

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

ZNÁZORNĚNÍ PRÁCE CYKLICKÝCH MOTORŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

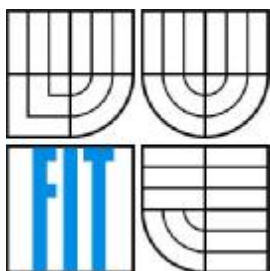
AUTHOR

JAN FAJKUS

BRNO 2007



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ
FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

ZNÁZORNĚNÍ PRÁCE CYKlickÝCH MOTORŮ CYCLIC ENGINE VISUALIZATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN FAJKUS

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JAROSLAV PŘIBYL

BRNO 2007

Abstrakt

Předmětem této bakalářské práce bylo seznámení se s různými cyklickými motory, pochopení jejich principu, popis jejich společných a rozdílných vlastností.

Programová část projektu spočívala ve vytvoření vizualizace vybraných motorů v jazyce C/C++ pomocí OpenGL.

Klíčová slova

vizualizace motoru, OpenGL, Wankel, OHV, OHC, DOHC, kliková hřídel, ojnice, píst, ventil

Abstract

Objective of this thesis was acquaint oneself with theory of cyclic engines, understand their principle, describe their conjunctive and different properties.

Program part consisted in creating visualization of chosen engines in C/C++ language using OpenGL.

Keywords

engine visualization, OpenGL, Wankel, OHV, OHC, DOHC, crankshaft, piston rod, piston, valve

Citace

Fajkus Jan: Znázornění práce cyklických motorů. Brno, bakalářská práce, FIT VUT v Brně, 2007

Znázornění práce cyklických motorů

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jaroslava Příbyla. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....
Jan Fajkus
14. 5. 2007

Věnování

Tuto bakalářskou práci věnuji svému dědečkovi Františku Zvardoňovi, který mi v mém dětství ochotně vysvětloval principy motorů.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu Ing. Jaroslavu Příbylovi za ochotu při konzultacích. Dále bych chtěl poděkovat mým blízkým za pomoc a podporu.

© Jan Fajkus, 2007.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů..

Obsah

Obsah.....	1
Úvod.....	3
1 Teorie motoru	4
2 Motory s vnějším spalováním.....	5
2.1 Parní stroj	5
2.2 Plynová turbína.....	5
2.3 Parní turbína	6
2.4 Stirlingův motor.....	6
3 Motory s vnitřním spalováním.....	7
3.1 Rotační (Wankelův) motor.....	7
3.2 Spalovací motor s vratným pohybem pístů (dále v této kapitole jen motor).....	8
3.2.1 Válec a píst.....	8
3.2.2 Kliková hřídel, ojnice	9
3.2.3 Počet válců, jejich uspořádání	10
3.2.4 Uložení motoru.....	12
3.2.5 Dvoudobý zážehový motor	12
3.2.6 Dvoudobý vznětový motor.....	13
3.2.7 Čtyřdobý motor obecně.....	14
3.2.8 Čtyřdobý zážehový motor	15
3.2.9 Čtyřdobý vznětový motor	15
3.2.10 Atmosférické plnění motoru	15
3.2.11 Přepřňování	16
3.2.12 Ventily	17
3.2.13 Vačky.....	17
3.2.14 Ventilové rozvody	17
3.2.15 Překřížení ventilů	18
3.2.16 Hlava válce	19
3.2.17 Kompresní poměr	19
3.2.18 Zvyšování výkonu	19
4 Návrh a provedení.....	21
4.1 Návrh	21
4.1.1 Míra abstrakce a zjednodušení	21
4.1.2 Výhodné odchylky od skutečnosti.....	22
4.1.3 GUI.....	22

4.1.4	Zachování realističnosti	22
4.1.5	Otevřenost pro pozdější navázání.....	23
4.1.6	Univerzálnost	23
4.1.7	Výběr motorů	23
4.1.8	Výukové účely.....	24
4.2	Řešení jednotlivých součástí	24
4.2.1	Moduly.....	24
4.2.2	Komplet dílů.....	24
4.2.3	Kliková hřídel.....	24
4.2.4	Píst	25
4.2.5	Ojnice.....	25
4.2.6	Hlava válce.....	25
4.2.7	Ventil	26
4.2.8	Vačka	26
4.2.9	Způsob vykreslování.....	26
4.2.10	Selekce zobrazení jednotlivých součástí.....	26
4.2.11	Kamera.....	26
4.2.12	Simulace	27
5	Implementace.....	28
5.1	Časování.....	28
5.2	Pomocné funkce	28
5.3	Hlavní funkce	29
5.4	Vykreslení motoru	30
6	Závěr	31
7	Literatura	32
	Seznam příloh	33
	Příloha 1. Manuál k aplikaci	34
	Požadavky.....	34
	Instalace.....	34
	Ovládání	34

Úvod

V dnešní době funguje po celém světě obrovské množství spalovacích motorů. Liší se velikostí, principem, efektivitou a v mnoha a mnoha dalších parametrech, ale všechny mají i společné vlastnosti. V této práci se zmíním o nejrozšířenějších a nejznámějších motorech, ale i o těch méně známých. Nejvíce prostoru ale bude věnováno motorům s vnitřním spalováním. Těm je také věnována přiložená vizualizace napsaná v jazyce C s použitím OpenGL.

V první části se nachází teoretický rozbor principu, konstrukčních provedení a vlastností jednotlivých typů motorů. Rozeberu v ní principy různých typů motorů, porovnáám jejich efektivitu, nákladnost na výrobu, ale i poměry výkonu k hmotnosti nebo škodlivost zplodin. Pokusím se čtenáři vysvětlit základní rozdíly mezi čtyřtákním a dvoutákním motorem, shrnout hlavní odlišnosti vznětových a zážehových motorů a nastínit princip nejrozšířenějších způsobů realizace ventilových rozvodů u čtyřtákních motorů.

Druhá část popisuje způsob dekompozice problémů, jejich řešení, způsob návrhu a důvody, proč byly jednotlivé úkoly řešeny takovým způsobem, jakým byly. Vysvětlím, z jakých důvodů jsem se rozhodl některé části při návrhu vizualizace neuvažovat a co mě k tomu vedlo. Popíšu mé uvažování, jak docílit ze všech hledisek dobrého programu. To se týká nejen jednoduchosti návrhu a jednoduché čitelnosti kódu, ale také nízkých hardwarových nároků a naopak potenciálu využít výkonný systém pro vykreslení co nejpřesněji provedených komponentů simulovaného motoru. Dále jde o to, aby bylo na projekt jednoduché dále navázat a rozšířit jej v libovolném směru.

Ve třetí části se lze dočíst, jakým způsobem byla implementována praktická část bakalářské práce. Popíši v ní problémy, se kterými jsem se při vlastní implementaci setkal. Dále se v ní zmíním o systému časování simulace. Vyjmenuji důležité hlavní i pomocné funkce a popíši jejich práci. Nastíním způsob práce s OpenGL.

V závěru zhodnotím práci a zmíním možnosti, jakými by šlo ve vývoji dále pokračovat.. Zhodnotím dosažené výsledky a pokusím se odhadnout přínos této práce.

1 Teorie motoru

Spalovací motor je stroj, který spálením paliva přeměňuje jeho chemickou energii na mechanickou práci. Spalovací motory můžeme rozdělit podle druhu spalování na motory s vnějším spalováním a motory s vnitřním spalováním.

2 Motory s vnějším spalováním

Motor s vnějším spalováním je tepelný stroj, který využívá chemickou energii získanou spálením paliva na ohřev pracovní látky, která v motoru následně vykonává práci. Spalování probíhá vždy mimo motor, přičemž pracovní látkou může být plyn nebo samotné spaliny.

Motory tohoto typu bývají těžší a objemnější než srovnatelně výkonné motory s vnitřním spalováním, protože obsahují navíc výměník tepla pro ohřívání pracovní látky. Jejich výhodou je zpravidla menší náročnost na kvalitu paliva. Spalování probíhá za nižších tlaků a teplot.

2.1 Parní stroj

Vynález parního stroje je přisuzován Jamesi Wattovi (1736-1819). Parní stroj je sestaven z kotle, který je ohříván vnějším spalováním paliva, většinou uhlí, regulátoru, šoupátkové komory, válce a pístu. Voda v kotli je ohřívána, odpařuje se, tlak roste. Pára pod tlakem prochází přes regulátor do šoupátkové komory. Nejčastěji se používá Wattův rotační regulátor, který využívá odstředivé síly. Přes šoupátkovou komoru se pára přepouští do válce na jednu nebo druhou stranu pístu. Na kterou stranu pístu to bude, určuje šoupátko otevíráním příslušných přepouštěcích kanálů. Šoupátko je ovládáno přes táhlo od excentrického mechanismu. Ten má jiné pootočení na setrvačnicku než klikový mechanismus pohonu, čímž je zajištěn potřebný předstih. Parní stroje pro lokomotivy mají ještě před ovládním šoupátka předřazenou kulisu, pomocí které může strojvedoucí měnit směr pohybu motoru. Parní stroj má účinnost 5 – 15%. Výhodou parního stroje je nízká poruchovost, jednoduchá údržba, široké spektrum použitelných otáček a nízké provozní náklady dané zejména tím, že kotel lze ohřívát v podstatě libovolným palivem. Nevýhodou je nízká účinnost, nekompaktnost konstrukce, velká hmotnost a nutnost s sebou kromě paliva vozit i zásobu vody.

2.2 Plynová turbína

V plynové turbíně předávají zahřáté plyny svoji energii lopatkám. Může jít o plyny ohřáté externím zdrojem nebo o zplodiny hoření. Konstrukce může být axiální, kdy plyny proudí přibližně rovnoběžně s osou otáčení turbíny, nebo radiální - plyny proudí kolmo na osu turbíny. Klasickým příkladem plynové turbíny je turbodmychadlo. Turbodmychadlo u spalovacího motoru využívá zbytkovou energii výfukových plynů ke zvýšení tlaku nasávaného vzduchu, čímž umožní spálení většího množství benzínu, než při atmosférickém plnění. Dalším příkladem je parní turbína.

2.3 Parní turbína

Teplu ze spáleného paliva se v ohřívači předá vodě, která se přeměňuje na páru. Ta je vedena potrubím do turbíny, tvořené skupinou lopatek na rotoru. Přehřátá pára expanduje a proudí skrz turbínu, přičemž tlačí na lopatky, které roztáčejí rotor. Z rotoru se odebírá užitečná práce. Na výstupu z turbíny má pára o mnoho nižší teplotu, protože odevzdala část své tepelné energie rotoru. Parní turbína se používá například v tepelných elektrárnách. Používá se také v atomových elektrárnách – ale tam už bychom opustili téma spalovací motory.

