



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

REALIZACE EDUKAČNÍ ÚLOHY NA EXPERIMENTÁLNÍ STANICI S VAČKOVÝM MECHANISMEM

REALIZATION OF EDUCATIONAL PROBLEM BASED ON EXPERIMENTAL APPARATUS WITH
CAM MECHANISM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

VOJTĚCH TOMEČEK

Ing. MICHAL VAVERKA, Ph.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Vojtěch Tomeček

kteřý/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Stavba strojů a zařízení (2302R016)**

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

Realizace edukační úlohy na experimentální stanici s vačkovým mechanismem

v anglickém jazyce:

Realization of educational problem based on experimental apparatus with cam mechanism

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem bakalářské práce je kompletní vytvoření výukové úlohy na experimentálním zařízení s vačkovým mechanismem.

Cíle bakalářské práce:

Diplomová práce musí obsahovat:

- 1.Úvod
- 2.Přehled současného stavu poznání
- 3.Formulaci řešeného problému a jeho analýzu
- 4.Vymezení cílu práce
- 5.Návrh metodického přístupu k řešení
- 6.Analýzu a interpretaci získaných údajů
- 7.Závěr

Forma diplomové práce: pruvodní zpráva

Účel práce: edukační

Typ práce: analytická

Seznam odborné literatury:

R.L. Norton: Cam Design and Manufacturing Handbook, 2002 Industrial Press. New York, 2002

R.L. Norton: Design of Machinery Mcgraw-Hill, New York, 2003



Vedoucí bakalářské práce: Ing. Michal Vaverka, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 20.11.2009

L.S.

prof. Ing. Václav Pištek, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací edukační úlohy na experimentální stanici s vačkovým mechanismem. Cílem edukační úlohy je prakticky studenty v rámci výuky seznámit s analýzou kinematických veličin vačkových zdvihátek. V rámci práce je uvedeno obecné pojednání o současném stavu poznání na poli vačkových mechanismů a jsou vysvětleny základní pojmy. Dále uvedení přístroje do provozu, odstranění jeho dílčích nedostatků, analýza kinematických veličin možných kombinací dodaných vaček se zdvihátky a definice postupů budoucí edukační úlohy. Sama edukační úloha následuje interpretaci a komentář získaných údajů. V závěru jsou provedena doporučení dalších modifikací experimentálního aparátu a nástin jeho budoucího možného využití.

Klíčová slova

vačka, zdvihátko, vahadlo, vačkový mechanismus, kinematické veličiny, numerická derivace, zdvih, poloha, rychlost, zrychlení, ryv, experiment, edukační úloha, výuka, snímač

Abstract

Bachelor's thesis is focused on solving educational problem based on experimental apparatus with cam mechanism. The task of the educational problem is to teach students to analyse kinematic quantities of cam followers. The thesis contains general discourse on the topic of cam mechanisms and basic terms definition. This is followed by putting the device into service, eliminating its particular imperfections, analysis of kinematic quantities of various combinations of available cams and followers and definition of methodics of the educational problem. The educational problem itself follows the presentation and commentary of gained results. At last some recommendations for the future modifications of the experimental apparatus are given followed by foreshadow of its eventual future usage.

Key words

cam, follower, cam mechanism, kinematic quantity, numeric derivation, lift, position, velocity, acceleration, jerk, experiment, educational problem, education, sensor

Bibliografická citace

TOMEČEK, Vojtěch. *Realizace edukační úlohy na experimentální stanici s vačkovým mechanismem*. Brno, 2010. 94 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.



FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Realizace edukační úlohy na experimentální stanici s vačkovým mechanismem* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Michala Vaverky, Ph.D. a uvedl v seznamu literatury všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 15.5.2010

.....
Tomeček Vojtěch



Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Michalu Vaverkovi, Ph.D. za odborné vedení práce, četné konzultace a rady při řešení dílčích problémů bakalářské práce.



Obsah

1	Obsah	10
1	Úvod	12
2	Přehled současného stavu poznání	13
2.1	Vačkové mechanizmy	13
2.1.1	Dělení vaček podle jejich tvaru	13
2.1.2	Vačky podle druhu přitlačení zdvihátka	19
2.1.3	Vačky podle druhu pohybu zdvihátka	19
2.1.4	Parametry vačky	20
2.2	Zdvihátka	23
2.2.1	Dělení zdvihátek podle druhu pohybu	23
2.2.2	Dělení zdvihátek podle tvaru styčné plochy	24
2.2.3	Přesazení posuvných zdvihátek	26
2.3	Síly ve vačkových soustavách	27
2.3.1	Pracovní zatížení	27
2.3.2	Rázové síly	27
2.3.3	Setrvačné síly	28
2.3.4	Síly v důsledku vibrací	28
2.3.5	Třecí síly	28
2.3.6	Síly od pružin	29
2.3.7	Provozní síly	29
2.3.8	Krouticí moment na vačkovém hřídeli	30
2.4	Materiály	30
2.4.1	Oceli	30
2.4.2	Litiny	30
2.4.3	Bronzy	31
2.4.4	Plasty	31
2.5	Výroba vaček	31
2.5.1	Ruční číslicově řízené (NC) obrábění	31
2.5.2	Analogové kopírování	31
2.5.3	Souvislé číslicově řízené obrábění	32
2.5.4	Obrábění elektrickým výbojem	32
2.5.5	Kování	32
2.5.6	Prášková metalurgie	32
2.5.7	Přesnost výroby	33
2.6	Mazání vačkových soustav	33
2.6.1	Mazání kapalnými medii	33
2.6.2	Mazání tukem	35
2.7	Opotřebení vaček a zdvihátek	35
2.7.1	Adhezní opotřebení	35
2.7.2	Abrázní opotřebení	36
2.7.3	Koroze	36
2.7.4	Kontaktní únava povrchů	37
2.8	Základní kinematické veličiny	37
2.8.1	Poloha	37
2.8.2	Rychlost	37
2.8.3	Zrychlení	37
2.8.4	Ryv	38
2.9	Křivky používané při návrhu profilů vaček	38
2.9.1	Jednoduché polynomální křivky	38
2.9.2	Trigonometrické křivky	40

2.9.3	Modifikované základní křivky	41
2.9.4	Aplikace základních křivek u vaček DRRD	43
2.9.5	Kombinace modifikovaných základních křivek u DRRD aplikací	44
2.9.6	Polynomální křivky	45
2.9.7	Tlakový úhel v závislosti na použitých křivkách	45
2.9.8	Výběr pružiny podle druhu křivky	46
2.10	Měření chodu vaček	46
2.10.1	Snímače úhlové polohy	46
2.10.2	Snímače zdvihu	48
2.10.3	Snímače rychlosti	49
2.10.4	Tenzometry	50
2.10.5	Snímače zrychlení	50
2.10.6	Měření vibrací	50
3	Formulace řešeného problému a jeho analýza	51
3.1	Popis mechanismu	51
3.1.1	Zdvihátka	51
3.1.2	Vačky	52
4	Vymezení cílů práce	53
5	Metodický přístup k řešení	54
5.1	Provedené konstrukční úpravy	54
5.1.1	Úprava díry pro zdvihátka v základové desce	54
5.1.2	Úprava zdvihátka	54
5.2	Možnosti analýzy kinematických veličin daných vaček	54
5.3	Změření úhlové rychlosti vačkového hřídele	54
5.4	Získání kinematických veličin na základě sestavení zdvihových závislostí	54
5.5	Získání kinematických veličin na základě měření na experimentálním zařízení	54
6	Analýza a interpretace získaných údajů	59
6.1	Srovnání dat získaných oběma metodami	59
6.1.1	Konkávní vačka s kladičkovým zdvihátkem	59
6.1.2	Konkávní vačka s plochým zdvihátkem	59
6.1.3	Vačka s kruhovým bokem č. 1 s kladičkovým zdvihátkem	64
6.1.4	Vačka s kruhovým bokem č. 1 s plochým zdvihátkem	66
6.1.5	Vačka s kruhovým bokem č. 2 s kladičkovým zdvihátkem	69
6.1.6	Vačka s kruhovým bokem č. 2 s plochým zdvihátkem	71
6.1.7	Tečná vačka s kladičkovým zdvihátkem	74
6.1.8	Tečná vačka s plochým zdvihátkem	76
6.2	Shrnutí	79
6.3	Formulace edukační úlohy	79
6.3.1	Zadání	79
6.3.2	Rozbor úlohy a návod	80
6.4	Nástin možného řešení elektronického snímání veličin	86
6.4.1	Snímač zdvihu	86
6.4.2	Snímač úhlové polohy	86
7	Závěr	88
8	Seznam zdrojů	89
9	Seznam obrázků	91
10	Seznam tabulek	94
11	Seznam použitých symbolů a jednotek	94
12	Seznam příloh	94

1 Úvod

Moderní trendy ve výuce, jakými jsou experimentální výuka (Experimental education), učení založené na řešení problému (Problem-based learning, zkráceně PBL), učení založené na řešení projektu (Problem-based Learning, PjBL), aktivní učení (Active learning) a další, se společně vyznačují odklonem od tradičního přístupu memorování přednesených informací a kladou důraz na studentovo samostatné nebo skupinové řešení praktického problému. Student je při bezprostředním kontaktu s předmětem studia nucen nastudovat problematiku, řešit předložené zadání, zkoumat jej, uvažovat o něm, zformulovat závěry a ty uceleně prezentovat. Kromě zodpovědnosti za vlastní vzdělávání si osvojuje dovednosti související s modelováním problému, jeho analýzou a syntézou nebo týmovou prací. Nadto bylo prokázáno, že forma výuky, do které byl student sám aktivně zapojen, má lepší dopad na studentovu schopnost porozumět učivu a naučené si v budoucnu vybavit. Učitel zde vystupuje spíše v roli pomocníka a moderátora společné diskuse, než instruktora [1], [2], [3],[4].

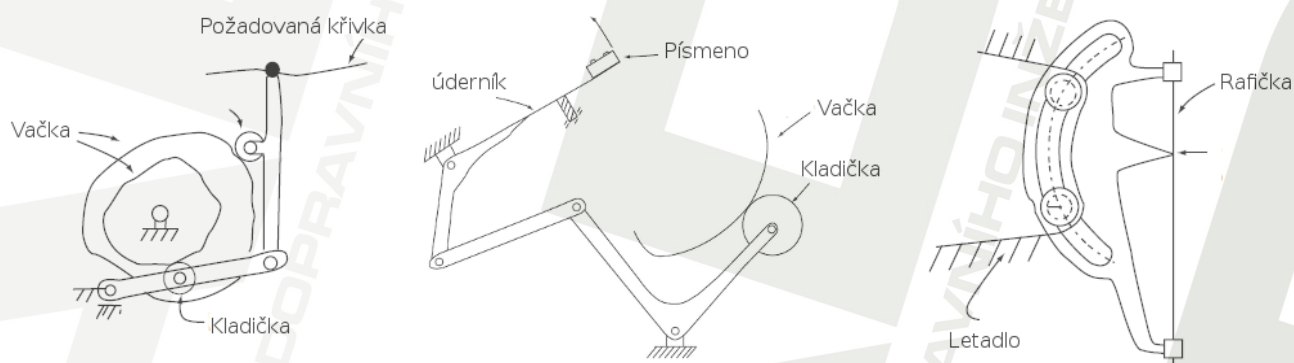
V souladu s těmito tendencemi na poli výuky je zřizována a vybavována nová laboratoř na Ústavu konstruování Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Jednotlivá experimentální zařízení v laboratoři mají prakticky ilustrovat problematiku vyučovanou v rámci předmětů garantovaných ústavem a dát studentům možnost si samostatným řešením úloh osvojit odpřednášené zákonitosti a fenomény. Tento způsob výuky je nejen vhodným prostředkem k hlubšímu pochopení látky, ale i neocenitelnou přípravou studenta na řešení praktických problémů v budoucí praxi a na existenci v pracovním kolektivu.

Jedním z pořízených přístrojů je aparát na analýzu zdvihových funkcí vaček od britského výrobce edukačních zařízení *TecQuipment*. Přístroj bude mimo jiné zapojen jako doplněk praktické výuky cvičení z předmětu Konstruování strojů - Mechanismy (6KM). Za jeho pomoci se studenti budou moci seznámit se základními charakteristikami průběhu zdvihu, rychlosti a zrychlení rozličných kombinací některého z příložených zdvihátek v součinnosti s dodanými vačkami. Bakalářská práce je zaměřena na uvedení stanice do provozu, odstranění jeho potenciálních nedostatků a navržení postupu analýzy kinematických veličin. Dále pak na realizaci navržené metodiky a formulaci zadání budoucí laboratorní úlohy v souladu s popsanými tendencemi ve výuce.

2 Přehled současného stavu poznání

2.1 Vačkové mechanismy [5], [6]

Vačka je speciálně tvarovaná zpravidla rotující součást, která vyvolává pohyb součásti zvané zdvihátko přímým fyzickým kontaktem. Vačka, která je obvykle hnacím členem, se může přesouvat, oscilovat nebo se otáčet. Zdvihátko, zpravidla hnaný člen, se může posouvat, oscilovat nebo se pootáčet. Soustavu vačka-zdvihátko si lze představit jako mechanické paměťové zařízení, jež určuje pohyb zdvihátka podle předem stanoveného programu. Soustava může být navržena pro sledování určité dráhy, vyvolání požadovaného pohybu nebo jako generátor funkce. Tato tři možná určení vačky jsou na obr. 1.1a, 1.1b a 1.1c. První z nich ukazuje generátor funkce, ve kterém vačka pohání čtyřkloubové pákové úderníku psacího stroje. Druhý v pořadí ukazuje generátor trasy využívající spřažených vaček a na třetím obrázku je jako generátor pohybu zachycen úchylkoměr určující relativní směr letadla vůči zemi.



1.1a,
Generátor funkce, [5]

1.1b,
Generátor trasy, [5]

1.1c,
Generátor pohybu, [5]

Váčkové soustavy zajišťují kontrolovaný pohyb s vysokou přesností, opakovatelností a životností. Jsou důležitou komponentou všech druhů strojů a zařízení napříč průmyslovými odvětvími.

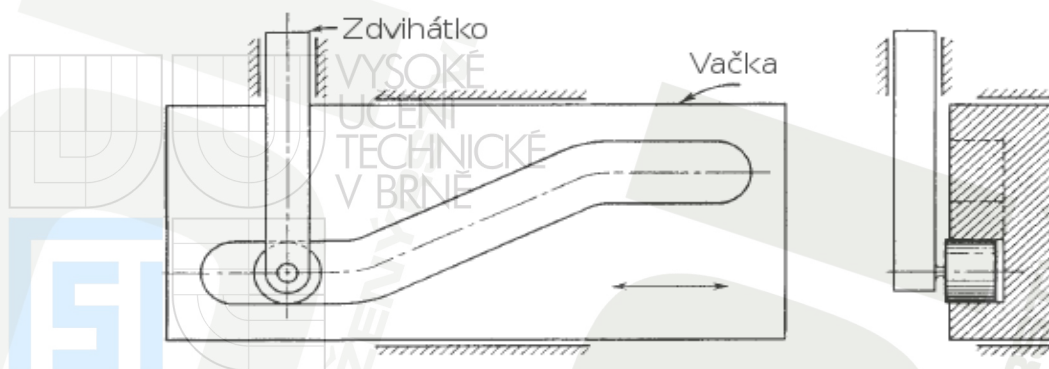
Do šedesátých let 20. stol. byly vačky konstruovány jen na základě grafických návrhů, vyráběny v malých sériích ručně ovládanou výrobou a ve větších analogovými kopírovacími stroji podle ručně zhotovených modelů. V poslední době umožnily počítačové systémy CAD/CAM (computer aided design - konstruování s počítačovou podporou, resp. computer aided manufacturing - výroba s počítačovou podporou) podstatné zjednodušení návrhu a výroby vaček. Výpočetní technika umožnila optimalizovat pohyb a geometrii vačkového mechanismu a dále vyhovět kinematickým a dynamickým vlastnostem v širokém rozpětí provozních rychlostí.

Vačky lze docela zřejmě rozdělit podle množství kritérií. Literatura [5] a [6] uvádí dělení podle tvaru, podle druhu pohybu zdvihátka, nebo podle způsobu přitlačení zdvihátka k vačce. Příklady k oběma zmíněným dělením jsou v této podkapitole.

2.1.1 Dělení vaček podle jejich tvaru

i) Lineární vačky

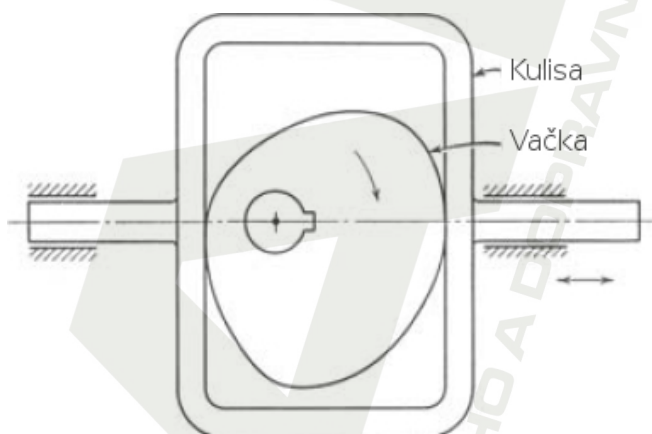
Lineární nebo též posuvná vačka je taková, která se pohybuje posuvně vratně. Zdvihátko se může jak posouvat, tak oscilovat. Přitlačeno může být jako pružinou, tak desmodromicky. Tento typ vaček je vůbec nejjednodušším. Posuvná vačka s translačním zdvihátkem je na obr. 2.1.



2.1, Lineární vačka s posuvným zdvihátkem, [5]

ii) Radiální vačky

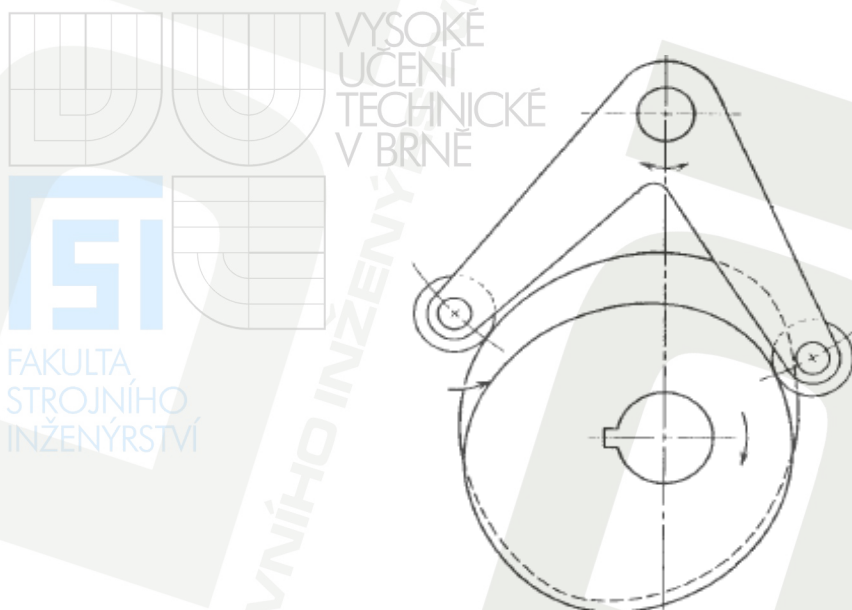
U radiální kotoučové vačky je poloha zdvihátka určena jeho radiální vzdáleností od osy vačky. Radiální vačky jsou s převahou nejužívanější a to pro svoji jednoduchost s kompaktností. Radiální vačky lze dále dělit na kulisové a spřažené. Vačka kulisová je obemknuta kulisou zdvihátka. Zdvihátko se může posouvat nebo kývat. Kulisa bývá osazena protilehlými kladičkami nebo plochá. Takové uspořádání je na obr. 2.2. Nedostatkem je fakt, že jakékoli opotřebení má za následek vůli, která vede k nepřesnému chodu, zvláště za středních a vyšších rychlostí. Kulisové vačky bývají používány zřídka.



2.2, Radiální kulisová vačka, [5]

Spřažená nebo-li dvojkotoučová radiální vačka je taková, která je fakticky složena ze dvou spojených radiálních kotoučů na jednom hřídeli, z nichž každý je v kontaktu s jednou plochou nebo častěji kladičkou společného zdvihátka resp. vahadla. Zřejmou výhodou takovéto konstrukce je absence přítlačné pružiny, jde o desmodromický model řešení. Běžná radiální vačka opatřená drážkou může také pracovat bez pružiny, ale její nevýhodou jsou vůle nutné pro pohyb kladičky v drážce. Spřažené vačky poskytují možnost předepnutí větví vahadla nebo zdvihátka pružinou. Toto řešení vede ke snížení hlučnosti, vibrací a opotřebení při provozu za vysokých rychlostí a velkých dynamických zatížení. Nevýhodou spřažených vaček je jejich vyšší cena a složitost. Je totiž nutno, aby byly vůči sobě přesně definovány povrchy obou vaček. Proto nejsou příliš používané u výrobních strojů ani běžných spalovacích motorů. Své uplatnění mají především u závodních aplikací, kde je jejich cena vyvážena zvýšením výkonu motoru. Při návrhu spřažených vaček je jedna považována za primární. Ta je navržena jako jakákoli jiná vačka. Protikus je vytvořen inverzí její zdvihové

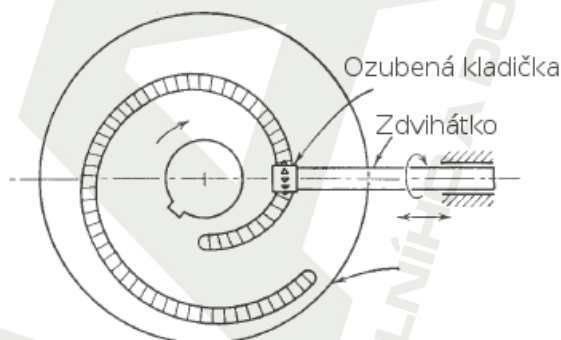
funkce. Tento typ vačky s vahadlem je na obr. 2.3. Zpravidla bývá použito kladiček.



2.3, Spřažená radiální vačka s vahadlem, [5]

iii) Spirální vačky

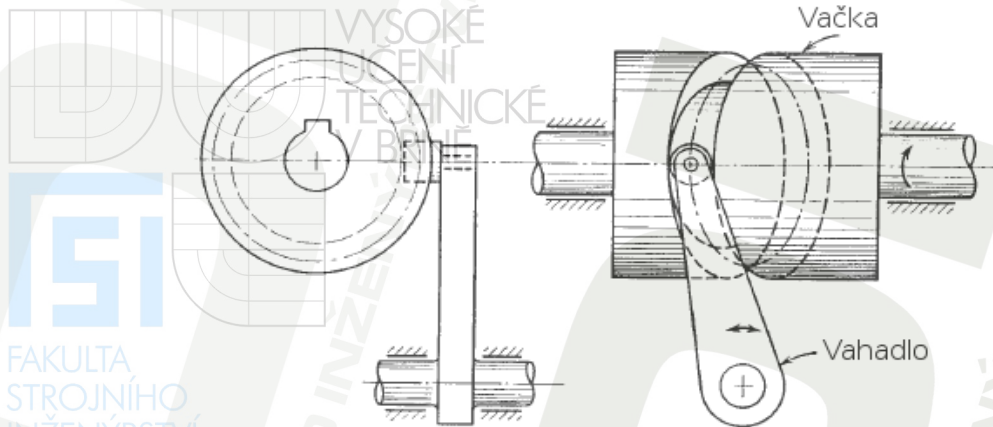
Spirální vačka na obr. 2.4 je na čele opatřena drážkou, která vede posuvající se a zároveň rotující zdvihátko. Ozubená kladička je vedena zuby v drážce vačky a úhlová rychlost zdvihátka je určována radiální vzdáleností od středu vačky. Tato vačka byla využívána v analogových výpočetních strojích.



2.4, Spirální vačka se zdvihátkem, [5]

iv) Bubnové vačky

Bubnová nebo také cylindrická, axiální, popř. soudečková vačka má tvar válce. V jeho povrchu je buď vyříznuta drážka anebo z něho vystupuje „žebro“. Zdvihátko se může buď posouvat nebo kývat. Obvykle jsou opatřena kladičkami. K redukci prokluzu a opotřebení způsobených různými radiálními vzdálenostmi zdvihátka od středu vačky v průběhu cyklu bývají s výhodou použity kuželové kladičky. Bubnová vačka s vahadlem je na obr. 2.5.

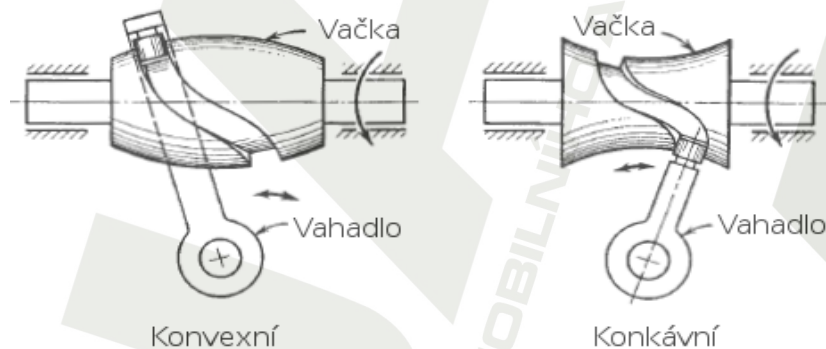


2.5, Bubnová vačka s vahadlem, [5]

Na bubnovou vačku s žebrem obemknutým dvěma kladičkami společného zdvihátka resp. vahadla může být nazíráno též jako jako na pár spřažených axiálních vaček. Oba boky žebra jsou totiž provázány stejně jako profily dvou spřažených vaček. Jeden je považován za primární a utvořen obdobně jako profil axiální vačky, druhý je k němu přiřazen. Toto uspořádání je opět složitější na výrobu, ovšem poskytuje opětovně výhodu možného předepětí kladiček proti sobě, což umožní vymezení vůle.

v) *Globoidní vačky*

jsou vzhledem a chodem podobné vačkám válcovým. Existují dva typy globoidních vaček. První má v povrchu vyříznutou drážku pro kladičku vahadla. Tento typ se vyskytuje jak jako konvexní, tak jako konkávní. Oba typy jsou na obr. 2.6. Tyto vačky jsou používány pro malé úhly výkyvu vahadla. Druhý typ globoidních vaček je po obvodu opatřen žebrem nebo závitem. Kladičky zdvihátka jsou v kontaktu s žebrem na obou jeho stranách.



2.6, Globoidní vačky s drážkou, [5]

vi) *Kuželové vačky*

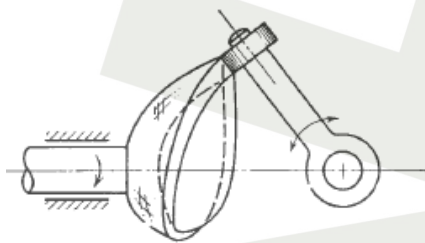
Kuželová vačka má tvar kužele a pohání zdvihátko v rovině kolmé ke své podstavě. Zdvihátko se může posouvat nebo kývat, zatímco vačka zpravidla rotuje. Tyto vačky jsou užívány zřídka pro složitost výroby a vysokou pořizovací cenu. Pro desmodromický pohon bývají do kuželových vaček vyřezány drážky. Kuželová vačka je na obr. 2.7.



2.7, Kuželová vačka s posuvným kladičkovým zdvihátkem, [5]

vii) Sférické vačky

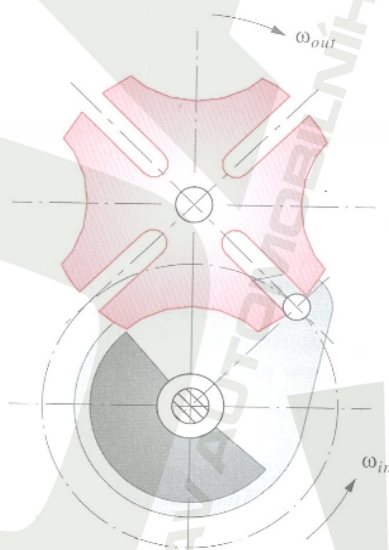
Sférická vačka má tvar části koule, která kývá vahadlem okolo osy kolmé k ose vačky. Tato vačka představuje vlastně limitní případ kuželové vačky a je zatížena podobnými nevýhodami. Sférická vačka je na obr. 2.8.



2.8, Sférická vačka s kladičkovým vahadlem, [5]

viii) Krokovací vačky

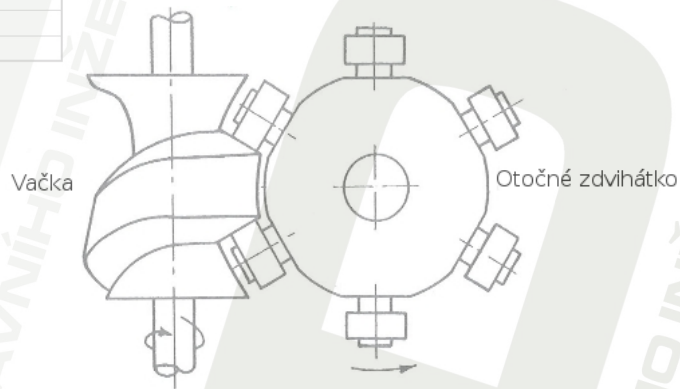
V praxi je častý požadavek na přerušovaný rotační pohyb. Toho je možno dosáhnout krokovacím mechanismem. Nejznámějším z nich je maltézský mechanismus. Na obr. 2.9 je čtyřramenný. Nevýhodami takového mechanismu je velké zrychlení, nekonečný ryv v momentě, kdy čep vstupuje do drážky a vysokého opotřebení drážek.



2.9, Maltézský mechanismus, [6]

Častěji používaným způsobem dosažení přerušovaného rotačního pohybu je krokovací vačka (obr. 2.10). Vačka je vlastně zvláštním případem globoidní vačky s žebrem na obvodu, které je přerušeno. Vpodstatě jde o šnek s nekonstantním stoupáním na otáčku. Je zde několik kladiček instalovaných radiálně okolo revolverového „zdvihátka“ (čili výstupního hřídele) tak, že v kontaktu s žebrem jsou vždy dvě kladičky. Takové mechanismy mohou být vyrobeny s třemi i více prodlevami během jedné otáčky. Takovéto vačky zajišťují velkou přesnost, mají dlouhou životnost, vykazují nízké vibrace a chod bez rázů i za vysokých rychlostí. Pro ideální chod by kladičky měly být předepnuty k vymezení vůlí.

151
FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ



2.10, Krokovací vačka, [5]

ix) Trojdimenzionální vačky

Trojdimenzionální vačky, anglicky též označované termínem camoids (tedy „camoidy“ nebo-li „vačkoidy“) rotují kolem své osy a krom toho se podél této osy vratně posouvají. Poloha posuvného zdvihátka je tedy závislá jak na úhlové, tak translační pozici vačky. Takové vačky jsou používány v omezené míře pro svoji složitou výrobu, tedy vysokou výrobní cenu, a z důvodu vysokých třecí sil a relativně velkých prostorových nároků.

x) Řetězové a řemenové vačky

Jsou zvláštním a relativně méně používaným druhem vaček. Jejich anglický název by mohl být přeložen jako „obálkové vačky“, protože jejich profil je ovinut řetězem nebo řemenem. Vačka se neotáčí dokola, jen se vratně kývá, obvykle v rozsahu méně než jedné plné otáčky. Může být jak vstupním, tak výstupním členem. V prvním případě je vačka zatížena kroutícím momentem a působí tažnou silou na řemen nebo řetěz. V druhém možném případě vyvíjí vačka točivý pohyb, pokud je tažený element zatížen silou. Možnost užití řetězových resp. řemenových vaček spočívá ve vyvažovacích zařízeních, posilovacích přístrojích, u bubenických pedálech atd. Na vačku působí relativně nízké Hertzovy tlaky. Minimálního prokluzu je dosaženo opatřením povrchu zuby anebo trvalým připojením (příšroubováním) tažného elementu k povrchu vačky. Řetězová vačka je na obr. 2.11.



2.11, Řetězová vačka, [5]

2.1.2. Vačky podle druhu přitlačení zdvihátka

Stálý kontakt zdvihátka s povrchem vačky je vyvozen dvěma způsoby. Buďto tzv. desmodromicky nebo tlačnou pružinou. Zpravidla je pružina mechanická, výjimečně pneumatická. Desmodromický pohon (anglicky označován termíny closed-track, positive drive, form closed) zdvihátko jak tlačí, tak „tahá“ zpět (ve skutečnosti jej v obou směrech tlačí). Z výše jmenovaných vaček jsou desmodromickými například radiální spřažené, radiální kulisové, bubnové s drážkou nebo žebrem nebo krokovací. Výhodou desmodromického pohonu je absence pružiny a možnost tak soustavu provozovat za vysokých rychlostí, při kterých by mechanická pružina nejen nestíhala navracet zdvihátko, ale hrozila by její rezonance a v konečném důsledku destrukce zařízení. Méně výraznou nevýhodou je nutnost vyrobit dvě funkční plochy (ať už obě strany drážky ve vačce nebo dva povrchy spřažených vaček). Podstatnější nevýhodou desmodromického pohonu je vznik přechodového rázu při změně směru zdvihátka. Kladička v drážce například přeskočí na druhou stranu drážky, kulisa zdvihátka dosedne na vačku protilehlou plochou apod. a v soustavě není pružina, která by tento ráz pohltila. Tyto rázy způsobují hluk, vysoká dynamická zatížení a rychlejší opotřebení. Navíc kladička zdvihátka musí v drážce při přechodovém bodu změnit směr rotace, což vede ke krátkodobému smýkání a jejímu rychlejšímu opotřebení. Problém je možno eliminovat použitím pružiny přitlačující kladičku k jedné straně drážky. Jiným způsobem řešení tohoto problému je použití vačky s žebrem na obvodu namísto drážky. Žebro je semknuto dvěma kladičkami, které mohou být předepínány a vůli odstranit. Dalším způsobem je vyrobit drážku ve vačce dost širokou, aby se do ní vešly dvě vzájemně rozpínané kladičky. U spřažených vaček s dvěma kladičkami se tento problém díky možnému předepnutí taktéž nevyskytuje.

2.1.3. Vačky podle druhu pohybu zdvihátka

Literatura [5] a [6] uvádí dělení vaček podle průběhu zdvihové funkce. Možných kombinací zdvihů, poklesů a prodlev by bylo možno vytvořit nekonečně mnoho. Několik níže uvedených příkladů jsou v praxi nejčastěji užívané formy.

i) DRD

tedy (dwell-rise-dwell, čili prodleva-zdvih-prodleva). Takový typ vačky (obr. 2.12a), má prodlevu následovanou zdvihem a opět prodlevou na maximálním zdvihu. Příkladem takové vačky je krokovací mechanismus. Vícenásobné prodlevy jsou nutné jen ve vzácných případech.

ii) DRDRD

nebo-li (dwell-rise-dwell-return-dwell, tedy prodleva-zdvih-prodleva-návrat-prodleva) mají zdvih a návrat předcházen i následován prodlevou. Ve strojírenství je její použití omezené. Zdvihový diagram takové vačky je na obr. 2.12b.

iii) DRRD

čili (dwell-rise-return-dwell, tedy prodleva-zdvih-návrat-prodleva) jsou vačky se zdvihem a návratem předcházenými i následovanými prodlevou. Ve strojírenství je jejich použití taktéž omezené. Zdvihová funkce je na obr. 2.12c.

iv) RRR

Závislost zdvihu vačky RRR (rise-return-rise, tedy zdvih, návrat, zdvih) nevykazuje žádné prodlevy. Její zdvihová závislost je na obr. 2.12d.



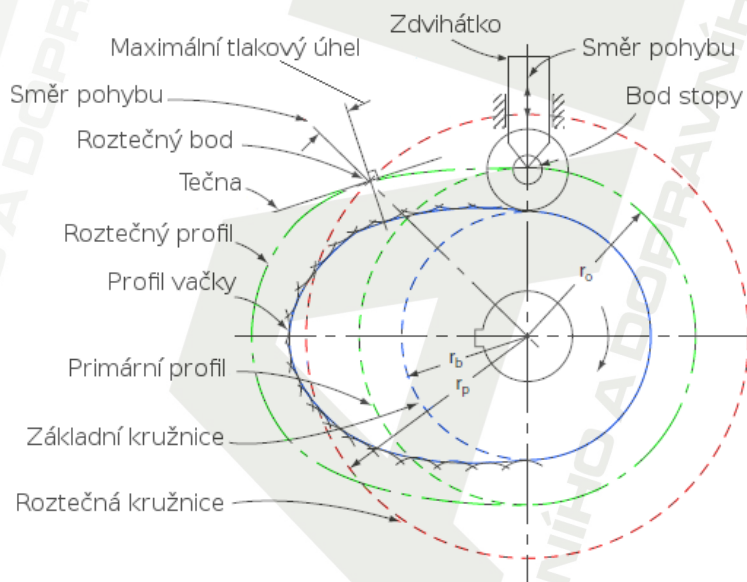
2.12, Zdvihové závislosti různých typů vaček, [5]

Dále je v literatuře zmíněna existence dalších druhů vaček, které nejsou dále rozebrány. Jsou jimi RF (rise-fall, tedy zdvih-pokles), RFD (rise-fall-dwel, tedy zdvih, pokles, prodleva) nebo RDFD (rise-dwell-fall-dwell, tedy zdvih-prodleva-pokles-prodleva).

2.1.4 Parametry vačky

i) Geometrické veličiny

Základní geometrické veličiny potřebné k popisu tvaru profilu radiální vačky jsou na obrázku 2.13. Některé z nich jsou blíže rozebrány níže.



2.13, Základní geometrické parametry vačky, [5]

Profil vačky je skutečnou funkční plochou vačky. Je to povrch, který je v kontaktu se zdvihátkem. Na obr. 2.13 je zaznačen modrou barvou. *Základní kružnice*, v obrázku zakreslená modře, označená jako r_b , je nejmenší kružnice opsaná profilem vačky. *Bod stopy* je bod ležící na špičce zdvihátka, resp. v středu kladičky nebo v středu jeho sférické plochy. Všechny body stopy čítá roztečný profil nebo-li *roztečná křivka*. To je dráha opsaná bodem stopy. V obrázku je zaznačena zelenou barvou. Při návrhu vačky je tato křivka často stanovena jako první a poté je profil vačky utvořen jako tečný k povrchu kladičkového nebo plochého zdvihátka. Pro jednoduché zdvihátko s špičkou jsou roztečná křivka a profil vačky jedno a totéž. *Primární kružnice* je nejmenší kružnice tečná k roztečné křivce se středem v středu vačky. V obrázku je zelená. Poloměr primární kružnice je zaznačen jako r_o .

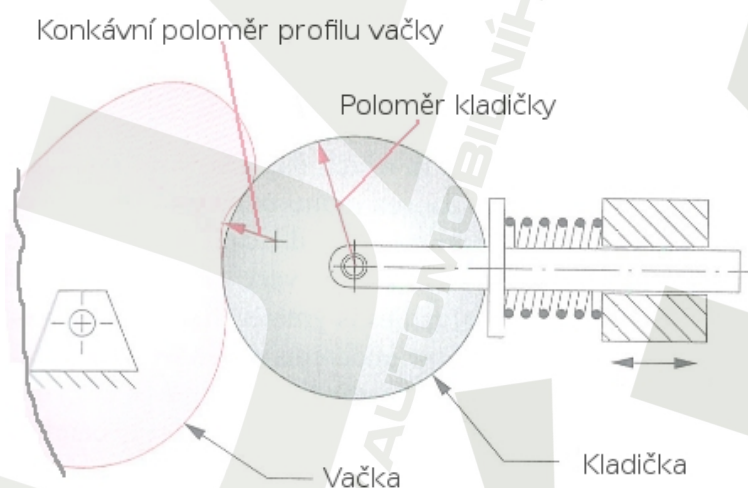
ii) Tlakový úhel

Úhel tlaku je úhel (v kterémkoli bodě profilu) mezi normálou k roztečné křivce a vektorem pohybu zdvihátka (u plochého posuvného zdvihátka je tedy vždy nulový). Tento úhel vypovídá o strmosti profilu a tedy určuje síly působící na jeho povrch. Maximální doporučená hodnota úhlu je 30° (výjimečně při užití vhodných lineárních ložisek může být dosaženo úhlu až 48°). Přílišná příkrost profilu by mohla mít neblahý vliv na plynulost chodu a ohybové síly působící na dřík zdvihátka. Zmenšení vačky je žádoucí nejen pro redukci její hmotnosti a setrvačných vlastností, ale i ke zmenšení tlakového úhlu. O vlivu úhlu tlaku na silová působení na vačku více v podkapitole 2.4. Nalezení úhlu tlaku axiální vačky je mnohem snazší, než u vačky radiální. Neexistuje zde totiž zkruslení zdvihového diagramu, protože ten je jen „obtočený“ okolo povrchu vačky. Průměr válce je analogický základní kružnici radiální vačky a nazývá se základním průměrem válce. Úhel tlaku v bodě odpovídá sklonu křivky zdvihového diagramu. Více k problematice výpočtů tlakových úhlů různých konfigurací zdvihátek a vaček a jejich analýze v literatuře.

