VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

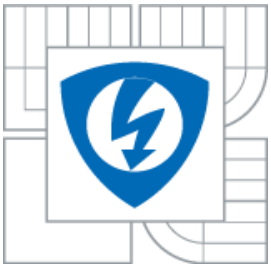
ZDOKONALOVÁNÍ PALIVOVÝCH ČERPADEL, MOŽNOSTI A OMEZENÍ

BAKAKÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Vladimír Novotný
AUTHOR

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

ZDOKONALOVÁNÍ PALIVOVÝCH ČERPADEL, MOŽNOSTI A OMEZENÍ

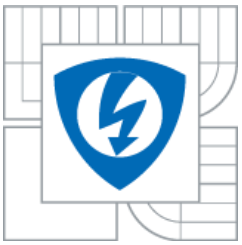
THE FUEL PUMP IMPROVEMENT, POSSIBILITIES AND LIMITATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Vladimír Novotný
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.
SUPERVISOR

BRNO, 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Vladimír Novotný
Ročník: 3

ID: 125168
Akademický rok: 2012/13

NÁZEV TÉMATU:

Zdokonalování palivových čerpadel, možnosti a omezení

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vypracujte přehled existujících systémů vstřikování paliva do motorů.
2. Analyzujte systém řízení vstřiku paliva u produktu Common Rail firmy Bosch.
3. Navrhněte možnosti zdokonalení některých komponent.

DOPORUČENÁ LITERATURA:
Dle pokynů vedoucího

Termín zadání: 17.9.2012 ***Termín odevzdání:*** 4.6.2013

Vedoucí práce: doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá vstřikovacími systémy Common Rail používanými u vznětových motorů vozidel. Obsahuje přehled výrobců těchto systémů, jejich konstrukci a odlišnosti. V druhé části jsou popsány elektrotechnické a elektronické součásti systému Common Rail firmy Bosch, způsob řízení a regulace tlaku. V poslední kapitole jsou shrnuty možnosti vývoje a zdokonalení některých komponent tohoto systému v budoucnosti.

Abstract

This thesis deals with common rail injection systems used at diesel vehicles. It contains an overwiev of manufacturers common rail systems, their construction and differences. The second part contains a description of Bosch Common Rail electrical and electronic components, and described ways of pressure control. Last chapter summarizes the possibilities for development and improvement of some parts of the system in the future.

Klíčová slova

Common Rail, piezoelektrický vstřikovač, piezoelektrický snímač, PZT keramika

Keywords

Common Rail, piezoelectric injector, piezoelektric sensor, PZT keramics

Bibliografická citace

NOVOTNÝ, V. *Zdokonalování palivových čerpadel, možnosti a omezení.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 46 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma **Zdokonalování palivových čerpadel, možnosti a omezení** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 30.5.2013 Podpis autora ……..

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Bohuslavu Bušovovi, CSc. a Ing. Jaroslavu Čápovi, Ph.D. z firmy Bosch za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne …… Podpis autora ……..

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ **10**

SEZNAM TABULEK **11**

ÚVOD **12**

1 HISTORIE A VÝROBCI SYSTÉMŮ COMMON RAIL **13**

1.1 HISTORIE VZNĚTOVÉHO MOTORU **13**

1.2 HISTORIE SYSTÉMU COMMON RAIL **14**

1.3 VÝROBCI **14**

1.3.1 BOSCH 14

1.3.2 CUMMINS 16

1.3.3 DELPHI 17

1.3.4 DENSO 19

2 ČÁSTI SYSTÉMU VSTŘIKOVÁNÍ COMMON RAIL BOSCH, JEHO ŘÍZENÍ A REGULACE **20**

2.1 KONSTRUKČNÍ ČÁSTI SYSTÉMU COMMON RAIL BOSCH **20**

2.2 SNÍMAČE A ELEKTRONICKÁ ČÁST SYSTÉMU **21**

2.2.1 SNÍMAČ VYSOKÉHO TLAKU 21

2.2.2 SNÍMAČ OTÁČEK KLIKOVÉ HŘÍDELE 22

2.2.3 SNÍMAČ OTÁČEK VAČKOVÉ HŘÍDELE 22

2.2.4 SNÍMAČE TEPLOTY 23

2.2.5 SNÍMAČ POLOHY PLYNOVÉHO PEDÁLU 24

2.2.6 SNÍMAČ TLAKU PLNICÍHO VZDUCHU 25

2.2.7 SNÍMAČ HMOTNOSTI NASÁVANÉHO VZDUCHU 26

2.2.8 ELEKTRONICKÁ ŘÍDÍCÍ JEDNOTKA ECU (ELECTRONIC CONTROL UNIT) 27

2.3 AKČNÍ ČLENY **28**

2.3.1 VYSOKOTLAKÝ REGULÁTOR DRV (DRUCK REGEL VENTIL) 28

2.3.2 NÍZKOTLAKÝ REGULÁTOR 28

2.3.3 VSTŘIKOVAČE SYSTÉMU COMMON RAIL 29

2.4 ZPŮSOBY REGULACE TLAKU V CR SYSTÉMU **34**

2.4.1 REGULACE NA VYSOKOTLAKÉ ČÁSTI HYDRAULICKÉHO SYSTÉMU 34

2.4.2 REGULACE NA NÍZKOTLAKÉ ČÁSTI HYDRAULICKÉHO OKRUHU 35

2.4.3 KOMBINOVANÁ REGULACE 35

2.5 SOFTWAROVÉ NÁSTROJE REGULACE TLAKU **36**

2.5.1 IQA – INJECTOR QUANTITY ADJUSTMENT 36

2.5.2 FBC – FUEL BALANCE CONTROL 37

2.5.3 PWC – PRESSURE WAVE CORRECTION 37

2.5.4 ZFC – ZERO FUEL CALIBRATION 38

2.5.5 NVC – NOMINAL VOLTAGE CORRECTION (PIEZO) 38

3 MOŽNOSTI ZDOKONALENÍ SYSTÉMU VSTŘIKOVÁNÍ COMMON RAIL **39**

3.1 VYUŽITÍ PIEZOELEKTRICKÝCH MATERIÁLŮ V SYSTÉMECH VSTŘIKOVÁNÍ PALIVA **39**

3.1.1 MOŽNOST ZAPOJENÍ PIEZOKRYSTALŮ VE VSTŘIKOVAČI 41

3.2 PIEZOELEKTRICKÉ SNÍMAČE 42
3.2.1 APLIKACE PZT KERAMIKY, SLEDOVANÉ PARAMETRY A VÝVOJ 43
4 ZÁVĚR 44
LITERATURA 45
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK 46

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Vstřikovač paliva a stlačeného vzduchu
Obrázek 2: Motor s předkomůrkou
Obrázek 3: Common Rail Bosch
Obrázek 4: Schéma Scania XPI
Obrázek 5: UPCR (Unit Pump Diesel Common Rail) systém
Obrázek 6: Delphi Multec Light Duty Diesel Common Rail systém
Obrázek 7: Delphi F2e Ultra High Pressure Heavy Duty Diesel Common Rail systém
Obrázek 8: Systém Common Rail Denso
Obrázek 9: Konstrukční části systému CR BOSCH
Obrázek 10: Snímač vysokého tlaku v railu
Obrázek 11: Snímač otáček klikové hřídele
Obrázek 12: Signál ze snímače otáček
Obrázek 13: Snímač otáček vačkové hřídele
Obrázek 14: Snímač teploty
Obrázek 15: Kalibrace odporového snímače
Obrázek 16: NTC odporový snímač
Obrázek 17: Zapojení snímače polohy plynového pedálu
Obrázek 18: Snímač polohy brzdového pedálu
Obrázek 19: Snímač plnícího tlaku vzduchu
Obrázek 20: Zapojení snímače hmotnosti vzduchu
Obrázek 21: Snímač hmotnosti nasávaného vzduchu
Obrázek 22: Zpracování dat v řídící jednotce
Obrázek 23: Vysokotlaký regulátor DRV2
Obrázek 24: Řez nízkotlakým regulátorem
Obrázek 25: Charakteristika čerpadla řízeného nízkotlakým regulátorem
Obrázek 26: Elektromagnetický vstřikovač
Obrázek 27: Spouštěcí fáze elektromagnetického ventilu
Obrázek 28: Blokové schéma spouštěcích fází el. mag. ventilu
Obrázek 29: Konstrukce piezoelektrického vstřikovače
Obrázek 30: Spouštění piezoelektrického vstřikovače
Obrázek 31: Princip regulace v systému BOSCH Common Rail
Obrázek 32: Regulace tlaku s oběma regulátory v závislosti na otáčkách motoru a požadovaném vstřikovaném množství.
Obrázek 33: Reakce na náhlý pokles požadovaného tlaku v případě regulace na nízkotlaku a regulace s oběma regulátory
Obrázek 34: IQA – korekce výchozí délky buzení v závislosti na výrobních tolerancích
Obrázek 35: FBC - dynamická korekce vstřikovaného množství
Obrázek 36: PWC - korekce tlakových vln ve vysokotlaké části CR systému
Obrázek 37: ZFC - kalibrace minimální délky vstřiku
Obrázek 38: Průběh ovládacího napětí
Obrázek 39: Konfigurace bimorfů
Obrázek 40: Zapojení paralelního bimorfu pro ohyb dolů
Obrázek 41: Elektrický obvod se zapojeným bimorfem
Obrázek 42: Piezoelektrické snímače

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Generace systémů Bosch Common Rail

ÚVOD

Na počátku vývoje automobilu sloužil jako hnací agregát silničních vozidel zážehový motor. Později se začal u nákladních vozidel používat vznětový motor, který se mohl prosadit díky své hospodárnosti a dlouhé životnosti. S příchodem moderních vznětových motorů s přímým vstřikem a přeplňováním se image vznětových motorů v osobních vozidlech změnil. Nyní je jejich podíl oproti zážehovým motorům u nově přihlášených vozidel v Evropě přibližně 50% a neustále se zvyšuje.

Příčina tohoto zvyšování má několik faktorů. Jedním z nich je hospodárnost. Spotřeba paliva vůči srovnatelnému zážehovému motoru je mnohem nižší, což vyplývá z vyšší tepelné účinnosti vznětového motoru. Dále je třeba uvést, že v mnoha evropských zemích je motorová nafta zatížena nižší daní. Pro mnoho řidičů je tak vznětový motor, i přes vyšší pořizovací náklady, hospodárnější alternativou.

Dalším faktorem je „radost z jízdy“ u vznětového motoru. Vlivem přeplňování je dosaženo vysokého stupně naplnění válce již při nízkém rozsahu otáček motoru, čímž motor vyvine vysoký točivý moment. A ten je rozhodující pro tažnou sílu motoru.

V neposlední řadě je to ekologická nezávadnost. Dříve vozidla se vznětovým motorem při vysokém zatížení produkovala kouřovou clonu, ale s vylepšením vstřikovacích systémů a elektronickou regulací jsou u dnešních vznětových motorů plněny nejpřísnější emisní normy.

S přísnějšími emisními normami u spalovacích motorů stoupá i potřeba přesného řízení a načasování vstřikované dávky paliva. Předpokladem k správnému řízení je potřeba znát co nejpřesněji aktuální stav, ve kterém se nachází spalovací motor. K rychlému snímání provozního stavu motoru nám slouží řada snímačů, jejichž důležitost s vývojem nových vstřikovacích systémů stoupá. U prvních systémů vstřikování byla hodnota počátku a množství vstřiku nastavena mechanicky z výroby a dala se regulovat jen v omezené míře. V dnešních systémech se mechanické principy nastavování už téměř nevyskytují. Příkladem takového systému je i Common Rail systém, kde časování a regulaci provádí řídící jednotka na základě snímání provozních dat. Proto se v posledních letech zvedly požadavky na kvalitu, přesnost a rychlost používaných snímačů. Jedním s nejnovějších typů jsou i snímače pracující s piezoelektrickými krystaly, jejichž vývoj započal teprve v nedávné době. Tyto krystaly jsou v moderních automobilech využívány i pro převod elektrické energie na mechanický pohyb, a to v komponentech, které se nazývají aktuátory. Výzkum nových krystalů v tomto relativně novém technickém odvětví dává příležitost pro nové objevy a zdokonalování, které může být následně využito v senzorice pro výrobu dokonalejších snímačů nebo ve zmíněných aktuátorech.

1 HISTORIE A VÝROBCI SYSTÉMŮ COMMON RAIL

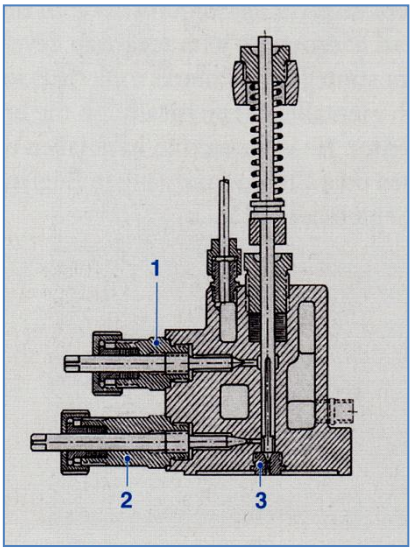
1.1 Historie vznětového motoru

Dieselův motor

První funkční prototyp vznětového motoru vymyslel a zkonstruoval v roce 1897 ve spolupráci s firmou MAN Rudolf Diesel. Tento motor používal jako palivo těžký olej, byl vysoký kolem tří metrů a vážil asi 4,5 tuny. Motory o takových rozměrech nebylo možné použít v automobilech, a proto sloužily jako stabilní zdroje energie pro pohon různých zařízení nebo pohonné jednotky velkých lodí.

Dodávka paliva u prvních motorů

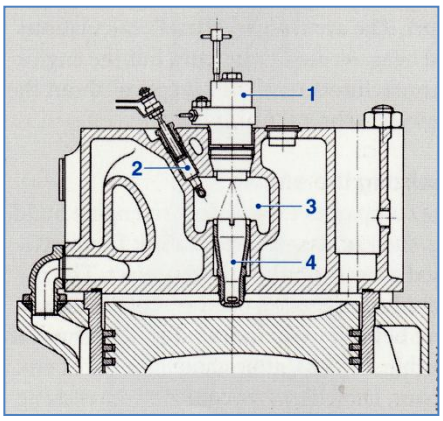
Rudolf Diesel při konstrukci svého motoru použil k zásobování paliva do spalovacího motoru vstřikovač, který vytvářel směs paliva a stlačeného vzduchu. Pro tvorbu stlačeného vzduchu, který pomáhal přivádět palivo do válce, bylo zapotřebí použít vzduchový kompresor. Vstřikovač obsahoval dva ventily (jeden pro přívod stlačeného vzduchu a druhý pro přívod paliva) a trysku s jehlou, která byla otevírána vačkou v závislosti na poloze klikové hřídele. Velkou nevýhodou byl těžký a drahý vzduchový kompresor a také to, že dodávka vstřikovaného množství byla velmi omezena. Proto nebylo možné dosáhnout většího naplnění válce při vyšších otáčkách motoru.



Obrázek 1 Vstřikovač paliva a stlačeného vzduchu [9]
1 - přívod stlačeného vzduchu
2 - přívod paliva
3 - jehla trysky

Vstřikování paliva do předkomůrky

Systém vstřikování paliva do předkomůrky, jenž je také nazýván nepřímé vstřikování, byl poprvé použit u motoru značky Benz v roce 1909. U tohoto typu motoru bylo již palivo stlačováno na 0,23 - 0,25 MPa a vstřikováno do předkomůrky umístěné v hlavě válců motoru. Směs paliva a vzduchu se tvoří v předkomůrce, která je spojena s válcem motoru malým kanálkem. Při vstříknutí paliva do předkomůrky dojde k zapálení směsi. Protože vytvořená směs obsahuje jen malé množství vzduchu, shoří jen částečně. Zbytek zahřátého paliva proudí kanálkem do válce motoru, kde se smísí s nasátým vzduchem a dojde k dohoření. Funkce předkomůrky je tedy příprava a předehřátí zápalné směsi a díky ní bylo možné odstranit problémy s komplikovaným a drahým kompresorem vzduchu používaným u prvních motorů tohoto typu.



Obrázek 2 Motor s předkomůrkou [9]
1 - vstřikovací ventil
2 - žhavicí svíčka
3 - předkomůrka
4 - propojovací kanálek

Přímé vstřikování

První vznětový motor pracující s přímým vstřikem byl v roce 1923 motor značky MAN. Motor používal jako palivo velmi lehký olej, jenž byl vstřikován přímo do spalovací komory válce s použitím vstřikovacího čerpadla. Motory s přímým vstřikováním paliva byly v nákladních automobilech používány převážně od šedesátých let minulého století a postupně vytlačily motory s předkomůrkou. U osobních automobilů se z důvodu nízké hladiny hluku používaly motory s předkomůrkou až do devadesátých let. Přímé vstřikování paliva je nejpoužívanější systém vstřikování paliva v současných motorech (vznětových i zážehových).

