



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

ANIMACE FUNKCE PŘEVODŮ S OHEBNÝMI PŘEVODOVÝMI ČLENY

ANIMATION OF THE BEHAVIOR OF FLEXIBLE POWER TRANSMISSION ELEMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

František Dolíhal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **František Dolíhal**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce: **prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

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

Animace funkce převodů s ohebnými převodovými členy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Řemenové, řetězové a lanové převody se používají k přenosu malých až středních výkonů na relativně velké osové vzdálenosti. Umožňují změnu úhlových rychlostí a točivých momentů mezi hnacím a hnaným členem. Nejčastěji se používají u nejrůznějších dopravních strojů a zařízení. Představa o kinematických a silových poměrech má zásadní význam pro správný návrh těchto převodů.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je vytvoření animací objasňujících kinematické a silové poměry u řemenových a řetězových převodů. Jedná se o kuželový variátor s plochým řemenem, otevřený převod plochým a klínovým řemenem a řetězový převod.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- výběr a vymezení problémů vhodných pro animaci,
- identifikace parametrů pro vytvoření animace,
- navržení výpočtových modelů,
- vytvoření animací.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, digitální data.

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

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

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukoncení/>

Seznam doporučené literatury:

JELASKA, Damir. Gears and gear drives. Chichester: Wiley, 2012. ISBN 978-1-119-94130-9.

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. Konstruování strojních součástí. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce je věnována tvorbě animací, které jsou zaměřeny na řemenové převody a řetězový převod. Obsahem práce je výběr zobrazovaných principů, shromáždění odpovídajících teoretických vztahů, převod těchto vztahů do prostředí animace a finální demonstrování vybraných jevů za pomoci výstupních výukových animací. Práce se věnuje těmto tématům: kinematické a dynamické parametry převodu se skluzem a beze skluzu, průběh sil po neutrálním vláknu plochého, respektive klínového řemene a efekt mnohoúhelníku zpříčiňující nerovnoměrný chod řetězového převodu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Řemenový převod, skluz, variátor, průběh sil, plochý řemen, klínový řemen, řetězový převod, nerovnoměrnost chodu, efekt mnohoúhelníku.

ABSTRACT

This bachelor thesis is dedicated to the creation of animations that are focused on belt transmissions and chain transmission. The content of the work is the selection of the displayed principles, the collection of corresponding theoretical equations, the transfer of these equations into the system of animation and the final demonstration of selected phenomena with help of output in form of educational animations. This thesis deals with the topics of kinematic and dynamic parameters of the transmission with slip and without slip, the course of forces along the neutral fiber of the flat or V-belt and the effect of polygon causing uneven speed of the chain transmission.

KEYWORDS

Belt transmission, slip, variator, force course, flat belt, V-belt, chain transmission, uneven running, polygon effect.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOLÍHAL, František. *Animace funkce převodů s ohebnými převodovými členy*. Brno, 2022, 50 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce prof. Ing. Martinu Hartlovi, Ph.D., za podnětné rady, ochotu, vstřícný přístup, věnovaný čas při konzultacích a poskytnutí zahraniční odborné literatury.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Animace funkce převodů s ohebnými převodovými členy* vypracoval samostatně, pod odborným vedením prof. Ing. Martina Hartla, Ph.D., a současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

V Třebíči dne 08. 05. 2022

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Řemenový převod	14
2.1.1	Vlastnosti převodu	14
2.1.2	Silové poměry	15
2.1.3	Prokluz	19
2.2	Řetězový převod	19
2.2.1	Vlastnosti převodu	19
2.2.2	Efekt mnohoúhelníku	20
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	23
3.1	Analýza problému	23
3.2	Cíl práce	23
3.3	Témata animací	24
3.3.1	Základní závislost kinematických a dynamických veličin na převodovém poměru.	24
3.3.2	Silové poměry v řemenovém převodu a jejich průběh po neutrálním vláknu	24
3.3.3	Nerovnoměrnost chodu řetězového převodu	24
4	MATERIÁL A METODY	25
4.1	Příprava	25
4.2	Tvorba modelů	25
4.3	Vazby a pohyb modelů	27
4.4	Kontroly a úpravy	28
4.5	Render	28
5	VÝSLEDKY	30
5.1	Animace 1 – Variátor	30
5.1.1	Animace 1A (Variátor bez prokluzu)	30
5.1.2	Animace 1B (Variátor s prokluzem)	32
5.2	Animace 2 (Řemenový převod)	34
5.2.1	Parametry výpočtu	34
5.2.2	Průběh animace	34
5.3	Animace 3 (Řetězový převod)	38

6	DISKUSE	40
6.1	Animace 1A, Animace 1B	40
6.2	Animace 2	41
6.3	Animace 3	42
7	ZÁVĚR	44
8	CITOVANÁ LITERATURA	45
9	SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN	46
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	48
11	SEZNAM TABULEK	49
12	SEZNAM PŘÍLOH	50

1 ÚVOD

Mechanické převody, ať už ozubené nebo třecí, jsou od pradávna nedílnou součástí strojů. I přes nepřetržitý vývoj moderních technologií a současných trendů jsou stále základem většiny lidských výrobků, anebo alespoň strojů, které tyto výrobky vyrábí.

Ač se může základní funkce a vlastnosti převodů v kontextu celku zdát jako hrubě triviální, přesto její komplexní pochopení tvoří dobrý základ pro zvládnutí celého návrhu. Ke znázornění těchto principů a jevů nám již od dob Komenského slouží učebnice, skripta i odborné publikace vybavené obrázky, diagramy a různými schématy. Zde však student naráží na strnulé zobrazení pohyblivých (a často také dynamických) jevů, které již musí oživit jeho samotná mysl. Ono oživení, z latiny animace, je ovšem svou věrohodností závislé na zkušenostech a čtenářově intuici.

Dnes doba pokročila a s ní se rozšiřují i možnosti výuky a demonstrování těchto principů. Starší variantou byla názorná videa natáčená s fyzickými modely, popřípadě demonstrační pokus přímo na přednášce. Nyní lze díky výpočetní technice snadno postoupit ještě dál a prezentovat jevy, které byly patrné i u oněch videí a pokusů, zpomaleně s různými detaily, pohledy, průřezy a vývojem sledovaných veličin v čase. To vše v jediném snímku, ve společném rámci a kontextu. Relativně snadná dostupnost nástrojů k tvorbě animací má ovšem za následek jakési přesycení internetu různými videi, která ukazují pouhý pohyb (a to mnohdy i nepřesně) a zůstávají pouze na povrchu věci.

Právě v této situaci je vhodné usilovat o animace, které budou zacíleny na osvětlení konkrétního problému, jevu nebo principu o videa, která dokážou překlenout pomyslnou propast mezi statickým technickým schématem a grafy, příp. odstavcem textu, který je více či méně názorně opisuje. Úkolem tedy je vytvořit na základě reálné aplikace částečně zjednodušený model, který ovšem stále nebude vytržen z reality a jehož pohyby budou svázány platnými mechanickými zákonitostmi.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

V této kapitole jsou uvedeny všechny jevy a zákonitosti, které jsou popisovány ve výstupních animacích. Označení pomocí indexů vychází z (1). Index (d) odpovídá hnací části převodu, index (D) části hnané. Obrázky jsou z literatury (2) a (3).

2.1 Řemenový převod

Převod pomocí elastického pásu obepínajícího vstupní a výstupní řemenici realizuje přenos výkonu za pomoci tření. Kinematicky se podobá převodu ozubenými koly a platí pro něj podobné zákony, které se ovšem v detailech liší na základě níže popisovaných principů. Existuje několik podob řemenového převodu, tato práce bude popisovat variantu tzv. otevřeného opásání (tedy bez zkřížení), která není napínána kladkou.

2.1.1 Vlastnosti převodu

Charakteristickým znakem řemenového převodu je zachování smyslu vstupních otáček také na výstupu. Obvodová rychlost hnací řemenice je v ideálním případě, kdy neuvažujeme skluz (srov. kap. 2.1.3), ve stejné velikosti přenášena řemenem až na hnanou řemenici. Na hnané řemenici je pak sice stejně velká obvodová rychlost, ale zpětným přepočtem na výstupní otáčky dochází k redukci, respektive k multiplikaci, pokud mají řemenice různé průměry. Tento vztah popisuje rovnice (2-1). (1) (2) (3)

$$v = \left| \frac{d_w}{2} \omega_d \right| = \left| \frac{D_w}{2} \omega_D \right| \quad (2-1)$$

Základním tvarem rovnice, která popisuje převod bez skluzu, je následně tato:

$$i = \left| \frac{\omega_d}{\omega_D} \right| = \frac{D_w}{d_w} \quad (2-2)$$

kde

v	ms^{-1}	obvodová rychlost
i	1	převodový poměr
ω_d	rads^{-1}	úhlová rychlost hnací řemenice
ω_D	rads^{-1}	úhlová rychlost hnané řemenice
d_w	m	výpočtový průměr hnací řemenice
D_w	m	výpočtový průměr hnané řemenice

Dynamické vlastnosti převodu v případě zanedbání ztrát rovněž vycházejí z rovnice (2-2) převodového poměru.

$$i = \left| \frac{M_D}{M_d} \right| = \left| \frac{D_w}{d_w} \right| \quad (2-3)$$

kde

M_d Nm točivý moment hnací řemenice

M_D Nm točivý moment hnané řemenice

2.1.2 Silové poměry

Řemen přilehlý na hnací, resp. hnanou řemenici tvoří část oblouku, který lze popsat odpovídajícím výpočtovým průměrem řemenice a úhlem opásání θ . Tento úhel má klíčovou funkci ve výpočtu třecí síly, která realizuje vlastní převod. (2)

$$\theta_d = 180^\circ - 2\arcsin\left(\frac{D_w - d_w}{2a}\right) \quad (2-4)$$

$$\theta_D = 180^\circ + 2\arcsin\left(\frac{D_w - d_w}{2a}\right) \quad (2-5)$$

kde

θ_d ° úhel opásání hnací řemenice

θ_D ° úhel opásání hnané řemenice

a m osová vzdálenost řemenic

Do rovnic vstupují výpočtové průměry řemenic a také osová vzdálenost, která je závislá kromě velikosti řemenic i na (výpočtové) délce pásu, která bývá u řemenů s klínovým průřezem normalizována (obecně u tzv. uzavřených řemenů). Na základě zvolené výpočtové délky řemene L_w lze osovou vzdálenost dopočítat dle rovnice (2-6). (1)

$$a = 0,25 \left\{ \left[L_w - \frac{\pi}{2}(D_w + d_w) \right] + \sqrt{\left[L_w - \frac{\pi}{2}(D_w + d_w) \right]^2 - 2(D_w - d_w)^2} \right\} \quad (2-6)$$

kde

L_w m výpočtová délka řemene

Vlastní třecí síla, která přenáší výkon z hnací části převodu na hnanou, závisí na tzv. Eulerově vztahu suchého pásového tření (2-7). Do tohoto vztahu vstupuje kromě úhlu opásání také součinitel smykového tření f , který je vlastností styku konkrétních druhů materiálů.

$$F_T = e^{f\theta} \quad (2-7)$$

kde

θ	°	úhel opásání řemenice
f	1	součinitel smykového tření

Pro klínové řemeny, kde jsou stykovou plochou boky drážky v řemenici, je součinitel tření přepočítán s ohledem na úhel drážky (1).

$$f_k = \frac{f}{\sin(\alpha/2)} \quad (2-8)$$

kde

f_k	1	součinitel smykového tření mezi boky řemenu a drážky
α	°	úhel drážky řemenice