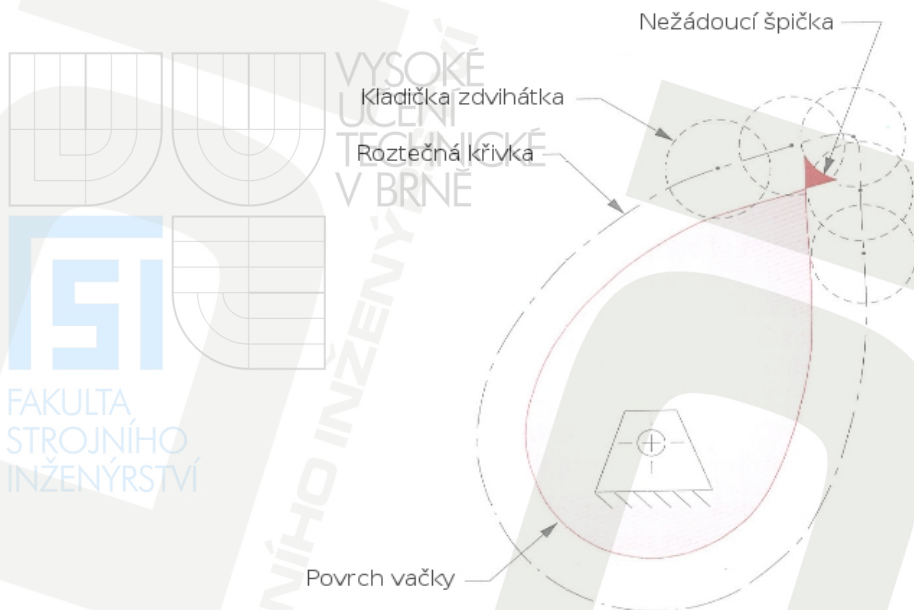
iii) Poloměr křivosti vačky, riziko podřezání profilu

Zmenšování vačky za účelem dosažení příznivějšího tlakového úhlu ovlivňuje i poloměr křivosti v každém bodě (u axiální vačky s posuvným zdvihátkem je poloměr křivosti totéž, co poloměr křivosti zdvihového diagramu promítnutého do základního válce). Podřezání je jev, který nastává při nevhodné kombinaci tvaru vačky (jejího poloměru křivosti) a zdvihátka. Zdvihátko nemůže sledovat požadovanou trasu přesně. Stručný přehled vyšetření rizika podřezání u některých typických konfigurací následuje níže. Vyšetření podřezání u dalších uspořádání je poměrně komplexní analytickou záležitostí, která svojí složitostí překračuje rozsah bakalářské práce. Více je možno nalézt v literatuře.

Podřezání radiální vačky s kladičkovým zdvihátkem může nastat tehdy, když je poloměr kladičky zdvihátka větší, než konkávní radius radiální vačky (obr. 2.14). Zdvihátko pak nevykonává zamýšlenou funkci správně. Jiný problém nastane, když je poloměr kladičky větší, než nejmenší konvexní radius vačky (obr. 2.15). Zdvihátko opět nemůže vykonat zamýšlený pohyb správně. Zmenšování velikosti vačky je tedy rizikem podřezání omezeno. Podřezání se jen zřídka objevuje u konkávních úseků profilu vačky. Nicméně poloměr křivosti profilu vačky by měl vždy být větší, než poloměr kladičky. Poloměr kladičky by měl být obecně co možná nejmenší.

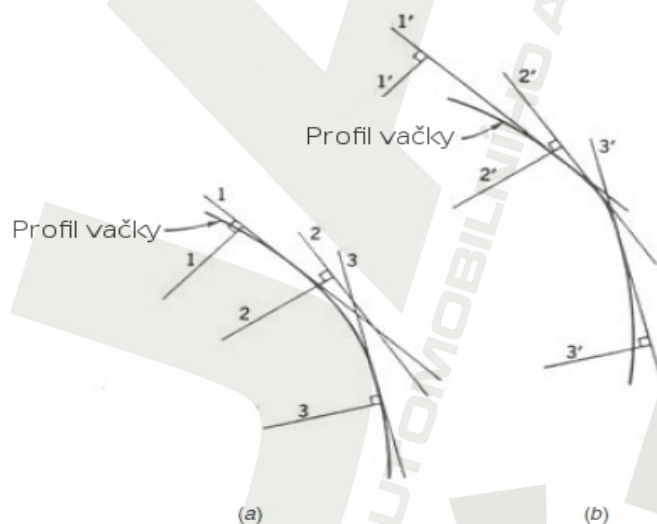


2.14, Podřezání konkávního povrchu radiální vačky s kladičkovým zdvihátkem, [6]



2.15, Podřezání konvexního povrchu radiální vačky s kladičkovým zdvihátkem, [6]

Tlakový úhel je u plochých zdvihátek vždycky nulový a neomezuje tedy požadovaný rozměr vačky. *Riziko podřezání radiální vačky s plochým zdvihátkem* je jediným omezujícím hlediskem pro zmenšování velikosti vačky. Na obrázku 2.16a je ve třech pozicích zakresleno ploché zdvihátko a k němu tečná vačka. Profil vačky tečný k ploše zdvihátka nemůže zajistit styk v bodě 2. Jinými slovy předchozí a následující pozice znemožňují styk v pozici č. 2. Dochází k podřezání a taková vačka je nepřijatelná. Obr. 2.16b ukazuje větší vačku, tentokrát bez podřezání. Riziko podřezání omezuje i minimální velikost vaček použitých s plochými zdvihátky. Záporný poloměr křivosti zjevně nemůže být sledován plochým zdvihátkem. Podřezání se tedy objeví také tehdy, když poloměr křivosti bude záporný a vačka konkávní.



2.16, Podřezání konvexního povrchu radiální vačky s plochým zdvihátkem, [5]

Podřezání radiální vačky s plochým vahadlem může nastat v případě, kdy je nevhodně zvolena kombinace poloměru základní kružnice a umístění čepu vahadla. A to i v případě, kdy poloměr křivosti je po celém obvodu vačky kladný. Přímka vedená z požadovaného bodu

kontaktu do středu čepu může protnout část povrchu vačky potřebnou ke správnému umístění vahadla do předešlé nebo následující úhlové polohy na vačce. Pak nastává podřezání. Někdy je nutné poloměr základní kružnice zvětšit, čímž se zamezí negativnímu poloměru křivosti dráhy vahadla.

iv) Návrh náboje

Vačka musí mít pochopitelně dostatečně velký náboj, který umožní upevnění k hnacímu hřídeli. Jedním z prvních kroků při návrhu soustavy je stanovit velikost vačkového hřídele a potřebné drážky pro pero. Pro zvýšení únosnosti náboje je vhodné umisťovat drážku pro pero do místa většího rozměru vačky. V praxi je profil vačky větší než náboj přibližně o tři milimetry z důvodu předcházení koncentraci napětí a tedy zvýšení životnosti profilu vačky.

v) Setrvačníky

Velké výkyvy ve zrychlení mohou v soustavě způsobit značné oscilace kroutícího momentu potřebného k udržení konstantní rychlosti vačky. Špičky momentu mohou být tak vysoké, že by vyžadovaly neúměrně silný motor. Avšak průměrná hodnota potřebného momentu může být daleko nižší. Relativně nenákladnou metodou ke zmírnění výkyvů je použití setrvačnicku na vačkovém hřídeli. Jinou variantou je přidat na hřídel další vačku pohánějící neužitečnou hmotu (obvykle pružinu), která zajistí přibližné vyrovnaní momentu na hřídeli.

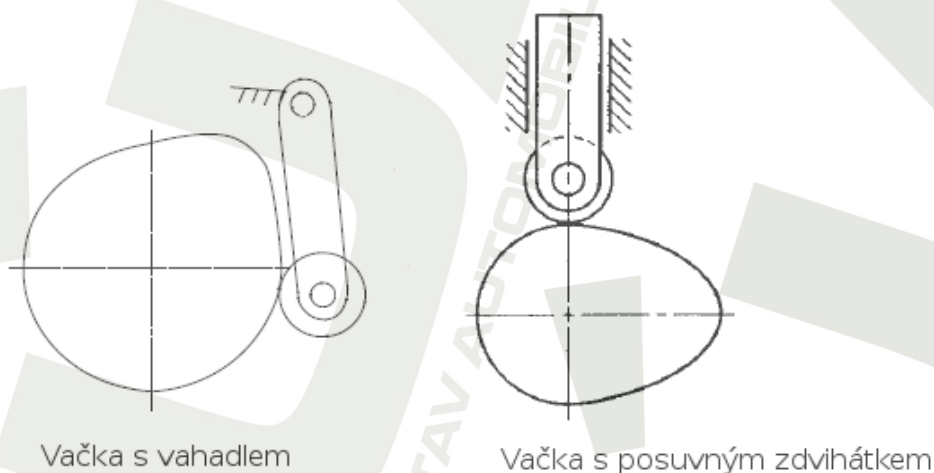
2.2 Zdvihátka [5], [6]

Zdvihátka je podobně jako vačky možno rozdělit podle různých hledisek. Nejčastější dělení jsou podle tvaru stykové plochy zdvihátka nebo podle druhu pohybu zdvihátka.

2.2.1 Dělení zdvihátek podle druhu pohybu

Zdvihátka se mohou vratně posouvat podél své osy, kývat se okolo pevného bodu anebo rotovat. Vykonává-li zdvihátko translaci, jde o zdvihátko posuvné. Koná-li zdvihátko kyvný nebo rotační pohyb, je nazýváno vahadlem.

Jak zdvihátka posuvná, tak vahadla bývají označovány souhrnným termínem zdvihátka. Pro jasné odlišení jsou tedy v textu používány termíny posuvná (nebo translační) zdvihátka a vahadla, není-li konkrétní typ patrný z kontextu. Zdvihátko a vahadlo jsou k vidění na obr. 2.17. Rotaci okolo své osy vykonávají jakožto zvláštní typ zdvihátek revolverové hlavy krokovacích mechanismů.

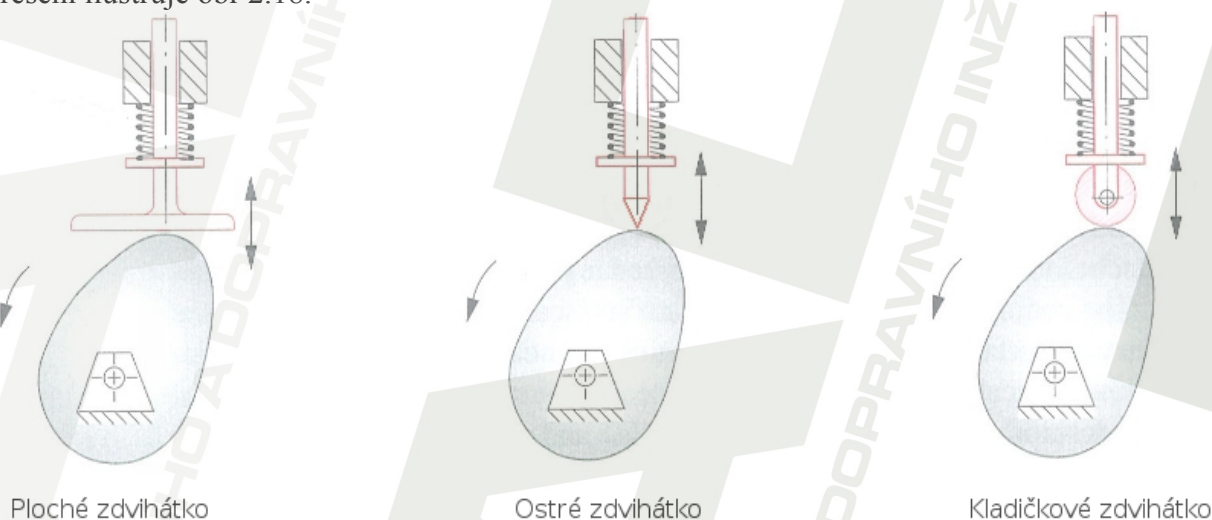


2.17, Radiální vačka s kyvným a posuvným zdvihátkem, [5]

V mnoha případech může být voleno jak zdvihátko posuvné, tak vahadlo, ale výběr zdvihátka je často diktován jeho výhodnějšími zástavbovými rozměry. Je-li však vyžadován přibližně přímočarý pohyb a nepodléhá-li konstrukce omezením, je na zvážení užití vahadla o velkém poloměru. To má oproti lineárnímu zdvihátku několik výhod. Posuvná zdvihátka se mohou volně otáčet okolo své osy, nejsou-li vybavena zvláště tvarovaným vedením nebo drážkou, která tomuto zabrání. To je při využití kladičky krajně nežádoucí. Vahadlo udrží kladičku v požadovaném směru vždy bez potřeby zvláštního vodítka. Stejně tak čepové tření u vahadla má poměrně malou hodnotu oproti přímočarému vedení. Další výhodou vahadel je jejich schopnost zajistit větší úhel tlaku při menším namáhání dřívku. U vahadla navíc v podstatě nikdy nehrozí mezní stav vzpěrné stability. Možnost většího tlakového úhlu dovoluje použití menší vačky.

2.2.2 Typy zdvihátek podle tvaru styčné plochy

Zdvihátko je zakončeno je ostrým hrotem, plochou nebo valivou kladičkou. Tato tři řešení ilustruje obr. 2.18.



2.18. Různé druhy posuvných zdvihátek [6]

i) Plochá zdvihátka

jsou buď rovinná anebo sferická s velkým poloměrem. Obecně mají nižší hmotnost, než kladičková a mají oproti nim další výhody jakými jsou jednoduchost výroby, údržby a mazání. Sferická zdvihátka zajišťují přijatelnější tvar stykové plochy a tím pádem menší opotřebení, než rovinná. Sférické zdvihátko o velkém poloměru navíc kompenzuje případné nepřesnosti chodu zařízení. Nejširší uplatnění mají plochá zdvihátka v automobilním průmyslu. Neměla by být používána pro konkávní vačky, protože nejsou schopna správně sledovat tvar profilu o negativním poloměru křivosti. Stejně tak nejsou vhodná pro vačky velkých rozměrů z důvodu významného smyku mezi vačkou a zdvihátkem.

ii) Zdvihátka s hrotem

Zakončení zdvihátka hrotem je nepraktické kvůli vysokému působícímu tlaku ve styku vačky a zdvihátka, který způsobuje brzké poškození povrchu funkční plochy vačky. Narozdíl od plochých zdvihátek jsou však schopna přesně sledovat tvar i konkávních vaček.

iii) Zdvihátka s kladičkou

Kladičková zdvihátka mají v porovnání s kluznými výrazně nižší koeficient tření a jsou v praxi nejpoužívanější. Zpravidla jsou dostupná jako sestava jednotlivých částí - čepu

(pro vedení maziva někdy vrtaného), vnější dráhy a ložiska. Vnější dráha je obvykle z leštěné a tvrzené oceli. Ložiska jsou obvykle jehlová, někdy válečková, zřídka kuličková. Jak jehlová, tak válečková přenáší pouze radiální síly. Ložiska jehlová mají výhodu lepšího vyrovnávání deformací vnější dráhy. Mají nižší ryhlostí limity, zato mají menší hmotnost a tedy i setrvačnost. Válečková ložiska jsou používána pro velká zatížení. Pro extrémně velká zatížení jsou dostupná jako dvojřadá.

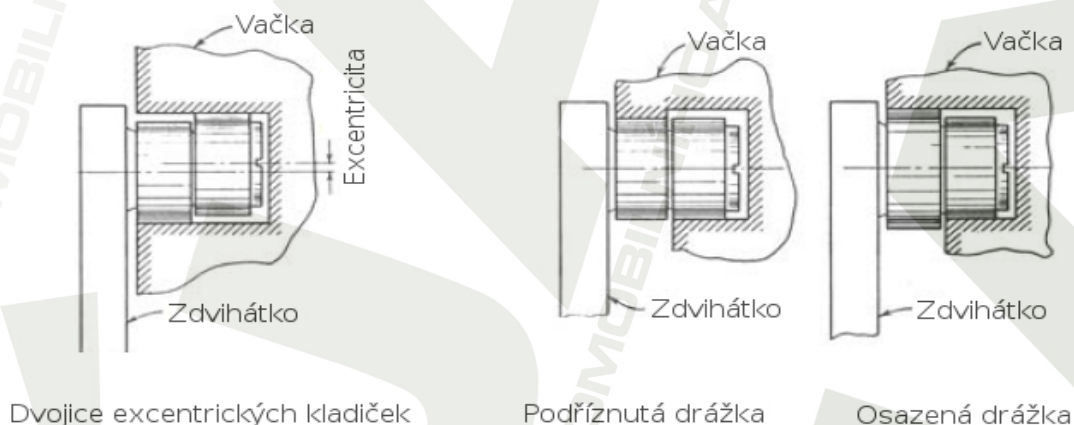
Je doporučeno používat obecně zdvihátka s kladičkami oproti plochým. Kladičku je možno v případě opotřebení snadno vyměnit, také má výrazně nižší tření. Plochá vahadla, například, jsou vyráběna obvykle na zakázku a jsou proto relativně drahá.

Je-li k mazání kontaktu mezi vačkou a zdvihátkem použit tuk, musí být dostatečně 'mazlavý', aby nutil kladičku k valení namísto skluzu (více v podkapitole 2.7). Krátkodobé smýkání způsobují i nerovnoměrnosti v rychlosti vačky (např. i rozběh a zastavení stroje) nebo vůle. Značný stálý smyk je evidentní za vysokých rychlostí. K zajištění valení a redukci smyku je obecně vhodná co nejlehčí kladička s co nejmenší setrvačností.

Zkušenost ukazuje, že kladičková zdvihátka u vaček s drážkou nezabezpečují přesný chod kvůli nutné vůli mezi kladičkou a boky drážky. V přechodovém bodě, kdy zdvihátko mění svůj směr, musí navíc kladička přeskočit na opačný bok drážky a prudce změnit smysl otáčení. Oba problémy je možno řešit použitím zdvihátka s dvěma kladičkami, které vhodně vymezují vůli. Tak se předejde brzkému opotřebení kladiček i vaček a možné hlučnosti soustavy. V praxi je situace často řešena instalací dvojice kladiček do jedné drážky. V zásadě jsou možné tyto tři způsoby řešení:

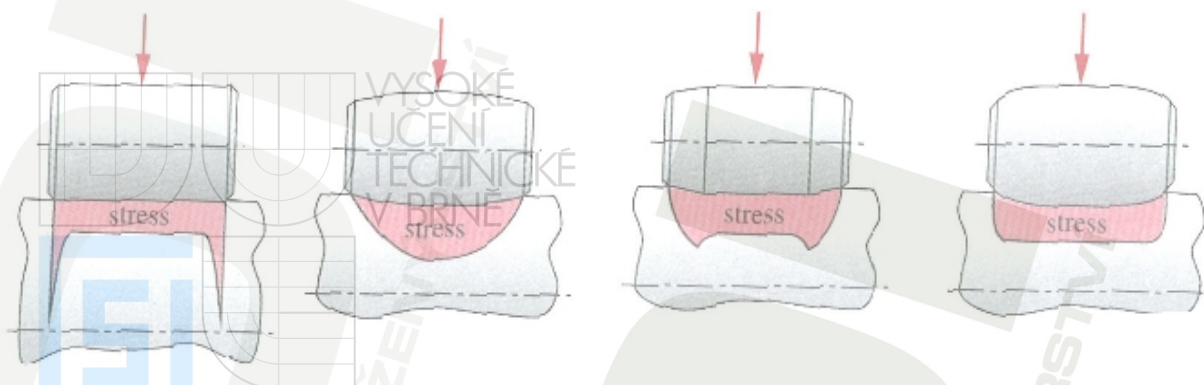
1. Dvěma vzájemně excentricky uloženými kladičkami
2. Podříznutou drážkou
3. Osazenou drážkou

Všechny tři varianty jsou k vidění na obr. 2.19. Excentrické kladičky jsou stejného průměru, jsou nezávisle volně otočné a pojíždí navzájem po protilehlé straně drážky. Osazenou drážku je z uvedených řešení nejsložitější vyrobit. Kladičky v ní pojíždějící mají také shodné průměry. Poslední varianta je nepřijatelnější. Dvě soustředné kladičky různých průměrů jsou vedeny v odstupňované drážce.



2.19, Řešení vymezení vůle v drážce radiální vačky dvojicemi kladiček [5]

V některých případech je vhodné použití kladiček jiných, než ryze válcových. Vysoké rychlosti a vysoká zatížení mohou vyžadovat použití vypouklých soudečkových kladiček pro vyrovnání potenciálních nerovností stýkajících se povrchů k zabránění enormních poškození. Vypuklé kladičky navíc efektivněji rozloží stykové napětí. Rovná válcová kladička zapříčiňuje koncentraci napětí na okrajích kontaktní plochy. Situace je patrná na obr. 2.20, který ukazuje průběhy napětí pro různé tvary kladičky.



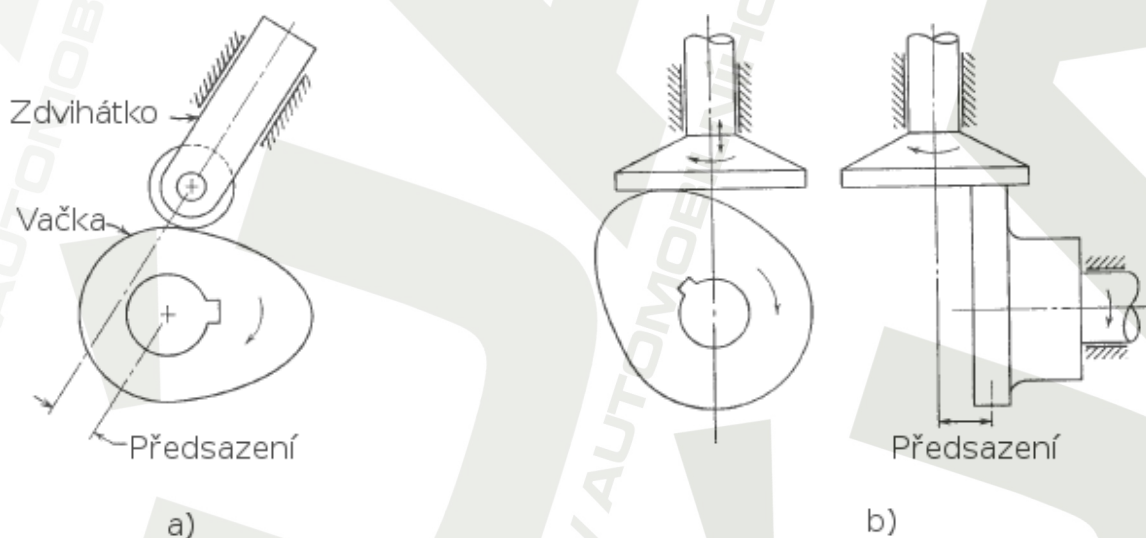
2.20, Průběh stykového tlaku v závislosti na tvaru kladičky [6]

U bubnových vaček s vodící drážkou jsou vhodné konické kladičky. Každý konec kladičky je v kontaktu s vačkou na jiném poloměru. Tento rozdíl poloměrů znamená odlišné obvodové rychlosti. Vzniká tak skluz napříč šířkou kladičky, který může být vyrovnán právě použitím kónických kladiček. Pomyslný vrchol kužele by měl být umístěn v středu vačky. Pak budou teoreticky všechny body zdvihátka hnány stejnou rychlostí. Výhodou konické kladičky je navíc možnost jejím posuvem vymezovat vůle. Veskrze podobná je situace u bubnové vačky s žebrem. To může být vyrobeno se stěnami nerovnoběžnými v radiálním směru, tak že je u paty širší a směrem od vačky se zužuje. To umožňuje instalaci konických kladiček s osami radiálními k vačce.

2.2.3 Přesazení posuvných zdvihátek

Nejčastěji jsou zdvihátka konstruována jako radiální, tedy je taková, která se posouvají v rámci osy procházející středem rotace vačky. Zdvihátka ovšem mohou být oproti středu vačky přesazena buď ve směru osy její rotace anebo kolmo k ní.

Předsazením kolmo k ose rotace vačky lze dosáhnout zlepšení chodu díky zmenšení některých působících sil a namáhání. Více k silovým poměrům vačkových soustav v podkapitole 2.4. Takovýmto předsazením je též možné minimalizovat rozměry vačky. Obr. 2.21a zobrazuje předsazené zdvihátko na radiální vačce. Zdvihová závislost zůstává předsazením změněna.



2.21, Předsazení zdvihátka kolmo k ose rotace vačky a ve směru osy rotace[5]

Plochá posuvná zdvihátka mohou být předsazena ve směru osy rotace vačky k redukci neblahých důsledků smýkání. Situaci ilustruje obr. 2.21b. Zdvihová závislost se tím nezmění a zdvihátka se takto může volně otáčet okolo své osy a tím je relativně zvětšena jeho kontaktní oblast a tedy jeho životnost. Velikost předsazení je omezena dovoleným ohybovým namáháním dřívku.

2.3 síly ve vačkových soustavách [5]

V soustavě vačka-zdvihátka současně působí různé druhy sil, které je možno rozdělit do několika částečně se překrývajících kategorií. Těmito kategoriemi jsou:

1. Pracovní zatížení
2. Rázy
3. Setrvačné síly
4. Síly od vibrací
5. Třecí síly
6. Síly od pružiny
7. Provozní síly (od spouštění a zastavení)

Určení těchto sil a jejich velikostí je stěžejní pro návrh rozměrů základních částí soustavy. Odvíjí se od nich i volba vhodných materiálů, velikostí ložisek nebo velikostí a tuhostí pružin. Mezi silové poměry je zahrnut i kroutící moment na vačkovém hřídeli.

2.3.1 Pracovní zatížení

představují užitečnou práci vykonanou strojem. Nemusí být v přímé souvislosti s rychlostí vačky. Kupříkladu nízkorychlostní vačkový mechanismus pohánějící lis na plech může vykazovat výrazná skoková zatížení, zatímco vysokorychlostní soustava ke stlačení vzduchu pracuje v režimu relativně stálého zatížení.

Síly od tlakového úhlu lze též řadit mezi pracovní zatížení. U posuvného zdvihátka s kladičkou je dovolený tlakový úhel omezen dovolenými bočními silami na dřívku zdvihátka. Ty jsou dány mírou vyložení zdvihátka, délkou a vůlí jeho vedení a tuhostí dřívku. Součinitel tření kladičkového zdvihátka je pro velikost tlakového úhlu takřka zanedbatelný. V praxi je doporučeno minimalizovat délku zdvihátka přečnávající oproti jeho vedení a vůli. Délku vedení zdvihátka naopak udržovat co největší, nejméně pak dvojnásobnou oproti přečnávající části. Výrazné ohybové namáhání dřívku se projevuje během zdvihu, při návratu pak zpravidla nikoli. Proto během poklesu není velikost tlakového úhlu obecně limitována. Nicméně může se stát, že zdvihátka bude při poklesu hnát vačku vpřed, je-li přitlačeno silnou pružinou. To je z hlediska chování stroje nepřijatelné. Vahadla s kladičkou jsou obecně vhodnější volbou oproti posuvným zdvihátkům proto, že dovolují mnohem vyšší limitní úhel tlaku při zachování uspokojivého chodu. Tedy s kyvným zdvihátkem může být použita menší vačka. Pro lepší chod a vyšší přesnost je doporučeno, aby kružnice, po které se kladička pohybuje, procházela blízko středu vačky, idálně aby ho protínala. Dále vhodným umístěním čepu zdvihátka je možno teoreticky dosáhnout nemožnosti vzniku jakéhokoli ohybového namáhání bez ohledu na strmost povrchu. I to jsou důvody častější volby vahadel na úkor zdvihátek. Jedinou extrémní limitující podmínkou je, aby normálová síla neprocházela čepem vahadla. To by způsobilo vzpříčení a zblokování vahadla. Jak již bylo řečeno, tlakový úhel plochého posuvného zdvihátka je vždy nulový. Jeho ohybové namáhání je tedy zanedbatelné oproti posuvným zdvihátkům kladičkovým. Stejně jako pro ně platí zásady, aby část dřívku, které přečnává, byla co nejmenší a koeficient tření vůči vačce byl minimální.

2.3.2 Rázové síly

Nejvyšším zatížením jsou vačkové mechanismy zatíženy právě v důsledku rázů. Mechanický ráz násobí zatížení systému až čtyřikrát oproti statickým hodnotám. Rázové jevy

u vaček dosud nebyly podrobeny detailnímu zkoumání. Pro získání nejpřesnějších údajů doporučuje literatura [5] použít tenzometry, vysokorychlostní fotografování, snímače rychlosti a pohybu (o snímačích více v podkapitole 2.10). Obecně je doporučováno minimalizovat rychlosti a setrvačnosti narážejících součástí a používat materiály dobře tlumící rázy.

2.3.3 Setrvačné síly

jsou u většiny soustav nejdůležitějšími ze všech rozebíraných sil, zvláště za vysokých rychlostí. Působí-li na těleso zřejší zrychlení, má setrvačná síla procházející jeho těžištěm opačný směr. Analogicky proti úhlovému zrychlení působí moment opačného směru. Setrvačné síly zdvihátka jsou úměrné momentálnímu zrychlení od vačky. Proto je důkladná analýza zrychlení zdvihátka podstatnou kapitolou.

2.3.4 Síly v důsledku vibrací

Jsou způsobeny především silami, jejichž velikosti, směry a působíště se v čase mění. Způsobují kolísání pružných deformací. Velikosti sil od vibrací jsou ovlivněny zrychlením, tuhostí a tlumením mechanismu. Vibrace mohou být způsobeny vysokou drsností povrchu vačky a zdvihátka.

2.3.5 Třecí síly

Tření je silové působení, které brání relativnímu pohybu stýkajících se povrchů. U soustav vačka-zdvihátko se vyskytuje jak tření valivé, tak smykové. Nejlepším a velmi nákladným způsobem analýzy třecích sil je změřit je přímo na prototypu stroje. Mnohé knihy a katalogy však nabízejí hodnoty smykových odporů pro kombinace různých materiálů. O materiálech více v podkapitole 2.5.

Tři nejpodstatnější případy třecího působení u vačkových mechanismů jsou:

- i) Prostý smyk, který se objevuje mezi vačkou a plochým zdvihátkem
- ii) Valení a případný prokluz valivých kladiček
- iii) Tření v přímých (mnohdy kuličkových) vedeních posuvných zdvihátek

i) Tření u plochých zdvihátek

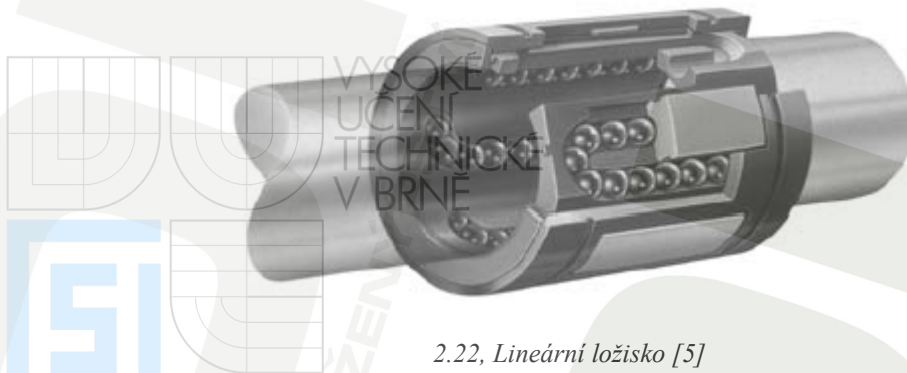
Rovinná i vypouklá zdvihátka bývají vyráběna z materiálů, které jsou z hlediska třecích vlastností vhodně kombinovatelné s povrchovými materiály vaček. Tření mezi vačkou a zdvihátkem ovlivňují čistota povrchů, jejich opotřebení, způsob mazání soustavy (o mazání více v pod kapitole 7). Kluzná zdvihátka mají pohybový koeficient tření od 0,12 do 0,20. Klidový koeficient tření je přibližně o 40 procent vyšší.

ii) Tření u kladiček

Kromě ztrát valením přímo v ložkách se u kladiček projevují ztráty způsobené viskozitou maziva, ztráty prokluzem ložiska ve vnějším prstenci kladičky nebo vychýlením dřívku zdvihátka. Roli hraje i počet kladiček, které jsou v kontaktu s vačkou. Zdvihátka s valivým prvkem mají koeficient tření od 0,01 do 0,15. Poměrně velký rozsah hodnot je daný rozličnými režimy provozu mechanismů.

iii) Tření v lineárních vedeních zdvihátek

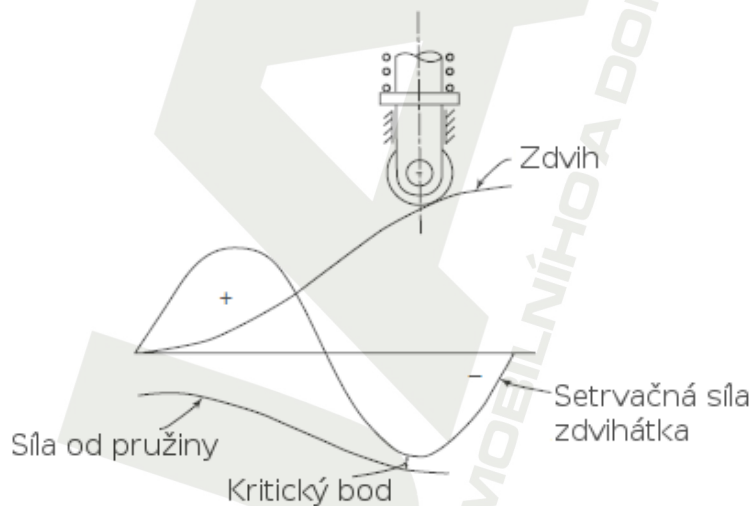
Lineární kuličková ložiska s nízkým třením jsou relativně dostupná a svým nízkým součinitelem tření zvláště vhodná pro přímé vedení zdvihátek. Vykazují koeficient tření od 0,01 do 0,05. Obr. 2.22 zobrazuje takové ložisko pro vedení a podporu posuvného zdvihátka.



2.22, Lineární ložisko [5]

2.3.6 Síly od pružin

Nejedná-li se o desmodromickou soustavu, je přítlak zdvihátka v drtivé většině aplikací zajištěn předepjatou mechanickou tlačnou pružinou, obvykle šroubovitě vinutou. Síla od pružiny je přímo úměrná vychýlení zdvihátka. Je-li příliš malá, dovoluje zdvihátku odskakovat od vačky. Na stranu druhou nepřiměřená síla od pružiny se odráží na chodu celé soustavy. Vyžádá si mohutnější konstrukci stroje a rychlejší opotřebení součástí. Nevýhodou soustav s přítlakem vyvozeným pružinou je působení dalšího zatížení právě od této pružiny. Obr. 2.23 ukazuje správně navrženou křivku pružiny. Kritický bod je ten, kde se setrvačné síly a síly od pružiny nejtěsněji přibližují. Tento bod se objevuje v okolí maximálního záporného zrychlení. Poskočení se objeví, když záporná setrvačná síla soustavy převyší sílu zajištěnou stlačením pružiny. Ta by měla překračovat celkové vnější zatížení o 30 až 50 procent (v závislosti na hmotnosti a tuhosti mechanismu). Častým neblahým projevem chodu pružiny je za vysokých rychlostí vlnění nebo chvění. To je výsledkem vln buzeného kmitání postupujících délkou drátu pružiny. Tyto složité fenomény mohou negativně ovlivňovat efektivitu funkce pružiny.



2.23, Křivka silového působení pružiny ve vztahu k setrvačnosti zdvihátka [5]

2.3.7 Provozní síly (síly od spouštění a zastavení)

Při rozběhu nebo náhlém zastavení stroje se vyskytují přechodové síly, které jsou svým průběhem prudší, než síly působící za ustáleného stavu. Především stroje s větší setrvačností jsou rozbíhány a zastavovány pomocí spojek resp. brzd, které umožní plynulý náběh do rychlosti resp. doběh. Spojky nebo brzdy jsou ovládány mechanicky, pneumaticky, hydraulicky nebo elektricky. Spojka může též fungovat jako pojistka proti přetížení.

2.3.8 Kroutící moment na vačkovém hřídeli

Důležitou součástí návrhu soustavy je určení průběhu kroutícího momentu na vačkovém hřídeli. Průběh momentu je určující pro výběr motoru, rozměry hnacího hřídele a přidružených součástí. Jeho vyrovnanost je dále podstatná pro plynulost chodu stroje. Dobrá znalost kroutícího momentu je zvláště nutná u mechanismů výrazně zatížených a vysokorychlostních. Průběh kroutícího momentu je závislý zejména na tlakovém úhlu vačky, velikosti vačky, hmotnosti zdvihátka, síle od pružiny a součiniteli tření.

U mnoha pomalochdoých mechanismů je možno navrhnout tvar vačky s ohledem na kroutící moment. Ten je pak stabilní, bez výraznějších výkyvů. To umožňuje použití motoru o nižším výkonu. Takové vačky dále nalézají uplatnění například u elektrických vypínačů.

Řetězové a řemenové vačky bývají navrženy zpravidla s kontrolovaným kroutícím momentem. To znamená, že jsou používány k převodu konstantního silového vstupu na předem definovaný výstupní kroutící moment.

2.4 Materiály [5], [6]

Výběr materiálu vačky i zdvihátka je ovlivněn požadavky na přesnost a chod (rychlost, zatížení, hlučnost), ale také na dovoleným Hertzovým tlakem, odolností proti otěru, antikorozními vlastnostmi, výrobní cenou, dovolenou hmotností atd. Finální volba je kompromisem mezi všemi často protichůdnými nároky. Vačky jsou vyráběny z obecně dostupných a používaných materiálů jako jsou oceli, litiny, bronzy nebo plasty, popřípadě práškovou metalurgií. Zdvihátka jsou obvykle vyráběna z oceli nebo litiny.

2.4.1 Oceli

Jsou-li provozní podmínky mírné, je možno použít nízkolegované oceli bez nadbytečných nákladů na tepelné zpracování. Jsou-li podmínky náročnější, je nutné použít legované oceli, vačku tvrdit a povrchově zpevnit cementací nebo nitridací. Nízko a střednělegované oceli mají však omezené teploty použití. Při kritických teplotách ztrácejí tvrdost a pevnost a může se vyskytnout povrchové poškození. U velmi namáhaných mechanismů jsou proto nutnou volbou vysokolegované oceli. Pro získání velmi odolného povrchu jsou cementovány nebo nitridovány. Cementované vačky zpravidla vyžadují dodatečné broušení k vyrovnání vzniklých deformací. Nitridované materiály nevykazují tak velké deformace a nevyžadují tedy povrchové dokončení. To je výhodou u velkých vaček s malou tloušťkou. Některé vačky jsou nejprve jemně broušeny, tvrzeny a poté leštěny, aby byl odstraněn karbonový film pozůstávající po tvrzení. Důvodem takového postupu je zabránit možné teplotní degradaci povrchu během konečného broušení, která by mohla materiál místně tepelně znehodnotit a vést k jeho následné poruše. Oceli nejlépe vyhovují požadavkům na kladičková zdvihátka.