1.2 Historie systému Common Rail

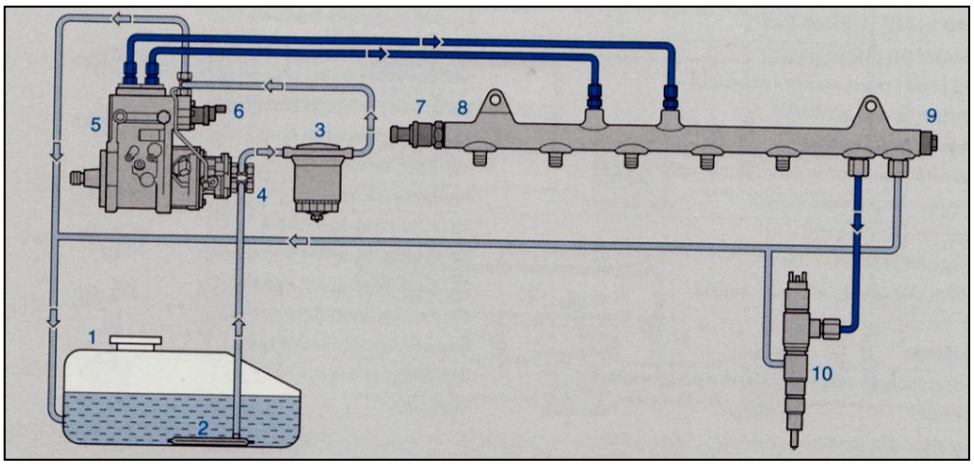
Prototyp systému common rail vyvinul koncem 60. let Švýcar Robert Huber. Ve vývoji v období let 1976 až 1992 pokračovala Spolková vysoká technická škola v Curychu. V polovině devadesátých let Dr. Shohei Itoh a Masahiko Mijaki z firmy Denso vyvinuli common rail pro velká nákladní vozidla. Prvním prakticky použitelným systémem označeným *ECD-U2 Common Rail* byl vybaven automobil Hino Raising Ranger. V devadesátých letech spolupracovaly na vývoji firmy Magneti Marelli, Výzkumné centrum Fiat a Elasis, tato fáze skončila v roce 1994. Koncem roku 1993 zakoupila patenty německá firma Robert Bosch GmbH a pokračovala ve výzkumu a vývoji pro uvedení do sériové výroby. V roce 1997 přišly na trh první modely osobních automobilů, nejprve 1. října Alfa Romeo 156 1.9 JTD a později i Mercedes-Benz E 320 CDI. [1]

1.3 Výrobci

1.3.1 BOSCH

Generace CR	Maximální tlak	Vstřikovač	Vysokotlaké čerpadlo
1. generace (osobní vozidla)	135...160 MPa	s elektromagnetickým ventilem	CP1 Regulace tlaku na straně vysokého tlaku s regulačním tlakovým ventilem
1. generace (nákladní vozidla)	160 MPa	s elektromagnetickým ventilem	CP2 Regulace množství na straně sání s dvěma elektromag. ventily
2. generace (osobní a nákladní vozidla)	160...220 MPa (ve vývoji 250 MPa)	s elektromagnetickým ventilem	CP3, CPN5,CP4.1(2) Regulace množství na straně sání s dávkovačem
3. generace (osobní vozidla)	180...220 MPa (ve vývoji 250 MPa)	piezoelektrický inline (BOSCH)	CP3, CPN5,CP4.1(2) Regulace množství na straně sání s dávkovačem
4. generace (nákladní vozidla)	systémový 90...120MPa vstřikovací 200...250 MPa	se dvěma elektromagnetickými ventily, jeden jako násobič tlaku	CPN5 Systém má násobič tlaku v injektoru - HADI (Hydraulically Amplified Diesel Injector)

Tab. 1: Generace systémů Bosch Common Rail



Obrázek 3 Common Rail Bosch [9]
1 – nádrž, 2 – předfiltr, 3 – palivový filtr, 4 – dopravní čerpadlo, 5 – vysokotlaké čerpadlo, 6 – dávkovač, 7 – snímač tlaku, 8 – rail, 9 – regulační ventil, 10 - vstřikovač

Vstřikovací systém se skládá z vysokotlakého čerpadla, společného vysokotlakého zásobníku paliva tzv. railu, injektorů, elektronické řídící jednotky (ECU), několika senzorů a akčních členů. Injektory jsou pomocí vysokotlakých trubek napojeny na rail. Vysoký tlak v railu je generován zpravidla pomocí radiálního pístového čerpadla. Hladina tlaku paliva je řízena pomocí regulačního obvodu s uzavřenou zpětnou vazbou, která obsahuje tlakový snímač, řídící jednotku, jeden nebo dva regulátory a v některých případech i pojistný ventil. Vstřikování paliva do spalovacího prostoru zajišťuje vysokorychlostní vstřikovač s integrovanou tryskou. Vstřikovač je ovládán elektrickým signálem z řídící jednotky a je schopen dávkovat palivo již od 0,5 mg při jednom vstřiku. Jeden pracovní cyklus může být rozdělen do několika izolovaných předvstřiků, hlavních vstřiků a dodatečných vstřiků, čímž lze dosáhnout nižší hlučnosti a lepšího spalování směsi. [3]

Systém Common Rail 3. generace s Piezo-Inline inovativní technikou a tlakem v systému 160 MPa zavedený v roce 2003 ukazuje ve vývoji zcela nový směr. K ještě většímu omezení vzniku škodlivin Bosch tuto generaci dále vyvinul pro systémové tlaky až 220 MPa, přičemž vývoj stále není ukončen a vstřikovací tlaky mají potenciál ještě vzrůst.

Aby mohla firma Bosch nabídnout vedle stávajících systémů Common Rail další náročná řešení, vyvinula pro oblast nákladní dopravy už čtvrtou generaci systému vstřikování Common Rail. Na tomto stupni vývoje je u nákladního vozu poprvé aplikován hydraulicky zesilující vstřikovač nafty. Tento vstřikovač pracuje s převodovým pístem, který zesiluje systémový tlak v railu a umožňuje dosáhnout vstřikovacích tlaků až 250 MPa. Tato u nákladních vozidel nová technika otevírá možnost pracovat v samotném řídícím systému se zjevně nižším tlakem, který je snadněji ovladatelný, a požadovaný maximální tlak vytvářet teprve až ve vstřikovači. Téměř celý systém tak lze dimenzovat na podstatně nižší tlaky, což snižuje náklady a nároky na výrobu. Požadovaný konstrukční prostor u vstřikovače čtvrté generace Common Rail přitom v podstatě odpovídá potřebě tradičního vstřikovače druhé generace. [2]

Výhody 4. generace:

- systémový tlak až 120 MPa
- posílení tlaku = 1 : 2,2
- vstřikovací tlak až 250 MPa

- volitelný tlakový profil v průběhu vstřiku (boot/ramp/square)
- téměř identický konstrukční prostor jako injektor 2. generace

1.3.2 CUMMINS

1.3.2.1 Cummins Common Rail (CCR)

Vstřikování common rail je používáno v motorech, kde se dříve využívalo systémů čerpadlo-tryska (PLN). Dále se používá ve středně velkých a malých motorech. Cummins CR palivová čerpadla nabízí vyšší vstřikovací tlak a vyžadují méně energie k provozu, což vede ke snížení spotřeby paliva a emisí. Čerpadlo CCR se používá na motorech Cummins ISL 9 l a ISC 8 l.

1.3.2.2 Cummins XPI Systém

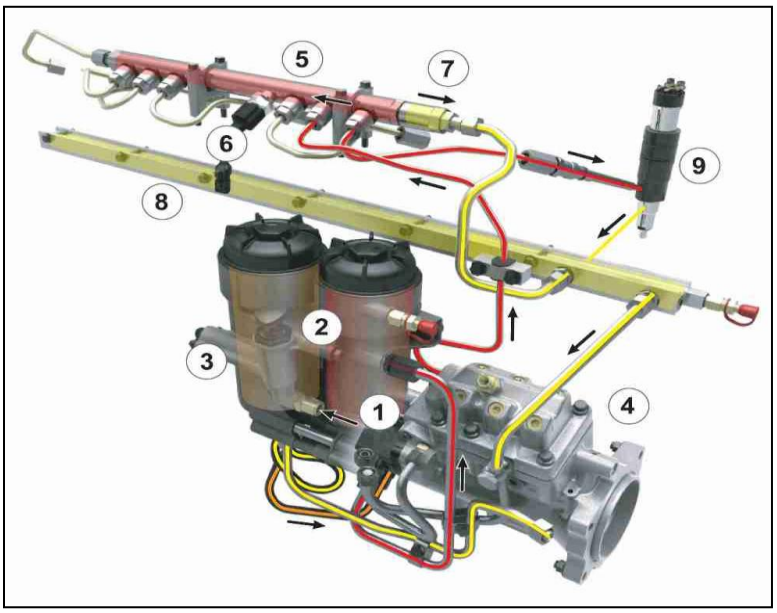
Cummins XPI (Extra High-vstřikování), byl vyvinut společně s firmou Scania. Vyznačuje se vysokým vstřikovacím tlakem v místě spalování a nižším obsahem částic ve výfukových plynech, což eliminuje potřebu zpracování výfukových plynů, aby mohl splnit emisní normu EURO 5. Nový systém umožňuje velkou svobodu ve volbě úhlu předstihu, trvání vstřiku a nastavení vstřikovacího tlaku. Systém Common Rail není závislý na poloze vačkové hřídele a vysoký vstřikovací tlak je k dispozici po celou dobu bez ohledu na otáčky motoru. Řízení systému vstřikování paliva je plně elektronické. Palivo pod vysokým tlakem je vždy k dispozici v railu (zásobník), takže vstřikování paliva je možné kdykoliv, bez ohledu na pozici vačkové hřídele.

Palivo je do systému přiváděno přes hrubý palivový filtr s odlučovačem vody. Voda z paliva proudí do jímky s automatickým vypouštěcím ventilem. Palivo se dále přivádí přes regulační ventil do vysokotlakého čerpadla. Čerpadlo a regulační ventil jsou jeden celek. Účelem regulačního ventilu je nastavování tlaku v rozsahu od 50 MPa (při volnoběžných otáčkách) do maximální výše 240 MPa. Průměrný provozní tlak 180 MPa. Vstřikovací ventil je ovládán elektronicky řídící jednotkou na základě signálů z tlakového snímače v railu a snímače natočení klikové hřídele. Mechanický tlakový ventil zabraňuje nadměrnému zvýšení tlaku v railu, takže odvádí přebytečné palivo zpět do nádrže prostřednictvím zpětného potrubí. Solenoidové vstřikovače jsou průběžně plněny vysokým tlakem paliva z railu. Jednotlivé vstřiky zajišťuje elektronicky řízený elektromagnetický ventil, který se nachází přímo ve vstřikovači. Ten je otevřený, dokud řídící jednotka přivádí na elektromagnetický ventil napětí. Množství vstřikovaného paliva je závislé na čase otevření vstřikovače a tlaku paliva v railu. Palivo se vstřikuje do spalovací komory tryskou vstřikovače vícefázovým vstřikováním. V první fázi je do spalovací komory motoru vstříknuta malá počáteční (pilotní) dávka, která je určena ke snížení hluku a zajišťuje nízkou úroveň emisí. Pak následuje hlavní (pracovní) vstřik, který se vstřikuje do již hořící směsi z předvstřiku. Konečná dávka (povstřik) musí být dodána krátce po hlavním vstřiku, aby snížila množství pevných částic (sazí) a NO_x (oxidy dusíku) ve výfukových plynech. A také umožňuje nastavit teplotu výfukových plynů pro jejich následné zpracování.[5]

1.3.2.3 Vysokotlaké vstřikování směsi paliva a plynu.

V roce 2008 si nechala firma Cummins patentovat systém vstřikování směsi paliva se vzduchem. Stlačený vzduch je do palivového systému přiváděn v oblasti vysokotlakého čerpadla paliva v poměru přibližně 1% objemu paliva/1 atm vzduchu. Směs je nadále stlačována v railu na 50 – 260 MPa a poté vstřikována injektory do spalovacího prostoru motoru. Po vstříknutí paliva se stlačený vzduch obsažený ve směsi rozpíná, tím přispívá k lepšímu rozprášení (atomizaci)

paliva a snížení vstřikované dávky. Tento inovativní systém umožňuje další snižování spotřeby paliva a emisí ve výfukových plynech.[6]



Obrázek 4 Schéma Scania XPI [5]
1. Podávací čerpadlo (nízký tlak) 2. Palivový filtr s odlučovačem vody 3. Rozdělovač 4. Vysokotlaké čerpadlo 5. Rail (zásobník) 6. Tlakový snímač 7. Mechanický tlakový ventil 8. Zpětné potrubí 9. Elektronicky řízené vstřikovače

1.3.3 DELPHI

1.3.3.1 UPCR (Unit Pump Diesel Common Rail) systém

UPCR je inovativní koncept systému řízení motoru, který využívá pokročilé technologie common rail s přihlédnutím k "zelené strategii". Je především určen pro výrobce velmi malých, 1-, 2- nebo 3-válcových vznětových motorů, použitelných v malých automobilech nebo pohonných jednotkách v zemědělské a průmyslové technice. Nabízí výrobcům motorů ekonomické řešení při dosažení optimální spotřeby paliva a splnění emisní normy Euro 4.

Systém UPCR se skládá z rychlých solenoidových vstřikovačů, společného zásobníku paliva, řídící jednotky motoru (ECM) a silného jednopístového vysokotlakého čerpadla.[8]

Obrázek 5 UPCR (Unit Pump Diesel Common Rail) systém [8]

Výhody:

- nízké pořizovací náklady
- kompaktní velikost umožňující použití ve velmi malých motorech
- nízká hmotnost systému – přispívá ke snížení emisí CO_2

- vysoký tlak v systému (až 160 MPa) dosahuje vysoké účinnosti a výkonu motoru
- rychlá odezva vstřikovačů – jsou schopny až 5-ti vstřiků v jednom cyklu
- jednotku ECM lze vybrat v omezené verzi (DCM 2.5) nebo plně funkční (DCM 3.x), která umožňuje řízení turbodmychadla, recirkulaci výfukových plynů, ovládání škrticí klapky ap.

1.3.3.2 Delphi Multec Light Duty Diesel Common Rail systém

Systém se skládá z rychlých elektromagnetických vstřikovačů, které poskytují přesné odměření paliva a výkon podobný konkurenčním piezoelektrickým vstřikovačům. Dále obsahuje jednopístové vysokotlaké palivové čerpadlo DPF6 jehož účinnost se pohybuje nad 90% a dosahuje tlaku kolem 200 MPa. Tento systém je vybaven patentovanou individuální vstřikovací charakteristikou (I3C – Individual Injection Characterization), jenž pomáhá zajistit optimální kontrolu vícenásobného vstřikování po celou dobu životnosti motoru. To vede k udržení nízké hlučnosti a hladiny emisí.[8]

Obrázek 6 Delphi Multec Light Duty Diesel Common Rail systém [8]

Výhody:

- jednoduchý, modulární, robustní a přesný systém vstřikování paliva
- stabilní emise a vynikající akustický výkon po celou dobu provozu
- vstřikovače nevyžadují chlazení zpětně vedeného paliva
- trubkový rail hydraulicky optimalizuje tlumení vln uvnitř railu, což vede k přesnějšímu dávkování paliva
- palivový filtr je navržen tak, aby vydržel po celou dobu životnosti
- splňuje emisní normy Euro 6
- umožňuje až 9 vstřiků v jednom cyklu
- vstřikovače pracují s napětím baterie a mají nižší energetickou náročnost oproti konkurenčním systémům (piezo vstřikovače)

1.3.3.3 Delphi F2e Ultra High Pressure Heavy Duty Diesel Common Rail systém

F2e systém je zcela nový koncept v technologii Common Rail s velmi vysokým vstřikovacím tlakem. Tento systém se montuje přímo do hlavy válců motoru. Vyznačuje se tím, že obsahuje dva druhy vstřikovačů. Jeden vstřikovač je stejný jako u klasického systému CR, zatímco druhý vstřikovač je stlačován vačkou v hlavě válců a slouží k natlakování railu na velmi vysoký tlak. Systém F2e je primárně určen pro motory s velkým objemem (9 – 15 litrů). Vstřikovače jsou u tohoto systému řízeny stejnosměrným napětím o velikosti 50 V.[8]

Výhody:

- malé rozměry umožňující montáž do hlavy válců
- vysoká účinnost
- nízký mechanický hluk
- velmi malé vstřikované množství paliva z důvodu vysokého tlaku
- tlak vstřikovaného paliva až 250 - 300 MPa
- splňuje emisní normu Euro 6

Obrázek 7 Delphi F2e Ultra High Pressure Heavy Duty Diesel Common Rail systém [8]

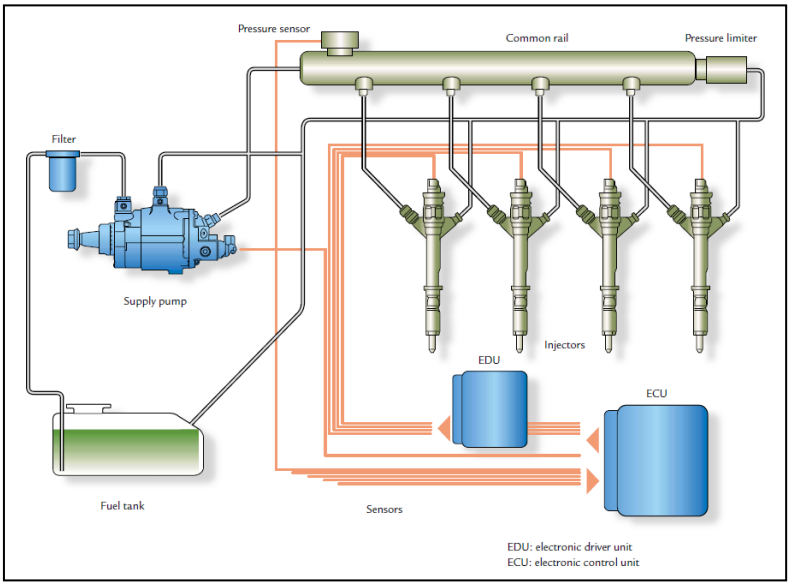
1.3.4 DENSO

1. generace: až 145 MPa (ECD-U2P)
2. generace 180 MPa + (HP3, HP4)

Firma Denso začala vyrábět první systém Common Rail pro nákladní vozidla již v roce 1995. V roce 1999 začali dodávat první generaci systému ECD-U2P do osobních vozidel značky Toyota. O rok později dodali těchto systémů do osobních aut 78 000 ks. V následujících letech, z důvodů přísnějších emisních norem, vyvinuli druhou generaci s tlakem až 180 Mpa a v roce 2010 bylo firmou Denso dodáno již 12 mil. systémů CR. Konstrukce celého systémů je obdobná jako u ostatních výrobců. [7]

Výhody:

- rychlá odezva vstřikovačů - interval mezi předvstřikem a hlavním vstřikem ~ 0,7 ms
- keramická sedla ventilů – minimalizace velikosti
- palivo je z nádrže dopravováno el. dopravním čerpadlem, což vede k ustálemému tlaku v nízkotlaké části systému
- Splňuje EURO 4/5/6 emisní požadavky



Obrázek 8 Systém Common Rail Denso [7]

2 ČÁSTI SYSTÉMU VSTŘIKOVÁNÍ COMMON RAIL BOSCH, JEHO ŘÍZENÍ A REGULACE

Tato bakalářská práce vznikla ve spolupráci s firmou Bosch Diesel, proto budou v další části uvedeny komponenty systému Common Rail Bosch, které se mohou u ostatních výrobců systému common rail lišit.

