

NÁVRH TESTOVACÍ STOLICE PRO OPTIMALIZACI SACÍHO BODU OLEJE SPALOVACÍCH MOTORŮ

Bc. Karel Nekut,
Západočeská univerzita v Plzni,
Univerzitní 8, 306 14 Plzeň
Česká republika

ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem testovací stolice, která dokáže simulovat faktory ovlivňující tvar objemu oleje v olejové vaně při jízdě vozidla dle daného testovacího cyklu. Význam zařízení spočívá ve včasné ověření funkčnosti důležitých částí mazací soustavy v raných fázích návrhu spalovacího motoru. Konkrétně testovací stolice ověřuje, zda při zvoleném sacím bodě (ústí sací trubice v olejové vaně) a vybraném testovacím cyklu (soubor pohybů simulující pohyb vozidla na testovacím okruhu) nedochází k nasávání vzduchu do mazací soustavy.

Práce obsahuje nezbytné teoretické informace z oblasti teorie mazací soustavy spalovacích motorů, konkrétně popis funkce, konkrétní příklad mazací soustavy a popis statické náklonové metody, která se používá jako orientační metoda pro prvotní určení sacího bodu. V práci je dále uveden výpočet pohonů naklápění pro obě osy zařízení. Zvláštní pozornost je věnována výpočtu testovacího cyklu a závěr práce je věnován konkrétnímu popisu navrženého zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA

testovací stolice, náklonová analýza, sací bod, olejová vana, sací trubice, mazací soustava, testování motorů

ÚVOD

Cílem práce je navrhnout zařízení (testovací stolicí), které dokáže simulovat faktory ovlivňující tvar objemu oleje v olejové vaně při jízdě vozidla a tím pomoci k co možná nejlepšímu umístění sacího bodu oleje (ústí sací trubice) v olejových vanách motorů z pohledu stálé a plynulé dodávky oleje bez nasátí vzduchu.

ZADÁNÍ PRÁCE

Navrhněte testovací stolicí spalovacího motoru pro optimalizaci sacího bodu oleje spalovacích motorů. Zařízení musí umožnit naklápění testované sestavy kolem dvou os o 60°. Úkolem naklápění je simulace dynamických účinků při pohybu vozidla. Součástí práce bude návrh rámu, pohonů naklápění, pohonu klikového hřídele a spojení testované sestavy motoru s testovací stolicí.

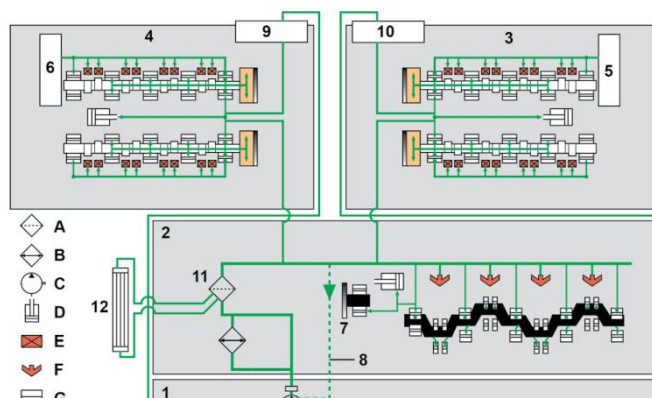
MAZACÍ SOUSTAVA SPALOVACÍCH MOTORŮ

Pro další pochopení práce je nezbytné na úvod uvést několik základních faktů ohledně teorie mazací soustavy spalovacího motoru. Mazací soustava spalovacího motoru má za úkol vytvoření vrstvy oleje na povrchu ploch, u kterých dochází ke tření. Důsledek tohoto jevu je především:

- Zmenšení třecích ztrát a opotřebení pohybujících se částí motoru
- Odvedení části tepla z motoru
- Zlepšení vzájemného těsnění jednotlivých pohybujících se součástí motoru
- Odstranění nečistot z motoru a mazací soustavy
- Konzervace vnitřku motoru, díky které se zabrání vzniku koroze
- Snížení hlučnosti částí motoru [1]

Příklad mazací soustavy spalovacího motoru Mercedes-Benz M177 je uveden na Obrázku 1. Ze schématu je patrné, že celý systém je závislý na první části řetězce – sací trubici. Jedna ze základních podmínek funkčnosti mazacího systému je, aby sací trubice vždy sála jen olej a nedošlo k situaci, kdy sací trubice nasaje olejovou pěnu (směs oleje a vzduchu), nebo dokonce jen vzduch (nestandardní situace, ke které by mohlo dojít například při proražení olejové vany).

