Vážená komise, milí spolužáci, rád bych Vám představil obhajobu mé seminární práce na téma „Počítačové modelování dynamických magnetických systémů a vývoj magnetických převodovek“.

Tato práce se zároveň uchází o zapojení do soutěže SOČ.

-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Ze začátku bych chtěl představit úlohu, kterou je tato práce inspirována.

Jedná se o 10. úlohu letošního Turnaje mladých fyziků, která se zabývá prstovými točítky (anglicky fidget spinnery), které jsou osazeny magnety.

Naším úkolem v této úloze je sledování a popis jejich vzájemné interakce.

Naše řešení, které v této prezentaci představím, obsahuje: …

a jako poslední se budeme zabívat

Nakonec se podíváme i na to, jak můžeme pomocí získaných poznatků vytvořit efektivnější magnetickou převodovku.

-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Prvním krokem našeho řešení bylo úvodní sledování, z něhož jsme si odnesli několik poznatků.

1. Rychle rotující spinner se chová jako permanetnní magnet.
2. Pomalé spinnery se schovají chaoticky
3. Více spinnerů se též chová chaoticky

-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Když už jsme si problém osahali, přichází na řadu druhý krok a tím je určení relevantních parametrů.

Ty si rozdělíme do několika kategorií:

1. konfigurace, která zahrnuje pozice, rychlosti a nasměrování magnetů
2. dále tření, ke kterému se dostaneme za chvíli
3. vlastnosti spinneru jako velikost a moment setrvačnosti
4. nakonec vlastnosti magnetů - jako síla a velikost

-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

A nyní se dostáváme k modelu.

Náš model aproximuje každý magnet jako jeden magnetický dipól, jehož velikost můžeme šikovně určit pomocí tzv. remanence.

Remanence je magnetizace, kterou si látka udržuje po odstranění vnějšího magnetického pole, a závisí na materiálu, ze kterého je magnet.

Tento model je pro nás dobrý, protože magnety jsou relativně malé a můžeme pomocí něho jednoduše vypočítat síly a momenty sil působící mezi dvěma magnety.

Mezi další jevy, které však nejsme schopni simulovat, patří nějaké koncentrické síly na ložisko nebo oscilace a chrastění ložisek.

-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Pro naši simulaci budeme potřebovat určit remanenci našich magnetů, k čemuž použijeme předchozí dva vzorce.

Ty lehce upravíme a získáme tím 2 možnosti pro určení remanence.

V experimentu poté jednoduše určíme sílu mezi magenty pomocí váhy, nebo změříme magnetické pole pomocí magnetometru v mobilním telefonu.

-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Vlevo můžeme vidět záznam měření magnetometrem.

Toto měření probíhá tak, že magnet přiblížíme jedním pólem k telefonu a poté ho otočíme druhým směrem. Z rozdílu pak dostaneme dvojnásobek velikosti magnetické indukce.

Vpravo jsou výsledky měření pomocí váhy.

Zde je dobré zmínit, že námi naměřená data klesají se 4. mocninou vzdálenosti, jak bychom očekávali z předchozí rovnice.

-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Výsledky všech měření pak byly shrnuty v pravém grafu.

Z něj můžeme vyčíst, že remanence se v závislosti na vzdálenosti nemění a je konzistentní mezi měřeními, jak bychom doufali, jelikož se jedná o materiálovou vlastnost.

Zároveň si můžete všimnout, že jiný, větší a starší, magnet má remanenci o něco nižší.

-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Další hodnotou potřebnou pro naší simulaci je moment setrvačnosti spinneru.

Ten můžeme určit pomocí modelu fyzického kyvadla – nesymetricky zatížený spinner jednoduše zavěsíme a necháme oscilovat.

Z frekvence jsme pak schopni dopočítat hodnotu momentu setrvačnosti, která je srovnatelná s externími zdroji.

-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Poslední jev, který musíme simulovat, je tření.

Ze sledování jsme odhadli, že hlavní třecí složky budou pocházet z:

1. tření uvnitř ložiska, které je nezávislé na rychlosti a označíme ho alfa
2. a z turbulentního odporu vzduchu, který roste kvadraticky s rychlostí a označíme ho gamma

Nakonec jsme se snažili zakomponovat i lineární složku beta, ale ukázalo se, že ta není fyzikálně signifikantní a tak jsme ji později zavrhli.

Pomocí těchto dvou/tří koeficientů můžeme sestavit diferenciální rovnici, která má analytické řešení.

-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Na tomto slidu můžete vidět srovnání našeho analytického řešení (červeně) s naměřenou rychlostí spinneru (zeleně).

Vlevo nezapočítáváme lineární koeficient, vpravo ano. V obou případech je však shoda velmi dobrá.

-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

A nyní se konečně dostáváme k samotné simulaci.

Jedná se o diskrétní simulaci, což znamená, že se pomocí nějakých pravidel snažíme předpovědět budoucí stav ze stávajícího stavu.

