



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**MECHANICKÁ KONSTRUKCE ELEKTROMAGNETICKÝCH
VENTILŮ V AUTOMOBILOVÉ OBLASTI**

MECHANICAL CONSTRUCTION OF ELECTROMAGNETIC VALVES IN AUTOMOTIVE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Sušovský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Martin Sušovský**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

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 bakalářské práce:

Mechanická konstrukce elektromagnetických ventilů v automobilové oblasti

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na elektromagnetické ventily jsou v automobilech kladeny velmi přísné požadavky. Zejména v systémech vstřikování paliva je třeba velmi rychlé časové odezvy ventilu. S klasickou konstrukcí solenoidového ventilu je dosažení rychlé časové odezvy nemožné.

Typ práce: rešeršně syntetická

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je zmapování mechanické konstrukce elektromagnetických ventilů zejména s ohledem na rychlou časovou odezvu ventilu.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- definovat oblast využití elektromagnetických ventilů v automobilech,
- rozdělit elektromagnetické ventily podle konstrukce,
- stanovit technická řešení vedoucí k rychlé odezvě elektromagnetického ventilu.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam doporučené literatury:

DRAXLER, Waldemar, Thomas CHRISTMANN a Horst BOEDER. Weakly-Magnetic Sintered Composite-Material and Method for Production Thereof. USA. US 6,726,740 B1. Uděleno Apr.27,2004.

ROEMER, Daniel, Michael BECH, Per JOHANSEN a Henrik PEDERSEN. Optimum Design of a Moving Coil Actuator for Fast-Switching Valves in Digital Hydraulic Pumps and Motors. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics [online]. 2015, 20(6), 2761-2770 [cit. 2016-11-07]. DOI: 10.1109/TMECH.2015.2410994. ISSN 1083-4435. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7084166/>

PARK, Chang-Dae, Byung-Ju LIM a Kyung-Yul CHUNG. Design verification methodology for a solenoid valve for industrial applications. Journal of Mechanical Science and Technology [online]. 2015, 29(2), 677-686 [cit. 2016-11-07]. DOI: 10.1007/s12206-015-0127-9. ISSN 1738-494x. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s12206-015-0127-9>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce přináší komplexní pohled na elektromagnetické ventily v osobních automobilech. Poskytuje bližší informace o jejich funkcích a činnostech v rámci důležitých částí automobilů. Práce je zaměřená především na užití elektromagnetických ventilů ve vstřikovacích systémech, jako je např. vysokotlaký common-rail systém od firmy BOSCH u dieselových motorů. Hlavní část práce se pak soustředí na možné technické řešení vedoucí k získání rychlejší časové odezvy, a tím i zlepšení výkonu ventilu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektromagnetické ventily, solenoidy, vstřikování, časová odezva.

ABSTRACT

The bachelor thesis brings complex view at electromagnetic valves used in automotive. Providing closer information about its function in important parts of car. This study is mostly focused on usage of the electromagnetic valves in an injection systems, like high pressure common-rail system used in diesel engine from BOSCH. Furthermore, in main part of the study, technical solutions, that lead to reduced response time, which results to improved performance of the valves, are investigated.

KEY WORDS

Electromagnetic valves, solenoids, injection, response time.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SUŠOVSKÝ, M. *Mechanická konstrukce elektromagnetických ventilů v automobilové oblasti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017, 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Mechanická konstrukce elektromagnetických ventilů v automobilové oblasti“ vypracoval samostatně s využitím pramenů a literatury, které jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne

Podpis

OBSAH

OBSAH	11
1 ÚVOD	12
2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	13
3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	14
3.1 Oblasti využití elektromagnetických ventilů v automobilech	14
3.1.1 U vstřikovacích systémů.....	14
3.1.2 U brzdných systémů	15
3.1.3 U tlumičů	16
3.1.4 U automatických převodovek	17
3.2 Rozdělení elektromagnetických ventilů dle konstrukce	17
3.2.1 Rozdělení elektromagnetických ventilů podle počtu cest	19
3.2.2 Přímé ovládané ventily	20
3.2.2 Nepřímé ovládané ventily	21
3.2.3 Proporcionální solenoidové ventily	21
3.3 Technická řešení vedoucí ke zlepšení časové odezvy	22
3.3.1 Design ventilů s pohonem pohybující cívkou	27
3.3.2 Volba materiálu	30
4 DISKUZE	36
5 ZÁVĚR	37
6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	38
7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN.....	42
8 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ.....	44
9 SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK	45

1 ÚVOD

Elektromagnetické ventily jsou speciálním typem ventilů, které převádějí elektrický signál, vyslaný z řídicí jednotky vozidla, na signál mechanický, tj. pohyb pístu. Činnost ventilů je řízená pomocí elektrického proudu, jenž se přivádí k duté cívce, umístěné uvnitř jejich těla. Tím se v cívce generuje magnetické pole, které, prostřednictvím své magnetické síly, pohybuje s pístem a ventil tak přechází mezi stavy otevřen/uzavřen. U složitějších typů, jako jsou například proporcionální či servo ventily, je možno regulováním hodnoty přiváděného elektrického proudu libovolně nastavovat výšku zdvihu pístu nad sedlem a tím přímo ovlivňovat množství kapaliny protékající ventilem.

Elektromagnetické ventily se v dnešní době staly nedílnou součástí moderních strojů a zařízení. Své uplatnění našly i v automobilové oblasti, kde pronikly do mnoha odvětví, a při jízdě vozidlem svou činností přispívají k pohodlí a bezpečnosti celé posádky. Jejich značnou výhodou oproti klasickým mechanickým ventilům je to, že navzdory svým malým rozměrům mohou pracovat s vysokými tlaky. Další velmi důležitou vlastností je rychlost jejich časové odezvy. Ta je klíčovým faktorem například u brzdných systémů, jako je ABS, či u vstřikovacích systémů paliva, jakým je systém common-rail od firmy BOSCH, kde jsou elektromagnetické ventily důležitými prvky.

S cílem vylepšit tento důležitý parametr, byly během posledních let a stále jsou vypracovávány výzkumy, které zkoumají jednotlivé vlastnosti ventilů a to jak jejich změny ovlivňují rychlost časové odezvy.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2

Nejdůležitější vlastností elektromagnetických ventilů je jejich rychlost odezvy, tj. jak rychle po dodání elektrického napětí do cívky uvnitř těla ventilu, je ventil schopen vykonat požadovaný úkon, ať už se jedná o přechod do otevřeného či uzavřeného stavu. Například, aby se u motoru dosáhlo co nejefektivnějšího provozu, musí být jejich odezva, v porovnání s cyklem pístu ve válci, velmi malá. U ventilu umístěných u rychle rotujících součástí, například 1000 až 3000 otáček za minutu, je požadován čas jejich přepnutí v rámci milisekund. Přepínací rychlost ventilu je tudíž rozhodujícím kritériem při určování jeho výkonu. Pohon ventilu zajišťující pohyb pístu musí být tedy adekvátně rychlý. To staví jasné požadavky pro konstrukční řešení ventilů a jejich elektromagnetických částí [1].

Optimálních vlastností ventilů pro požadovanou časovou odezvu lze docílit několika způsoby. Odlišné přístupy, jak jich dosáhnout, jsou prezentovány ve studiích, které ukazují vliv: a) geometrie a vlastnosti solenoidů [2, 3], b) konfigurace elektrických obvodů, které přivádějí elektrický proud k cívce [4], či c) použitých materiálů s různými magnetickými vlastnostmi [2, 5]. U prvních dvou výše zmíněných metod spočívá hlavní myšlenka ve snaze získat optimální elektromagnetickou sílu, jenž dokáže, při přívodu minimálního elektrického proudu k cívce, dostatečně rychle zvednou píst ventilu a dosáhnout tak nejmenší možné časové odezvy.

Cílem této práce je zmapování mechanické konstrukce elektromagnetických ventilů zejména s ohledem na rychlou časovou odezvu ventilu.

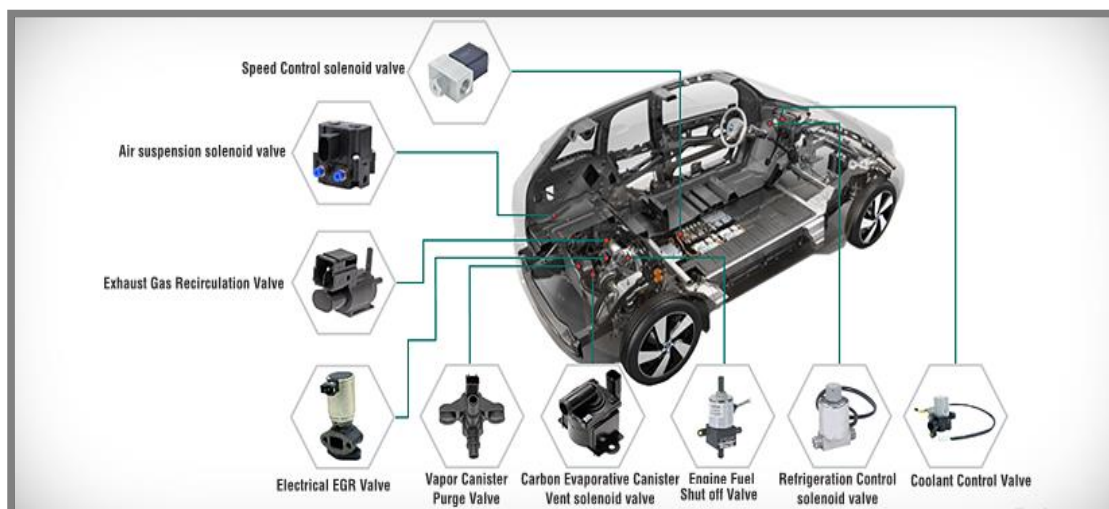
Dílčí cíle bakalářské práce jsou:

- Definovat oblast využití elektromagnetických ventilů v automobilech
- Rozdělit elektromagnetické ventily podle konstrukce
- Stanovit technická řešení vedoucí k rychlé odezvě elektromagnetického ventilu

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

3.1 Oblasti využití elektromagnetických ventilů v automobilech

V současném automobilovém a dopravním průmyslu mají elektromagnetické ventily širokou škálu uplatnění. Na Obr. 1 je ukázáno, kde všude solenoidové ventily pronikly a jak důležitými prvky vozidel dnes jsou. Tato práce se soustředí na využití ventilů u vstřikovacích systému, např. common-rail, brzdných systému, jako je ABS, či tlumičů CDC od firmy ZF nebo EDC tlumičů vyvinutých firmou BMW.



Obr. 3-1 Příklady užití elektromagnetických ventilů v osobním automobilu. [6]

3.1.1 U vstřikovacích systémů

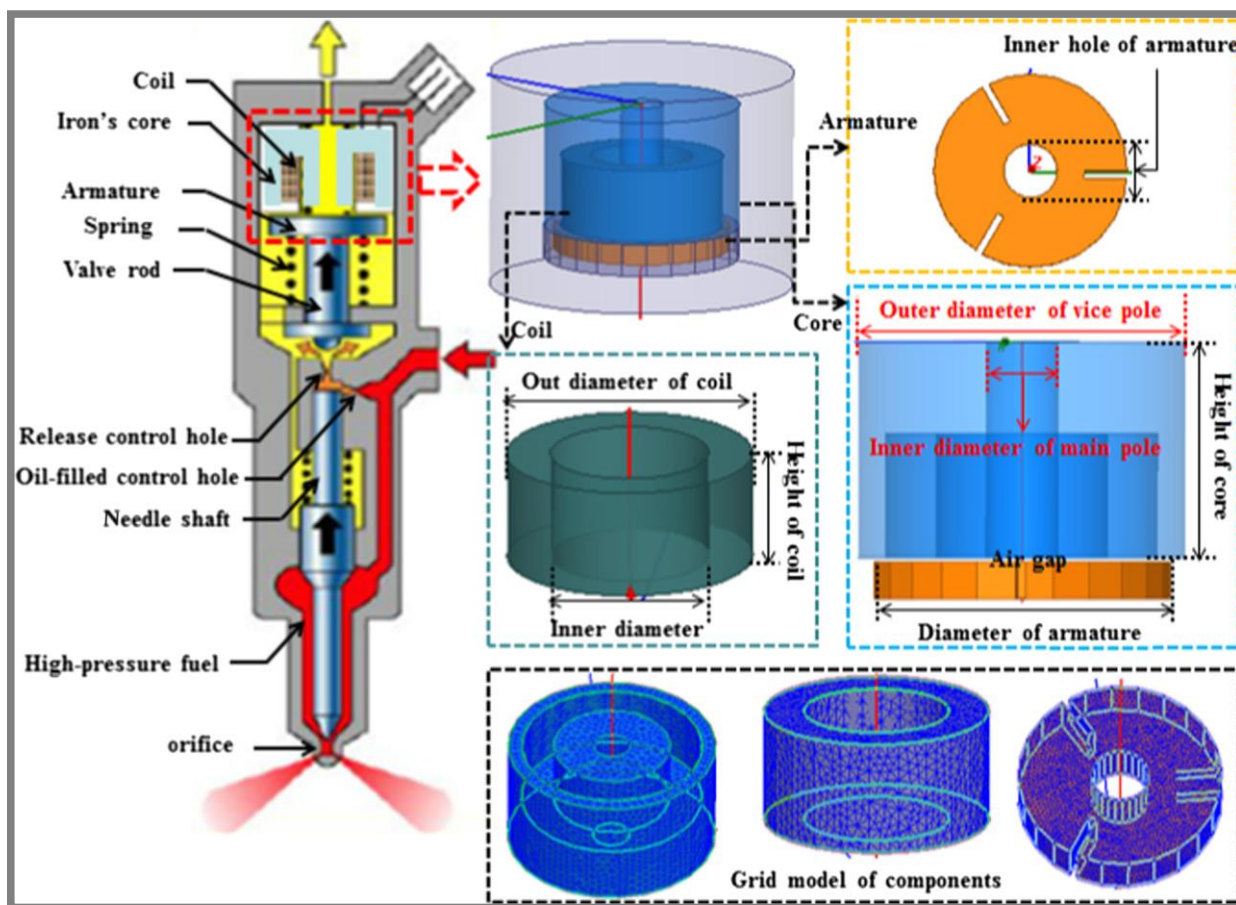
Do vstřikovacích systému se elektromagnetické ventily dostaly na počátku devadesátých let, kdy je firma BOSCH použila při vývoji dvou odlišných systému pro vstřikování paliva. Prvním byla elektronicky řízená vstřikovací jednotka s čerpadly pro jednotlivé válce. Druhým byl common-rail systém s vysokotlakým čerpadlem. [7]

3.1.1.1 Common-rail systém

Elektricky ovládané vstřikovací systémy se u dieselových motorů staly vývojovým trendem díky během let se zpřísňujícím bezpečnostním a emisním normám. Jako vhodné řešení, pro splnění těchto norem, se ve většině případů volí vysokotlaký common-rail systém, který umožňuje flexibilní kontrolu jak nad tlakem při vstřikování paliva, tak nad množstvím paliva a jeho rychlostí. Tímto lze dosáhnout pozitivního ovlivnění spalovacího procesu, a také zlepšení výkonu motoru. Čímž se u motoru sníží emise a učiní se ekologicky přátelštějším.