2.4.2 Litiny

Jsou u vaček používány pro svoji nízkou cenu, dobrou obrobiteľnost nebo přijatelné mechanické vlastnosti, které jsou dílem zapříčiněny volným grafitem a poréznoostí materiálu. Grafit činí litiny zčásti samomaznými. Tři základní druhy litiny jsou rozlišeny podle struktury grafitu v kovové mřížce.

1. šedá litina, v níž má grafit vločkovitý tvar
2. temperovaná litina, u níž se grafit vyskytuje v podobě rovnoměrně rozprostřených částic nebo peciček
3. tvárná litina, v níž je grafit ve formě kuliček

Temperovaná a tvárná litina mají lepší odolnost proti rázům, výborně tlumí vibrace a eliminují hluk. Litiny jsou ze stejných důvodů vhodné i k výrobě rámu a stojanů strojů, které

by měly být těžké a tuhé. Litiny mohou být pro zlepšení mechanických vlastností dále tepelně zpracovány. Litina vyhovuje nárokům na kluzná zdvihátka.

2.4.3 Bronzy

Bronzové vačky jsou použity například tam, kde se může vyskytovat voda způsobující korozi ocelí. Nejvíce slitin bronzu obsahuje rozličná množství cínu, zinku, hořčíku, hliníku, fosforu, křemíku, olova, niklu a železa. Bronzové vačky jsou kombinovány s ocelovými kladičkovými zdvihátky. Tato konfigurace zajišťuje dosažení dobré odolnosti proti opotřebení. U mnoha aplikací, kde mohou být bronzы nahrazeny levnější litinou při zachování příznivých kluzných vlastností, je však jejich použití na zvážení. Bronzové slitiny jsou dobře obrobitelné, dobře tlumí rázy, tlumí setrvačné síly. Bronzové vačky nejsou hlučné a jsou necitlivé vůči případným nečistotám v mazivu.

2.4.4 Plasty

jsou vhodným materiálem nenáročné aplikace vyžadující nízkou hmotnost a nevelké výrobní náklady. V minulosti byly vačky zhotovovány z pryskyřici na fenolové bázi. S rozvojem polymerů začaly být vyráběny z různých druhů plastů. Nejčastěji je používán nylon, přestože má relativně omezenou pevnost, tepelnou odolnost a neposkytuje možnost dosažení velké přesnosti výrobku. Nylonové pryskyřice mají navíc tendenci absorbovat vlhkost a jejich pevnost tedy s časem ještě klesá a materiál bobtná. Plastové vačky mohou operovat v prostředích, kde by kovové materiály podléhaly rychlé zkáze. Tedy tam, kde se vyskytují nečistoty nebo kapaliny působící korozi. Navíc mohou pracovat bez mazání nebo mohou být mazány přímo zpracovávanými materiály (např. v potravinářství). K dosažení přesného a tichého chodu jsou plastové vačky provozovány s kovovými zdvihátky. Polymid je dražším plastovým materiálem než nylon, ale může operovat za vyšších teplot, což jej činí vhodným pro mnohé náročnější aplikace, které by jinak vyžadovaly kovovou vačku. Polyamidy mají dobré kluzné vlastnosti a mohou tak být velmi efektivně kombinovány s kovy bez nutnosti mazání.

2.5 Výroba vaček [5], [6]

Možné způsoby výroby vačky mohou být rozděleny na

1. ruční nebo číslicově řízené (NC) obrábění
2. analogové kopírování podle připravené šablony
3. počítačem ovládané číslicové řízení (CNC) s lineární, polární, sferickou nebo Bezierovou interpolací
4. obrábění elektrickým výbojem (EDM)
5. jiné metody jako řezání plamenem, odlévání, kování, lisování a prášková metalurgie

2.5.1 Ruční číslicově řízené (NC) obrábění

Při ručním číslicově řízeném obrábění (NC) je budoucí vačka upevněna na frézce nebo přesné souřadnicové vyvrtávačce, kde nástroj vytvoří profil z tabelovaných údajů. Tento proces zanechává vroubkované povrchy a je nutná další dokončovací operace. Standardně je přesnost frézování řádově v setinách milimetru. Někdy konečná fáze výroby čítá zaškrabávání a odstranění otřepů.

2.5.2 Analogové kopírování

Analogové kopírování připravené šablony bylo všeobecně používáno před zavedením numericky řízených strojů. Tento způsob je dodnes používán při výrobě malých serií. Šablona je vyfrézována podle radiálních a úhlových souřadnic, obvykle po přírůstcích půl stupně. Někdy jsou užity ortogonální souřadnice. Fréza má obvykle stejnou velikost jako

kladička zdvihátka konečné vačky. Výroba šablony je zdlohuhavá, obtížná a nákladná operace. Frézování zanechává na profilu vroubky. Vroubkovaný vzor je poté pokryt modrou barvou a zaškrábán nebo broušen, dokud je barva na povrchu patrná. Při použití půlstupňových přírůstků by šablona vačky s průměrem třicet centimetrů měla přenost až tisícín mm. Jakmile je šablona vačky dokončena a shledána přijatelnou, je umístěna do obráběcího stroje a kopírování může začít. Přesnost výsledných vaček je v desetínách až setínách mm. Obr. 2.24 ukazuje kopírování cylindrické vačky.



2.24, Výroba bubnové vačky na kopírovacím stroji [5]

2.5.3 Souvislé číslicově řízené obrábění

Až na výjimky bylo použití kopírovacích strojů nahrazeno CNC obráběním a CNC broušením. V CNC stroji je nástroj kontinuálně v záběru a pohyb obrobku nebo nástroje je řízen počítačem. Profil vačky je obvykle diskretizován, běžně na čtvrt až půlstupňové přírůstky (pro velké vačky i větší) v závislosti na tlakovém úhlu. U standardních radiálních vaček je při frézování ponechána rezerva v desetínách mm na broušení.

2.5.4 Obrábění elektrickým výbojem

používá k vyříznutí profilu tepelný drát. Je to proces podobný CNC a umožňuje obrábět předtvrzený polotovar bez nutnosti tak výrazného dalšího broušení jako při běžném obrábění. To umožní při broušení ušetřit strojní čas. V praxi se při EDM ponechávají pro broušení řádově setiny mm.

2.5.5 Kování

velké vačky složitých tvarů jsou často s výhodou vyráběny kováním. Pevnost a odolnost kovaných vaček vůči únavovému poškození je značně vyšší, než u ostatních výrobních postupů.

2.5.6 Prášková metalurgie

Práškovou metalurgií mohou být vyrobeny vačky složitějších tvarů s dobrými mechanickými vlastnostmi a kvalitním povrchem. Výroba vykazuje dobrou efektivitu a malá množství odpadu. Není navíc nutné větší množství dokončovacích operací. Slinuté vačky mohou být dále tvrzeny.

2.5.7 Přesnost výroby

Tvarová přesnost vačky je pro chod soustavy stěžejní. Špatné výrobní postupy při výrobě správně navržené vačky znamenají nevyhovující výrobek. Nepřesnosti mohou být vzhledem k výslednému chování mechanismu zásadě rozděleny do dvou kategorií. Nedostatečně jemná struktura povrchu a chyby rozměrů resp. tvaru.

Struktura povrchu profilu nesmí být podceněna. V závislosti na náročnosti aplikace ovlivňuje povrchová úprava zásadně životnost vačky, vnikající vibrace a hlučnost celého systému. Příliš drsný povrch vačky má nadto za následek vibrace o vysokých frekvencích a malých amplitudách. Povrchy zdvihátek jsou mnohdy lapovány.

Rozměrová a tvarová přesnost je neméně podstatná. Jako u všech součástí dochází i u vaček k vzniku úchylek oproti jmenovitým rozměrům a tvaru. Ty mohou poměrně podstatně ovlivnit chování stroje. U vysokorychlostních aplikací mohou výrazně zkrátit životnost soustavy a hlučnost. Chyby mohou vzniknout nepozorností při samotném návrhu nebo programování výrobního stroje, případně chybnými kroky při výrobě. Například je-li fréza nesprávně seřízená nebo zastaví-li se na delší dobu v jednom bodě profilu. V místech, kde fréza zastavuje nebo se rozbíhá, je riziko vzniku chyb poměrně časté. Nežádoucí nepřesnost vznikne i přílišnou posuvovou rychlostí frézovacího stroje. Nepřesnosti mohou dále vzniknout vibruje-li brusný kotouč při dokončovacím broušení. To se projeví charakteristickými výkyvy ve zrychlení vačky. Některé vačky vyžadují ruční dokončovací práce jako ruční broušení, odstranění otřepů apod. Jakákoli ruční operace s sebou nese chybu kompletně závislou na zručnosti a zkušenosti dělníka. Je třeba dbát i na to, aby plocha rovinného plochého zdvihátka byla kolmá na směr pohybu zdvihátka a rovnoběžná s profilem vačky v místě styku. Není-li tomu tak, má styková plocha nežádoucí tvar a obě součásti mají výrazně sníženou životnost.

2.6 Mazání vačkových soustav [5], [7]

Úkolem mazání je oddělit povrchy v relativním pohybu materiálem, který má nízké smykové tření a dále minimalizovat poškození povrchů. Tímto materiálem může být adsorbovaný plyn, produkt chemických reakcí, kapalně nebo pevně mazivo. Pro mazání vaček jsou používána zpravidla maziva kapalná nebo pevná.

2.6.1 Mazání kapalnými medii

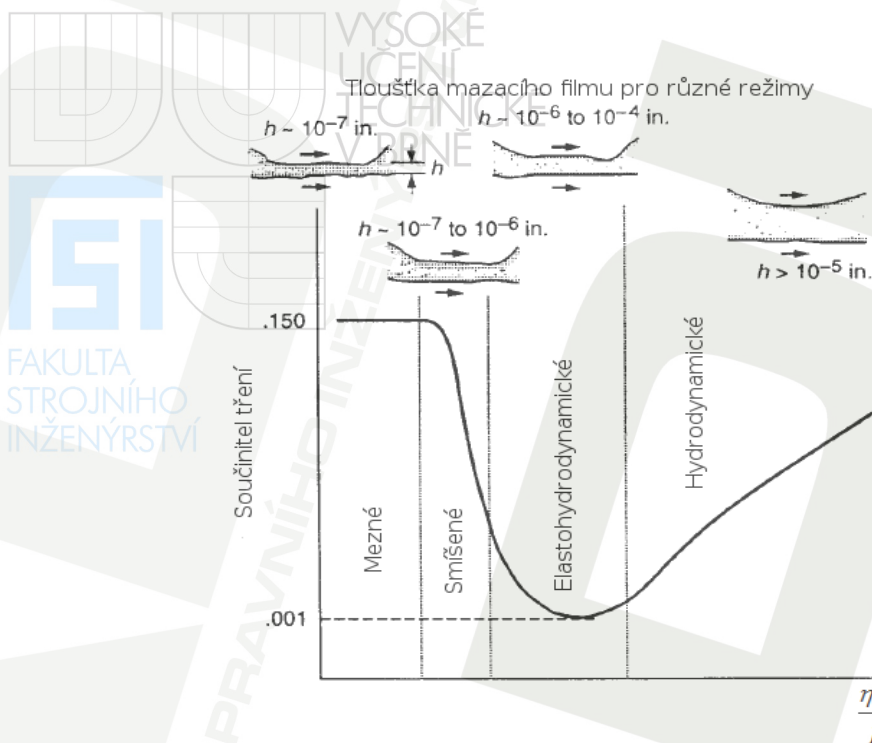
Kapalně mazivo má v systému několik funkcí. Odděluje povrchy vačky a zdvihátka, tlumí rázy a mělo by zajistit dokonalé valení kladičky beze smýkání. Nadto chladí soustavu a odvádí částičky vzniklé otěrem a zabraňuje korozi. Je nutné zvážit, zda bude mazivo přiváděno na náběžnou stranu vačky před zdvihátko nebo za zdvihátko. V praxi se častěji objevuje únava u vaček mazaných na vstupní straně. Žádný zvláštní výzkum na poli lubrikace vaček nebyl dosud proveden, využívá se výsledků experimentů s ložisky a ozubenými koly. Za určitých modifikací jsou však výsledky všeobecně použitelné.

Mazací filmy je možné rozdělit pomocí Stribeckovy křivky (obr. 2.25) do několika režimů. V grafu je součinitel tření mezi dvěma povrchy znázorněn jako funkce poměru podle vztahu (2.1).

$$\frac{\eta \omega_r}{p} \quad (2.1)$$

kde η je dynamická viskozita media, ω_r je relativní rychlost povrchů a p je tlak. Mazání je podle diagramu možno rozdělit na mezní, smíšené a kapalinové podle toho, zda dojde k úplnému oddělení stýkajících se povrchů anebo dojde k bezprostřední interakci. Kapalinové se dělí na hydrodynamické a elasto-hydrodynamické. Poměr tloušťky mazacího

filmu k drsnosti stýkajících se povrchů vyjadřuje parametr mazání Λ .



2.25, Stribeckova křivka a tloušťky mazacích filmů při jednotlivých režimech mazání [5]

i) Mezné mazání

je režimem, při němž jsou pohybující se povrchy v těsné blízkosti a povrchové nerovnosti obou ploch tak vzájemně interagují. Parametr mazání Λ je menší, než 1. Zatížení přenáší tenký povrchový film se strukturou a vlastnostmi odlišnými od lubrikantu i obou povrchů. Film vzniká adsorpcí, chemisorpcí nebo chemickými reakcemi maziva s povrchy. Brání přímému kontaktu nerovností a otírání materiálů a zajišťuje nízké tření. Převážně v režimu mezného mazání pracují kluzná zdvihátka.

ii) Elastohydrodynamické (EHD) mazání

je režim mazání, při kterém jsou elastické deformace nerovností třecích povrchů řádově stejně velké jako tloušťka mazacího filmu. Vyskytuje se především u nekonformně zakřivených povrchů. Velikost parametru mazání Λ se při EHD mazání pohybuje od 3 (včetně) do 10. Tento režim se týká zpravidla styku kladičkových zdvihátek s vačkou.

iii) Smíšené mazání

Ve smíšeném režimu je parametr mazání Λ větší nebo roven 1 a menší, než 5. Je tedy režimem na pomezí mezného a elastohydrodynamického. Projevují se zřetelně interakce mezi povrchy i efekty kapalinového filmu.

iv) Hydrodynamické mazání

se vyskytuje za vysokých rychlostí a nízkých zatížení nebo při vysoké viskozitě a především u konformních povrchů. Parametr mazání Λ je větší nebo roven 5 a menší než 100. Povrchy jsou tedy zcela separovány poměrně silnou vrstvou maziva a nevykazují takřka žádné známky opotřebení.

2.6.2 Mazání tukem

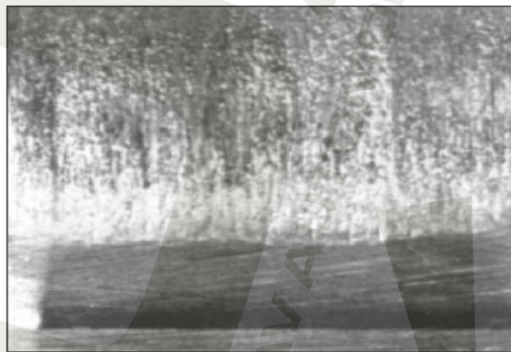
Tuk je nejlevnějším mazivem. Není-li komerční kladičkové zdvihátko obklopeno kapalným mazivem a utěsněno, je obaleno tukem. Tuk sestává z tuhé fáze doplněné o ropný nebo syntetický olej a zahušťovadlo. Nejpoužívanějšími zahušťovadly jsou mýdla na bázi sodíku, vápníku nebo lithia anebo mýdla na organické bázi. Protože zde neexistuje cirkulace maziva, musí ložiska mazaná tukem odvádět teplo vedením.

2.7 Opotřebení vaček a zdvihátek [5], [7]

Vačky a zdvihátka se jako všechny součásti ve vzájemném pohybu opotřebovávají otěrem. Otěr je nežádoucí oddělování pevného materiálu z třecích povrchů. Čtyři základní druhy otěru objevující se ve vačkových soustavách jsou adhezní opotřebení, abrazivní opotřebení, koroze a únavové opotřebení. Opotřebení obecně lze ovlivnit výběrem materiálu obou součástí, jejich drsností a tvrdostí, volbou maziva a způsobem jeho dopravy, tvarem vačky, setrvačností kladičky apod. Životnost třecích povrchů je ovlivněna i napětím v součástech a historií obráběcích nebo dokončovacích operací. Roste se zvyšujícím se parametrem mazání Λ . Životnost stroje stejně jako kvalitu jeho chodu mohou nepříznivě ovlivnit nečistoty v soustavě. Nečistoty mohou při nedůsledném očištění součástí zůstat ve stroji po výrobě, mohou vznikat během jeho chodu anebo do něj vnikat z nějšího pracovního prostředí (prach, papír, písek, mouka apod). Mazací medium je třeba dobře filtrovat, aby v něm potenciální nečistoty nesetřávaly. Časté zapínání a vypínání stroje způsobuje kontakt kov na kov, který je z hlediska opotřebení velmi nežádoucí. U nerezových materiálů s nízkou tepelnou vodivostí je třeba brát v úvahu možná poškození vlivem přílišného zahřívání součástí. Podstatnou vlastností je i tvrdost povrchu součástí. Je třeba brát v potaz, že nízkolegované a střednělegované oceli mají omezené teploty použití. Při kritických teplotách ztrácejí tvrdost i pevnost a roste pravděpodobnost havárie. Přestože však pozitivně ovlivňuje životnost povrchů, může volba vysoké tvrdosti zbytečně neúměrně navýšit výrobní náklady.

2.7.1 Adhezní opotřebení

objevuje se mezi dvěma prokluzujícími povrchy. Je způsobeno přitažlivostí mezi atomy stýkajícími se materiálu. Když se pár silně spojených výčnělků povrchu odtrhne, uvolnění se energie v podobě tepla. Je-li proces dostatečně rychlý, aby způsobil svaření stýkajícími se vrcholky, vytvoří se kousek přeneseného materiálu. Jsou-li podmínky takové, že se neobjeví znatelná difuze, adhezivní síla může stále držet kousky kovu na protějším vrcholku. Jsou-li difuze i adheze slabé, zůstane mezi povrchy volná částice. Množství přeneseného materiálu může být významně ovlivněno povrchovým třením a okolními podmínkami. Obr. 2.26 ukazuje adhezní opotřebení součástí s podobnými příklady povrchových poškození, jaká se mohou objevit u vaček a zdvihátek.



2.26, Příklad adhezního opotřebení povrchu [7]

Podstatným faktorem ovlivňujícím adhezi je kompatibilita použitých materiálů. Experimenty ukázaly, že některé kombinace jsou z hlediska životnosti vhodné, zatímco jiné ne. Tabulka 8 ukazuje přehled vybraných kombinací.

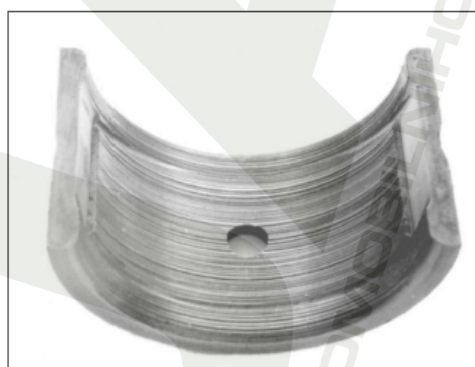
Tab. 1, vhodnost kombinací stýkajících se materiálů s ohledem na adhezní opotřebení [5]:

Příznivé		Nepříznivé	
Litina	Fosforový bronz	Tvrzená ocel	Tvrzený bronz
Tvrzená ocel	Fosforový bronz	Tvrzená ocel	Niklová ocel
Litina	Měkká ocel	Měkká ocel	Bronz
Ložiskový kov	Měkká ocel	Měkká ocel	Měkká ocel
Mosaz	Měkká ocel	Měkká ocel	Termosety
Tvrzená ocel	Měkký bronz	Měkká ocel	Nylon
Tvrzená ocel	Mosaz		
Tvrzená ocel	Litina		
Tvrzená ocel	Termosety		
Tvrzená ocel	Nylon		

Tyto kombinace jsou ovšem posuzovány pouze s ohledem na adhezní vlastnosti. Jsou-li dva povrchy v kontaktu, oblasti styku jsou právě jejich nerovnosti. Počáteční kontakt deformuje tyto nerovnosti elasticky, později při zvýšení zátěže plasticky. Právě na těchto vrcholcích se objevuje adheze. Velikost adhezních sil závisí například na čistotě a drsnostech povrchů. V mazacím oleji indikuje adhezi výskyt větších částic. Při vyšetření povrchů je adheze signalizovaná trhlinami.

2.7.2 Abrazní opotřebení

Abrazie se objevuje při styku povrchu s částicemi materiálu výrazně tvrdšího v relativním pohybu. Materiál měkčího povrchu je odírán materiálem tvrdším. Abrazivní částice mohou být produktem součinnosti mechanismů nebo mohou pocházet zvnějšku. Odstranění těchto částic je jedním z úkolů mazacího systému. Abrazie signalizuje přítomnost typických odštěpků v mazacím mediu a výskyt škrábanců na inkriminovaném povrchu. Pánev ložiska poškozenou abrazí ukazuje obr. 2.27.



2.27, Příklad abrazního opotřebení povrchu [7]

2.7.3 Koroze

je v běžných pracovních prostředích častým druhem poškození. Je způsobena reakcí materiálu s atmosferickým kyslíkem a vodou. Jsou-li produkty oxidace přítomny mezi vačkou a zdvihátkem, negativně ovlivňují chod soustavy a napomáhají jejich abrazi. Koroze může být minimalizována správně realizovaným mazáním. Korozi odhaluje přítomnost jemných oxidačních částic v lubrikační kapalině.

2.7.4 Kontaktní únava povrchů

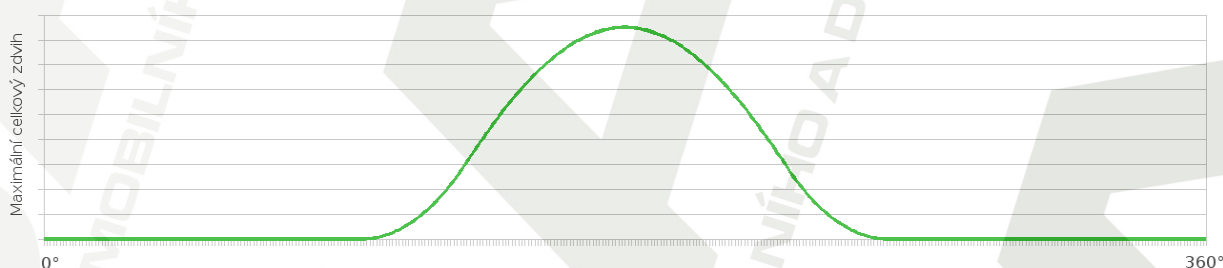
Při vzájemném valení se dvou těles může opakované lokální zatížení vést ke kontaktní únavě materiálu. Ta se projevuje odlupováním a vydrolováním částic z povrchů, tzv. pittingem. Příčinou únavového opotřebení je šíření podpovrchových trhlin vzniklých následkem cyklického namáhání povrchu. Tyto trhliny se dále větví a rozšiřují po hranicích zrn, dochází k tvorbě dutin rovnoběžných s povrchem, k odlupování materiálu a tvorbě typických důlků. Na kontaktní únavu mají vliv činitelé jako rychlost, zatížení, materiál, teplota, geometrie povrchů, mazivo, podíl smyku apod. V mazací kapalině je pitting patrný výskytem charakteristických vločkovitých částic poškozeného povrchu.

2.8 Základní kinematické veličiny [5], [6]

Základními kinematickými veličinami vaček (resp. jimi hnaných zdvihátek) a předmětem zkoumání této práce jsou poloha, rychlost, zrychlení a ryv.

2.8.1 Poloha

Záznamem pohybu zdvihátka v závislosti na čase (nebo úhlu natočení vačky) do pravoúhlých souřadnic je tzv. zdvihový diagram. Příklad zdvihového diagramu je možno vidět na obr. 2.28. Při návrhu vačky je přibližné sestrojení požadovaného zdvihového diagramu zpravidla prvním krokem. Profil radiální vačky je poté sestrojen inverzní metodou, kdy jsou patřičné velikosti zdvihu zaneseny do radiálních souřadnic. Protože je zakreslen transformací z polárních souřadnic do ortogonálních souřadnic, nezobrazuje zdvihový diagram radiální vačky skutečnou strmost povrchu. U cylindrických vaček k takovému zakreslení nedochází. Zakreslením zdvihových závislostí více vaček ve vzájemné součinnosti do jednoho diagramu dostáváme časový diagram. Ten umožňuje správné vzájemné načasování chodu vaček vůči sobě. Optimální nastavení takového stroje znamená minimalizaci prostojů a zvýšení produktivity práce. Je-li k dispozici kompletní zdvihovou závislost, lze snadno určit ostatní kinematické charakteristiky.



2.28, Zdvihový diagram vačky

2.8.2 Rychlost

je derivací polohy podle času. Protože derivace křivky je určena jejím sklonem v bodě, udává strmost zdvihové křivky v kterémkoli bodě rychlost zdvihátka. Tomuto procesu se říká grafická derivace křivky. Svislý sklon křivky v bodě je nazýván nespojitostí. Pokud je tím pádem zdvih přesně matematicky definován, lze další kinematické charakteristiky získat jeho postupnými derivacemi podle času. Je-li kladný směr výchylky zdvihátka směrem nahoru od nejnižšího bodu diagramu, pak rychlost je kladná, když se zdvihátka pohybuje v tomto směru a záporná v případě opačném. Jinými slovy je rychlost kladná při zdvihu a záporná při poklesu. Ryv zdvihátka by měl být co nejnižších hodnot.

2.8.3 Zrychlení

je derivací rychlosti podle času resp. druhou derivací polohy podle času. Sklon křivky rychlosti určuje zrychlení obdobně jako je tomu ve vztahu mezi polohou a rychlostí. Pro

zrychlení platí i obdobná znaménková konvence. Je tedy kladné tehdy, když jeho směr je shodný s kladným směrem zdvihu a opačně. Analýza zrychlení zdvihátka je zvláště důležitá při návrhu rychloběžných strojů. Je svázáno se setrvačnými silami. S jeho průběhem souvisí rázy, hlučnost a opotřebenění stroje nebo vibrace. Křivka zrychlení by neměla vykazovat žádné nespojitosti v oblastech prodlevy zdvihátka. Hodnoty zrychlení ve kterémkoli bodě navíc souvisí s poloměrem křivosti profilu vačky a tedy v důsledku s opotřebením vačky.

2.8.4 Ryv

je derivací zrychlení podle času resp. třetí derivací polohy podle času. Hodnotu ryvu v bodě je taktéž možné určit ze sklonu křivky zrychlení. U běžných průmyslových vaček je sledování křivky ryvu většinou zanedbáváno, jelikož výrobní tolerance bývají v řádech setin milimetrů a průběh ryvu je citlivý na daleko menší odchylky. Ovšem v automobilním průmyslu pracují vačky s velmi malými zdvihy a tím pádem vyššími tolerancemi, které jsou řádově v mikrometrech. V takovém případě je vhodné uvažovat i data o průběhu ryvu.

2.9 Křivky používané při návrhu profilů vaček [5], [6]

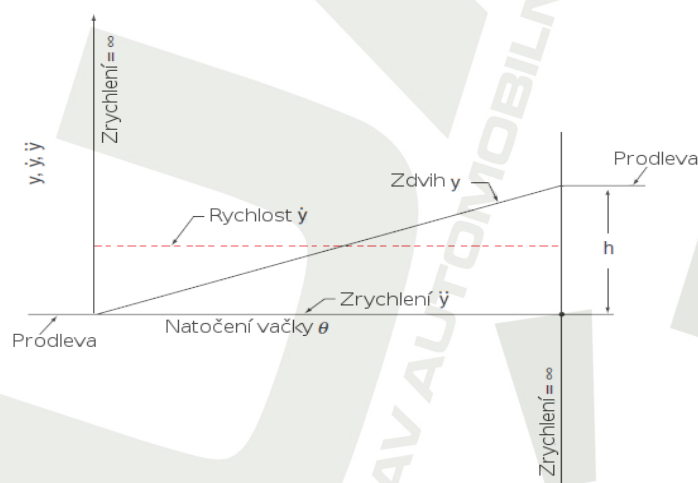
Tato podkapitola představuje základní matematické křivky, které jsou prvotní volbou při návrhu vačky. Snadno se s nimi pracuje a jsou dobře analyzovatelné. Podrobné seznámení s nimi, jejich vlastnostmi a matematickým vyjádřením poskytuje literatura [5] a [6].

2.9.1 Jednoduché polynomální křivky

jsou často první volbou při konstrukci nízkorychlostních a středněrychlostních soustav. Základními polynomálními křivkami jsou přímka, parabola a kubické křivky.

i) Křivka konstantní rychlosti

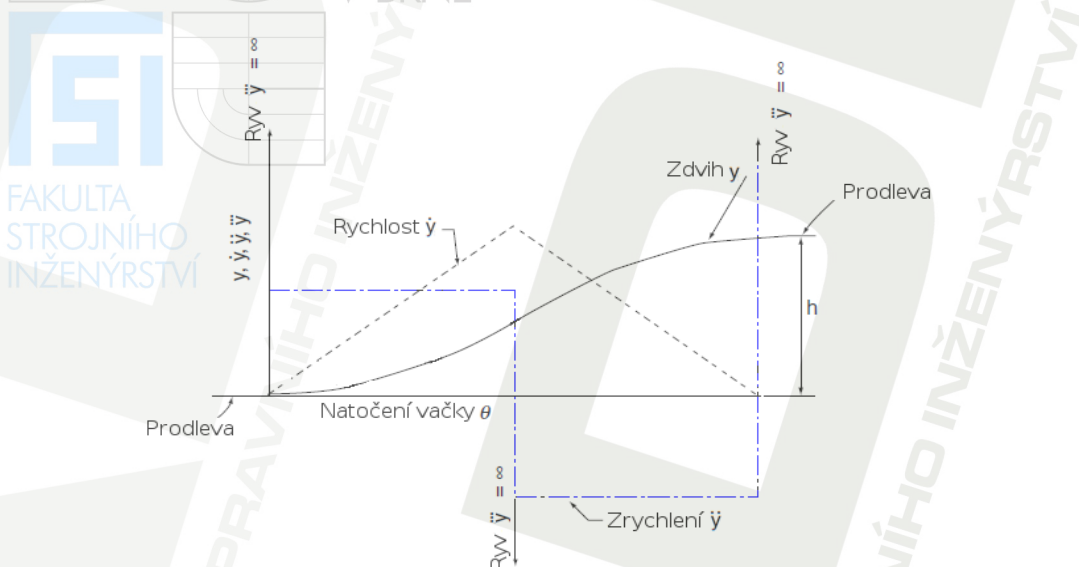
Křivka konstantní rychlosti nebo-li kontinuálního zdvihu má přímkovou zdvihovou závislost s konstantním sklonem (obr. 2.29). Radiální vačka konstantní rychlosti má tvar Archimedovy spirály. Vidíme, že zdvih je kontinuální, rychlost konstantní a zrychlení je během zdvihu nulové. Na začátku zdvihu, kde se prodleva potkává s přímkou, zdvihátka poměrně prudce nabírá rychlost z klidu, což se projevuje teoreticky nekonečným zrychlením. Podobně na jeho konci, kde prudce působí záporné zrychlení. Toto způsobuje ve zdvihátku výrazný ráz. Jeho velikost závisí na tuhosti zdvihátka. Jinými slovy se na kontuře vačky nachází schodek, který zdvihátka není schopno sledovat. Tato křivka je tedy pro DRD vačku nepraktická a v praxi v podstatě nepoužívaná.



2.29, Křivka konstantní rychlosti, [5]

ii) *Křivka konstantního zrychlení*

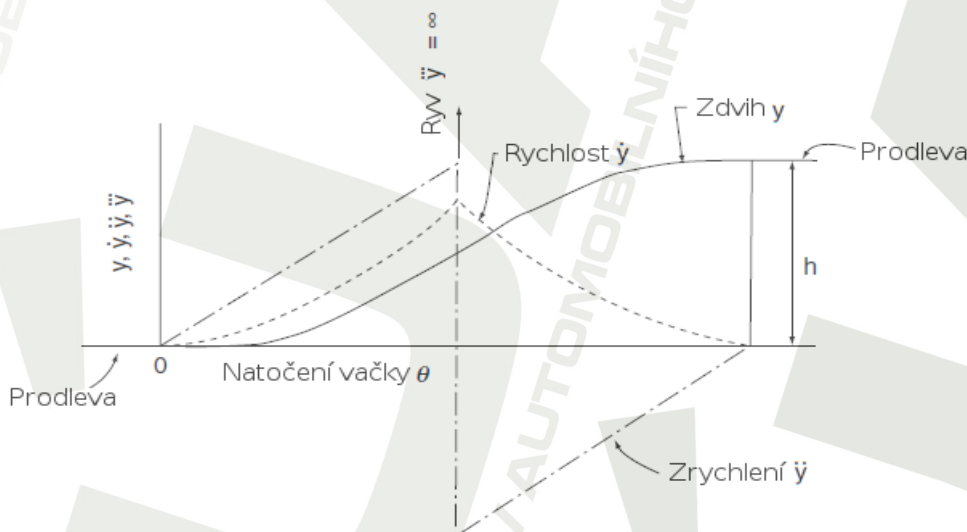
Tato z polynomálních křivek je známa také jako parabolická křivka a má konstantní průběh kladné i záporné hodnoty zrychlení. Tato křivka má nejmenší maximální zrychlení ze všech možných základních křivek, avšak má nespojitosti v křivce zrychlení na obou koncích prodlevy a v přechodovém bodě. Je proto používána pro nízkorychlostní systémy. Křivku je možno vidět na obr. 2.30.



2.30, Křivka konstantního zrychlení, [5]

iii) *Kubická křivka č. 1*

Tato zdvihová křivka polynomální třídy má křivku zrychlení trojúhelníkového tvaru. Představuje modifikaci parabolické křivky, zbavenou skokové změny zrychlení na konci cyklu. Nicméně vykazuje nespojitosti zrychlení vprostřed cyklu. Takováto křivka má omezené užití, poněvadž jí odpovídající tlakový úhel je relativně vysoký a protože způsobuje velké setrvačné síly. Křivku ilustruje obr. 2.31.



2.31, První kubická křivka, [5]

iv) Kubická křivka č. 2

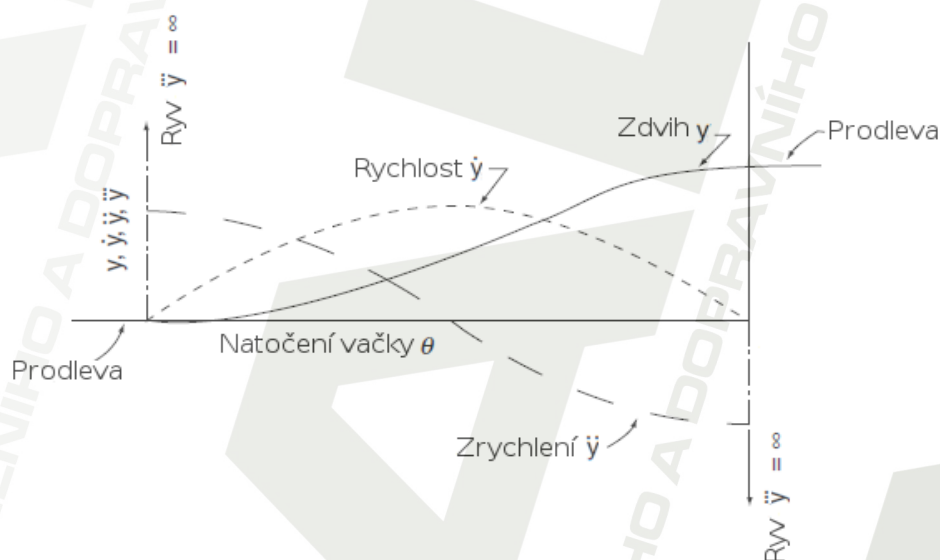
se od předešlé liší absencí nespojitosti v přechodovém bodě a také spojitostí zrychlení po celou dobu zdvihu. Sama o sobě je používaná zřídka, ale její kombinace s jinými křivkami skýtá výhody.

2.9.2 Trigonometrické křivky

Trigonometrickými křivkami jsou jednoduchá harmonická, cykloidní a dvojitá harmonická. Porovnáme-li nejčastěji používané křivky, pak trigonometrické dávají oproti polynomálním celekově lepší chod. Výhodami jsou menší výsledné rozměry vačky a zredukované namáhání zdvihátka.

i) Jednoduchá harmonická křivka

je velmi oblíbenou volbou. Jí odpovídající zrychlení probíhá podle funkce kosinus. Křivka zrychlení je hladká výjima konce prodlev, kde vykazuje nespojitost a tím pádem nekonečný ryv. Hodnoty rychlosti a zrychlení bývají pro snazší výpočty tabelovány. Charakteristiky jednoduché harmonické křivky jsou podobné jako u křivky kubické. Křivku je možno vidět na obr. 2.32.



2.32, Jednoduchá harmonická křivka, [5]

ii) Cykloidní zdvihová křivka

je, jak napovídá její název, tvořena cykloidou a má sínovou křivku zrychlení. Cykloida je křivka vzniklá odvalováním kružnice po úsečce. Cykloidní křivka je první z DRD křivek, která nevykazuje nespojitosti ani prudké změny zrychlení. Může tedy být použita i při vyšších rychlostech a to přesto, že maxima jejího zrychlení jsou mnohdy relativně vysoká. Cykloidní křivka je mimo to výhodná i proto, že způsobuje ze všech základních křivek nejmenší vibrace, opotřebení, namáhání, hlučnost a rázy. Takováto vačka se snadno rozbíhá, k přítlaku zdvihátka postačí menší pružina, na zdvihátko působí menší boční síly. Nevýhodou je vyšší potřebná výrobní přesnost. Data pro rychlost a zrychlení cykloidní křivky bývají pro jednoduchost opět tabelována. Křivka polohy a zrychlení je je zobazena na obr. 2.36.

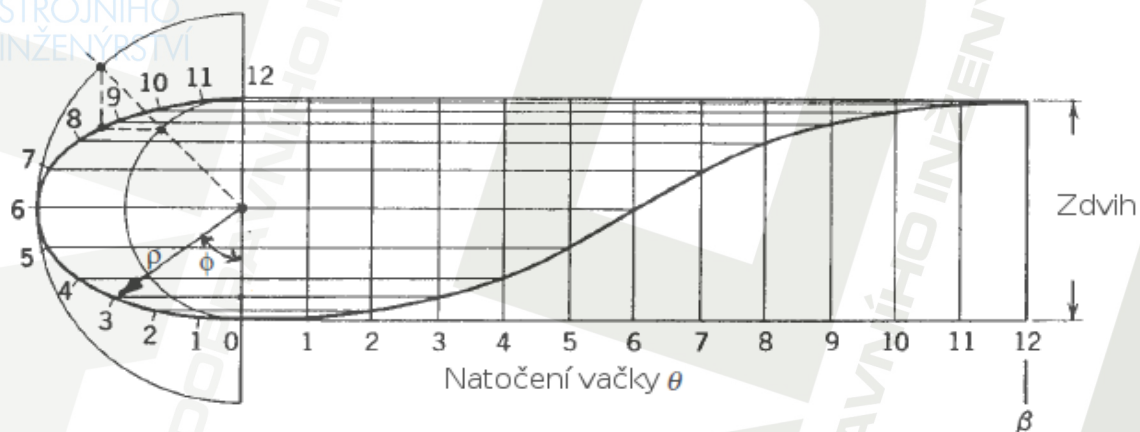
iii) Dvojitá křivka harmonického pohybu

Tato asymetrická křivka sestává z rozdílu mezi dvěma harmonickými pohyby. Jedním o čtvrtinové amplitudě a dvojnásobné frekvenci, než má druhý. Nabízí výhody jednoduché harmonické křivky s téměř kompletním vyloučením vysokých rázů a vibrací na počátku

zdvihu. Náběh zrychlení na počátku zdvihu je pozvolný, dávající v tomto bodě hladký chod. Nicméně tento pomalý start vyžaduje větší vačku k zajištění dostatečně malé křivosti.

iv) Eliptická křivka

Tato křivka je vytvořena průmětem polárních souřadnic bodů elipsy do vodorovné osy podle obr. 2.33. Kontura vačky a její vlastnosti závisí na zvolených poměrech hlavní a vedlejší poloosy. S rostoucí velikostí hlavní poloosy roste rozměr vačky a zdvihová křivka je plošší. Byla-li by hlavní poloosa elipsy na délku nulová, byla by zdvihovou křivkou přímka. Poměr 1:2 je vhodný pro malou vačku o přijatelných vlastnostech. Kinematické parametry jsou podobné jako u jednoduché harmonické křivky s nespojitostí na začátku a na konci cyklu. Snižování poměru poloos až k 11:8 přibližuje křivku k parabole. Další zmenšování poměru není praktické.