2.4 Stirlingův motor

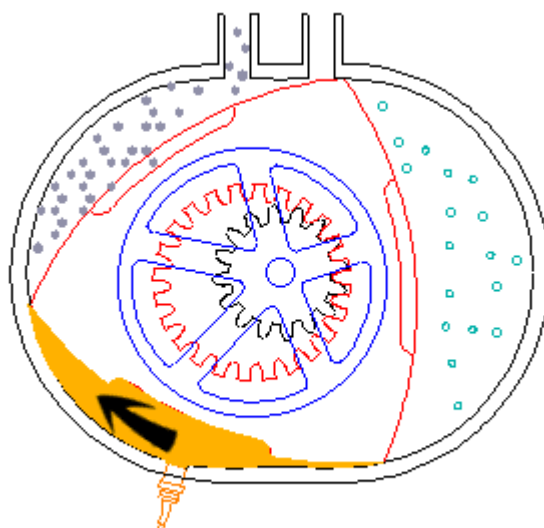
Stirlingův motor byl vynalezen v roce 1816 skotským pastorem Robertem Stirlingem. Tento motor má dva pracovní prostory, mezi nimiž může volně proudit plyn a je v nich tedy prakticky stejný tlak. Jeden z prostorů je studený, druhý horký. Toho je docíleno buď přímým ohříváním a chlazením komor, nebo, a to častěji, vnějším ohřívačem a chladičem. Mezi ohřívač a chladič je obvykle zařazen ještě regenerátor akumulující teplo plynu procházejícího z ohřívače do chladiče, nebo naopak. Jako plyn konající práci se dříve používal vzduch. Dnes se kvůli vyšší tepelné vodivosti a menším turbulentním ztrátám používá raději helium či vodík. Stirlingův motor se vyskytuje v mnoha modifikacích. Písty mohou být v samostatných válcích, nebo v jednom válci společném, kdy jeden z pístů pracuje v dvojčinném režimu. Hlavní výhodou je skutečnost, že tento motor může pracovat s nejrůznějšími zdroji vnější tepelné energie. Geotermální či solární energií počínaje a fosilními palivy či biomasou konče. Termická účinnost se u motorů s výkonem 1 až 25 kW pohybuje v rozmezí 25 až 33%. Energetická účinnost v rozmezí 18 až 22%. Dalšími výhodami jsou tichý chod, vysoká životnost či minimální možnost poruchy. Teoreticky by také Stirlingův motor mohl pracovat s větší účinností, a tím přispět k šetření energie a ochraně přírody, v praxi se to ale moc nedaří, protože se dá těžko dosáhnout vysoké pracovní teploty. Nevýhodou motoru je špatná regulovatelnost a malá pohotovost k provozu. Potřebuje také poměrně velký chladič s výkonným ventilátorem a pro dosažení vysoké účinnosti musí pracovat s vysokými tlaky plynu. Používá se tedy většinou jako stacionární motor.

3 Motory s vnitřním spalováním

Na rozdíl od předchozího druhu spalovacích motorů, v těchto probíhá hoření paliva přímo v pracovním prostoru motoru. Dosahují výrazně lepších poměrů hmotnost/výkon, ale zase produkují více oxidů dusíku, což je způsobeno vyššími teplotami a tlaky při spalování. Motory můžeme rozdělit podle způsobu předávání energie spáleného paliva. Toto může probíhat pomocí pístu (rotačního, nebo s vratným lineárním pohybem), lopatek turbíny, nebo samotným reakčním efektem. Rotační píst používá například Wankelův motor, vratné písty většina dnešních automobilů a motocyklů. Jakýmsi kompromisem mezi vratným a rotačním pohybem je technicky velice zajímavý rotační radiální (hvězdicový) motor, který se používal v letadlech před První světovou válkou a v jejím průběhu. Turbína se používá u turbínových motorů, kde se využívá buď pohybu osy turbíny, nebo samotného reakčního efektu u proudového motoru.

3.1 Rotační (Wankelův) motor

Wankelův motor byl postupně v 20. - 50. letech vyvinut Felixem Wankelem. Jde o rotační spalovací motor, kde spalování směsi probíhá ve třech rotujících komorách. Komory jsou realizovány oválným válcem a téměř trojúhelníkovým pístem. V tomto motoru žádná součást nevykonává vratný pohyb, takže není třeba používat vyvažovacích hřídelí nebo jiných řešení k potlačení vibrací, např. uložení na silentblocích. Velkou výhodou je také absence ventilů, protože ty jsou u spalovacích motorů s vratným pohybem pístů hlavním důvodem omezování provozních otáček. Změna pracovního prostoru je realizována cyklickým vzdalováním plochy pístu od plochy válce a následným opětovným přibližováním, přičemž všechny tři hrany pístu, oddělující jednotlivé spalovací komory, se válce neustále dotýkají. Hrany pístu se pohybují po křivce zvané epitrochoida. To je umožněno odvalováním větší kružnice vnitřního ozubení pístu po menší kružnici - ozubené hřídeli. Poměr počtu zubů většího kola k počtu zubů menšího kola je 3:2. Je možné konstruovat i rotační motory s čtyřúhelníkovým pístem a poměrem zubů 4:3, ale v praxi se tento model nepoužívá. Teoreticky lze zkonstruovat i rotační motory s pěti komorami a poměrem 5:4 atd., ale takové motory nevznikají ani ve formě prototypů a raději se vyrábějí tříkomorové víceválce. Další výhodou těchto motorů je nízká hmotnost a klidný chod. Nevýhodou jsou vysoká spotřeba pohonných hmot, konstrukčně daná nedokonalá těsnost mezi jednotlivými komorami, způsobující nedosažitelnost vyššího kompresního poměru, a spotřeba oleje. Nižší spalovací teplota a tlak mají příznivý vliv na obsah oxidů dusíku v emisích. Radost ekologům ovšem kazí spotřeba oleje, která úsporu škodlivin ze spalování benzínu zdaleka překonává. Wankelův motor se používal v automobilech (např. Lada, Citroen), v motocyklech (např. NSU), v dnešní době se sériově montuje v dvouválcovém provedení jen do Mazdy RX8 [6].



Obrázek 3.1: Schéma Wankelova motoru

3.2 Spalovací motor s vratným pohybem pístů (dále v této kapitole jen motor)

Pístové motory nás doslova obklopují. Od nejmenších spalovacích motorků v RC modelech, přes většinou dvoutaktní motory pohánějící motorové pily a jiné nářadí, kompaktní motory motocyklů všech různých objemů, různé, ať už vznětové či zážehové motory pohánějící automobily, obrovské pomaluběžné lodní motory, až po gigantické stacionární motory. Všechny ale mají společné principy, společné mechanismy a společné, ač velikostí diametrálně odlišné, díly.

3.2.1 Válec a píst

Pevný válec a pohybující se píst (zpravidla, výjimky zmíním v pozdější kapitole) tvoří v motoru proměnlivě objemný pracovní neboli spalovací prostor. Protože je pohyb pístu posuvný, je potřeba nějakým způsobem utěsnit styčnou plochu s válcem. Toto je realizováno pomocí jednoho či více pístních kroužků uložených ve výřezech pístu. Dotěsnění této styčné plochy dopomáhá i olej, jenž je primárně určen k mazání pohyblivých spojení a dotýkajících se ploch v motoru. Kromě toho také pomáhá chladit motor.

Válec má určitý průměr, který označujeme vrtání. Některé motory sice mají oválný průřez, ale těchto motorů je velmi málo. Pokud vrtání není rovnoměrné, nebo průřez válce není přesně kruhový (takzvaná ovalita) a hodnoty překračují normy, jde o opotřebený motor a je třeba co nejdříve provést výbrus, převložkování, nebo potáhnout stěny novým nicasilem. Nicasil je vrstva pokovení, do které se vybrušuje základní hodnota vrtání potřebná pro píst. Píst se pohybuje po přímce z horní

úvrati (HÚ) do dolní úvrati (DÚ). Vzdálenost těchto dvou bodů je dána délkou ramene klikové hřídele – je jejím dvojnásobkem. Nazývá se zdvih.

Násobek $vrtání \times 2 \times p \times zdvih$ určuje zdvihový objem.

Poměr zdvihu a vrtání určuje motor „čtvercový“, pokud se tyto dvě míry rovnají, „podčtvercový“, pokud je vrtání větší než zdvih, nebo „nadčtvercový“, když je zdvih větší než vrtání. Teoreticky by bylo výhodné vyrábět motory s minimálním vrtáním a o to větším zdvihem – plocha pístu nemá na přenesenou sílu vliv a větší zdvih znamená větší páku na klikové hřídeli, a tím pádem větší točivý moment. V praxi je ovšem situace jiná. Nehledě na to, že válec o průměru několika málo centimetrů a výšce v řádech metrů by nepříjemně ovlivnil velikost a tvar samotného motoru, bylo by technicky velice složité realizovat přenos síly z pístu na klikovou hřídel, protože by se ojnice při svých maximálních výkyvech do válce jednoduše nevešla. Kromě toho by byl tvar pro hoření směsi extrémně nevýhodný a hoření by probíhalo pomalu a nedokonale. Dalším problémem by byla velmi vysoká střední rychlost pístu a, tedy by nebylo možné používat motor ve vyšších otáčkách. Proto se používají „rozumné“ poměry vrtání a zdvihu. Pro nízkootáčkové motory zpravidla nadčtvercové kvůli zvýšení točivého momentu, pro vysokootáčkové motory podčtvercové, které umožňují dosahovat vysokých otáček, a tím získat výkon z otáček místo z točivého momentu, protože jak víme

$$P = 2 \times p \times M \times n \text{ (výkon[W], točivý moment[Nm], otáčky[1/min]).}$$

3.2.2 Kliková hřídel, ojnice

Kliková hřídel spolu s ojnicí slouží k převedení posuvného pohybu pístu na pohyb rotační. Kliková hřídel je uložena v ložiscích v bloku motoru a mívá k sobě připojen setrvačnický k vyhlazení rázů od pístů. Uložení je závislé na konkrétním motoru, jen u řadových čtyřválců bývá uložena dvěma způsoby. První, jednodušší a levnější, je používán u levnějších motorů s nižšími výkony (např. byl používán u vozidel značky Škoda) a spočívá v uchycení k bloku jen na třech místech – před válci, mezi druhým a třetím válcem a za válci. Toto řešení je jednodušší na výrobu, protože není potřeba soustružit 5 dosedacích ploch pro ložiska, ale jen tři, levnější, jelikož dojde k úspoře materiálu, práce a ložisek, ale umožňuje klikové hřídeli deformovat se. Druhá varianta upevňuje klikovou hřídel pětkrát, tedy mezi každými dvěma válci, a ač je dražší a náročnější na výrobu, umožňuje vyšší zatížení klikové hřídele a zaručuje vyšší životnost. Kliková hřídel rotuje a vzhledem ke své excentricitě mívá často protizávaží. Toto můžeme vidět obzvláště u jednoválců, u víceválců je často motor vyvážen vzájemným úhlovým posunutím válců, ale o tom až později. Ojnice spojuje píst s klikovou hřídelí. Vykonává kývavý pohyb, který je kombinací rotačního pohybu klikové hřídele a lineárního pohybu pístu. Pohyb pístu není vlivem konečné délky ojnice popsitelný jednoduše funkcí sinus, protože nemůžeme zanedbat boční výkyv ojnice. Teoreticky by se při nekonečně dlouhé ojnici píst pohyboval po sinusovce.