Jako prvky, který řídí činnost vstřikovačů, se v současnosti běžně užívají vysokorychlostní solenoidové ventily (HSV – high-speed solenoid valves), princip jejich funkce je na znázorněn na Obr 2. Tento typ ventilů má, oproti jiným ventilům, výhody v rychlosti časové odezvy, velikosti magnetické síly a dlouhodobé životnosti. [8] Výkon těchto HSV přímo ovlivňuje preciznost funkce common-rail systému a má tak výrazný vliv na účinnost spalovacích motorů. I v dnešní době jsou stále

prováděny výzkumy s cílem pozměnit parametry HSV a dosáhnout tak jejich nejlepšího výkonu. [9]



Obr. 3-2 Zjednodušený model vstřikovače z common-rail systému a model solenoidového ventilu. [9]

Různé studie, zabývající se ideálním návrhem solenoidových ventilů pro vstřikovací systémy, zaujímají odlišné postoje, jak dosáhnout co nejlepších výsledků. Avšak samotná konstrukce HSV má významný vliv na urychlení časové odezvy ventilů [10]. Jejich přístupy, skrze které se snaží docílit požadovaných parametrů, lze rozdělit do tří hlavních kategorií:

- Změnou geometrie solenoidů
- Vliv velikosti přiváděného proudu
- Použitím magneticky měkkých materiálů

3.1.2 U brzdných systémů

3.1.2

3.1.2.1 Systém ABS

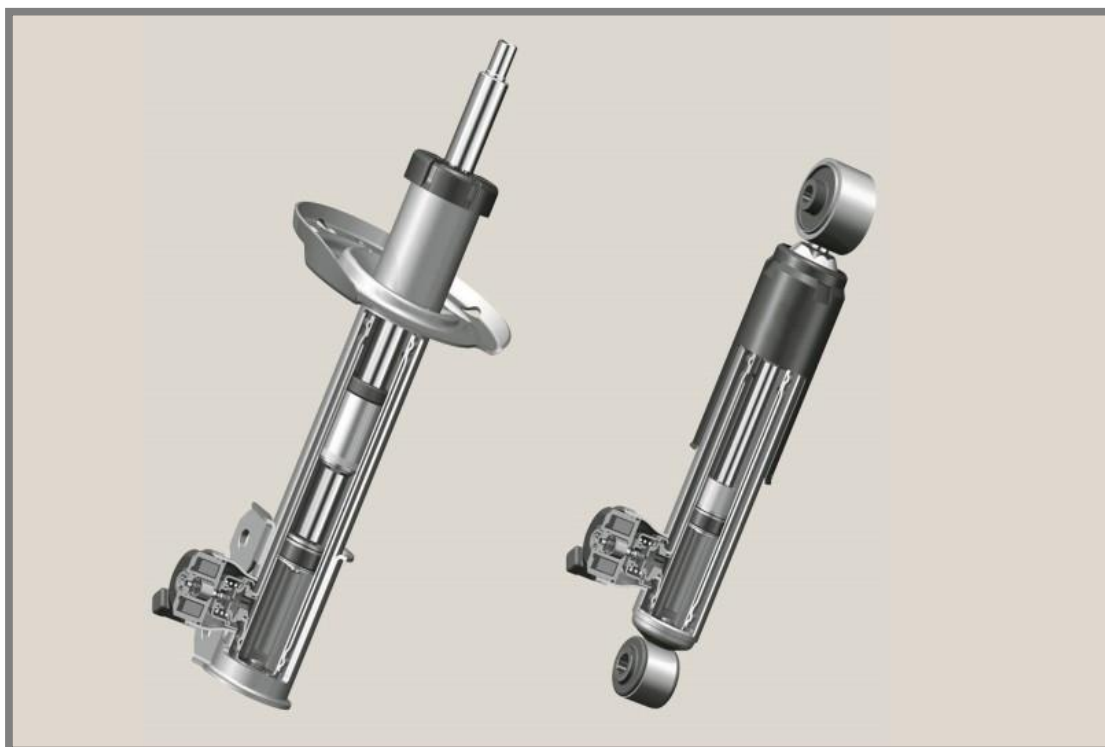
ABS (Anti-lock brake system), které se v dnešní době nachází ve standardní výbavě většiny vozidel, je vylepšená forma klasických brzd. ABS je navrženo tak, aby kontrolovalo, že nedochází k prokluzování jednoho či více kol při náhlém brždění, brždění na mokrému nebo kluzkém povrchu. Nastane-li tato situace, ABS přes řídicí jednotku vyšle elektrický signál do solenoidových ventilů v hydraulické části brzd.

Tímto je omezen hydraulický tlak v brzdách, čímž se zamezí případnému zaseknutí kol a následnému smyku. Když ovlivněné kolo přestane prokluzovat, je hydraulický tlak znovu aplikován. Tento cyklus se při brždění provede několikrát během vteřiny. Díky tomu vozidlo zůstává během krizových situací stabilní a pod úplnou kontrolou řidiče. V dnešní době, kdy se vývoj nových technologií soustředí především na úsporu energie a zlepšení bezpečnostních prvků, se upírá stále větší pozornost k elektricky poháněným či hybridním vozidlům. Především díky jejich menším emisím a vyšší účinnosti oproti vozidlům se spalovacím motorem. U těchto automobilů však není možné použití konvenčních brzd, a tak se využívají elektricky ovládané hydraulické pumpy. V těch se nachází solenoidový ventil, který při brždění poskytuje vysoký tlak brzdovým kotoučům. Solenoidový ventil pracuje s velmi vysokými tlaky dosahujícími až 200 bar s úzkou mezerou pro brzdovou kapalinu, pohybující se od pár jednotek až po desítky mikrometrů (záleží na brzdném zatížení). [11]

3.1.3 U tlumičů

3.1.3.1 CDC systém

U systému CDC (Continuous Damping Control) od firmy ZF se používají proporcionální ventily, což jsou speciální typy elektromagnetických ventilů. Tyto ventily jsou ovládaný pomocí řídicí jednotky, která dostává data od senzorů ve vozidle, jenž snímají vnější faktory (např. rychlost jízdy, podmínky na vozovce, váhu vozidla atd.). Řídicí jednotka poté určí, jaké optimální tlumení je vyžadováno pro jednotlivá kola a v rámci milisekund skrze proporcionální ventily upravuje tlumicí sílu, kterou jsou kola nezávisle na sobě ovlivněna. Tímto se dosáhne většího pohodlí během jízdy a skrze lepší kontakt pneumatik s vozovkou i kratší brzdné dráhy. [12]



Obr. 3-3 Ukázka CDC tlumičů s proporcionálními ventily od firmy ZF. [13]

3.1.3.2 EDC systém

Stejný typ elektromagnetických ventilů se používá i u systému EDC (Electronic Damper Control) od firmy BMW, který jednotlivě ovládá každý tlumič v závislosti na jízdních podmínkách. Senzory neustále snímají faktory ovlivňující chování vozidla a signály předávají EDC mikroprocesorům. Tam jsou během zlomku vteřiny analyzovány a následně vyhodnocené příkazy jsou poslány k regulátorům, které s pomocí elektromagnetických ventilů proměnlivě přizpůsobují tlumiče k dosažení ideálního odpružení. Díky EDC systému je zkrácena brzdná dráha při náhlém brždění a vliv výmolů či nerovností na silnici je redukován na minimum. [14]

3.1.4 U automatických převodovek

3.1.4

Automatická převodovka je jednou z nejsložitějších a nejkomplexnějších částí, které jsou v osobních automobilech k nalezení. Obsahují mechanické systémy, hydraulické systémy, elektrické systémy a počítačovou kontrolu, které se společně podílejí na precizním řazení tak, aby se otáčky motoru nacházely v optimálním rozsahu, ve kterém má motor nejlepší výkon. Řídící jednotka užitím senzorů, nacházejících se u motoru a v samotné převodovce, shromažďuje data, jako např. rychlost vozidla, otáčky motoru atd. Jakmile tyto data obdrží, posílá elektrický signál do proporčních solenoidových ventilů nacházejících se v převodovce, které jej transformují na mechanický pohyb. Ventily slouží jako ovládací prvek v systému převodovky a starají se o usměrňování toku kapaliny či o upravení tlaku a množství proudící kapaliny, aby byl zajištěn plynulý chod převodovky. [15]

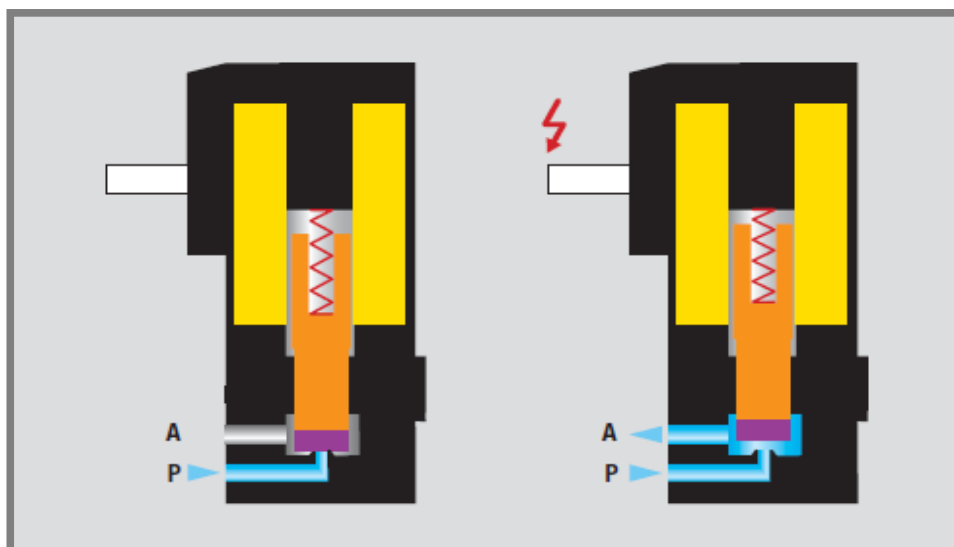
3.2 Rozdělení elektromagnetických ventilů dle konstrukce

3.2

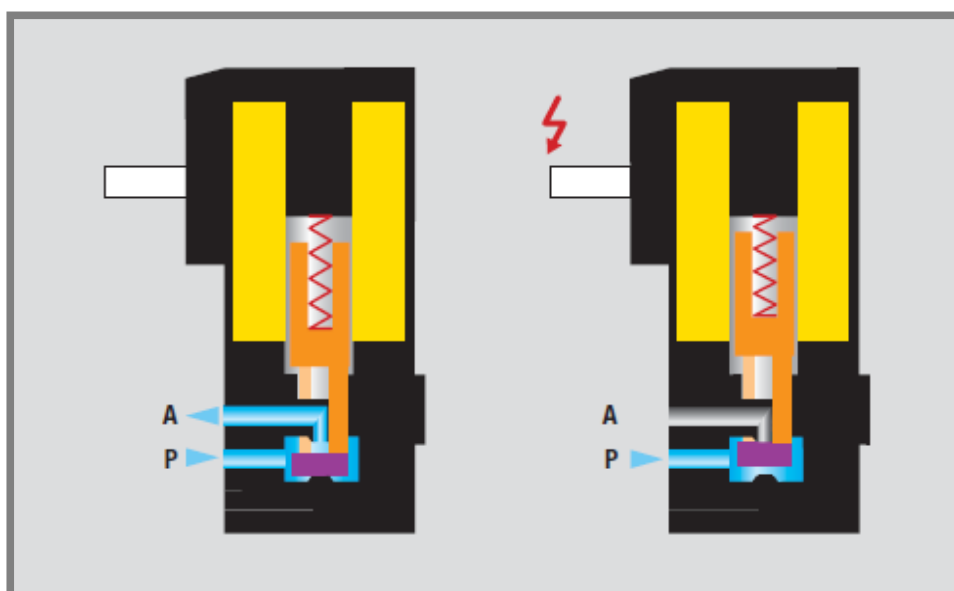
Většina elektromagnetických ventilů funguje na digitálním principu. To znamená, že mají dva základní stavy, ve kterých se mohou nacházet. První nastane, je-li do cívky přiveden elektrický proud a tím v cívce započne indukce magnetického pole. Druhý stav je tehdy, pokud není do ventilu přiveden elektrický proud a ventil je uzavřen, nachází se tedy v klidové poloze.