2.1 Konstrukční části systému Common Rail BOSCH

Na obrázku 7 můžeme vidět všechny součásti plně vybaveného systému Common Rail čtyřválcového vznětového motoru osobního vozidla. Některé součásti nemusejí být použity u všech typů vozidel. Pro úpravu výfukových plynů jsou uvedeny příklady dvou kombinovaných systémů (a nebo b).

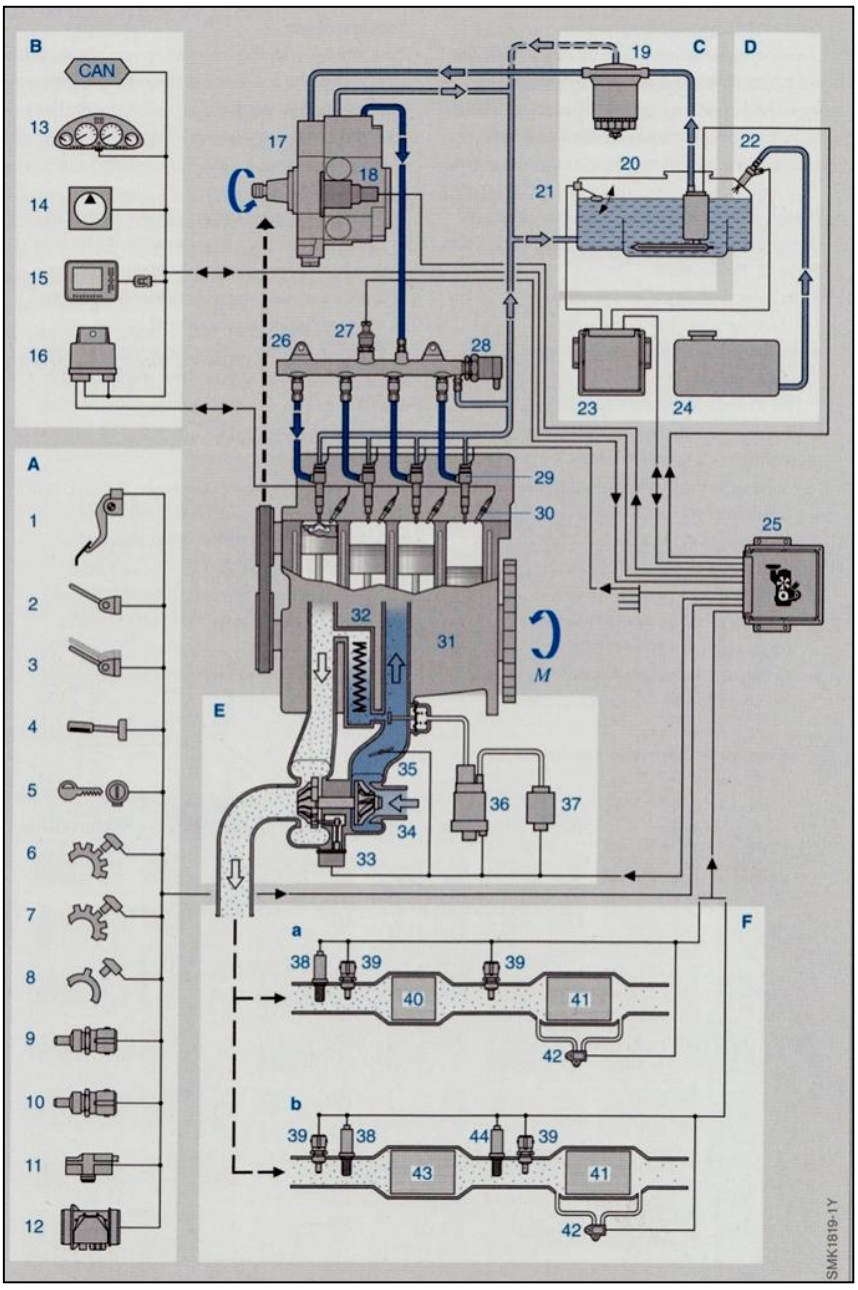
Popis obrázku:

Motor, řízení motoru a součásti vysokotlakého vstřikování
17 – vysokotlaké čerpadlo
18 – dávkovací jednotka (škrtící ventil)
25 – řídící jednotka ECU
26 – zásobník paliva – rail
27 – snímač tlaku v railu
28 – regulační tlakový ventil (DRV)
29 – vstřikovač
30 – žhavicí svíčka
31 – vznětový motor
M – krouticí moment

A Snímače a čidla požadovaných hodnot
1 – snímač plynového pedálu
2 – spojkový spínač
3 – brzdový spínač
4 - tempomat
5 – spínací skříňka
6 – snímač rychlosti
7 – snímač ot. klikové hřídele
8 – snímač ot. vačkové hřídele
9 – snímač teploty motoru
10 – snímač teploty vzduchu
11 – snímač tlaku
12 – snímač hmotnosti nasávaného vzduchu

B Datové rozhraní
13 – panel přístrojů
14 – jednotka klimatizace
15 – diagnostické rozhraní
16 – relé žhavicích svíček
CAN (Controller Area Network)

C Palivový systém
19 – palivový filtr s ventilem
20 – nádrž s palivovým čerpadlem



Obrázek 9 Konstrukční části systému CR BOSCH [9]

21 – snímač hladiny paliva
D Systém přidávání aditiv
22 – dávkovač aditiv
23 – řídící jednotka dávkování
24 – zásobník aditiva

E Přeplňování
32 – EGR ventil
33 – nastavovač lopatek turbodmychadla
34 – turbodmychadlo VTG (Variable Turbine Geometry)
35 – klapka
36 – ventil přepouštění výfuk. plynů
37 – podtlaková pumpa
F Čištění výfukových plynů
38 – lambda sonda – typ LSU
39 – snímač teploty výfuk. plynů
40 – oxidační katalyzátor
41 – filtr pevných částic
42 – snímač rozdílu tlaků
43 – katalyzátor NO_x
44 – lambda sonda NO_x

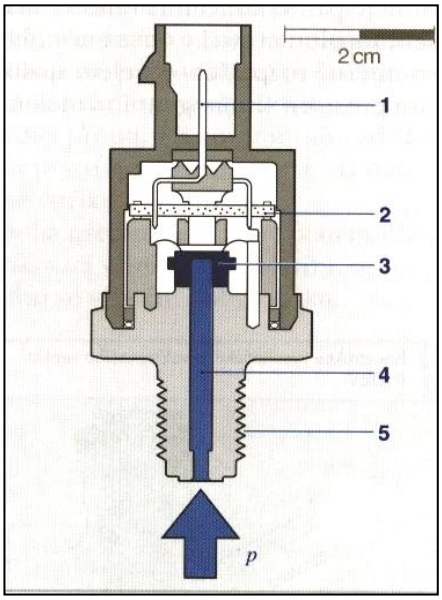
2.2 Snímače a elektronická část systému

Snímače systému CR vyhodnocují všechny důležité hodnoty o provozním stavu. Tyto vstupní informace jsou ve formě analogových elektrických signálů přivedeny do řídící jednotky, kde jsou převedeny na digitální signály a následně zpracovány pro řízení akčních členů.

2.2.1 Snímač vysokého tlaku

Firma Bosch používá k měření vysokého tlaku v CR systému vlastní tlakové snímače. Pro první generaci systému se vyráběl snímač s maximálním tlakem do 160 MPa, pro další generace se začaly vyrábět snímače s rozsahem do 180, 200, až dnešních 330 MPa. [3]

Snímač je tvořen membránou, na které jsou upevněny rezistory v můstkovém zapojení. Rozsah měření je závislý na síle membrány. Čím je síla materiálu větší, tím je větší schopnost měřit hodnoty vyššího tlaku. Působením tlaku dochází k prohnutí membrány a na tomto základě se mění na rezistorech odpor. Například prohnutí o 20 µm odpovídá zvýšenému tlaku o 150 MPa. Napětí na můstku je v rozsahu 0–80 mV zesíleno ve vyhodnocovacím obvodu snímače a výsledná hodnota 0–5 V je signálem pro řídící jednotku. V ní je proveden výpočet velikosti tlaku paliva v railu v závislosti na zadané charakteristice snímače.[4]

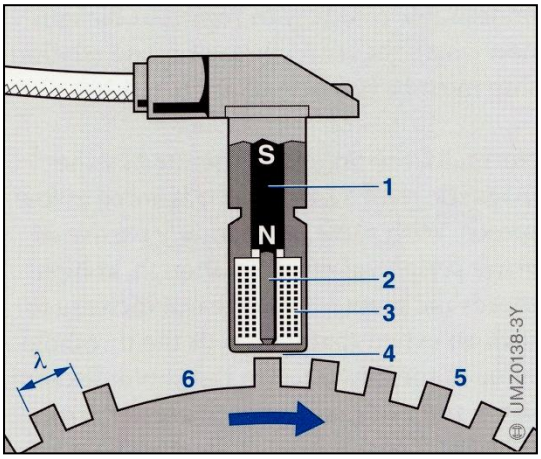


Obrázek 10 Snímač vysokého tlaku v railu [9]
1 – konektor, 2 – vyhodnocovací obvod, 3 – ocelová membrána s tenzometrickými rezistory, 4 – tlaková přípojka, 5 – upevňovací závit

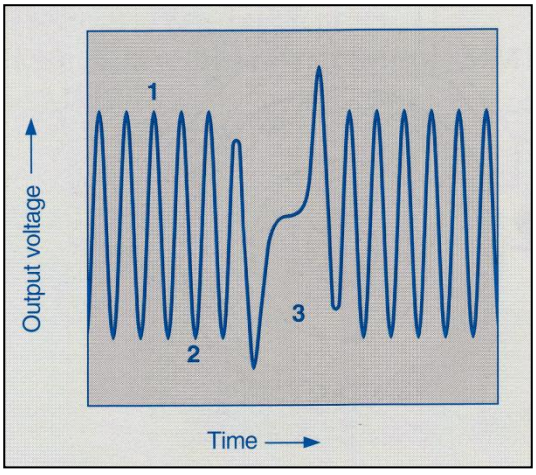
2.2.2 Snímač otáček klikové hřídele

Poloha pístu válce je rozhodující pro správný okamžik vstřiku. Informace o natočení klikové hřídele a poloze pístu vypočítává řídící jednotka na základě signálů indukčního snímače. Na klikové hřídeli je namontováno feromagnetické ozubené kolo s 60-2 zuby, přičemž dva zuby jsou vynechány. Tato obzvláště velká zubová (referenční) mezera je přiřazena definované poloze klikové hřídele prvního válce. Snímač otáček (obr. 11) snímá sled zubů kola snímače. Skládá se z permanentního magnetu a jádra z měkkého železa s měděným vinutím o určitém počtu závitů N. Když míjejí zuby a mezery snímač, dochází v něm ke změně magnetického toku ϕ a je indukováno střídavé napětí u ve tvaru sinusoidy. Amplituda střídavého napětí silně narůstá se stoupajícími otáčkami. Dostatečná amplituda je k dispozici od min. 50 otáček za minutu.[10] Napětí indukované v cívce je dáno vztahem:

$$u = N \cdot d\phi / dt \tag{1}$$



Obrázek 11 Snímač otáček klikové hřídele[4]
1 – permanentní magnet, 2 – jádro z měkkého železa, 3 – vinutí, 4 – vzduchová mezera, 5 – ozubené kolo, 6 – referenční mezera, λ – interval zubu



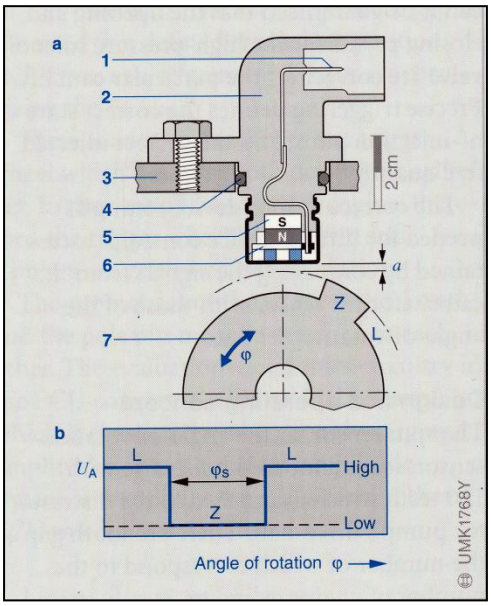
Obrázek 12 Signál ze snímače otáček[4]
1 – zub, 2 – mezera, 3 – referenční mezera

2.2.3 Snímač otáček vačkové hřídele

Vačková hřídel motoru ovládá sací a výfukové ventily motoru. Otáčí se poloviční otáčkami než kliková hřídel. Její poloha určuje, zda se píst, který se pohybuje k horní úvrati, nachází v kompresním taktu se zapojeným zapalováním, nebo výfukovém taktu. Z polohy klikové hřídele nemusí být tato informace během startu získána. Naproti tomu za chodu je informace, získaná ze snímače polohy klikové hřídele, pro polohu motoru dostatečná. To znamená, že při výpadku snímače otáček vačkové hřídele za chodu zná řídící jednotka stále polohu motoru. Princip měření polohy vačkové hřídele je založen na Hallově jevu. Na vačkové hřídeli je umístěn zub z feromagnetického materiálu, který se otáčí s vačkou. Když tento zub mine polovodičovou destičku tloušťky d snímače otáček vačkové hřídele, kterou protéká proud I, tak jeho magnetické pole s magnetickou indukcí B_y vychýlí elektrony na polovodičové destičce kolmo ke směru proudu. Tím vzniká krátkodobý napěťový signál (Hallův signál), který řídící jednotce oznámí, že se první válec nachází v kompresi.[10]

$$U_H = R_H \cdot \frac{I \cdot B_y}{d} \tag{1.1}$$

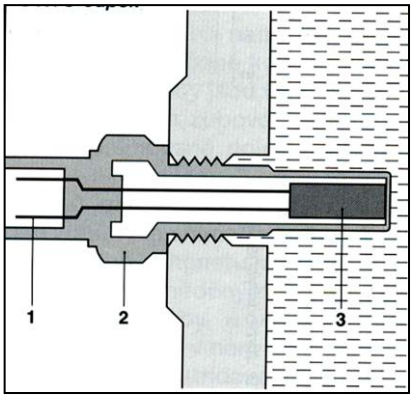
kde R_H je Hallova konstanta.