3.2.3 Počet válců, jejich uspořádání

V honbě za větším a větším výkonem motoru se jednoválcový motor zvětšoval a zvětšoval, ale od určité hranice už to přestalo být efektivní. Proč? Když osvědčený motor zvětšíme dvakrát, vzroste jeho zdvihový objem (nesprávně často nazývaný jako obsah motoru) osmkrát. Přitom ale průměr sacích a výfukových kanálů vzroste jen čtyřikrát. Rychlost hoření směsi se nezvýší. Každá součástka ale bude osmkrát těžší a bude mít větší setrvačnost, zatímco pevnost materiálu se opět nezmění, takže maximální dosažitelné otáčky se rapidně sníží, nemluvě o problematickém chlazení. Proto se zdvihový objem rozděluje do více válců, čímž lze zachovat rozumnou hmotnost součástí, a tedy i jejich přijatelnou setrvačnost, umožňující zachovat maximální otáčky. Méněválcový motor bude mít větší točivý moment vycházející z většího zdvihu, a tedy páky na klikové hřídeli, ale nižší maximální otáčky a maximální výkon, než víceválcový motor srovnatelného objemu. Méněválcové motory také více zatěžují spojku a převodovku svými rázy.

3.2.3.1 Jednoválcové motory

Jednoválcové motory se vyrábějí od nejmenších modelářských motorů se zdvihovým objemem řádově kolem několika málo kubických centimetrů, přes největší sériově vyráběný motocyklový jednoválec o objemu 800 ccm, který má v rámu enduro Suzuki DR BIG, až po experimentální ruský třílitrový jednoválec určený pro motocykl. Pro zajímavost - tento motor nebyl vybaven vyvažovacími hřídelemi, a proto musel být už tak dost těžký motocykl ještě dovybaven postranním vozíkem, aby neposkakoval po asfaltu. Vyvažovací hřídele jsou hřídele rotující dvojnásobnou rychlostí než kliková hřídel, ale v opačném směru. Eliminují vibrace způsobené anomálií pohybu pístu – již zmíněný vliv konečné délky ojnice.

3.2.3.2 Řadové motory

Takové motory mají válce v řadě, tedy osy válců jsou rovnoběžné. Dvouválce bývají většinou pootočené o 180°, čímž se částečně navzájem vyvažují. Některé ale mají posunutí 0° - často je to pro zachování stejných parametrů jako u jednoválce - velký točivý moment v nízkých otáčkách. U dvoutaktních motorů, většinou motocyklových, je tato úprava častá. U čtyřtaktních potom charakteristika chování záleží na nastavení vačkových rozvodů a zapalování. Čtyřtakty, na rozdíl od dvoutaktů, pálí jen jednou za dvě otáčky. Tříválce, které známe například z vozidel značky Škoda, mívají posunutí válců na klikové hřídeli zpravidla o 120°, u čtyřválců chodí první píst se čtvrtým a druhý píst se třetím. Zapalování mají dvojice pístů posunutých o 360°, takže každou půlotáčku pálí jeden válec. Takové uspořádání motoru má dnes většina osobních automobilů. Dvoutaktní čtyřválec má zalomení klikové hřídele po 90°, protože pálí při každé otočce a v uspořádání jako čtyřdobý čtyřválec (1. s 4. , 2. s 3.) by se vykazoval dvouválcovým chováním - dvojice pístů by pálily

současně. U víceválcových řadových motorů už bývá uspořádání válců a zapalování, případně rozvodů u čtyřdobých motorů, závislé na konkrétním provedení.

3.2.3.3 Motory do V (správně V-motory)

Dvouválcové motory do V se montují převážně do motocyklů. Např. legendární motor HD TwinCam s rozevřením válců do 45° a oběma ojniciemi uchycenými na jedné hřídeli. Tento motor se vyznačuje velikou předimenzovaností dílů, velmi často se používá po extrémním vyladění na závodech dragsterů a po doplnění o turbodmychadlo, kompresor, nebo N2O systém dosahuje řádově několikanásobných výkonů, než měl v sériovém provedení. Jen o něco méně legendární motor do V s rozevřením válců do úhlu 90° (lze tedy mluvit o motoru do L) představila Suzuki v roce 1998 v nekompromisním supersportu TL1000. Tento motor se dodnes dodává do motocyklu Suzuki SV1000, ovšem už v přiškrcené a kultivovanější podobě. Víceválcové motory do V se používají jak u motocyklech – ovšem tady jen do čtyřválců (pokud nepočítám studii Dodge Tomahawk s desetiválcovým osmilitrem původně z vozu Dodge Viper), tak u automobilů. U víceválců se kvůli značné délce bloku motoru používá koncept do W. Speciálním případem motorů do V jsou motory s rozevřením válců do úhlu 180°. Tyto motory se opět používají jak u motocyklů, tak u automobilů. Jejich výhodou je jednoduché vyvážení – písty běhají proti sobě, u motocyklů je pak nevýhoda podélného uložení a značná zranitelnost hlav válců. K problematice uložení motoru se dostaneme později.

3.2.3.4 Hvězdicové motory

Radiální, neboli hvězdicové motory byly značně oblíbené u leteckých konstruktérů před První světovou válkou a během ní. U těchto motorů jsou válce uloženy do hvězdy a všechny ojnice jsou uchycené na jeden klikový čep. Pro vyvážení stačí vývažek na klikové hřídeli. Tyto motory byly pro letadla vhodné pro svou krátkou stavbu a jednoduché vyvážení. Technickou třešničkou na dortu byly rotační radiální motory, kde byla kliková hřídel napevno uchycena k letadlu a celý motor se otáčel kolem ní. Vrtule byla přimontována přímo k němu. Takové uspořádání mělo ve své době mnoho výhod. Uložení motoru mimo letadlo se odfiltrávaly i poslední vibrace, které nešlo odstranit vyvážením a které měly velice neblahý vliv na veškeré spoje na konstrukci letadla. Dále se projevoval velký gyroskopický efekt, který letadlo stabilizoval. O ztíženém manévrování nemá smysl mluvit, protože veškeré ovládací plochy, kterým by to mohlo klást odpor (výškovka, směrovka), měly velkou páku – tedy celou délku letadla. Náhlá změna rychlosti otáčení vrtule byla sice ztížena, ale nebylo potřeba ji provádět. Dále se takovýto motor nápořem proudícího vzduchu výborně chladil. V té době totiž nebyly vodou chlazené motory příliš rozšířené a pro letadla by byly přehnaně těžké. Směs vzduchu a benzínu se přiváděla přes klikovou skříň, tudíž při vyšších otáčkách odstředivá síla způsobovala efekt podobný dnešnímu přeplňování. Pro zajímavost - jeden z prvních motocyklů, tedy spíše motorový bicykl, používal rotační radiální motor umístěný mezi výpletem předního kola.

3.2.4 Uložení motoru

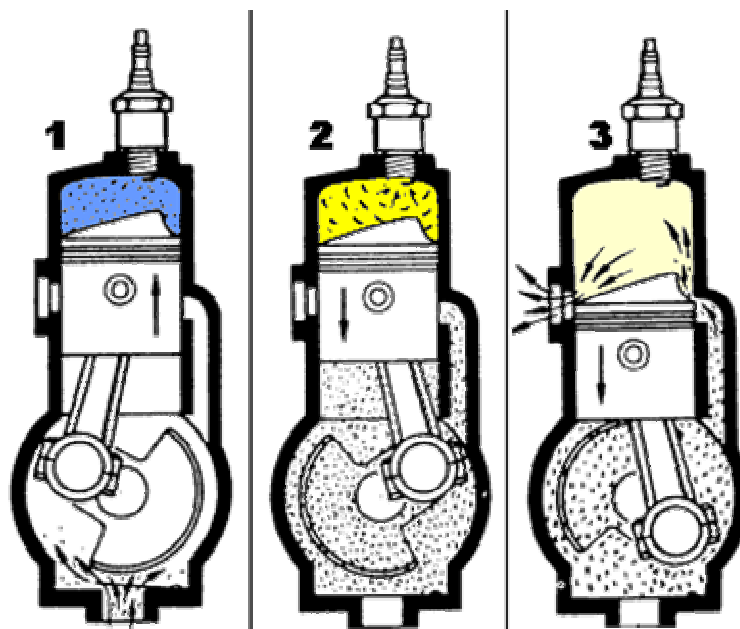
Motor může být uložen podélně (tj. osa vozidla je rovnoběžná s osou klikové hřídele) nebo příčně (tj. osa vozidla je k ose klikové hřídele kolmá). Podélné uložení je výhodné tím, že motor, spojka i převodovka jsou v jedné přímce a můžou být napojeny přímo bez zbytečných převodů navíc. Nevýhodou pak jsou u automobilů zvýšené nároky na prostor pro motor. Zvláště u řadových motorů nebo víceválcových V-motorů – tady pomáhá rozdělení válců do tvaru W. U motocyklů je zas velkou nevýhodou přenášení setrvačného momentu rotujících částí motoru do rámu při změně otáček motoru. Při zvýšení otáček má motocykl tendenci se naklánět na jednu stranu, při snížení otáček na stranu druhou.

Příčně uložený motor v automobilu šetří místo, u motocyklu eliminuje přenos setrvačného momentu do rámu. Nevýhodou je naopak nutnost primárního převodu mezi motorem a převodovkou.