I v nezátíženém řemenu působí trvale základní síla předpětí F_u . Tato síla působí proti síle odstředivé F_c , která má snahu odtrhávat pás řemene z řemenice. Při přerušení kontaktu řemene s řemenicí dochází k prokluzu a výkon se nepřenáší. Velikost odstředivé síly F_c je závislá na obvodové rychlosti řemenice a na délkové hustotě řemene ρ_l , která je opět charakteristickou vlastností daného řemene.

$$F_c = \rho_l v^2 = \rho_l \omega_d^2 \left(\frac{d_w}{2}\right)^2 \quad (2-9)$$

kde

F_c	N	odstředivá síla řemene
ρ_l	kgm ⁻¹	délková hustota řemene

Síla počátečního předpětí F_u je však závislá na přenášeném točivém momentu (respektive na výkonu a úhlové rychlosti, nebo častěji na otáčkách za minutu). Velikost momentu M_d je dána rovnicí (2-10).

$$M_d = \frac{P}{\omega_d} = \frac{60P}{2\pi n_d} \quad (2-10)$$

kde

M_d	Nm	točivý moment hnací řemenice
P	W	vstupní výkon
n_d	min ⁻¹	vstupní otáčky

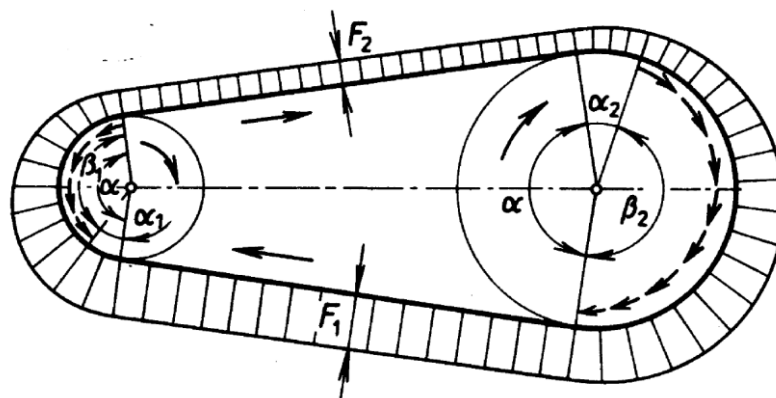
Působení vstupního točivého momentu lze přepočítat na tahovou sílu ΔF .

$$\Delta F = \frac{2M_d}{d_w} \quad (2-11)$$

kde

ΔF	N	tahová síla
------------	---	-------------

Tato síla způsobuje pronutí v napjaté větvi řemene, za kterou táhne hnací řemenice, a naopak zapříčiňuje průhyb v ochablé větvi řemene, která je pomyslně tlačena na řemenici hnanou. Celou situaci výmluvně popisuje obrázek 2-1.



Obr. 2-1 Rozložení sil po neutrálním vlákně řemene (2)

Obrázek zachycuje průběh celkové síly řemene po neutrálním vlákně, tedy v místě nulového napětí od ohybového momentu. Indexování těchto sil je nezávislé na indexech řemenic, jeho účelem je odlišit větší sílu od menší. Vrchní větev řemene je ochablá a síla v ní přenášená se nazývá F_2 ; ta je vždy menší silou z obou zmiňovaných. V napnuté větvi řemene je síla označena jako F_1 , přičemž platí vzájemný vztah (2-12). (1)

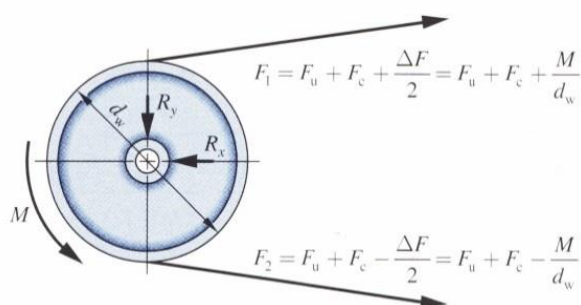
$$F_1 - F_2 = \Delta F = \frac{2M_d}{d_w} = (F_1 - F_c) \frac{e^{f\theta} - 1}{e^{f\theta}} \quad (2-12)$$

kde

F_1 N síla napnuté větve

F_2 N síla ochablé větve

Vlastní složení sil pak popisují následující rovnice (2-12) a (2-13) a obrázek 2-2.



Obr. 2-2 Složení sil větví řemene (1)

$$F_1 = F_u + F_c + \frac{\Delta F}{2} \quad (2-13)$$

$$F_2 = F_u + F_c - \frac{\Delta F}{2} \quad (2-14)$$

kde

F_u N síla předpětí řemene

Vlastní velikosti sil lze kvantifikovat úpravou rovnice (2-12) na tvar (2-15), vyjádříme také velikost síly F_2 v rovnici (2-16). (1)

$$F_1 = F_c + \frac{\Delta F e^{f\theta}}{e^{f\theta} - 1} \quad (2-15)$$

$$F_2 = F_1 - \Delta F \quad (2-16)$$

Dle rovnic (11), (12) a (13) pak získáme velikost síly počátečního předpětí F_u .

$$F_u = \frac{F_1 + F_2}{2} - F_c \quad (2-17)$$

Na základě těchto vzorců jsme schopni pro konkrétní řemenici propočítat průběh sil pro plochý řemen, u něhož se zpravidla zanedbává vliv ohybu kolem řemenice. V případě klínového řemene však dochází tímto ohybem ke vzniku ohybového napětí, které snižuje životnost řemene. Pro potřeby výpočtů lze účinky tohoto namáhání nahradit celkovou ekvivalentní silou, která je součtem vypočtené síly F_2 , resp. F_1 a náhradní síly F_b , která je závislá na průměru řemenice a experimentálně zjištěné konstantě řemene k_1 (1).

$$F_{ed} = F_1 + F_{b1} = F_1 + \frac{k_1}{d_w} \quad (1-18)$$

$$F_{eD} = F_1 + F_{b1} = F_1 + \frac{k_1}{D_w} \quad (1-19)$$

kde

F_{ed} N ekvivalentní síla ochablé větve na hnací řemenici

F_{eD} N ekvivalentní síla ochablé větve na hnané řemenici

F_{b1} N náhradní síla ohybu na hnací řemenici

F_{b2} N náhradní síla ohybu na hnané řemenici

k_1 Nm konstanta tuhosti průřezu řemene

Jelikož jsou tedy obě větve řemenového převodu po dobu chodu pod působením sil F_1 , respektive F_2 , je namáhán samotný řemen, ale tyto síly se vektorově skládají a působí i na ložiska, ve kterých jsou hřídele s řemenicemi uloženy. Tato silová výslednice má tedy význam při výpočtech ohybů hřídelů, příp. životnosti ložisek.

$$\mathbf{F}_A = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad (1-20)$$

kde

\mathbf{F}_A N vektor výslednice sil

\mathbf{F}_1 N vektor síly v napjaté větvi

\mathbf{F}_2 N vektor síly v ochablé větvi

2.1.3 Prokluz

Vlivem pružnosti řemene dochází k jevu zvanému prokluz. Tento jev je závislý na vlastnostech povrchu řemene, řemenice, obvodové rychlosti, předpětí atd. Celý problém lze vysvětlit tak, že ochablá větev řemene vstupuje na hnací řemenici a zde se počáteční síla ochablé větve navýší o tahovou sílu až na hodnotu síly v napnuté větvi. Postupným zvyšováním vnitřní síly v řemeni dochází podle zákonů pružnosti k prodloužení. Při opačném ději, kdy se tahová síla přenáší na hnanou řemenici, dochází k opětovnému smrštění. Toto kolísání délky řemene má pak za následek nižší obvodovou rychlost na výstupu, než jaká byla na vstupu. Pro porovnání těchto rozdílných rychlostí zavádíme součinitel prokluzu. (2) (4) (5)

$$\psi = \frac{v_d - v_D}{v_d} \quad (2-21)$$

kde

ψ	1	součinitel prokluzu
v_d	ms^{-1}	obvodová rychlost hnací řemenice
v_D	ms^{-1}	obvodová rychlost hnané řemenice

Se zohledněním k prokluzu tak můžeme stanovit skutečný převodový poměr.

$$i' = \left| \frac{\omega_d}{\omega_D} \right| = \frac{D_w}{d_w(1-\psi)} \quad (2-22)$$

kde

i'	1	skutečný převodový poměr
ω_d	rads^{-1}	úhlová rychlost hnací řemenice
ω_D	rads^{-1}	úhlová rychlost hnané řemenice

2.2 Řetězový převod

Převod pomocí článkovaného řetězu obepínajícího vstupní a výstupní kolo realizuje přenos výkonu na základě tvarového styku řetězu se zuby řetězových kol. Kinematické chování se velmi podobá řemenovému převodu až na několik výjimek.

2.2.1 Vlastnosti převodu

Zákonitosti převodového poměru řetězového převodu jsou totožné s řemenovým převodem. Obvodová rychlost hnacího kola se přenáší na obvod kola hnaného. Tento vztah popisuje rovnice (2-23), ze které vychází vztah převodového poměru.

$$v = \left| \frac{d_w}{2} \omega_d \right| = \left| \frac{D_w}{2} \omega_D \right| \quad (2-23)$$

$$i = \left| \frac{\omega_d}{\omega_D} \right| = \frac{D_w}{d_w} \quad (2-24)$$

2.2.2 Efekt mnohoúhelníku

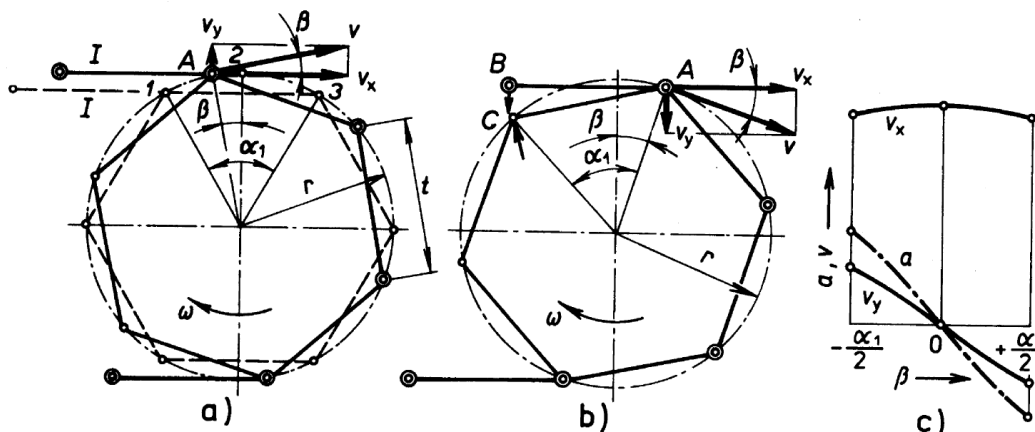
Oproti převodu plochým řemenem, který se plynule odvaluje po hladkých kolech (řemenicích), se jednotlivé články pohybují na řetězovém kole a způsobují tak nerovnoměrný chod. Ozubené řetězové kolo lze totiž nahradit myšleným pravidelným mnohoúhelníkem, který má stejný počet vrcholů, jako má kolo počet zubů. Vzdálenost mezi vrcholy zubů je jedna rozteč řemene a mnohoúhelník je vepsán do roztečné kružnice řetězového kola. Pro velikost roztečné kružnice platí následující vztah. (1) (2) (6) (7)

$$d_0 = \frac{p}{\sin\left(\frac{180^\circ}{z}\right)} \quad (2-25)$$

kde

d_0	m	průměr roztečné kružnice
p	m	rozteč mezi zuby řetězového kola
z	1	počet zubů řetězového kola

Na tento mnohoúhelník přichází řetěz, který je zachycen zubem řetězového kola a následně zvednut do horní úvratě, která nastává při potočení o polovinu úhlu mezi dvěma vrcholy. V druhé části cyklu je pak článek řetězu unášen zuby kola dolů a další jeho kloub zapadne do následného zubu. Tento efekt, probíhající pouze na první rozteči kola, způsobuje zdvihání a nerovnoměrný chod řetězu a jeho účinek roste s klesajícím počtem zubů kola. Na obrázku 2-3 je tento děj zobrazen ve schématu na kole o šesti zubech reprezentovaných vrcholy.