Obrázek 13 Snímač otáček vačkové hřídele[4]
a – snímač a ozubené kolo, b – výstupní napěťová charakteristika U_A, 1 – konektor, 2 – těleso snímače, 3 – blok motoru, 4 – těsnění, 5 – permanentní magnet, 6 – Hallův snímač, 7 – ozubené kolo, a – vzduchová mezera, b – úhel natočení, Z –zub, L - mezera

2.2.4 Snímače teploty

Snímače teploty jsou používány na více místech - např. v chladicím okruhu chladicí kapaliny, v sacím kanálu, v motorovém oleji, ve zpětném vedení paliva atd. Konstrukčně se jedná o NTC (Negative Temperature Coefficient) nebo PTC (Positiv Temperature Coefficient) odpor, zapojený jako dělič napětí. Podle teploty T se mění hodnota odporu R a tím se mění i velikost proudu v děliči napětí a tím také úbytek napětí na měřícím odporu v řídící jednotce a ta udává teplotu chladicí kapaliny. Snímač je ve skutečnosti čtyřpólový, protože obsahuje dva elektricky oddělené měřicí elementy. Závislost odporu na teplotě je nelineární a je dána vztahem:



Obrázek 14 Snímač teploty[12]
1 – konektor, 2 – pouzdro, 3 – NTC/PTC odpor

$$R_1 = R_2 \cdot e^{B/K} \tag{1.2}$$

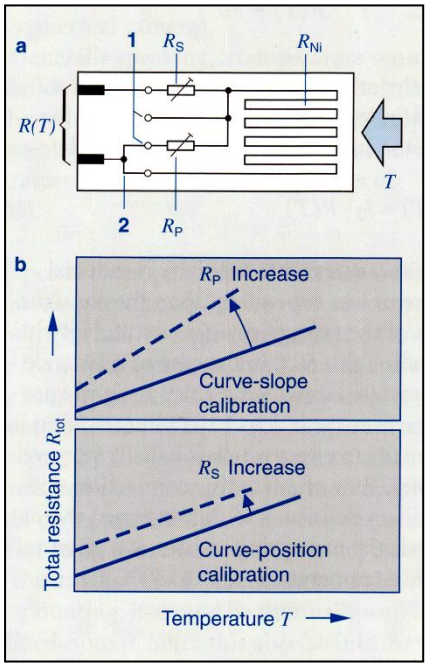
kde $K = 1/T_1 - 1/T_2$, R_1, R_2 jsou odpory při teplotách T_1, T_2 a B je materiálová konstatnta (B = 2000...5000 K).

Další variantou pro přesnější měření teplot jsou odporové snímače kovové, nejčastěji odporové čidlo Pt (měřící rozsah -220...850°C) nebo Ni (měřící rozsah -60...320°C). Snímač se

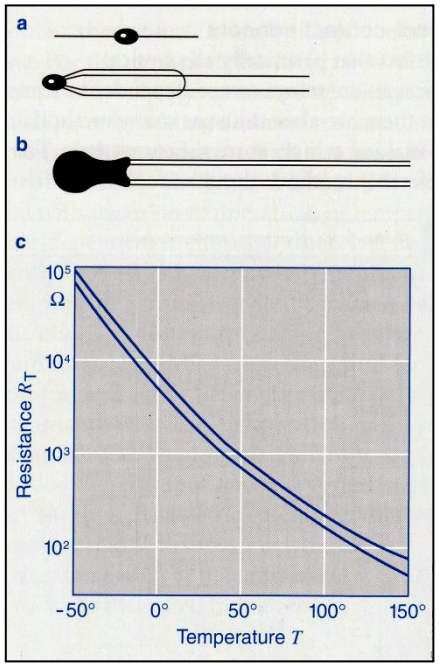
skládá z keramického tělíska, na kterém je navinut tenký drát s elektrickým odporem. Závislost odporu na teplotě je lineární a je dána vztahem:

$$R_2 = R_1 \cdot \left[1 + \alpha\left(\vartheta_2 - \vartheta_1\right)\right] \tag{1.3}$$

kde R_1, R_2 jsou odpory při teplotách ϑ_1, ϑ_2 a α je teplotní součinitel el. odporu



Obrázek 15 Kalibrace odporového snímače [4]
a - odporový snímač,b - charakteristická křivka
1 – pomocný kontakt, 2 – můstek,
R_S – sériový reostat, R_P – paralelní reostat,
R_{Ni} – odporové čidlo, R_{tot} – celkový odpor



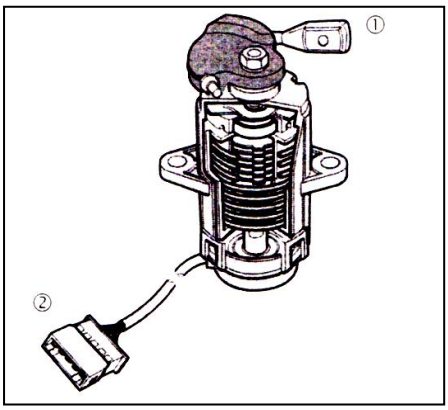
Obrázek 16 NTC odporový snímač [4]
a – perlový tvar, b – diskový tvar,
c – charakteristická křivka

2.2.5 Snímač polohy plynového pedálu

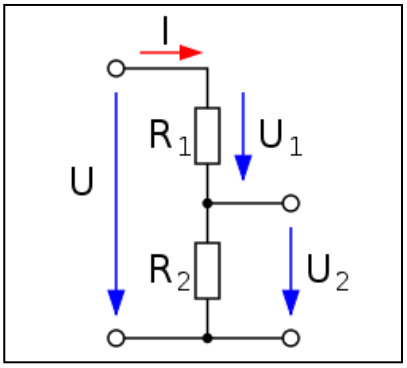
Snímač polohy plynového pedálu je smyčkový potenciometr. Je vestavěn pod plynovým pedálem a je s ním spojen krátkým lankem. Obsahuje kromě potenciometru volnoběžný kontakt a kontakt „Kick-Down“, který plní svoji funkci pouze u vozidel s automatickou převodovkou. Kromě toho obsahuje šroubovou pružinu, jejíž sílu musí řidič při sešlápnutí plynového pedálu překonat. Řídící jednotka vyhodnocuje hodnotu napěťového signálu ze snímače.

Pokud je plynový pedál v klidové poloze, je sepnut volnoběžný kontakt a řídící jednotka reguluje předepsané volnoběžné otáčky. Při sešlápnutí plynového pedálu se volnoběžný kontakt rozepne - regulace rovnoměrného chodu je přerušena. Potenciometr je zapojen jako posuvný napěťový dělič a řídící jednotka vyhodnocuje výstupní napětí U_2, které je úměrné vstupnímu napětí U:

$$U_2 = U \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \tag{1.4}$$



Obrázek 17 Snímač polohy brzdového pedálu [12]
1 – tažné lanko, 2 – připojovací konektor



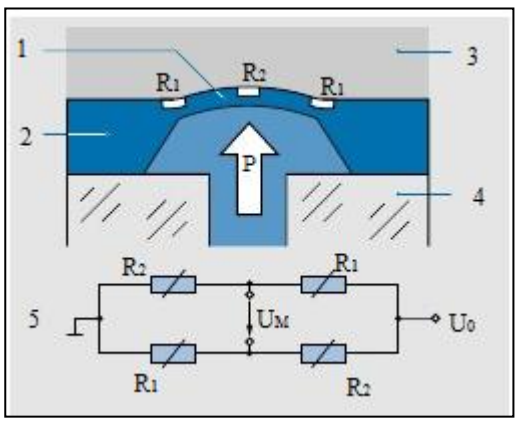
Obrázek 18 Zapojení snímače polohy plynového pedálu [11]

2.2.6 Snímač tlaku plnicího vzduchu

Nachází se buď v řídící jednotce a s místem odběru tlaku je spojen pryžovou hadičkou nebo se nachází přímo v sacím potrubí za mezichladičem plnicího vzduchu. Měří absolutní hodnotu plnicího tlaku. Snímač je vnitřně rozdělen na tlakový článek se dvěma měřicími elementy a na prostor s vyhodnocovacím obvodem. Tyto části se nacházejí na společné desce z keramického substrátu. Měřicí element je tvořen membránou ve tvaru zvonu, která uzavírá komoru s konstantním referenčním tlakem. Podle velikosti tlaku v sacím potrubí se mění velikost prohnutí membrány. Na membráně jsou naneseny piezorezistivní odpory R_1, R_2 (viz obrázek 19), jejichž měrná vodivost se mění vlivem mechanického napětí. Tyto odpory jsou zapojeny do Wheatsonova můstku, takže vychýlení membrány způsobí nerovnovážnost můstku. Napětí můstku U_M je tak mírou pro tlak v sacím potrubí. Úkolem vyhodnocovacího obvodu je zesílit napětí na můstku, kompenzovat vliv teploty a linearizovat tlakové charakteristiky. Výstupní signál z tohoto obvodu je přiváděn do řídící jednotky. Signál ze snímače plnicího tlaku využívá řídící jednotka k regulaci plnicího tlaku.[4]

Napětí na Wheatsonově můstku U_M si řídící jednotka spočítá ze vstupního napětí U_0 a z hodnot použitých odporů R_1, R_2 pomocí rovnice:

$$U_M = U_0 \cdot \left(\frac{R_1}{R_2 - R_1} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \tag{1.5}$$



Obrázek 19 Snímač plnicího tlaku vzduchu [9]
1 – membrána
2 – silikonový čip
3 – uzavřená komora s referenčním vakuem
4 – deska z keramického substrátu
5 – můstek z odpory
R_1, R_2 – piezorezistivní odpory
U_M – měřené napětí
U_0 – napájecí napětí
P – měřený tlak

2.2.7 Snímač hmotnosti nasávaného vzduchu

Tento snímač měří hmotnost vzduchu, kterou motor skutečně nasává. Pracuje na principu „vyhřívaného filmu“, který je obtékán a tím ochlazován nasávaným vzduchem. Plocha filmu (odpor R) je elektricky vyhřívaná proudem I_H na takovou teplotu, aby byl zachován stále stejný teplotní rozdíl vůči okolo proudícímu vzduchu. To znamená, že elektrický výkon P_{el} dodaný pro vyhřívání se rovná výkonu P_V odvedenému při proudění a ten je úměrný rozdílu teplot $\Delta\vartheta$, měrné tepelné vodivosti λ a koeficientu c_1 udávajícímu parametry snímače:

$$P_{el} = I_H{}^2 \cdot R = P_V = c_1 \cdot \lambda \cdot \Delta\vartheta \tag{1.6}$$

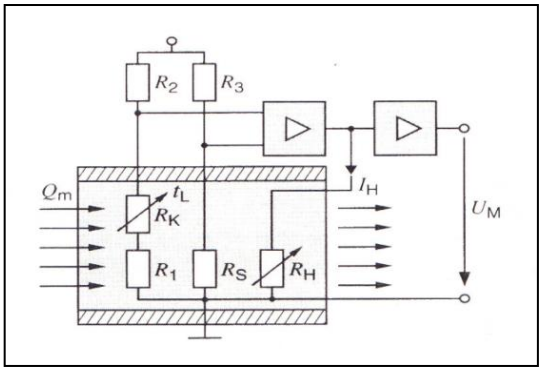
Z měrné tepelné vodivosti s pomocí hustoty ρ a rychlosti proudění v, můžeme přibližně vyjádřit hmotnostní tok Q_V (c_2 jsou přídavné tepelné ztráty konvekcí):

$$\lambda = \sqrt{\rho \cdot v} + c_2 = \sqrt{Q_V} + c_2 \tag{1.7}$$

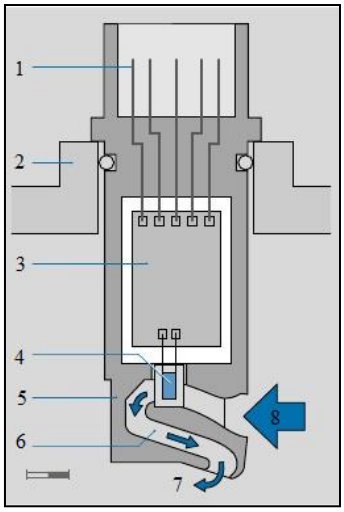
Úpravou rovnic potom dostaneme vztah mezi vyhřívaným proudem a hmotnostním tokem:

$$I_H = c_1 \cdot \sqrt{\left(\sqrt{Q_V}\right) + c_2} \cdot \sqrt{\Delta\vartheta / R} \tag{1.8}$$

Napětí U_M, které je k tomuto vyhřívání zapotřebí, slouží jako míra hmotnosti nasávaného vzduchu a je dále zpracováváno řídící jednotkou. Vliv teploty nasávaného vzduchu na jeho hmotnost je kompenzován snímačem teploty (odpor R_K). Snímač hmotnosti vzduchu je konstruován tak, že naměřená hodnota hmotnosti vzduchu nezávisí na znečištění „vyhřívaného filmu“. Snímač nemá žádné pohyblivé díly a klade nasávanému vzduchu minimální aerodynamický odpor.[12]



Obrázek 20 Zapojení snímače hmotnosti vzduchu [12]
R_K – snímač kompenzace teploty, R_H – vyhřívaný odpor (platinový film), R_S – odpor snímače, R_1, R_2, R_3 – odpory můstku, U_M – měřicí napětí, I_H – vyhřívací proud, t_L – teplota vzduchu, Q_M – hmotnost protékajícího vzduchu za časovou jednotku

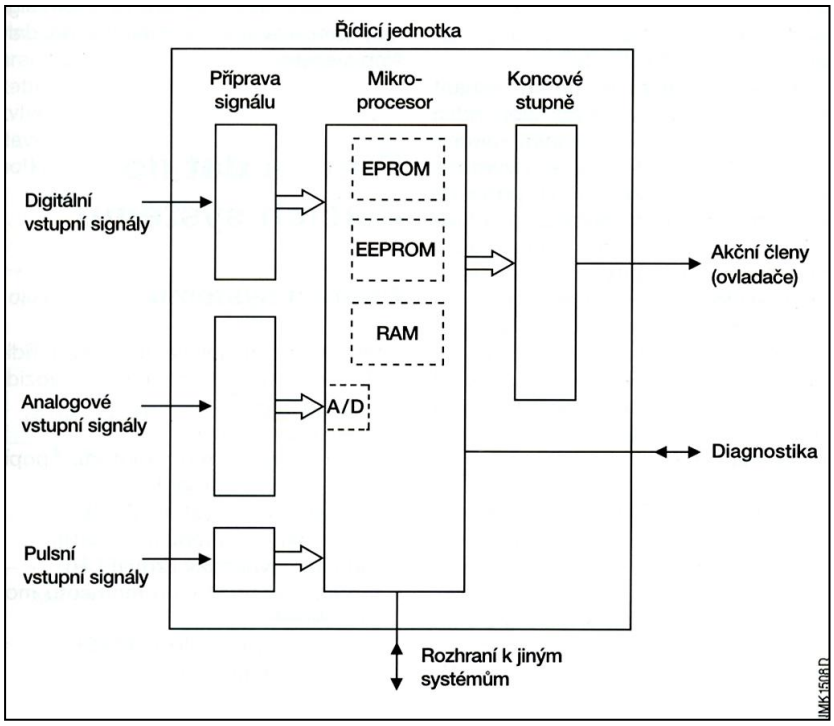


Obrázek 21 Snímač hmotnosti nasávaného vzduchu [9]
1 – svorka el. připojení, 2 – těleso měřicí trubky
3 – el. obvod, 4 – vyhřívaný film
5 – těleso snímače
6 – kanálek pro proudění měřeného vzduchu
7 – vývod vzduchu,8 – sání dílčího vzduchu

2.2.8 Elektronická řídící jednotka ECU (Electronic Control Unit)

ECU zpracovává data o provozním stavu motoru, které jí dodávají jednotlivé snímače, a omezuje přípustnou úroveň napětí. Signály ze snímačů mohou být analogové (např. snímač tlaku, potenciometr), digitální (např. sepnutí spínačů) nebo pulsně tvarované (např. induktivní snímač otáček). Řídící jednotka je dále propojena přes datové rozhraní s dalšími jednotkami např. ABS, klimatizace apod. Mikroprocesor v ECU tyto signály zpracovává a na základě uložených dat v paměti vytváří řídící signály pro akční členy (viz dále), které nastavují např.:

- startovací dávku
- režim jízdy
- regulaci volnoběhu
- regulaci klidného chodu
- regulaci rychlosti jízdy
- regulaci omezení dávky
- aktivní tlumení nerovnoměrného chodu
- odstavení



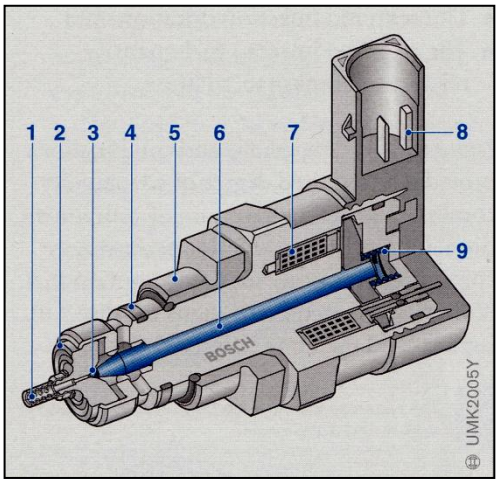
Obrázek 22 Zpracování dat v řídící jednotce [10]

2.3 Akční členy

Převádí elektrické výstupní signály z ECU na mechanický pohyb (např. regulaci tlaku, vstřikovaného množství paliva, načasování počátků vstřiků,..). ECU vypočítává nebo měří hodnoty ze snímačů a na jejich základě určuje nastavení hodnot pro optimální chod motoru.