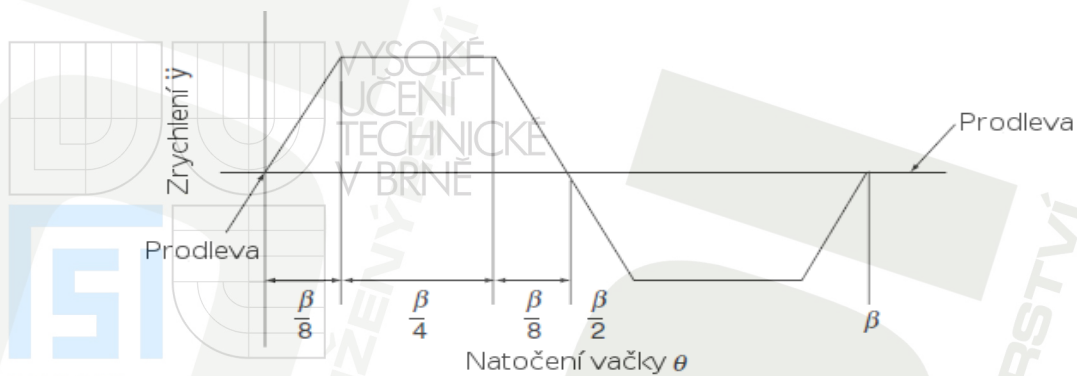
2.33, Konstrukce eliptické zdvihové křivky, [5]

2.9.3 Modifikované základní křivky

S ohledem na mnohé požadavky na chod strojních zařízení, rychlost a především zrychlení zdvihátek je jsou základní křivky často aplikovány v modifikacích. Takovými modifikacemi jsou natočení anebo kombinace úseků kubických křivek, harmonických křivek, cykloidních křivek, křivek konstantní rychlosti a konstantního zrychlení a dalších. Níže je představeno několik typické kombinací, nicméně základní křivky mohou být k uspokojení konstrukčních požadavků kombinovány zcela libovolně. Platí však několik zásad. Součet dílčích zdvihů kombinovaných úseků musí být roven celkovému požadovanému zdvihu. Součet úhlů rotovaných vačkou v rámci jednotlivých úseků musí být roven celkovému úhlu rotace vačky. Rychlosti v bodech, kde se stýkají úseky různých křivek se musí rovnat. Vysokorychlostní chod vyžaduje rovnost zrychlení v těchto bodech. Nesmí se objevovat nespojitosti ve zrychlení a tedy nekonečné hodnoty ryvu. V některých případech diktují speciální požadavky na konstrukci vlastnosti akcelerační křivky. Například poměr kladného a záporného zrychlení má vliv na potřebnou velikost přítlačné pružiny. Podrobnější matematickou analýzu modifikovaných křivek je možno nalézt v literatuře [5] a [6].

i) Křivka trapézového zrychlení

Je kombinací kubických a parabolických křivek. Výsledkem je modifikace pravoúhlého průběhu zrychlení parabolické křivky na trapézové. Taková křivka poskytuje dobré dynamické odezvy při vysokorychlostních aplikacích. Křivku znázorňuje obr. 2.34.



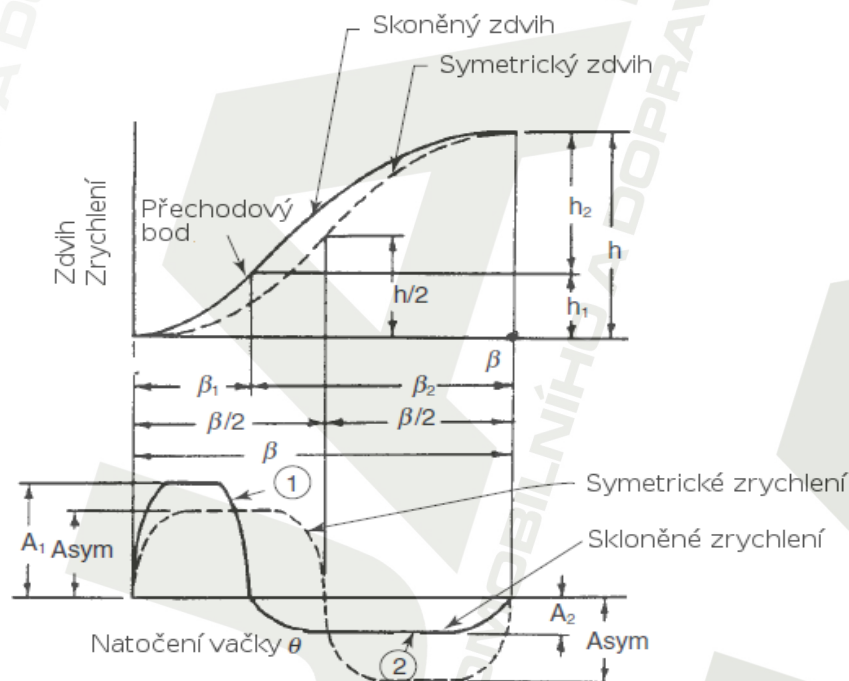
2.34, Křivka trapézového zrychlení, [5]

ii) *Modifikovaná křivka trapézového zrychlení*

vzniká další úpravou křivky předešlé. Zdvihová křivka sestává z kombinace paraboly a cykloidy. Tato kombinace redukuje maximální zrychlení na úkor zvýšení maximálních hodnot ryvu. Křivka zrychlení je obdobná jako v předchozím případě, jen ostré hrany jsou nahrazeny hladkými přechody.

iii) *Křivka skloněného trapézového zrychlení*

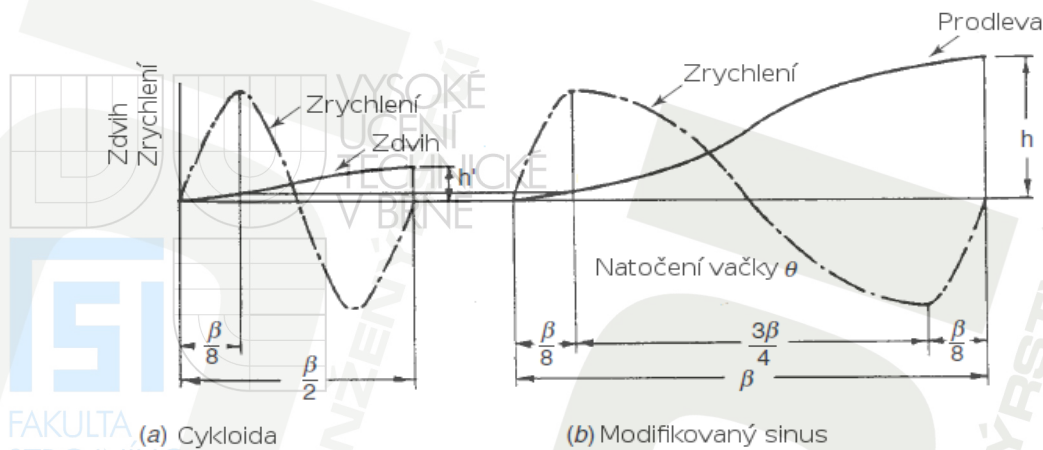
Ve výjimečných případech zdvihátko vyžaduje jistou rychlost a jisté zrychlení v konkrétních kritických bodech chodu stroje. Toho může být dosaženo skloněním profilu zrychlení jako na obr. 2.35.



2.35, Křivka symetrického a skloněného trapézového zrychlení, [5]

iv) *Modifikovaný sinus*

vznikne kombinací čtvrtin sinusovky. Změna působícího točivého momentu z kladného na záporný probíhá téměř po polovinu dobu cyklu. To takové vačky předurčuje k manipulaci s těžkými předměty nebo ke krokování revolverových hlav. Obr. 2.36a ukazuje základní cycloidní křivku, ze které byla odvozena, 2.36b zobrazuje diagramy zdvihu a zrychlení modifikované sinusovky.



2.36, Zdvih a zrychlení cykloidy a modifikovaného sinu, [5]

v) *Modifikovaná cykloida*

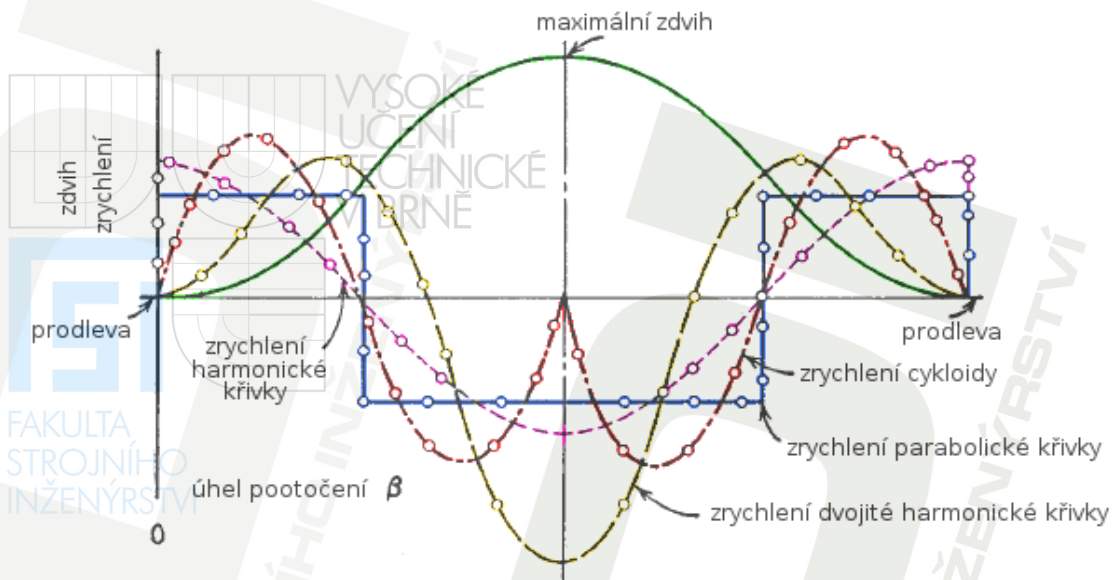
je kombinací sinusoidy a křivky stálé rychlosti. Vykazuje nižší maximální zrychlení přibližně o sedm procent.

2.9.4 Aplikace základních křivek u vaček DRRD

Pro aplikaci u vaček DRRD platí s mírnými obměnami většina pravidel uvedených pro vačky DRD. Vačky DRRD, které používají tyto křivky jak pro zdvih, tak pro pokles (návrat), mohou být rozděleny na vačky se souměrným zdvihovým diagramem a s nesouměrným zdvihovým diagramem. Zdvih i pokles vaček se souměrným zdvihem trvají stejně dlouhý čas (resp. stejnou mírou pootočení vačky), zatímco doba zdvihu u vaček s nesouměrným zdvihem je rozdílná od doby poklesu.

i) *Vačky DRRD se souměrným zdvihovým diagramem*

Na obr. 2.37 je pro srovnání vykresleno několik křivek DRRD vaček se souměrným zdvihem. Symetrická parabola, jednoduchá harmonická křivka, cykloidní a dvojitá harmonická křivka. Závislosti zdvihu a rychlosti jsou mezi prodlevami pro všechny z nich hladké a spojitě. Nicméně parabolická a jednoduchá harmonická křivka zrychlení vykazují stejný problém jako u aplikací DRD, tedy náhlé změny na obou koncích. Tento nedostatek činí takové vačky nevhodnými pro vysokorychlostní aplikace. Nadto cykloida, která je nejvhodnější křivkou pro DRD, projevuje náhlou změnu ve zrychlení v bodě nejvyššího zdvihu. To je nežádoucí kvůli vzniku vibrací. Jejich velikost samozřejmě závisí na rychlosti chodu. Bod nejvyššího zdvihu paraboly ani harmonické křivky tuto skokovou změnu nevykazuje. Nejlepší křivkou pro rychlochodé použití je z hlediska rozběhu a zastavení beze skokové změny zrychlení dvojitá harmonická křivka.



2.37, Zrychlení DRRD vaček různého typu se souměrným zdvihem, [5]

ii) Vačky DRRD s nesouměrným zdvihem a poklesem

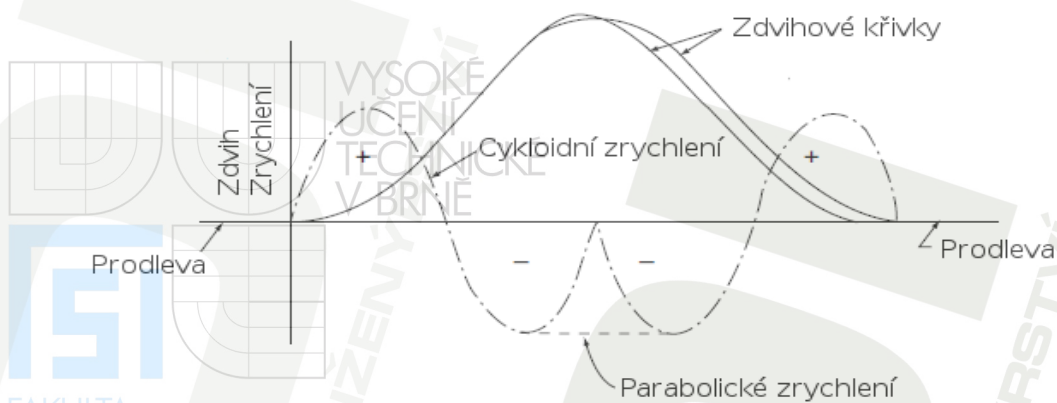
Na obr. 2.38 je patrný problém tohoto typu vaček - nespojitost zrychlení v bodě maximálního zdvihu. Jednoduchá harmonická křivka s poklesem pomalejším, než je zdvih, má v bodě největšího zdvihu nežádoucí prudkou změnu zrychlení, která může vést ke vzniku vibrací, k hlučnosti soustavy a k jejímu opotřebení. Pro nižší a střední rychlosti může být tato skoková změna zanedbána.



2.38, Zrychlení DRRD vaček různého typu s nesouměrným zdvihem, [5]

2.9.5 Kombinace modifikovaných základních křivek u DRRD aplikací

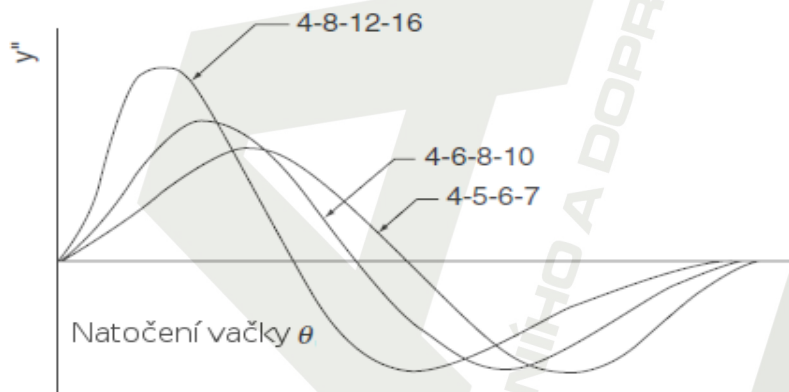
Všechny modifikované křivky vhodné k vysokorychlostním aplikacím (symetrická cykloida, trapézová, modifikovaná trapézová) trpí při použití u DRRD vaček stejným problémem, kterým je špička v akcelerační křivce v oblasti nejvyššího zdvihu. Toto náhlé zvýšení způsobuje velké zatížení stroje a vibrace. Situaci ilustruje symetrická cykloidní křivka na obr. 2.39. Zde je popsán problém řešen proložením cykloidy parabolickými úseky. Vzniká hladší a přijatelnější akcelerační křivka s nižšími špičkovými zrychleními. Jiným, méně matematicky náročným řešením, je užití polynomálních křivek.



2.39, Proložení cykloidního zrychlení křivky parabolickým úsekem, [5]

2.9.6 Polynomální křivky

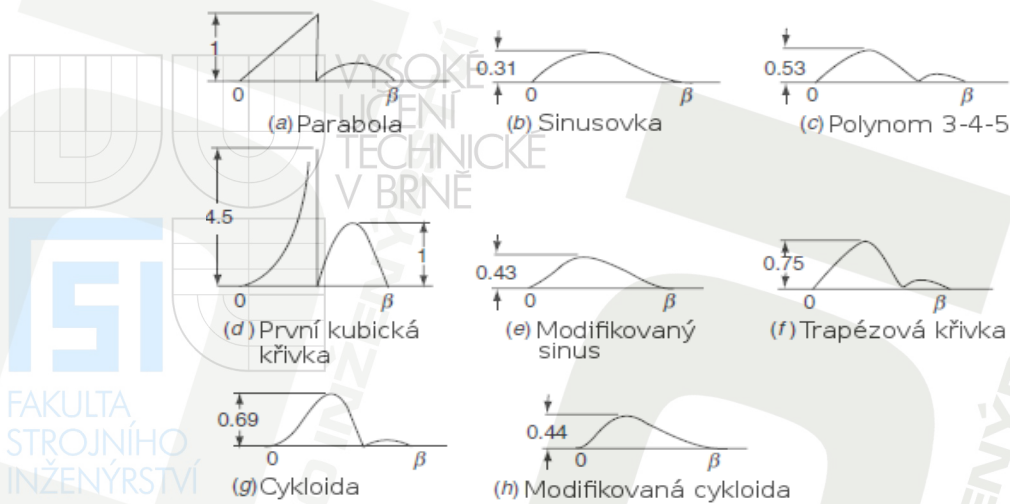
Další možností při vývoji profilu vačky je použití algebraických polynomů. Polynomální řešení mohou být použita k uspokojení zcela libovolných požadavků na zdvihovou křivku. Dlouhodobým vývojem byla navržena řešení polynomů různých stupňů, která nejlépe vyhovují požadavkům na chod stroje a zároveň minimalizaci tlakových úhlů nebo vznikajících napětí. Experimentálně byly pro automobilní vačky použity polynomy až padesátého stupně. Ovšem při vysokorychlostním chodu mohou polynomy příliš vysokých řádů přinášet rizika vibrací. Polynomálních řešení je využíváno zvláště u vysokorychlostních automobilních vaček DRRD. Více o polynomech rozličných stupňů a jejich analýze v [5] a [6]. Obr. 2.40 ukazuje průběh polynomálních křivek s různými koeficienty.



2.40, Průběhy polynomálních křivek o různých koeficientech, [5]

2.9.7 Tlakový úhel v závislosti na použitých křivkách

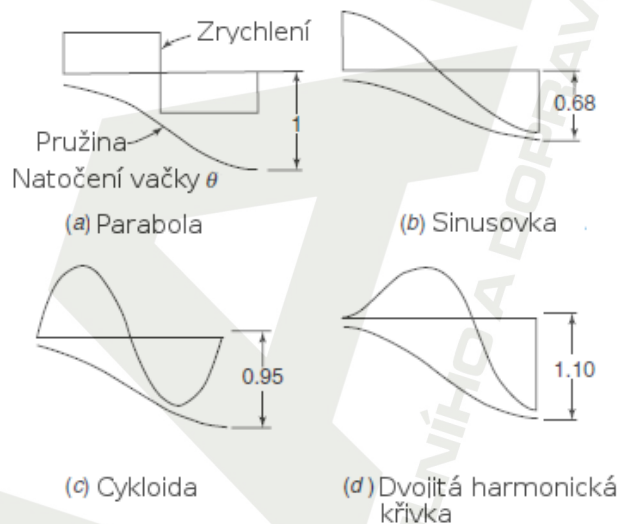
Pro rozličné druhy křivek se liší velikost výsledného tlakového úhlu vačky a tím pádem míra bočního namáhání zdvihátka. Možnost názorného srovnání jeho velikosti pro různé vačky (o shodném průměru základní kružnice) nabízí obr. 2.41 Jako měřítko slouží maximální boční namáhání u parabolické křivky. K němu jsou relativně vztažena namáhání u ostatních křivek. Na svislých osách grafů je míra bočního namáhání dřívku, na vodorovných osách je úhel natočení.



2.41, velikost bočního namáhání zdvihátka pro různé křivky v porovnání k parabole, [5]

2.9.8 Výběr pružiny podle druhu křivky

U různých zdvihových křivek se liší i velikost potřebné síly přitlačné pružiny. Obr. 2.42 ukazuje srovnání potřebné síly pro parabolu, sinusoidu, cykloidu a dvojitou harmonickou křivku. Na svislých osách grafů je síla od pružiny u paraboly. Jako jednotka pro srovnání posloužila síla pro parabolickou vačku. Na vodorovných osách je úhel natočení.



2.42, Velikost potřebné síly pružiny pro různé druhy křivek, [5]

2.10 Měření chodu vaček [7], [8], [9], [10]

Veličiny jako úhlová poloha, zdvih, rychlost, zrychlení, síly a zatížení mohou dnes být měřeny s velkou přesností, velkou opakovatelností a s vysokou vzorkovací frekvencí. Výkonná výpočetní technika umožňuje provádět analýzu chodu v reálném čase a eventuálně ihned korigovat nastavení stroje. K měření dynamických a kinematických veličin je dostupná celá řada snímačů.

2.10.1 Snímače úhlové polohy

Úhlová poloha hřídele musí být často měřena s vysokou přesností. K dispozici jsou jak absolutní, tak přírůstkové snímače. Přírůstkové dovedou odečíst relativní míru potočení hřídele, ale po vypnutí se vynulují. Jsou levnější a častěji používané. Nejčastěji používanými

typy snímačů úhlové polohy jsou kontaktní a z nekontaktní. Nkontaktními snímači bývají indukční fázové senzory, optické snímače a indukční snímače.

i) kontaktní

V minulosti byly ke zjišťování úhlového pootočení využívány kontaktní snímače v podobě nejčastěji desetipolohových otočných přepínačů. Jejich převod byl obvykle 1:10 a informaci poskytovaly okamžitě a absolutně. Od jejich užívání bylo již vesměs upuštěno.

ii) Induktivní fázové senzory

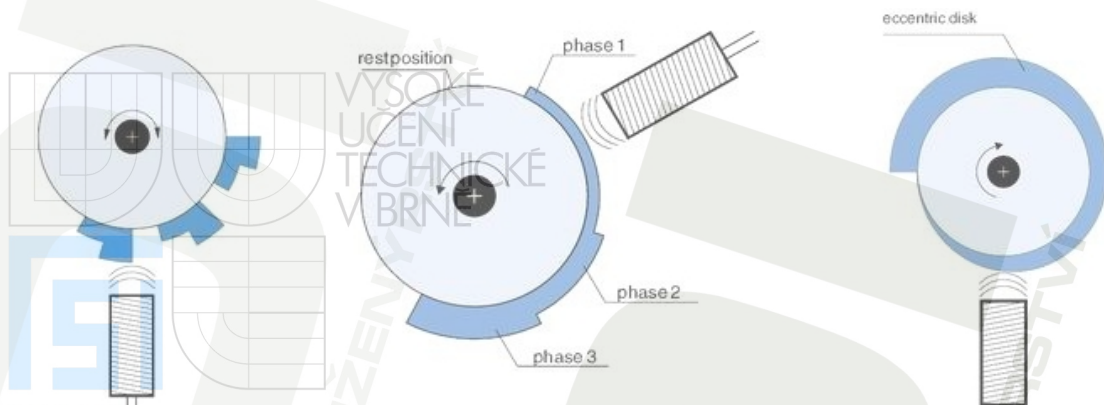
pracují na indukčním fázovém principu. Vpodstatě jde o střídavý rotační stroj připomínající asynchronní motor s vyvedenou kotvou, pro potřeby měření obvykle ve dvoufázovém provedení. Napájením cívek statoru se uvnitř vytváří rotující magnetické pole, které v cívce rotoru vyvolává střídavé napětí o stejné frekvenci a fázovém posunu úměrném úhlu natočení. Z tohoto napětí je vyhodnocen údaj o natočení rotoru vůči výchozí poloze. V rámci jedné otáčky má údaj absolutní charakter, který se cyklicky opakuje s každou otáčkou. Po zapnutí stroje je nutné uvést do souladu vyhodnocovaný údaj s údajem o skutečné poloze. Přístroj je tedy nutno vynulovat po najetí stroje do referenční polohy. Dokud je přístroj pod proudem, je údaj o pootočení absolutní.

iii) Optické přírůstkové snímače

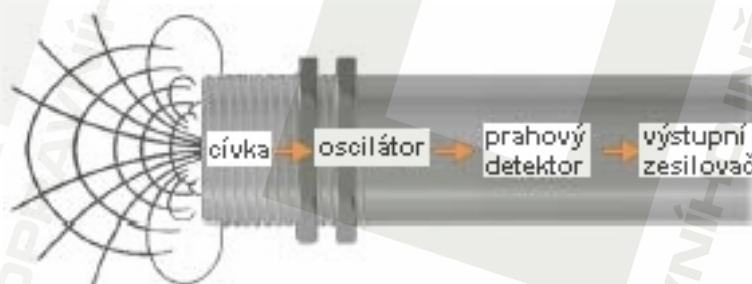
Dnes nejpoužívanějším druhem snímačů jsou optické přírůstkové senzory polohy. Princip jejich funkce spočívá ve změnách světelného toku v závislosti na natočení kotoučových segmentů s ryskami nebo drážkami. Světelný tok je vyhodnocován dvojicí optických čidel, která jsou přesazena o čtvrtinu periody. Při plynulém pohybu je výstupem senzoru dvojice periodických napěťových signálů, fázově posunutých o tuto hodnotu. Informace o poloze má přírůstkový charakter a po každém zapnutí systému je třeba ji aktualizovat – opět najetím do referenčních poloh. Aktualizaci polohového údaje usnadní využití tzv. nulového pulzu, který je generován jednou za otáčku. V každé otáčce tak lze aktualizovat cyklicko-absolutní údaj o poloze a v referenční poloze mu dát absolutní charakter, který je platný do nejbližšího výpadku napájení.

iv) Indukční snímač

K určení úhlového pootočení lze rovněž využít indukční snímač vzdálenosti v kombinaci s vhodně tvarovaným kolem. Obecně dovede indukční senzor polohy bezdotykově měřit přiblížení vodivého tělesa. Základem indukčního senzoru jsou cívka s kondenzátorem, jež spolu vytváří paralelní rezonanční obvod oscilátoru. Z oscilátoru vystupuje vysokofrekvenční proud, který při průtoku cívkou kolem ní vytváří magnetické pole. Nachází-li se v blízkosti tohoto pole feromagnetický materiál, začnou se v něm indukovat vířivé proudy a magnetické pole se zdeformuje. To ovlivní impedanci cívky, a tím i frekvenci oscilátoru. Změnu frekvence kmitání oscilátoru vyhodnotí prahový detektor. Ten řídí klopný obvod přepínače, který ovládá výstup na koncový zesilovač. Různým připojením zátěže na výstup se ovlivní, zda bude výstup napěťový, nebo proudový. Pro snímání úhlové polohy se využívá kombinace diskretního indukčního snímače s vhodně tvarovaným kovovým kolem. Typické tvary kotoučů při interakci se snímačem jsou na obr. 2.43. Indukční snímač je možno vidět na obr. 2.44.



2.43, některé typické tvary kovových kotoučů používaných při indukčním snímání úhlové polohy [9]



2.44, Uspořádání běžného indukčního snímače [9]

2.10.2 Snímače zdvihu

Pro smínání lineárního vychýlení zdvihátka je k dispozici celá řada zařízení. V zásadě se dělí na čidla kontaktní nebo nekontaktní.

Kontaktní lineární snímač poskytuje spolehlivé, vysoce přesné měření momentálního zdvihu, ale vyžaduje připevnění pohyblivého jádra přímo ke zdvihátku. To mnohdy není možné, kupříkladu u spalovacího motoru automobilu. Nejčastěji používanými druhy kontaktních snímačů jsou odporové a kapacitní.

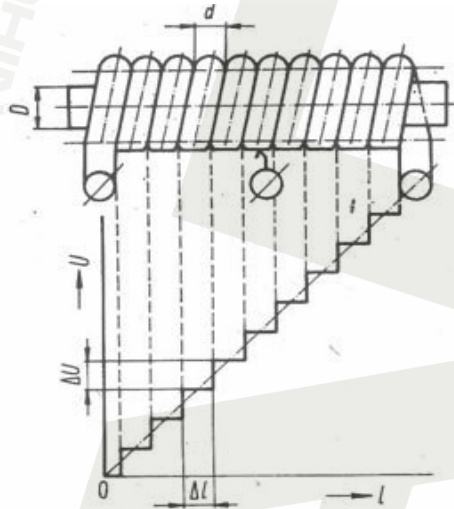
i) Odporové snímače polohy

pracují spojitě nebo nespojitě. Nespojitě pracující umožňují měření pouze mezních hodnot polohy a pracují na principu spínání nebo rozpojování kontaktů. Hodnota odporu je buď nulová, nebo nekonečně vysoká. Spojitě snímáče umožňují plynulé měření hodnot polohy v celém měřicím rozsahu. Obvykle sestávají z cívkového rezistoru s jezdcem připevněným k měřicímu trnu. Je-li spojitý odporový snímač zapojený do obvodu seriově (jako reostat), je výstupním signálem proud I . Jeho průběh je vzhledem k pohybu měřicího trnu nelineární, hyperbolický. Proto jsou reostatové snímače používané zřídka. Je-li snímač v obvodu zapojen paralelně, chová se jako potenciometr a bývá označován jako potenciometrický snímač polohy. Schema takového snímače a jeho zapojení je na obr. 2.45, kde R_1 je rezistor snímače, R_2 odpor zátěže, U_1 vstupní napětí a U_2 výstupní napětí.



2.45, Schéma zapojení potenciometrického snímače polohy [8]

Velikost výstupního napětí U_2 je úměrná poloze měřícího trnu. Změna výstupního napětí probíhá po malých skocích rovných úbytku napětí na jednotlivých závitěch cívky (obr. 2.46). Proto je třeba dbát na to, aby průměr odporového drátu byl co nejmenší vzhledem k požadovanému rozsahu měřených hodnot a dráha jezdce co nejdelší.



2.46 Skokový průběh výstupního napětí u potenciometrického snímače [8]

ii) Kapacitní snímače polohy

Kapacitní snímače pracují na principu kondenzátoru s proměnnou kapacitou. Při konstrukci kapacitních snímačů můžeme využívat změny účinné plochy elektrod, změny jejich vzdálenosti nebo změny dielektrika.

iii) Bezkontaktní snímače polohy

Bezkontaktní, indukční snímače pracují na principu změny indukčnosti tlumivky změnou magnetické vodivosti magnetického obvodu. Při změně vodivosti magnetického obvodu se mění indukčnost tlumivky, bez nutnosti měnit počet závitů. Takové zařízení je oproti kontaktním snímačům nákladné a komplikované. Jeho nevýhodou je i malá fyzická odolnost. Bezkontaktní snímače jsou často užívané při měření chodu spalovacích vaček motorů.

2.10.3 Snímače rychlosti

Jsou podobné kontaktním snímačům polohy. Průchod železného jádra cívkou vytváří proud, který je úměrný rychlosti. Stejně jako snímače polohy vyžadují přímé napojení na měřený objekt. Jejich přenos je obdobná. Často používají snímače polohy i rychlosti stejná pouzdra, takže mohou být v rámci experimentu snadno vyměněny bez náročnější změny uspořádání.

2.10.4 Tenzometry

Jde o lehké velmi tenká měřicí zařízení, která jsou přilepena k povrchu součástí a zajišťují měření napětí při jejím zatížení. Elektrický odpor zařízení se mění úměrně změně napětí. Tenzometry jsou cenově dostupné, jejich aplikace je nenáročná a jejich hmotnost je zanedbatelná. Jejich vzorkovací frekvence je omezena na 1 až 2 kHz.

2.10.5 Snímače zrychlení

Nejlepší volbou v oblasti vaček je piezoelektrický akcelerometr. Ten obsahuje křemenné krystaly, které vytváří elektrický proud úměrně zatížení. Takové zařízení je poměrně drahé. Jeho výhodou je nicméně vysoká přesnost a opakovaetlnost, necitlivost ke změnám teploty a šířka pracovního pásma až 5 kHz. Jeho nevýhodou je větší hmotnost, tedy nutnost jej „zastavět“ do soustavy a schopnost měřit zrychlení jen v jedné ose. Jde o dynamický snímač a nemůže tedy snímat statické zatížení.

2.10.6 Měření vibrací

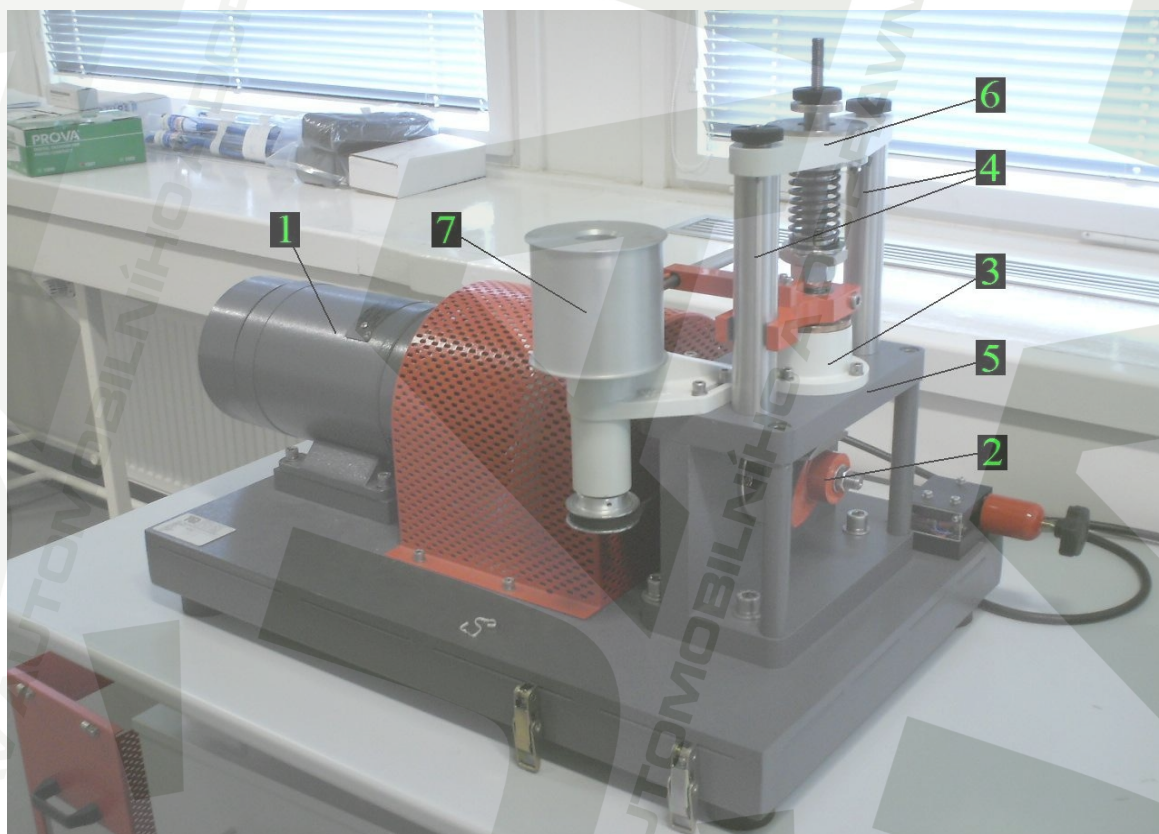
Má dlouhou historii. Postupy se měnily s rozvojem technologií. V počátcích bylo k analýze vibrací užíváno zdvihových závislostí. Po příchodu snímačů rychlosti byly k měření vibrací používány tyto snímače. Dnes, kdy jsou k dispozici cenově dostupné a přesné akcelerometry, jsou používány právě ty. Důvodem je i fakt, že čím vyšší derivace je změřena, tím více dynamických informací je dostupných pro matematickou analýzu.

3 Formulace řešeného problému a jeho analýza

K praktickému seznámení studentů s vyšetřováním průběhů zdvihu, rychlosti a zrychlení vačkových zdvihátek je třeba vytvořit laboratorní úlohu využívající možností zakoupeného experimentálního aparátu. Je nutné se s přístrojem důkladně seznámit, odstranit eventuelní nedostatky bránící jeho správné funkci, zprovoznit jej a definovat možné metody analýzy zkoumaných veličin. Na základě praktického provedení vymezených postupů následně navrhnout názornou vzdělávací úlohu dávající studentům představu o zpracování změřených dat a chování zkoumaných kinematických veličin.

3.1 Popis mechanismu

Fotografie experimentální stanice jsou na obr. 3.1. Aparát sestává ze stejnosměrného elektromotoru (1) spojeného pružnou spojkou (krytou ochranným plechem) se samotným vačkovým hřídelem. Vačkový hřídel je zakončen kuzelem, na který se s pomocí Woodruffova pera nasazuje zkoumaná vačka (2). Ta se poté zajistí maticí. Zdvihátko je vedeno přírubou s bronzovou vložkou (3) a ve svislém směru je podpořeno dvojicí stojin (4) upevněných na základové desce (5). Na příčniku (6) mezi stojinami je umístěna tlačná vinutá pružina zajišťující kontakt zdvihátka s vačkou. K zdvihátku je přímo mechanicky připojen záznamový hrot - propisovací tužka. Záznamový válec (7) je ozubeným řemenem spojen s vačkovým hřídelem. Jeho úhlová frekvence je shodná s úhlovou frekvencí vačky a jedna jeho otáčka tak odpovídá jedné otáčce vačkového hřídele.