Obr. 2-3 Efekt mnohoúhelníku (2)

Pro kvantifikování účinků tohoto jevu nejprve zavedeme úhel mezi vrcholy γ (odpovídá α na obr 2-3) a úhel pootočení φ (odpovídá β na obr 2-3), který v úvrati nabývá hodnoty 0° .

$$\gamma = \frac{360^\circ}{z} \quad (2-26)$$

$$\varphi \in \left\langle -\frac{\gamma}{2}; \frac{\gamma}{2} \right\rangle \quad (2-27)$$

$$s_\varphi = r_0 \sin \varphi \quad (2-28)$$

$$s_v = r_0 \left(\cos \varphi - \cos \frac{\gamma}{2} \right) \quad (2-29)$$

kde

γ	$^\circ$	úhel mezi sousedními vrcholy náhradního mnohoúhelníku
s_φ	m	horizontální posun řetězu
s_v	m	vertikální posun řetězu
φ	$^\circ$	úhel pootočení řetězového kola

Rychlost řetězu ve vertikálním směru v_y i rychlost ve směru horizontálním v_x vycházejí z obvodové rychlosti v na roztečné kružnici řetězového kola d_0 , která je na tyto složky rozkládána goniometrickými funkcemi dle následných rovnic. (5) (6)

$$v = \frac{d_0}{2} \omega_d = r_0 \omega_d \quad (2-30)$$

$$v_x = v \cos \varphi \quad (2-31)$$

$$v_y = v \sin \varphi \quad (2-32)$$

kde

v	ms^{-1}	obvodová rychlost
v_x	ms^{-1}	horizontální složka obvodové rychlosti
v_y	ms^{-1}	vertikální složka obvodové rychlosti
ω_d	rads^{-1}	úhlová rychlost hnacího kola

Derivací rovnice (2-31) dále určíme zrychlení horizontální složky, která se přímo přenáší do řetězu, způsobuje v něm nežádoucí rázy a snižuje jeho životnost.

$$a_x = \frac{r_0 \omega_d \cos \varphi}{dt} = \omega_d^2 r_0 \sin \varphi \quad (2-33)$$

kde

a_x	ms^{-2}	zrychlení horizontální složky řetězu
-------	------------------	--------------------------------------

Porovnáním extrémů horizontální složky rychlosti, která je okamžitou rychlostí vlastního řetězu před dosednutím na hnací kolo, lze stanovit nerovnoměrnost chodu převodu a podle tohoto kritéria již lze posuzovat vhodnost parametrů navrženého převodu.

$$v_{xmin} = v \cos \frac{\gamma}{2} \quad (2-34)$$

$$v_{xmax} = v \cos(0^\circ) = v \quad (2-35)$$

$$v_{xst} = \frac{v_{xmin} + v_{xmax}}{2} \quad (2-36)$$

$$\delta = \frac{v_{xmax} - v_{xmin}}{2v_{xst}} = \frac{1 - \cos\left(\frac{180^\circ}{z}\right)}{1 + \cos\left(\frac{180^\circ}{z}\right)} = 2 \tan\left(\frac{90^\circ}{z}\right) \quad (2-37)$$

kde

δ	1	nerovnoměrnost chodu řemenového převodu
v_{xmax}	ms^{-1}	maximum horizontální složky obvodové rychlosti
v_{xmin}	ms^{-1}	minimum horizontální složky obvodové rychlosti
v_{xst}	ms^{-1}	střední hodnota horizontální složky obvodové rychlosti

Problém nerovnoměrnosti chodu je tedy závislý na počtu zubů, proto jsou postulovány minimální počty zubů pro dané rychlosti řemene, na které je nutné brát ohled zejména při minimalizaci zástavného prostoru převodu při vlastním návrhu. (2)

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Problematika převodů dala název kurzu 6KT (*Konstruování strojů – převody*) a je jeho stěžejním obsahem. Toto téma je však komplexní a vyžaduje solidní základ a relativně rychlé pochopení hlavních principů, na základě kterých pak studenti musí iterovat své vlastní samostatné práce. Často je nutné brát v potaz i děje, které při běžných rychlostech zůstávají prostému pohledu skryté, jejichž působením však dochází ke změnám parametrů převodu či snižování jeho životnosti. Právě představa, jak se vzájemně parametry převodu ovlivňují, je klíčem k efektivním a vědomým úpravám a modifikacím daného problému, a to nejen ve školním modelovém prostředí.

Dnes si lze jen stěží představit technickou literaturu bez grafického vyjádření skutečnosti, tedy bez schémat, nákresů, grafů, nomogramů a podobně. Hlavním našim problémem je demonstrovat pohyblivý jev v pohybu. Tím, čím by se měly výukové animace lišit oproti těm laicky vytvořeným, je výpovědní hodnota a strážlivý vzhled, který strhává pozornost na klíčové jevy a jejich vývoj v čase.

3.2 Cíl práce

Cílem práce je tedy vytvořit ucelená, kompaktní a schematicky znázorněná videa, která se vždy zaměří na jeden konkrétní děj a která bude možné použít při výkladu látky předmětu *6KT Konstruování strojů – Převody*. Klíčové je simultánní zobrazení vlastního pohybu modelu zároveň s grafem či grafy. Aby mohlo dojít k vjemu společného pohybu graficky znázorněných teoretických veličin a modelu inspirovaného praxí, je nutné dané děje zveličit. To znamená například výrazně snížit rychlosti otáčení na vstupních převodových elementech a pečlivě volit rozsah převodu tak, aby i výstupní otáčky byly lidským okem rozeznatelné. Zároveň je nepřípustné, aby animace obsahovaly hrubé chyby - ať už grafické (např. neprostupnost materiálů), anebo systémové (výpočty veličin).

3.3 Témata animací

3.3.1 Základní závislost kinematických a dynamických veličin na převodovém poměru.

Jako výchozí model je zvolen řemenový variátor se dvěma totožnými protilehlými nesouhlasně orientovanými kužely. Výstupem je dvojice videí:

- a) Cílem je znázornit průběhy výstupních otáček, obvodové rychlosti, výstupního momentu a obvodové síly, v ideálním případě beze ztrát a bez prokluzu.
- b) Cílem je znázornit a porovnat průběhy výstupních otáček, obvodové rychlosti, výstupního momentu a obvodové síly v případě beze ztrát, ovšem se znatelným konstantním prokluzem, který bude rovněž znázorněn.

3.3.2 Silové poměry v řemenovém převodu a jejich průběh po neutrálním vláknu

Jako výchozí model je zvolen jednoduchý převod plochým, respektive klínovým řemenem.

Cílem je znázornit vývoj vnitřní síly v řemenu podél neutrálního vlákna, zobrazit rozdíly mezi napjatou a ochablou větví řemene a zdůraznit rozdíl mezi klínovým a plochým řemenem z hlediska vnitřních sil.

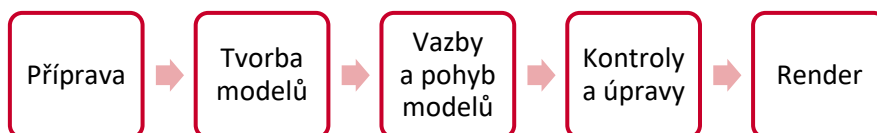
3.3.3 Nerovnoměrnost chodu řetězového převodu

Jako model je zvolen převod s hnacím kolem se šesti zuby. Toto kolo je nahrazeno šestiúhelníkem vepsaným do roztečné kružnice.

Cílem je ukázat pohyb řetězu vstupujícího na řetězové kolo s nízkým počtem zubů a zobrazit průběh jeho rychlosti v závislosti na pootočení.

4 MATERIÁL A METODY

Tato kapitola popisuje celý řetězec metodiky tvorby animace. Pro rychlé zorientování je celý proces zobrazen ve vývojovém diagramu.



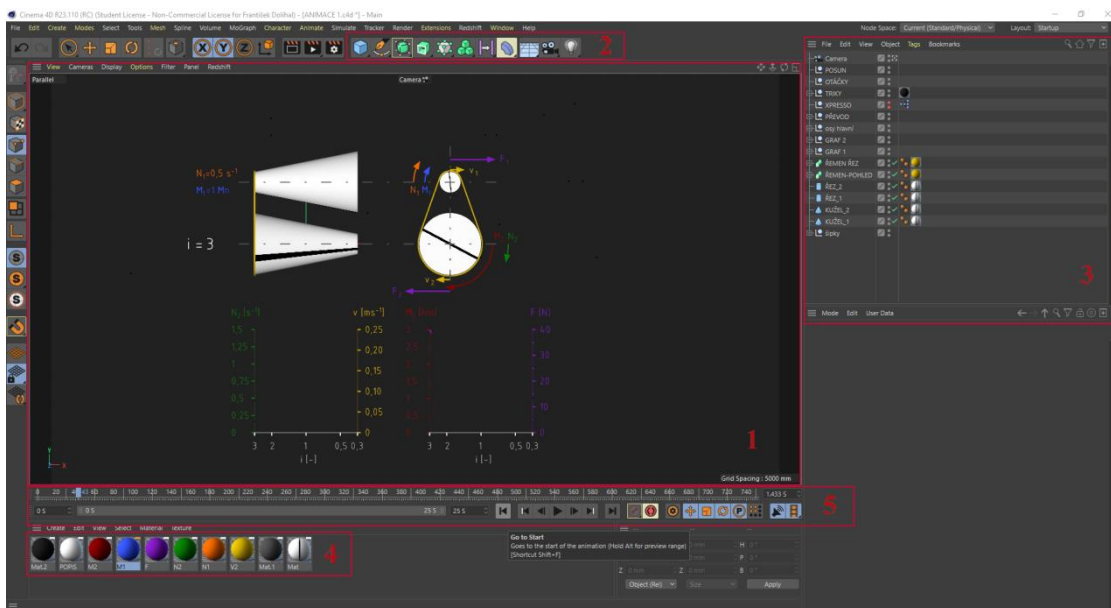
Obr. 4-1 Postup tvorby animací

4.1 Příprava

Na počátku tvorby animace je užší zacílení na daný problém, tedy rozhodnutí, které veličiny budou zobrazeny a které v dané chvíli mohou být opomenuty, aby byl grafický výstup přehledný. Dalším rozhodnutím je volba parametrů, které budou v prvních iteracích (tedy ještě před první prací v 3D modeláři) měněny, aby bylo možné co nejlépe zobrazit žádané průběhy a pohyby. Tyto vstupy jsou tedy svázány dle platných vzorců s výstupy a následně jsou poprvé vypočítány a zobrazeny hodnoty pomocí počítačového programu Microsoft Excel, který umožňuje snadné a rychlé změny parametrů s promptním vykreslením. Jelikož jsou stěžejní součástí animací grafy, je třeba právě nyní rozhodnout o jejich konečném měřítku, které musí být vytvořeno v 3D programu spolu s celkovou modelovou situací.

4.2 Tvorba modelů

Po několika ručních skicách koordinovaných s již vypočítanými a zvolenými grafy začíná práce v 3D modeláři. Pro tvorbu animací jsem zvolil profesionální program Cinema 4D od firmy Maxon. Tento software nabízí mnoho pokročilých funkcí, díky kterým v něm mohou vznikat skutečná umělecká díla (simulace materiálů, fyziky, částic, ...), ovšem jeho skutečná výhoda pro tvorbu přesných animací tkví v intuitivní možnosti vzájemného provázání všech těles, geometrií, textur, barev a pohybů pomocí implementovaného prostředí vazeb za pomoci bloků anebo programovacího jazyka Python.