2.3.1 Vysokotlaký regulátor DRV (Druck Regel Ventil)

Konstrukčně se jedná o cívku, jejíž kotva spojená s jehlou ventilu tlačí kuličku do sedla ventilu, viz obrázek 23. V sedle ventilu je otvor o průměru ~0,7 mm, kulička má průměr ~1,2 mm. Před filtr v sedle ventilu se lisuje kovový filtr s otvory o průměru ~60 µm, který zabraňuje zanesení ventilu nečistotami. Ventil je ovládán signálem s pulzně-šířkovou modulací (PWM) a může jím protékat až 250 l/h. Max. odběr proudu při plně zavřeném ventilu je ~1,6 A. V současnosti se vyrábí pro celou škálu pracovních tlaků a průtoků. [3]



Obrázek 23 Vysokotlaký regulátor DRV2 [9]
1 – filtr, 2 – dosedací hrana, 3 – sedlo
s kuličkou, 4 – těsnicí kroužek, 5 – závit,
6 – kotva, 7 – cívka, 8 – konektor, 9 - pružina

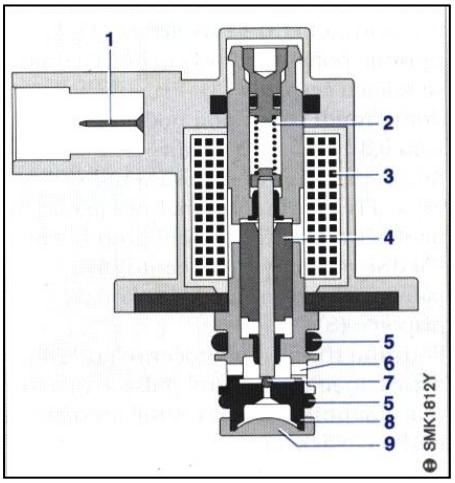
2.3.2 Nízkotlaký regulátor

U aplikací s vyššími nároky na výkon motoru (nákladní vozidla, pracovní stroje, lodě) je použití vysokotlakého regulátoru problematické. Ventil by musel mít dostatečně dimenzovaný průtok, aby byl schopen i u velkého motoru s odpovídající spotřebou reagovat třeba na situaci, kdy při plných otáčkách motoru je prakticky nulové vstřikované množství (např. brzdění motorem). Další otázkou je životnost čerpadla. V aplikaci s vysokotlakým regulátorem je množství paliva dodávané do railu závislé na otáčkách čerpadla. Při nejvyšších otáčkách je čerpadlo nejvíce namáháno bez ohledu na požadovaný výkon, který definuje řidič stlačením plynového pedálu. Při brzdění motorem ve vysokých otáčkách stlačuje čerpadlo stále velké množství paliva, které na druhé straně odchází nevyužité zpět do nádrže. Výkonová ztráta činí v takovém případě někdy více než 5 kW. Největší část tohoto výkonu je ve formě tepla absorbována pracovním médiem, což vede k tomu, že je nutné dostatečně dimenzovat chlazení palivového systému.

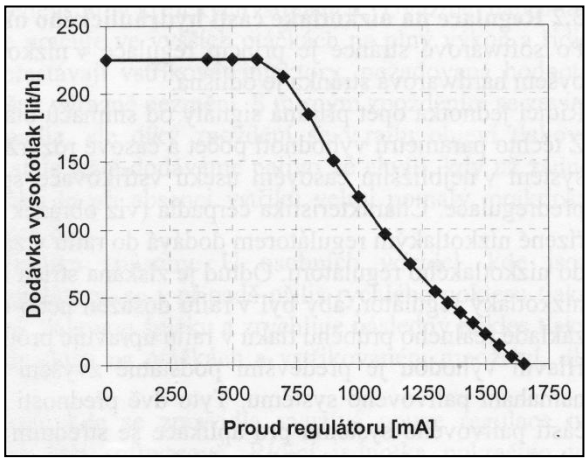
Výše popsané problémy řeší regulace v nízkotlaké části systému. Nízkotlaký regulátor (ZME - ZuMessEinheit) řídí množství paliva, které čerpadlo stlačuje do railu. Veškeré stlačené palivo je

spotřebováno na vstřiky do válců motoru nebo unikne konstrukčními netěsnostmi v jednotlivých komponentech do přepadu. Na obrázku 24 je řez nízkotlakým regulátorem ZME: píst, na který zespodu působí pružina, je kotvou cívky tlačen směrem dolů. V pístu je několik řídících štěrbin zpravidla trojúhelníkového tvaru, které svou plochou překrývají vstupní otvory. Plochou překrytí protéká regulátorem palivo. S výchylkou pístu z nulové polohy se zmenšuje plocha překrytí kontrolních štěrbin a vstupních otvorů, až se při max. výchylce regulátor zcela uzavírá. Charakteristika vysokotlakého čerpadla řízeného nízkotlakým regulátorem je na obr. 16. Při použití regulace v nízkotlaké části hydraulického okruhu je nutné chránit vysokotlakou část pojistným ventilem. Otevření pojistného ventilu je detekováno řídící jednotkou a zpravidla vyhodnoceno jako závažná chyba, při které se nastaví nouzový režim se sníženým výkonem. [3]

Řízení ventilu je prováděno PWM signálem o frekvenci 160 – 190 Hz, která je taková, aby se kotva díky vlastní setrvačnosti a této frekvenci neustále pohybovala tam a zpět - řádově o desítky mikrometrů. Tím se eliminuje zalehnutí regulátoru zejména při dlouhé monotónní jízdě, kdy se palivo ohřeje, ventil zůstává stále v jedné poloze a z nafty se vylučují látky s vysokou přilnavostí a sedimentují na ohřátých plochách. Méně kvalitní paliva mívají s tímto efektem problém.



Obrázek 24 Řez nízkotlakým regulátorem [9]
1 - konektor, 2 – pružina, 3 – cívka, 4 – kotva, 5 – O-kroužek, 6 – odtokový otvor, 7 – kulička ventilu, 8 – sedlo ventilu, 9 – přítok se sítkem



Obrázek 25 Charakteristika čerpadla řízeného nízkotlakým regulátorem při konstantních otáčkách [3]

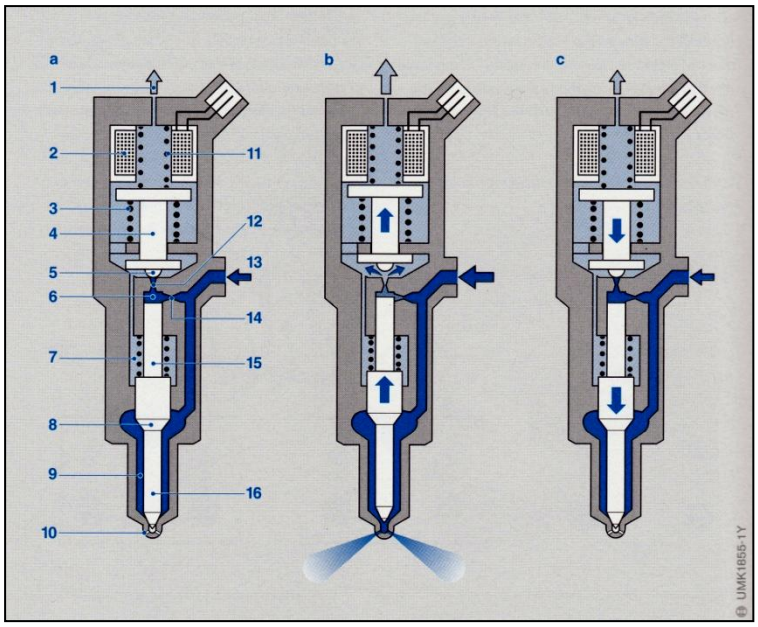
2.3.3 Vstřikovače systému Common Rail

U systému Common Rail jsou vstřikovače napojeny na rail krátkým vysokotlakým palivovým potrubím. Vstřikovače jsou utěsněné ve spalovací komoře pomocí měděné těsnicí podložky. V závislosti na konstrukci spalovací komory mohou být vstřikovače montovány v přímé nebo nakloněné pozici. Jedna z hlavních výhod systému CR je nezávislost vstřikovacího tlaku na otáčkách motoru a vstřikovaném množství. Počátek vstřiku a vstřikované množství jsou řízeny elektricky aktivovaným vstřikovačem. [9]

2.3.3.1 Vstřikovač s elektromagnetickým ventilem

Aby bylo dosaženo správného počátku vstřiku a přesné vstřikované dávky, jsou používány u systému CR speciální vstřikovače s hydraulickým servosystémem a elektricky ovládanou jednotkou (magnetickým ventilem). Na začátku vstřikovacího procesu je vstřikovač aktivován zvýšeným záběrovým proudem a tím se rychle otevře magnetický ventil. Jakmile dosáhne jehla

trysky svého maximálního zdvihu a tryska se naplno otevře, je ovládací proud snížen na nižší udržovací hodnotu. Vstřikovací proces je ukončen, když není magnetický ventil aktivován, a tím je uzavřen. Jednotlivé fáze vstřikovače ukazuje obrázek 26.

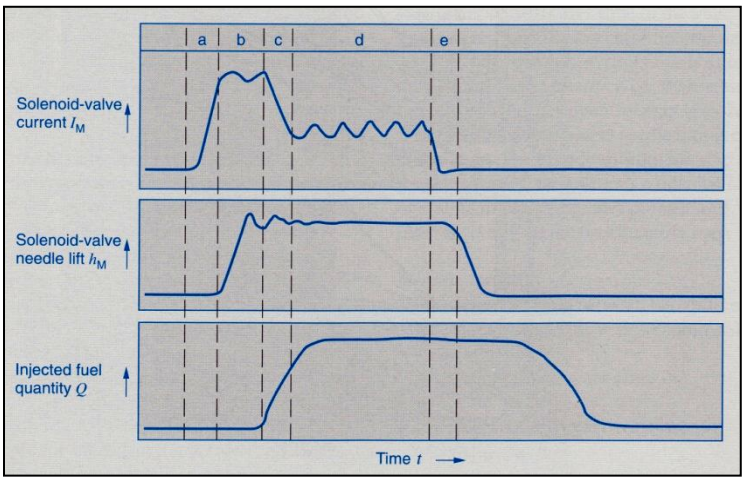


Obrázek 26 Elektromagnetický vstřikovač [9]
a – klidový stav, b – vstřikovač se otevírá, c – vstřikovač se zavírá
1 – zpětné vedení paliva, 2 – elektromagnetická cívka, 3 – vratná pružina, 4 – kotva elektromagnetu, 5 – kulička ventilu, 6 – řídící komora, 7 – pružina vstřikovací trysky, 8 – tlakový kužel, 9 – palivová komora, 10 – vstřikovací otvor, 11 – pružina el. mag. ventilu, 12 – výpustní omezovač, 13 – vysokotlaké vedení paliva, 14 – sací omezovač, 15 – tlakový čep, 16 – tryska jehly

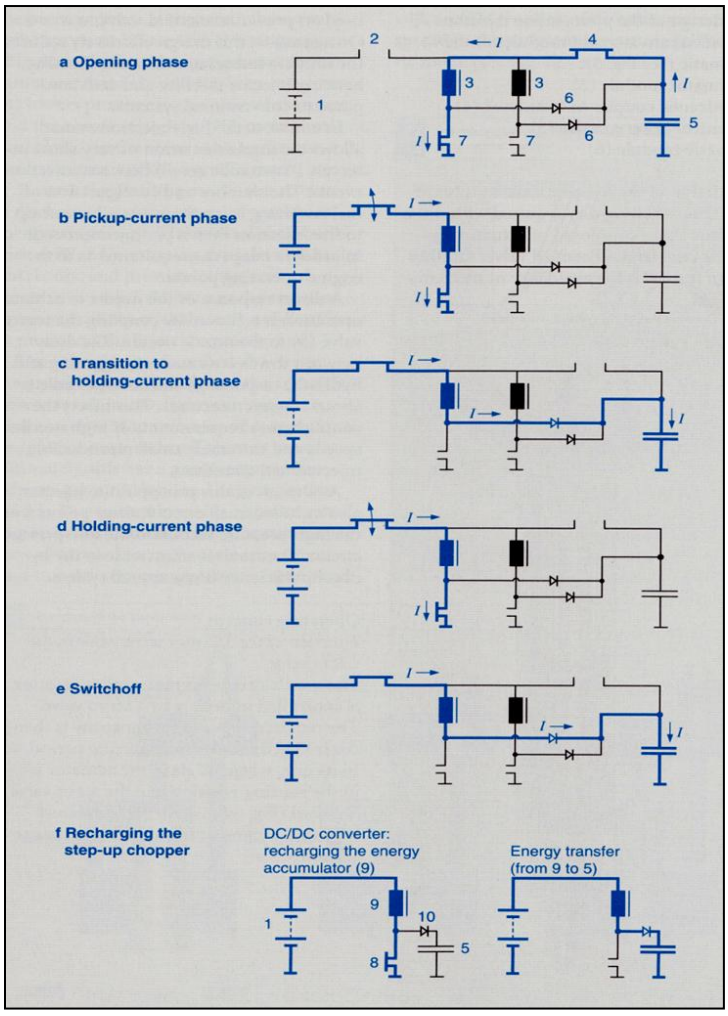
Spouštění elektromagnetického ventilu

Spouštění lze rozdělit do pěti fází:

1. otevírací fáze – k zajištění přesného načasování počátku vstřiku je třeba rychle zvýšit proud tekoucí do elektromagnetického ventilu, a to přibližně na 20 A. To je dosaženo pomocí napětí zvýšeného na hodnotu až 50 V, které je vytvořeno v řídící jednotce a uchováno v kondenzátoru. Působením tohoto napětí na elektromagnetický ventil se několikanásobně zvýší rychlost nárůstu proudu tekoucího do cívky ventilu.
2. fáze přitahovacího proudu – v průběhu této fáze je pro přitahovací proud použito napětí baterie. Proud je regulován na cca 20 A.
3. fáze udržování proudu – dochází ke snížení a udržování proudu na přibližně 13 A, aby se omezil ztrátový výkon v řídící jednotce a ve vstřikovači. Energie dostupná při snižování proudu slouží k nabíjení kondenzátoru.
4. vypnutí spínače – když je přepínač válců vypnut, uzavře se elektromagnetický ventil a přebytek energie z cívky ventilu proudí do kondenzátoru.
5. dobíjení step-up měniče – zvyšující (step-up) měnič napětí je integrován v řídící jednotce ECU. Slouží ke zvýšení napětí, které je zapotřebí k nabíjení kondenzátoru a následnému otevření el. mag. ventilu při otevírací fázi. [9]



Obrázek 27 Spouštěcí fáze elektromagnetického ventilu [9]
a – otevírací fáze, b – fáze přitahovacího proudu, c – přechod k udržovací fázi proudu, d – fáze udržování proudu, e – vypnutí spínače



Obrázek 28 Blokové schéma spouštěcích fází el. mag. ventilu [9]
1 – akumulátor, 2 – proudový spínač, 3 – vinutí cívky el. mag. ventilu, 4 – spínač pomocného kondenzátoru, 5 – pomocný kondenzátor, 6 – usměrňovací dioda, 7 – přepínač vstřikování jednotlivých válců, 8 – spínač DC/DC (step-up) měniče, 9 – cívka DC/DC měniče, 10 – dioda DC/DC měniče, I – směr proudu

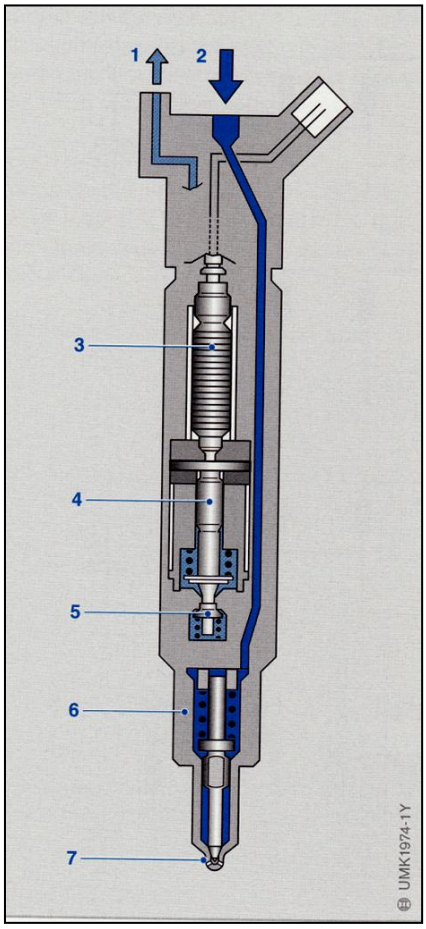
2.3.3.2 Piezoelektrický vstřikovač

Vývoj v oblasti piezoelektřiny a konstrukce piezoelektrických krystalů umožnila konstrukční zdokonalení vstřikovačů, které vede k mnoha výhodám oproti elektromagnetickým vstřikovačům. Piezoelektrické vstřikovače využívají nepatrných rozměrových změn krystalické struktury po zavedení elektrického napětí - tzv. elektrostrikce. Tyto nepatrné změny se převádějí na mechanický pohyb jehly vstřikovače.