3.2.5 Dvoudobý zážehový motor

Dvoudobý motor se v dnešní době využívá stále méně často. Je k tomu několik důvodů. Zaprvé má menší účinnost, a tedy při stejném výkonu jako čtyřtakt větší spotřebu. Dále nespaluje dokonale, protože není možné zajistit, aby se částečně nesmísily spaliny s nově nasávanou směsí, což způsobuje vyšší hodnoty škodlivých látek v emisích. Ovšem ještě nepříjemnější efekt pro emise je to, že dvoutaktní motor pro svůj běh využívá i spodní stranu pístu, a tedy nemůže být mazán tlakovým oběhovým mazáním jako motor čtyřtaktní. Proto musí spalovat i olej přimíchaný ve směsi paliva a vzduchu. Toto neplatí pro dvoudobý vznětový motor, jak zmíním později. Princip dvoudobého zážehového motoru je jednoduchý. Při pohybu pístu od dolní úvrati k horní se směs nad pístem stlačuje. V ten stejný okamžik se prostor pod pístem zvětšuje, klesá zde tlak a okolní atmosférický tlak sem žene přes karburátor nebo kolem vstřikovací trysky čerstvou směs. Krátce před dosažením horní úvrati (předstih) dojde na elektrodách svíčky k přeskočení jiskry, a tím se směs zažehne. Řádově se tam napětí pohybuje v řádu jednotek až desítek kilovoltů. Míra, o kolik proběhne zažehnutí dříve, než dosažení horní úvrati, se nazývá předstih. Expandující zapálený plyn působí silou na píst, který již mezi tím stihl překonat horní úvrat, a tím jej dává do pohybu směrem k dolní úvrati. Píst svou stěnou zakrývá sací kanál ústící do prostoru pod ním, posunuje se dále k dolní úvrati, čímž zmenšuje objem prostoru pod pístem a zvyšuje v něm tlak. V určitém okamžiku píst svou stěnou odkryje výfukový kanál spalovacího prostoru a zplodiny začnou proudit výfukovým kanálem do výfukového potrubí. Jen o malou chvíli později je odkryt i přepouštěcí kanál a směs pod tlakem se začne přelívat do prostoru nad pístem. Vytlačí zbytkové zplodiny do výfukového kanálu, ale vlivem své setrvačnosti částečně také opouští spalovací prostor. Tady se ke slovu dostává důležitost správně navrženého výfukového systému, jenž je u dvoutaktních motorů klíčový. Výfukové plyny proudící ven mezi tím narazily na dno expanzní komory ve výfukovém systému a odražené zpět se vracejí k výfukovému

kanálu, čímž natlačí uniknuvší čerstvou směs do spalovacího prostoru. V zápětí píst, který v této době již dávno překonal dolní úvrať, uzavírá výfukový i přepouštěcí kanál. Jak je vidět, velmi záleží na správném načasování této zpětné vlny, a tedy na délce výfukového potrubí. Mezi tím už se pod píst nasává čerstvá směs a nad pístem se stlačuje směs právě přepuštěná. Vše se může opakovat. Samozřejmě nic nefunguje stoprocentně, zvláště když máme pevnou délku výfukového potrubí, ale proměnné otáčky, a tak se vždy alespoň část plynů smíchá a do výfuku jde nějaký malý objem nespáleného benzínu, zatímco zplodiny zbytečně prožívají ještě jednu expanzi. I přes nedokonalost spalování a malou účinnost dokáže dvoutaktní motor při stejném objemu disponovat větším výkonem, než jeho čtyřtaktní protějšek. To je způsobeno skutečností, že u dvoutaktního motoru je při každé otáčce předán výkon – na rozdíl od každé druhé otáčky u čtyřtaktů. Navíc bude takový motor mnohem lehčí, protože neobsahuje další složité součásti jako rozvody. Proto se dvoutaktní motory s oblibou používají v místech kde záleží na váze – lehké terénní motocykly, ruční nářadí, modelářství... Dvoutaktní motor také na rozdíl od čtyřtaktu nelze přetočit – nemá ventily, které by se mohly srazit s pístem, jen je citlivý na mazání. Při jízdě z kopce se zavřeným plynem se motor otáčí rychle, ale nevstupuje do něj téměř žádná směs paliva s pro něj životně důležitým olejem. Kromě toho se tím snižuje efekt vnitřního chlazení. Proto se například u dvoutaktních automobilů značky Wartburg montovala na poslední (tj. čtvrtý) rychlostní stupeň volnoběžka, systém známý například z jízdních kol, umožňující jízdu z kopce se zařazenou rychlostí na volnoběžné otáčky.



Obrázek 3.2: Schéma funkce dvoudobého zážehového motoru

3.2.6 Dvoudobý vznětový motor

Veřejnosti nepříliš známý je dvoudobý vznětový motor. Tento typ motoru se používá jako stacionární agregát a jako zdroj elektrické energie v dieselelektrických lokomotivách. Na rozdíl od

benzínových dvoutaktních motorů se může tento koncept motoru chlubit velice příznivými hodnotami zplodin. Princip je následující: Vzduch je kompresorem tlakován na velmi vysoké hodnoty a uchováván v zásobníku. Při pohybu pístu z dolní úvratí do horní úvratí se velice brzy otevírá přepouštěcí kanál a prostor nad pístem se plní stlačeným vzduchem. Vzápětí se kanál uzavírá plochou pístu a jeho dalším pohybem vzhůru se vzduch dále stlačuje. Tím dosáhne dostatečně vysokého tlaku a teploty pro vznícení nafty. Těsně před dosažením horní úvratí je palivo vstříknuto do spalovacího prostoru, kde okamžitě dojde k jeho vznícení. Zatímco hořením směsi ve spalovacím prostoru dále vzrůstá tlak, píst překoná horní úvratě a je tlačěn k dolní úvratí. Před jejím dosažením se otevírá výfukový ventil, spálená směs uniká do výfukového potrubí. Později se otevírá přepouštěcí ventil a výfukový zavírá. Spalovací prostor se plní stlačeným vzduchem a cyklus se opakuje. Tento motor je velmi účinný – při každé otáčce dochází k vznícení. Protože, na rozdíl od zážehového dvoutaktu, není využit prostor pod pístem, je motor mazán stejně jako čtyřtaktní motor tlakově oběžným mazáním a nedochází tedy ke spalování oleje. Tedy alespoň ne ve významné míře. I přes zmíněné výhody není tento typ motoru vhodný pro pohon vozidel, protože má značnou hmotnost, což je způsobeno dimenzovaností na velice vysoké tlaky a vysokou prostorovou náročnost kvůli velkému kompresoru a tlakové nádobě na stlačený vzduch.

3.2.7 Čtyřdobý motor obecně

Čtyřtakt je v dnešní době nejrozšířenějším spalovacím motorem vůbec. Jeho činnost lze, jak je odhadnutelné z názvu, rozdělit do čtyř částí – sání, komprese, expanze, výfuk.

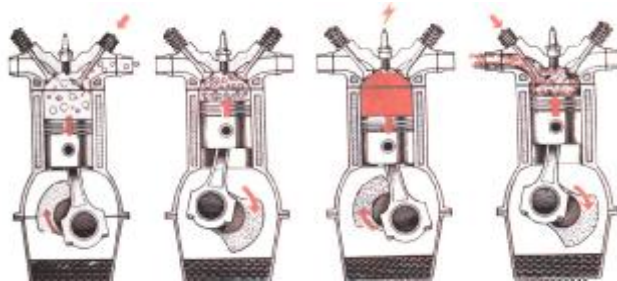
Sání – píst se pohybuje od horní úvratí k dolní, sací ventil je otevřen. Objem pracovního prostoru se zvyšuje, vzniká v něm podtlak a směs je nasávána. Sací ventil se zavírá.

Kompresce – píst se pohybuje od dolní úvratě k horní, oba ventily jsou uzavřeny. Objem pracovního prostoru se zmenšuje, nasátá směs se stlačuje, roste tlak a teplota.

Expanze (neboli výbuch) – hořící směs paliva a vzduchu tlačí píst z horní úvratě do dolní.

Výfuk – píst se pohybuje z dolní úvratě do horní, výfukový ventil je otevřen. Spálená směs je vytlačována do výfukového kanálu, opouští motor výfukovým potrubím, výfukový ventil se zavírá.

Tento cyklus se periodicky opakuje.



Obrázek 3.3: Schéma čtyřdobého motoru

3.2.8 Čtyřdobý zážehový motor

Zážehové motory používají k zažehnutí směsi svíčku. Svíčka je zašroubována do hlavy válce a její jiskřiště, skládající se ze dvou a více kontaktů, je zasunuto do spalovacího prostoru. Těsně před dosažením horní úvratě při fázi komprese dojde na jiskřišti k přeskočení jiskry – jedná se o napětí v řádech jednotek až desítek kilovoltů. Toto vysoké napětí vzniká v zapalovací cívice. Cívka může být společná pro všechny válce – zde je použit rozdělovač, nebo zvlášť pro každý válec. Rozdělovač je zařízení, které přiděluje vysokonapěťové pulsy ke správným svíčkám. Někdy se také používá jedna svíčka pro dva válce s pootočením klikové hřídele o 0° a s posunutím zapalování o 360° . Při takovémto zapojení jiskra vzniká před každou horní úvratí - ve fázi mezi výfukem a sáním ovšem nemá žádný vliv – jde pouze o zjednodušení zapojení.

Předstih – pojem „předstih“ znamená úhel otočení klikové hřídele, o který zážeh předběhne dosažení horní úvratí. Nutnost předstihu vyplývá z konečné rychlosti hoření směsi paliva se vzduchem – při 6.000 otáčkách za minutu dochází k zážehu každých 20 milisekund, takže zdánlivě velká rychlost hoření přestává být dostatečná. Velikost předstihu tedy závisí na otáčkách. Starší motory měly předstih nastaven napevno, šlo tedy o jakýsi kompromis mezi výkonem ve vysokých otáčkách a schopností nezhasínat v otáčkách nízkých. Moderní motory mají předstih řízen elektronicky v závislosti na otáčkách a jiných čidly naměřených hodnotách. Tento motor používá ve většině případů jako palivo benzín, ovšem je schopen spalovat i LPG, alkohol, nebo methanol. Při použití jiných paliv pak ovšem záleží na kompresním poměru, k němuž se dostaneme později.

3.2.9 Čtyřdobý vznětový motor

U vznětových motorů se využívá té vlastnosti nafty, že se při vstříknutí do stlačeného velmi zahřátého vzduchu sama vznítí – odtud také pochází jejich označení. Ve fázi, kde u zážehových motorů přeskakuje na jiskřišti svíčky jiskra, dochází u vznětových k samovolnému vznícení směsi. Tohoto je dosaženo vyšší kompresí, což má vliv na hmotnost motoru – aby zvládal vyšší tlaky, musí být dostatečně dimenzován. To se samozřejmě projeví na hmotnosti – proto se např. příliš nevyrábí diesellové motocykly (jsou i výjimky – např. britské motocykly značky Enfield – nyní vyráběné v licenci v Indii).

3.2.10 Atmosférické plnění motoru

Píst, pohybující se od horní úvratě k dolní při otevřeném sacím ventilu, zvětšuje objem pracovního prostoru motoru, čímž v něm snižuje tlak, a rozdíl tlaků oproti atmosférickému způsobuje proudění vzduchu do válce. Ovšem samotný vzduch by nehořel. Do válce je potřeba dostat i palivo. U zážehových motorů se používají čtyři způsoby mixování paliva se vzduchem:

- 1) karburátor – karburátor je zařízení pracující na principu snížení tlaku v plynu, pokud zvýší rychlost proudění. Přes trysku se nasává palivo a rozprašuje se. Při zahřátí směsi ve fázi komprese se odpařuje.
- 2) jednobodové vstřikování – v sacím potrubí je vstřikovací ventil, který podle pokynů řídicí jednotky dávkuje palivo do sacího potrubí společného pro všechny válce.
- 3) vícebodové vstřikování – vylepšená varianta jednobodového vstřikování, kde má každý válec v sání vstřikovací jednotku.
- 4) přímé vstřikování – obměna vícebodového vstřikování, vstřikovací jednotky dávkuje palivo pod vysokým tlakem přímo do spalovacího prostoru. Tento způsob plnění se používá i u vznětových motorů.