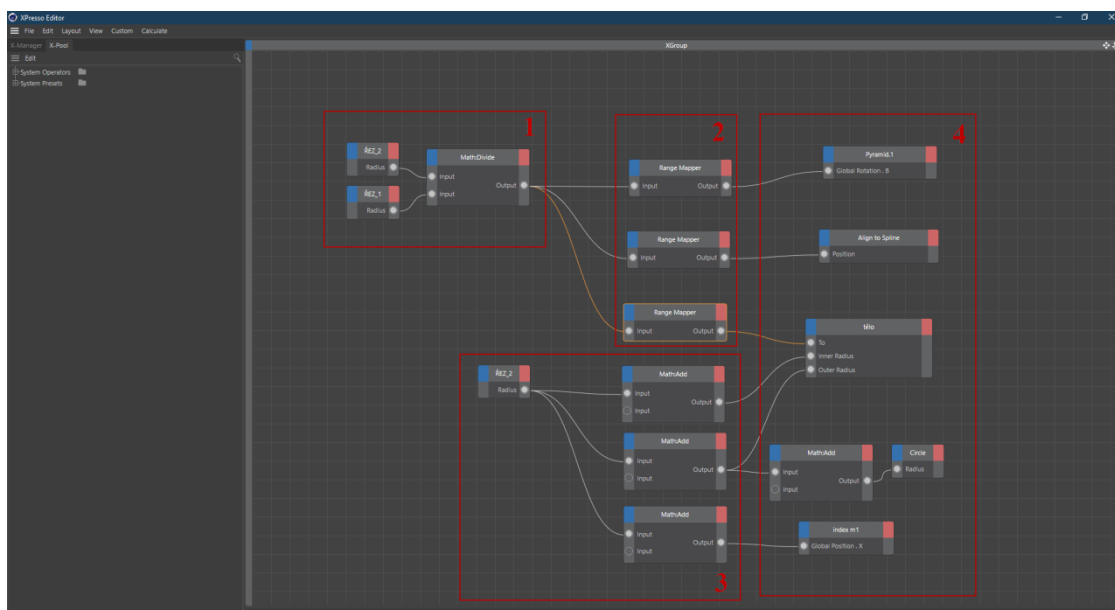


Obr. 4-2 Cinema 4D – základní zobrazení

Uživatelské prostředí v základním zobrazení je znázorněno na obr. 4-2. Oblast **1** zahrnuje pohledy (ať už pomocné, hlavní, nebo vykreslované, tzv. renderované). Pro tvorbu základních geometrií slouží pás ikon v oblasti **2**. Zde jsou obsaženy všechny obvyklé funkce společné všem 3D modelářům (základní tvary, šablonování, extruze, deformace a podobně). Výčet všech vytvořených geometrií (tělesa, rovinné obrazce, aplikované výtvarné povely a vazby) se nachází v oblasti vyznačené číslem **3**. Zde je možnost vše seskupovat a strukturovat do tematických bloků. Tato vlastnost je nezbytná, zvláště když si uvědomíme, že každé těleso, každá šipka, popiska, osa i značka má svou vlastní položku v tomto pomyslném kusovníku a i v pokročilých fázích sestavování modelu musí být dohledatelná k případným korekcím. V oblasti **4** se nacházejí „materiály“, ze kterých jsou tělesa sestavena. V případě těchto animací je důležitá pouze barva, ostatní dynamické vlastnosti jsou potlačeny, jelikož se s nimi dále nepracuje. Vlastní rozpohybování animace je pak dáno časovou osou v poslední oblasti číslo **5**. Zde lze nastavit rovněž délku animace a jakýsi scénář souslednosti různých dějů. Čas je v základním pojetí animace diskretizován po jednotlivých snímcích (anglicky frame) a sekundy jsou vnímány až coby druhotná jednotka, jelikož závisí na počtu snímků za sekundu (frame rate).

4.3 Vazby a pohyb modelů

Jak již bylo zmíněno výše, software disponuje programovacím prostředím, které dovoluje vytvořit vazby mezi danými tělesy a umožňuje tedy převod vzorců (použitých už při prvotní rozvaze) na konkrétní matematizované povely vytvořeným tělesům. Toto prostředí se nazývá XPRESSO. Práce probíhá zejména skládáním bloků se specifickými povely (logickými, matematickými, výtvarnými), ale v případě komplexnějších vazeb lze rovněž program modeláře ovládat i zabudovaným programovacím jazykem Python. Zde jsou nejprve rozpohybovány hlavní modely (kužely, řemenice, řetězy), dále pak i spojnice grafů, šipky označující veličiny na hlavních modelech a popisky těchto šipek.



Obr. 4-3 Cinema 4D – prostředí XPRESSO

Na ukázce práce v programovatelném prostředí XPRESSO (obr. 4-3) je ukázáno zapojení povelů k ovládání jediné (obloukové) šipky, která znázorňuje výstupní otáčky N_3 na proměnném průřezu kuželu variátoru z první animace (na předchozím obrázku znázorněna jako zelená šipka). Každý blok má modře označeny vstupy a růžově výstupy. Nejprve je propočítán aktuální převodový poměr v oblasti 1. V oblasti 2 je výstup převeden pomocí funkce „Range Mapper“ na odpovídající proměnné parametry, kterými jsou zde úhel oblouku a poloha koncové šipky. Jelikož se mění velikost průřezu, na kterém se otáčky zobrazují, je nutné, aby se měnil průměr oblouku šipky, což je pomocí sčítání (funkce „Add“) provedeno v oblasti 3 a všechny tyto vypočtené hodnoty jsou dosazeny do vstupů vlastních geometrií v oblasti 4. Takto je to vytvořeno pro každou znázorněnou veličinu zvlášť. Celá animace má v tomto případě ještě jedno centrální řízení hlavních a závislých pohybů. Vhodnými vazbami je možnost udělat sestavu v programu Cinema 4D jako editovatelnou. To dává možnost vlastní pohyby a jejich sled ještě dodatečně režírovat před vlastním renderem, aniž by tyto struktury musely být znovu přepisovány.

4.4 Kontroly a úpravy

Po dokončení a rozpořbování animace musí následovat ještě fáze drobné editace. Zde se vytváří prvotní hrubé vykreslení (dále jen render), podle kterého lze kontrolovat, jak celá scéna vypadá, ještě před finálním exportem videa. Kromě posledních úprav načasování pohybů (jejich společný začátek, prodlevy v pozicích i konec) je každé veličině přidělena specifická barva, která sjednocuje zejména ty veličiny, které jsou zobrazovány několikrát (graf i model). V neposlední řadě je zde připraveno tmavé pozadí celé animace a je umístěn i model kamery. Na kameře jsou využita pouze nezbytná nastavení: zoom, ohnisková vzdálenost a pozice kamery. Jako poslední je potlačena perspektiva, místo které se využívá tzv. paralelní zobrazení. Díky paralelnímu zobrazení dojde ke správnému složení pohybujícího se prostorového modelu a 2D geometrie, která jej obklopuje. Právě tímto nastavením získá výsledné video technický vzhled a charakter výkresu či schématu.

4.5 Render

Po několika iteračních renderech ve snížené kvalitě jsou nastaveny parametry pro finální vyvedení videa. Jejich volba je motivována především možností promítání na velkém plátně v rámci přednášek, je tedy cíleno na vysokou kvalitu obrazu, který bude dobře čitelný i z větší dálky. Parametry videa zvolené pro výslednou animaci jsou uvedeny v tabulce 4-1.

Tab. 4-1 Vlastnosti renderovaných videí

Grafický parametr	Hodnota
Rozlišení v pixelech	3840 x 2160 (4 K)
Poměr stran	16 : 9
Počet snímků za sekundu	30
Formát souboru	MP4

Každá animace je jinak náročná na výpočet a vykreslení v rámci renderu v závislosti na délce počtu vykreslovaných geometrií a vzájemných pohybech. Tabulka 4-2 nabízí porovnání výsledné velikosti času renderu.

Tab. 4-2 Parametry videí jednotlivých animací

Název animace	Délka videa	Velikost souboru	Čas renderu
1A – Variátor	25 s	6,91 MB	00.33.39
1B – Variátor s prokluzem	25 s	7,56 MB	00.33.31
2 – Řemenice	55 s	11,90 MB	01.13.30
3 – Řetězový převod	25 s	6,43 MB	00.33.49

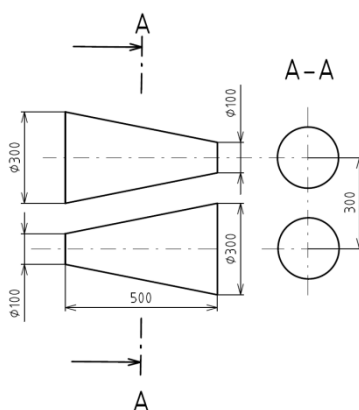
Výpočetně nejnáročnější je jistě poslední animace (3 – Řetězový převod), jelikož je tvořena největším počtem modelů a má též nejrozsáhlejší výpočet v rámci vazeb prostředí XPRESSO, které nerovnoměrný chod řetězu řídí. Nejdéle ovšem zcela logicky probíhal výpočet nejdelší animace, tedy animace řemenice.

5 VÝSLEDKY

V této kapitole jsou jednotlivě představeny dílčí animace. Jejich příprava a vlastní tvorba byly obsahem předchozí kapitoly a technické principy, ze kterých tato zobrazení vycházejí, jsou uvedeny v přehledu současného poznání v kapitole 2.

5.1 Animace 1 – Variátor

První animace zobrazuje dva totožné protilehlé kužele spojené řemenem, které jsou jednou z nejstarších podob variátoru. Rozměry kuželů jsou voleny tak, aby se přibližovaly realitě stran výstupních otáček a obvodových rychlostí. Výsledné rozpětí převodového poměru je zvoleno jako $i_{12} \in \langle 0,3; 3 \rangle$. Základní součást animace je znázorněna na obrázku 5-1.



Obr. 5-1 Základní rozměry fiktivního variátoru

Toto zobrazení modelu variátoru je pak základem pro obě animace variátoru. Součástí obou zmiňovaných animací jsou přilehlé grafy, vektorově zobrazené veličiny a jejich popis. Jelikož jsou tyto animace použitelné i pro vysvětlování vlastností ozubených převodů, byly formálně indexy vstupních veličin na hnacím kuželi označeny jako (2) a výstupní veličiny na výstupním kuželi jako (3), tedy dle označování ozubených soukolí.