Základní rozdělení solenoidových ventilů může být dle dvou výchozích stavů:

- a) Normálně uzavřen: ventil je normálně uzavřen, pokud nedochází k průtoku ventilem v jeho klidové pozici a není k němu přiveden elektrický proud.
- b) Normálně otevřen: ventil je normálně otevřen, pokud je umožněn průtok ventilem v jeho klidové pozici a není k němu přiveden elektrický proud.



Obr. 3-4 Příklad normálně uzavřeného dvoucestného ventilu. [16]



Obr. 3-5 Příklad normálně otevřeného dvoucestného ventilu. [16]

3.2.1 Rozdělení elektromagnetických ventilů podle počtu cest

Solenoidové ventily lze dle počtu cest (přítoky a výtoky), kterými se vede příslušná tekutina, rozdělit na dvoucestné, trojcestné a vícecestné.

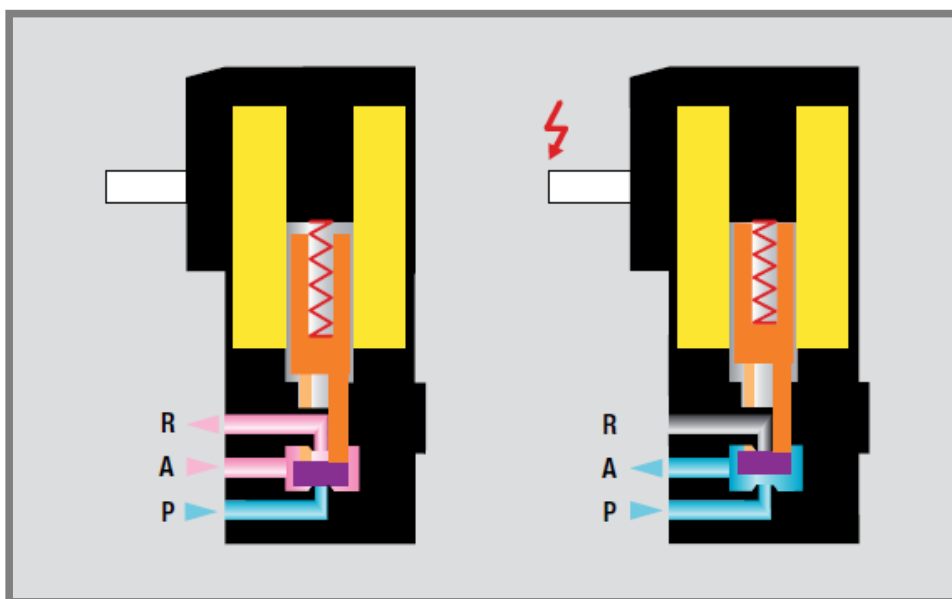
3.2.1.1 Dvoucestné ventily

Jedná se o nejjednodušší provedení elektromagnetických ventilů se dvěma cestami (jeden přítok, jeden výtok) a jen jedním otvorem kontrolujícím průtok kapaliny ventilem. Mohou tedy být použity jen v případě, je-li třeba přecházet pouze mezi stavy otevřen/uzavřen. [17]

3.2.1.2 Trojcestné ventily

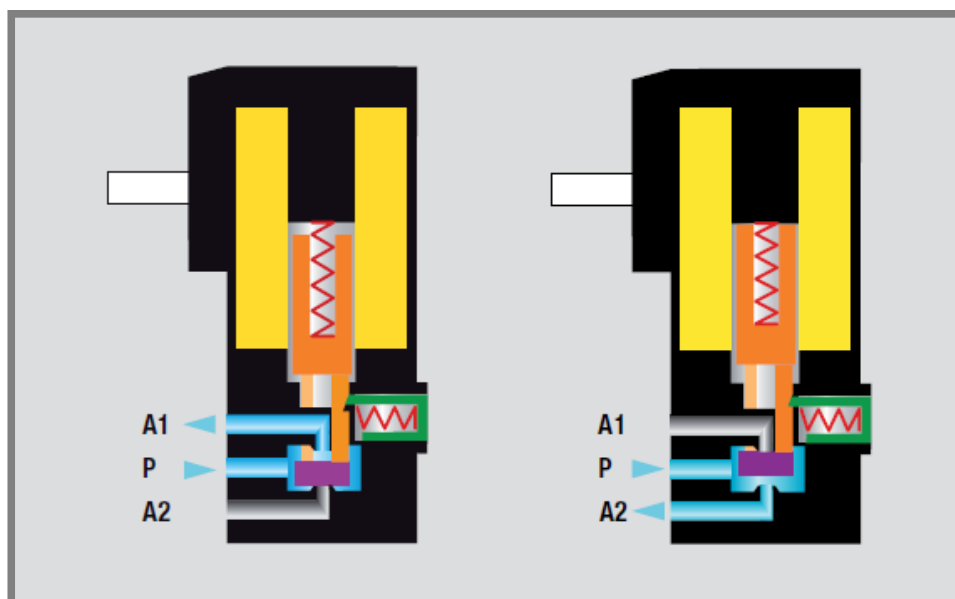
Tyto solenoidové ventily využívají tři cesty, jejichž funkce se mohou lišit podle oblasti aplikace ventilu. Mohou nastat 3 různé situace:

- 1) V klidové pozici, není-li do cívky přiveden elektrický proud, většina základních trojcestných ventilů využívá jeden port jako přítok (P), druhý jako výtok (A) a poslední má funkci výfuku (R). Po přivedení proudu do cívky se ventil otevře a umožní proudění kapaliny z přítoku (P) skrze výtok (A), zároveň se tím uzavře výfuk (R). Využití toho typu je např. u provozování jednoho samostatného válce. [16,17]



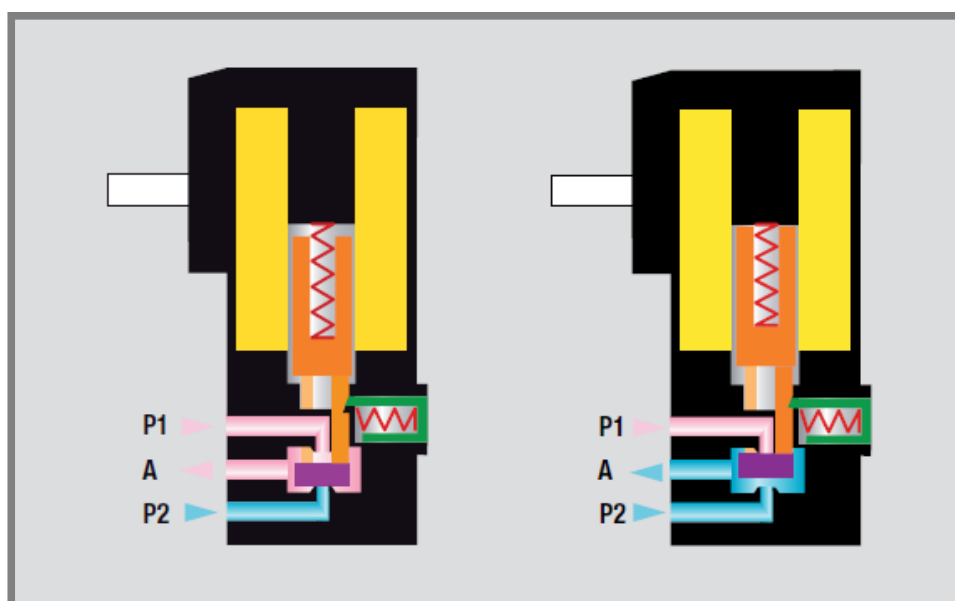
Obr. 3-6 Trojcestný ventil s jedním přítokem (P), výtokem (A) a výfukem (R). [16]

- 2) Jeden port sloužící jako přítoky (P) a zbylé dva jako výtoky (A1, A2). Aplikace takového ventilu může být, je-li třeba usměrňovat tok tekutiny střídavě do jednoho či druhého výtoku.



Obr. 3-7 Trojcestný ventil s jedním přítokem (P) a dvěma výtoky. [16]

- 3) Poslední kombinací jsou 2 přívody a jeden vývod, které jsou použity za účelem smíchání dvou tekutin.

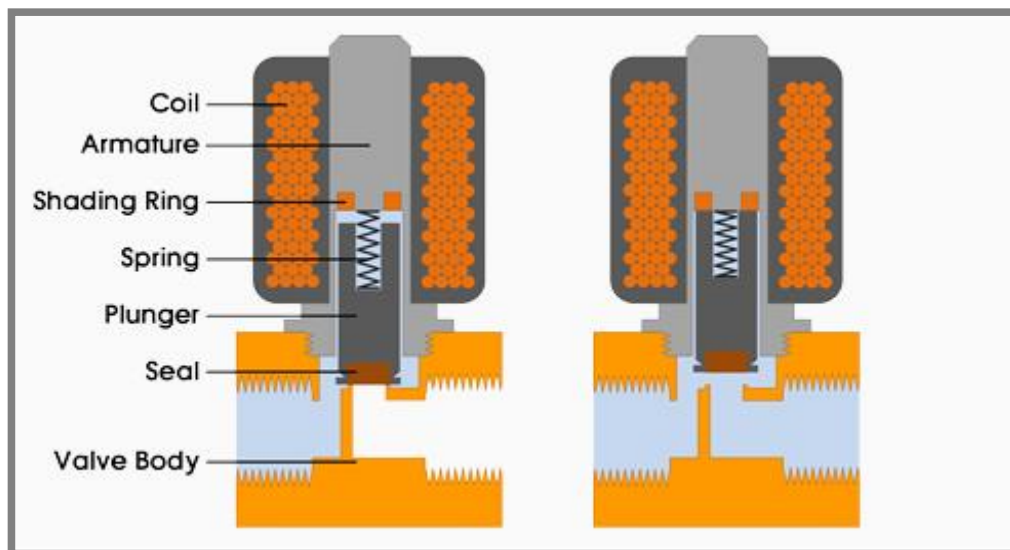


Obr. 3-8 Trojcestný ventil se dvěma přítoky (P1, P2) a jedním výtokem. [16]

3.2.2 Přímé ovládané ventily

Tento typ ventilů má nejjednodušší pracovní princip a jeho funkcí je přecházet mezi stavy uzavřen/otevře jen pomocí síly elektromagnetu. U přímo ovládaných ventilů, s výchozím stavem normálně uzavřen, je píst, uzavírající otvor pro proudění tekutiny, držen v uzavřené pozici díky malé pružince. Jakmile je do cívky přivedeno napětí, indukuje se elektromagnetické pole, které svou silou překoná sílu pružinky a píst je vytažen vzhůru. Tím se otvor otevře a je umožněn průtok tekutiny. Normálně otevřené ventily pracují opačným způsobem. Maximální provozní tlak a průtok jsou

přímo závislé na průměru otvoru a síle elektromagnetu ve ventilu. Přímo ovládané ventily nevyžadují žádný minimální tlak nebo rozdíl tlaků a mohou být tedy použity u aplikací od 0 bary až do maximálního povoleného tlaku [17].



Obr. 3-9 Princip činnosti přímo ovládaného dvoucestného, normálně uzavřeného ventilu. [18]

3.2.2

3.2.2 Nepřímo ovládané ventily

Nepřímo ovládané ventily pro svou činnost využívají rozdílných tlaků (minimální rozdíl musí být alespoň 0,5 bar) v přítokové části ventilu s tekutinou a v prostoru výtoku, který je při uzavřeném stavu ventilu vyplněn vzduchem. Tyto dva prostory jsou odděleny gumovou membránou, ve které je malý otvor pro průchod tekutiny do horní komory nad membránou. Tlak tekutiny spolu s pružinou nad membránou zajišťují uzavření ventilu. Když je přivedeno napětí do cívky, vzniklou elektromagnetickou silou je zvednut píst, uzavírající malý kanálek spojující prostor vývodu ventilu s horní komorou nad membránou. Tímto se tekutina dostane do vývodu ventilu, čímž dojde k poklesu tlaku tekutiny působícího na membránu a k jejímu následnému zdvihu. Ventil se díky tomu otevře a je umožněn průtok. Hlavní výhodou nepřímo ovládaných ventilů je zmenšení energetických nároků oproti přímo ovládaným ventilům [18,19].