3.2.11 Přepřňování

Pro zvýšení výkonu je potřeba přeměnit chemickou energii většího množství paliva. Toho lze docílit buď zvýšením zdvihového objemu, nebo přepřňováním. Přepřňování znamená zvýšení tlaku v sání, čímž dojde k naplnění válce větším množstvím paliva s odpovídajícím množstvím vzduchu do válce. Dosáhneme toho třemi způsoby: turbodmychadlem, kompresorem, nebo náporovým sáním.

Turbodmychadlo (mezinárodně označované jako turbocharger) využívá zbytkové energie výfukových plynů. Systém spočívá ve dvou turbínách na jedné hřídeli. Jedna z nich je poháněna zbytkovou energií výfukových plynů, která by se jinak nevyužila. Pomocí hřídele je od ní poháněna druhá turbína, která nasává vzduch a pod tlakem jej vhání do sání. Turbodmychadlo je výhodné ve vysokých otáčkách, v nižších otáčkách nemá dostatečnou účinnost. Nevýhodou turbodmychadla je takzvaný turboefekt – prudký nárůst točivého momentu v otáčkách, kdy turbodmychadlo začne být účinné. Vozidlo se silným motorem s turbodmychadlem může tímto prudkým nárůstem točivého momentu nezkušenému řidiči způsobit problémy se zvládnutím řízení vozidla.

Kompresor (mezinárodně označovaný jako supercharger) pracuje na podobném principu jako turbodmychadlo, pouze není poháněn výfukovými plyny, ale převodem od klikové hřídele. Na rozdíl od turbodmychadla je účinný už od nízkých otáček. Ve vysokých naopak zbytečně zatěžuje motor (v těchto otáčkách uniká zbytečně mnoho zbytkového výkonu výfukem).

U obou systémů se někdy používá mezichladič vzduchu. Příliš teplý vzduch má nízkou hustotu, což má nepříznivý vliv na plnění. U dražších motorů a tam, kde nejde v první řadě o hmotnost, se používá kombinace obou těchto technologií. Při nízkých otáčkách se využívá kompresoru. Ten se při zvýšení otáček odpojí od klikové hřídele pomocí elektromagnetické spojky a nezatěžuje zbytečně motor, když už jeho funkci převezme turbodmychadlo. Podobný systém je použit u čerpadla klimatizace.

Náporové sání je konstrukčně velice jednoduché – jde v podstatě o jakýsi trychtýř vystavený náporu vzduchu, kterým proudí vzduch do sání. Je tedy pochopitelné, že náporové sání má efekt jen ve vysokých rychlostech.

3.2.12 Ventily

U motorů je potřeba otevírat a zavírat sací a výfukové kanály. Zatímco u dvoutaktních motorů je toto realizováno pomocí pohybu samotného pístu, u čtyřtaktů jsou použity ventily. Ventily bývají zpravidla ocelové. Jedná se o talířové ventily – tedy kónický talířek s dříkem, který dosedá na ventilové sedlo a v zavřeném stavu je naprosto utěsněný. K sedlu je přitahován pružinou pomocí dříku. Pro otevření se celý ventil posune směrem do spalovacího prostoru, čímž se otevře, a plyny proudí kolem něj – směs často dohořívá až ve výfukovém potrubí. Z tohoto důvodu jsou kladeny vysoké nároky na žáruvzdornost u výfukových ventilů.

3.2.13 Vačky

Ventily je třeba otevírat a zavírat v přesně daném okamžiku. To je realizováno pomocí vaček na vačkové hřídeli. Vačky ve svém tvaru obsahují předpis, kdy se bude ventil otevírat a kdy zavírat. Protože je potřeba otevřít ventil jen jednou za dvě otáčky klikové hřídele, vačková hřídel se otáčí poloviční rychlostí. Tvar vaček je na první pohled jednoduchý (vejčitý), ale ve skutečnosti musí splňovat několik důležitých parametrů. Tvar vačky musí být navržen tak, aby minimálně první dvě derivace jejího tvaru byly spojitě. To zaručuje pozvolně zrychlený pohyb bez rázů, které by mohly způsobit oddálení a vzápětí náraz jednotlivých částí systému. Opakované nárazy v systému by měly pro motor fatální následky. Při vhodném návrhu tvaru vaček ke ztrátě kontaktu mezi součástmi prakticky nemůže dojít. Ovšem i vratná pružina má určité parametry, proto není možné zvyšovat otáčky do nekonečna – pružina by pak nestihla ventil zavřít včas a ke ztrátě kontaktu a následným rázům by stejně došlo. O něco lépe na tom jsou desmodromické rozvody, které používá ve svých motocyklech značka Ducati. Tady je i zavírání ventilu realizováno pomocí vačky. Není tedy potřeba použít pružinu a motor může dosahovat podstatně vyšších otáček. Nevýhodou je pak složitost nastavení a nákladnost výroby, protože je použito dvakrát více vaček.

3.2.14 Ventilové rozvody

Od klikové hřídele je točivý pohyb přiveden k vačce, ta jej přemění na posuvný pohyb. Ten je pak přiveden k ventilu. Jakým způsobem to probíhá, určuje ventilový rozvod.

Jen okrajově bych chtěl zmínit ventilový rozvod typu SV (Side Valve – ventily po straně), kde je vačková hřídel uložena ve skříni motoru. Je poháněn ozubeným kolem přímo od klikové hřídele, ventily směřují dříkem směrem ke klikové hřídeli a jsou tedy umístěny „vzhůru nohama“. U dieselu je dokonce možno použít jeden ventil jak pro sání, tak pro výfuk. Rozvod je dostatečně tuhý, s malými rotačními hmotami, což je způsobeno absencí zdvihátek. Bohužel je nutný spalovací prostor, který není tvarově výhodný. V dnešní době už se tento systém nepoužívá [1].

U rozvodu typu OHV (Over Head Valve – ventily nad hlavou válce) je vačková hřídel uložena v bloku motoru. Přenos pohybu od klikové hřídele k vačkové bývá realizován většinou pomocí ozubených kol. Přenos pohybu od vačky k ventilu využívá soustavy zdvihátka, zdvihací tyče a vahadla. Výhodou tohoto systému je jednoduchý převod točivého pohybu z klikové hřídele na vačkovou hřídel, nevýhodou značná hmotnost, a tedy i setrvačnost celého systému. Proto tento rozvod není vhodný pro vysokootáčkové motory. Používá se například u motorů motocyklů značky Harley Davidson, kromě motorů typu Revolution, nebo u starších automobilových i motocyklových motorů (např. Škoda 120).

Nejmodernější a také nejvíce používaný je rozvod typu OHC (Over Head Camshaft – vačková hřídel nad hlavou válce). U této konstrukce je vačková hřídel umístěna, jak vyplývá ze samotného názvu, nad hlavou motoru. Přenos síly na ventil se děje buď přes vahadlo a nebo hrníčkové zdvihátko, přes které vačka vysunuje ventil do spalovacího prostoru přímo. Výhodou je nízká hmotnost a setrvačnost systému, a tedy vhodnost použití i pro vysokootáčkové motory, nevýhodou složitější přenos točivého pohybu z klikové hřídele na vačkovou hřídel. To bývá vyřešeno pomocí řetězu nebo ozubeného řemenu. Jednoduchou úpravou systému získáváme rozvod DOHC (Double Over Head Camshaft – dvě vačkové hřídele nad hlavou motoru) neboli 2x OHC. V tomto případě jsou nad hlavou válce umístěny dvě vačkové hřídele a na každý válec nepřipadají dva ventily, ale čtyři, což zajišťuje lepší plnění motoru ve vysokých otáčkách. Používá se u většiny motocyklových motorů a u výkonnějších automobilových motorů [2].

3.2.15 Překřížení ventilů

Ačkoliv by se mohlo zdát logické, že ventily jsou otevřeny přesně půl otáčky klikové hřídele, není tomu tak. Výfukový ventil se otevírá před dolní úvratí a zavírá až za horní úvratí. Podobně je tomu i u sacího ventilu. Je to způsobeno setrvačností plynů. Jak tedy vypadá otevírání a zavírání ventilů ve skutečnosti? Jsme ve fázi po zažehnutí směsi, píst se pohybuje k dolní úvratí. Výfukový ventil se otevírá ještě před dosažením dolní úvratě. Řádově se jedná o desítky stupňů u vysokootáčkových motorů, u nízkootáčkových méně. V tom okamžiku expandující plyny již předaly velkou většinu své energie pístu, tlak i teplota výrazně poklesly a píst pokračuje v pohybu spíše setrvačností než vlivem tlaku plynu. Je tedy výhodnější začít proces vypouštění zplodin, které sice nemají dostatečný tlak pro pohyb pístem, ale na opouštění spalovacího prostoru otevřeným výfukovým ventilem jim jejich tlak dostatečně. Píst překonává dolní úvratí a pokračuje nahoru, stále otevřeným výfukovým ventilem jsou zplodiny vytlačeny z válce. Před dosažením horní úvratě (opět řádově jednotky až desítky stupňů podle konstrukčních otáček motoru) se otevírá sací ventil a ventily jsou otevřeny současně. Vlivem setrvačnosti spálené směsi unikající výfukovým kanálem vzniká ve spalovacím prostoru podtlak a čerstvá směs se začíná nasávat i přesto, že se píst pohybuje k horní úvratí. Za horní úvratí se zavírá výfukový ventil a píst svým pohybem k dolní úvratí nasává čerstvou směs. Ventil zůstává otevřen i po

dosažení dolní úvratě a i přes zmenšující se pracovní prostor pokračuje plnění motoru čerstvou směsí vlivem setrvačnosti plynu. Ventil se zavírá. Pro nízké otáčky je výhodnější kratší otevření, a tedy i délka překřížení, pro vysoké naopak delší. Každý tvar vaček je ideální jen pro jedny konkrétní otáčky motoru. Reálná vačka je tedy kompromisem mezi ideálním plněním motoru ve vysokých a v nízkých otáčkách. Pro zvýšení výkonu se používají takzvané ostré vačky (s paradoxně tupějším tvarem), které způsobují zlepšení plnění ve vysokých otáčkách, a tedy zvýšení maximálního výkonu, ale zhoršení průběhu točivého momentu a výkonu v otáčkách nižších. Oba ventily zůstávají déle otevřené, prodlužuje se doba překrytí. Tato úprava je tedy vhodná spíše pro sportovní využití, kde se spektrum nízkých otáček nevyužívá. Řešení tohoto problému přináší systém proměnného časování ventilů VTEC používaný v některých motorech značky Honda. Každý ventil má dvě vačky – jednu pro nízké otáčky, druhou pro vysoké. Nevýhodou je větší nákladnost výroby[3].