Aby k této situaci nedošlo, je důležité zvolit vhodnou polohu sacího bodu vzhledem ke dnu olejové vany a právě touto problematikou se zabývá tato práce. Konstrukcí zařízení (testovací stolice), které dokáže ověřit správnou polohu sacího bodu v rané fázi návrhu motoru.



Obrázek 27: Mazací soustava motoru M177 [2]

Popisky k Obrázku 1:

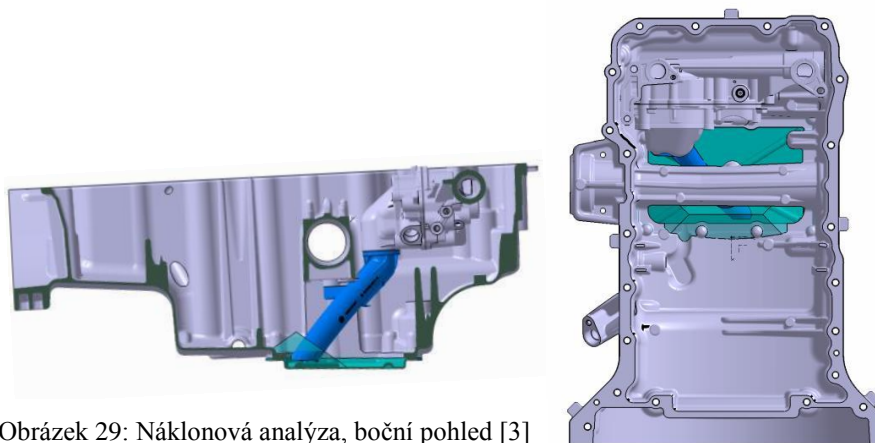
1 - Olejová vana, 2 - Kliková skříň, 3 - Pravá hlava, 4 - Levá hlava, 5 - Pravé vysokotlaké čerpadlo (mazání ložisek), 6 - Levé vysokotlaké čerpadlo (mazání ložisek), 7 - Rozvodové řetězové kolo, 8 - Zpětná regulace, 9 - Levé turbodmychadlo, 10 - Pravé turbodmychadlo, A - Filtr oleje, B - Chladič oleje (vodní), C - Olejové čerpadlo, D - Napínák řetězu, E - Kompenzační členy ventilů, F - Olejová tryska, G - Kluzné ložisko, H - Pohon vačkové hřídele

Statická náklonová metoda – prvotní určení sacího bodu

Pro přibližné prvotní určení polohy sacího bodu se používá statická náklonová metoda v CAD programu. Tato metoda je statická a uvažuje tedy pouze vliv naklání vozidla vůči vodorovné rovině, případně převedení setrvačných účinků na statické náklony. Metoda má následující kroky: Nejdříve se vytvoří 3D model vnitřního objemu olejové vany. Následně se zvolí 4 (případně 8) směrů, ve kterých chceme polohu sacího bodu vyšetřovat. Dále je nutno si zvolit maximální úhly, pod kterými bude vozidlo při provozu nakloněno. Tyto úhly mohou alternativně odpovídat maximálnímu zrychlení (například v podélném a příčném směru), kterému bude vozidlo vystaveno.

V dalším kroce se roviny v daném směru a pod daným úhlem posouvají tak, aby při virtuálním řezu rovinou do objemu oleje, zbylo těleso jen o takovém objemu, který odpovídá minimálnímu objemu oleje, který ještě stačí pro provoz motoru.