Tomuto procesu rozdělení nějakého spojitého jevu na diskrétní momenty se říká časová diskretizace.

Začáteční stav spinneru tedy obsahuje všechny potřebné informace, jako pozici, rychlost a úhel

a z těch poté vypočítá moment síly působící na spinner kvůli magnetickým interakcím.

Řídící rovnice jsou zde:

Moment síly, neboli změna momentu hybnosti je součet všech interakcí externích magnetů.

A silová a momentová složka je popsána takto.

K dalšímu zpřesnění simulace ještě využíváme metodu Runge-Kutta 4. stupně.

-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Celý průběh simulace pak můžeme shrnout v tomto vývojovém diagramu:

1. Vytvoříme simulační kontext a definujeme simulační parametry a všechny spinnery
2. Vytvoříme tzv. phi-stav, který se stará o integraci úhlové rychlosti, abychom získali nový úhel
3. Pro toto je však ještě potřeba provést druhou integraci, abychom z momentu síly získali novou úhlovou rychlosti
4. Tento proces opakujeme jak dlouho se nám zlíbí

-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Nyní se vrátíme k experimentům a podíváme se na magentické vázání.

Pokud máme dva spinnery a jeden z nich roztáčíme motorem, ten druhý se může začít také točit a udržovat si svou rychlost.

Toto je magnetická vazba.

Zároveň jsme však schopni vytvářet i jiné módy vazeb, což znamená, že poměr otáčení není pouze 1:1.

Můžeme tedy mít hnací spinner, který se otáčí nějakou rychlostí, ale hnaný spinenr se otáčí poloviční, nebo dvakrát vyšší, rychlostí.

-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Na těchto výsledcích našich měření můžeme sledovat hned několik módů.

Nejzajímavější je však případ 2:1, kdy hnaný spinner spadnul z vyššího módu na mód nižší, kolem kterého osciloval.

Podobná oscilace je i u módu 1:1.

-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tuto oscilaci kolem nějakého rychlostního ekvilibria jsme byli schopni také simulovat, jak je možné vidět na tomto grafu.

-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Když už víme, že jsme schopni vazbu vytvořit, přichází otázka toho, jak velký moment síly jsme pomocí ní schopni přenést.

Abychom toto zjistili, upravili jsme hnaný spinner tak, že jsme k němu připevnili lehkou brzdnou vrtuli.

Tímto jsme zvýšili odpor vzduchu, což bude naše zátěž.

Přenesený moment síly pak poměrně jednoduše dopočítáme pomocí nejvyšší dosažené rychlosti, při které se vazba nerozbije.

-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Přenesený moment jsme pak sledovali v závislosti na dvou parametrech: vzdálenosti spinnerů a počtu magnetů.

Moment roste přibližně lineárně s počtem magnetů, ale opět klesá se čtvrtou mocninou vzdálenosti.

Přenesený moment síly je však velmi malý.

-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Na principu podobném našim spinnerům fungují i magnetické převody, které jsou řádově silnější.

Hlavním rozdílem mezi spinnery a mag. převodovkami je použití pólových párů s opačnými póly vedle sebe.

Tímto se vytvoří takový pomyslný magnetický zub a pomocí toho jsme schopni vytvořit magnetické ekvivalenty všech možných ozubených soukolí.

Lepší jsou však magnetické převody, které používají tzv. modulátor.

-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Modulátor, jak již z názvu vyplývá, moduluje magnetický tok tak, aby perioda vnějšího rototu odpovídala periodě vnitřního rotoru.

K modulování se používají látky s vysokou permeabilitou a počet modulátorových nástavců musí být roven součtu vnitřních a vnějších pólových párů.

Modulace funguje tak, že každý modulátorový nástavec je posunut o krapet menší úhel, než je úhel mezi vnějšími pólovými páry.

Tím získáváme plynulou vlnu, jejíž perioda je stejná jako perioda vnitřního rotoru.

…

-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

A nyní se dostáváme k mému vlastnímu návrhu, který máte před sebou.

Jedná se o modulátorovou převodovku s převodem 1:3.

Byla navržena v programu Fusion 360 a skládá se z 5 částí.

Vnitřní rotor má 4 PP, vnější 12 PP a tedy 16 modulátorových nástavců.

-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Zde je detail a řez návrhem.

Vlevo vidíme modulátor s drážkami na vložení nástavců.

Uprostřed je vnější rotor, který v sobě má 24 otvorů pro magnety.

Vpravo je vidět řez modelem.

-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Nakonec bych rád celou prezentaci shrnul:

1. Byl dosažen hlavní cíl, kterým bylo sestrojení modulátorové magnetické převodovky.
2. Dále bylo popsáno magnetické vázání a přenos momentu síly
3. Byla vytvořena a ověřena simulace
4. byl nalezen analytický popis třecích sil působících na spinner
5. A nakonec byly představeny metody jako měřit moment setrvačnosti a remanenci.