3.2.16 Hlava válce

Hlava válce je tvořena zpravidla hliníkovým odlitkem. Obsahuje ventily, v případě (D)OHC rozvodů také vačkovou hřídel, případně vačkové hřídele. U zážehových motorů také zapalovací svíčku (výjimečně dvě svíčky), u vznětových motorů žhavicí svíčku. Protože vznětové motory využívají samovolného vznícení, k čemuž je potřeba dostatečná teplota, montují se do vznětových motorů žhavicí svíčky, umožňující studené starty. U motorů s přímým vstřikováním dále hlava obsahuje vstřikovací trysku. Ze spodní části je v hlavě válce prostor, do kterého se vysunují ventily a do kterého píst nezasahuje ani v horní úvratí.

3.2.17 Kompresní poměr

Objem prostoru v hlavě válce spolu se zdvihovým objemem motoru udává kompresní poměr. Ten vypočteme jako podíl maximálního a minimálního objemu pracovního prostoru.

U vysoce výkonných benzínových motorů je kompresní poměr natolik velký, že při použití běžného benzínu dochází k detonacím, což znamená nežádoucí vzplanutí směsi vlivem vysokého tlaku a teploty. Detonace se projevují klepáním motoru. Mají nepříznivý vliv na výkon i na životnost pohonného agregátu. Oktanové číslo udává odolnost benzínu proti těmto detonacím. Tankovat ale vyšší oktanové číslo, než je předepsané, nepřinese žádný pozitivní vliv na průběh činnosti motoru, pouze negativní vliv na peněženku.

3.2.18 Zvyšování výkonu

Zvyšovat výkon motoru lze mnoha způsoby, ačkoliv často vyjde výhodněji si jednoduše koupit jiný, výkonnější motor. Přesto jsou použitelné tyto způsoby:

Spálení většího množství paliva – toho lze dosáhnout buď zvětšením objemu, nebo přeplňováním. Zvětšování objemu se většinou provádí převrtáním válců na větší vrtání. Je zde třeba dát pozor, zda se tím příliš neoslabil stěny válce. Přeplňování již bylo zmíněno dříve.

Efektivnější spalování – pro ideální spálení paliva, a tím vyšší účinnost motoru, by byla ideální podstatně vyšší teplota, než při jaké probíhá spalování v dnešních motorech. Bohužel jsme limitováni oleji. Při příliš vysoké teplotě ztrácí olej viskozitu a mazací schopnosti. Zatím není známa technologie, jak vyrobit olej s dobrými mazacími vlastnostmi i při vysokých teplotách za přijatelné náklady. Tudy cesta tedy (alespoň zatím) nevede. Efektivnějšího spalování lze však docílit i větším rozdílem mezi maximálním a minimálním objemem pracovních plynů, tedy zvýšením komprese. Poměrně jednoduchou úpravou, která spočívá buď ve snížení hlavy válce, nebo instalací speciálních pístů, lze zvýšit výkon motoru. Nastává ovšem nutnost používat benzín s vyšším oktanovým číslem.

Kromě toho lze použít průchodnější vzduchový filtr, laděné výfukové potrubí, modifikovanou mapu vstřikování, již zmíněné ostré vačky, odlehčit rotující části, připojit N₂O systém atd.

Každé větší zvýšení výkonu ovšem znamená snížení životnosti motoru.

4 Návrh a provedení

4.1 Návrh

Po pečlivém prostudování zadání jsem si sepsal základní body, podle kterých jsem určil, jakým směrem se budu při vypracování práce ubírat. Z mnoha často protichůdných požadavků jsem po pečlivém výběru vyzdvihl ty, které jsem považoval za nejdůležitější.

4.1.1 Míra abstrakce a zjednodušení

Navrhnout vhodnou míru abstrakce je klíčovým problémem při návrhu jakéhokoli systému. Přílišné přibližování se k reálné předloze způsobí velké problémy. Systém bude příliš složitý na obsluhu, bude méně přehledný a při dovedení realističnosti do extrému také nepoužitelný. Při zvážení všech aspektů, které působí v reálném světě, by také byl program extrémně náročný na výpočetní výkon počítače a měl obrovské paměťové nároky. Musel by také počítat s nedokonalostí materiálu, nepřízní podmínek a jinými těžko předpověditelnými skutečnostmi, čímž by se vytratila elegance počítačové simulace dokonalého systému. Přesněji řečeno obrazu ideálního, ač v realu nedosažitelného, stroje. Poslední, avšak neméně závažnou nevýhodou by bylo neadekvátní množství práce, potřebné k vytvoření takového systému. Kromě toho, že kvalita a použitelnost výsledného produktu by ani zdaleka neodpovídala vynaloženému úsilí, nebylo by ani reálné takovýto projekt dokončit do stanoveného termínu. Nemluvě o testování, které jakožto neméně důležitý prvek tvorby softwaru, vždy vyžaduje nezanedbatelné množství času, nezřídka většinu času celkového, stráveného při vývoji. Tomuto nepříznivému stavu jsem se chtěl vyhnout, avšak takovým způsobem, abych vyhověl druhému požadavku. Tento požadavek je protichůdný k výše zmíněnému. Jedná se o nutnost provést vizualizaci natolik realisticky, aby projekt ve své hotové formě měl využitelnou vypovídající hodnotu. Přitom platí, že čím více vypovídající vizualizace bude, tím lépe.

Moje filozofie řešení tohoto problému byla následující: Součásti motoru, které mají funkci nosného prvku, nebudu v návrhu vůbec uvažovat, protože nemají ve vizualizaci vypovídající hodnotu. Tyto součásti naopak pouze ruší uživatele a odvádí jeho pozornost od součástí důležitých pro pochopení principu činnosti daného motoru. Podobně součásti pomocné, tedy například převody, nebo pomocné systémy, které přímo nesouvisí s principem motoru. Vybral jsem tedy jen součásti potřebné pro pochopení činnosti motoru. Tyto součásti jsem v návrhu zjednodušil natolik, aby byly univerzálně použitelné pro vizualizaci různých typů motorů, nezatěžovaly příliš počítač, ale zachoval jsem jejich důležité parametry.

4.1.2 Výhodné odchylky od skutečnosti

Zjednodušení některých vlastností zobrazovaných součástí může zabránit nepříznivému efektu přitahování pozornosti uživatele na detaily, které nejsou v dané situaci důležité. Některé vlastnosti zobrazovaných komponent jsem ale naopak oproti skutečnosti zněkolikanásobil, aby tyto na první pohled nepříliš výrazné, ale velmi důležité atributy, byly pro uživatele na první pohled zřejmé. To pomáhá pochopit základní principy práce motoru, bez kterých by motor nefungoval, nebo pokud ano, tak jen velice neefektivně. To se týká například ventilů, které mají oproti skutečnosti delší zdvih, takže proces jejich otevírání a zavírání je jednoduše postřehnutelný už na první pohled. Stejně tak vačky jsou modelovány do tvaru, který by v reálném motoru nebyl použitelný, ale pro vizualizační účely je více než vyhovující. Až extrémní doba trvání překřížení ventilů na tuto jejich vlastnost upozorní více, než při zachování její reálné doby trvání. Tato vlastnost plnění motoru je mezi veřejností jen málo známa, a je tedy vhodné ji zvýraznit. Vačky jsou modelovány jednoduchým způsobem, který by u reálného motoru způsoboval nadměrný hluk a rychlé opotřebenění souvisejících součástí. Pro počítačovou simulaci je ale tento model optimální, protože je jednoduchý na výpočet a u vizualizace k opotřebenění nedochází. Navíc tato nepřesnost není postřehnutelná pouhým okem.

4.1.3 GUI

Základním požadavkem bylo nabídnout uživateli co největší komfort při ovládní vizualizace. Všechny funkce musejí být dostupné pomocí polohovacího zařízení, vhodné je umožnit uživateli ovládat program rychlejším způsobem, prostřednictvím klávesových zkratk. Vhodné ovládní bývá často příčinou velkého úspěchu nebo naopak neúspěchu softwarového produktu, proto jej není vhodné podcenit, ale naopak se jeho návrhu dostatečně věnovat. Proto jsem se rozhodl pro ověřené intuitivní principy ovládní, na které je zvyklý každý uživatel počítače. Kliknutím pravým tlačítkem myši se vyvolává kontextová nabídka pro ovládní programu, tažením se současně stisknutým levým tlačítkem myši lze modelem motoru pohybovat. Klávesové zkratky jsem navrhl tak, aby bylo rozložení ovládacích kláves logické, intuitivní a snadno zapamatovatelné. Program jsem napsal takovým způsobem, aby bylo možné ovládní jednoduchou úpravou kódu modifikovat pro vyhovění specifických požadavků uživatele.

4.1.4 Zachování realističnosti

Důležitou fází návrhu bylo vybrat vlastnosti součástí, které je vhodné zachovat, nebo alespoň co nejméně zkreslit. Jedná se o základní parametry, které jsou neodmyslitelnou součástí vhodně navržené vizualizace. Jedná se například o nutnost zachovat dotek spojených součástí motoru. Pohyblivé spoje je potřeba namodelovat tak, aby bylo na první pohled patrné, o jaký způsob spojení

se jedná (například uložení v ložisku by nemělo být pohyblivé v jiných osách než ve skutečnosti). Analýza těchto vlastností tvořila nezanedbatelnou část samotného návrhu řešení.

4.1.5 Otevřenost pro pozdější navázání

Protože téma práce je velmi zajímavé, velice obsáhlé a daleko převyšuje možnosti jedné bakalářské práce, postupoval jsem při návrhu tak, aby výsledek byl dále rozšiřitelný a modifikovatelný. Vhodnou abstrakcí problémů jsem dosáhl takových způsobů řešení, které neuzavírají vývoj v žádném směru a umožňují projekt dále rozšiřovat, vylepšovat a doplňovat o další prvky, které by zvýšily použitelnost programu pro výuku a demonstraci funkce motorů. Jednou z možností dalšího vývoje je navázání na projekt v diplomové práci. Prostoru k vývoji kupředu je mnoho. Zajímavým rozšířením by kupříkladu byla simulace proudění plynů během pracovních cyklů, jejich vizualizace, výpočet vlivu a silového působení na jednotlivé součásti motoru. Dále výpočet setrvačných momentů motoru, třecích sil v pohyblivých uloženích, mechanických i tepelných ztrát, nebo přenos momentů přes uložení motoru do zbytku vozidla. Jiným směrem by se dalo ubírat například při důsledném modelování konkrétního existujícího motoru včetně všech ostatních podpůrných systémů a součástí, které přímo nemají vliv na princip činnosti motoru. Zpracování by mohlo být fotorealistické použitím textur reálných materiálů a realistickým osvětlením včetně odrazů a zrcadlení. Třetí možností rozšíření by bylo zdokonalení GUI pro komfortnější ovládání celého programu, přidání instalačního software, manuálu, helpu a jiných utilit, například WYSIWYG editoru nových typů motorů. Vše samozřejmě se zaměřením na využitelnost pro výuku například na základních nebo středních školách. Těmito příklady rozšíření ovšem možnosti nekončí a je jich ještě k dispozici celá řada.