5.1.1 Animace 1A (Variátor bez prokluzu)

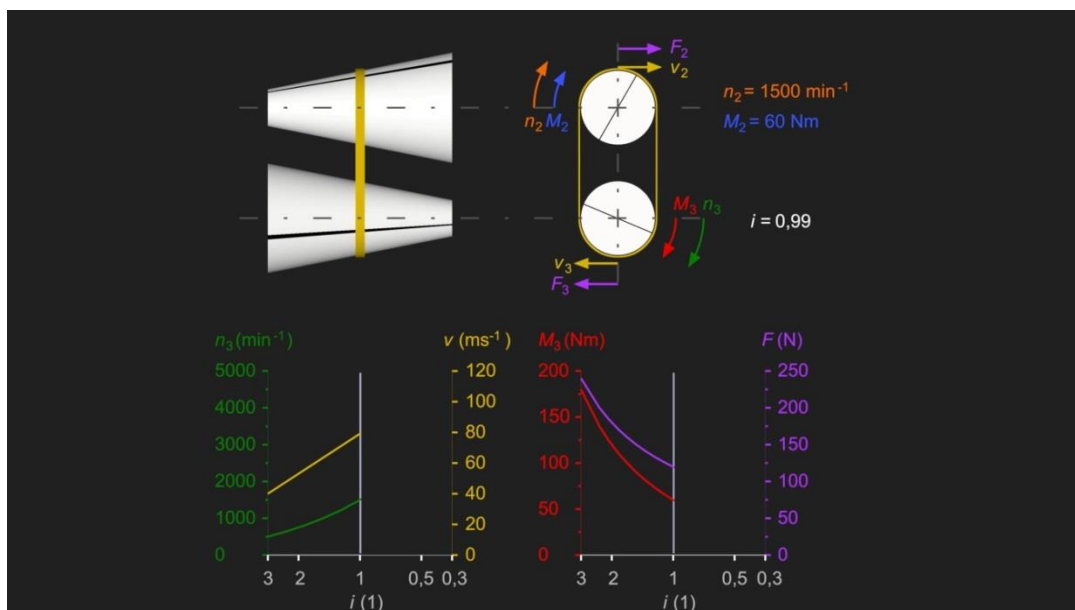
Animace Variátor bez prokluzu (dále jen Animace 1A) je sestavena z:

- hlavního pohledu na rotující kužely s posuvným řemenem
- proměnného průřezu kuželů právě opásaného řemenem
- vektorových znázornění vstupních a výstupních veličin
- dvojice grafů
- popisků veličin

Každá veličina má určenou svoji barvu. Samotný řemen má stejný odstín žluté, jako má obvodová rychlost, protože je to rychlost, kterou se pohybuje, a navíc je žádoucí zdůraznit jeho polohu ve vztahu s nastalým převodovým poměrem.

Tab. 5-1 Barevné schéma animace 1A

Veličina	Barva
Převodový poměr i_{23}	bílá
Vstupní otáčky n_2	oranžová
Vstupní moment M_2	modrá
Obvodová rychlost v	žlutá
Obvodová síla F	fialová
Výstupní otáčky n_3	zelená
Výstupní moment M_3	červená



Obr. 5-2 Animace 1A – základní zobrazení

Konstantními hodnotami fiktivního variátoru jsou vstupní otáčky vrchního kužele $n_2 = 1500 \text{ min}^{-1}$ a vstupní jednotkový točivý moment $M_2 = 60 \text{ Nm}$. Volba těchto hodnot je odkazem na reálný vstup z běžného čtyřpólového elektromotoru. Tyto vstupy jsou hlavními parametry výpočtů výstupních veličin, jejich důležitost je navíc zdůrazněna výpisem hodnot ve stejné barvě, jako jsou zobrazeny jejich vektory. Otáčení dvojice kuželů, respektive jejich průřezů je zvýrazněno černým pruhem na bílém podkladu. Vlastní otáčky kuželů v modelu jsou však zpomaleny, aby byl patrný jejich vzájemný vztah. Vstupní otáčky modelu jsou tedy ve skutečnosti $n_2 = 30 \text{ min}^{-1}$, převodový poměr je ovšem samozřejmě dodržen.

Proměnnými hodnotami, které jsou představeny, jsou obvodová rychlost řemene v , výstupní otáčky n_3 , obvodová síla F , výstupní točivý moment M_3 a momentální převodový poměr i . Graficky jsou reprezentovány vektory v průřezu. Změna velikosti obvodových veličin je znázorněna jako prodlužování, respektive zkracování délky přímkových šipek. Veličiny, které mají svůj vektor kolmý na nákresnu, jsou znázorněny obloukovou šipkou a jejich velikost znázorňuje velikost úhlu jejich oblouku.

Hlavním zobrazením těchto veličin však zůstává dvojice grafů umístěná pod modelem variátoru. Oba grafy se vykreslují v závislosti na pozici řemene a poskytují tak aktuální hodnotu výstupů převodu. První graf, který je zarovnán přímo pod dvojicí kuželů a délkou vodorovné osy, je totožný s délkou kuželů a zobrazuje vývoj kinematických veličin, tedy rychlosti a otáček. Druhý graf stejné velikosti zobrazuje dynamické veličiny (sílu a moment), opět synchronně s pohybem řemene variátoru v hlavním pohledu. Grafickou reprezentací převodového poměru je samotný průřez dvojicí kuželů právě tou rovinou, ve které se nachází řemen variátoru.

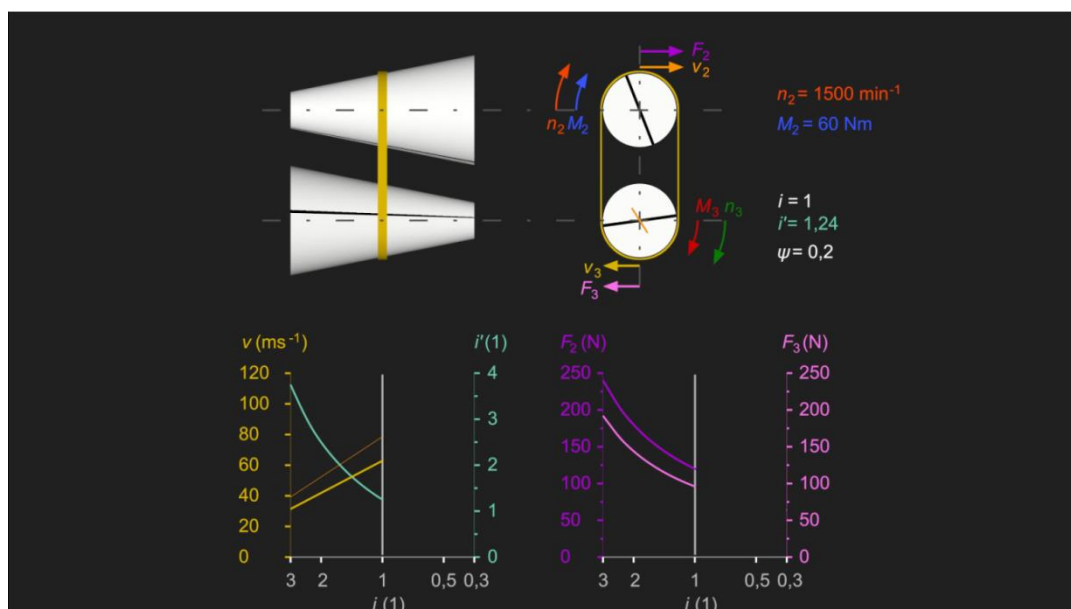
5.1.2 Animace 1B (Variátor s prokluzem)

Animace Variátor s prokluzem (dále jen Animace 1B) je sestavena totožně jako varianta bez prokluzu. Velikost skluzu byla určena jako $\psi = 0,20$, což je záměrným zveličením reality pro potřeby viditelnosti. Každá veličina má stále určenou svoji barvu. Použité barevné schéma vychází rovněž z předchozí animace, ale je rozšířeno o podvojně veličiny, které vlivem skluzu nejsou na výstupu a na vstupu shodné. Tyto dvojice veličin spojuje společná barva, ale v jiném odstínu (viz tab. 5-2).

Tab. 5-2 Barevné schéma animace 1B

Veličina	Barva
Převodový poměr i	bílá
Skutečný převodový poměr i'	tyrkysová
Vstupní otáčky n_2	oranžová
Vstupní moment M_2	modrá
Obvodová rychlost v_2	žlutá – tmavá
Obvodová síla F_2	fialová – tmavá
Obvodová rychlost v_3	žlutá – světlá
Obvodová síla F_3	fialová – světlá
Výstupní otáčky n_3	zelená
Výstupní moment M_3	červená

Zobrazení vektorů zůstává s přihlédnutím k pozměněným barvám totožné. Hlavní změnou prošly grafy. První graf (kinematický), umístěný vlevo, již nezobrazuje výstupní otáčky, ale porovnává rozdílnost výpočtové rychlosti bez prokluzu a skutečné obvodové rychlosti řemene. Dalším parametrem zobrazeným v prvním grafu je skutečný převodový poměr. Druhý graf (dynamický) již pouze porovnává obvodovou sílu výpočtovou a skutečnou.



Obr. 5-3 Animace 1B – základní zobrazení

5.2 Animace 2 (Řemenový převod)

Tato animace znázorňuje průběhy sil v řemenech na jednoduchém otevřeném převodu. Dále bude v této práci zkráceně nazývána jako Animace 2.

5.2.1 Parametry výpočtu

Základní bázi pro výpočty jsou parametry odpovídající realitě (viz tab. 5-3). Podobně jako v předchozí animaci je zvolen čtyřpólový elektrický motor dále jsou vybrány standardní velikosti hnané a hnací řemenice dle tabulek (1). Vlastní velikost převodového poměru zde není podstatná, ovšem pro potřeby animace je klíčové, aby průměry řemenic byly co nejmenší, tedy aby řemen při jejich opásání nabýval co nejvyšší křivosti.

Tab. 5-3 Vstupní parametry výpočtu animace 2

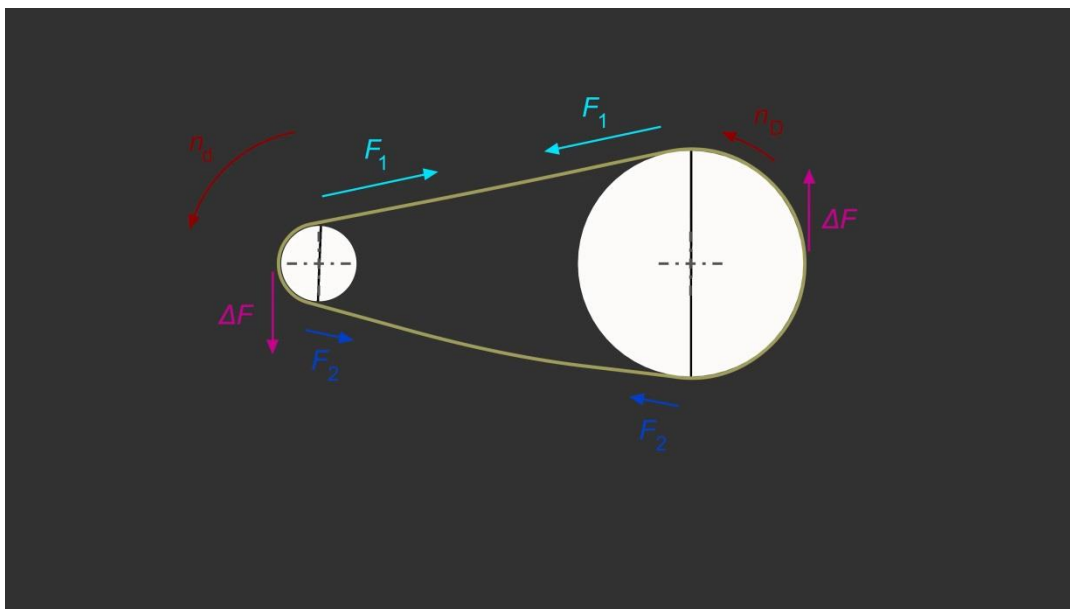
Parametr	Hodnota
d_w	112 mm
D_w	335 mm
n_d	1500 min ⁻¹
P	1500 W
L_w	1600 mm

Pro potřeby zobrazení byla zvolena i standardní normovaná délka (klínového) řemene a na základě ní byla stanovena roztečná vzdálenost. Tato hodnota však do výpočtů nevstupuje a je zobrazena pouze na stupnici vodorovné osy grafu v animaci coby dodatečné měřítko.