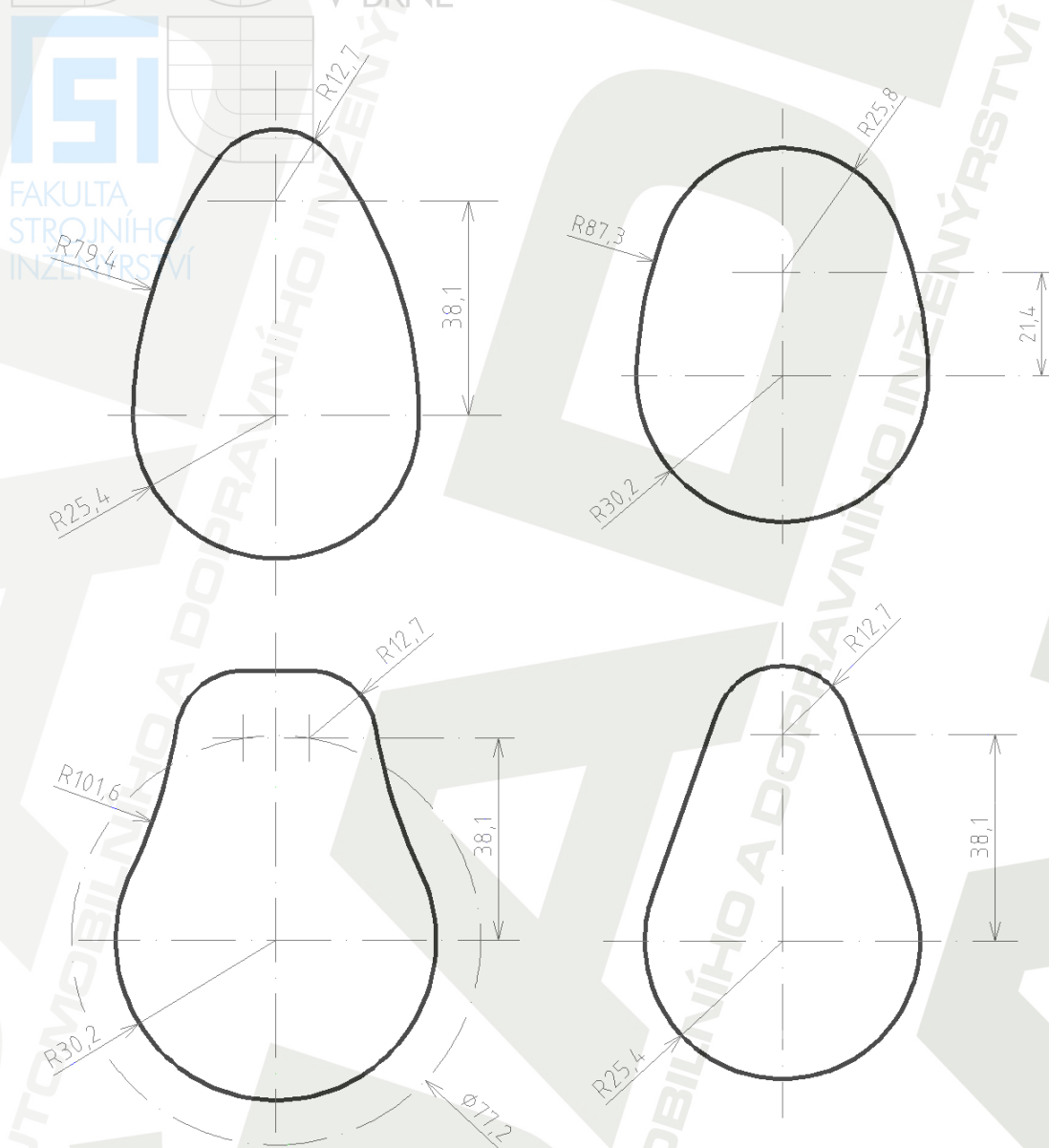
3.1, Fotografie měřicího aparátu s hlavními pozicemi

3.1.1 Zdvihátka

K přístroji byla dodána dvě zdvihátka. Ploché o rozměrech délce plochy 78 mm a šířce plochy 60 mm. Kladičkové o průměru kladičky 28,6 mm.

3.1.2 Vačky

Na kuželový konec hřídele je možno nasadit některou ze čtveřice dodaných vaček. Schematicky jsou okótované profily jednotlivých vaček zobrazeny na obr. č. 3.2. Vlevo nahoře vačka s kruhovým bokem č. 1, vpravo nahoře vačka s kruhovým bokem č. 2, vlevo dole konkávní vačka a vpravo dole vačka tečná.



3.2, Okótované funkční profily zkoumaných vaček

4 Vymezení cílů práce

Cílem práce je v první řadě nalézt postup získání průběhů ostatních kinematických veličin na základě jeho experimentálně změřené zdvihové závislosti. Dále najít, zvážit a případně provést možné alternativy tohoto postupu a získané výsledky porovnat. Zdvihová závislost je jediným parametrem odměřitelným přímo na experimentální stanici. K měření zdvihů možných kombinací dodaných vaček a zdvihátek je nutné odstranit základní nedostatky stanice a umožnit tak její plnohodnotný provoz. Ve druhé řadě pak odstranit eventuální dílčí problémy při provozu stanice. Dále na základě definovaných postupů zformulovat a vyzkoušet metodiku samotné edukační úlohy a pokusit se vymezit další potenciální možnosti úpravy zařízení a jeho možného použití.

FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

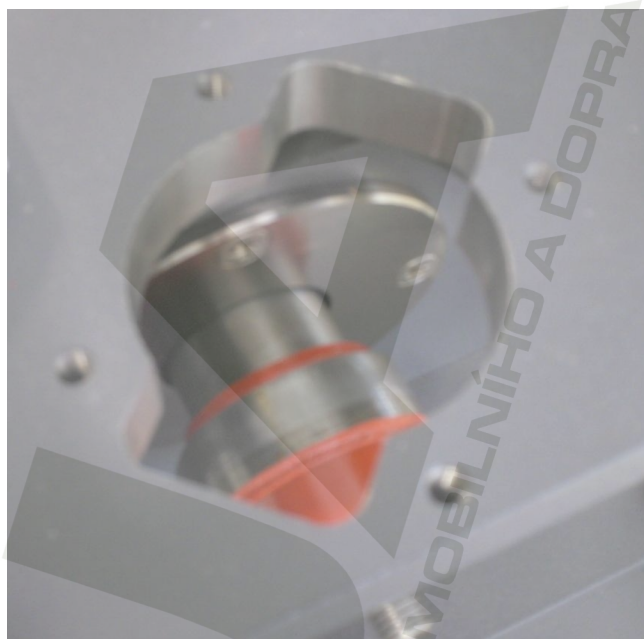
5 Metodický přístup k řešení

5.1 Provedené konstrukční úpravy

Aby bylo vůbec možné provádět zamýšlená měření, bylo třeba odstranit zásadní konstrukční nedostatek měřicí stanice. Tím byl fakt, že přiložené ploché zdvihátko mělo délku plochy 78 mm, zatímco otvor v základové desce zařízení měl průměr pouhých 57 mm. Bez demontáže záznamového válce, dvojice stojin a základní desky tedy nebylo vůbec možné ploché zdvihátko na zařízení instalovat. Demontáž zařízení je relativně problematická (šrouby byly navíc zalakovány) i časově náročná a nebylo by efektivní nechat ji studenty provádět během výuky a hrozilo by například stržení závitů šroubů nebo vznik nežádoucích vůlí na přístroji. Bylo tedy přistoupeno k modifikaci tvaru zdvihátka i tvaru díry v základové desce.

5.1.1 Úprava díry pro zdvihátko v základové desce

Pouhé zvětšení průměru kruhové díry na rozměr délky zdvihátka nebylo možné ze dvou důvodů. Zaprvé by výsledný otvor zasahoval do roztečné kružnice závitových děr pro šrouby držící přírubu. To by znamenalo nutnost vytvoření nových závitových děr na roztečné kružnici o větším průměru a tím pádem i výrobu nové příruby včetně kluzné bronzové vložky. Zadruhé a především však vzdálenost středu díry od okraje základové desky takovéto zvětšení ani nedovoluje. Vzniklý otvor by sahal mimo desku. Bylo proto navrženo a provedeno řešení spočívající v přefrézování díry v základové desce podle výkresu 3-BP-001-2010 a ve zmenšení šířky plochy zdvihátka. Výkres základové desky, který názorně dokumentuje všechny popsané skutečnosti, je k nahlédnutí v přílohách práce. Výsledná podoba díry je na obr. 5.1. Úprava zdvihátka je popsána níže.



5.1, Fotografie výsledného tvaru díry v základové desce

5.1.2 Úprava zdvihátka

Původní šířka plochy zdvihátka byla zúžena na minimální možný rozměr (rovný průměru dířku zdvihátka), tedy 35 mm. Takovéto řešení v kombinaci s provedenou změnou tvaru otvoru v základové desce dovoluje snadné prostrčení zdvihátka skrze otvor pouze za cenu demontáže příruby. To nejenom výrazně časově zefektivní provádění experimentů na zařízení, ale v důsledku také přispěje k jeho delší životnosti a k lepší pohodě práce.

5.2 Možnosti analýzy kinematických veličin daných vaček

Kromě přímého odměření zdvihu zkoumaných vaček na experimentálním zařízení bylo zváženo několik dalších variant řešení. Těmito možnostmi byly:

- i) Analytické řešení zdvihové funkce na základě matematických rovnic odvozených od tvaru vaček
- ii) Osazení měřicího zařízení elektronickými snímači
- iii) Sestrojení zdvihových závislostí vaček v CAD softwaru

i) Analytické řešení na základě rovnic

Analytické řešení rovnice zdvihové křivky na základě tvaru vačky a zdvihátka by teoreticky bylo možné. Vzhledem k poměrně složitosti jejich tvaru (především vačky konkávní) by však taková metoda byla neúměrně náročná a proto od ní bylo upuštěno.

ii) Osazení měřicího přístroje elektronickými snímači

Osazení stanice elektronickými čidly a jejich propojení s počítačovým rozhraním se jeví jako nejvhodnější řešení. V dnešní době je komerčně dostupná široká paleta snímačů úhlové polohy, zdvihu, rychlosti i zrychlení. Výsledky elektronického měření, které jsou k dispozici takřka okamžitě, jsou navíc velmi přesné a snadno zpracovatelné. Instalace elektronických čidel, jejich kalibrace a především naprogramování potřebného počítačového rozhraní je však svojí náročností zcela mimo rámec bakalářské práce. Bylo provedeno doporučení vhodných snímačů pro možnou budoucí aplikaci, samotná realizace elektronického snímání a analýzy kinematických veličin byla pak doporučena ke zpracování v rámci potenciální budoucí diplomové práce.

iii) Sestrojení zdvihových závislostí

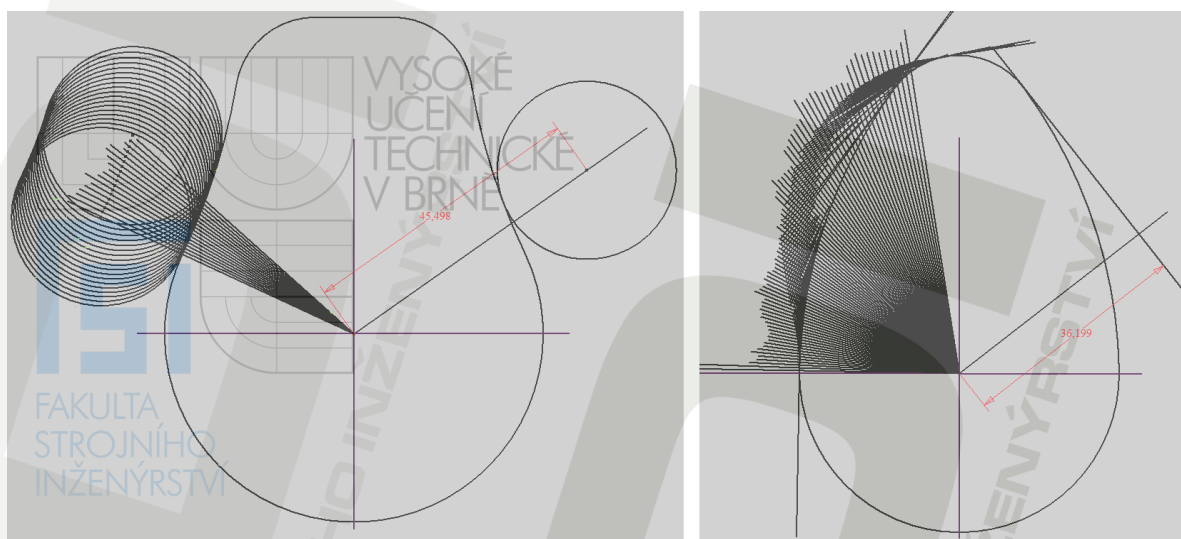
Grafická konstrukce zdvihové závislosti je relativně snadným způsobem k získání uspokojivé zdvihové funkce vačky. Při dostatečně malém kroku je závislost poměrně přesná. Obdržené velikosti zdvihu je jednoduché dále matematicky zpracovat. K dalšímu postupu byla zvolena právě tato varianta řešení. O jejím přesném postupu viz níže.

5.3 Změření úhlové rychlosti vačkového hřídele

Pomocí optického snímače Prova RM-1501 osazeného adaptérem RM-1502 pro kontaktní snímání úhlové rychlosti byla změřena průměrná úhlová frekvence vačkového hřídele při nejnižších možných otáčkách motoru, které dovoluje ovládací panel experimentální měřicí stanice. Při této úhlové frekvenci byla prováděna všechna praktická měření (Viz níže). Tato frekvence je $4\pi \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$.

5.4 Získání kinematických veličin na základě sestavení zdvihových závislostí

Na základě okótovaných schémat obsažených v návodu k použití přístroje byly vytvořeny náčrty zkoumaných vaček v CAD systému *AutoDesk Inventor*. Tyto náčrty jsou na obr. 3.2. Postupně byly sestaveny zdvihové závislosti všech vaček jak pro ploché, tak pro kladičkové zdvihátka. Konstrukci zdvihových závislostí ilustruje obr. 5.2. Vlevo konkávní vačka s kladičkovým zdvihátkem, vpravo vačka s kruhovým bokem s plochým zdvihátkem.



5.2, sestrojení zdvihové závislosti pro různé konfigurace vačka-zdvihátka

Velikost zdvihu y každého kroku byla v softwaru odměřena a zaznamenána s přesností jedné setiny milimetru. Jako krok při sestrovování zdvihových závislostí byl volen jeden stupeň, aby získaná data byla co nejjemnější. Na základě znalosti úhlové rychlosti vačky ω byl podle vztahů (5.1) [11] a (5.2) [12] k odpovídajícím úhlům natočení vačky vypočítán odpovídající čas v sekundách.

$$\omega [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] = \frac{\Delta \varphi [\text{rad}]}{\Delta t [\text{s}]} \Rightarrow \Delta t [\text{s}] = \frac{\Delta \varphi [\text{rad}]}{\omega [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]} \quad (5.1)$$

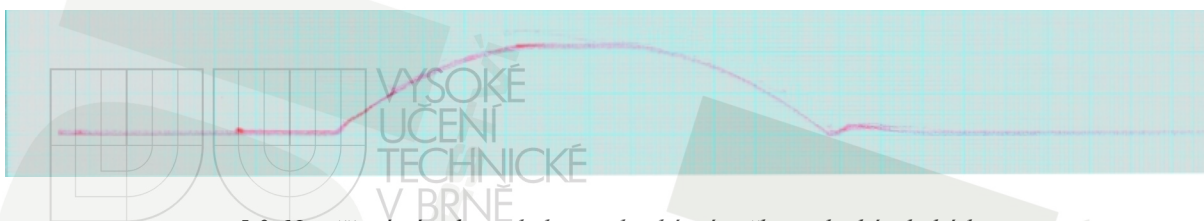
$$\alpha [^\circ] = \frac{\alpha [\text{rad}] \cdot 180 [^\circ]}{\pi [\text{rad}]} \quad (5.2)$$

Jednotlivé velikosti zdvihu y byly zaneseny do tabulkového procesoru *OpenOffice.org Calc* a v souladu se vztahy (5.3) [13] postupně třikrát středově numericky zderivovány podle času t adekvátního úhlu natočení vačky. Takto byly obdrženy velikosti rychlosti v , zrychlení a a ryvu j zdvihátka pro všechny kombinace vaček a zdvihátek. Na jejich základě byly vygenerovány grafické průběhy. Ty jsou k vidění níže v podkapitole 6.1.

$$v [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] = \frac{dy [\text{m}]}{dt [\text{s}]}; a [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] = \frac{dv [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]}{dt [\text{s}]}; j [\text{m} \cdot \text{s}^{-3}] = \frac{da [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]}{dt [\text{s}]} \quad (5.3)$$

5.5 Získání kinematických veličin na základě měření na experimentálním zařízení

Na experimentální stanici byla provedena měření zdvihových závislostí všech osmi možných kombinací vačka - zdvihátka. Vzhledem k tomu, že mechanismus pracuje v poměrně ustáleném režimu a záznamový hrot sleduje velmi přesně stále tutéž trajektorii, bylo provedeno po jednom měření od každé konfigurace. Získané zdvihové diagramy na milimetrovém papíře jsou neupravené na obr. 5.3 - 5.10.

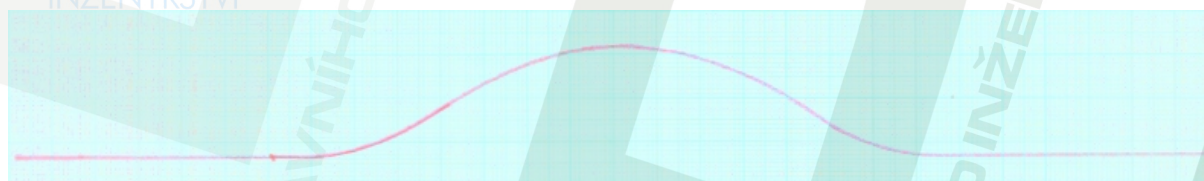


5.3, Naměřená závislost zdvihu pro konkávní vačku a ploché zdvihátko

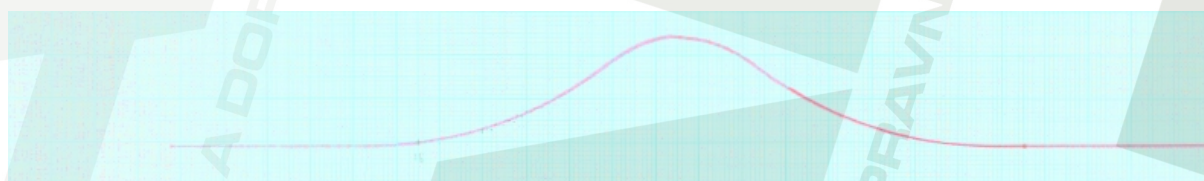


ISI
FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

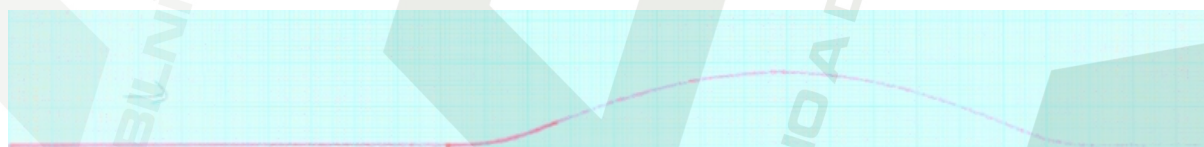
5.4, Naměřená závislost zdvihu pro konkávní vačku a kladičkové zdvihátko



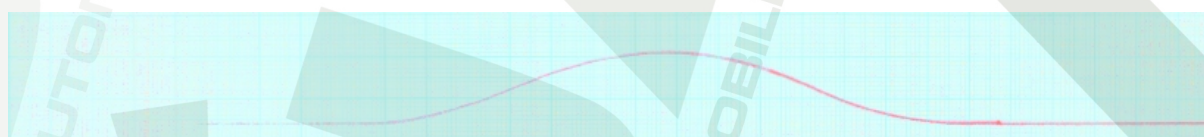
5.5, Naměřená závislost zdvihu pro vačku s kruhovým bokem č. 1 a ploché zdvihátko



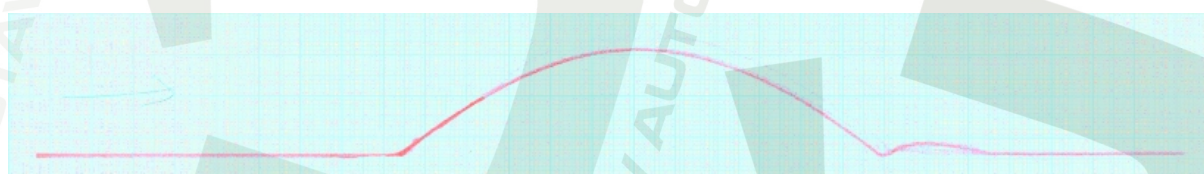
5.6, Naměřená závislost zdvihu pro vačku s kruhovým bokem č. 1 a kladičkové zdvihátko



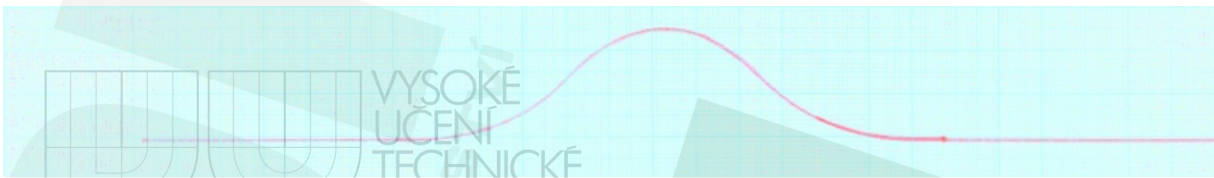
5.7, Naměřená závislost zdvihu pro vačku s kruhovým bokem č. 2 a ploché zdvihátko



5.8, Naměřená závislost zdvihu pro vačku s kruhovým bokem č. 2 a kladičkové zdvihátko



5.9, Naměřená závislost zdvihu pro tečnou vačku a ploché zdvihátko



5.10, Naměřená závislost zdvihu pro tečnou vačku a kladičkové zdvihátko

Aby bylo možné zaznamenané křivky numericky derivovat a získat tak ostatní kinematické veličiny, bylo potřeba je převést do digitální podoby. Byly naskenovány s dostatečným rozlišením běžným scannerem a přesně vyrovnány do vodorovné polohy v softwaru *Rhino 3D*. V tomto softwaru byla každá získaná křivka dostatečně přesně překryta křivkou spline s vhodně zvolenými řídicími body. Spline zastupující analyzovanou křivku byla poté rozdělena na diskrétní sadu bodů o dané vodorovné vzdálenosti jednoho mm. Program *Rhino 3D* umožňuje provést výstup souřadnic jednotlivých bodů v ortogonálních osách do textového souboru. Takto získané souřadnice byly převedeny do tabulkového procesoru *OpenOffice.org Calc*. Protože jsou otáčky n vačky shodné s otáčkami n záznamového válce, jehož obvod s je 297 mm, je obvodová rychlost v podle vztahu (5.4) [14] rovna $0,594 \text{ ms}^{-1}$. Odtud byl příslušným vodorovným souřadnicím přiřazen adekvátní čas v sekundách podle vztahu (5.5) [13].

$$v_o = s[m] \cdot n[m^{-1}] = 0,297m \cdot 2s^{-1} = 0,594ms^{-1} \quad (5.4)$$

$$v[m \cdot s^{-1}] = \frac{\Delta s[m]}{\Delta t[s]} \Rightarrow \Delta t[s] = \frac{\Delta s[m]}{v[m \cdot s^{-1}]} \quad (5.5)$$

Velikosti zdvihu y byly poté v tabulkovém procesoru numericky derivovány podle času t příslušného konkrétní vodorovné souřadnici s . Postupně trojitá středová numerická derivace byla provedena podle vztahů (5.3) obdobně jako v případě derivace teoretických zdvihových závislostí. Tento byl zvolen především ze dvou důvodů. Zaprvé jsou takto získaná data svým charakterem obdobná s diskrétními daty získanými na základě elektronického snímání. Bylo možno si osvojit metody nakládání s nimi a byl položen základ pro potenciální analýzu výstupů elektronických čidel. Zadruhé bylo možno využít podobný postup derivace, jaký byl použit při analýze kinematických veličin na základě teoretických zdvihových závislostí.

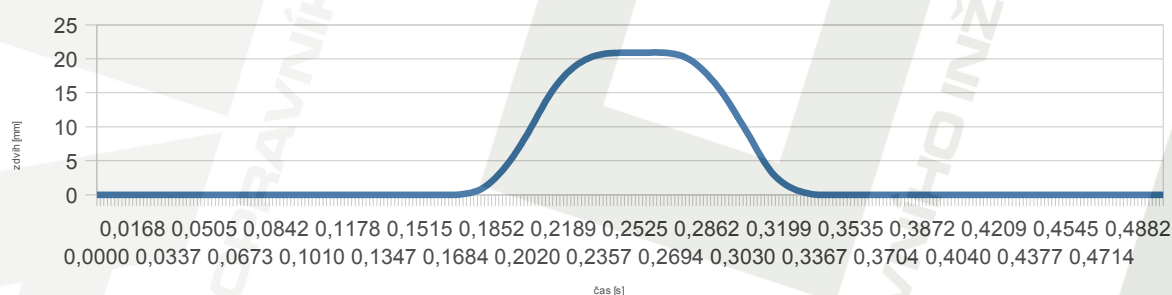
6. Analýza a interpretace získaných údajů

6.1 Srovnání dat získaných oběma metodami

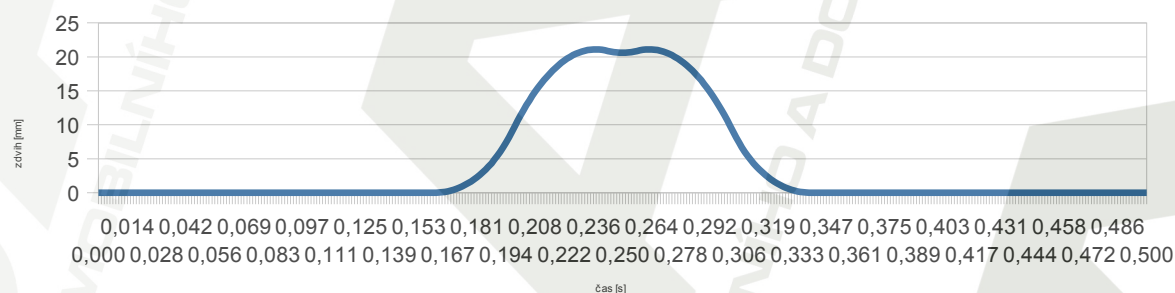
Tato kapitola představuje grafické výstupy průběhů kinematických veličin všech kombinací vaček se zdvihátky získané oběma popsány způsoby. Následuje jejich porovnání.

6.1.1 Konkávní vačka s kladičkovým zdvihátkem

Odměřená velikost zdvihu (obr. 6.1) přibližně odpovídá teoreticky sestrojené (obr. 6.2). Maximální hodnoty obou grafů se taktéž víceméně shodují. Skutečná zdvihová závislost ovšem nevykazuje propad vprostřed cyklu (v čase 0,250 s). Tato absence je způsobená nedostatečnou tuhostí tlačné pružiny, kvůli níž zdvihátko setrvává v horní poloze a nesleduje přesně profil vačky.

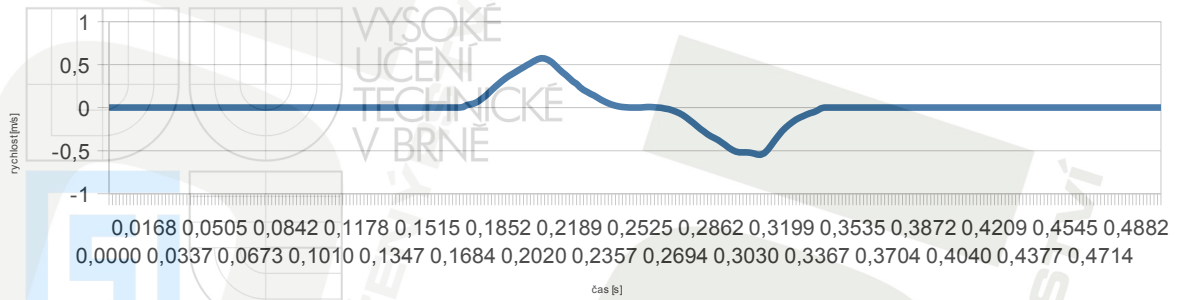


6.1, Skutečný průběh zdvihu kladičkového zdvihátka konkávní vačky

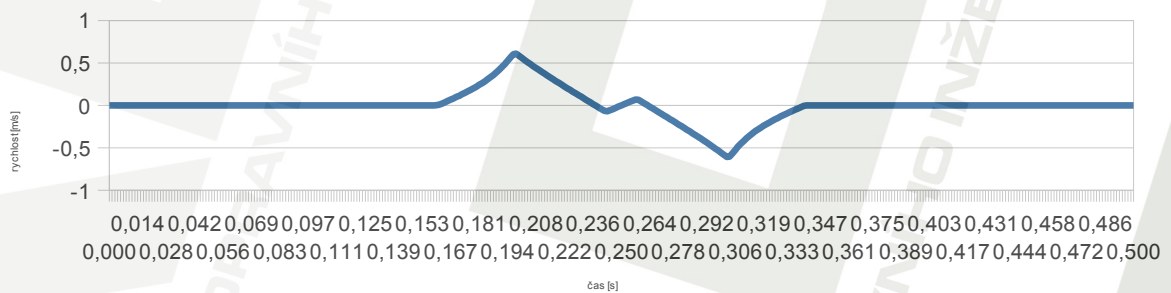


6.2, Teoretický průběh zdvihu kladičkového zdvihátka konkávní vačky

S tímto jevem souvisí i odlišný průběh rychlostí a potažmo zrychlení v této oblasti. Skutečná rychlost zdvihátka (obr. 6.3) je v horní poloze po dobu dvou setin sekundy v podstatě setrvale nulová. Špičky rychlosti za počátkem (čas přibližně 0,200 s) zdvihu a před jeho skončením (čas přibližně 0,308 s) velikostí odpovídají teoreticky získané rychlosti (obr. 6.4).

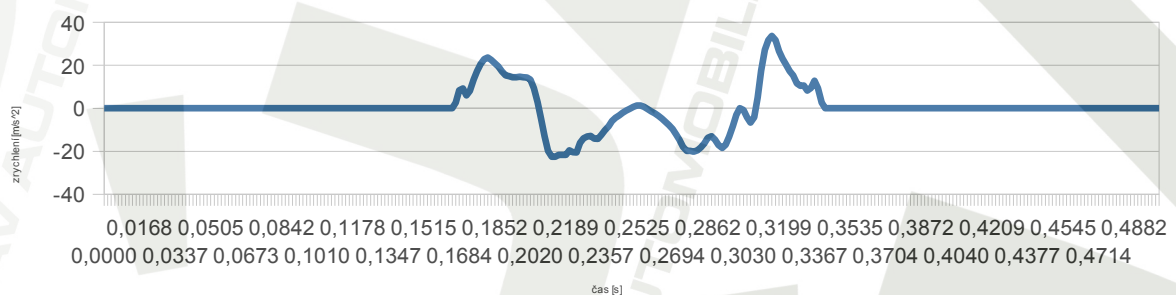


6.3, Skutečný průběh rychlosti kladičkového zdvihátka konkávní vačky

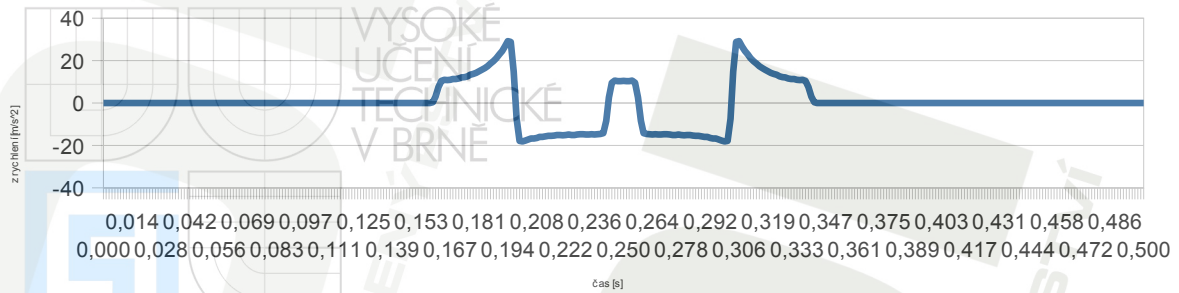


6.4, Teoretický průběh rychlosti kladičkového zdvihátka konkávní vačky

Grafický průběh skutečného zrychlení (obr. 6.5) je zatížen chybami jak samotného postupu měření a transformace získané křivky do diskretních hodnot, tak chybou dvojité numerické derivace. Je tedy jen přibližný. Ovšem na první pohled vykazuje špičky na počátku a na konci zdvihu (časy 0,181 s a 1,317 s) a v jeho prostředku (čas 0,250 s) podobně jako závislost teoretická (obr. 6.6). V oblasti maximálního zdvihu je špička podstatně menší hodnoty, než v případě teoretického průběhu právě z důvodu nepřítomnosti propadu skutečné zdvihové křivky a tedy takřka nulové změny rychlosti v čase. Maximální hodnoty kladného i záporného zrychlení se též v obou případech víceméně shodují.

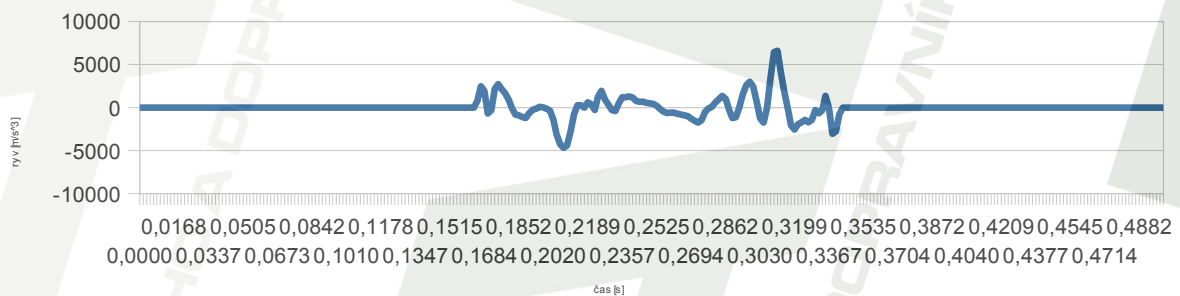


6.5, Skutečný průběh zrychlení kladičkového zdvihátka konkávní vačky

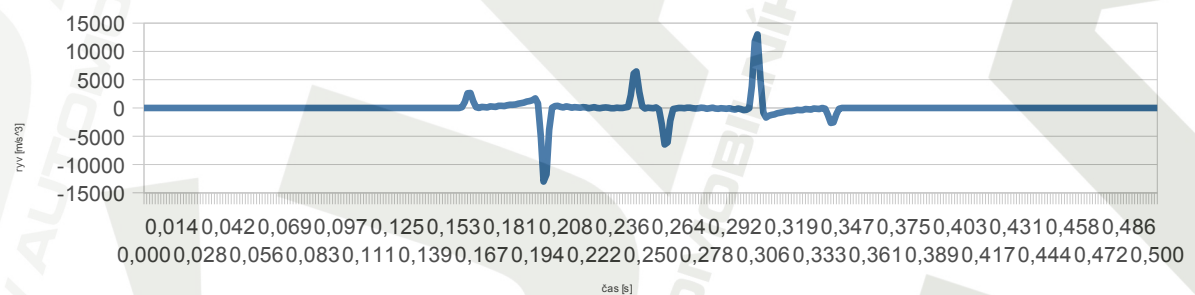


6.6, Teoretický průběh zrychlení kladičkového zdvihátka konkávní vačky

Průběhu velikosti ryvu v čase je s ohledem na již zmíněné chyby bez výrazné vypovídací hodnoty. Na skutečném průběhu ryvu (obr. 6.7) jsou patrné shody se špičkami teoretické závislosti (obr. 6.8) v časech přibližně 0,207 s a 0,310 s. Poloměr kladičky (12,7 mm) je větší, než nejmenší konvexní poloměry vačky (14,3 mm) a použitá kombinace kladičky s vačkou tedy nesplňuje jednu z podmínek předejití podřezání profilu.



6.7, Skutečný průběh ryvu kladičkového zdvihátka konkávní vačky

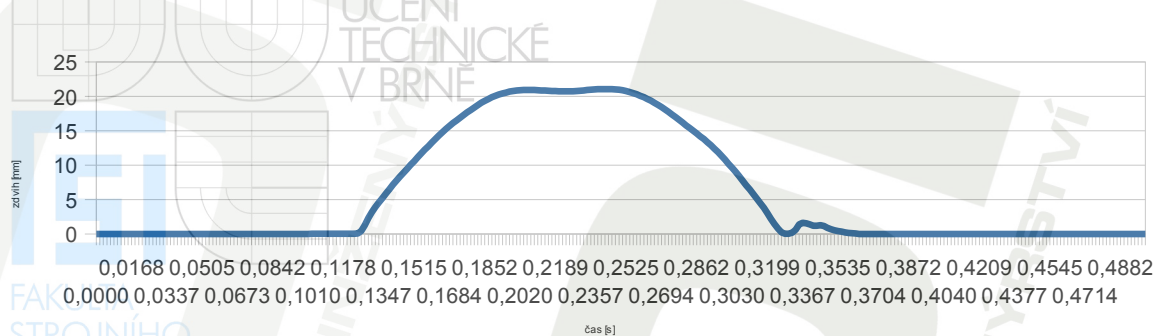


6.8, Teoretický průběh ryvu kladičkového zdvihátka konkávní vačky

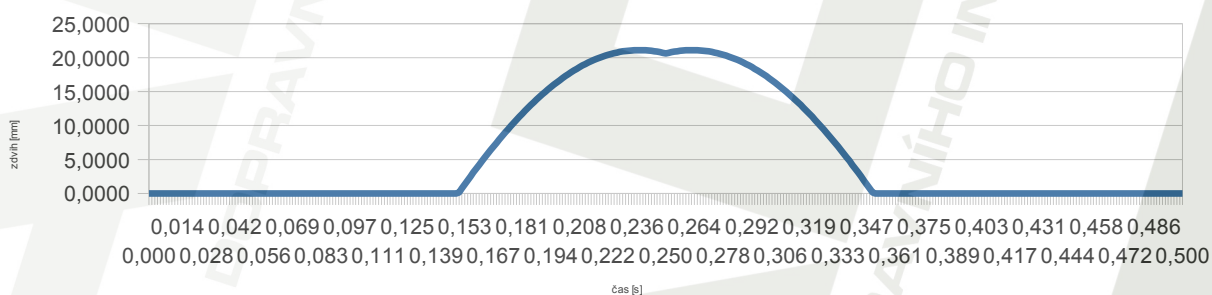
6.1.2 Konkávní vačka s plochým zdvihátkem

Reálný průběh zdvihu (obr. 6.9) opět přibližně odpovídá teoreticky sestavenému (obr. 6.10). Maximální hodnoty jsou v přibližné shodě. Propad vprostřed cyklu je méně znatelný oproti teoretickému, opět z důvodu nedostatečné přítlačné síly pružiny. Za povšimnutí stojí především “poskočení” zdvihátka na konci zdvihu (v čase přibližně 0,330 s). To je způsobeno zaprvé velkým rázem poté, co ploché zdvihátko “překlene” konkávní poloměr vačky a

zadruhé zmíněnou nedostatečnou tuhostí pružiny. Tento jev je důkazem nevhodnosti použití plochých zdvihátek v součinnosti s vačkami o negativním poloměru křivosti. Dochází zde ke zjevnému podřezání profilu vačky.

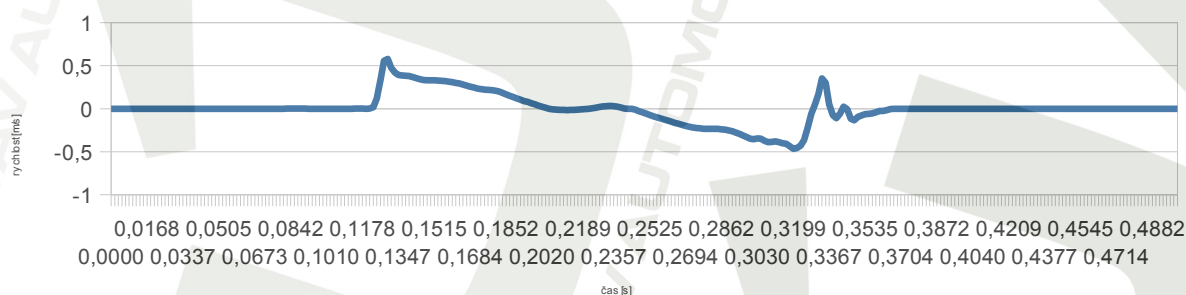


6.9, Skutečný průběh zdvihu plochého zdvihátka konkávní vačky

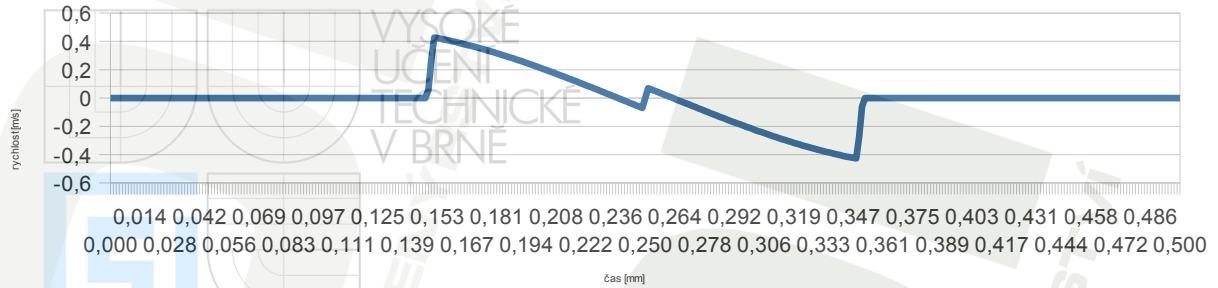


6.10, Teoretický průběh zdvihu plochého zdvihátka konkávní vačky

V průběhu skutečné rychlosti (obr. 6.11) jsou zřetelné špičky v časech okolo 0,152 s a 0,320 s, které odpovídají teoretickým (obr. 6.12). Prudký dopad zdvihátka na nulovou hodnotu zdvihu v čase okolo 0,320 s a následné poskočení způsobuje oproti teoreticky získanému průběhu velmi znatelný překmit rychlosti do kladných hodnot a krátkou fluktuaci. S tím souvisí i kolísavý průběh zrychlení (obr. 6.13) v této oblasti. Graf skutečného zrychlení však především podobně jako v případě kladičkového zdvihátka postrádá výraznou špičkovou hodnotu v čase 0,250 s, protože rychlost zdvihátka vprostřed cyklu je navzdory teoretickým hodnotám (obr. 6.14) relativně neměnná.