4.1.6 Univerzálnost

Vhodným rozložením řešení problémů jsem dosáhl toho, že lze velmi jednoduše zobrazovat téměř libovolné typy pístových motorů s lineárním pohybem pístu. Tato vlastnost ušetří čas člověku, který by nebyl spokojen s paletou nabízených motorů a chtěl by si prohlédnout jiný typ. Jednoduchým stovebnicovým skládáním komponent v průhledném a čitelném zdrojovém kódu lze za velmi krátký čas vytvořit nespočetné množství variant motorů.

4.1.7 Výběr motorů

Definovat pojem „zajímavý“ není zcela triviální. Proto nemusí každý souhlasit s mým výběrem motorů. Snažil jsem se ale z mnoha existujících a nesporně zajímavých konstrukcí vybrat ty opravdu nejzajímavější. Ať už z technického hlediska, z hlediska historického, nebo z důvodu zachování pestrosti řešení v základní paletě nabízených motorů. Technickým hlediskem myslím zajímavé nebo průkopnické přístupy k realizaci motoru. Pod historickým najdete motory, které vyhrávaly války,

měnily dějiny, nebo prostě byly jen tak spolehlivé nebo kvalitní, že se zapsaly do dějin samy o sobě. Pro zmíněné zachování pestrosti jsem vynechával motory, které se, ač jsou z nějakého hlediska velmi zajímavé, příliš podobají motorům již obsaženým v nabídce. U motorů jsem zachovával poměry důležitých rozměrů. Z důvodu názornosti jsem ale vytvořil pouze rozvody typu OHC a DOHC, protože jiné typy rozvodů by byly náročné na modelování a co je podstatnější, kazily by přehlednost vizualizace a zbytečně mátlly uživatele. Proto se zobrazení některých motorů liší od skutečnosti.

4.1.8 Výukové účely

Vizualizace byla navržena tak, aby demonstrovala klíčové principy práce motoru. Dílčí a méně důležitá fakta zanedbává, aby zbytečně nerušila nebo nemátla uživatele. Důležité principy naopak ukazuje s reálnými parametry nebo u některých částí naopak zvýrazňuje klíčové vlastnosti průběhu jednotlivých fází běhu motoru.

4.2 Řešení jednotlivých součástí

4.2.1 Moduly

Pro jednoduchost implementace jsem zvolil postup modelovat motor z jednotlivých modulů, obsahujících buď jiné moduly, nebo konkrétní součásti. Základními moduly jsou samotné motory různých typů. Každý z motorů se skládá z jednoho nebo více kompletů. Komplet obsahuje klikovou hřídel, ojnici, píst a hlavu válce. V následující kapitole postupně rozeberu jednotlivé moduly.

4.2.2 Komplet dílů

Komplet dílů má parametr s názvem fáze. Tento parametr se počítá z času běhu motoru a určuje v jaké fázi se v který okamžik nachází. Pomocí něj se nastavuje uspořádání jednotlivých pístů na klikové hřídeli a aktuální natočení vaček. Před vykreslením je potřeba nastavit úhel naklonění, který určuje sklon osy válce.

4.2.3 Kliková hřídel

Modul kliková hřídel se řídí dvěma parametry: fáze a zdvih. Zdvih určuje délku jejího ramene. Fáze určuje její natočení. Protože je fáze udávána ve stupních a jednotkou otáčení souřadnic v OpenGL jsou též stupně, je její vykreslení triviální. Parametr zdvih určuje délku ramene, tedy vzdálenost čepu od osy hřídele. Modul nejprve zajistí příslušné otočení a zavolá vykreslení kliky. V ten okamžik se nejprve vykreslí obě nosné části klikové hřídele a následně čep v požadované vzdálenosti od osy otáčení.

4.2.4 Píst

Pro výpočet polohy pístu je nutné použít tři parametry: zdvih, délka ojnice a fáze. Protože pohyb pístu v čase není funkcí sinus, je nutné uvažovat i délku ojnice. Při nekonečně dlouhé ojnici by se pohyb pístu sinusovce přiblížil úplně, ale protože modelujeme reálné motory, musíme použít složitější funkci

$$d = r \times \left(1 + \left(\frac{l}{4}\right) - \cos j - \left(\frac{l \times \cos j}{4}\right)\right)$$

kde d je dráha pístu, φ je natočení kliky a λ je poměr délky ramene kliky r a délky ojnice.

Po výpočtu polohy pístu se nastaví počátek souřadnic na ono místo a píst se vykreslí.

4.2.5 Ojnice

Ojnice používá pro výpočet stejné parametry jako píst. Nejprve se spočítá poloha ramene klikové hřídele pomocí dvou rovnic

$$x = d \times \cos j$$

$$y = d \times \sin j$$

kde d je zdvih

a do vypočtených souřadnic se posune střed souřadného systému. Pak se vypočítá úhel naklonění pomocí následujících rovnic

$$b = \arcsin\left(\sin a \times \frac{d}{2 \times l}\right)$$

$$g = 2 \times p - (a + b)$$

$$w = 2 \times p - (a + g)$$

kde d je zdvih, l je délka ojnice, a je úhel pootočení klikové hřídele od horní úvratě, ω je výsledný úhel

O výsledný úhel se souřadný systém pootočí a ojnice se zadanou délkou je vykreslena. Správnost výpočtu polohy všech třech součástí způsobí to, že ojnice „lícuje“ jak s klikovou hřídelí, tak s pístním čepem.

4.2.6 Hlava válce

Tento modul používá opět stejné parametry jako moduly předchozí. Přesune souřadný systém nad horní úvrat' pístu použitím součtu délky ojnice, poloviny zdvihu, výšky pístu a výšky spalovacího prostoru. Potom zavolá modul ventil pro sací a pro výfukový ventil. Vzhledem k vzájemnému pootočení vaček sání a výfuku předá výfukovému ventilu fázi o 180° větší. Pokud je aktivována volba DOHC, zavolá obě vačky dvakrát. Samozřejmě vše s příslušným posunutím a nakloněním.

4.2.7 Ventil

Přepočítání fáze klikové hřídele na fázi vačky, která se točí dvakrát pomaleji, je realizováno jednoduchým vydělením fáze dvěma. Následuje vykreslení ventilu v odpovídající poloze. Kromě ventilu je také vykresleno sedlo ventilu pro názornější zobrazení funkce. Po posunutí souřadnic o délku ventilu je zavolán modul vačka.

4.2.8 Vačka

Návrh vačky byl velice komplikovaný, protože reálné vačky mají tvar jen těžko matematicky popsitelný. Nakonec se osvědčilo vačku modelovat jako modifikovanou kružnici. V polovině jejího obvodu je jedna ze souřadnic násobena konstantou 2.0, což sice neodpovídá realitě, ale je jednoduché na výpočet, tvar se podobá reálné vačce a pohyb ventilu je pro naši simulaci příznivější. Tímto zkrácením se zvětšuje doba překřížení ventilů, která by při reálném zobrazení nebyla dostatečně výrazná a postřehnutelná.

4.2.9 Způsob vykreslování

Pro jednoduchost a přehlednost nebyly uvažovány texture. Model lze zobrazit ve třech módech: Plošně, v drátěném modelu a pouze body. Protože každému uživateli vyhovuje něco jiného, může si přepnout do pro něj nejpříjemnějšího způsobu zobrazení. Po dobu běhu si program pamatuje volbu uživatele.

4.2.10 Selektce zobrazení jednotlivých součástí

Pro přehlednější zobrazení jednotlivých součástí motoru lze nechat zobrazit jen vybrané části. Zapínat/vypínat vykreslování lze u klikové hřídele, u ojnice, u pístu a u ventilů s vačkami. Program si opět po dobu svého běhu pamatuje volbu uživatele. Pomocí kontextového menu nebo klávesových zkratk lze také ovlivnit detailnost vykreslení scény. Díky tomuto program nemá problémy s plynulým během i na slabších počítačích.

4.2.11 Kamera

Kamerou lze pohybovat kolem modelu motoru a zoomovat. Ovládání je možné pomocí myši. Se stisknutým levým tlačítkem lze kamerou pohybovat, při stisknutí klávese Shift dojde k zoomování.

4.2.12 Simulace

Uživatel může ovlivňovat rychlost simulace pomocí kontextové nabídky nebo klávesovými zkratkami. Rychlost simulace závisí na proměnné, která se při každém provedení cyklu hlavní smyčky připočte k aktuálnímu času. Z něj se počítá aktuální úhel. Tato proměnná může mít i zápornou hodnotu, čímž otočí smysl rotace motoru. Jen je třeba si v tuto chvíli uvědomit, že ze sacích ventilů se stávají výfukové a naopak.

5 Implementace

V této části popíšu vlastní implementaci projektu. Vyjmenuji použité funkce, popíšu způsob jejich volání a parametry k zavolání potřebné. Dále zmíním problémy, na které jsem narazil při implementaci a popíšu, jakým způsobem jsem je řešil a zda ten který způsob řešení byl efektivní. V souladu se zadáním jsem projekt implementoval v jazyce C s použitím OpenGL[4,5].

Prvním vyskytnuvším se problémem, bylo problematické slinkování s příslušnými knihovnami v prostředí Dev-C++. Po několika pokusech o správné nastavení linkeru, jsem od plánu psát práci v tomto vývojovém prostředí ustoupil. Nainstaloval jsem tedy C/C++ plugin do původně Javového prostředí netbeans, ale ani zde jsem nebyl úspěšný. Nakonec jsem tedy zvolil klasickou osvědčenou metodu jednoduchého textového editoru (v mém případě CodePad) a překlada v konzoli. Pro úplnost uvádím, že projekt byl vytvořen a testován na stroji s Windows XP.

5.1 Časování

Pro jednoduchost použití jsem pro uložení aktuálního času použil globální proměnnou `time`. Typu `float`. K této proměnné se při každém provedení funkce `onTimer()` přičte proměnná `speed`, samozřejmě také typu `float`. Tato proměnná může dosahovat i záporných hodnot, a tím převrátit smysl otáčení vizualizovaného motoru, a lze, vzhledem ke svému datovému, nastavit téměř libovolně jemný krok. Ještě doplním, že funkce `onTimer()` se volá 40x za sekundu, tedy každých 25ms.

5.2 Pomocné funkce

Vzhledem k univerzálnosti řešení, jsem se rozhodl celou vizualizaci řešit pomocí vykreslování trojúhelníků a čtyřúhelníků. Pro jednoduchý postup a přehlednost kódu jsem vytvořil sadu pomocných funkcí. Pro všechny je společná jedna vlastnost – v for-cyklu rozdělí kulaté tvary do `n` polygonů, přičemž `n` závisí na globální proměnné `presnost`. Tímto způsobem lze dosáhnout velmi pěkných výsledků při vizualizaci, ale naopak i plynulý běh vizualizace i na podprůměrných strojích.

