

ANALYSIS OF DYNAMIC STRESS OF PLANETARY TRANSMISSIONS

V. Neumann*

Summary: *This benefit is dealing with dynamic stress of planetary transmission elements. Solving of this problems is fixated to change planetary transmission elements load at shifting. In the benefit is effected movements analysis of planetary transmission. There are fixed the sizes of inertial forces and moments, which are rising at the main planetary transmission element, in the benefit. The results are administered to more detailed specifications of planetary transmission load. Analysis of dynamic stress has foundation in determination of planetary transmission elements load and it can be used for preliminary thermal calculation of planetary transmission control elements. It is also very important in projecting changes of controlling mechanism including its automatic control.*

1 Úvod

U současných bojových pásových vozidel se používají především planetové převodovky. Změna převodového poměru se u těchto převodovek realizuje propojováním nebo bržděním prvků planetové řady, zpravidla třecími elementy (spojky, brzdy). U tohoto systému řazení se mění nejenom otáčky jednotlivých prvků, ale tím, že jsou na každý rychlostní stupeň propojeny nebo bržděny jiné prvky planetové řady, dochází k tomu, že se mění počet rotujících prvků a tím i celková hmotnost rotujících částí. Především změna celkové hmotnosti rotujících částí a změna otáček má za následek vznik setrvačných momentů, které výrazně dynamicky zatěžují prvky planetové převodovky.

Analýza dynamického namáhání planetových převodovek zahrnuje vyšetření vzniku setrvačných momentů při řazení jednotlivých rychlostních stupňů. Důležitými parametry pro provedení dynamické analýzy jsou moment setrvačnosti a úhlová zrychlení jednotlivých prvků planetových řad. Při výpočtu úhlových zrychlení se vychází z výsledků analýzy planetové převodovky při statickém zatížení.

2 Setrvačný moment

Setrvačný moment vzniká od setrvačných sil všech rotujících částí převodovky při změně rychlosti otáčení. Jeho hodnota je závislá na hmotnosti rotujících částí, jejich průměru a gradientu zrychlení.

* Ing. Vlastimil Neumann, Vojenská akademie v Brně, Fakulta vojenských technologií, Kounicova 65, 612 00 Brno, Tel.: +420 973 443 429, E-mail: Vlastimil.Neumann@vabo.cz

Pro případ otáčivého pohybu tělesa kolem pevné osy je dán obecně známým vztahem:

$$M_s = I \cdot \varepsilon$$

kde: ε - úhlové zrychlení
I – moment setrvačnosti

2.1 Moment setrvačnosti

Moment setrvačnosti lze chápat jako míru setrvačnosti tělesa při jeho otáčení. Závisí na rozložení hmoty tělesa vzhledem k dané ose otáčení. Pro případ tuhého tělesa, které se otáčí kolem pevně zvolené osy, je moment setrvačnosti konstantní, toto je velmi podstatná vlastnost, která usnadňuje další úvahy. Osu otáčení je nutno jasně zadat, neboť velikost momentu setrvačnosti na ní výrazně závisí.

Je-li těleso složeno z jednotlivých těles, lze jeho moment setrvačnosti snadno určit, součtem momentů setrvačnosti jednotlivých těles :

$$I = \sum m_i \cdot r_i^2$$

Je-li však hmota tělesa rozložena spojitě, je třeba nahradit tento součet integrálem. Moment setrvačnosti je pak definován jako :