Konstrukce piezoelektrického vstřikovače je rozdělena na několik částí (obr. 29):

- piezoelektrický modul
- hydraulický vazební člen (převodník)
- řídící ventil (servoventil)
- modul trysky

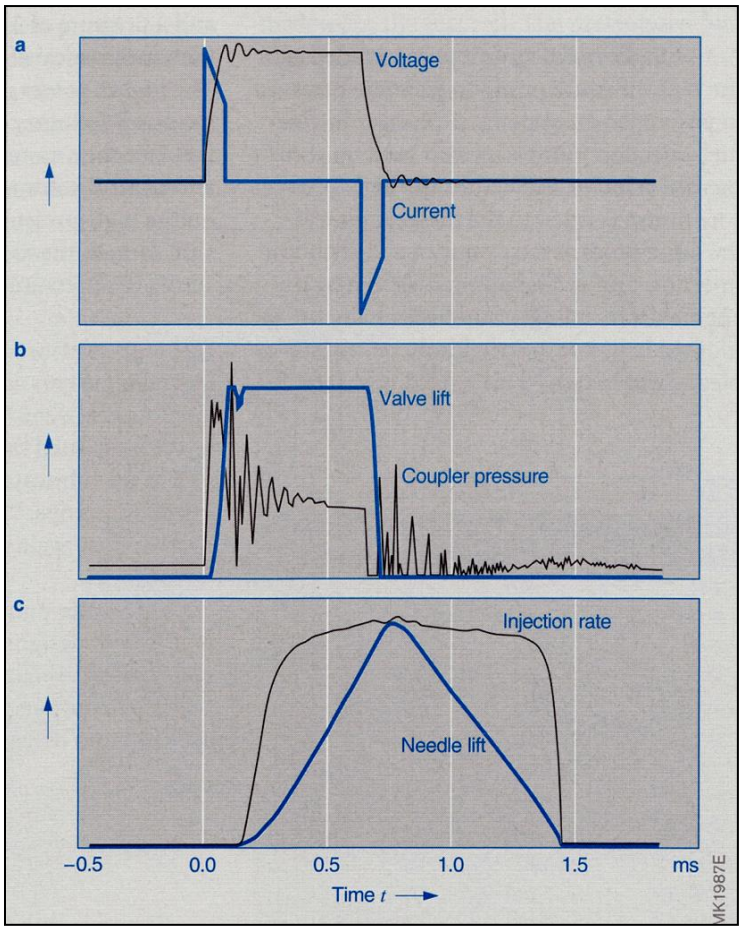
Při návrhu vstřikovače je brána zřetel na celkovou vysokou tuhost požadovanou od celé jednotky včetně modulu složeného z mnoha vrstev piezokrystalů. Velkou výhodou je eliminace mechanických sil působících na jehlu trysky, které vznikají v důsledku stlačení pístu u elektromagnetických vstřikovačů. Při konstrukci zařízení se efektivně snížila velikost pohyblivých částí a tření, což vede k lepší stabilitě vstřikování. Další výhodou je rychlá odezva vstřikovače, což umožňuje velmi malé intervaly mezi jednotlivými vstřiky („hydraulická nula“). Rychlou reakcí jehly trysky na činnost piezoelektrického modulu je dosaženo díky úzké vazbě servoventilu s jehlou trysky. Doba prodlevy mezi elektrickým impulsem a hydraulickou odezvou jehly trysky je asi 150µs. Systém tedy splňuje požadavek na rychlý pohyb jehly při malých dávkách vstřikovaného paliva. Vstřikovač díky svému principu také neobsahuje žádná místa přímého úniku paliva z vysokotlaké části do nízkotlaké části systému a výsledkem toho je zvýšená hydraulická účinnost celého systému. [9]



Obrázek 29 Konstrukce piezoelektrického vstřikovače [9]
1 – zpětné vedení paliva,
2 – vysokotlaké vedení,
3 – piezo modul,
4 – hydraulický vazební člen (převodník),
5 – servoventil,
6 – tryska s jehlou,
7 – vstřikovací otvor

Spouštění piezoelektrického vstřikovače

Vstřikovač je spouštěn prostřednictvím signálů z řídící jednotky motoru (ECU) speciálně přizpůsobené pro tento druh vstřikování. Velikost napětí spouštějící kontrakci piezo modulu se pohybuje v rozmezí 110 – 150 V a je řízena řídící jednotkou v závislosti na tlaku paliva v railu. Napětí má pulsující průběh a ECU řídí okamžik sepnutí spínače pro spuštění piezo modulu. Kontrakcí piezo modulu dojde ke stlačení táhla a hydraulický vazební člen tento posun zvětší. Posunem dojde k otevření servoventilu a snížení tlaku paliva na vrchní část jehly trysky. Tím se zvýší tlak paliva působící na spodní část trysky, dojde k otevření jehly trysky a vstřikování. Po rozpojení spínače a poklesu napětí na piezo modulu se modul stáhne a servoventil uzavře. Tlaky paliva pod a nad jehlou trysky se opět vyrovnají, jehla trysky se vrátí do sedla ventilu a vstřikování končí. [9]



Obrázek 30 Spouštění piezoelektrického vstřikovače[9]
a – průběh proudu a napětí při spouštění vstřikovače,
b - průběh zdvihu servoventilu a tlaku paliva ve vazebním členu,
c – průběh zdvihu jehly a vstřikovaného množství

Výhody piezoel. vstřikovače oproti el. mag. vstřikovači:

- vícenásobné vstřikování s možností přesnějšího řízení počátku a délky vstřiku v jednom vstřikovacím cyklu
- vstřikování velmi malého množství paliva
- menší rozměry a hmotnost vstřikovače (270 g oproti 490 g)
- nižší hlučnost (-3 dB [A])
- nižší spotřeba paliva (-3%)
- nižší emise (-20%)
- vyšší výkon motoru (+7%)

2.4 Způsoby regulace tlaku v CR systému

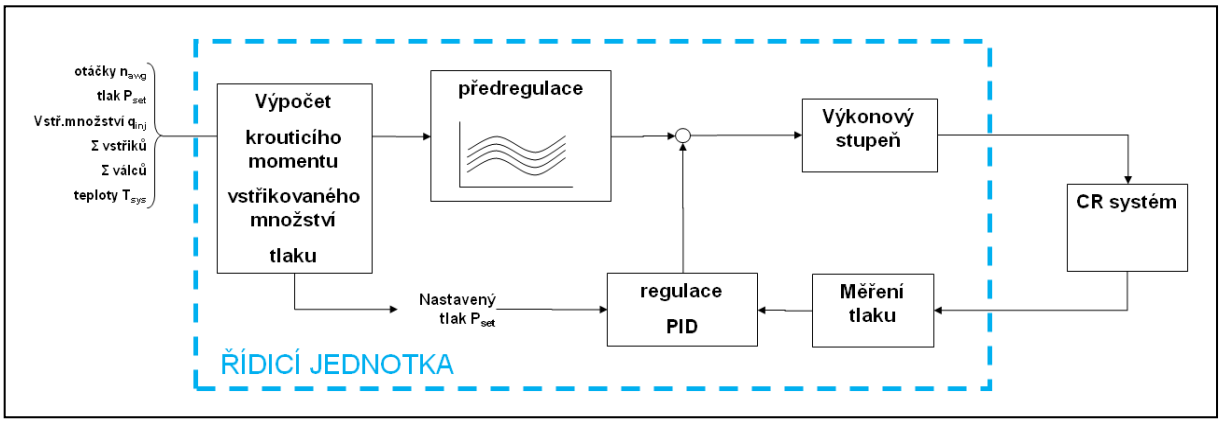
V současnosti se vyrábí sériově již čtvrtá generace systému CR, vývoj dalších generací nezadržitelně postupuje. Za celou dobu svého vývoje se systém výrazně diferencoval a s ním i způsoby regulace tlaku.

2.4.1 Regulace na vysokotlaké části hydraulického systému

Historicky první sériově vyráběný systém Bosch CR s pracovním tlakem 135 MPa byl řízen vysokotlakým regulátorem. Princip regulace je schematicky znázorněna na obr. 31.

Řídící jednotka přijímá signály od snímačů otáček, teplotních senzorů, různých snímačů tlaku (chladicí kapaliny, oleje, paliva, vzduchu v turbogenerátoru,..) a od plynového pedálu. Z těchto signálů vyhodnotí, kolik a jak dlouhých vstřiků bude aplikováno, tedy jak velké množství paliva systém v nejbližším časovém úseku spotřebuje. Podle počtu otáček motoru resp. čerpadla, odhadne řídící jednotka množství paliva dodávaného do railu a rozdíl těchto dvou množství je základním parametrem pro určení tzv. předregulace. Výstupním parametrem je množství paliva, které musí projít vysokotlakým regulátorem. Toto množství je poté přepočítáno na střídu PWM signálu, kterým je nutné působit na vysokotlaký regulátor, aby byl v railu dosažen nebo udržen požadovaný tlak. Jako zpětná vazba je měřen tlak v railu snímačem tlaku RDS. Rozdíl požadovaného a skutečného tlaku je předmětem PID regulace, která se přičítá k předregulaci a výpočet se opakuje ve smyčce až do zastavení motoru.

Hlavní výhodou této regulace je krátká doba odezvy na požadovanou změnu tlaku. Nevýhodou je větší mechanické namáhání čerpadla a vysokotlakého regulátoru. [3]



Obrázek 31 Princip regulace v systému BOSCH Common Rail

2.4.2 Regulace na nízkotlaké části hydraulického okruhu

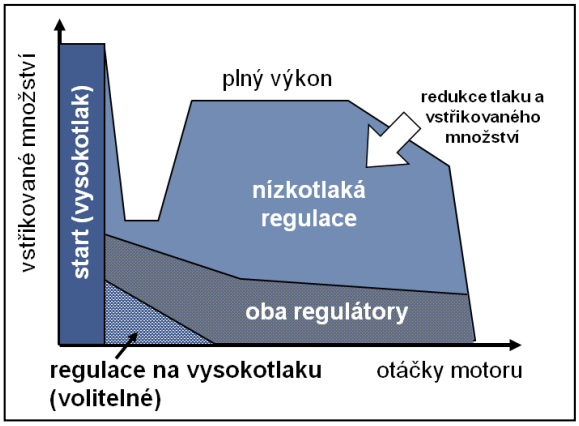
Po softwarové stránce je princip regulace v nízkotlaké části hydraulického okruhu stejný, ovšem po hardwarové stránce je odlišný. Řídící jednotka opět přijímá signály od snímačů otáček, teplot, tlaků a od plynového pedálu. Z těchto parametrů vyhodnotí počet a časové rozvržení vstřiků, čili jak velké množství paliva v nejbližším časovém úseku vstřikovače spotřebují. Tato hodnota je již výsledkem předregulace. Charakteristika čerpadla (obrázek 25) udává množství paliva, které čerpadlo řízené nízkotlakým regulátorem dodává do railu v závislosti na otáčkách čerpadla a na proudu do nízkotlakého regulátoru. Odtud je získána střída PWM signálu, kterým je nutné působit na nízkotlaký regulátor, aby byl v railu dosažen nebo udržen požadovaný tlak. PID regulace na základě reálného průběhu tlaku v railu upravuje proud do nízkotlakého regulátoru. Hlavní výhodou je především podstatné zvýšení životnosti čerpadla a snížení tepelného namáhání palivového systému. Tyto přednosti předurčují systém s regulací v nízkotlaké části palivového systému pro aplikace se středním a vysokým zatížením (nákladní vozidla, tahače, pracovní stroje). Díky nízkým výkonovým resp. tepelným ztrátám se však motor pomaleji zahřívá na pracovní teplotu. Není proto příliš vhodný pro aplikaci v osobních vozidlech s častým provozem na krátké vzdálenosti. Nevýhodou tohoto typu regulace je delší doba odezvy a větší problém může nastat zejména při rychlém poklesu požadovaného tlaku, kdy zároveň vstřikovače z railu neodebírají žádné palivo. Dostatečně rychlý pokles vysokého tlaku je v takovém případě problematický a musí se řešit softwarovými nástroji, jak je popsáno v kapitole 2.5. [3]

2.4.3 Kombinovaná regulace

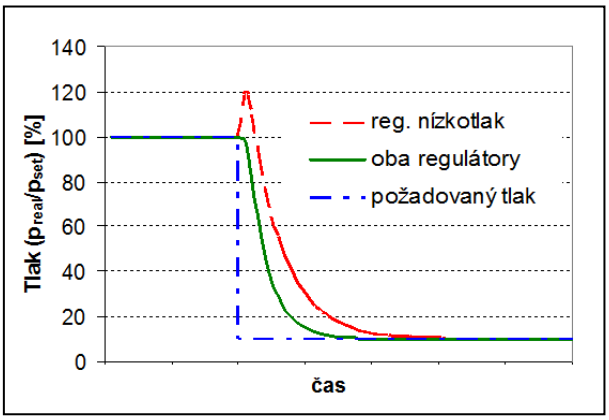
Pro náročnější aplikace, jako je například CR systém s piezo-inline vstřikovači, byl vyvinut systém, který kombinuje výhody obou popsaných typů regulace a zároveň se snaží eliminovat jejich negativní projevy. U kombinované regulace jsou v systému přítomny oba regulátory, vysokotlaký i nízkotlaký, a způsob řízení závisí na několika vstupních parametrech. Hlavními jsou otáčky motoru, požadované vstřikované množství (obrázek 32) a teplota chladicí kapaliny. Při startu motoru je nízkotlaký regulátor zcela otevřen (čerpadlo dodává maximální množství paliva) a systém je řízen rychlým vysokotlakým regulátorem (DRV regulace), aby bylo co nejrychleji dosaženo požadovaného tlaku a motor se co nejrychleji rozběhl. Po dosažení volnoběžných otáček je rozhodujícím parametrem teplota chladicí kapaliny. Je-li nižší než ~70°C, systém pokračuje v regulaci na vysokotlaku, čímž dochází k výkonovým ztrátám a motor se rychleji zahřívá. Po dosažení teploty chladicí kapaliny~70°C se způsob regulace přepíná na regulaci s oběma regulátory (ZME+DRV) nebo pouze na regulaci na nízkotlaku (ZME).