Základních funkcí `VykresliKruh()`, `VykresliPlast()` (myšleno plášť válce) a `VykresliMezikruzi()` využívají funkce `VykresliValec()` (myšleno geometrický objekt), `VykresliRouru()` a `VykresliKuzel()`. Kromě jejich parametru `presnost` používají ještě parametr `barva`, což je jednorozměrné pole typu `float` pro uložení hodnot pro `red`, `blue`, `green` a `alpha`, dále `polomer`, `vnitni_polomer` a `vyska` (pokud je třeba).

Pokročilé funkce jsou naopak využívány funkcemi určenými pro vykreslování jednotlivých komponent motoru. Tyto funkce mají za úkol pouze vykreslit součást motoru podle zadaných parametrů, k žádnému počítání polohy zde nedochází. Takovým způsobem to bylo uděláno z důvodu

jednoduchosti následujících úprav za účelem zobrazování realističtějších komponentů při dalším vývoji projektu. Jedná se o funkce `VykresliKliku()`, `VykresliOjnicu()`, `VykresliPist()`, `VykresliVentil()` a `VykresliVacku()`. Funkce se volají s parametry určujícími rozměry požadovaných součástí.

5.3 Hlavní funkce

Kterýkoli vykreslený motor se primárně skládá z jedné, nebo více sestav komponentů, které tvoří funkce `Valec()`. Tato funkce má za úkol vykreslit vše co s jedním válcem souvisí. Je volána s parametry `faze`, `zdvih` a `delka_ojnice`. Parametr `faze` se určuje z proměnné `time`, s ohledem na to, jak je kliková hřídel tohoto válce pootočená oproti horní úvratí v počátečním čase. Jedná se vlastně o aktuální natočení celého systému. Zdvih ani délka ojnice nejsou pro tuto funkci příliš důležité, jen je předává dalším funkcím. Funkce `Valec()` volá následující funkce: `Klika()`, `Ojnice()`, `Pist()` a `Hlava()`. Pro jednodušší provedení se před zavoláním posledních dvou zmíněných funkcí přenastaví souřadný systém otočením o 90° kolem osy `x` příkazem `glRotatef(90.0, -1.0, 0.0, 0.0);` abychom zachovali osu `Z` osou rotačních objektů.

Funkce `Klika()` je volána s parametry `faze` a `zdvih`. Podle parametru `faze` natočí souřadný systém do požadovaného otočení, a jednoduše zavolá pomocnou funkci `VykresliKliku()` s tím, že jí předá parametr `zdvih`.

Funkce `Ojnice()` použije všechny tři parametry. Pomocí nich spočítá aktuální polohu ramene klikové hřídele. Tam posune počátek souřadného systému. Potom vypočítá aktuální naklonění ojnice, podle výsledku nakloní souřadný systém. Oba výpočty jsou vysvětleny v kapitole `Návrh`. Nakonec vykreslí ojnicu o požadované velikosti zavoláním příkazu `VykresliOjnicu()` a předáním potřebných parametrů.

Funkce `Pist()` provede potřebný posun po souřadnicích na prostřední hodnotu zdvihu. Poté z parametrů `faze`, `zdvih` a `delka_ojnice` vypočítá aktuální polohu pístu. Do této polohy posune počátek systému a zavolá pomocnou funkci `VykresliPist()`.

Funkce `Hlava()` zajišťuje předání řízení funkci `Ventil()`. Tuto funkci zavolá 2x nebo 4x, podle toho, zda je aktivní volba `DOHC`. Před zavoláním ovšem posouvá souřadný systém tak, aby byly ventily se svými vačkami vykresleny na správném místě. Pro výfukové ventily posouvá fázi o 180°, aby se otvíraly a zavíraly ve správný čas.

Funkce `Ventil()` nejprve dělí fázi dvojkou (vačkové hřídele se otáčejí poloviční rychlostí než kliková hřídel). Poté vypočítá správnou polohu ventilu a po posunu na správnou lokaci zavolá funkci `VykresliVentil()`. Pro názornou simulaci také vykresluje ventilové sedlo. Nakonec, po posunutí na správné místo a příslušné pootočení, zavolá pomocnou funkci `VykresliVacku()`.

5.4 Vykreslení motoru

Vymodelování konkrétní motoru spočívá ve správné sekvenci posouvání a rotací systému a ve volání funkce `Valec()` se správnými parametry. Pro jednoduchost a funkčnost jsem sekvence pro vykreslení různých motorů zapsal do zvláštních funkcí. Každá z funkcí vykresluje jeden konkrétní motor. Například funkce `MotorHDTwin88()`, která zařizuje vykreslení legendárního motoru Harley Davidson TwinCam 88:

```
void MotorHDTwin88(float faze)
{
    vrtani = 4.756;
    float zdvih = 5.565;
    float delka_ojnice = 12.4;
    glTranslatef(0.0 , -delka_ojnice*0.8, 0.0);
    glRotatef(90.0 , 0.0 , -1.0 , 0.0);
    vyska_pistu = 5.0;
    glPushMatrix();
    glTranslatef(0.0 , 0.0 , 1.5);
    glRotatef(22.5 , 0.0 , 0.0 , -1.0);
    Valec(zdvih , faze+22.5 , delka_ojnice);
    glTranslatef(0.0 , 0.0 , 3.0);
    glRotatef(45.0 , 0.0 , 0.0 , 1.0);
    Valec(zdvih , faze-22.5+360.0 , delka_ojnice);
    glPopMatrix();
}
```

O tom, která funkce bude zavolána a tedy jaký motor se vykreslí, rozhoduje proměnná `typ`.

6 Závěr

V této práci jsem se pokusil co nejnázorněji popsat princip činnosti různých cyklických motorů. Myslím, že se mi to podařilo a tím jsem splnil zadání bakalářské práce. Začal jsem popisem spalovacích motorů s vnějším spalováním, ale nejvíce jsem se věnoval spalovacím motorům s vnitřním spalováním, konkrétně pístovým motorům s lineárním pohybem pístů. Ty jsou pro většinu lidí nejzajímavější, protože jsou součástí každodenního života. Tyto motory jsem také později použil v programové části práce. Popsal jsem principy činnosti vznětových i zážehových motorů, jejich odlišnosti i společné vlastnosti. Zmínil jsem odlišný princip dvoudobých a čtyřdobých motorů, jejich výhody a nevýhody z hlediska ekonomické náročnosti výroby, spolehlivosti, poměru výkonu k hmotnosti a účinnosti. Pokusil jsem se nastínit problematiku ventilových rozvodů u čtyřtákních motorů z hlediska vhodnosti pro motory určené k různému použití. Popsal jsem možnosti zvyšování výkonu motorů pomocí zvyšování množství spálené směsi, zlepšení efektivity spalování. Zmínil jsem se i o neblahém vlivu těchto úprav pro poruchovost agregátů.

V další části jsem rozebral možnosti dekompozice jednotlivých aspektů činnosti spalovacích motorů pro efektivní způsob vizualizace vybraných typů pístových spalovacích motorů na počítači. Uvažoval jsem nad různou důležitostí jednotlivých součástí motoru pro názorné vysvětlení principu činnosti. Důkladným rozebráním faktů jsem odfiltroval aspekty nevhodné pro realizaci v programu. Důvodem k vynechání součástí motoru může být jejich malá důležitost pro pochopení základních principů činnosti motorů, nebo, a co je ještě závažnější, negativní vliv na pozornost uživatele. Negativním vlivem je myšlena situace, kdy pohyb součásti, která je jen dílčí z hlediska principu funkce motoru, odvádí pozornost od pohybu součástí pro funkci motoru klíčových. V závěru této části jsem se zamyslel nad provedením návrhu vizualizace z pohledu její další využitelnosti pro rozšíření za účelem komplexní aplikace pro výuku principu spalovacích motorů na základních nebo středních školách. Dále jsem uvažoval o způsobu návrhu z hlediska jednoduché upravitelnosti pro poněkud jiné účely. Nezapomněl jsem zmínit zájem o pokračování v tomto projektu při řešení diplomové práce.

V poslední části práce jsem popsal způsob vlastní implementace programové části v jazyce C s použitím OpenGL. Popsal jsem hierarchii funkcí, způsob jejich vzájemného volání i parametry nezbytné pro korektní volání těchto funkcí. Popsal jsem problémy při implementaci programu, postup jejich řešení i úspěšnost, s jakou se tyto pokusy o řešení setkaly.

Realizace projektu mě zavedla do situací, které jsem do té doby neměl možnost řešit. Tím pro mě bylo řešení tohoto úkolu velice přínosné, protože jsem se naučil nové technologie i postupy řešení pro mě dříve neznámých situací. Projekt hodnotím jako velmi zajímavý a pevně doufám, že v podobném tématu budu pokračovat za dva roky při vypracovávání diplomové práce na Ústavu počítačové grafiky a multimedíí.

7 Literatura

- [1] Rollinger, M. GSXR Page [online]
URL: <http://www.gsxr.wz.cz/vacky.htm>
- [2] Automotive illustrated glossary [online]
URL: <http://www.samarins.com/glossary/dohc.html>
- [3] How stuff works – learn how everything works! [online]
URL: <http://auto.howstuffworks.com/camshaft.htm>
- [4] NeHe OpenGL tutoriály [online]
URL: http://nehe.ceskehry.cz/tut_obsah.php
- [5] Seriál grafická knihovna OpenGL – root.cz [online]
URL: <http://www.root.cz/serialy/graficka-knihovna-opengl/>
- [6] Jan, Z., Žďánský B. Automobily 3: Motory. Brno, Avid s.r.o., 2000, IBSN 16 916/2001-23.

Seznam příloh

Příloha 1. Manuál k aplikaci

Příloha 1. Manuál k aplikaci

Požadavky

Program ke svému korektnímu chování potřebuje knihovnu `glut32.dll`. Pro přeložení jsou potřeba knihovny `math.h`, `stdio.h`, `stdlib.h`, `gl/glut.h`, `gl/glaux.h`, `gl/gl.h`, `gl/glext.h` a `gl/glaut.h`. Program byl testován na platformě Windows XP.

Instalace

Instalace není nutná, stačí spustitelný soubor uložit na disk a spustit.

Ovládání

Aplikace lze kompletně ovládat pomocí myši. Při stisknutí levém tlačítku myši se jejím pohybem otáčí modelem motoru. Pokud přidržíme `shift`, dochází pohybem myši k zoomování.

Pravé tlačítko vyvolá kontextovou nabídku, která je dostatečně intuitivní. Z ní lze i vyčíst klávesové zkratky ale pro úplnost uvedu jejich seznam:

- +/- zvyšování/snižování kvality zobrazení (počtu vykreslovaných polygonů)
- q/a zrychlování/zpomalování rychlosti simulace
- z změna smyslu otáčení
- b,n,m přepínání způsobá zobrazení
- 0-9 přepínání jednotlivých typů motorů
- p zobrazení/skrytí pístu
- r zobrazení/skratí ojnice
- c zobrazení/skrytí klikové hřídele
- f fullscreen
- w přepnutí do defaultního okna
- x ukončení programu