3.2.3

3.2.3 Proporcionální solenoidové ventily

Proporcionální ventily jsou speciálním typem ventilů, které poskytují nekonečné polohování výšky zdvihu pístu a tím i přesné a variabilní řízení. Díky tomu může být docíleno libovolného průtokového objemu. Tento druh ventilů s variabilním polohováním umožňuje kontrolu, jak nad rychlostí proudící kapaliny, tak nad směrovým řízením. Nejsou tedy vyžadovány dva rozličné ventily pro rozdílné funkce. Další významnou předností těchto ventilů je možnost dosažení různých průtokových rychlostí. Potřebné rozličné průtokové rychlosti u některých obvodů jsou zajištěny pouhou změnou přiváděného elektrického signálu k ventilu. Dle velikosti aplikovaného elektrického proudu se indukují příslušná elektromagnetická síla působící proti síle pružiny a výsledná poloha pístu je udržována, dokud nedojde ke zvýšení či snížení elektrického proudu. [20]

3.3 Technická řešení vedoucí ke zlepšení časové odezvy

Lan Wang se spolu s kolegy ve své práci [9] zaměřil na vliv charakteristických parametrů na magnetické vlastnosti solenoidových ventilů užívaných vysokotlakými common-rail systémy u dieselových motorů s cílem zvětšit elektromagnetickou sílu a optimalizovat časovou odezvu. Nejprve při této studii stanovil níže popsany matematický model ventilu pomocí základních Maxwellových rovnic pro 3D statické magnetické pole:

$$\nabla * H(x, y, z) = J(x, y, z) \quad (1)$$

$$\nabla * B(x, y, z) = 0 \quad (2)$$

Kde je:

H	A/m	intenzita magnetického pole
J	A/m ²	hustota elektrického proudu
B	T	magnetická indukce

Dále může být kinematická rovnice zapsána pomocí Newtonovy rovnice dynamické rovnováhy. Pohybující se části ventilů jsou při daném výzkumu primárně zatíženy elektromagnetickou silou, silou od pružiny, třecí silou, hydraulickou silou od protékajícího paliva a jejich tíhou, ve vztahu:

$$m * \frac{d^2x(t)}{dt^2} = F_m(t) - F_{pre}(t) - b_t * \frac{dx(t)}{dt} - F_s(t) - m * g \quad (3)$$

Kde je:

m	kg	hmotnost
x	m	souřadnice posunu armatury
F _m (t)	N	elektromagnetická síla
F _{pre} (t)	N	hydraulická síla
b _t	N*s/m	koefficient tlumení
g	m/s ²	tíhové zrychlení

Popis elektrického chování solenoidového ventilu je realizován skrze Kirchhoffovy rovnice rovnováhy [21]:

$$U(t) - N \frac{d\phi(t)}{dt} - R * i(t) = 0 \quad (4)$$

Kde je:

U(t)	V	napětí zdroje
N	-	počet závitů cívky
Φ	Wb	magnetický tok skrze jednotlivé závity
R	Ω	odpor solenoidové cívky
i	A	elektrický proud

Z energetické konverzní rovnice je možno získat energetickou rovnici magnetického obvodu:

$$U(t)i(t)dt = R * i^2(t)dt + F_m(t)dx + dU_m \quad (5)$$

Kde je:

$U(t)i(t)$	W	příkon
R	Ω	odpor solenoidové cívky
i	A	elektrický proud
$F_m(t)dx$	J	mechanické práce od elektromagnetické síly
dU_m	J	změna magnetické energie soustavy

Elektromagnetická síla $F_m(t)$ může být odvozena výpočtem, provedeným ze zaznamenaných časových průběhů proudu a napětí.

$$F_m(t) = \frac{\phi(t)^2}{S * \mu_0} = \frac{B^2 * S}{\mu_0} \quad (6)$$

Je-li B magnetická indukce a $\phi(t)$ je pro magnetický tok, který je funkcí proudu $i(t)$ a změny polohy armatury Δx , pak rovnice platící pro magnetickou sílu může být zapsána v tomto tvaru:

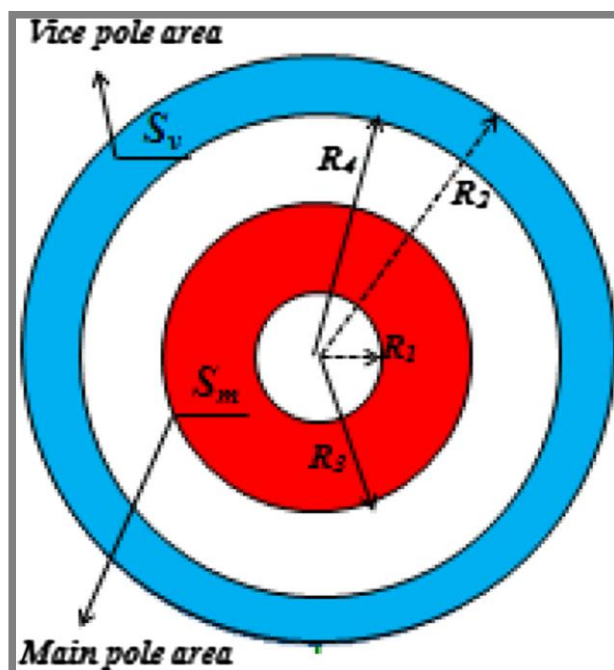
$$F_m(t) = \frac{(NI)^2 * S * \mu_0}{4 * (\Delta x)^2} \quad (7)$$

Kde

NI	A	ampér-závit
μ_0	N/A ²	magnetická permeabilita vzduchu
S	m ²	plocha průřezu magnetického jádra
Δx	m	změna polohy armatury.

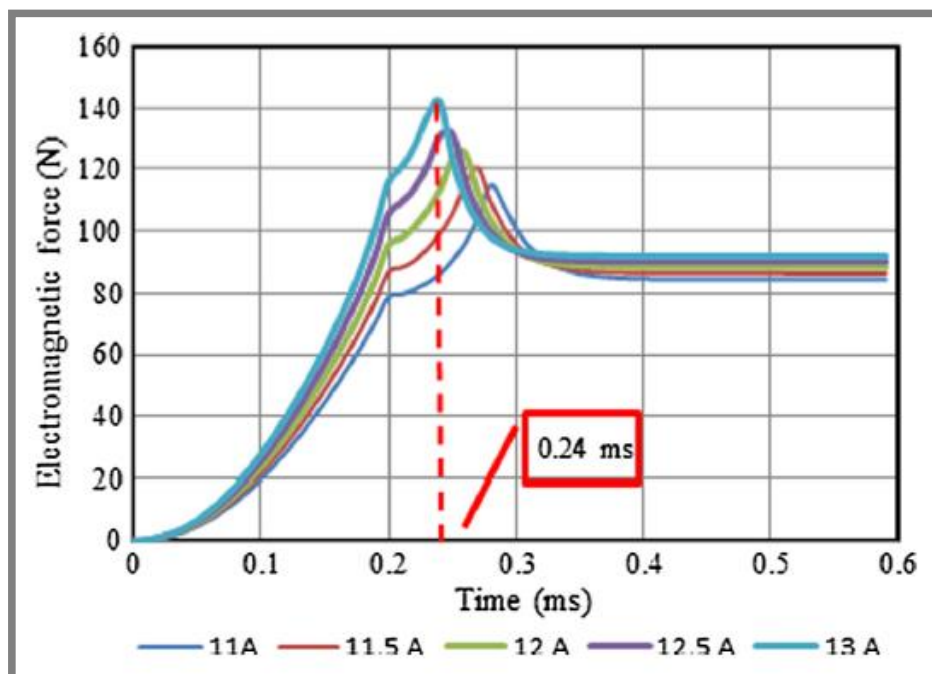
Zprv se z toho modelu skrze výpočty dosáhlo numerických výsledků, které ukazují, jaký vliv na magnetickou sílu F_e má příčný průřez jádra, jenž je znázorněné na Obr.3-10.

Změn ploch průřezů S_m a S_v je dosaženo rozličnými hodnotami vnitřního poloměru R_1 , respektive vnějšího poloměru R_2 . Různými kombinacemi těchto dvou parametrů se docílilo odlišných výsledků, přičemž optimální dvojicí lze získat až o 38,8 % vyšší F_e . Dále bylo také vypořizováno, že čím menší je rozdíl mezi plochami S_m a S_v , tím větší sílu F_e dostaneme.



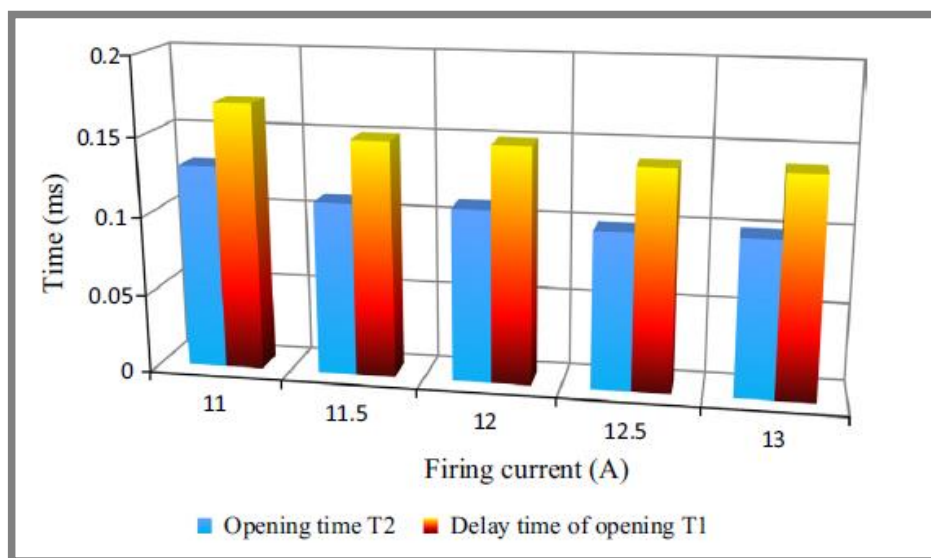
Obr. 3-10 Vertikální pohled na příčný průřez jádrem. [9]

Zadruhé je prezentován vliv řídicích parametrů, jako je řídicí proud a udržovací proud, na časovou odezvu ventilu (prodlevu před zahájením otevírání T_1 , dobu otevírání T_2 a dobu uzavírání T_3). Řídicí proud má přímý účinek na rychlost otevření ventilu, což je ukázáno na Obr.3-11.

Obr. 3-11 Křivky elektromagnetické síly F_e ventilu s různými firing current. [9]

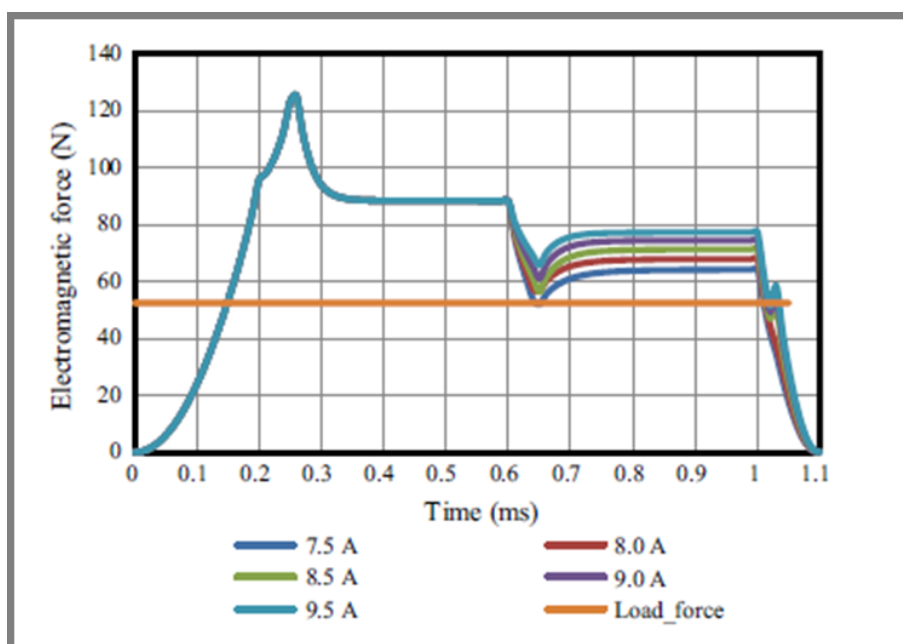
S jeho rostoucí velikostí, z 11 A na 13 A, se zvyšuje elektromagnetická síla, z 114 N na 142 N, a zároveň doba, za kterou nabyde svého vrcholu, poklesne z 0,28 ms na

0,24 ms. Avšak nabyde-li přílišné hodnoty, nebude mít nadále kladný dopad na časovou odezvu a začne docházet k nežádoucím jevům. Obr. 3-12 zobrazuje pokles T_1 , z 0,17 ms na 0,14 ms, a T_2 , z 0,13 ms na 0,1 ms, v závislosti na řídicím proudu, který se pohybuje v rozmezí 11 A až 13 A. Je možno vidět, že časy T_1 a T_2 jsou oba stejné při 12,5 A a 13 A. To je způsobeno počínající přeměnou přebývající energie na energii tepelnou, mající za důsledek energetické ztráty. Z tohoto vyplývá, že optimálně by měl řídicí proud nabývat hodnot 11,5 A či 12 A.

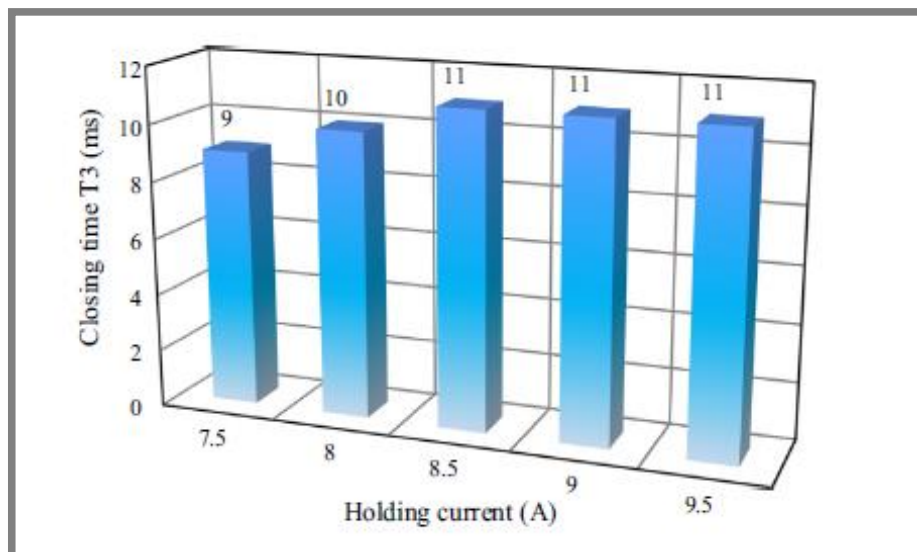


Obr. 3-12 Doba pohybu při otevírání ventilu pod různými řídicími proudy. [9]

Udržovací proud, jak je ukázáno na Obr.3-13, nemá efekt na otevírací fázi ventilu, ale jeho velikostí lze ovlivnit dobu uzavírání ventilu. Se zvyšujícím se udržovacím proudem narůstá doba, za kterou elektromagnetická síla překoná opačně působící sílu od pružiny a dojde k neprůchodnosti ventilu. Vzhledem k Obr. 3-14 bylo odvozeno, že hodnota udržovacího proudu by měla být 7,5 A.