Řízení s oběma regulátory se uplatňuje především v kritických situacích. Uvažme například modelovou situaci, kdy motor ve vozidle pracuje ve vyšších otáčkách na plný výkon a řidič náhle sundá nohu z plynu. V té chvíli přestávají vstřikovače dodávat palivo, požadovaná hodnota tlaku se náhle sníží. Otáčky čerpadla se však výrazně nezmění. S mírným zpožděním se zavírá přívod paliva nízkotlaké části čerpadla, ale díky zpoždění se v railu objeví tlaková špička. Ta je způsobena tím, že do railu stále vlivem setrvačnosti dodáváme palivo ve chvíli, kdy už žádné palivo neodebíráme. Následný pokles tlaku je při absenci vstřiků velmi pomalý, prakticky daný pouze netěsností vstřikovačů (viz obrázek 33). Tuto situaci je možné řešit hned několika způsoby. U osobních vozidel, kde jsou v hydraulickém systému přítomny oba regulátory, se v případě příliš pomalého poklesu tlaku otevře vysokotlaký regulátor, který eliminuje i tlakovou špičku a zrychluje následný pokles tlaku v systému. Regulace potom probíhá v závislosti na otáčkách a vstřikovaném množství, dle schématu na obrázku 32. U nákladních vozidel a pracovních strojů,

kde se zpravidla využívá pouze regulace na nízkotlaku, se problém tlakových špiček řeší softwarově. Řídící jednotka pokračuje ve vstřikování velkého vstřikovaného množství až do chvíle, kdy tlak významněji poklesne. Při prudké akceleraci může dojít k opačné situaci, tedy prudkému nárůstu požadovaného tlaku a poklesu tlaku skutečného. Analogicky pokračuje řídící jednotka ve vstřikování malého množství až do dosažení vyššího tlaku, což se při provozu projeví mírným zpožděním v odezvě motoru. [3]



Obrázek 32 Regulace tlaku s oběma regulátory v závislosti na otáčkách motoru a požadovaném vstřikovaném množství. [3]



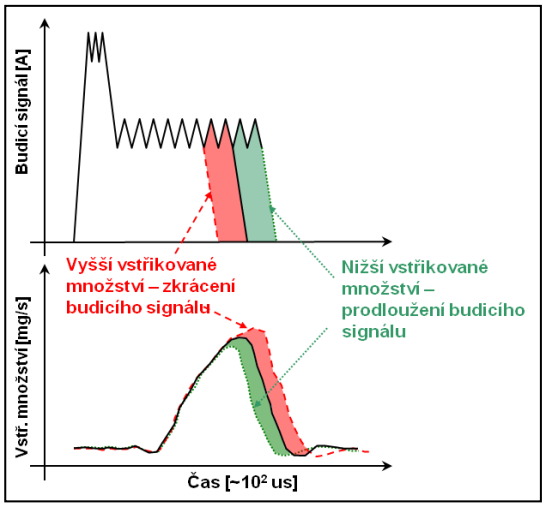
Obrázek 33 Reakce na náhlý pokles požadovaného tlaku v případě regulace na nízkotlaku a regulace s oběma regulátory[3]

2.5 Softwarové nástroje regulace tlaku

Výroba komponent pro CR systém je technologicky náročná záležitost. Těsnost celého systému prakticky závisí na výrobních tolerancích jednotlivých dílů. Každý díl CR systému tak může mít mírně odlišné výchozí vlastnosti, díky kterým podléhá rychlejšímu nebo pomalejšímu opotřebení. Negativní dopady těchto skutečností na regulaci tlaku se snaží korigovat soubor softwarových nástrojů, z nichž některé jsou popsány v následujících odstavcích. [3]

2.5.1 IQA – Injector Quantity Adjustment

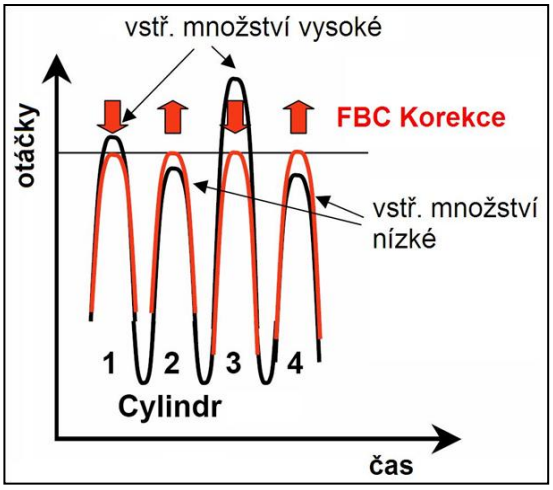
Prvním nástrojem, který koriguje výrobní nepřesnosti je úprava vstřikovaného množství – IQA. Elektrické a mechanické vlastnosti každého jednotlivého vstřikovače jsou při opouštění výrobní linky změřeny a vypáleny na jeho hlavičku v podobě 2D čárkového kódu a alfanumerického řetězce. Tyto údaje jsou při montáži motoru načteny a vloženy do řídící jednotky. Princip korekce je následující: u vstřikovače, který na jmenovitý budící signál vstřikuje nižší než jmenovité množství, je budící signál prodloužen a naopak u vstřikovače, který na jmenovitý budící signál vstřikuje vyšší než jmenovité množství, je budící signál zkrácen (obr. 34). Tím je docíleno přibližně stejného vstřikovaného množství u všech vstřikovačů, hladšího průběhu tlaku v railu a klidnějšího chodu motoru. [3] Tento princip se v poslední době stal velmi oblíbený a používají ho nejen u vstřikovačů téměř všichni výrobci, zejména díky jeho jednoduchosti a účinnosti.



Obrázek 34 IQA – korekce výchozí délky buzení v závislosti na výrobních tolerancích [3]

2.5.2 FBC – Fuel Balance Control

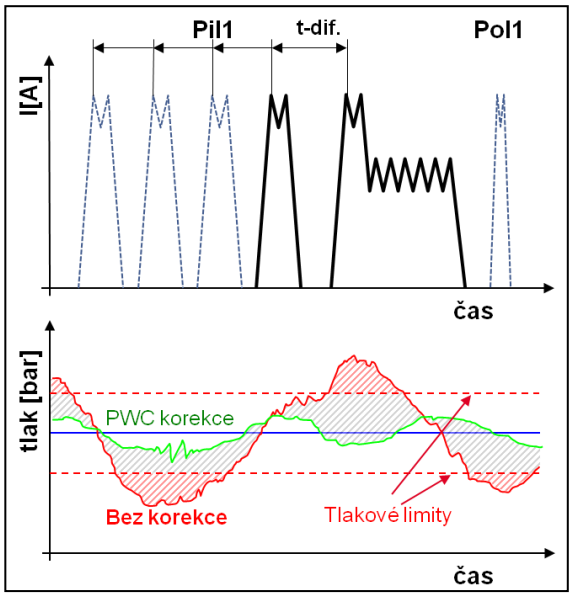
Podobným nástrojem zklidňujícím chod motoru a průběh tlaku v railu je dynamická korekce vstřikovaného množství FBC. Tato funkce reaguje na různé opotřebení jednotlivých vstřikovačů (princip je znázorněn na obrázku 35). Při stabilních otáčkách (např. volnoběžných) si řídící jednotka měří zrychlení klikové hřídele po každém vstřiku a následně upravuje vstřikované množství pro jednotlivé vstřikovače tak, aby průběh otáček klikové hřídele byl harmonický. [3] Tím se opět dosahuje zklidnění chodu motoru. Oproti předchozímu typu IQA se hodnota korekce v čase mění podle stupně opotřebení nebo zanesení vstřikovacího systému. Řidič pozná změnu chování motoru až ve chvíli, kdy kladná nebo záporná hodnota dynamické korekce dosáhne své maximální hodnoty definované v řídící jednotce a ani maximální korekce vstřikovaného množství potom nestačí ke zklidnění chodu motoru. Pro servisní účely je v chybové paměti řídící jednotky generováno chybové hlášení od konkrétního vstřikovače.



Obrázek 35 FBC - dynamická korekce vstřikovaného množství[3]

2.5.3 PWC – Pressure Wave Correction

Při vstřikování do válce motoru se otevírá vstřikovač a ve vysokotlakém vedení dojde k poklesu tlaku. Při zavření vstřikovače „narazí“ palivo proudící vysokotlakou trubkou na uzavřený vstřikovač, v tom místě se ještě více stlačí a vytvoří se tlaková vlna, která se odráží od vstřikovače a pohybuje se trubkou zpět. Rozdíly tlaku na vstupu vstřikovače tak mohou činit řádově i desítky MPa vzhledem k požadovanému tlaku. Následný problém spočívá v celkovém vstřikovaném množství, které je při konstantní délce buzení závislé na tlaku. Mění-li se tlak v průběhu vstřiku, mění se i celkové množství vstřikovaného paliva v průběhu vstřiku (viz obr. 35) a míra jeho rozptýlení za tryskou. Při výraznějších tlakových oscilacích v railu je tak chod motoru nepravidelný a hlučnější, což je způsobeno právě rozdílnými vstřikovanými množstvími pro každý válec. Za této situace vstupuje do hry korekce tlakových vln – PWC. Řídící jednotka upraví vzdálenost předvstřiku před hlavním vstřikem tak, aby pokles tlaku způsobený hlavním vstřikem byl vyrovnán tlakovou špičkou způsobenou předvstřikem. Dojde tak k negativní interferenci tlakových vln ve vysokotlakém potrubí. Výsledkem je klidnější průběh tlaku v railu (viz obr.

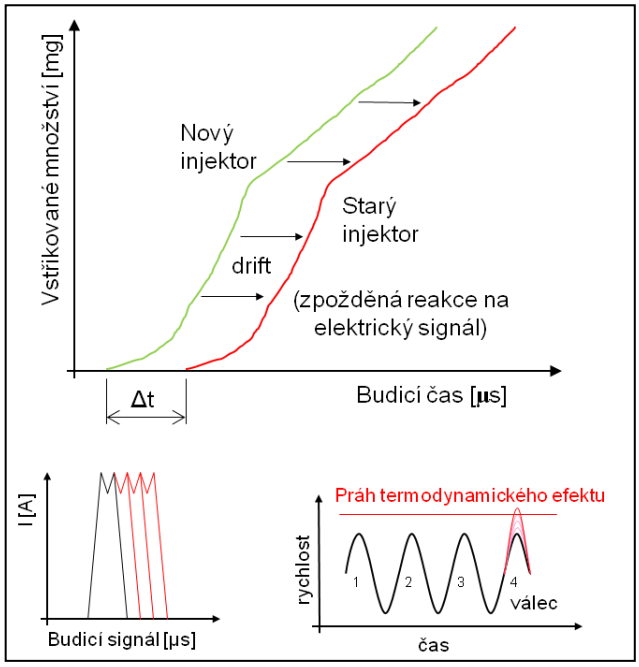


Obrázek 36 PWC - korekce tlakových vln ve vysokotlaké části CR systému[3]

36) a nižší mechanické namáhání komponent, především vstřikovačů, klikové hřídele a tlumiči torzních kmitů na řemenici klikové hřídele. [3]

2.5.4 ZFC – Zero Fuel Calibration

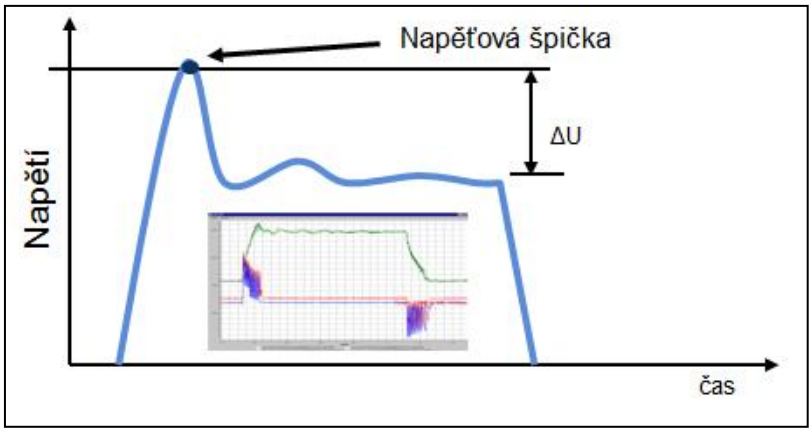
Vstřikovač v systému CR je ovládán elektronicky. Elektronické prvky ve vstřikovači podléhají při provozu únavě a v charakteristice vstřikovače je pak možné zaznamenat mírný drift. Ten způsobí, že původní minimální délka buzení, při kterém bylo možné dávkovat palivo již od 0,5 mg/vstřik, nestačí. Vstřikovač zůstává uzavřen, ačkoliv buzení bylo dostatečně dlouhé. Rozpoznání driftu je úkolem funkce ZFC – kalibrace nulového množství. Řídící jednotka ze zrychlení klikové hřídele motoru postupně pro každý vstřikovač určí maximální délku buzení, která se ještě neprojeví na dynamice motoru. Software se tak sám adaptuje na postupně se měnící elektrické a mechanické vlastnosti svých komponent. [3]



Obrázek 37 ZFC - kalibrace minimální délky vstřiku[3]

2.5.5 NVC – Nominal Voltage Correction (PIEZO)

Tento systém korekce je použit pouze u piezo inline vstřikovačů. Z důvodu stárnutí nebo opotřebení piezoaktuátoru je nutné korigovat ovládací napětí, aby byla zachována konstantní síla na ovládacím ventilu. Řídící jednotka měří rozdíl napěťové špičky a ustáleného napětí tak, aby rozdíl napětí ΔU měl předepsanou velikost (obrázek 38). Tím se udržuje konstantní síla na ovládacím ventilu injektoru, stabilizuje chování injektoru a prodlužuje jeho životnost.



Obrázek 38 Průběh ovládacího napětí [16]

3 MOŽNOSTI ZDOKONALENÍ SYSTÉMU VSTŘIKOVÁNÍ COMMON RAIL

Na možnostech zdokonalení systémů vstřikování common rail pracují celé týmy vývojářů řadu let. Proto se budu v této kapitole zabývat jen předpokládanými možnostmi, jakým směrem by se mohly některé komponenty vyvíjet z elektrotechnického hlediska.

3.1 Využití piezoelektrických materiálů v systémech vstřikování paliva

Piezoelektrický jev, kdy vznikající náboj je přímo úměrný mechanickému namáhání (tlaku, tahu, ohybu nebo krutu) vyvíjenému na některé krystalické materiály, byl objeven bratry Pierrem a Jacquesem Curiovými již v roce 1880. Objevitelé vypozorovali jev, který znamenal vznik elektrických nábojů na plochách středově nesymetrických krystalů turmalínu, křemene a některých dalších látek v důsledku jejich mechanického namáhání. Průmyslově byl však využíván až přibližně od poloviny 20. století, kdy doplňoval poznatky a rychle se rozvíjející aplikace polovodičové techniky. Od té doby našly piezotechnologické prvky uplatnění v elektrotechnice (automatizační a telekomunikační technika, radioelektronika,...), optice, automobilní a spotřební elektrotechnice.

Jevem podobným jevu piezoelektrickému je elektrostrikce, kdy se působením elektrického napětí krystal určitých látek mechanicky deformuje. Tato závislost je kvadratická, na rozdíl od lineární závislosti při jevu piezoelektrickém. Elektrostrikci využívají aktuátory, které mění elektrické napětí na mechanické posunutí. Tohoto jevu je využito např. v piezo-inline vstřikovačích ke zvedání jehly trysky.

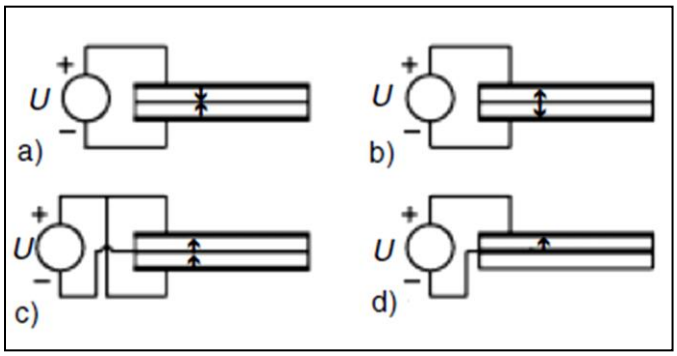
Jako technická piezoelektrika se v dnešní době využívají keramické materiály na bázi tuhých roztoků olova (Pb), zirkonu (Zr) a titanu (Ti). Jsou známy přibližně od počátku padesátých let 20. století a označovány jako PZT keramika.

Rozdělení piezoelektrických kompozitních struktur:

1. **Unimorfy** – bývají to tenké kovové destičky s nalepenou deskou PZT keramiky uspořádané v kruhové konfiguraci (bzučáky, sirény, ..)
2. **Bimorfy** – používají se jako aktuátory (převodníky elektrického signálu na mechanické posunutí)
3. **Polymorfy** - s více než dvěma vrstvami PZT keramiky zvyšují účinnost převodu el. energie a zmenšují elektrické napětí při stejném výkonu

Zapojení piezoelektrických bimorfů

Podle polarity přiloženého napětí a následné polarizaci prvků se rozlišují bimorfy sériové (obrázek 39 a,b), paralelní (obrázek 39 c) a unimorfy (obrázek 39 d). Paralelní bimorfy mají při stejném napětí dvojnásobnou výchylku oproti bimorfům sériovým, neboť v piezokeramice je při stejném napětí vytvářeno dvojnásobné el. pole. Střední kovová elektroda u paralelního bimorfu je slepena se dvěma piezoelektrickými keramickými plátky, které jsou polarizovány ve stejném směru. Směr polarity je výrobcem vyznačen na pozitivní straně. Na vnějších plochách keramických plátků jsou naneseny uhlíkové elektrody a povrch bimorfu je izolován speciálním ochranným lakem.



Obrázek 39 Konfigurace bimorfů [13]

Fyzikální základy

Piezoelektrické prvky bimorfu se deformují podle velikosti intenzity působícího elektrického pole. Jestliže je el. pole paralelní s polarizací prvku, prvek se smršťuje v rovinách kolmých na el. pole a roztahuje se ve směru pole. V případech, kdy elektrické pole působí antiparalelně se směrem polarizace prvku, dochází k roztahování v rovinách kolmých na el. pole a ke smršťování ve směru pole. Pokud se spojí dva piezoelektrické prvky tak, aby ve spoji nevznikaly podélné deformace, výsledkem smrštění jednoho prvku a prodloužením druhého bude ohyb takto spojených prvků. Zatíží-li se volný konec bimorfu takovou silou, aby při určitém připojeném napětí byla výchylka způsobená el. polem nulová, bude tato síla rovna blokovací síle. Blokovací síla a výchylka na konci bimorfu jsou důležité parametry pro použití v konkrétních aplikacích.

Lineární stavové rovnice popisující přímý piezoelektrický jev:

$$\begin{aligned} S_\lambda &= s^E_{\lambda\mu} T_\mu + d_{i\mu} E_i \\ D_i &= d_{i\mu} T_\mu + \varepsilon^T_{ij} E_i \end{aligned} \tag{2}$$

Lineární stavová rovnice popisující nepřímý piezoelektrický jev (elektrostrikce):

$$\begin{aligned} S_\lambda &= s^D_{\lambda\mu} T_\lambda + g_{j\lambda} D_i \\ E_i &= -g_{i\mu} T_\lambda + \beta^T_{ij} D_i \end{aligned} \tag{2.1}$$

kde S_λ, $T_{\mu(\lambda)}$, D_i, E_i jsou složky mechanické deformace a napětí, elektrické indukce a intenzity.