$$I = \int r^2 \cdot dm_i$$

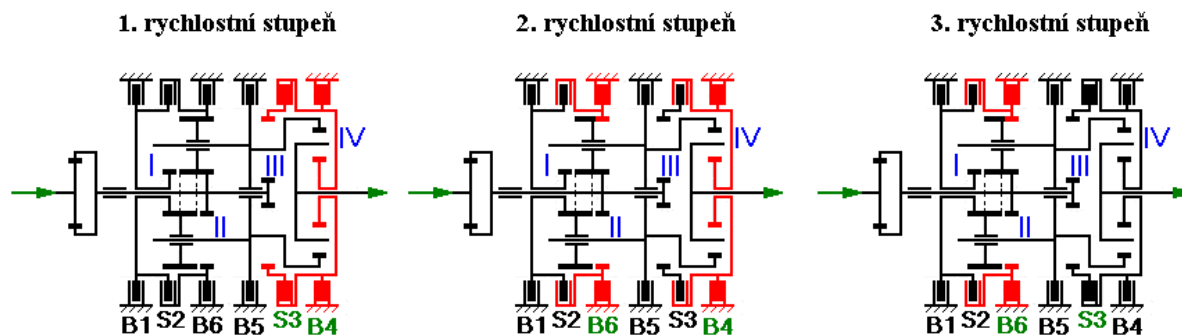
kde: r – poloměr tělesa
 m – hmotnost rotujících prvků

Z uvedených vztahů je patrné, že změna momentu setrvačnosti je závislá na změně hmotnosti rotujících prvků.

2.1.1 Změna hmotnosti rotujících prvků

Při řazení rychlostních stupňů se v planetové převodovce, na rozdíl od převodovky s pevnými osami, mění počet otáčejících se prvků a tím se tedy mění i hmotnost otáčející se soustavy, což způsobuje změnu momentu setrvačnosti.

Na obr. 1 je kinematické schéma planetové převodovky tanku T-72. Jsou zde znázorněny prvky které jsou zabržděny při zařazeném 1., 2. a 3. rychlostním stupni. Červeně označené prvky jsou zabržděny - stojí, ostatní prvky se otáčejí. Zeleně označené ovládací prvky jsou sepnuty.



obr. 1 – znázornění změny rotujících hmot při změně převodového poměru

Na obr 1. je názorně vidět, že při řazení dochází k tomu, že se určité prvky planetové řady během krátké doby řazení zabrzdí, nebo naopak roztočí, může také dojít k situaci, kdy prvek planetové řady změni smysl otáčení. Při řazení tedy dochází jednak ke změně otáček, ale také ke změně celkové hmotnosti rotujících prvků. Tyto děje způsobují v planetové převodovce vznik setrvačných momentů, které mají výrazně dynamický charakter.

2.2 Úhlové zrychlení

Jestliže není úhlová rychlost rotujícího tělesa konstantní, má těleso nenulové úhlové zrychlení. Úhlová rychlost tělesa v okamžiku t_1 má hodnotu ω_1 a v okamžiku t_2 má hodnotu ω_2 , pak průměrné úhlové zrychlení rotujícího tělesa v časovém intervalu od t_1 do t_2 vyjádříme vztahem:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

kde: ω_1 - úhlová rychlost prvků planetové řady před zařazením rychlostního stupně
 ω_2 - úhlová rychlost prvků planetové řady po zařazení rychlostního stupně
 Δt - doba řazení

Doba řazení rychlostních stupňů závisí na druhu převodovky a na ovládacím ústrojí převodovky, viz. tab. 1.

Druh převodovky a řadicího ústrojí	Doba potřebná k řazení [s]
převodovka s pevnými osami a posuvnými koly	2 – 3
převodovka s pevnými osami a řadicími objímkami	1,5 – 2
převodovka s pevnými osami a synchronizátory	1 – 1,5
planetová převodovka	0,5 – 1
planetová převodovka s automatickým řazením	0,2 – 0,5

tab. 1 – závislost doby řazení na převodovce a ovládacím ústrojí

Z tab. 1 vyplývá, že při změně ovládání převodovky se mění doba řazení a tím i úhlové zrychlení jednotlivých prvků planetové převodovky, se zkracující dobou řazení roste zatížení ovládacích prvků převodovky.