5.2.2 Průběh animace

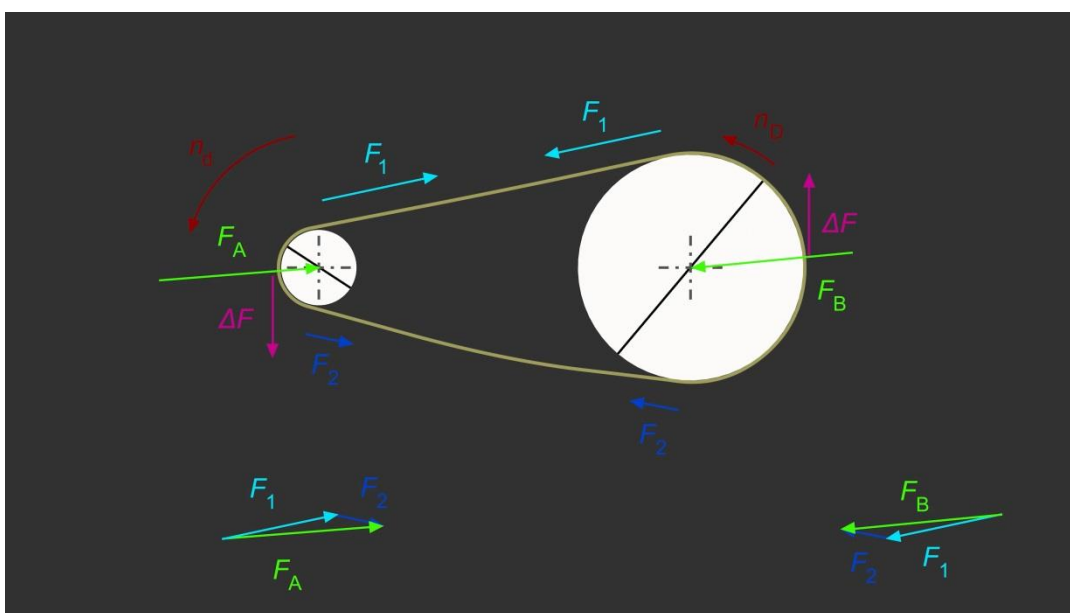
Tato animace pracuje se základním pohledem na dvojici řemenic s řemenem, kolem kterého se postupně zobrazují vektory sil a otáček, hodnoty grafů, a průřezy řemenů. Animace svým uspořádáním cílí přímo na pozornost sledujícího a záměrně ji směřuje na jednotlivé dílčí jevy a problémy postupným vývojem snímku a polohou virtuální kamery.

V první poloze kamery (detail) je představen základní model ve statické podobě a bez zobrazovaných veličin. V dalším okamžiku je spuštěn pohyb modelu a teprve na základě něho se zobrazí základní silové poměry a směr otáčení. Zde je cílem představit pozorovateli rozdíl sil v ochablé a napjaté větvi řemene. Tento rozdíl je určen jako velikostí přenášeného točivého momentu, zde znázorněného pro jednotu jako síla na rameni, kterým je poloměr hnané, respektive hnací řemenice.



Obr. 5-4 Animace 2 – počáteční zobrazení

Po vykreslení sil v řemeni následuje též zobrazení výsledné síly, která je přenášena do ložiska. Tato síla má význam pro mnoho výpočtů ložisek a hřídelí (statické zatížení, cyklické zatěžování, únava, ...), proto je znázorněn její vznik na základě skládání vektorů.



Obr. 5-5 Animace 2 – počáteční zobrazení se skládáním sil

Pro rychlou orientaci v animaci má opět každá veličina přiřazenu svoji charakteristickou barvu (viz tab. 5-4).

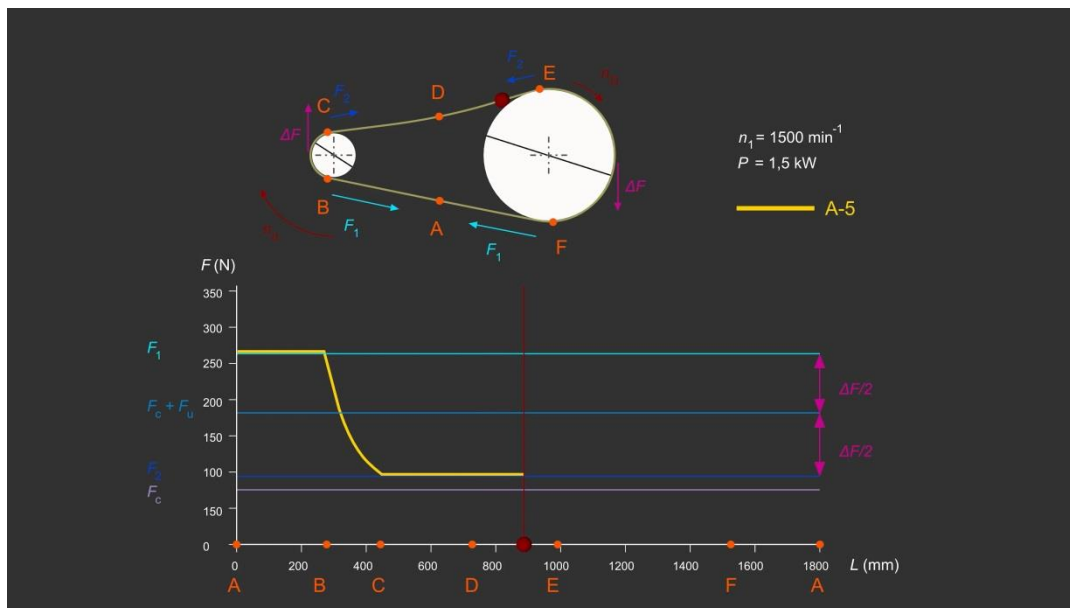
Tab. 5-4 Barevné schéma animace 2

Veličina	Barva
Otáčky n_d a n_D	tmavě červená
Tahová síla ΔF	fialová
Síla napjaté větve F_1	tyrkysová
Síla ochablé větve F_2	tmavě modrá
Střední síla $F_u + F_c$	modrá
Silové výslednice $F_A + F_B$	zelená
Průběh sil plochého řemene	žlutá
Průběh sil klínového řemene	světle zelená
Pozice na řemeni	oranžová

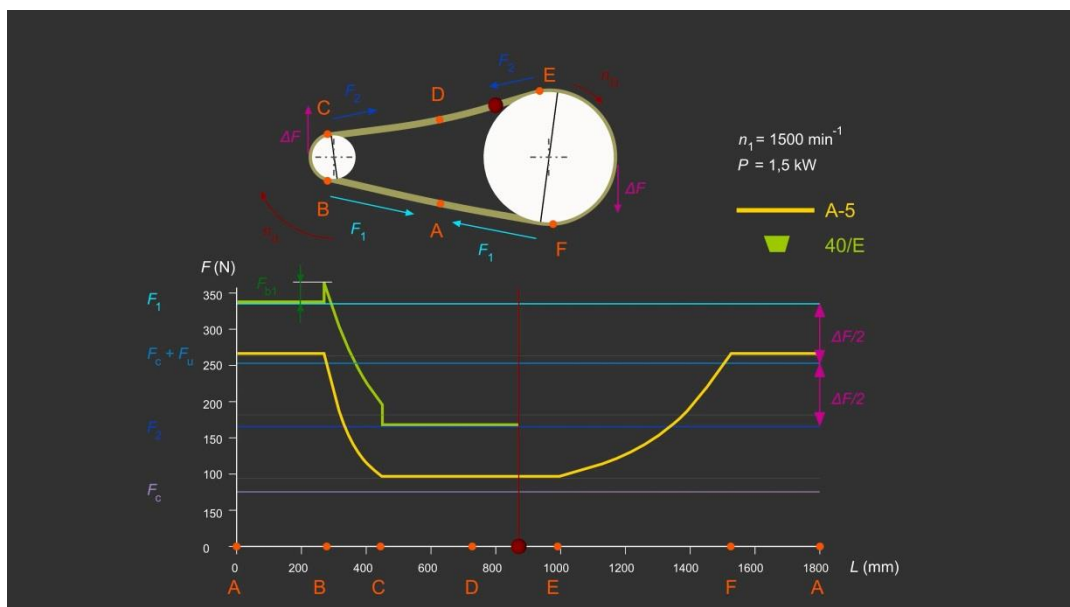
Po zobrazení těchto sil se pohyb řemenice zastaví, veličiny zmizí a následuje nové vykreslení týchž veličin pro rotaci v obráceném směru. Zde již není prezentován nějaký jiný, nový princip, ale má dojít k zopakování a utvrzení těchto základních informací, jelikož z nich vychází druhá polovina animace.

Poté, co se zastaví pohyb v opačném směru, je kamera oddálena od modelu převodu a do popředí se dostává graf, kde je průběh sil vyčíslen. Na řemeni jsou označeny důležité uzly pro snadnější orientaci, které se objeví na vodorovné ose grafu. Objeví se zároveň červená značka v podobě bodu, který postupně putuje celým pásem ve směru otáčení. Zároveň se značkou na páse se pohybuje i červený pruh po vodorovné ose grafu, který za sebou vykresluje aktuální průběh sil v řemeni. Hodnoty jsou vykresleny žlutě, stejně jako popiska, která označuje plochý průřez řemene.

Po vykreslení průběhů sil v plochém řemeni se objeví též popiska zelené barvy, která označuje klínový řemen. Předchozí průběh zůstává zachován a k němu je nyní doplněn průběh pro klínový řemen v odpovídající zelené barvě. Než animace skončí, máme chvíli čas prohlédnout si a porovnat dva rozdílné průběhy.



Obr. 5-6 Animace 2 – následné zobrazení s průběhem sil plochého řemene



Obr. 5-7 Animace 2 – následné zobrazení s průběhem sil v klínovém řemeni

Pro obě tato vykreslení jsou na graf předem naneseny hodnoty sil F_2 , $F_u + F_c$, F_1 a F_c . Vykreslovaný průběh se pohybuje v mezích těchto hodnot, proto tyto hodnoty zlepšují orientaci ve významu grafu. Důležitým významem je také velikost tahové síly ΔF v kontextu celého grafu, je jí proto vyčleněno místo na konci grafu, kde je tato síla zakótována. Při vykreslování druhého průběhu zůstávají šedou barvou tenče naznačeny hodnoty původních sil pro plochý řemen bez popisek. Hodnoty kót pro klínový řemen jsou pak označeny stejným způsobem, navíc k nim přibylo i zakótování síly F_{b1} , resp. F_{b2} v různých odstínech zelené barvy, vzájemně se odlišující, ale blízké barvě vlastního průběhu.

5.3 Animace 3 (Řetězový převod)

Obdobně jako u předchozích bude tato animace dále označována jako Animace 3.

Pro zobrazení nerovnoměrného chodu muselo být z podstaty problému zvoleno hnací kolo s nejnižším možným počtem zubů. Bylo zvoleno kolo s 6 zuby a do dvojice k němu kolo s 12 zuby (to pro vlastní animaci nemá tak důležitý význam).