Za zjednodušujících předpokladů lze pro paralelní bimorf odvodit vztah pro výchylku δ v závislosti na působící síle F a elektrickém napětí U.

$$\delta = \frac{L^3 s^E_{11}}{2wh^3} F + \frac{3d_{31}L^2}{4h^2} U \tag{2.2}$$

kde s, d jsou mechanické a piezoelektrické materiálové koeficienty piezokeramické vrstvy, L volná délka bimorfu, w šířka piezokeramické vrstvy a h tloušťka piezokeramické vrstvy.

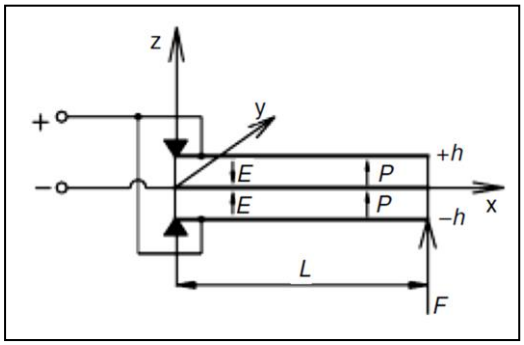
Pro bimorf zatížený blokovací silou (za podmínky δ=0) se získá vyjádření pro blokovací sílu:

$$F_{bl} = -\frac{3d_{31}wh}{2Ls^E_{11}} U \tag{2.3}$$

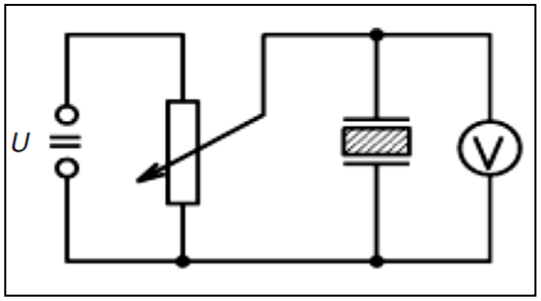
Pro rezonanční frekvenci platí vztah:

$$f_R = 0{,}161\frac{2h}{L^2}\sqrt{\frac{1}{\rho s_{11}^E}} \tag{2.4}$$

kde U je napětí na elektrodách a ρ je hustota keramiky.[13,14]



Obrázek 40 Zapojení paralelního bimorfu pro ohyb dolů [13]



Obrázek 41 Elektrický obvod se zapojeným bimorfem [13]

3.1.1 Možnost zapojení piezokrystalů ve vstřikovači

V konstrukci dnešních piezoaktuátorů ve vstřikovačích se používá paralelní zapojení většího počtu piezokrystalů. Výhoda tohoto zapojení oproti zapojení sériovému spočívá v tom, že krystaly mají dvojnásobnou výchylku při působení stejného napětí – viz předešlá kapitola. Nicméně i tak se aktuátor skládá z většího počtu piezokrystalů (několik desítech až stovek), které je potřeba spolehlivě elektricky propojit, aby se mohl aktuátor rovnoměrně roztahovat po přiložení elektrického napětí. Největší problém spočívá právě v místech spojení, kde se jednotlivé krystaly rychle pohybují (o několik mikrometrů) a tento mechanický pohyb narušuje elektrické spoje, které se mohou po delším provozu odlomit a způsobit nefunkčnost aktuátoru. Čím větší je počet elektrických propojení, tím větší je pravděpodobnost takové závady. Je nutné podotknout, že samotné piezokrystaly v aktuátorech potíže nezpůsobují.

Možností jak zmenšit pravděpodobnost poruchovosti, je zmenšení počtu piezokrystalů, a tím i elektrických propojení, při zachování stejných parametrů aktuátoru. Můžeme toho docílit vývojem nových piezokrystalů, vhodnějších pro tyto účely, nebo zvolit možnost jiného elektrického zapojení. V případě druhé varianty se nabízí alternativa zapojit piezokrystaly také paralelně, ale s opačnou polarizací, tak, aby docházelo k ohybu spojených piezokrystalů (viz obrázek 40). Jeden konec takových piezokrystalů musí být vetknutý v nepohyblivém tělese. Druhý konec a jeho pohyb se využívá jako rychlý spínač řízený elektrickým napětím. Pro výpočet potřebných parametrů nám mohou posloužit rovnice pro blokovací sílu F_{bl} a výchylku δ, které jsou uvedeny výše. Velikost síly potřebné pro spínání je možné při návrhu aktuátoru změnit velikostí parametrů piezokrystalu, jako je jeho délka, šířka a tloušťka, a velikostí přiloženého napětí regulovat výši této síly. Pokud by byla velikost síly i tak nedostačující, je možné použít mechanické nebo hydraulické principy na posílení této síly. Hydraulického zesílení se využívá např. v piezo-inline vstřikovačích použitím servoventilu.

3.2 Piezoelektrické snímače

Ke konstrukci tohoto typu snímače se využívá piezoelektrického jevu, který spočívá v tom, že uvnitř některých polykrystalických dielektrik vzniká vlivem mechanické deformace elektrická polarizace, čímž se na povrchu tvoří zdánlivé náboje, které mohou na přiložených elektrodách vázat nebo uvolňovat náboje skutečné. Jakmile napětí zmizí, dostává se dielektrikum do původního stavu.

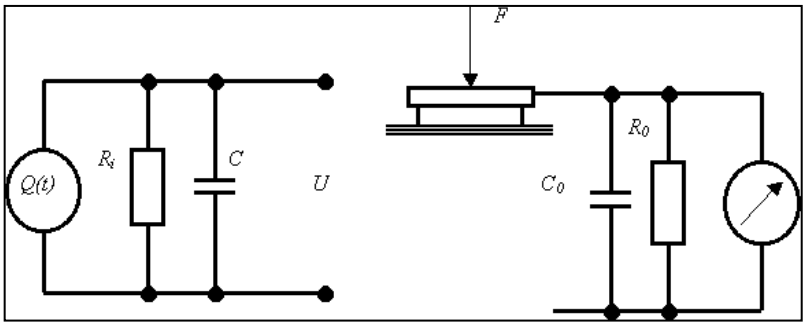
Jako materiál piezoelektrických snímačů se často používá křemen (SiO_2). Piezoelektrický jev u křemene nezávisí na teplotě téměř až do 200 °C. Piezoelektrická konstanta je nepatrně závislá na teplotě, asi 0,01 %/°C. Relativní permitivita krystalu z křemene je e_r = 4, piezoelektrická konstanta je k_p = 2,1. Při teplotě 573 °C SiO_2 ztrácí piezoelektrické vlastnosti. Dále se jako materiál snímačů používá titaničitan baria $BaTiO_3$.

Piezoelektrický snímač se při působení neelektrické veličiny chová jako generátor náboje. V elektrickém náhradním schématu je R_i definován vnitřním a povrchovým odporem použitého materiálu. Kapacita C_i je závislá na geometrických rozměrech krystalu a permitivitě použitého materiálu. Při zapojení do elektrického obvodu je třeba uvažovat také izolační odpor použitého kabelu R_{iz} a jeho kapacitu C_v. Parametry celku jsou pak dány celkovým součtem kapacit a součtem vodivostí jednotlivých odporů. K měření napětí je nutno použít přístroj pracující v bezproudovém režimu (aby neodsával náboj ze snímače). Je také nutno snímač stínit proti vlivům vnějších elektrických polí. Pro výstupní napětí snímače platí:

$$U = \frac{Q_0}{C_0} e^{-\frac{t}{R_0 C_0}} = U_0 e^{-\frac{t}{R_0 C_0}} \tag{2.5}$$

kde Q_0 je počáteční náboj na snímači, U_0 počáteční napětí, R_0 je celkový odpor (daný vnitřním a povrchovým odporem snímače, izolačním odporem vedení a vnitřním odporem měřicího přístroje), C_0 celková kapacita (součet kapacity snímače, kapacity vedení a vstupní kapacity měřidla), t doba od počátku zatížení snímače. Součin $\tau = R_0 C_0$ je časová konstanta obvodu se snímačem (pro křemen je $t = 18.10^5$s). Tento údaj je důležitý pro určení dolní hranice kmitočtového rozsahu snímače a pro cejchování statickou metodou.

Požadavky kladené na spojovací vedení jsou vysoké. Musí mít velmi nízkou kapacitu, která se nemění s ohýbáním kabelu, velmi vysoký izolační odpor a dobré stínění proti vnějším polím. Podobně je to i u měřicího přístroje, kde se často jako vstupní prvky používají FET tranzistory. Protože je výstupní napětí ze snímače poměrně vysoké, používá se pro jeho snížení kondenzátor s přídavnou kapacitou.[15]



Obrázek 42 Piezoelektrické snímače [15]
a) elektrické náhradní schéma piezoelektrického snímače, b) Zapojení snímače k měřicímu přístroji

Příklady použití snímačů v automobilové technice:

- snímač příčného a podélného zrychlení
- snímač klepání motoru
- snímače zrychlení pro aktivaci airbagu a bezpečnostních pásů
- snímače tlaku

3.2.1 Aplikace PZT keramiky, sledované parametry a vývoj

Použitelnost PZT keramiky závisí na teplotě, elektrickém poli a mechanickém zatížení a při návrhu konkrétní aplikace je nutno k tomuto přihlédnout. Aby byla zaručena stabilita materiálových vlastností keramiky, doporučuje se nepřekračovat teplotu nad ½ T_C (Curiova teplota). V blízkosti Curiovy teploty se totiž vlastnosti materiálu značně mění.

Dále je nutno počítat s tím, že se vlastnosti PZT keramik vyvíjejí v čase - dochází k jejich stárnutí, které má logaritmický průběh. To má za následek snižování hodnoty piezoelektrického koeficientu, který je jedním z důležitých parametrů každé keramiky.

Chemické složení PZT keramiky se modifikuje malým množstvím dopujících příměsí (např. atomy La, Nb, Sr, Fe,...), čímž lze významně ovlivňovat materiálové vlastnosti keramiky, jako je piezoelektrický koeficient a permitivita. Tyto příměsi se přidávají do keramiky v průběhu výroby a jejich použití je třeba konzultovat s výrobci.

Sledovaným parametrem u PZT keramiky je také hysterezní smyčka, která je důsledkem polarizace při výrobě. K polarizaci keramiky se používá elektrické pole o velikosti 2 – 4 kV/mm. Plocha hysterezní smyčky udává v materiálu množství uvolněného tepla (dielektrických ztrát) při jednom průchodu touto smyčkou. Materiály s užší hysterezní smyčkou a menšími dielektrickými ztrátami se používají v aplikacích využívajících vyšší přenášené energie (ultrazvukové čištění a svařování), a naopak materiály s širší hysterezní smyčkou a většími dielektrickými ztrátami jsou používané pro snímače a aktuátory (piezoelektrický modul vstřikovače).

Současný vývoj piezoelektrických látek je veden směrem k nalezení materiálů s lepšími piezoelektrickými vlastnostmi, tedy citlivosti, účinnosti převodu elektrické a mechanické energie, teplotní stability rezonančního kmitočtu a ke snížení pracovního napětí při zachování stejného pracovního efektu.

4 ZÁVĚR

V první části této bakalářské práce jsou uvedeni výrobci systémů vstřikování paliva Common Rail a jejich konstrukční řešení. Jsou v ní popsány základní principy jednotlivých systémů a jejich komponent s přihlédnutím k nejnovějším poznatkům v oblasti vývoje těchto systémů. První kapitola slouží jako přehled o aktuálně používaných systémech a jejich odlišnostech u různých výrobců.

Z důvodu spolupráce s firmou Bosch, je ve druhé části podrobněji rozebrán systém Bosch Common Rail, jeho řízení a možnosti regulace tlaku. V této kapitole jsou obsaženy zejména elektronické a elektrotechnické komponenty systému s popisem jejich konstrukce, principů měření včetně výpočtových vzorců a ukázek průběhů elektrických hodnot. Dále jsou zde zahrnuty elektricky řízené akční členy s popisem elektrických schémat a průběhů spouštění. Jelikož se opotřebením komponent mění jejich parametry, jsou na závěr této kapitoly uvedeny softwarové nástroje pro regulaci tlaku, které kompenzují negativní vlivy stárnutí a opotřebení po celou dobu životnosti systému.

Druhá kapitola může posloužit jako příručka pro bližší seznámení se systémem Bosch Common Rail z hlediska elektrotechniky a senzoriky nebo pro seznámení se s typy regulací tlaku a nástroji pro jeho řízení.

Poslední kapitola se zabývá piezoelektrickými snímači a PZT keramikami používanými v aktuátorech. Je v ní uvedena podstatná nevýhoda dnešních aktuátorů a návrh možného zdokonalení aktuátoru s použitím jiného zapojení piezokrystalů. Samotná kapitola slouží jako pomůcka pro návrh a výpočet parametrů piezokrystalů a jsou v ní uvedeny fyzikální základy a výpočtové vztahy pro návrh piezoelektrických bimorfů používaných v aktuátorech.

Poruchovost piezoelektrických materiálů se v praxi příliš nevyskytuje. Při návrhu je brán ohled na provozní podmínky v daných aplikacích a materiály jsou navrženy takovým způsobem, aby odolaly zvýšeným provozním hodnotám s dostatečnou rezervou. Většina piezoelektrických snímačů je vybavena zesilovačem napětí, který je uložený co nejblíže měřicímu členu z důvodu eliminace parazitních vlivů. Nejčastější závadou u takto konstruovaných snímačů je poškození zesilovače. Časté závady u piezoelektrického vstřikovače resp. jeho piezomodulu způsobuje elektrické propojení jednotlivých piezokrystalů. Tento problém by mohlo odstranit zapojení piezokrystalů do podoby ohybového aktuátoru, který by aktivoval počátek a konec vstřiku. Tímto konstrukčním řešením by se eliminoval počet použitých piezokrystalů a jejich propojení.

LITERATURA

[1] Common rail. *Wikipedia* [online]. 11. 3. 2013 [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Common_rail

[2] BOSCH-Pressforum. *BOSCH* [online]. 9/2005 [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: http://press.bosch.cz/detail.asp?f_id=436

[3] *20. mezinárodní konference Hydrauliky a pneumatiky*. 1. vyd. Ostrava: Česká strojnická společnost a VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008. Koňařík Petr. ISBN 978-80-02-02074-5.

[4] BOSCH Automotive Sensors. Stuttgart: Robert Bosch GmbH, 2002.

[5] Truckfocus. [online]. [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: http://truckfocus.pl/drukuj/2626/prze%C5%82om-technologiczny-scania

[6] MICHAEL A., Lucas, Tagnelius LARS a Benson DONALD J. CUMMINS INC. High pressure common rail fuel system with gas injection [patent]. 7950370. Uděleno 13.3.2008. Dostupné z: http://www.freepatentsonline.com/7950370.html

[7] DENSO. Diesel Common Rail Systems for Passenger Cars [online]. 2001 [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: http://www.denso.com.au/Products/Automotive/Engine-Management/Common-Rail-System

[8] Common Rail Systems. *Delphi* [online]. 2012 [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: http://delphi.com/manufacturers/cv/powertrain/common-rail-systems/

[9] ROBERT BOSCH GMBH. *Diesel-Engine Management: Systems and Components*. Cambridge, MA 02138: Bentley Publishers, 2005. ISBN 0 8376 1353 1.

[10] ROBERT BOSCH GMBH. *Diesel accumulator fuel-injection system Common Rail*. Postfach, 1999.

[11] Dělič napětí. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Dělič napětí

[12] RŮŽIČKA, Antonín; PETRÁS, Zdeněk. *Elektronické vstřikování vznětových motorů EDC 1.3.3*. Praha 4 : Divize automobilové diagnostiky, 1998. 64 s.

[13] PŮLPÁN, Petr a Jiří ENHART. Parametry piezoelektrických bimorfů. [online]. 2002 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=24939

[14] ENHART, Jiří. Piezoelektrické "chytré" materiály pro elektrotechniku. [online]. 2002 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25211

[15] *Energetický ústav: Odbor termomechaniky a techniky prostředí* [online]. [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/Ka03-05.htm

[16] ČÁP, Jaroslav. ROBERT BOSCH GMBH. *Regulace tlaku ve vstřikovacích systémech BOSCH Common rail*. Česká republika, 2010.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

B	materiálová konstanta
B_y	magnetická indukce
c_i	koeficient
d_{31}	piezoelektrický koeficient
D_i	indukce elektrického pole
E_i	intenzita elektrického pole
f	frekvence
F	síla
I_i	elektrický proud
N	počet závitů
P	výkon
Q_0	elektrický náboj
Q_V	hmotnostní tok
R_H	Hallova konstanta
R_i	elektrický odpor
s_{11}	mechanický koeficient
S_λ	složka mechanické deformace
T_i	termodynamická teplota
T_λ	složka mechanického napětí
u	střídavé napětí
U_H	Hallovo napětí
U_i	stejnosměrné napětí
v	rychlost
α	teplotní součinitel elektrického odporu
δ	výchylka
ϑ_i	Celsiova teplota
λ	měrná tepelná vodivost
ρ	hustota
ϕ	magnetický tok