3 Aplikace analýzy

Provedl jsem analýzu dynamického namáhání pouze převodovky tanku T-72. Potřebné vstupní hodnoty jsem získal z analýzy při statickém zatížení. Výsledky jsou uvedeny v následujících tabulkách.

rychlostní stupeň		N→1	N→2	N→R	1→2	2→3	3→4	4→5	5→6	6→7
ϵ_1	[rad/s ²]	-42	-79	0	-159	-68	-114	0	-112	+168
ϵ_{01}		-20	-37	0	+13	+56	+34	+88	+35	+168
ϵ_1'		0	0	0	+168	+168	+168	+168	+168	+168
ϵ_{s1}		+14	+25	0	+270	+242	+256	+220	+256	0
ϵ_2'		-30	-56	0	-65	0	-32	+48	-31	+168
ϵ_{s2}		-60	-112	0	-297	-168	-232	-71	-229	0
ϵ_3'		-24	-45	0	-21	+31	0	+71	+6	+168
ϵ_{s3}		-31	-58	0	-74	-7	-40	+44	-39	0
ϵ_4		0	0	+24	0	-21	+52	-47	+118	-112
ϵ_{04}		-14	-25	+8	+9	+31	+40	+45	+61	+79
ϵ_{s4}		-38	-70	-21	+24	+105	+204	-103	-139	-635

tab. 2 - velikost úhlového zrychlení jednotlivých prvků planetových řad při řazení

Z hodnot úhlových zrychlení (tab. 2) jsem odhadl prvky s největší pravděpodobností vzniku setrvačného momentu. Jsou to prvky:

- centrální kolo 1. planetové řady při řazení z neutrálu na 2., z 1. na 2., z 3. na 4., z 5. na 6. a z 6. na 7. rychlostní stupeň
- unašeč 1., 2. a 3. planetové řady + korunové kolo 4. planetové řady při řazení z 4. na 5. a z 6. na 7. rychlostní stupeň
- satelity 1. planetové řady při řazení z 1. na 2., z 2. na 3., z 3. na 4., ze 4. na 5. a z 5. na 6. rychlostní stupeň
- centrální kolo 2. planetové řady + centrální kolo 3. planetové řady + hnací hřídel při řazení z 1. na 2., z 2. na 3., z 3. na 4., ze 4. na 5., z 5. na 6. a z 6. na 7. rychlostní stupeň
- korunové kolo 2. planetové řady při řazení z 6. na 7. rychlostní stupeň
- satelity 2. planetové řady při řazení z neutrálu na 2., z 1. na 2., z 2. na 3., z 3. na 4., ze 4. na 5. a z 5. na 6. rychlostní stupeň
- korunové kolo 3. planetové řady při řazení z 6. na 7. rychlostní stupeň
- satelity 3. planetové řady při řazení z 1. na 2. rychlostní stupeň
- centrální kolo 4. planetové řady při řazení z 5. na 6. a z 6. na 7. rychlostní stupeň
- unašeč satelitů 4. planetové řady při řazení z 6. na 7. rychlostní stupeň
- satelity 4. planetové řady při řazení z neutrálu na 2., z 2. na 3., z 3. na 4., ze 4. na 5., z 5. na 6. a z 6. na 7. rychlostní stupeň

rychl. stupně		N→1	N→2	N→R	1→2	2→3	3→4	4→5	5→6	6→7
$M_{sc1} +$ $M_{s2} +$ M_{s3}	[Nm]	0	0	0	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25
M_{s1}		-11,65	-21,65	0	-43,76	-18,77	-31,29	0	-30,75	46,13
$M_{s01} +$ $M_{s02} +$ $M_{s03} +$ M_{s4}'		-8,47	-15,75	0	5,42	23,63	14,50	37,32	14,90	70,96
M_{ss1}		-1,91	-3,54	0	1,22	5,32	3,26	8,40	3,35	15,97
M_{s2}'		-3,25	-6,04	0	-6,98	0,00	-3,49	5,24	-3,35	18,13
M_{ss2}		-1,85	-3,44	0	1,18	5,16	3,16	8,14	3,25	15,48
M_{s3}'		-1,85	-3,43	0	-1,58	2,37	0,38	5,37	0,49	12,68
M_{ss3}		-1,62	-3,01	0	1,03	4,51	2,77	7,12	2,84	13,54
M_{s4}		0	0	7,60	0	-6,49	16,22	-14,68	36,69	-34,69
$M_{sný} +$ M_{s04}		-0,88	-1,64	0,00	0,56	2,46	1,51	3,89	1,55	7,39
M_{ss4}		-1,25	-2,33	0,72	0,80	2,88	3,68	4,15	5,64	7,23
M_{ss01}		0,03	0,05	0	0,59	0,53	0,56	0,48	0,56	0
M_{ss02}		-0,09	-0,17	0	-0,44	-0,25	-0,35	-0,11	-0,34	0
M_{ss03}		-0,28	-0,52	0	-0,66	-0,06	-0,36	0,39	-0,35	0
M_{ss04}		-0,08	-0,15	-0,04	0,05	0,22	0,43	-0,22	-0,29	-1,33