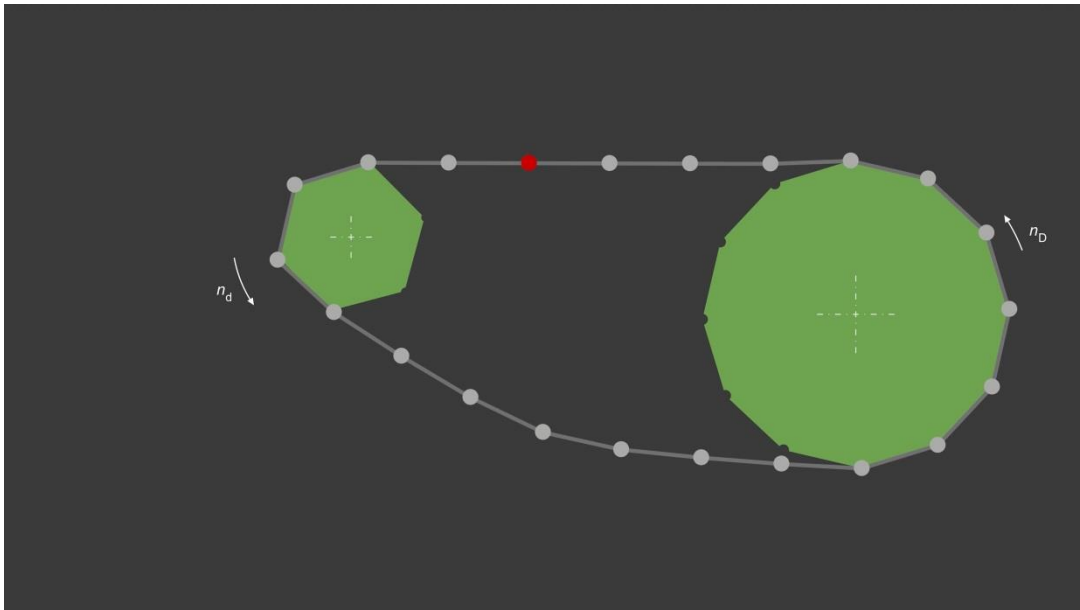
Pro výpočet reálných hodnot byly opět zvoleny vstupní otáčky kola $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ a jedna z normalizovaných roztečí řetězů dle (1) $p = 12,700 \text{ mm}$. Celkovou délku řetězu a roztečnou vzdálenost os kol určuje 22 článků, ze kterých je řetěz složen.

Pro schematicky znázorněné články řetězu i řetězová kola byly záměrně zvoleny bledé odstíny, protože tím hlavním, na co má být upoutána naše pozornost, je jediný bod řetězu a jeho rychlost, zrychlení a pohyb. Tyto zmiňované veličiny jsou zobrazeny sytými barvami, jak popisuje tabulka (5-5).

Tab. 5-5 Barevné schéma animace 3

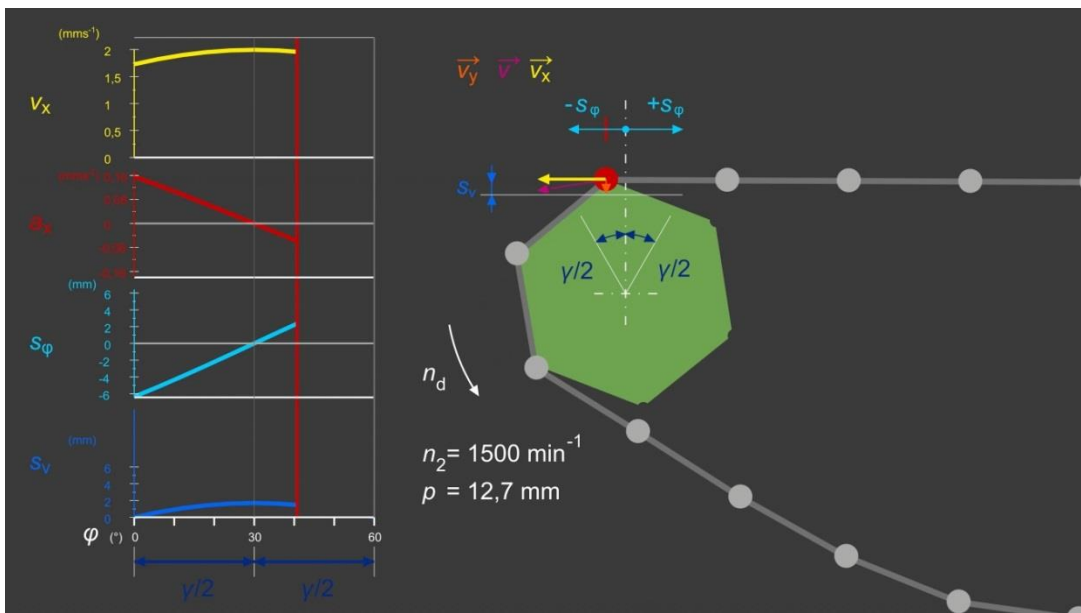
Veličina	Barva
Vstupní otáčky n_d	bílá
Rychlost řetězu v_x	žlutá
Obvodová rychlost v	světle fialová
Rychlost v_y	oranžová
Zrychlení a_x	tmavě fialová
Posun S_v	modrá
Posun S_φ	světle modrá
Úhel mezi vrcholy γ	tmavě modrá
Úhel pootočení φ	bílá

V první části animace je celá situace řetězového převodu představena jako celek. Můžeme pozorovat výkyvy a pulzování rychlosti řetězu na červeně vyznačeném bodu. Tento bod překonává vzdálenost mezi kolem hnaným a kolem hnacím. Těsně před dosednutím na hnací kolo kamera přiblíží detail a nachystají se grafy.



Obr. 5-8 Animace 3 – počáteční zobrazení, celek

V druhé části se zobrazí pomocné a vynášecí čáry na hnacím kole, zobrazí se rozklad rychlostí na označeném bodu a celý pohyb se ještě více zpomalí. Červený bod se už pootočí pouze o 60° , během tohoto času se zároveň s pootočením ve čtveřici grafů se společnou vodorovnou osou postupně vykreslí odpovídající veličiny (v_x , a_x , s_φ , s_v). Kromě složek rychlostí se pro lepší propojení grafu a modelu zobrazují v detailu také posuvy.



Obr. 5-9 Animace 3 – následné zobrazení v detailu s grafy

6 DISKUSE

Animace jsou v důsledku velmi mocným nástrojem pro demonstrování daného děje či problému, jelikož je možné je realizovat na rozdíl od experimentů ve zcela ideálním prostředí. To se samozřejmě může jevit jako naprostá výhoda, ovšem jedná se již o jisté vytržení z reality. Míru tohoto zjednodušení už musí určit inženýrský přístup k vlastnímu problému, tedy nakolik je jistý detail podstatný v rámci celku, tolik mu je věnováno prostoru.

Hlavním rozporem ve výše zmíněných animacích je nepochybně rychlost otáčení. Pro potřeby výpočtu a vyčíslení reálných hodnot jsou zvoleny otáčky, které mohou být označeny za běžně používané, ovšem otáčení vlastního modelu je vždy výrazně zpomalení. Snad by bylo nasnadě zvýraznit, že se zobrazení pohybů nachází ve zpomalení, ale toto by přineslo jen další grafické prvky do animace a přispělo by k vizuálnímu smogu celé scény. Ani nejdelší animace netrvá déle než minutu, proto považuji za důležité udržet animaci střízlivě zaplněnou a vždy přehlednou. Zdůrazňovat tedy tuto informaci po celou dobu animace je zcela zbytečné a lepší je tak učinit slovy ještě před vlastním přehráním.

Posledním problémem, který byl řešen společně pro všechna výstupní videa, byla volba fontu popisku. V první iteraci bylo zvoleno technické písmo ISO-CP, které se běžně používá na výkresovou dokumentaci. Bylo sice dosaženo technického vzhledu animací, ale došlo k závažnému snížení čitelnosti textů. Toto písmo má totiž jednotnou tloušťku, která kdysi vycházela z velikosti hrotu pera. Pro zobrazení různobarevného textu je však vhodnější použít písmo s plnějšími liniemi. Rozhodování tedy bylo mezi dvěma osvědčenými standardy: patkovým písmem Times New Roman a bezpatkovým písmem Arial. V kontextu videí lépe působí písmo bezpatkové, které se technickým vzhledem více podobám fontu ISO-CP, avšak řez písma je tlustší a je tak dobře čitelný i v různých barvách textu.

6.1 Animace 1A, Animace 1B

V první animaci, která zobrazuje ideální variátor, je základní zjednodušení situace pojmenováno již na začátku a považuji toto zjednodušení za žádoucí. Animace je první nejen ve výčtu této práce, ale tvoří i vstup do tematiky převodů jako takových.

Dalším zjednodušením v zobrazení první animace je řemen variátoru, není totiž zobrazován jeho průhyb a není rozlišována ochablá a propnutá větev. Zde je záměr zcela jasný, tento problém je podrobněji popsán v druhé animaci, neboť v úvodní animaci by tentojev, byť zcela přirozený, mohl působit rušivě.

V druhé variantě první animace, která již zmiňuje prokluz řemene, nastává problém u vodorovné osy grafů, která má jako své základní měřítko převodový poměr. Převodový poměr se však mění podle hodnoty skluzu, proto by bylo nutné přechíslovat vodorovnou osu. Cílem v první animaci však bylo sledovat pohyb řemene, se kterým se zároveň mění hodnoty v grafech. Grafy mají délku vodorovné osy stejnou, jako je délka kuželů, a první z grafů je záměrně umístěn přesně pod dvojici kuželů. Měřítko grafů tedy zůstalo nezměněno a tento problém skutečného a teoretického převodového poměru byl naopak ještě využit jako jeden z vykreslovaných průběhů v grafu, tedy závislost skutečného převodového poměru na teoretickém. Pro úplnost jsou tyto veličiny obě vypsány číselně v pravé části snímku.

Významným zveličením je bezesporu hodnota koeficientu prokluzu $\psi = 0,20$, která v reálném prostředí nabývá maximálně hodnoty 0,05 (2). Zde je úprava reality motivována čitelností zobrazení výstupních veličin, které jsou porovnávány s ideálním stavem bez prokluzu. V reálných hodnotách jsou v rozumném měřítku grafů téměř nepostřehnutelné a působí spíše jako chyba. Zde je však záměrem poukázat na vliv skluzu jako takového, například v nelineárním ovlivnění výstupních hodnot.

6.2 Animace 2

Prvním odchýlením od reality je v případě druhé animace neuvažování skluzu. Tento jev byl popsán v druhé variantě předešlé animace a zde by působil matoucím dojmem. V realitě je totiž moment na řemen přenášen jen v části opásaného oblouku (oblouk klidu) a následuje oblouk skluzu, kde již síla v řemeni nabyla svého maxima. (2) Tento jev by ovšem do vykreslených průběhů vnesl jistou nepřehlednost. V tomto případě student vidí, že se síly zvyšují, respektive snižují v oblasti, kdy řemen opásá řemenici, což je záměrem.

Tento jev bývá zobrazován v literatuře dvojím způsobem. Zejména ve starších publikacích je síla v řemeni nanášena přímo na schematické zobrazení řemene podobně, jako tomu bývá u prutových těles v předmětech mechaniky. Toto zobrazení ovšem znesnadňuje odečet velikosti a jeho porovnání. Druhou variantou pak bývá samostatný graf pod obrázkem vlastního převodu. Zde lze přehledně zakotovat všechny síly a pozorovat tak jejich vzájemné velikosti. Nedostatkem této varianty je však její oddělení od modelu. Průběh je pak označován body v charakteristických místech, která jsou shodně označena i na nákresu převodu. Označení je tedy přehledné a jednoznačné, ale za cenu větší hustoty grafických prvků. Animace využívá pro zobrazení přehlednější druhou variantu s vykreslením mimo model, avšak využívá možnost zobrazit označený bod na řemeni, se kterým se pohybuje zároveň značka stejné barvy po vodorovné ose grafu. Toto může být vnímáno jako sofistikovanější paralela studentova ukazováku pohybujícího se po obrázku na stránce učebnice při studiu.

Pro porovnání řemenů a jejich vlastností bylo opět nutno děje zvětšit. Zde byl k tomuto účelu použit stav předdimenzovaných řemenů. Oba použité řemeny se v praxi používají k přenášení řádově vyšších výkonů než zde a to způsobuje problematické chování, jakým je přílišný ohyb na řemenici nebo významně zvětšená odstředivá síla na základě robustnější stavby řemenů a tudíž i jejich délkové hustoty. Navíc se běžně tyto zvolené řemeny v takto malé délce nevyskytují.