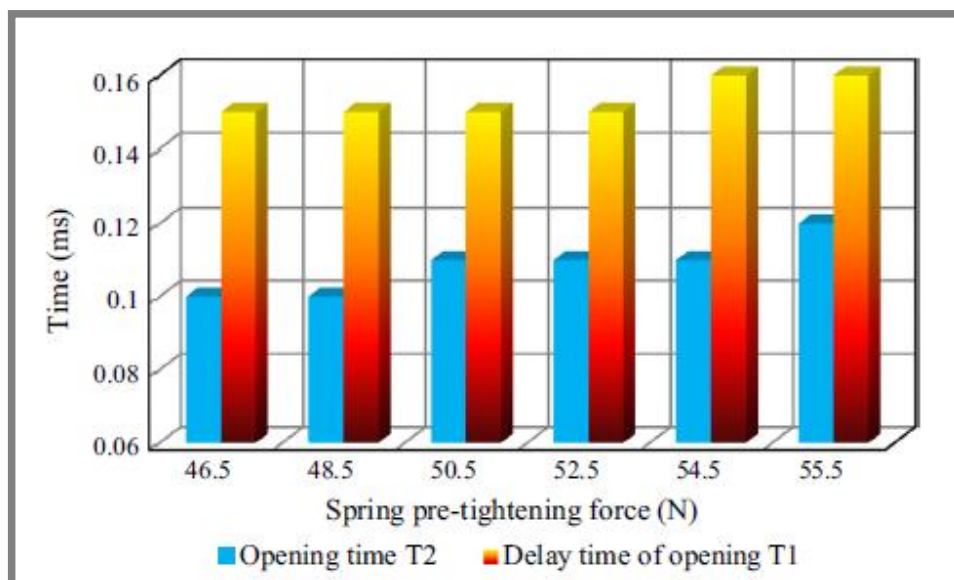


Obr. 3-13 Průběh F_e pod různými udržovacími proudy. [9]

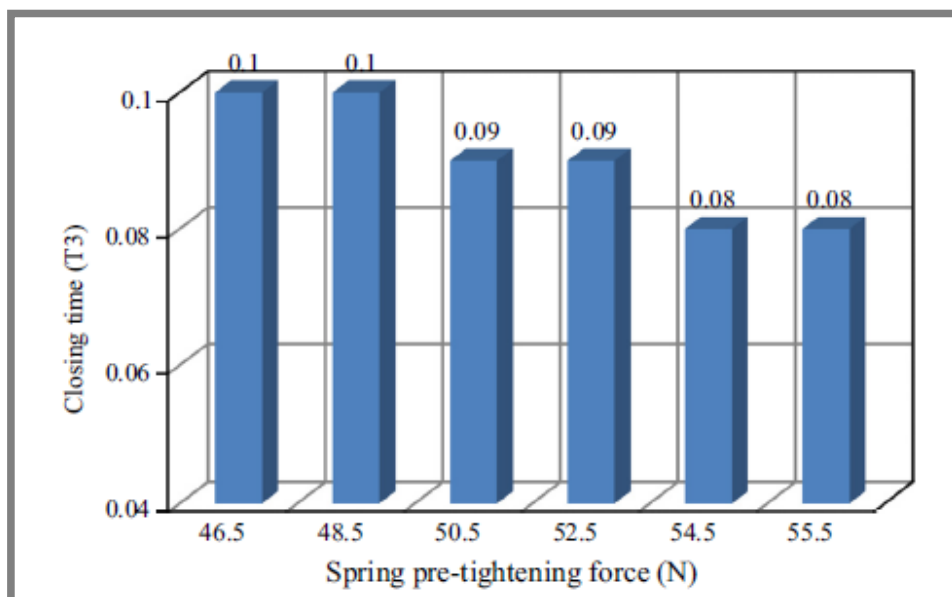


Obr. 3-14 Znázornění závislosti doby uzvírání na udržovacím proudu. [9]

Jako poslední je ve Wangově studii [9] popsán vliv vlastností pružiny, která svou silou od předpětí drží ventil uzavřen. Aby došlo k pohybu armatury a zprůchodnění ventilu, musí nejprve elektromagnetická síla F_e překonat proti-působící sílu, jenž zahrnuje předpětí pružiny. Čas, za který tak učiní, narůstá spolu se zvětšujícím se předpětím a má tudíž negativní dopad na otevírací fázi ventilu. Na druhou stranu má však pozitivní efekt na jeho uzavírání, které je urychleno. Na Obr. 8 jsou zobrazeny časy $T1$ a $T2$ v závislosti na změnách síle předpětí. Její vliv na uzavírací dobu je zachycen na Obr. 3-15.



Obr. 3-15 Znázornění závislosti otevíracích časů na velikosti předpětí pružiny. [9]



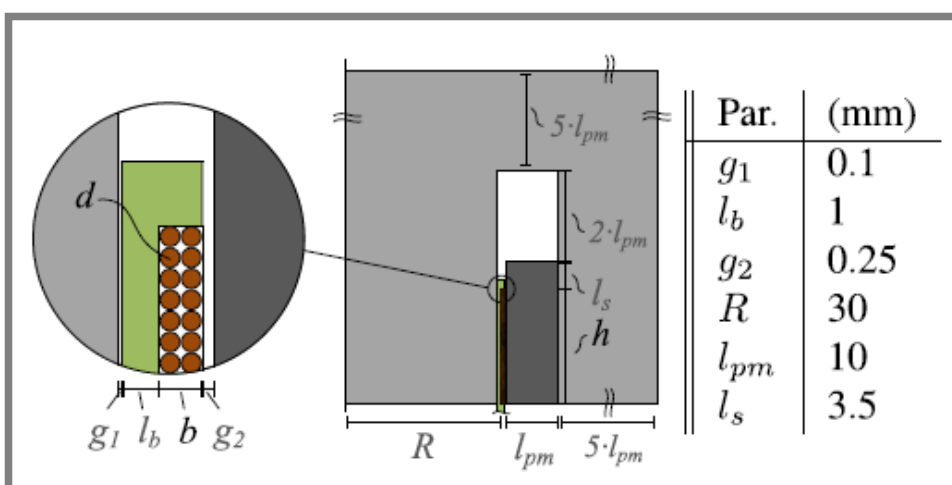
Obr. 3-16 Znáznornění závislosti uzavírací doby na velikosti předpětí pružiny. [9]

3.3.1 Design ventilů s pohonem pohybučím cívkou

3.3.1

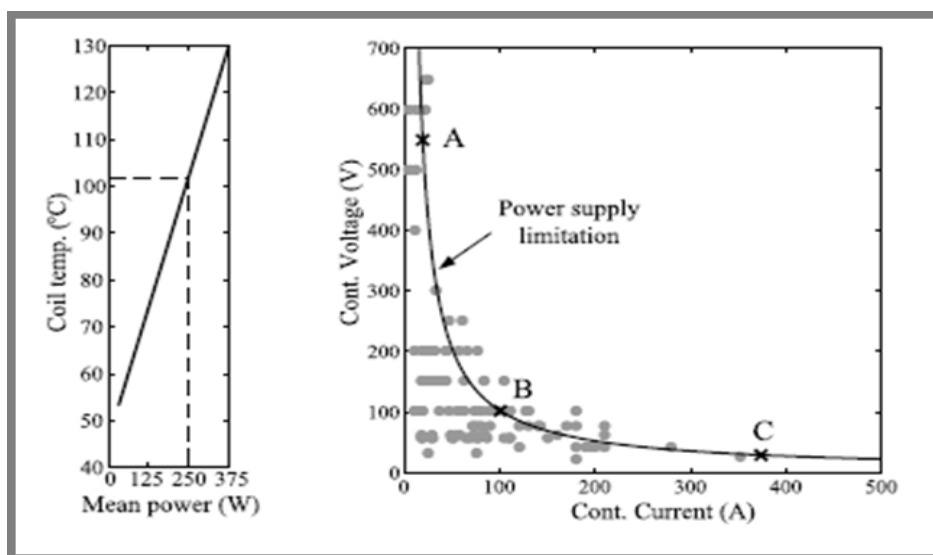
Design ventilů s pohybučím se cívkou je jednou z možností, jak konstrukčními změnami dosáhnout zlepšené časové odezvy elektromagnetických ventilů. Jednou z výhod, které tento přístup přináší, je, že odstraňuje zpoždění, nastávající u klasických pohonů ventilů, které je způsobeno přítomností vířivých proudů [22].

V práci [1] se autoři zabývali optimalizací spojené přechodné geometrie pohonu pohybučím cívkou u rychle spínacích ventilů. Požadované optimalizace probíhaly pomocí analýzy konečných prvků, která zohledňuje všechny významné dynamické a geometrické parametry tohoto pohonu. Ve vytvořeném modelu identifikovali tři proměnné, průměr drátu d , šířku cívky b a výšku cívky h , jenž definují geometrii pohonu. Na Obr.3-17 lze vidět danou geometrii spolu s tabulkou pevně daných vstupních parametrů.

Obr. 3-17 Geometrie pohonu se třemi proměnnými (d , b , h) a tabulkou parametrů. [1]

Cílem prvního kroku prováděné optimalizace je nalezení nejvhodnější konfigurace třech výše zmíněných proměnných tak, aby bylo dosaženo minimální doby sepnutí ventilu. Tím se rozumí doba (T_s) mezi přivedením elektrického proudu a dosažením úplného otevření ventilu.

V druhém kroku je potřeba zvolit vhodný zdroj napájení pohonu, který bude poskytovat maximální napětí a proud cívce. Vyšší hodnoty poměru těchto dvou veličin způsobí nárůst elektromagnetické síly, jenž uvádí píst ventilu do pohybu, a zároveň zkrátí dobu, za kterou se tak stane. Výkonnější zdroje jsou tedy upřednostňovány pro snížení časové odezvy, avšak při připojení zdrojů s vysokým poměrem proudu k napětí se cívka zahřívá a dochází tak k nadměrným tepelným ztrátám. To vede ke stanovení maximální povolené teploty cívky. Vzhledem k této skutečnosti autoři ve své práci určili jako maximální teplotu, které může cívka dosáhnout, 100°C. Tímto je omezen výběr zdroje napájení pohonu a jeho limitní poměr proudu ku napětí, jež vyjadřuje černá křivka na Obr.3-18 v pravém grafu. Pro zjištění vlivu poměru proudu k napětí na výkon ventilu byly vybrány tři referenční zdroje, na Obr.3-18 znázorněny body A, B, C a se svými parametry zapsány v Tab.3-1.

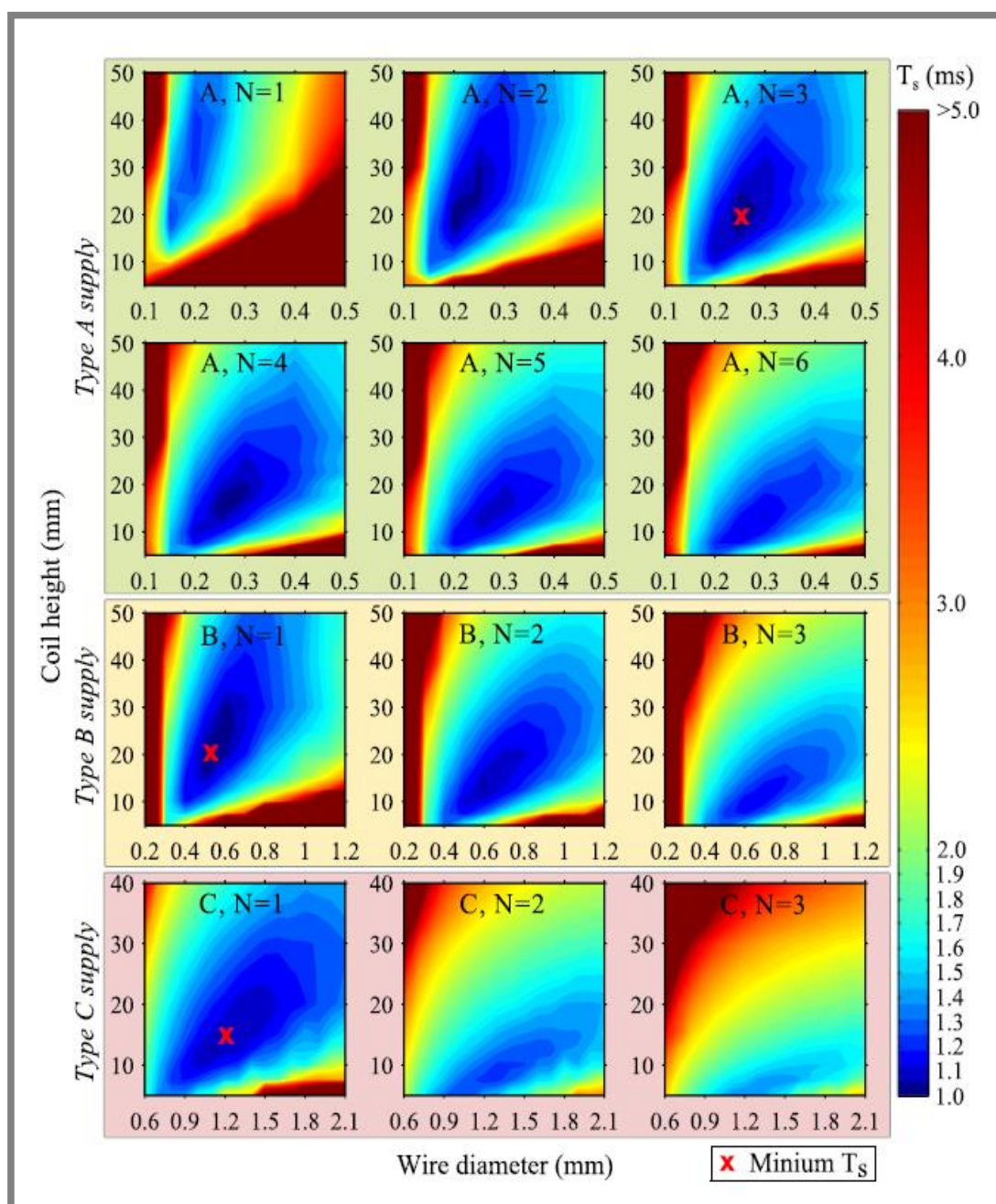


Obr. 3-18 Levá část: Teplota cívky zobrazena jako funkce středního výkonu
Pravá část: Zvolené referenční zdroje podle poměru proudu ku napětí. [1]