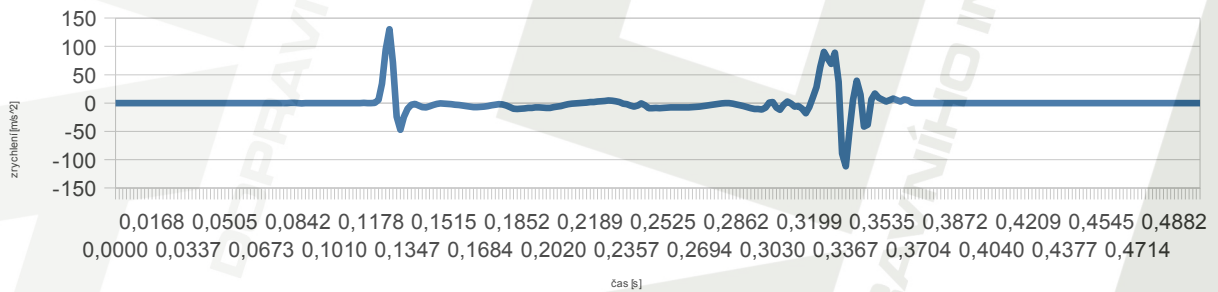


6.11, Skutečný průběh rychlosti plochého zdvihátka konkávní vačky

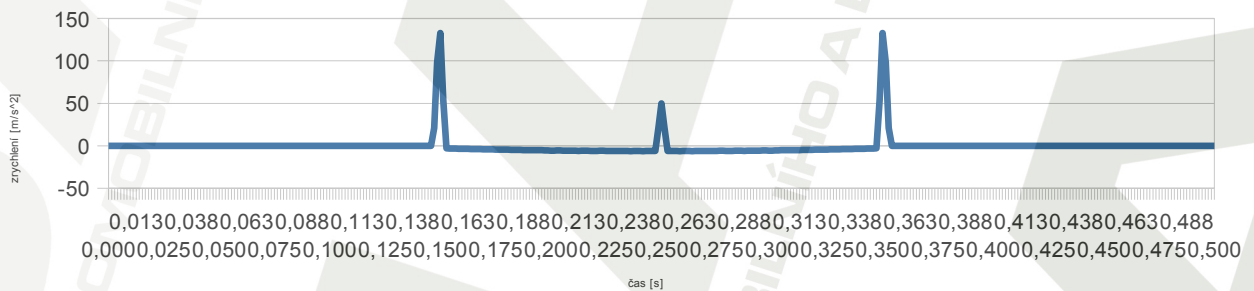


6.12, Teoretický průběh rychlosti plochého zdvihátka konkávní vačky

Špička zrychlení na počátku zdvihu (čas přibližně 0,125 s) má srovnatelnou hodnotu s teoretickým zrychlením v tomto okamžiku.

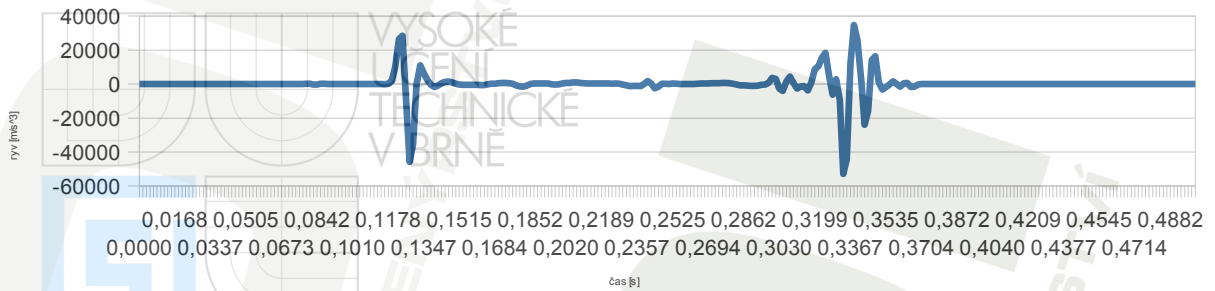


6.13, Skutečný průběh zrychlení plochého zdvihátka konkávní vačky

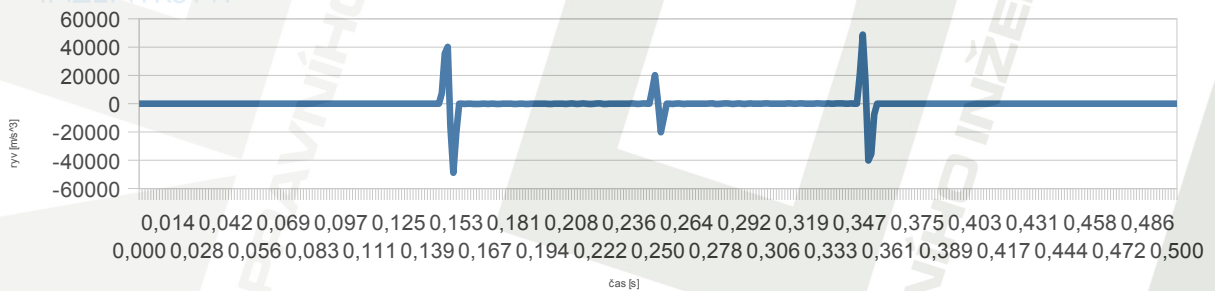


6.14, Teoretický průběh rychlosti plochého zdvihátka konkávní vačky

Grafická interpretace ryvu v čase je z výše zmíněných důvodů spíše symbolická. V jeho skutečném průběhu (obr. 6.15) chybí orpoti teoretickému (obr. 6.16) špička vprostřed zdvihu a to ze zmiňovaných důvodů - delší setrvání zdvihátka v horní poloze a proto méně patrná změna rychlosti, potažmo zrychlení v tomto okamžiku. Hodnoty ryvu na konci zdvihu vzhledem ke kolísajícímu zrychlení zřetelně fluktuují.



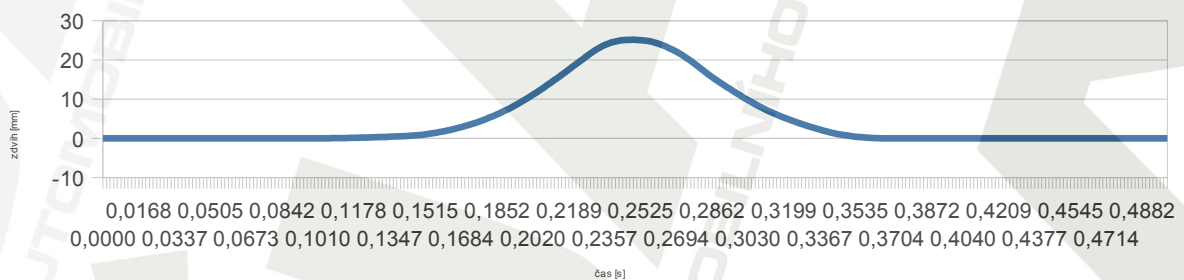
6.15, Skutečný průběh ryvu plochého zdvihátka konkávní vačky



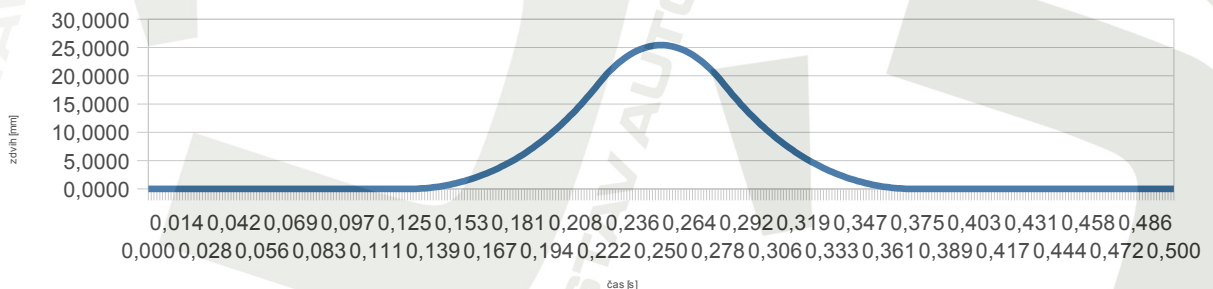
6.16, Teoretický průběh ryvu plochého zdvihátka konkávní vačky

6.1.3 Vačka s kruhovým bokem č. 1 s kladičkovým zdvihátkem

Skutečný (obr. 6.17) i teoretický (obr. 6.18) zdvih zdvihátka se relativně shodují, maximální hodnota je stejně tak odpovídající. Tato a všechny následující vačky jsou tvarově jednodušší, než vačka konkávní, proto zdvih ani rychlost se v zásadě neodlišují.

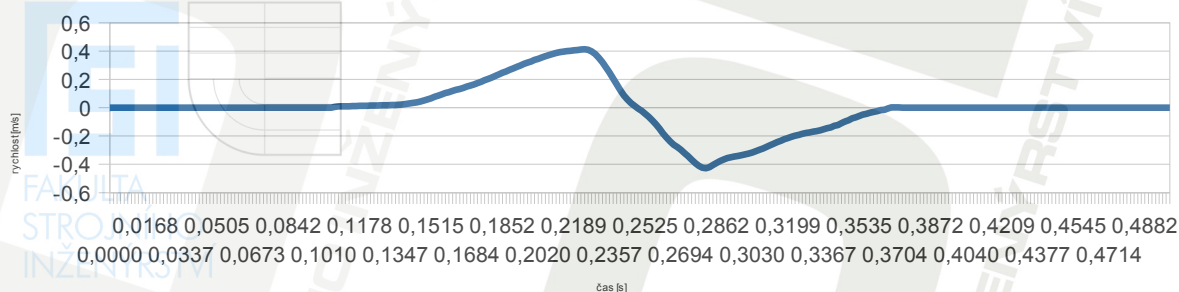


6.17, Skutečný průběh zdvihu kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1

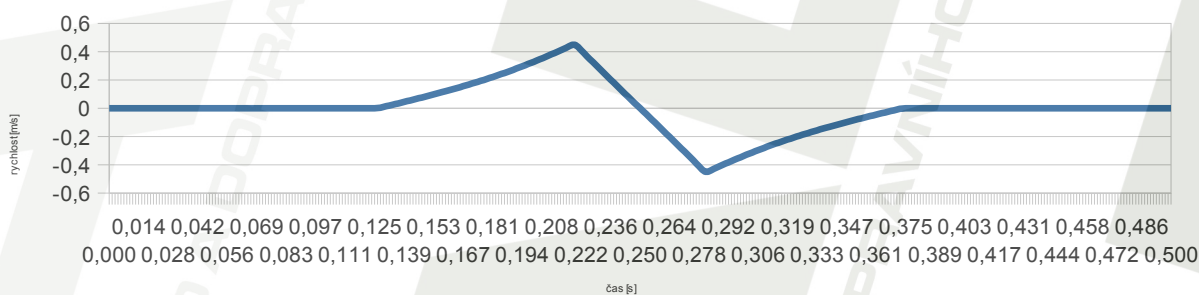


6.18, Teoretický průběh zdvihu kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1

V zádadě obdobné jsou i průběhy skutečné a teoretické rychlostí (obr. 6.19 a 6.20). Vprostřed zdvihu je však opětovně zřejmý krátkodobě menší sklon křivky. Ten indikuje krátké prodlení rychlosti v okolí nulové hodnoty. Toto je nesporným důkazem neschopnosti pružiny udržet kladičku v dokonalém kontaktu s profilem vačky v okamžiku obratu směru jeho pohybu.

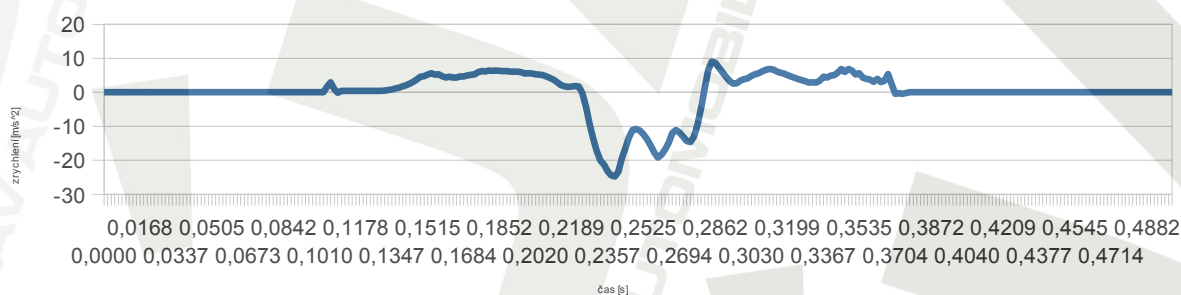


6.19, Skutečný průběh rychlosti kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1

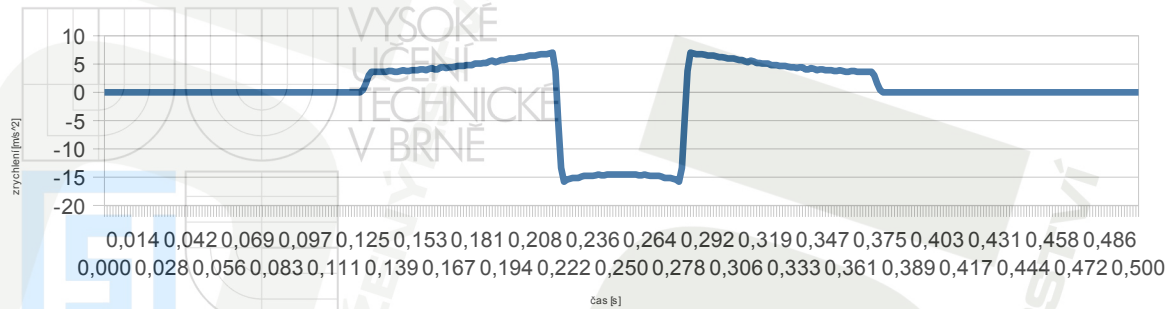


6.20, Teoretický průběh rychlosti kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1

Graf skutečného zrychlení (obr. 6.21) odpovídá teoretickému (obr. 6.21) jen velmi přibližně. Maximální hodnota skutečného zrychlení je v čase přibližně 0,285 s přibližně odpovídající teoretickému. Nárůsty zrychlení nejsou tak příkré právě proto, že změny rychlosti ve skutečnosti neprobíhají zcela skokově.

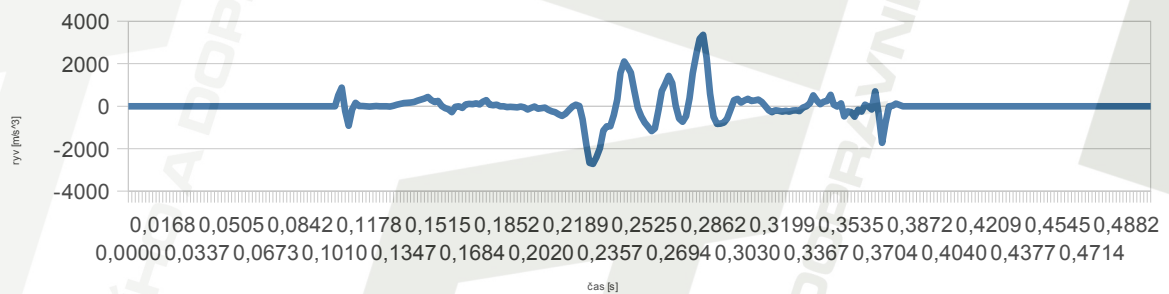


6.21, Skutečný průběh zrychlení kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1

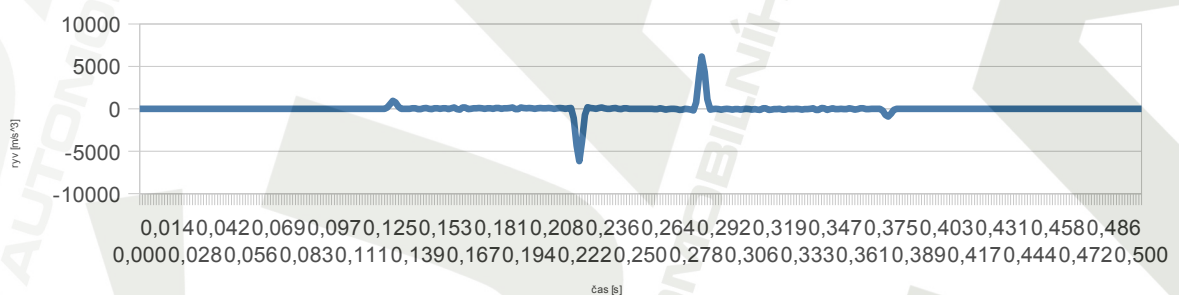


6.22, Teoretický průběh zrychlení kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1

Průběh skutečného ryvu (obr. 6.23) je už od teoretického (obr. 6.24) v podstatě zcela rozdílný. Výskyt nejvýraznějších špiček v časech okolo 0,219 s a 0,285 s se shoduje s teoreticky získanými, jejich hodnoty jsou však poloviční. To je právě následkem absence ostrých lokálních maxim v průbězích skutečné rychlosti, resp. zrychlení. Poloměr špičky vačky (12,7 mm) je menší, než poloměr kladičky (14,3 mm) a použitá konfigurace vačky a kladičky nevyhovuje podmínce na podřezání.



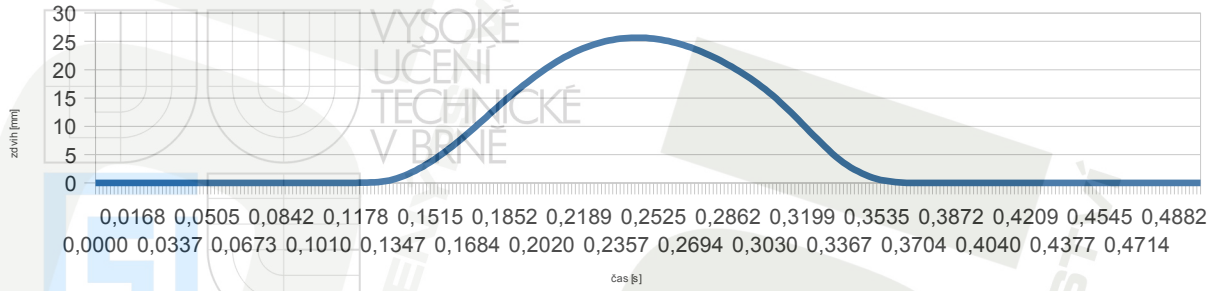
6.23, Skutečný průběh ryvu kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1



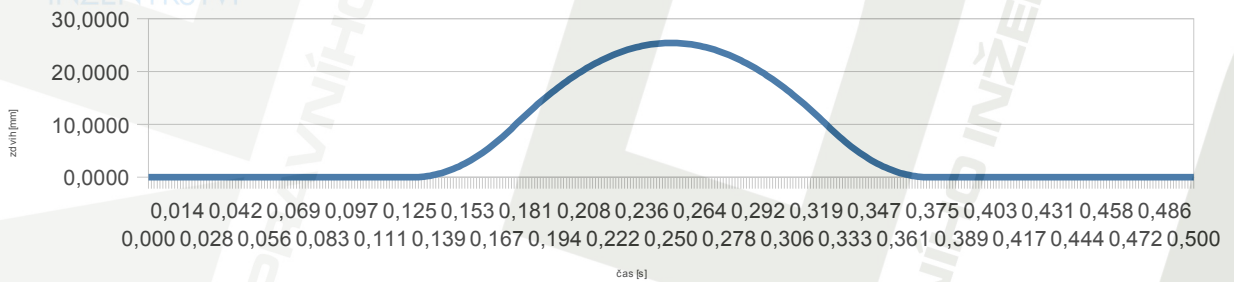
6.24, Teoretický průběh ryvu kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1

6.1.4 Vačka s kruhovým bokem č. 1 s plochým zdvihátkem

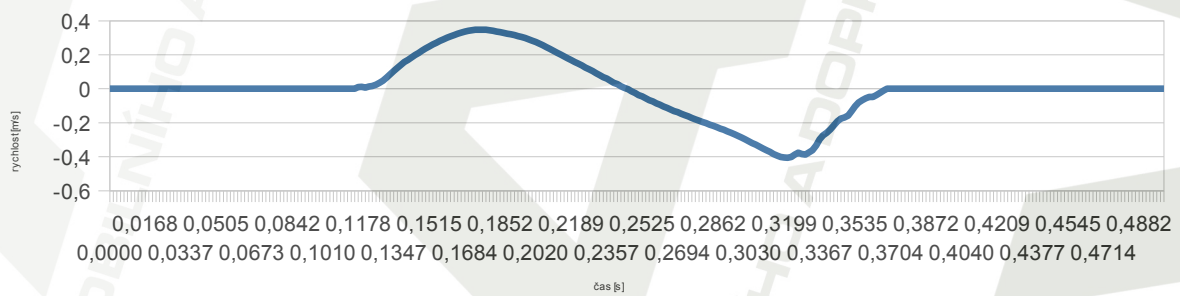
Odměřený zdvih (obr. 6.25) svým průběhem odpovídá teoreticky získanému (obr. 6.26) a stejně tak mají poměrně shodný průběh i rychlosti (obr. 6.27 a 6.28). Maximální kladná i záporná hodnota skutečné rychlosti (časy okolo 0,174 s a 0,320 s) jsou ve shodě s předpokladem. V oblasti poklesu není průběh rychlosti zcela hladkou křivkou pravděpodobně z důvodu možných kmitů přítlačné pružiny.



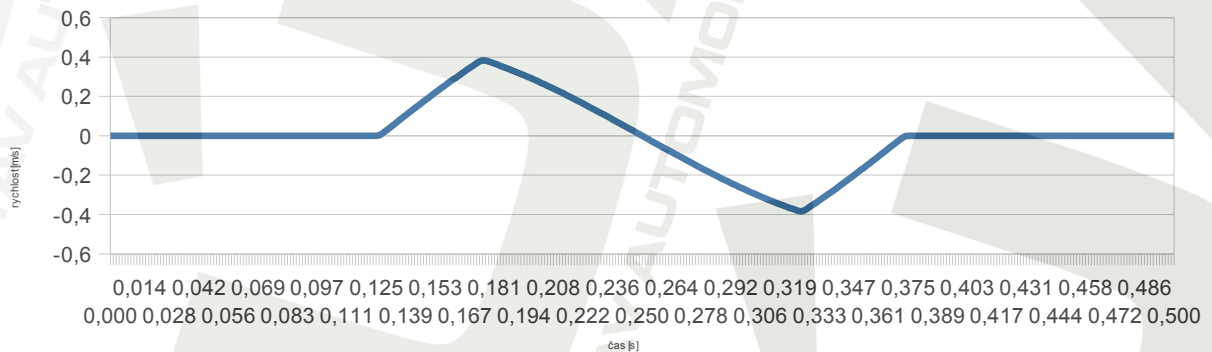
6.25, Skutečný průběh zdvihu plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1



6.26, Teoretický průběh zdvihu plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1

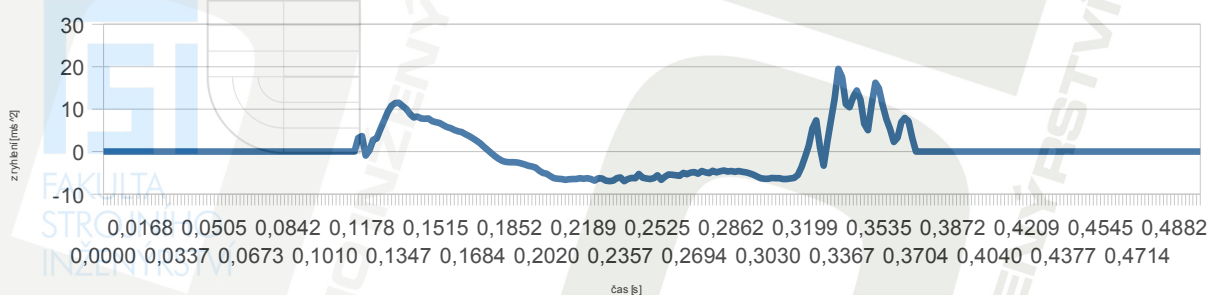


6.27, Skutečný průběh rychlosti plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1

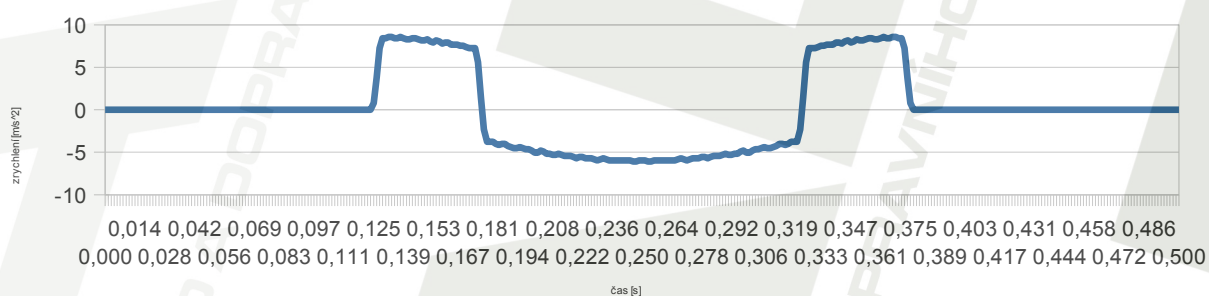


6.28, Teoretický průběh rychlosti plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1

Skutečné zrychlení se teoretickému v zásadě nepodobá. Přechody v jeho průběhu nejsou tak ostré z důvodu plynulejších změn rychlosti. Skutečné zrychlení zdvihátka (obr. 6.29) vykazuje místní maximum okolo času 0,134 s shodně s teoretickým průběhem (obr. 6.30). Výrazné skoky ve zrychlení na konci zdvihu jsou následkem nerovnoměrností rychlosti v této oblasti.

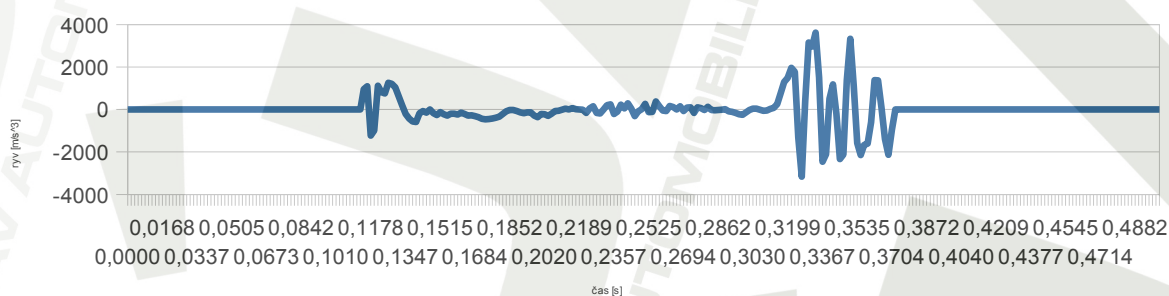


6.29, Skutečný průběh zrychlení plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1

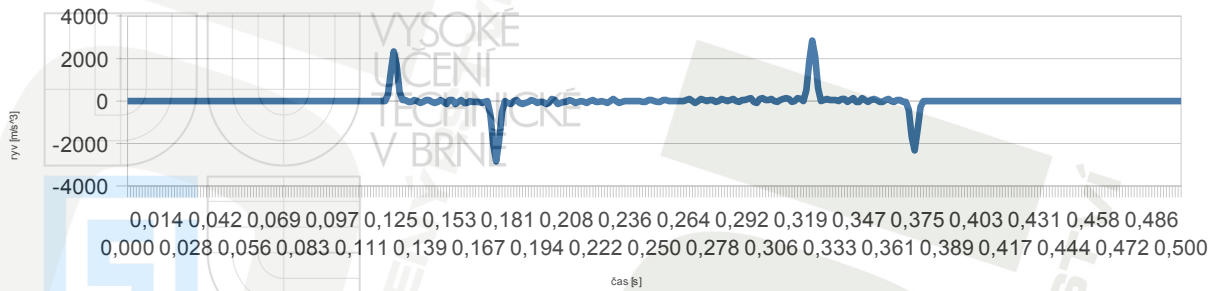


6.30, Teoretický průběh zrychlení plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1

Průběh skutečného ryvu (obr. 6.31) pak opět neodpovídá teoreticky předpokládanému (obr. 6.32). Jeho výrazná fluktuace ve zmiňovaném pásmu je pak jen následkem výkyvů ve zrychlení.



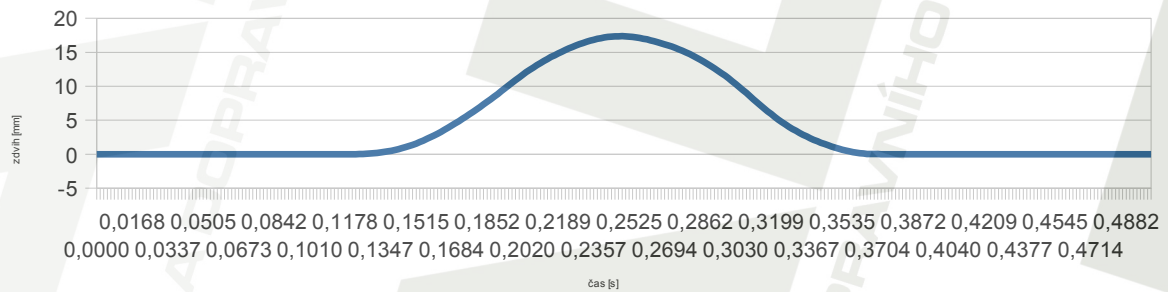
6.31, Skutečný průběh ryvu plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1



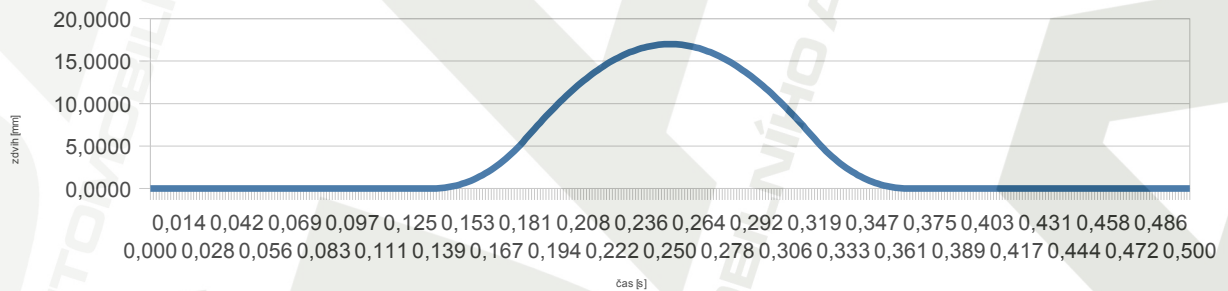
6.32. Teoretický průběh ryvu plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1

6.1.5 Vačka s kruhovým bokem č. 2 s kladičkovým zdvihátkem

Průběhy teoretického i skutečného zdvihu (obr. 6.33 a 6.34) jsou vesměs podobné, s maximem na přibližně stejné hodnotě.

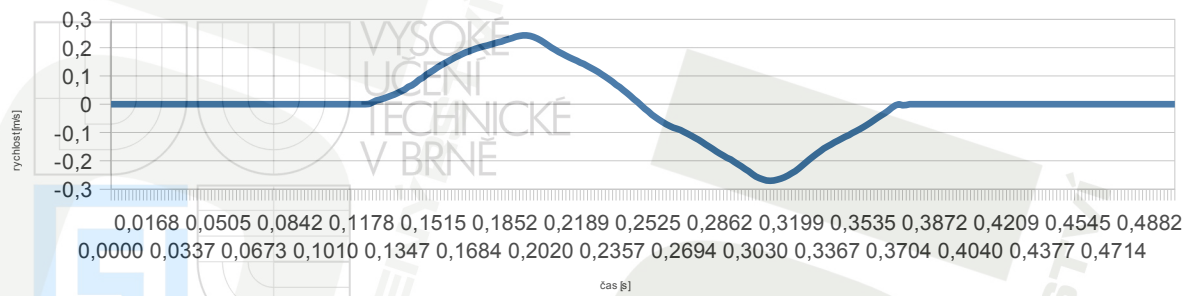


6.33. Skutečný průběh zdvihu kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2

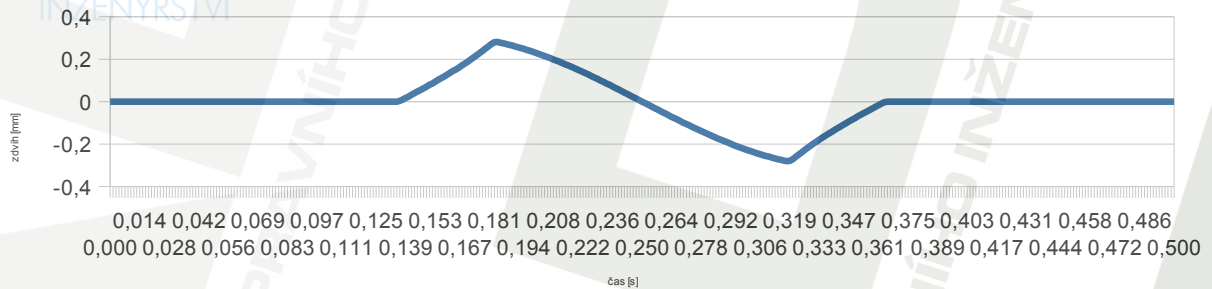


6.34. Teoretický průběh zdvihu kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2

Průběh skutečné rychlosti (obr. 6.35) má maxima o přibližně stejných hodnotách jako průběh získaný na základě teoretické zdvihové závislosti (obr. 6.36). Kladné okolo času 0,195 s a záporné okolo 0,310 s

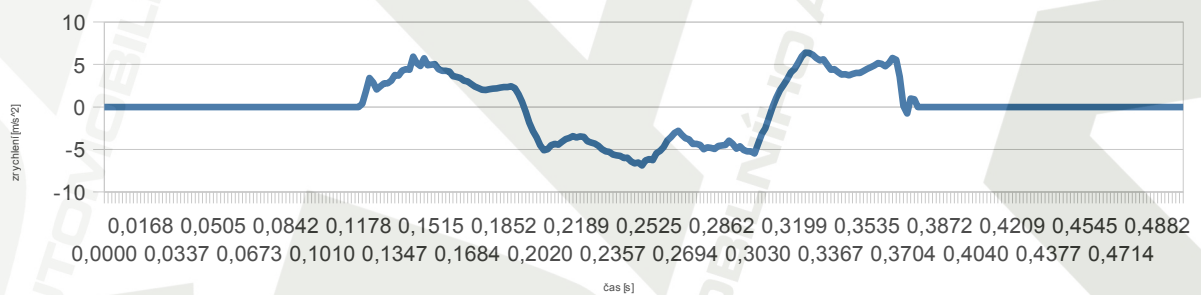


6.35, Skutečný průběh rychlosti kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2

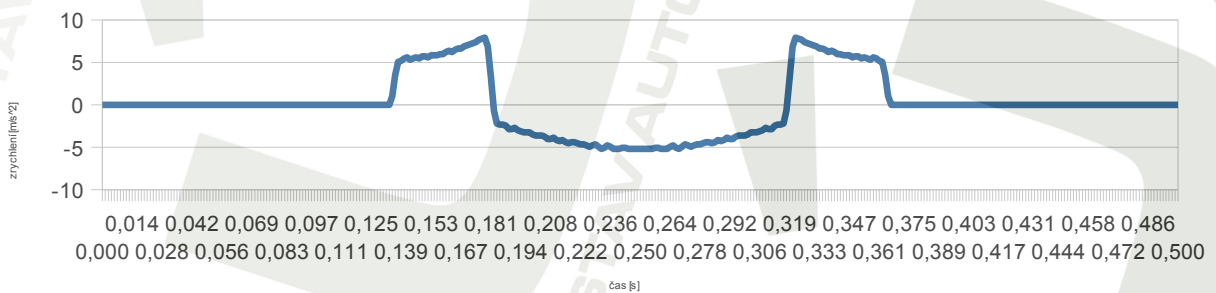


6.36, Teoretický průběh rychlosti kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2

Graf skutečného zrychlení zdvihátka (obr. 6.37) projevuje značné ostré výkyvy a teoretickému předpokladu (obr. 6.38) se přibližuje jen zhruba. Jeho celková nestálost byla připsána mnohokrát zmiňovaným chybovým faktorům. Zrchnění skutečné má maximální hodnoty mírně nižší, než jeho teoretický průběh. To je opětovně zapříčiněno pozvolnějším růstem křivky rychlosti.

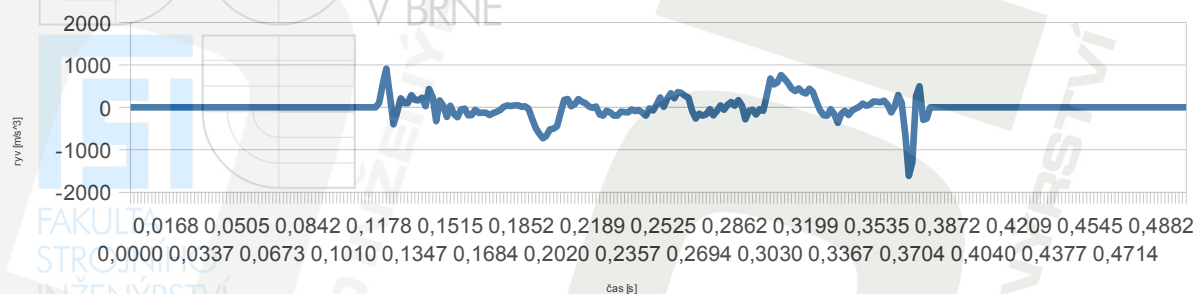


6.37, Skutečný průběh zrychlení kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2

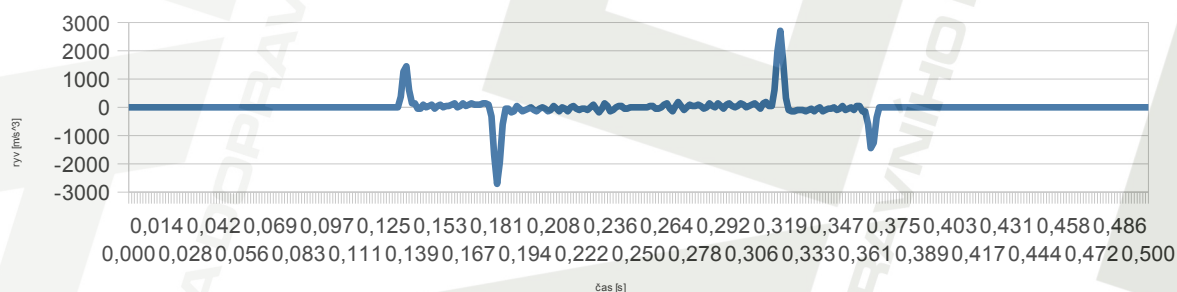


6.38, Teoretický průběh zrychlení kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2

Průběh skutečného ryvu (obr. 6.39) pak opět z výše uvedených důvodů není v přílišné shodě s teoretickým předpokladem (obr. 6.40). Poloměr špičky vačky je stejný jako v u první vačky s kruhovým bokem a podmínka podřezání zde stejně tak není plněna.