tab. 3 – setrvačné momenty jednotlivých prvků planetových řad při řazení

rychl. stupně	N→1	N→2	N→R	1→2	2→3	3→4	4→5	5→6	6→7
M_{sc} [Nm]	-33,15	-61,62	8,27	-40,32	23,74	13,22	67,75	36,44	173,72

tab. 4 – celkové setrvačné momenty převodovky při řazení

Z výsledků analýzy dynamického zatížení (tab. 3, tab. 4) vyplývá, že velikost setrvačných momentů při řazení z neutrálu na 2. rychlostní stupeň a při řazení ze 4. rychlostního stupně na 5. dosahuje vyšších hodnot. Nejvyšší hodnoty dosahuje při řazení z 6. rychlostního stupně na 7..

Kromě prvků které mají malé momenty setrvačnosti se vznik vyšší hodnoty setrvačného momentu potvrdil a to u těchto prvků:

- centrální kolo 1. planetové řady při řazení z 1. na 2., z 3. na 4., z 5. na 6. a z 6. na 7. rychlostní stupeň
- unašeč 1., 2. a 3. planetové řady + korunové kolo 4. planetové řady při řazení z 4. na 5. a z 6. na 7. rychlostní stupeň
- centrální kolo 4. planetové řady při řazení z 5. na 6. a z 6. na 7. rychlostní stupeň

4 Závěr

Analýza dynamického namáhání planetových převodovek slouží k vyšetření vzniku setrvačných momentů při řazení jednotlivých rychlostních stupňů. Setrvačný moment může způsobovat nadměrné dynamické zatížení všech prvků planetové převodovky a může se projevit zvýšením namáhání ovládacích prvků. Setrvačný moment vzniká tím, že se určité prvky planetové řady během krátké doby řazení zabrzdí, nebo naopak roztočí, tím dochází jednak ke změně otáček, ale také ke změně celkové hmotnosti rotujících prvků.

Již samotné hodnoty uhlových zrychlení odhalují prvky planetové řady s pravděpodobným vznikem setrvačných momentů a mohou tedy sloužit pro předběžný odhad míst se vznikem setrvačných momentů.

Z analýzy dynamického namáhání vyplývá, že v planetových převodovkách může docházet k dynamickým dějům, především při rozjezdech a při řazení jednotlivých rychlostních stupňů, které mohou způsobit nadměrné zatěžování jednotlivých prvků planetové převodovky a v důsledku toho mohou mít velký vliv na spolehlivost převodovky. Ukazuje se, že analýza planetových převodovek má své opodstatnění pro posouzení prvků planetové převodovky a je nezbytná jako předběžný podklad pro výpočet tepelného namáhání ovládacích prvků převodovky. Je rovněž nezbytně nutná v případě rozboru možností a návrhu změny ovládání převodovky včetně možnosti jejího automatického ovládání.

5 Literatura:

- Hájek, M., Kabourek, J.: *Bojová pásová vozidla – Konstrukce a výpočet*, učebnice VA v Brně, U-1178, 1985
- Kolybelník, I.: *Bojová pásová vozidla – Mechanika pohybu*, učebnice VA v Brně, U-574, 1985
- Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.: *Fyzika*, Vysoké učení technické v Brně – Nakladatelství VUTIUM a Nakladatelství PROMETHEUS, 2000
- Hájek, M.: *Konstrukce tanků – Planetová a hydraulická převodová ústrojí*, skripta VA v Brně, S-293, 1966
- Křiváková, J.: *Technická mechanika II. díl – Kinematika a dynamika*, skripta VA v Brně, S-1081/2, 2002