Tab. 3-1 Zvolené zdroje pro optimalizaci se svými parametry. [1]

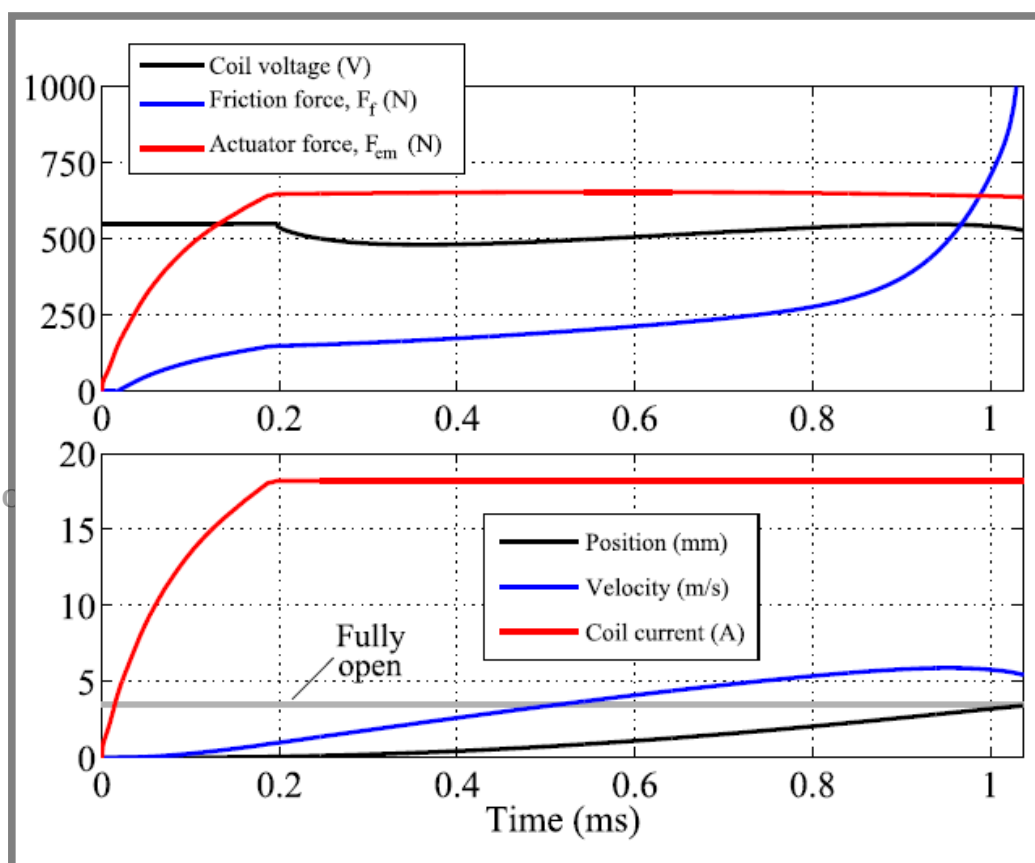
Supply type	A	B	C
Maximum voltage (V)	550	100	26.7
Maximum current (A)	18.2	100	375

Výsledky optimalizace jsou vykresleny na Obr.3-19, kde lze vypočítat doby sepnutí T_s pro různé kombinace průměru drátu d , výšky cívky h a počtu vinutí N pro všechny tři zvolené zdroje A, B a C. Minimální dosažené doby sepnutí ventilu T_s jsou pro jednotlivé zdroje zakresleny červeným křížkem. Jejich hodnota se pro všechny zdroje pohybuje v rozmezí 1 – 1,05 ms, pro A je to 1,02 ms, pro B 1,02 ms a pro C 1,05 ms. Zatímco se počet vinutí pro každý zdroj liší, minimální doby sepnutí T_s jsou skoro neovlivněny poměrem proudu ku napětí, což ukazuje, že design pohonu pohybujícího cívku využívá dodaný výkon, z jednotlivých zdrojů A, B a C, ideálním způsobem. Tudiž bylo odvozeno, že minimální doba sepnutí je funkcí pouze dostupného výkonu.



Obr. 3-19 Zobrazení dob sepnutí pro jednotlivé typy zdrojů A, B a C s různými kombinacemi průměru drátu d a výšky cívky h pro rozdílné počty vinutí N . [1]

Výsledný optimalizovaný pohon pohyblivé cívky byl tedy nalezen pomocí analýzy konečných prvků. Tento design využívá stabilního permanentního magnetu, jenž poskytuje magnetické pole, ve kterém se cívka může pohybovat. Doba sepnutí ventilu při tomto designu, pro cívku s výškou $h = 20$ mm a průměrem drátu $d = 0,2$ mm, je ukázána na Obr.3-20. Z toho lze odečíst, že doba sepnutí je 1,02 ms, během které píst ventilu urazí 3,5 mm. Proud v cívce je, po prudkém nárůstu na maximální hodnotu, na této hodnotě udržován. Z toho vyplývá, že napětí, jenž je vyžadováno pro udržení proudu na jeho maximální hodnotě, je přibližně stejné jako hodnota vstupního napětí k cívce. Tímto je skrze vysoké energetické nároky dosaženo nízké doby sepnutí.

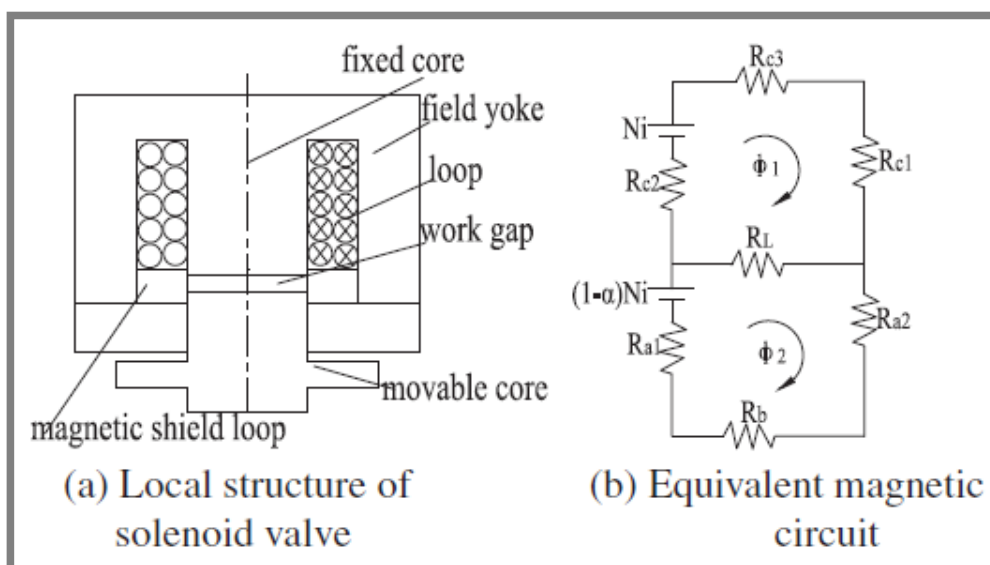


Obr. 3-20 Doba sepnutí při použití optimalizovaného pohonu pohyblivou cívku. [1]

3.3.2 Volba materiálu

U elektromagnetických ventilů lze upravovat dynamické charakteristiky a jejich výkon nejen změnou geometrie či řídicího proudu, ale také pomocí použitých materiálů na komponenty ventilu. Volbou vhodných magneticky měkkých materiálů s rozdílnými $B-H$ (hustota magnetického toku – intenzita magnetického pole) křivkami může být dosaženo větší elektromagnetické síly a zlepšení výkonu ventilu. [3] Mezi důležité charakteristiky magneticky měkkých materiálů patří vysoká hustota magnetického toku B_s , nízká intenzita magnetické remanence (zbytková magnetizace) B_r , vysoká počáteční permeabilita μ_i , vysoká maximální permeabilita μ_m a velký odpor ρ . [23] Těmto parametrům odpovídá slitina Al – Fe, jejíž dva vzorky jsou zkoumány v práci [23]. Tato studie řeší závislost časové odezvy a napětí v cívce na tlakovém zatížení od kapaliny uvnitř těla ventilu. Vytvořením modelu

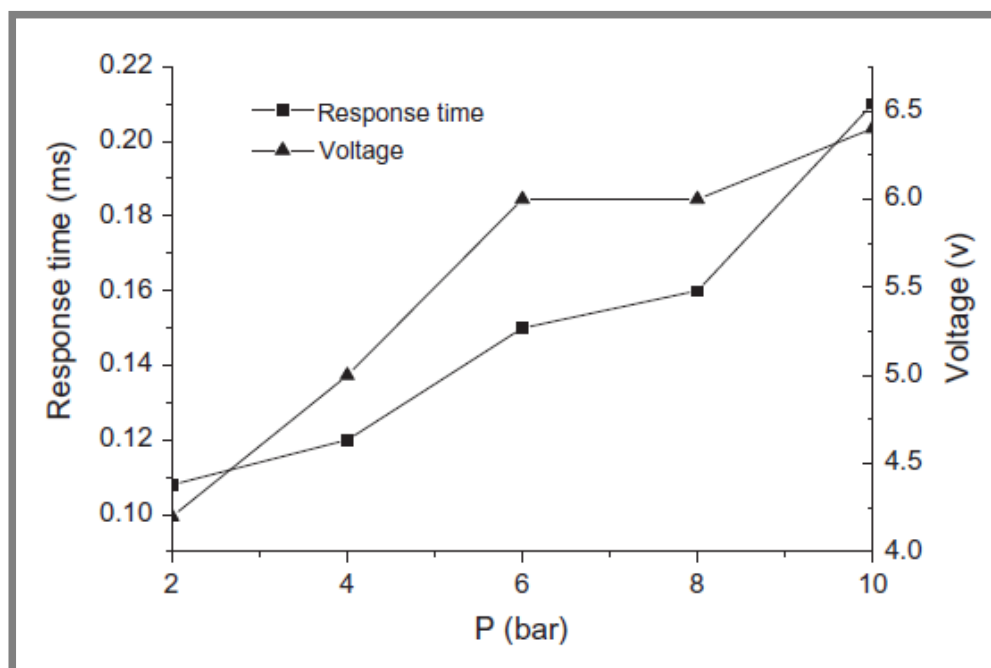
ventilu, (a) na Obr.3-21, a vypočtením magnetického obvodu, jehož zjednodušené schéma je viditelné na Obr.3-21 (b).



Obr. 3-21 (a) Model použitého solenoidového ventilu. (b) Zjednodušený magnetický obvod. [3]

Pro zlepšení výkonu ventilu, jsou autory práce [23] navrženy metody, kterými toho lze docílit. První možností je snížení průměru u přítoku ventilu tak, aby byla redukována zátěž od kapaliny v těle ventilu při jeho otevírání. Druhou možností pak je navýšení počtu vinutí cívky tak, aby byla zajištěna adekvátní elektromagnetická síla pohybující pístem ventilu.

Testováním vytvořeného modelu ventilu změnami tlaku v rozmezí 2 až 10 barů byly získány odpovídající hodnoty pro časovou odezvu ventilu a napětí v cívce. Ty jsou pak graficky znázorněny na Obr.3-22.