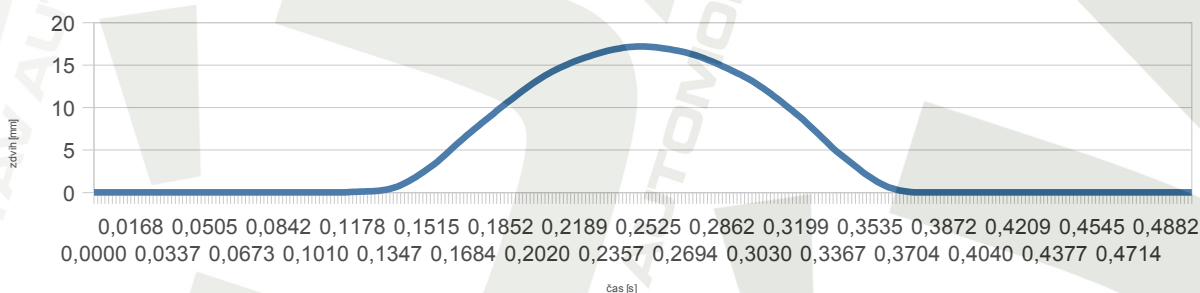
6.39, Skutečný průběh ryvu kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2



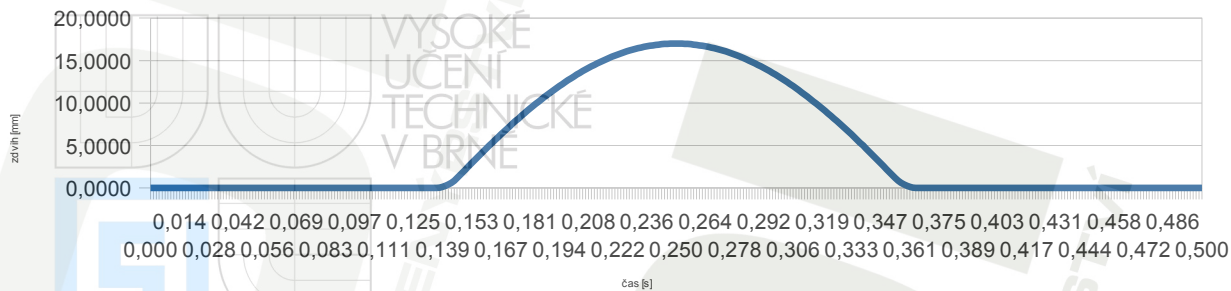
6.40, Teoretický průběh ryvu kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2

6.1.6 Vačka s kruhovým bokem č. 2 s plochým zdvihátkem

Chování kinematických veličin obou vaček s kruhovými boky je vzhledem k jejich podobným profilům podle očekávání relativně obdobné. Reálný zdvih (obr. 6.41) má oproti teoretickému (obr. 6.42) pozvolnější náběh a doběh. To lze připisovat nedokonalé tuhosti mechanismu, která prudký nástup resp. doběh eliminuje. Pozvolnější průběh skutečného zdvihu oproti předpokladu je patrným důvodem menší strmosti křivek rychlosti v oblastech boků vačky.

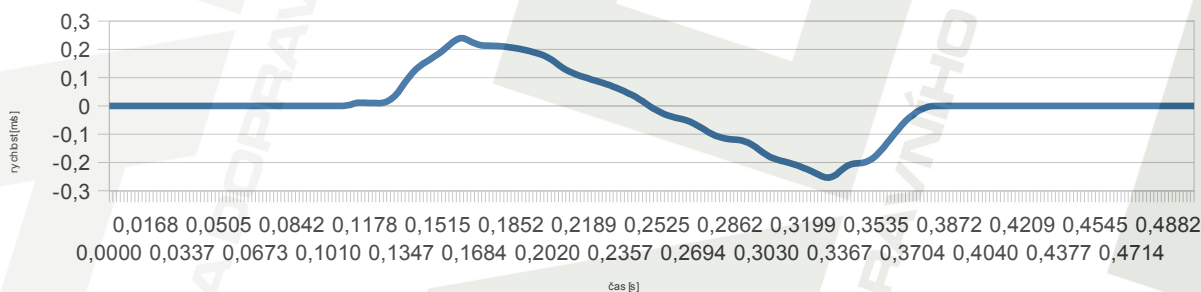


6.41, skutečný průběh zdvihu plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2

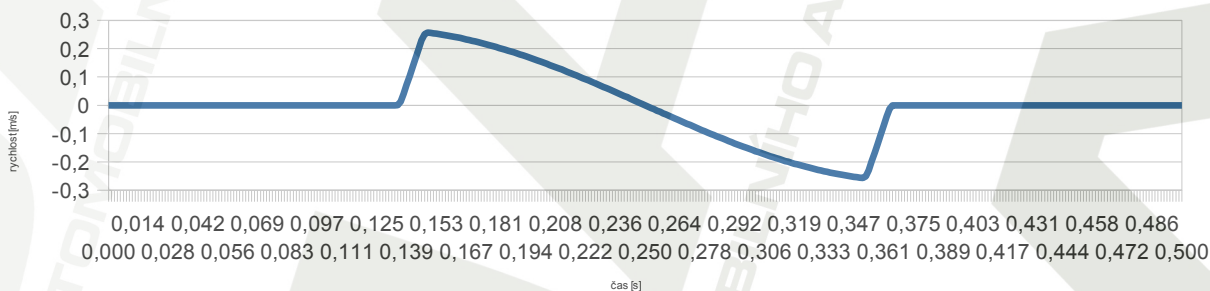


6.42, Teoretický průběh zdvihu plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2

Kladné maximum skutečné rychlosti (obr. 6.43) je v okolí času 0,162 s, jeho velikost je o něco nižší, než v případě rychlosti teoretické (obr. 6.44). Lokální extrém negativní rychlosti v čase 0,330 s přibližně odpovídá předpokladu.

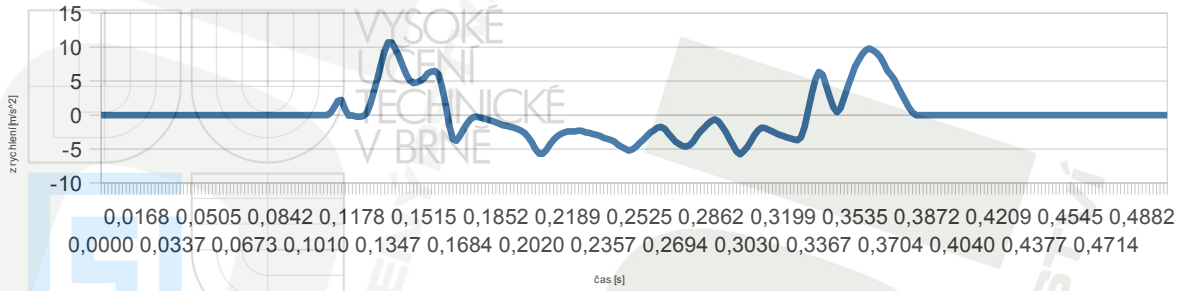


6.43, Skutečný průběh rychlosti plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2



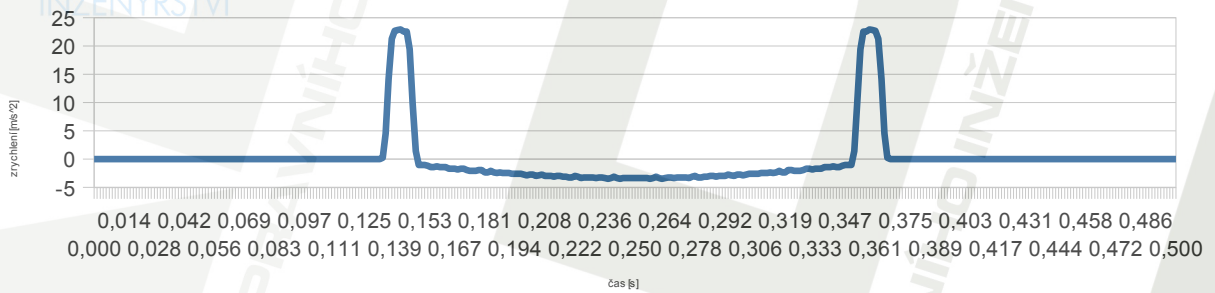
6.44, Teoretický průběh rychlosti plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2

Vzhledem k souhrnně “neklidnému” fluktuujícímu průběhu rychlosti zdvihátka je křivka skutečného zrychlení (obr. 6.45) velmi kolísavá. Její nejvýraznější špičkové hodnoty (okolí časů 0,134 s 0,306 s) svojí polohou odpovídají teoretickým (obr. 6.46), jejich hodnota je však z důvodu méně strmých křivek rychlostí podstatně nižší (přibližně poloviční).



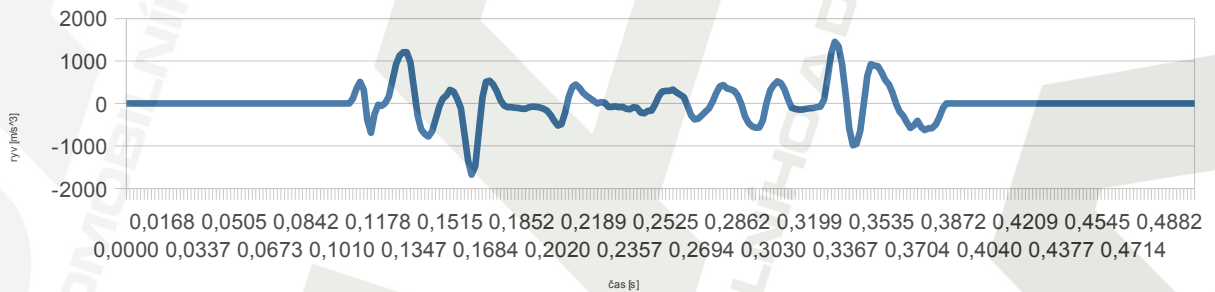
V

6.45, Skutečný průběh zrychlení plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2

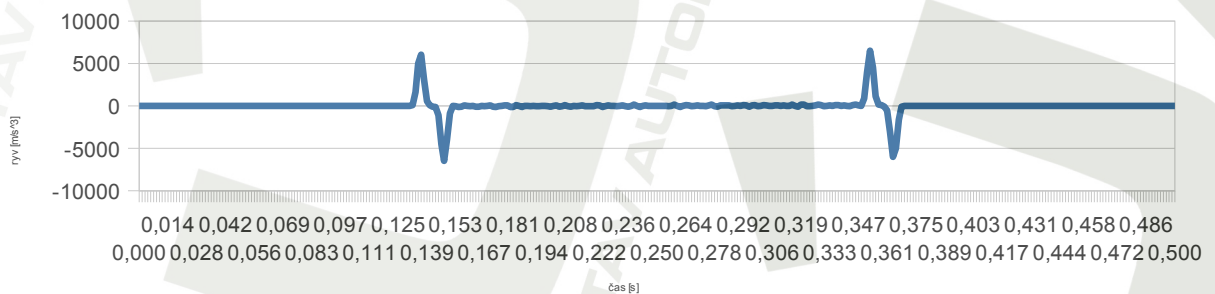


6.46, Teoretický průběh zrychlení plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2

Křivka průběhu skutečného ryvu (obr. 6.47) nemá v podstatě žádnou podobnost s teoretickým předpokladem (obr. 6.48).



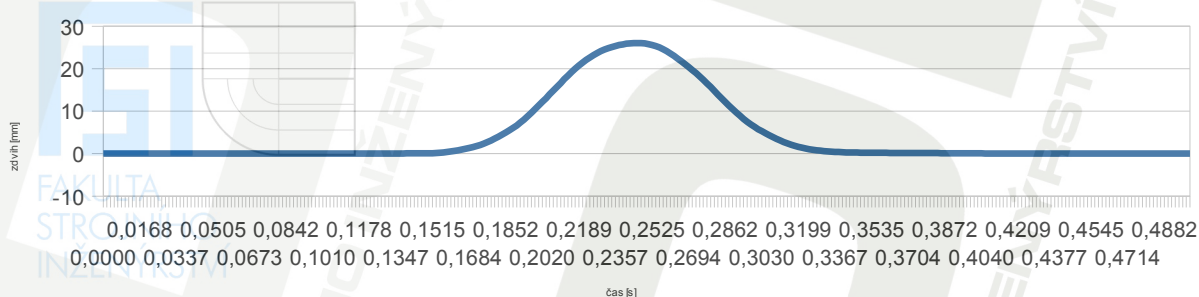
6.47, Skutečný průběh ryvu plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2



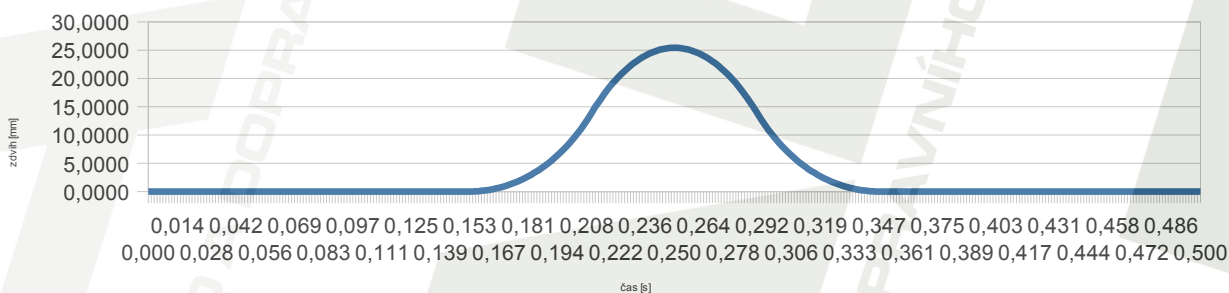
6.48, Teoretický průběh ryvu plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2

6.1.7 Tečná vačka s kladičkovým zdvihátkem

Tečná vačka je svým tvarem podobná vačce s kruhovým bokem č. 1. Podobné je i chování teoreticky získaných kinematických veličin obou vaček. Skutečný zdvih tečné vačky s kladičkovým zdvihátkem (obr. 6.49) je ve shodě s teoreticky sestrojeným (6.50).

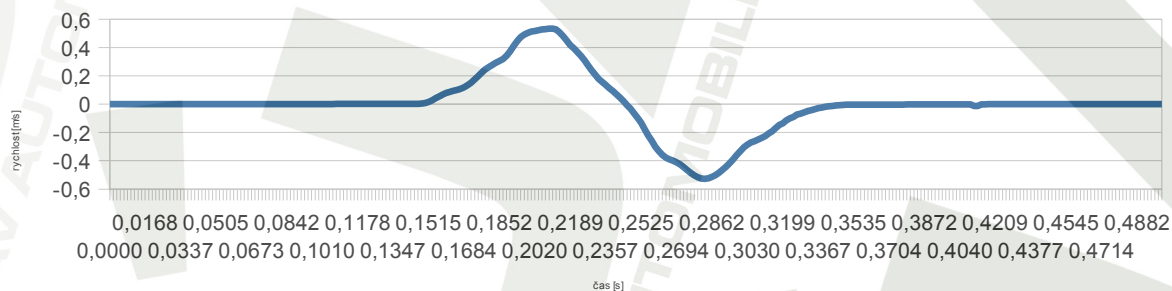


6.49, Skutečný průběh zdvihu kladičkového zdvihátka tečné vačky

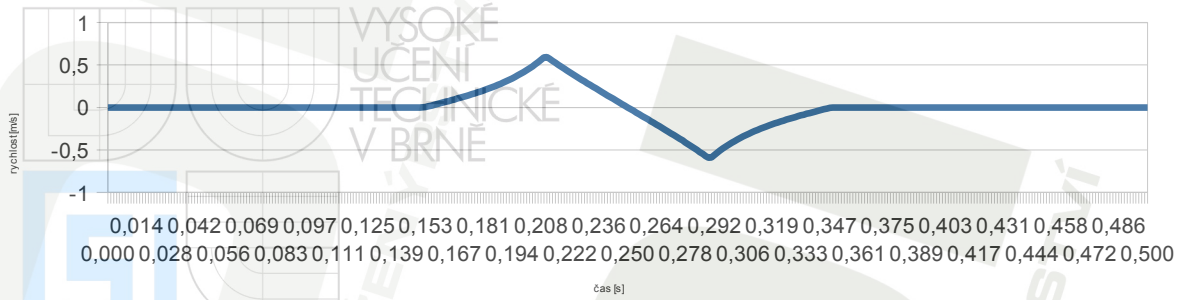


6.50, Teoretický průběh zdvihu kladičkového zdvihátka tečné vačky

Skutečná rychlost (obr. 6.51) na rozdíl od teoretické (6.52) nedisponuje natolik ostrými lokálními extrémy a její kladné i záporné maximum (časy v okolí 0,207 s a 0,282 s) je proto o něco nižší.

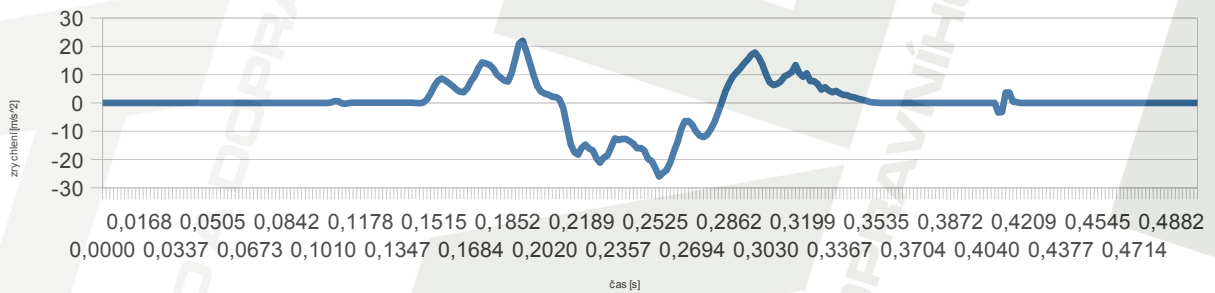


6.51, Skutečný průběh rychlosti kladičkového zdvihátka tečné vačky

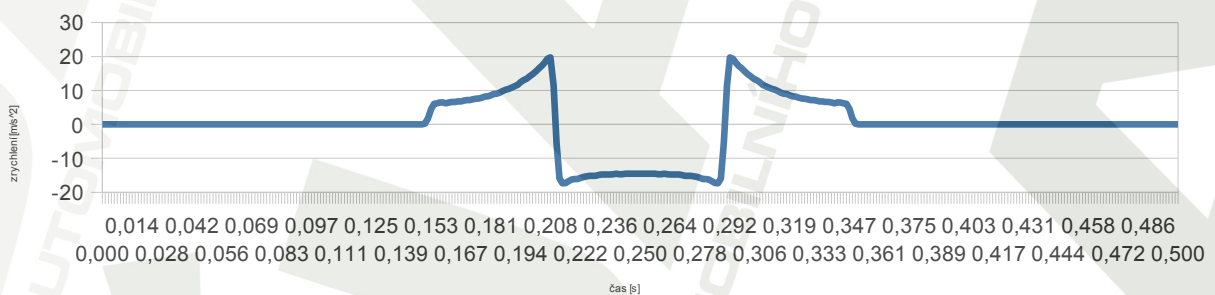


6.52, Teoretický průběh rychlosti kladičkového zdvihátka tečné vačky

Poloha i velikost globálních extrémů skutečného zrychlení (obr. 6.53) je ve shodě s teoretickým průběhem (obr. 6.54), celkově graf vlivem zmiňovaných chyb opět velmi znatelně kolísá. Nejvyšších hodnot dosahuje skutečné zrychlení v těsném okolí časů 0,175 s 0,297 s.

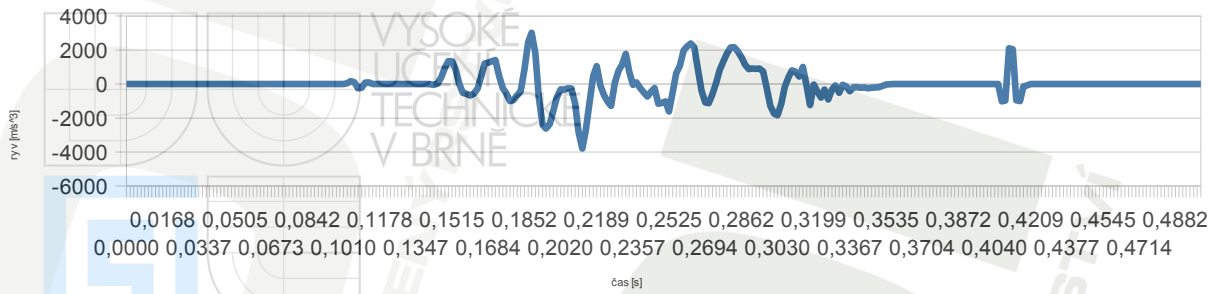


6.53, Skutečný průběh zrychlení kladičkového zdvihátka tečné vačky

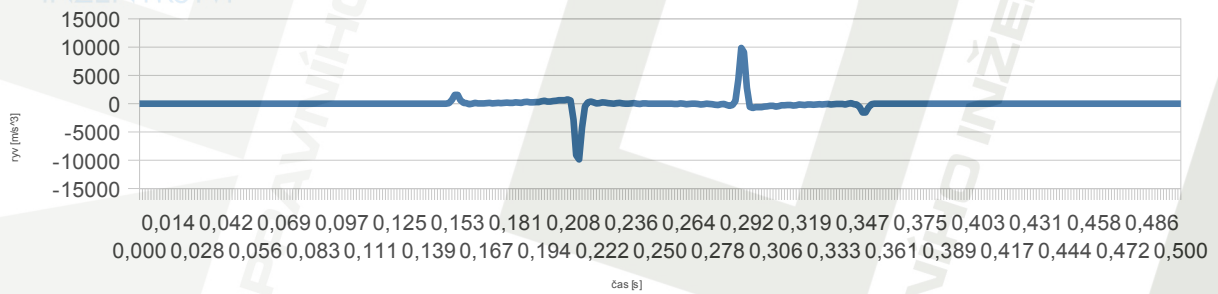


6.54, Teoretický průběh zrychlení kladičkového zdvihátka tečné vačky

Grafická interpretace ryvu má v tomto případě spíše symbolický charakter. Vzhledem k rozkolísanému průběhu zrychlení průběh skutečného ryvu (obr. 6.55) významně osciluje a s teoretickou závislostí (obr. 6.56) se v podstatě neshoduje.



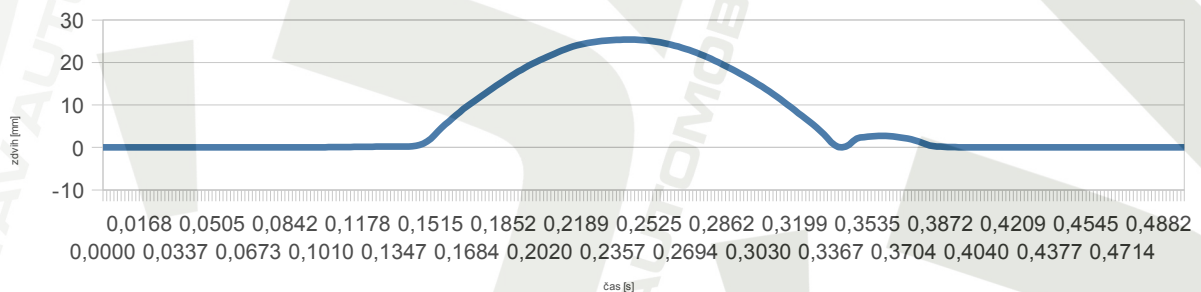
6.55, Skutečný průběh ryvu kladičkového zdvihátka tečné vačky



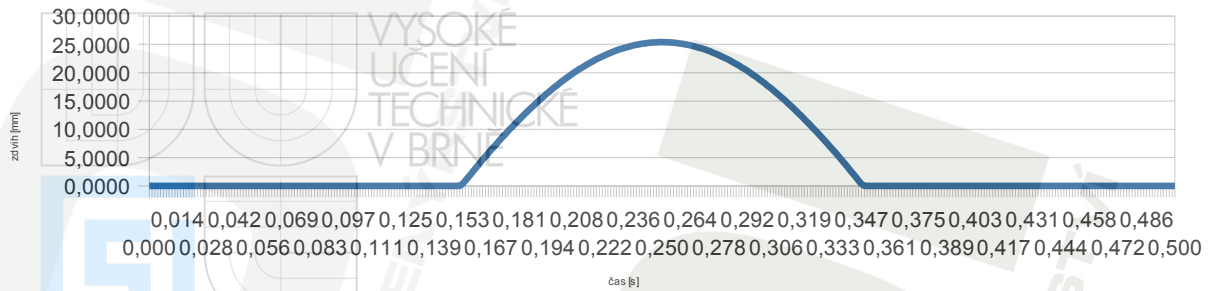
6.56, Teoretický průběh ryvu kladičkového zdvihátka tečné vačky

6.1.8 Tečná vačka s plochým zdvihátkem

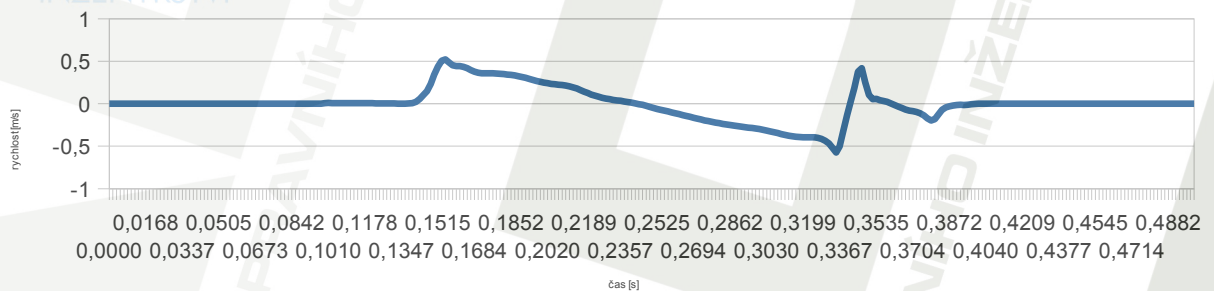
Měřená zdvihová závislost (obr. 6.57) opět vykazuje mírnější nástup a doběh, než teoretická (obr. 6.58) pravděpodobně kvůli nedokonalé tuhosti zařízení. Především podobně jako v případě součinnosti plochého zdvihátka s konkávní vačkou se na konci zdvihu nachází výrazné “poskočení” zdvihátka v čase 0,341 s. To je následkem velkého rázu při dopadu zdvihátka na nejmenší poloměr vačky a nedostatečnou tuhostí pružiny. Tento skok má za následek výrazný překmit křivky skutečné rychlosti v tomto pásmu (obr. 6.59). Maximální hodnota kladné rychlosti v čase 0,154 s odpovídá teoretickému předpokladu (obr. 6.60) stejně tak, jako její maximální záporná velikost v čase 0,335 s. Další kladná špička, nacházející se v čase 0,346 s, je důsledkem překmitu rychlosti vlivem poskočení zdvihátka.



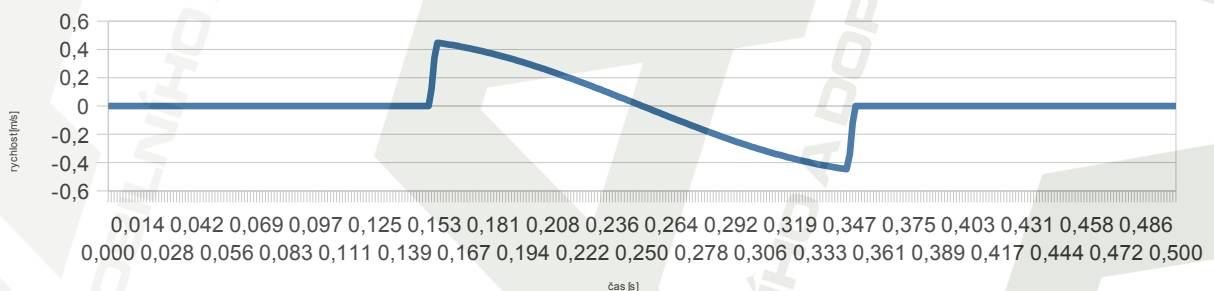
6.57, Skutečný průběh zdvihu plochého zdvihátka tečné vačky



6.58, Teoretický průběh zdvihu plochého zdvihátka tečné vačky

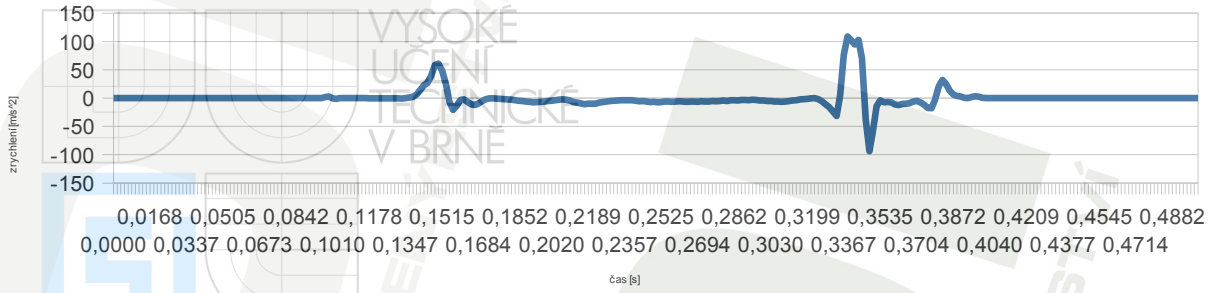


6.59, Skutečný průběh rychlosti plochého zdvihátka tečné vačky

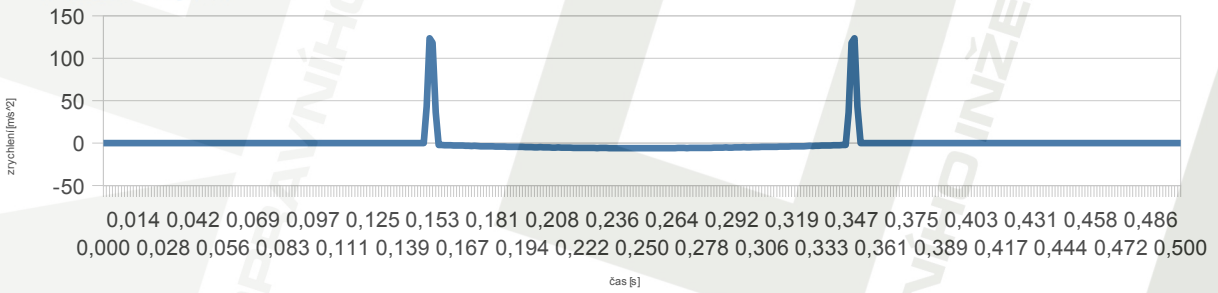


6.60, Teoretický průběh rychlosti plochého zdvihátka tečné vačky

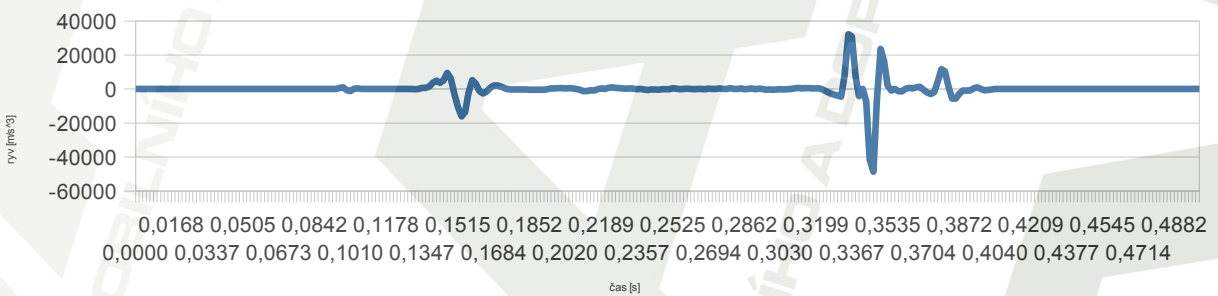
Výkyvy v křivce skutečného zrychlení (obr. 6.61) v časech 0,149 s a 0,340 s nejsou tak významné jako v případě jejich teoretických průběhů (obr. 6.62), protože křivka skutečné rychlosti je v obou příslušných pásmech méně strmá. Zrychlení na konci zdvihu fluktuuje rovněž následkem poskočení zdvihátka při návratu na nulovou hodnotu zdvihu. Podobně i graf skutečného ryvu (obr. 6.63), který pak celkově dosahuje zřetelně nižších maximálních hodnot než-li teoretický (obr. 6.64) díky méně strmému průběhu zrychlení. Přestože při použití tečné vačky nedochází k podřezání profilu, způsobuje prudký přechod vačky do záběru resp. dopad zdvihátka na menší poloměr výrazný ráz.



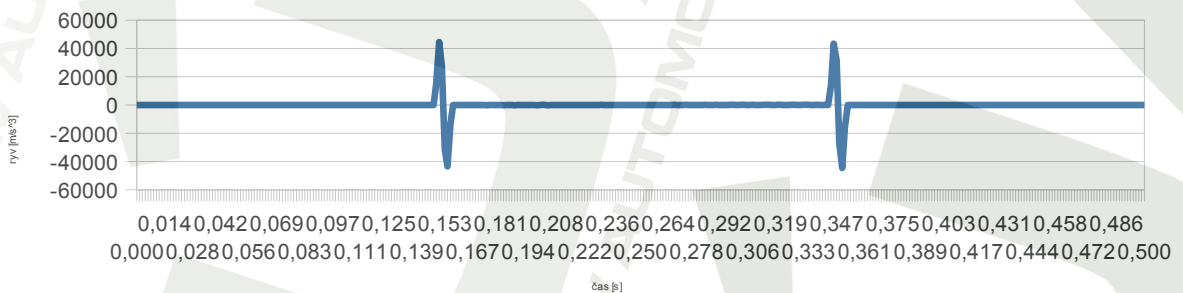
6.61, Skutečný průběh zrychlení plochého zdvihátka tečné vačky



6.62, Teoretický průběh zrychlení plochého zdvihátka tečné vačky



6.63, Skutečný průběh ryvu plochého zdvihátka tečné vačky



6.64, Teoretický průběh ryvu plochého zdvihátka tečné vačky

6.2 Shrnutí

Skutečné zdvihové závislosti potvrzují tendenci zdvihátka na okamžik setrvat v horní poloze vlivem nedostatečné tuhosti přítlačné pružiny. To se projevuje nepatrným prodlením křivky rychlosti v okolí nulové hodnoty v tomto pásmu. Obecně nicméně grafické průběhy skutečných rychlostí zdvihátek v čase poměrně odpovídají teoreticky získaným. Absenci ostrých lokálních maxim lze připisovat zmíněné nedokonalé tuhosti mechanismu i záznamového hrotu a jejich pružným deformacím.

Experimentálně získané závislosti zrychlení z velké části v podstatě také odpovídají teoretickým, je však nutno brát zřetel na jejich zatížení níže zmíněnými chybami. Na křivky je proto doporučeno nazírat jako na spíše orientační. Průběhy ryvu pak předpokládám odpovídají takřka výjimečně.

Jak již bylo naznačeno, je nutné brát v úvahu chyby, které do procesu vstupují jak použitím konečného počtu kroků při sestrojení zdvihové závislosti resp. při diskretizaci křivky experimentálně získané, tak (především) samotnou trojitou numerickou derivací. Měly-li by obdržené výsledky být považovány za vědecky hodnotné, pak by bylo třeba získaná data vhodným způsobem filtrovat. Do procesu samotného praktického měření však také vstupuje celá řada chyb. Především vlivem nedokonalé tuhosti rámu, potažmo záznamového hrotu (propisovací tužky), vlivem výrobních nepřesností vaček nebo vrstvy mazacího filmu mezi styčnými plochami. S ohledem na tyto skutečnosti a na především edukační poslání bakalářské práce byly chyby spjaté se zvoleným postupem zpracování dat shledány nepodstatnými. Edukační úloha si klade za cíl v první řadě seznámit studenty s vačkovými mechanismy, s průběhy kinematických veličin a jejich analýzou a osvojením si definovaných postupů.

Celá popsaná metoda odměření zdvihových závislostí na experimentální stanici osazené stávajícím záznamovým zařízením, jejich diskretizace a následné zpracování je poměrně náročný úkon. Zvláště pak, jsou-li výsledky práce ne zcela přesné a jsou-li na trhu cenově dostupné elektronické snímače kinematických veličin, ji lze považovat za snad až zbytečně komplikovanou. Zvláště vzhledem k těmto skutečnostem bylo doporučeno pořízení a instalace elektronických čidel (viz dále).

6.3 Formulace edukační úlohy

6.3.1 Zadání

- a) Zjistěte obvodovou rychlost záznamového válce experimentálního zařízení s pomocí rychloměru Prova RM-1501 osazeného adaptérem RM-1502 pro kontaktní snímání úhlové rychlosti.
- b) Proveďte měření zdvihové závislosti konkávní vačky s plochým zdvihátkem. Podle popsaného postupu graficky vyjádřete průběhy zdvihu, rychlosti a zrychlení zdvihátka v čase.
- c) Podle okótovaného schématu vačky na obr. 3.2 vytvořte v CAD softwaru náčrt profilu konkávní vačky a sestrojte zdvihovou závislost pro ploché zdvihátko podle popsaného postupu. Graficky vyjádřete průběhy zdvihu, rychlosti a zrychlení zdvihátka.
- d) Srovnějte průběhy rychlosti a zrychlení získané analyticky a experimentálně. Okomentujte a pokuste se vysvětlit jejich odlišnosti.
- e) Obdobným způsobem oběma metodami analyzujte a srovnějte tytéž kinematické veličiny tečné vačky s kladičkovým zdvihátkem. Okótovaný profil tečné vačky je opět na obr. 3.2. Výsledky zdůvodněte.

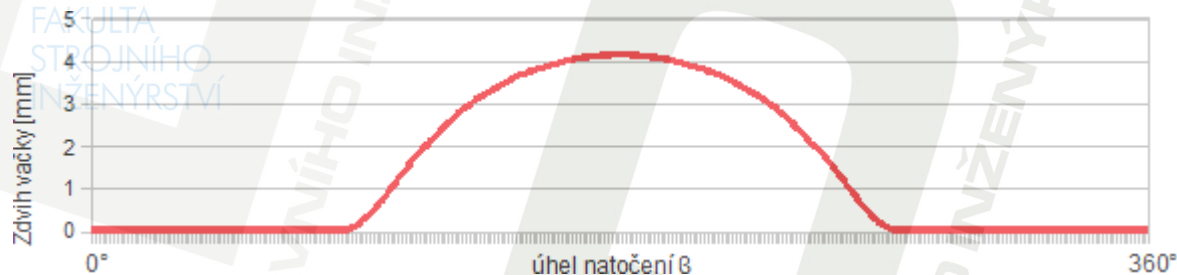
6.3.2 Rozbor úlohy a návod

i) popis mechanismu

(bude součástí teoretického rozboru laboratorní úlohy, viz podkapitola 3.1 této bakalářské práce)

ii) kinematické veličiny spjaté s vačkami a jejich průběh [5], [6]

Záznamem pohybu zdvihátka v závislosti na čase (nebo úhlu natočení vačky) do pravouhlých souřadnic je tzv. zdvihový diagram. Příklad zdvihového diagramu je na obr. 6.65. Je-li k dispozici kompletní zdvihová závislost, lze snadno určit ostatní kinematické charakteristiky.



6.65, Příklad zdvihového diagramu vačky

Derivací polohy podle času je rychlost. Protože derivace křivky je určena jejím sklonem v bodě, udává strmost zdvihové křivky v kterémkoli bodě rychlost zdvihátka. Tomuto procesu se říká grafická derivace. Pokud je zdvih přesně definován, lze další kinematické charakteristiky získat jeho postupnými derivacemi podle času. Konvence říká, že rychlost je kladná při pohybu zdvihátka vzhůru a záporná při jeho poklesu.