Nejprve byl volen průřez řemene klínového (kvůli požadavku na vysoký koeficient k_1 , viz kap 2.1.2). Na základě obsahu průřezu řemene byla zvolena šíře plochého řemene pro podobná zatížení. Oba řemeny mají tedy průřezy o podobné velikosti. Základní parametry pro výpočty poskytuje tabulka 6-1, hodnoty jsou převzaty z odborné literatury (1). Pro porovnání je uveden i minimální průměr řemenice, který bylo nutno významně překročit. V průběhu výpočtů se ukázalo, že i tento extrémní stav, který je již sám o sobě určitým vybočením z reality, je stále graficky nevýrazný, proto byla nakonec hodnota koeficientu síly ohybu zvolena nerealisticky jako $k_1 = 4\,000\text{ Nm}$ (sic!).

Tab. 6-1 Volba řemenů pro animaci 2

Typ	Označení	b (mm)	f (1)	k_1 (Nm)	ρ_l (kgm ⁻¹)	d_{\min} (mm)
Plochý	A-5	120	0,8	–	b·7,3	450
Klínový	E/40	40	0,13	1 226,1	0,8750 2	500

Pro jasné rozlišení obou větví je řemen animován s průvěsem. Tento jev (značně zvýrazněný) zde nabývá pouze estetické funkce, nebyla proto použita hodnota výpočtu reálného prověšení.

6.3 Animace 3

Hlavní změnou oproti realitě byla bezesporu volba počtu zubů řetězového kola. Počet 6 zubů je dostatečným extrémem, který zvýrazní zkoumaný děj, avšak stále je šestiúhelník ztotožnitelný s myšlenou součástí, kterou má být řetězové kolo. Volba šestiúhelníku je v odborné literatuře upřednostňovanou možností, jelikož dovoluje již na první pohled proniknout do problematiky nerovnoměrného chodu. Zcela výjimečně se setkáváme také se čtvercem (tedy řetězovým kolem se čtyřmi zuby).

V případě reálného převodu řetězem se na výsledné nerovnoměrnosti chodu podílí i kolo hnané. Jeho vliv ovšem záměrně není uváděn, jelikož by bylo nutné výsledné působení vzájemně skládat a celá animace by rázem ztratila na přehlednosti.

Dalším zjednodušením v zobrazení animace je samotná reprezentace řetězu. Po vzoru odborné literatury byl řetěz zjednodušen na jednotlivé klouby a jejich tenká spojení. Realistické zobrazení jednotlivých článků by nebylo z hlediska tvorby animace významnou obtíží, ovšem tloušťka a tvar těchto článků by odváděla pozornost a zanášela by celé video možná výtvarně zajímavou, zcela jistě však rušivou grafikou.

V této animaci sice absolutní hodnoty vykreslovaných veličin nehrají příliš podstatnou roli, ale i tak je vhodné je uvést formálně správně. V tomto případě vlivem malého výpočtového průměru hnacího kola nebylo možné rozumně uvádět hodnoty veličin v základních jednotkách, proto je jednotkou dráhy zvolen milimetr a jednotkami rychlosti a zrychlení jsou mms^{-1} a mms^{-2} .

V porovnání s ostatními animacemi je znázornění nerovnoměrnosti náročné a dochází k několika přechodovým jevům, které je nutné minimalizovat, příp. skrýt. Považuji za správné na tomto místě zmínit, že kdyby tato animace byla prohlížena v extrémním zpomalení, patrně by odhalila některé své nedostatky ve vykreslení (například postupné přesouvání kloubů řetězu oproti současnému, nebo skokové chování v místě horní úvrti). Posuzováno však z uživatelského hlediska je animace natolik upravena a ošetřena, že tyto jevy nikterak neruší a mnohým zrakům mohou zůstat skryty.

7 ZÁVĚR

Cíl práce byl stanoven na vytvoření čtveřice animací popisujících vybrané jevy, které nastávají v převodech s ohebnými elementy. Animace jsou graficky uzpůsobeny potřebám přednášek předmětu *Konstruování strojů – převody* a formálně označují zobrazované veličiny v návaznosti na hlavní učebnici tohoto předmětu *Konstruování strojních součástí* (autoři Shigley, Mishke, Budynas).

Struktura práce začíná kapitolou *Přehled současného stavu poznání*, kde jsou uvedeny všechny vzorce, na základě kterých byly animace modelovány. V další kapitole *Analýza problému a cíl práce* jsou stanoveny předpoklady pro využití animací při studiu, byly učeny též formální požadavky a byla vytyčena témata jednotlivých animací. Následující kapitola *Materiál a metody* popisuje cestu od prvotního námětu na animaci a základních výpočetních vztahů až k hotovému videu patřičné vizuální kvality. V rámci této kapitoly je nabídnut též vhled do malého dílčího problému při ovládní geometrií modelu animace, který poskytuje praktickou ukázkou vlastní výtvarné práce v počítačovém programu Cinema 4D. Jednotlivé výstupní animace jsou popsány v kapitole *Výsledky*. Závěrečná kapitola *Diskuse* podrobně rozebírá problematiku rozhodnutí, zjednodušení a kompromisy, které musely být do výsledných animací vneseny. Zde je též nastíněn přínos animace v porovnání s obrazovým statickým schématem včetně závazků, které jsou na animátora kladeny.

Cíl práce byl splněn vytvořením čtyř animací popisujících tři širší tematické skupiny (změna parametrů převodu bez prokluzu a s prokluzem, průběh sil v neutrálním vlákně řemenového převodu, nerovnoměrnost chodu řetězového převodu). Animacemi lze názorně doplnit standartní výuku předmětu *Konstruování strojů – převody* na FSI VUT, o jejich skutečném přínosu ovšem nakonec rozhodnou budoucí ročníky studentů Fakulty strojního inženýrství v Brně.

8 CITOVANÁ LITERATURA

1. SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. *Konstruování strojních součástí*. [překl.] Martin HARTL. Brno : VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
2. BOLEK, Alfred a Josef KOCHMAN. *Části strojů*. 5. přeprac. vyd. Praha : SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1990. Technický průvodce. ISBN 80-03-00426-8.
3. JELASKA, Damir. *Gears and gear drives*. Chichester : Wiley, 2012. ISBN 978-1-119-94130-9.
4. BOHÁČEK, František. *Části a mechanismy strojů*. Vyd. 2., upr. Brno : Vysoké učení technické, 1987. Sv. III, Převody, Celostátní učební texty vysokých škol.
5. HÖFLER, Andreas. How does a belt drive work? *Tec-Science*. [Online] Rheinstetten, 2022. [Citace: 08. 05 2022.]
<https://www.tec-science.com/mechanical-power-transmission/belt-drive/basics/>.
6. NIEMANN, Gustav, NEUMANN, Burkhard a WINTER, Hans. *Maschinenelemente*. Berlin : Springer, 1986. ISBN: 3540103171.
7. SCHLECHT, Berthold. *Maschinenelemente 2*. London : Pearson Studium, 2009. ISBN 978-3-8273-7145-4.

9 SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

a	m	osová vzdálenost
a_x	ms^{-2}	zrychlení horizontální složky řetězu
d_0	m	průměr roztečné kružnice
d_w	m	výpočtový průměr hnací řemenice / hnacího kola
D_w	m	výpočtový průměr hnané řemenice / hnaného kola
f	1	součinitel smykového tření
f_k	1	součinitel smykového tření mezi boky řemenu a drážky
\mathbf{F}_A	N	vektor výslednice sil
\mathbf{F}_1	N	vektor síly v napjaté větvi
\mathbf{F}_2	N	vektor síly v ochablé větvi
F_1	N	síla napjaté větve
F_2	N	síla ochablé větve
F_{b1}	N	náhradní síla ohybu na hnací řemenici
F_{b2}	N	náhradní síla ohybu na hnané řemenici
F_c	N	odstředivá síla řemene
F_{ed}	N	ekvivalentní síla ochablé větve na hnací řemenici
F_{eD}	N	ekvivalentní síla ochablé větve na hnané řemenici
F_u	N	síla předpětí řemene
i	1	převodový poměr
i'	1	skutečný převodový poměr
k_1	Nm	konstanta tuhosti průřezu řemene
L_w	m	výpočtová délka řemene
M_d	Nm	točivý moment hnací řemenice
M_D	Nm	točivý moment hnané řemenice
n_d	min^{-1}	vstupní otáčky
p	m	rozteč mezi zuby řetězového kola
P	W	vstupní výkon
r_0	m	poloměr roztečné kružnice
s_v	m	vertikální posun řetězu
s_φ	m	horizontální posun řetězu
v	ms^{-1}	obvodová rychlost
v_d	ms^{-1}	obvodová rychlost hnací řemenice
v_D	ms^{-1}	obvodová rychlost hnané řemenice

v_x	ms^{-1}	horizontální složka obvodové rychlosti
$v_{x\text{max}}$	ms^{-1}	maximum horizontální složky obvodové rychlosti
$v_{x\text{min}}$	ms^{-1}	minimum horizontální složky obvodové rychlosti
$v_{x\text{st}}$	ms^{-1}	střední hodnota horizontální složky obvodové rychlosti
v_y	ms^{-1}	vertikální složka obvodové rychlosti
z	1	počet zubů řetězového kola
α	$^\circ$	úhel drážky řemenice
γ	$^\circ$	úhel mezi sousedními vrcholy náhradního mnohoúhelníku
δ	1	nerovnoměrnost chodu řemenového převodu
ΔF	N	tahová síla
θ	$^\circ$	úhel opásání řemenice
θ_d	$^\circ$	úhel opásání hnací řemenice
θ_D	$^\circ$	úhel opásání hnané řemenice
ρ_l	kgm^{-1}	délková hustota řemene
φ	$^\circ$	úhel pootočení řetězového kola
ψ	1	součinitel prokluzu
ω_d	rads^{-1}	úhlová rychlost hnací řemenice
ω_D	rads^{-1}	úhlová rychlost hnané řemenice

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Rozložení sil po neutrálním vlákně řemene (2)	17
Obr. 2-2 Složení sil větví řemene (1)	17
Obr. 2-3 Efekt mnohoúhelníku (2)	20
Obr. 4-1 Postup tvorby animací	25
Obr. 4-2 Cinema 4D – základní zobrazení	26
Obr. 4-3 Cinema 4D – prostředí XPRESSO	27
Obr. 5-1 Základní rozměry fiktivního variátoru	30
Obr. 5-2 Animace 1A – základní zobrazení	31
Obr. 5-3 Animace 1B – základní zobrazení	33
Obr. 5-4 Animace 2 – počáteční zobrazení	35
Obr. 5-5 Animace 2 – počáteční zobrazení se skládáním sil	35
Obr. 5-6 Animace 2 – následné zobrazení s průběhem sil plochého řemene	37
Obr. 5-7 Animace 2 – následné zobrazení s průběhem sil v klínovém řemeni	37
Obr. 5-8 Animace 3 – počáteční zobrazení, celek	39
Obr. 5-9 Animace 3 – následné zobrazení v detailu s grafy	39

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1 Vlastnosti renderovaných videí	29
Tab. 4-2 Parametry videí jednotlivých animací	29
Tab. 5-1 Barevné schéma animace 1A	31
Tab. 5-2 Barevné schéma animace 1B	33
Tab. 5-3 Vstupní parametry výpočtu animace 2	34
Tab. 5-4 Barevné schéma animace 2	36
Tab. 5-5 Barevné schéma animace 3	38
Tab. 6-1 Volba řemenů pro animaci 2	42

12 SEZNAM PŘÍLOH

Video 1	Animace 1A.mp4
Video 2	Animace 1B.mp4
Video 3	Animace 2.mp4
Video 4	Animace 3.mp4