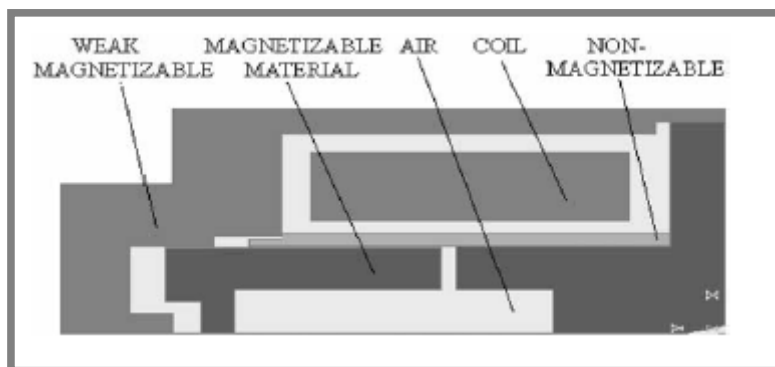


Obr. 3-22 Závislost napětí (V) a časové odezvy (ms) na postupném navýšování tlaku P (bar). [3]

Ve studii [3] je zkoumán trojcestný normálně uzavřený ventil používaný v automobilech u řídicích systémů automatických převodovek. Zjednodušený 3D model HSV je ukázán na Obr.3-23. S cílem získat přesnější informace o velikosti elektromagnetické síly a o rychlosti časové odezvy ventilu byla užita metoda konečných prvků (MKP) na zjednodušený rovinný model, zobrazený na Obr.3-24.



Obr. 3-23 Zjednodušený 3D model zkoumaného HSV. [3]



Obr. 3-24 Zjednodušený rovinný model HSV použitý pro MKP. [3]

Rovinný model pro MKP k analýze magnetického pole HSV je popsán následujícími rovnicemi. Elektromagnetické pole se řídí Maxwellovými rovnicemi. Při uvažování statického pole a zanedbání posuvného proudu, vyjadřují následné rovnice vzájemné vztahy mezi intenzitou magnetického pole H , hustotou magnetického toku B , hustotou vodivého proudu J a permeabilitou materiálu μ :

$$\nabla \times H = J \quad (8)$$

$$B = \mu * H \quad (9)$$

$$\nabla * B = 0 \quad (10)$$

Kde je:

H	A/m	intenzita magnetického pole
J	A/m ²	hustota elektrického proudu
B	T	magnetická indukce neboli hustota magnetického toku
μ	N/A ²	magnetická permeabilita materiálu

Dále lze obecně vyjádřit hustotu magnetického toku B jako funkci vektorového potenciálu A :

$$B = \nabla \times A \quad (11)$$

Kde je:

A	V*s/m	magnetický vektorový potenciál
-----	-------	--------------------------------

Kombinací čtyř výše uvedených rovnic dostaneme výslednou rovnici, dle které se řídí magnetické pole:

$$\nabla \times \mu^{-1} * \nabla \times A = J \quad (12)$$

Jelikož má elektromagnetická síla F_e přímý vliv na výkon ventilu, je třeba zvolit jeden ze dvou způsobů, jak ji vypočítat. [20] Prvním je výpočet Maxwellova tenzoru napětí podél uzavřené křivky Γ s délkou l , přes kterou se integruje: a μ_0 je konstanta permeability vzduchu:

$$F_e = \frac{l}{\mu_0} * \oint_{\Gamma} \left[(B * n_s) * B - \frac{1}{2} * B^2 * n_s \right] d\Gamma \quad (13)$$

Kde je:

F_e	N	elektromagnetická síla
l	m	délka křivky
μ_0	N/A ²	permeabilita vzduchu

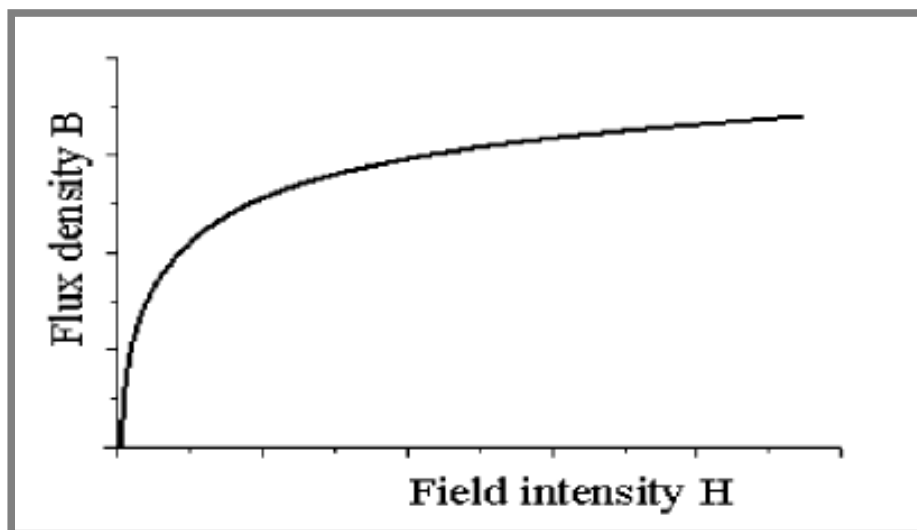
Druhým způsobem je metoda virtuálních magnetických posunů. Ten s konstantním proudem předpokládá velmi malé posuny Δx , a ukazuje vliv náhodné změny energie ΔW :

$$F_e = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta W'_m}{\Delta x} \quad (14)$$

Kde je:

Δx	m	změna polohy
ΔW	J	náhodné změny energie

Magneticky měkké materiály, kterými se zabývá tato studie [3], vykazují nelinearitu u svých B - H křivek. Po počátečním prudkém nárůstu hustoty magnetického toku B spolu s intenzitou magnetického pole H , se rapidně sníží permeabilita materiálu a hodnota hustoty magnetického toku B už nenarůstá tak strmě, což je ukázáno na Obr.3-25.



Obr. 3-25 Nelineární průběh B - H křivky magneticky měkkých materiálů. [3]

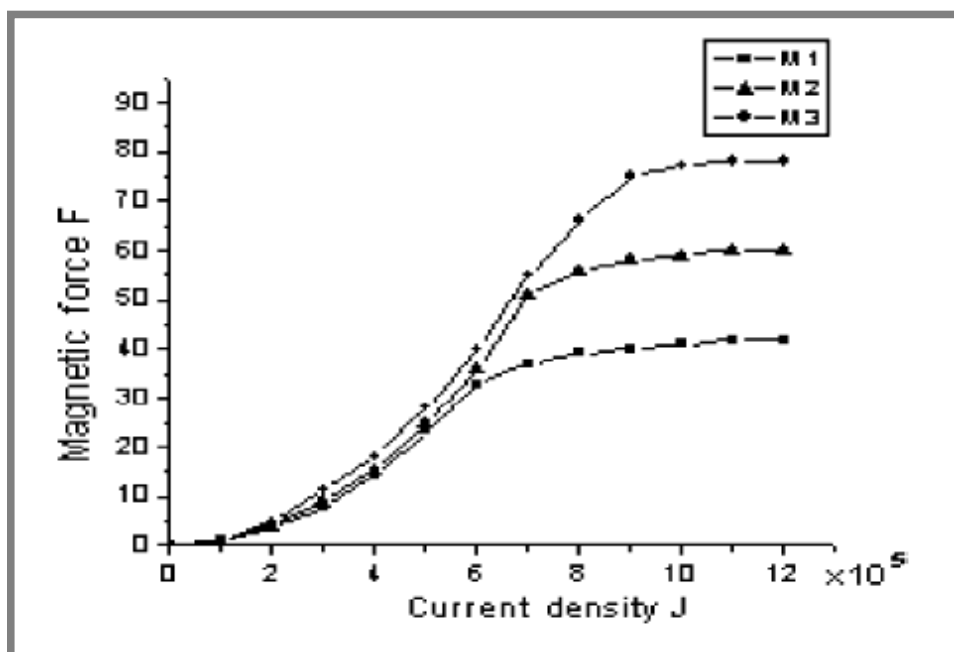
Pro konečný model byly vybrány tři magneticky měkké materiály s různými B - H křivkami, u kterých je nelineární průběh zřejmý. Faktory, které ovlivňují proudovou hustotu J jsou: počet vinutí cívky N , napětí U , délka cívky l , odporový koeficient ρ , plocha průřezu solenoidu S [25]:

$$J = \frac{N * i}{S} = \frac{N * U}{S * R} = \rho * \frac{N * U * s}{S * l} \quad (15)$$

Kde je:

J	A/m^2	hustota elektrického proudu
N	-	počet vinutí cívky
i	A	proud
U	V	napětí
l	m	délka cívky
ρ	-	odporový koeficient
S	m^2	plocha průřezu solenoidu
s	m^2	plocha průřezu pístu

Výsledná závislost magnetické síly F_e na proudové hustotě je, pro všechny tři zvolené materiály, vyobrazena na Obr.3-26. Lze odečíst, že spolu s rostoucí proudovou hustotou se navyšuje i hodnota síly, avšak pro každý materiál dosáhne síla rozdílného maxima. Určením vhodného materiálu a změnou parametrů, jenž ovlivňují proudovou hustotu J , bylo docíleno optimálního designu pro solenoidové ventily, které dosahují větší magnetické síly F_e a tím i lepší časové odezvy.



Obr. 3-26 Porovnání vypočtených magnetických sil pro tři zvolené magneticky měkké materiály. [3]

Patent [5] německých vědců se zabývá vytvořením nového kompozitu, jenž najde své uplatnění při konstrukci solenoidových ventilů. Slitiny magneticky měkkých materiálů, jako jsou FeCr nebo FeCo, obvykle používaných v rychle spínacích ventilech, dosahují nejvyššího možného elektrického odporu, který lze získat při slévarenských technologiích. Mezi velká negativa těchto slitin patří omezená stabilita při vyšších pracovních teplotách ve ventilu a jejich obtížné zpracování. Objevený kompozit je v porovnání s těmito magneticky měkkými materiály stabilnější vzhledem k vyšším provozní teplotám a agresivnímu prostředí paliva. Dalším pozitivem tohoto kompozitu je dosažení elektrického odporu většího než $2 \mu\Omega$.

Základním feromagnetickým prvkem kompozitů může být řada komerčně známých prášků, především čistě železný prášek, fosfatizovaný železný prášek nebo železo-chromové či železo-kobaltové směsi. Jako druhou feromagnetickou složkou je vhodné použít oxidové prášky jako Fe_2O_3 či měkké kovy jako MnZn nebo NiZn. Pro upravení fyzikálních vlastností kompozitu, mohou být do vzniklé směsi dodány další prvky. Ke zvýšení elektrického odporu kompozitu se do něj přidávají aditiva jako křemík, oxid křemičitý (SiO_2), hliník nebo oxid hlinitý (Al_2O_3). Samotný křemík také zvyšuje permeabilitu daného kompozitu.

4 DISKUZE

Časová odezva elektromagnetických ventilů je stěžejním parametrem určujícím jeho výkon. Je to jedna z jejich nejdůležitějších charakteristik mající výrazný vliv ve většině aplikací, ve kterých se elektromagnetické ventily nacházejí. Vysokotlaký vstřikovací common-rail systém je jednou z takových aplikací, ve které jsou elektromagnetické ventily použity jako řídicí jednotky. Jejich funkcí je zajištění ideálního množství vstřikovaného paliva do spalovacích komor válců u dieselových motorů. Tímto se dosahuje, oproti vstřikovacím jednotkám s klasickými mechanickými ventily či vačkami, snížené spotřeby paliva a redukování znečištění ovzduší výfukovými plyny.

Hlavním cílem této rešeršní studie je prezentování technických řešení vedoucích ke zlepšení časové odezvy. V této práci je představena řada metod, kterými lze pozitivně ovlivnit chování ventilu a urychlit jeho časovou odezvu. První metodou, kterou lze upravovat dynamické charakteristiky ventilů, je změna geometrie solenoidu. Dle možností lze upravovat jeho délku či průřez plochy jádra. Druhou metodou je regulace přiváděného elektrického proudu k cívce, umístěné uvnitř těla ventilu, skrze použité zdroje proudu a napětí o různých parametrech. Třetí přístup, k této problematice, představuje odlišný design elektromagnetického ventilu. Tento design využívá pohonu, jež pohybuje s cívkou v dutině těla ventilu a tím je generována větší elektromagnetická síla. Jako poslední metoda je v této práci vyšetřován vliv magneticky měkkých materiálů či kompozitů s různými aditivami. Tyto materiály musí mít požadované magnetické charakteristiky, aby jejich použití kladně ovlivnilo dynamické charakteristiky ventilů.

Výběr optimálních metod se pro různé ventily při daných aplikacích liší v závislosti na vstupních požadavcích na funkce ventilu a následných nákladech. Nelze jasně říci, že jedna metoda je lepší než ostatní. Volba metody, skrze kterou bude elektromagnetický ventil při svém designu upraven, tedy záleží na předcházejících nákladových kalkulacích a zkušenostech inženýra, který daný ventil navrhuje. Tato rešeršní práce poskytuje shrnutí a přehled nabízených metod dostupných na dnešním trhu a může posloužit jako pomoc při konstrukci elektromagnetických ventilů se zlepšenými dynamickými charakteristikami.

5 ZÁVĚR

Náplní této bakalářské práce je téma „Mechanická konstrukce elektromagnetických ventilů v automobilové oblasti“. Práce je ve třetí kapitole rozdělena na tři podkapitoly, které odpovídají dílčím cílům zadání. Největší důraz je poté kladen na poslední podkapitolu, jenž řeší technická řešení vedoucí ke zrychlení časové odezvy a následnému lepšímu výkonu ventilu.

V první podkapitole je obecné seznámení s elektromagnetickými ventily. Jsou zde ukázány oblasti osobních automobilů, do kterých tyto ventily pronikly, díky jejich přednostem, jako je menší velikost, rychlejší časová odezva a přesnější řízení, oproti klasickým mechanickým ventilům. Je zde popsán základní princip jejich funkce jako řídicích členů jednotlivých systémů, ať už se jedná o vstřikování u dieslových motorů či brzdných systémů ABS.