Derivací rychlosti podle času resp. druhou derivací polohy podle času je zrychlení. Sklon křivky rychlosti určuje zrychlení obdobně jako je tomu ve vztahu mezi polohou a rychlostí. Pro zrychlení platí i obdobná znaménková konvence. Je kladné, když je jeho směr shodný s kladným směrem zdvihu a opačně. Zrychlení je svázáno se vznikem setrvačných sil a jeho analýza je zvláště důležitá při návrhu rychloběžných strojů. S jeho průběhem souvisí rázy, hlučnost a opotřebení stroje nebo vibrace.

iii) Určování rychlosti záznamového válce

Digitální fototachometr Prova RM-1501 opatřený adaptérem RM-1502 umožňuje kontaktní snímání úhlové rychlosti hřídele. Přístroj je opatřen třemi tlačítky. Levé kruhové tlačítko slouží k výběru patřičných jednotek. Lomítko za jednotkou symbolizuje dotykové měření. Pravé z kruhových tlačítek je určeno k výběru měření maximální hodnoty, minimální hodnoty a průměrné hodnoty měření. Ke změření úhlové rychlosti vačkového hřídele je třeba přístroj nastavit na „AVE“, tedy průměrnou hodnotu. Pro návrat z menu výběru funkce se tlačítko stiskne na minimálně dvě sekundy. Prostřední obdélníkové tlačítko Start/Hold/On/Off spouští vypnutý přístroj, po jeho zapnutí spouští měření. Další stisknutí podrží změřená data na displeji a ukončí měření. Při stisknutí na déle než dvě sekundy se přístroj vypíná.

Měření otáček hřídele provádíme přitlačením gumového hrotu adaptéru ke středícímu důlku hřídele. Po spuštění přístroje je třeba zvolit opakovaným stiskem levého tlačítka jednotky „RPM/“ (Pozor! Nikoli „RPM“ bez lomítka), přístroj hrotem přitlačit k hřídeli a stisknout prostřední tlačítko (Start). Opětovné stisknutí tlačítka ukončí měření. Na displeji přístroje zůstanou zobrazeny otáčky hřídele za sekundu. Z otáček se úhlová rychlost vypočítá podle vztahu (6.1) [11].

$$\omega [rad \cdot s^{-1}] = 2\pi [rad] \cdot n[s^{-1}] \quad (6.1)$$

Protože úhlová rychlost ω záznamového bubnu je shodná s úhlovou rychlostí ω vačky, je podle vzorce (6.2) [15] možné spočítat obvodovou rychlost bubnu. K tomu je třeba změřit jeho poloměr r .

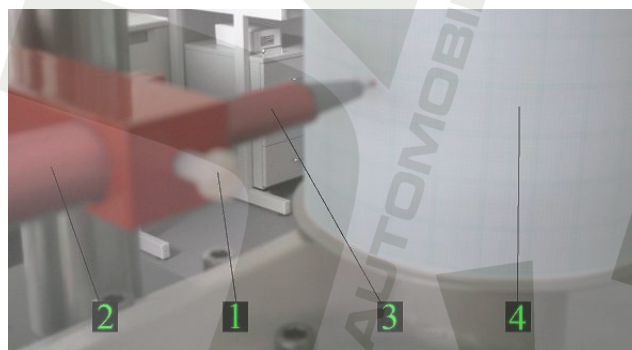
$$v_o[m \cdot s^{-1}] = \omega [rad \cdot s^{-1}] \cdot r[m] \quad (6.2)$$

iv) *Postup měření na experimentálním stanovišti*

Obvod měřicího válce je 297 mm, jeho výška je 92 mm. Záznamový milimetrový papír je vhodné připravit o několik cm delší pro jeho snazší následné přilepení k měřicímu bubnu. Je třeba dbát na to, aby papír byl ustřižen přesně podle milimetrové sítě a na záznamový buben umístěn přesně rovnoběžně s jeho spodní dosedací hranou. Jak bude vysvětleno níž, má přesná vodorovná poloha papíru zásadní vliv na kvalitu finálních výsledků. Papír se na válec přichytí pomocí lepící pásky. Jeden pruh pásky může být nalepen svisle od jedné podstavky válce ke druhé napříč papírem v místě překryvu obou jeho konců. Je však třeba se ujistit, že pruh lepící pásky přetíná budoucí zdvihovou křivku v místě nulového zdvihu vačky. O tom se lze přesvědčit ručním natočením vačky do polohy nulového zdvihu a poznačením polohy záznamového hrotu vůči papíru. V označeném místě je možno umístit lepící pásku. V opačném případě, kdy páska přerušuje papír v místě nenulového zdvihu, bude po jejím odlepení „chybět“ podstatná část měřené závislosti. Několik dalších proužků lepící pásky může být umístěno (opět kolmo k délce papíru) po obvodu válce vždy přes hrany jedné z jeho podstav. Je ovšem důležité, aby páska nezasahovala do předpokládané oblasti zdvihové křivky.

Poté, co je pruh milimetrového papíru umístěn, je třeba zajistit přítomnost souvislého mazacího filmu oddělujícího povrchy vačky a zdvihátka (nebo jeho kladičky). Na povrch profilu vačky je nutné nanést mazací olej a ručně s ní několikrát pootočit, dokud povrchy nejsou spolehlivě odděleny lubrikačním filmem.

Jsou-li povrchy spolehlivě mazány, lze přistoupit k osazení měřicího zařízení zapisovacím hrotem, popisovací tužkou. To se provede vsunutím tužky do dutiny kovového pouzdra uchyceného k zařízení. Plastový šroub (obr. 6.66, poz. 1) držící pouzdro (poz. 2) musí být nejprve povolen, poté pouzdro vyjmuto, osazeno tužkou (obr. 3) a opět pomocí šroubu instalováno. Pozor, mezi koncem tužky a kovovým pouzdrům musí být vložena tlačná pružina zajišťující pružný kontakt hrotu tužky s povrchem záznamového válce (poz. 4)



6.66, Detail záznamového zařízení

Pokud je zapisovací tužka v zaručeném kontaktu s milimetrovým papírem, zařízení může být zakrytováno. Ochranný kryt se přichytí kováním (obr. 6.67, poz. 1) a šroubem (poz. 2), který funguje jako bezpečnostní pojistka. Bez jeho úplného zašroubování není možné zařízení zapnout!



6.67, Měřicí stanice po osazení bezpečnostním krytem

Přístroj je spuštěn ovládacím tlačítkem „POWER ON“ na ovládacím panelu do polohy 1. Jakmile zařízení vykoná alespoň jeden úplný cyklus, může být stejným tlačítkem vypnuto, ochranný kryt sejmuto a výsledná zdvihová závislost odejmuta k dalšímu zpracování.

v) digitalizace odměřené křivky

Odměřenou zdvihovou závislost je nutné k dalšímu počítačovému zpracování naskenovat. Postačí běžně dostupný scanner s výchozím nastavením. Obrázek ve formě bitové mapy je v případě nedokonalé horizontálního předchozího umístění papíru na záznamový válec třeba v grafickém editoru pootočit tak, aby vodorovné čáry milimetrové sítě byly rovnoběžné s horizontální osou. Jak bude vysvětleno níže, je vhodné jej předem na šířku oříznout tak, aby jeho hrany ležely na svislých čarách milimetrové sítě. Nejlépe na silnějších, centimetrových. To ušetří práci při dalším zpracovávání křivky. Nyní je obrázek připraven k vložení do grafického softwaru (doporučen je *Rhino 3D*, použít však lze jakýkoli sofistikovanější grafický nástroj).

Po spuštění Software *Rhino 3D* je třeba kliknout levým tlačítkem myši do okna *Shora*. Tím se pohled shora stává aktuálně aktivním. Poté se výběrem příkazu *Maximalizovat* z nabídky *Pohled* v aplikačním menu skryjí ostatní „nepotřebné“ pohledy. Uživatel tak pracuje pouze v rovině xy. Příkazem *Umístit* v podnabídce *Podkladový obrázek* z téže nabídky se do aktuálního pohledu vkládá podkladový obrázek. Po zvolení připravené oskenované zdvihové závislosti se tato stává potenciálním podkladovým obrázkem. Program *Rhino 3D* žádá zadání souřadnice umístění levého dolního rohu obrázku. Je účelné zvolit [0;0] zadáním hodnoty „0,0“ do příkazového řádku. Program dále požaduje zadání délky podkladového obrázku v milimetrech. Proto je nezbytné obrázek předem oříznout tak, aby jeho šířka byla v celých milimetrech a toto číslo dobře odpočítat. Byl-li obrázek oříznut na celé centimetry, je určení jeho vodorovného rozměru snazší. Toto číslo (v milimetrech) je nezbytné zadat přesně, jinak obrázek nebude v měřítku 1:1! Jakmile je podkladový obrázek umístěn, je možné zdvihovou křivku překrýt křivkou spline (ikona na 6.68).



6.68, Ikona Spline softwaru *Rhino 3D*

Označením křivky a kliknutím na ikonu *Zapnout řídicí body* (obr. 6.69) se zobrazí řídicí body spline křivky. Jejich posouváním lze měnit požadovaný tvar spline křivky.



6.69, Ikona Zapnout řídicí body softwaru Rhino 3D

Po označení křivky a zadání příkazu *Rekonstruovat* do příkazového řádku je zaručena její hladkost a optimalizován počet řídicích bodů a jejich umístění. Pro rozdělení křivky na sadu bodů o konstantní vodorovné vzdálenosti je vhodné vytvořit pole svislých úseček s daným rozestupem a exportovat souřadnice jejich průsečíků se zpracovávanou křivkou. Úsečka je vytvořena použitím ikony *Lomená čára/úsečka* (obr. 6.70). Je účelné ji vytvořit v samostatné vrstvě.



6.70, Ikona Lomená čára/úsečka softwaru Rhino 3D

Program vyžaduje zadání počátečního bodu („0,0“), poté stačí se stisknutou klávesou *Shift* táhnout myši nahoru a v požadované vzdálenosti kliknout levým tlačítkem myši. Příkaz je ukončen stiskem klávesy *Enter*. Pole z vybraných objektů je vytvořeno příkazem *_Array*. Po označení úsečky a zadání příkazu software vyžaduje zadání počtu objektů v osách x, y, z a jejich rozestup. Dostačující vodorovnou vzdáleností je 1 mm. Zadáním příkazu *Průsečík* z podnabídky *Křivka z jiných objektů* v nabídce *Křivka* je vytvořena soustava bodů ležících v průsečících vybraných objektů. Program vyžaduje zvolit tyto objekty. Po označení křivky i všech svislých přímek a stisku klávesy *Enter* jsou tyto body vytvořeny. Je opět lépe je vytvořit v samostatné vrstvě. Poté, co uživatel všechny body vybere, je možné jejich ortogonální souřadnice exportovat do samostatného textového souboru. To se provede výběrem příkazu *Exportovat vybrané* z nabídky *Soubor* v aplikačním menu. Jako cílový formát je doporučen soubor *.txt, jako oddělovač pak středník.

Exportované hodnoty souřadnic diskretních bodů je možno vložit do tabulkového procesoru. Například otevřením textového souboru tyto hodnoty nesočího, označením všech položek, jejich načtením do schránky příkazem kopírovat a vložením do příslušného programu. Ten je sám rozdělí do příslušných sloupců a rádků. V prvním sloupci jsou horizontální souřadnice bodů, ve druhém adekvátní hodnoty zdvihu. Pozor, hodnoty jsou v milimetrech! Ve třetím sloupci je souřadnice z vybraných bodů. Tato hodnota je vzhledem k tomu, že body leží v rovině nulová a pro další řešení je zbytná. Data jsou řazena „pozpátku“, je třeba je seřadit. Podle vztahu (6.3) je svislá rychlost v zdvihátka v čase rovna derivaci zdvihu y podle odpovídající vodorovné souřadnice s násobená obvodovou rychlostí válce v_o .

$$v = \frac{dy[m]}{ds[m]} \cdot \frac{ds[m]}{dt[s]} = \frac{dy[m]}{ds[m]} \cdot v_o[m \cdot s^{-1}] = \frac{dy[m]}{dt[s]} \quad (6.3)$$

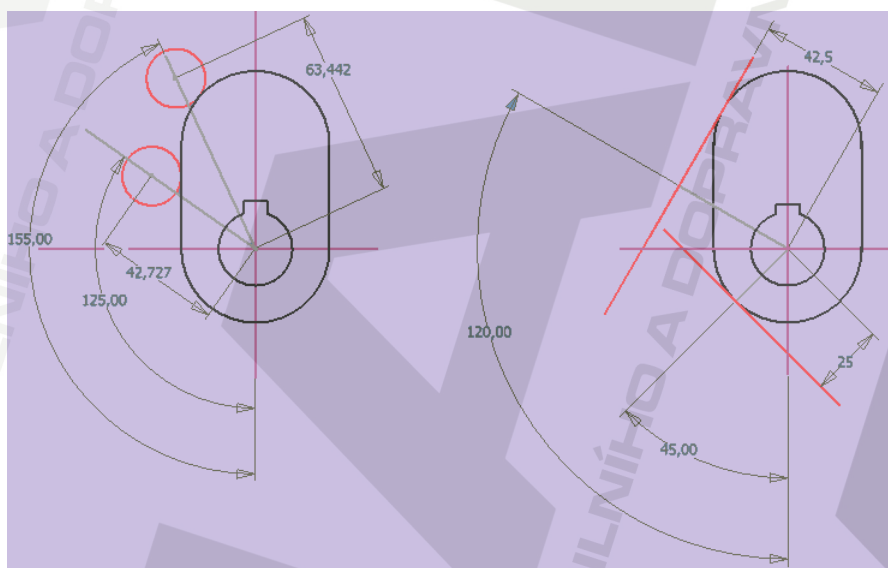
Protože jsou data diskretní, provádí se derivace tzv. numerická. O numerické derivaci bude krátce pojednáno dále. Zrychlení zdvihátka je derivací jeho rychlosti podle času, resp. druhou derivací jeho zdvihu podle času podle vztahu (6.4).

$$a[m \cdot s^{-2}] = \frac{dv[m \cdot s^{-1}]}{dt[s]} \quad (6.4)$$

vi) *Teoretická konstrukce zdvihové závislosti*

Je-li znám přesný profil zkoumané vačky, lze sestavit zdvihovou závislost pomocí CAD softwaru. Vačka zůstává statická a je po daném úhlovém kroku orotována zdvihátkem. Dvě úhlové polohy kladičkového a zdvihátka jim odpovídající zdvih jsou na obr. 6.71 vlevo. Osa zdvihátka vždy prochází osou rotace vačky, kladička (zakreslená červeně) je tečná k vnějšímu profilu vačky. Vzdálenost mezi osou rotace vačky a osou kladičky se pro každý krok odměří a přesně zaznamená. Jako krok pro rotaci je doporučen jeden stupeň. Čím jemnější krok je zvolen, tím přesnější jsou výsledná data. Ta jsou spolu s příslušným úhlem natočení zaznamenána do tabulkového procesoru. Příklad plochého zdvihátka je na obr. 71 vpravo. Osa zdvihátka opět prochází osou rotace vačky, plocha zdvihátka (zaznačena červeně) je tečná k vnějšímu profilu vačky. Vzdálenost mezi osou rotace vačky a plochou zdvihátka je pro každý krok zaznamenána a spolu s odpovídajícím úhlem pootočení zanesena do tabulkového editoru. Od všech odměřených hodnot je třeba odečíst velikost takto získaného zdvihu v úhlové poloze odpovídající nulovému zdvihu. Teprve potom je k dispozici skutečná velikost zdvihu. Je-li známa úhlová rychlost vačky ω , je možné získat rychlost v zdvihátka podle vztahu (6.5). Pozor! Úhel pootočení vačky φ je nutné převést na radiány. Zrychlení a zdvihátka je pak derivací rychlosti v podle času podle vztahu (6.4).

$$v = \frac{dy[m]}{d\varphi [rad]} \cdot \frac{d\varphi [rad]}{dt[s]} = \frac{dy[m]}{d\varphi [rad]} \cdot \omega [rad \cdot s^{-1}] = \frac{dy[m]}{dt[s]} \quad (6.5)$$



6.71, Příklad grafické konstrukce zdvihových závislostí

vii) *Numerická drivace [16], [17]*

Je-li k výpočtu derivace k dispozici pouze diskrétní sada hodnot, provádí se tzv. derivace numerická. Ta využívá diferenčních vzorců, které hodnoty derivace aproximují na základě znalosti hodnoty funkce v nejbližším známém okolí bodu. K výpočtu rychlosti a zrychlení zdvihátka postačí difference středová, která hodnotu derivace funkce y^d argumentu x^d v obecném bodě A vypočítává podle vzorce (6.6).

$$\frac{\Delta y^d_A}{\Delta x^d_A} = \frac{y^d_{(A+1)} - y^d_{(A-1)}}{x^d_{(A+1)} - x^d_{(A-1)}} \quad (6.6)$$

Přibližnou velikost rychlosti v patřičném časovém okamžiku je tedy možné spočítat jako rozdíl zdvihů v následujícím a předchozím okamžiku podělenou příslušícím rozdílem času mezi těmito body. Uvedený způsob výpočtu derivací je zatížen dvěma kategoriemi chyb. První jsou tzv. ořezávací, které jsou důsledkem odhadu derivace z konečného množství hodnot. Tyto chyby klesají se zmenšující se vzdáleností mezi známými hodnotami argumentu. Druhým typem chyb jsou chyby zaokrouhlovací vznikající jako následek toho, že výpočetní technika pracuje s pevným počtem číslic. Pro potřeby osvojení si metody analýzy kinematických veličin lze velikosti těchto chyb považovat za nepodstatné.



6.4 Nástin možného řešení elektronického snímání veličin

Měření elektronickými čidly poskytuje, jak bylo řečeno, nejpřesnější a nejsnáze počítačově zpracovatelná data takřka v reálném čase. Pro účely přesného měření zdvihové závislosti postačí snímač úhlové polohy vačky resp. vačkového hřídele a snímač svislé polohy zdvihátka. Ostatní kinematické veličiny mohou být dopočítány s pomocí postupu, který byl definován v rámci předchozích metod. Byl proveden nástin možných řešení měření obou veličin a příklady pro tyto účely vhodných snímačů. Kriteřiem pro jejich výběr byly cenová dostupnost, spolehlivost a přesnost měření, přiměřené rozměry.

6.4.1 Snímač zdvihu

Ke snímání zdvihu pro danou aplikaci postačí senzor kontaktní. Jako nejvhodnější byl sledán lineární odporový snímač polohy. Mezi výrobce lineárních odporových snímačů polohy patří například italská společnost *Gefran*, německá společnost *MegAuto* nebo britská *Penny+Giles*. Pro snímání svislého posuvu zdvihátek experimentální stanice bude postačovat zařízení o zdvihu 30 mm. Pouze společnost *Penny+Giles* dodává snímač o zdvihu 30 mm, ostatní výrobci dodávají měřidla v řadách měřících rozsahů 25 mm a 50 mm. Z důvodu menších zástavbových rozměrů byl vybrán snímač *Penny+Giles*, typ SLS095/30/1.2/R/50 o následujících parametrech:

Zdvih :	30 mm,
Opakovatelnost:	0,01 mm,
Rychlost snímání:	2,5 ms ⁻¹
Hmotnost:	14,5 g

Maximální rychlost snímání 2,5 ms⁻¹ je vzhledem k rychlostem zdvihátek, které se pohybují nejvýše okolo 0,6 ms⁻¹ zcela vyhovující. Osazení stanice tímto čidlem by nevyžadovalo její dodatečné zpřevodování do pomala. Tento typ měřícího senzoru je na koncích vybaven kovovým oky, jejichž prostřednictvím může být snadno uchycen. Snímače řady SL095 jsou na obr. 6.72.



6.72, Snímače *Penny+Giles* řady SL095 [18]

6.4.2 Snímač úhlové polohy

Jako vhodné řešení byl na základě zkušeností doc. Ing. Ivana Mazúrka, CSc. prezentovaných v [19] navržen indukční senzor přiblížení s diskretním výstupem v kombinaci s vhodným drážkovaným kolem umístěným mezi spojkou a vačkou na

vačkovém hřídeli. Zvolený typ IA05BSF10NC od firmy *Carlo Gavazzi* má následující parametry:

Pracovní dosah:	1,2 mm
Frekvence měřících cyklů:	4 kHz

Senzor této řady je na obr. 6.73



6.73, Zvolený indukční snímač, výrobce Carlo Gavazzi [20]

7 Závěr

Konstrukční úpravou přístroje byl odstraněn jeho zásadní nedostatek - nemožnost instalovat přiložené ploché zdvihátko jinak než za cenu demontáže celého aparátu. Teprve po úpravě bylo experimentální zařízení možné zařadit do plnohodnotného provozu. Za současného stavu je možné experimentálně zjišťovat zdvihové závislosti vaček jak s plochým, tak s kladičkovým zdvihátkem. Jejich výměnu lze uskutečnit během několika minut a čítá pouze demontáž a opětovnou montáž příčnicku a vodící příruby. Je tedy z hlediska časové i manuální nenáročnosti přijatelné nechat ji provádět studenty v rámci cvičení. Odstraněním nutnosti rozebírat celý aparát je eliminováno potenciální riziko jeho znehodnocení například stržením závitů šroubů nebo vznikem nežádoucích vůlí.

Byl navržen postup, pomocí něhož lze z odměřených zdvihových křivek získat velikosti rychlosti a zrychlení zdvihátek. Přesnost metody není vysoká, ale z edukačního hlediska je uspokojivá. Veličny je možné snadno názorně graficky interpretovat grafy a eventuálně porovnávat. Tím se rozrůstá potenciál měřicí stanice, jejímž jediným přímým výstupem jsou křivky zdvihu. Realizovaný postup neklade velké požadavky na výkon výpočetní techniky a je proveditelný na běžném osobním počítači disponujícím skenerem a dnes široce dostupným softwarovým vybavením v podobě tabulkového procesoru a grafického editoru. Využit by mohl být osobní počítač, který již je umístěn v laboratoři.

Výsledky uvedené metody byly porovnány s daty o kinematických veličinách získaných na základě grafické konstrukce zdvihových závislostí vaček a jejich numerických derivací. Průběhy zdvihů, rychlostí a zrychlení byly srovnány a byla dokázána jejich výrazná shoda. Případné místní rozdíly v chování křivek byly vysvětleny. Na skutečných zdvihových diagramech bylo poukázáno na projevy nedostatečnosti tuhosti přítláčné pružiny.

Předpoklad byl ukázat shodu i v průbězích ryvu. Z důvodu množství nepřesností a chyb, které do procesu měření a zpracování dat vstupují však grafy ryvu získané oběma metodami výraznou podobnost nevykazují. Proto bylo od analýzy ryvu v rámci vytvořené laboratorní úlohy upuštěno.

Úloha připravená v souladu s trendy v moderním vzdělávání dává budoucím studentům možnost hlouběji nahlédnout do problematiky diskretizace spojitých dat, kinematiky vačkových soustav a prezentace získaných údajů. Je praktickou průpravou studenta na řešení reálných problémů v jeho předpokládaném budoucím zaměstnání strojního inženýra.

S ohledem na nedokonalost a relativní časovou náročnost aplikovaného postupu a na dobrou dostupnost elektronických snímačů byla doporučena snímací technika, jíž by mohly být informace o úhlové poloze a zdvihu získávány v reálném čase. Základ pro analýzu výstupních dat byl položen. Elektronická data bývají do počítače přenášena prostřednictvím měřících karet a softwarově zpracována. Nákup a instalaci senzorů, výběr vhodných karet a pořízení resp. naprogramování softwaru včetně patřičných datových filtrů bylo mimo rámec bakalářské práce a bylo doporučeno jej řešit v rámci budoucí diplomové práce. Základní informace o problematice zpracování elektronických dat a lze nalézt například v literatuře [21], [22]. S přihlédnutím k rázům vznikajícím při použití některých konfigurací vačka - zdvihátko je též doporučeno zvážit a případně uskutečnit zpřevodování mechanismu do pomala.

Osazení experimentálního zařízení elektronickými snímači by značně zpřesnilo a zjednodušilo výsledky experimentů. Mimo to by znamenalo možnost jeho širšího využití nejen v rámci výuky na Fakultě strojního inženýrství. Umožňovalo by měřit geometrické a rozměrové parametry rotujících součástí nebo by bylo možné ověřovat kinematické veličiny vaček navržených a zhotovených studenty podle konkrétního zadání přímo na fakultě metodou rapid-prototyping apod. V neposlední řadě by se studenti měli možnost obeznámit se základy zpracování elektronických signálů.

8 Použité zdroje

- [1] Wikipedia : The free encyclopedia [online]. 2010, 10.4.2010 [cit. 2010-05-15]. Problem-based learning. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Problem-based_learning>.
- [2] Wikipedia : The free encyclopedia [online]. 2010, 17.5.2010 [cit. 2010-05-15]. Project-based learning. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Project-based_learning>.
- [3] Wikipedia : The free encyclopedia [online]. 2010, 15.5.2010 [cit. 2010-05-15]. Experiential education. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Experiential_education>.
- [4] Wikipedia : The free encyclopedia [online]. 2010, 21.5.2010 [cit. 2010-05-15]. Active learning. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Active_learning>.
- [5] ROTHBART, Harold A. Cam Design Handbook. [s.l.]: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2004. 587 s. ISBN 0-07-143328-7.
- [6] NORTON, Robert L. Cam design and manufacturing handbook. New York: Industrial Press, 2002. xiii, 610 s. ISBN 0-8311-3122-5.
- [7] BUDYNAS, Richard G. Shigley's Mechanical Engineering Design : Eighth Edition. 8th ed. in SI Units. New York : The McGraw-Hill Companies, Inc, c2008. xxv, 1055 s. ISBN 978-0-07-125763-3.
- [8] Automatizace: [online]. [cit. 2010-05-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.automatizace.cz/article.php?a=988>>.
- [9] VOJÁČEK, Antonín. Automatizace : Rady a poslední novinky z oboru [online]. 25.9.2006, 20:11 [cit. 2010-05-25]. Aplikace pro indukční senzory s analog. výstupem. Dostupné z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART276-aplikace-pro-indukcni-senzory-s-analog-vystupem.html>>.
- [10] KOVÁŘ, Josef Automatizační prostředky II. Automatizační prostředky II [online]. Střední průmyslová škola Zlín : 2005, 21.5.2005 [cit. 2010-05-25]. Dostupné z WWW: <[http://www.spszl.cz/modules/wfdownloads/visit.php?cid=8&lid=42%20\(ty%20odkazy\)%20na%20elektroniku](http://www.spszl.cz/modules/wfdownloads/visit.php?cid=8&lid=42%20(ty%20odkazy)%20na%20elektroniku)>.
- [11] Wikipedie : Otevřená encyklopedie [online]. 15.4.2010, 13:49 [cit. 2010-05-25]. Úhlová rychlost. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/%C3%9Ahlov%C3%A1_rychlost>.
- [12] Wikipedie : Otevřená encyklopedie [online]. 14.5.2010, 06:42 [cit. 2010-05-25]. Radián. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Radi%C3%A1n>>.
- [13] Wikipedie : Otevřená encyklopedie [online]. 5.3.2010, 00:50 [cit. 2010-05-25]. Kinematika. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Kinematika>>.
- [14] Wikipedie : Otevřená encyklopedie [online]. 25.5.2010, 06:35 [cit. 2010-05-25]. Rychlost. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Rychlost_%28mechanika%29>.

[15] Wikipedie : Otevřená encyklopedie [online]. 19.6.2009, 15:16 [cit. 2010-05-25]. Obvodová rychlost. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Obvodov%C3%A1_rychlost>.

[16] URBÁNEK, Tomáš; ŠKÁRKA, Jaroslav. Microsoft Excel 97 pro vědce a inženýry. Vyd. 1. Praha : Computer Press, 1998. xiv, 434 s s. ISBN 80-7226-099-5.

[17] CHAPRA, Steven C. Numerical methods for engineers. 2nd ed. New York : McGraw-Hill Book Company, 1990. xvii, 812 s. ISBN 0-07-100412-2.

[18] Penny+Giles [online]. [cit. 2010-05-10]. Position Measurement and Control Hardware. Dostupné z WWW: <http://www.pennyandgiles.com/script/cms/get_image.php?imageID=721&new_w=420>.

[19] MAZUREK, Ivan. Zařízení na měření vačkových hřídelí [online]. Brno : 10.6.2009 [cit. 2010-05-25]. Dostupné z WWW: <http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=1042>.

[20] Proximity Sensors Inductive, Short body, Stainless Steel Housing, Types IA, M5 [online]. [cit. 2010-05-25]. Dostupné z WWW: <<http://85.46.106.250/PDF/UK/ia05bsf10nom5.pdf>>.

[21] Wikipedia : The free encyclopedia [online]. 18.5.2010 [cit. 2010-05-20]. Signal processing. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Signal_processing>.

[22] Wikipedia : The free encyclopedia [online]. 25.5.2010 [cit. 2010-05-25]. Electronic filter. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_filter>.

9 Seznam obrázků

1.1a,	Generátor funkce	13
1.1b,	Generátor trasy	13
1.1c,	Generátor pohybu	13
2.1,	Lineární vačka s posuvným zdvihátkem	14
2.2,	Radiální kulisová vačka	14
2.3,	Spřažená radiální vačka s vahadlem	15
2.4,	Spirální vačka se zdvihátkem	15
2.5,	Bubnová vačka s vahadlem	16
2.6,	Globoidní vačky s drážkou	16
2.7,	Kuželová vačka s posuvným kladičkovým zdvihátkem	17
2.8,	Sférická vačka s kladičkovým vahadlem	17
2.9,	Maltézský mechanismus	17
2.10,	Krokovací vačka	18
2.11,	Řetězová vačka	18
2.12,	Zdvihové závislosti různých typů vaček	20
2.13,	Základní geometrické parametry vačky	20
2.14,	Podřezání konkávního povrchu radiální vačky s kladičkovým zdvihátkem	21
2.15,	Podřezání konvexního povrchu radiální vačky s kladičkovým zdvihátkem	22
2.16,	Podřezání konvexního povrchu radiální vačky s plochým zdvihátkem	22
2.17,	Radiální vačka s kyvným a posuvným zdvihátkem	23
2.18,	Různé druhy posuvných zdvihátek	24
2.19,	Řešení vymezení vůle v drážce radiální vačky dvojicemi kladiček	25
2.20,	Průběh stykového tlaku v závislosti na tvaru kladičky	26
2.21,	Předsazení zdvihátka kolmo k ose rotace vačky a ve směru osy rotace	26
2.22,	Lineární ložisko	29
2.23,	Křivka silového působení pružiny ve vztahu k setrvačnosti zdvihátka	29
2.24,	Výroba bubnové vačky na kopírovacím stroji	32
2.25,	Stribeckova křivka a tloušťky mazacích filmů při jednotlivých režimech mazání	34
2.26,	Příklad adhezního opotřebení povrchu	35
2.27,	Příklad abrazního opotřebení povrchu	36
2.28,	Zdvihový diagram vačky	37
2.29,	Křivka konstantní rychlosti,	38
2.30,	Křivka konstantního zrychlení	39
2.31,	První kubická křivka	39
2.32,	Jednoduchá harmonická křivka	40
2.33,	Konstrukce eliptické zdvihové křivky	41
2.34,	Křivka trapézového zrychlení	42
2.35,	Křivka symetrického a skloněného trapézového zrychlení,	42
2.36,	Zdvih a zrychlení cykloidy a modifikovaného sinu	43
2.37,	Zrychlení DRRD vaček různého typu se souměrným zdvihem	44
2.38,	Zrychlení DRRD vaček různého typu s nesouměrným zdvihem	44
2.39,	Proložení cykloidního zrychlení křivky parabolickým úsekem	45
2.40,	Průběhy polynomálních křivek o různých koeficientech	45
2.41,	Velikost bočního namáhání zdvihátka pro různé křivky v porovnání k parabole	46
2.42,	Velikost potřebné síly pružiny pro různé druhy křivek	46
2.43,	Některé typické tvary kovových kotoučů používaných při indukčním snímání úhlové polohy	48
2.44,	Uspořádání běžného indukčního snímače	48
2.45,	Schéma zapojení potenciometrického snímače polohy	49

2.46,	Skokový průběh výstupního napětí u potenciometrického snímače	49
3.1,	Fotografie měřícího aparátu s hlavními pozicemi	51
3.2,	Okótované funkční profily zkoumaných vaček	52
5.1,	Fotografie výsledného tvaru díry v základové desce	54
5.2,	Sestrojení zdvihové závislosti pro různé konfigurace vačka-zdvihátka	56
5.3,	Naměřená závislost zdvihu pro konkávní vačku a ploché zdvihátka	57
5.4,	Naměřená závislost zdvihu pro konkávní vačku a kladičkové zdvihátka	57
5.5,	Naměřená závislost zdvihu pro vačku s kruhovým bokem č. 1 a ploché zdvihátka	57
5.6,	Naměřená závislost zdvihu pro vačku s kruhovým bokem č. 1 a kladičkové zdvihátka	57
5.7,	Naměřená závislost zdvihu pro vačku s kruhovým bokem č. 2 a ploché zdvihátka	57
5.8,	Naměřená závislost zdvihu pro vačku s kruhovým bokem č. 2 a kladičkové zdvihátka	57
5.9,	Naměřená závislost zdvihu pro tečnou vačku a ploché zdvihátka	57
5.10,	Naměřená závislost zdvihu pro tečnou vačku a kladičkové zdvihátka	58
6.1,	Skutečný průběh zdvihu kladičkového zdvihátka konkávní vačky	59
6.2,	Teoretický průběh zdvihu kladičkového zdvihátka konkávní vačky	59
6.3,	Skutečný průběh rychlosti kladičkového zdvihátka konkávní vačky	60
6.4,	Teoretický průběh rychlosti kladičkového zdvihátka konkávní vačky	60
6.5,	Skutečný průběh zrychlení kladičkového zdvihátka konkávní vačky	60
6.6,	Teoretický průběh zrychlení kladičkového zdvihátka konkávní vačky	61
6.7,	Skutečný průběh ryvu kladičkového zdvihátka konkávní vačky	61
6.8,	Teoretický průběh ryvu kladičkového zdvihátka konkávní vačky	61
6.9,	Skutečný průběh zdvihu plochého zdvihátka konkávní vačky	62
6.10,	Teoretický průběh zdvihu plochého zdvihátka konkávní vačky	62
6.11,	Skutečný průběh rychlosti plochého zdvihátka konkávní vačky	62
6.12,	Teoretický průběh rychlosti plochého zdvihátka konkávní vačky	63
6.13,	Skutečný průběh zrychlení plochého zdvihátka konkávní vačky	63
6.14,	Teoretický průběh rychlosti plochého zdvihátka konkávní vačky	63
6.15,	Skutečný průběh ryvu plochého zdvihátka konkávní vačky	64
6.16,	Teoretický průběh ryvu plochého zdvihátka konkávní vačky	64
6.17,	Skutečný průběh zdvihu kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1	64
6.18,	Teoretický průběh zdvihu kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1	64
6.19,	Skutečný průběh rychlosti kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1	65
6.20,	Teoretický průběh rychlosti kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1	65
6.21,	Skutečný průběh zrychlení kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1	65
6.22,	Teoretický průběh zrychlení kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1	66
6.23,	Skutečný průběh ryvu kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1	66
6.24,	Teoretický průběh ryvu kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1	66
6.25,	Skutečný průběh zdvihu plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1	67
6.26,	Teoretický průběh zdvihu plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1	67
6.27,	Skutečný průběh rychlosti plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1	67

6.28,	Teoretický průběh rychlosti plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1	67
6.29,	Skutečný průběh zrychlení plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1	68
6.30,	Teoretický průběh zrychlení plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1	68
6.31,	Skutečný průběh ryvu plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1	68
6.32,	Teoretický průběh ryvu plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 1	69
6.33,	Skutečný průběh zdvihu kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2	69
6.34,	Teoretický průběh zdvihu kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2	69
6.35,	Skutečný průběh rychlosti kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2	70
6.36,	Teoretický průběh rychlosti kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2	70
6.37,	Skutečný průběh zrychlení kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2	70
6.38,	Teoretický průběh zrychlení kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2	70
6.39,	Skutečný průběh ryvu kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2	71
6.40,	Teoretický průběh ryvu kladičkového zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2	71
6.41,	Skutečný průběh zdvihu plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2	71
6.42,	Teoretický průběh zdvihu plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2	72
6.43,	Skutečný průběh rychlosti plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2	72
6.44,	Teoretický průběh rychlosti plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2	72
6.45,	Skutečný průběh zrychlení plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2	73
6.46,	Teoretický průběh zrychlení plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2	73
6.47,	Skutečný průběh ryvu plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2	73
6.48,	Teoretický průběh ryvu plochého zdvihátka vačky s kruhovým bokem č. 2	73
6.49,	Skutečný průběh zdvihu kladičkového zdvihátka tečné vačky	74
6.50,	Teoretický průběh zdvihu kladičkového zdvihátka tečné vačky	74
6.51,	Skutečný průběh rychlosti kladičkového zdvihátka tečné vačky	74
6.52,	Teoretický průběh rychlosti kladičkového zdvihátka tečné vačky	75
6.53,	Skutečný průběh zrychlení kladičkového zdvihátka tečné vačky	75
6.54,	Teoretický průběh zrychlení kladičkového zdvihátka tečné vačky	75
6.55,	Skutečný průběh ryvu kladičkového zdvihátka tečné vačky	76
6.56,	Teoretický průběh ryvu kladičkového zdvihátka tečné vačky	76
6.57,	Skutečný průběh zdvihu plochého zdvihátka tečné vačky	76
6.58,	Teoretický průběh zdvihu plochého zdvihátka tečné vačky	77
6.59,	Skutečný průběh rychlosti plochého zdvihátka tečné vačky	77
6.60,	Teoretický průběh rychlosti plochého zdvihátka tečné vačky	77
6.61,	Skutečný průběh zrychlení plochého zdvihátka tečné vačky	78
6.62,	Teoretický průběh zrychlení plochého zdvihátka tečné vačky	78
6.63,	Skutečný průběh ryvu plochého zdvihátka tečné vačky	78
6.64,	Teoretický průběh ryvu plochého zdvihátka tečné vačky	78
6.65,	Příklad zdvihového diagramu vačky	80
6.66,	Detail záznamového zařízení	81
6.67,	Měřicí stanice po osazní bezpečnostním krytem	82
6.68,	Ikona Spline softwaru Rhino 3D	82
6.69,	Ikona Zapnout řídicí body softwaru Rhino 3D	83
6.70,	Ikona Lomená čára/úsečka softwaru Rhino 3D	83
6.71,	Příklad grafické konstrukce zdvihových závislostí	84

6.72,	Snímače Penny+Giles řady SL095	86
6.73,	Zvolený indukční snímač, výrobce Carlo Gavazzi	87

10 Seznam tabulek

Tab. 1,	vhodnost kombinací stýkajících se materiálů s ohledem na adhezní opotřebení	36
---------	---	----

11 Seznam použitých symbolů a jednotek

označení	legenda	jednotka
a	zrychlení zdvihátka	[ms ⁻²]
F	síla	[N]
f	koeficient tření	[-]
I	elektrický proud přivedený na snímač	[A]
j	ryv zdvihátka	[ms ⁻³]
p	tlak mazacího media	[MPa]
t	čas	[s]
s	dráha	[m]
R _z	odpor zátěže snímače	[Ω]
U ₁	vstupní napětí snímače	[V]
U ₂	výstupní napětí snímače	[V]
v	rychlost zdvihátka	[ms ⁻¹]
v _o	obvodová rychlost záznamového bubnu	[ms ⁻¹]
y	zdvih zdvihátka	[mm]
ȳ	časová derivace zdvihu	[ms ⁻¹]
ÿ	druhá časová derivace zdvihu	[ms ⁻²]
ÿ	třetí časová derivace zdvihu	[ms ⁻³]
y ^d	obecná numericky derivovaná funkce	
x ^d	argument obecné numericky derivované funkce	
α	obecný úhel ve stupích	[°]
α	obecný úhel v radiánech	[rad]
φ	úhel natočení vačky	[°]
Λ	parametr mazání	[-]
η	dynamická viskozita	[N·s·m ⁻²]
ω	úhlová frekvence vačkového hřídele	[rad·s ⁻¹]
ω _r	relativní rychlost stýkajících se povrchů	[ms ⁻¹]

12 Seznam příloh

1 výkres, název DESKA, číslo dokumentu 3-BP-001-2010