V druhé podkapitole jsou prezentovány typy elektromagnetických ventilů, od základních až po komplexnější proporcionální ventily, jež jsou používány u brzdných systémů a v ovládacích prvcích automatických převodovek.

Poslední podkapitola se soustředí na technická řešení, skrze která je možno docílit rychlejší časové odezvy a zlepšení výkonu ventilu. Z použitých zdrojů bylo odvozeno, že nejvýznamnějších pokroků lze dosáhnout pomocí čtyř metod: a) změnou geometrie solenoidu, b) zvýšením či snížením přiváděného elektrického proudu, c) použitím magneticky měkkých materiálů či kompozitů, d) změnou konstrukce ventilu. Výběr vhodné metody je pak specifický pro jednotlivé aplikace ventilů, dle vstupních parametrů a nároků, kterým musí ventil podléhat.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ROEMER, Daniel B., Michael M. BECH, Per JOHANSEN a Henrik C. PEDERSEN. Optimum Design of a Moving Coil Actuator for Fast-Switching Valves in Digital Hydraulic Pumps and Motors. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* [online]. 2015, **20**(6), 2761-2770 [cit. 2017-05-17]. DOI: 10.1109/TMECH.2015.2410994. ISSN 1083-4435. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7084166/>
- [2] KAJIMA, T. a Y. KAWAMURA. Development of a high-speed solenoid valve: investigation of solenoids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. 1995, **42**(1), 1-8 [cit. 2017-05-17]. DOI: 10.1109/41.345838. ISSN 02780046. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/345838/>
- [3] TAO, G., H.Y. CHEN, Y.Y. J a Z.B. HE. Optimal design of the magnetic field of a high-speed response solenoid valve. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2002, **129**(1-3), 555-558 [cit. 2017-05-17]. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00633-7. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013602006337>
- [4] KAJIMA, T., Y. NAKAMURA a K. SONODA. Development of high speed solenoid valve-investigation of the energizing circuits. *Proceedings of the 1992 International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation, Marriot Mission Valley, San Diego, USA, 9-13. listopadu 1992* [online]. IEEE, 1992, 564-569 [cit. 2017-05-17]. DOI: 10.1109/IECON.1992.254495. ISBN 0-7803-0582-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/254495/>
- [5] DRAXLER, Waldemar, Thomas CHRISTMANN a Hosrt Boeder BOEDER. *Weakly-magnetic sintered composite-material and a method for production*. US 09/913,776. Uděleno 2000.
- [6] Solenoid Valve For Automotive. In: [Http://rotexautomation.com/](http://rotexautomation.com/) [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://rotexautomation.com/automotive/solenoid-valve-for-automotive/>
- [7] HWANG, Jae-Won, Han-Joo KAL, Jae-Keun PARK, A. A. MARTYCHENKO a Jae-Ou CHAE. A study on the design and application of optimized solenoid for diesel unit injector. *KSME International Journal* [online]. 1999, **13**(5), 414-420 [cit. 2017-05-17]. DOI: 10.1007/BF02939329. ISSN 1226-4865. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF02939329>

- [8] XIONG, Qinghui, Youtong ZHANG a Jun WANG. Development of a High-Speed Solenoid Valve Measuring Bench. *2009 International Conference on Information Technology and Computer Science, Kyjev, Ukrajina, 25-26 července 2009* [online]. IEEE, 2009, 421-424 [cit. 2017-05-17]. DOI: 10.1109/ITCS.2009.284. ISBN 978-0-7695-3688-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5190269/>
- [9] WANG, Lan, Guo-Xiu LI, Chun-Long XU, Xing XI, Xiao-Jun WU a Shu-Ping SUN. Effect of characteristic parameters on the magnetic properties of solenoid valve for high-pressure common rail diesel engine. *Energy Conversion and Management* [online]. 2016, **127**, 656-666 [cit. 2017-05-17]. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.09.057. ISSN 01968904. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890416308561>
- [10] DE, Xu, Fei HONG-ZI, Liu PENG, Zhou WEI a Fan LI-YUN. Electromagnetic force of high-speed solenoid valve based on correlation analysis. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems* [online]. 2015, **8**(4), 2267-2285 [cit. 2017-05-17]. ISSN 1178-5608. Dostupné z: <http://s2is.org/Issues/v8/n4/papers/paper20.pdf>
- [11] KO, Seungbin a Simon SONG. Effects of design parameters on cavitation in a solenoid valve for an electric vehicle braking system and design optimization. *Journal of Mechanical Science and Technology* [online]. 2015, **29**(11), 4757-4765 [cit. 2017-05-17]. DOI: 10.1007/s12206-015-1023-z. ISSN 1738-494x. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s12206-015-1023-z>
- [12] CDC from ZF — Continuous Damping Control for all Vehicles. In: <https://www.zf.com/> [online]. ZF North America, 2015 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: https://ci-portal.zf.com/global/media/en_de/zf_media/document/corporate_2/press_3/press_kits_1/2015_naia_1/tx15_NAIAS15_ZF_CDC_EN.pdf
- [13] CDC Dampers. In: <https://www.zf.com> [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: https://www.zf.com/brands/media/img/sachs/technology_in_practice_1/praxis_tips_2/CDC-damper_IMG_8_corporate_textimage_big_ar.jpg
- [14] Electronic Damper Control. In: <https://www.bmwgroup.com> [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: http://www.bmw.com.hr/com/en/insights/technology/technology_guide/articles/electronic_damper_control.html?source=categories&article=electronic_damper_control

- [15] The Research and Development and Industrialization on Inversely Proportional Solenoid Valve of Electric Hydraulic Control Automatic Transmission. *International Journal of Simulation -- Systems, Science & Technology* [online]. 2015, **16**(3), 7.1-7.6 [cit. 2017-05-17]. DOI: 10.5013/IJSSST.a.16.3B.07. ISSN 1473-804x. Dostupné z: <http://ijssst.info/Vol-16/TIL/No-3B/paper7.pdf>
- [16] Solenoid valve basics. In: www.norgren.com [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.pacontrol.com/download/Solenoid%20Valves%20Basics.pdf>
- [17] Different Types of Solenoid Valves, In: <http://www.mgacontrols.com> [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z <http://www.mgacontrols.com/wp-content/uploads/2016/08/Different-Types-of-Solenoid-Valves.pdf>
- [18] Solenoid valve types. <https://tameson.com> [online]. Tameson [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://tameson.com/solenoid-valve-types.html>
- [19] Indirectly solenoid actuated. <http://www.buschjost.com> [online]. IMI Buschjost [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.buschjost.com/valves/types-of-valves/indirectly-solenoid-actuated/>
- [20] WU, Rangli. The Research and Development and Industrialization on Inversely Proportional Solenoid Valve of Electric Hydraulic Control Automatic Transmission. *International Journal of Simulation -- Systems, Science & Technology* [online]. 2015, **16**(3B), 7.1-7.6 [cit. 2017-05-17]. DOI: 10.5013/IJSSST.a.16.3B.07. Dostupné z: <http://ijssst.info/Vol-16/TIL/No-3B/paper7.pdf>
- [21] CHENG, Qiang, Zhendong ZHANG a Nailiu XIE. Power losses and dynamic response analysis of ultra-high speed solenoid injector within different driven strategies. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2015, **91**, 611-621 [cit. 2017-05-17]. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.08.053. ISSN 13594311. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431115008492>
- [22] ROEMER, Daniel B., Per JOHANSEN, Henrik C. PEDERSEN a Torben O. ANDERSEN. Topology selection and analysis of actuator for seat valves suitable for use in Digital Displacement pumps/motors. *2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation* [online]. IEEE, 2013, 418-424 [cit. 2017-05-17]. DOI: 10.1109/ICMA.2013.6617955. ISBN 978-1-4673-5560-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6617955/>

- [23] WANG, Qilei, Fengyu YANG, Qian YANG, Junhui CHEN a Hongyan GUAN. Experimental analysis of new high-speed powerful digital solenoid valves. *Energy Conversion and Management* [online]. 2011, **52**(5), 2309-2313 [cit. 2017-05-17]. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.12.032. ISSN 01968904. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890411000124>
- [24] LIUSONG, Z. a X. SONG. *Application of the Finite Element Method in the Electromagnetic Calculation*. The Publication of the China Railroad, 1996, s. 123-125.
- [25] JIBIN, Z. *Magnetic Circuit and magnetic Field*. Harbin: Publication of Harbin Institute of Technology, 1998, s. 31.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

ABS		Automatický brzdňý systém
CDC		Continuus damping control, typ tlumičů s trvalým řízením tlumení od firmy ZF
EDC		Electronic damper control, typ tlumičů s elektronickým ovládáním od firmy BMW
HSV		High speed solenoid valves – vysokorychlostní solenoidové ventily
MKP		Metoda konečných prvků
Al	-	hliník
Co	-	kobalt
Cr	-	chrom
Fe	-	železo
Mn	-	mangan
Ni	-	nikl
O	-	kyslík
Si	-	křemík
Zn	-	zinek
μ	N/A^2	magnetická permeabilita materiálu
μ_0	N/A^2	permeabilita vzduchu
ρ	-	odporový koeficient
Φ	Wb	magnetický tok skrze jednotlivé závity
A	$V \cdot s/m$	magnetický vektorový potenciál
b	mm	šířka cívky
b_t	$N \cdot s/m$	koeficient tlumení
B	T	magnetická indukce či hustota magnetického toku
d	mm	průměr drátu
dU_m	J	změna magnetické energie soustavy
F_e	N	elektromagnetická síla
$F_m(t)$	N	elektromagnetická síla
$F_m(t)dx$	J	mechanické práce od elektromagnetické síly
$F_{pre}(t)$	N	hydraulická síla
g	m/s^2	tíhové zrychlení
h	mm	výška cívky
H	A/m	intenzita magnetického pole
i	A	elektrický proud
J	A/m^2	hustota elektrického proudu
l	m	délka křivky
m	kg	hmotnost
N	-	počet závitů cívky
NI	A	ampér-závit
R	Ω	odpor solenoidové cívky
S	m^2	plocha průřezu jádra solenoidu
s	m^2	plocha průřezu pístu
S_m	m^2	plocha průřezu jádra solenoidu

S_v	m^2	plocha průřezu vnějšího obalu
T_1	ms	doba před zahájením otevírání
T_2	ms	doba otevírání
T_3	ms	doba uzavírání
T_s	s	doba sepnutí ventilu
U	V	napětí
V	V	napětí zdroje
$V(t)i(t)$	W	příkon
ΔW	J	náhodné změny energie
x	m	souřadnice posunu armatury
Δx	m	změna polohy armatury

8 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 3-1 Příklady užití elektromagnetických ventilů v osobním automobilu. [6]	14
Obr. 3-2 Zjednodušený model vstřikovače z common-rail systému a model solenoidového ventilu. [9]	15
Obr. 3-3 Ukázka CDC tlumičů s proporcionálními ventily od firmy ZF. [13]	16
Obr. 3-4 Příklad normálně uzavřeného dvoucestného ventilu. [16]	18
Obr. 3-5 Příklad normálně otevřeného dvoucestného ventilu. [16]	18
Obr. 3-6 Trojcestný ventil s jedním přítokem (P), výtokem (A) a výfukem (R). [16]	19
Obr. 3-7 Trojcestný ventil s jedním přítokem (P) a dvěma výtoky. [16]	20
Obr. 3-8 Trojcestný ventil se dvěma přítoky (P1, P2) a jedním výtokem. [16]	20
Obr. 3-9 Princip činnosti přímo ovládaného dvoucestného, normálně uzavřeného ventilu. [18]	21
Obr. 3-10 Vertikální pohled na příčný průřez jádrem. [9]	24
Obr. 3-11 Křivky elektromagnetické síly F_e ventilu s různými řídicími proudy. [9]	24
Obr. 3-12 Doba pohybu při otevírání ventilu pod různými řídicími proudy. [9]	25
Obr. 3-13 Průběh F_e pod různými udržovacími proudy. [9]	25
Obr. 3-14 Znázornění závislosti uzavíracího času na udržovacím proudu. [9]	26
Obr. 3-15 Znázornění závislosti otevíracích časů na velikosti předpětí pružiny. [9]	26
Obr. 3-16 Znázornění závislosti uzavírací doby na velikosti předpětí pružiny. [9]	27
Obr. 3-17 Geometrie pohonu se třemi proměnnými (d , b , h) a tabulkou parametrů. [1]	27
Obr. 3-18 Levá část: Teplota cívky zobrazena jako funkce středního výkonu Pravá část: Zvolené referenční zdroje podle poměru proudu ku napětí. [1]	28
Obr. 3-19 Zobrazení dob sepnutí pro jednotlivé typy zdrojů A, B a C s různými kombinacemi průměru drátu d a výšky cívky h pro rozdílné počty vinutí N . [1]	29
Obr. 3-20 Doba sepnutí při použití optimalizovaného pohonu pohybujícím cívkou. [1]	30
Obr. 3-21 (a) Model použitého solenoidového ventilu. (b) Zjednodušený magnetický obvod. [3]	31
Obr. 3-22 Závislost napětí (V) a časové odezvy (ms) na postupném navýšování tlaku P (bar). [3]	31
Obr. 3-23 Zjednodušený 3D model zkoumaného HSV. [3]	32
Obr. 3-24 Zjednodušený rovinný model HSV použitý pro MKP. [3]	32
Obr. 3-25 Nelineární průběh B - H křivky magneticky měkkých materiálů. [3]	34
Obr. 3-26 Porovnání vypočtených magnetických sil pro tři zvolené magneticky měkké materiály. [3]	35

9 SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

9

Tab.1 Zvolené zdroje pro optimalizaci se svými parametry. [1]

28