Při provedení všech těchto řezů a následném průniku všech těchto těles (kritických stavů) zbyde těleso připomínající víceboký jehlan. Ve středu základny takového tělesa je pak výhodné umístit sací bod před samotným testováním motoru na testovací stolici. Výsledek takovéto analýzy je zřetelný na Obrázku 2 a 3.



Obrázek 29: Náklonová analýza, boční pohled [3]

Obrázek 28: Náklonová analýza, půdorysný pohled [3]

STATICKE FAKTORY OVLIVNUJICI POHYB OLEJE

Jak již bylo naznačeno, jeden z nejdůležitějších faktorů který ovlivňuje přelévání oleje ve vaně je statický náklon. Například Mercedes-Benz třídy G má maximální hodnotu bočního náklonu 35° (Obrázek 4 vpravo) a je schopen zdotat stoupání 100%, které odpovídá úhlu 45° vůči vodorovné rovině (Obrázek 4 vlevo). Tento faktor je tedy významný hlavně pro terénní vozidla.



Obrázek 30: Příčný a podélný náklon vozidla [4] [5]

DYNAMICKE FAKTORY OVLIVNUJICI POHYB OLEJE

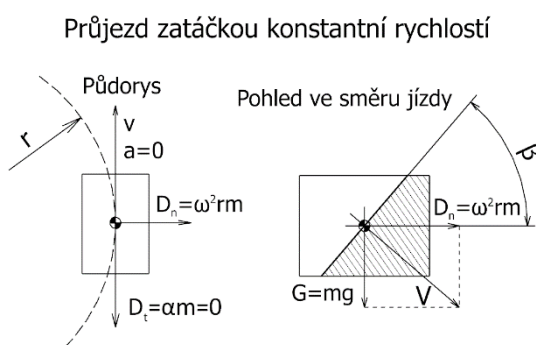
Přelévání oleje ovlivňují také dynamické faktory. V příčném směru je to odstředivé zrychlení při průjezdu zatáčkou. Tento setrvačný účinek má za následek, že se olej v olejové vaně vychýlí v určitém úhlu oproti klidnému stavu hladiny v podélném směru. Tuto situaci zobrazuje schéma na Obrázku 6.

V podélném směru přelévání ovlivňuje setrvačný účinek při akceleraci a brzdění. Schéma na Obrázku 5 ukazuje situaci při akceleraci, což odpovídá rovnoměrně zrychlenému přímočarému pohybu. Zde je zastoupen pouze setrvačný účinek v podélném směru, který má za následek naopak vychýlení hladiny oproti klidnému stavu v příčném pohledu.

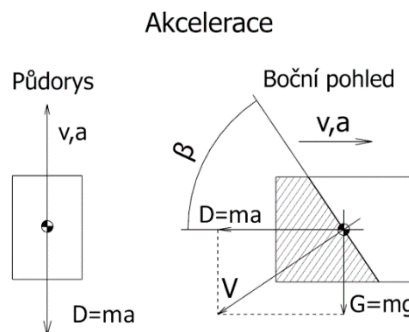
**ÚHEL VYCHÝLENÍ HLADINY OLEJE PŘI ZNÁMÉM ZRYCHLENÍ SE PAK
NAPŘÍKLAD PRO PŘÍPAD AKCELERACE (BRZDĚNÍ) VYPOČTE NÁSLEDOVNĚ:**

$$\beta = \arctg\left(\frac{a}{g}\right) \quad (1)$$

Dynamické faktory jsou rozhodující pro osobní vozidla a samozřejmě také pro sportovní vozidla. U běžných osobních vozidel je statická náklonová analýza prováděna pod úhlem 35° což odpovídá zrychlení 0,7g. U sportovních vozidel se může hodnota podélného zrychlení při brzdění pohybovat i přes 1,5g. Hodnota příčného zrychlení v zatáčce může být při vhodných podmínkách až 2g.



Obrázek 32 Schéma příčných dynamických účinků



Obrázek 31 Schéma podélných dynamických účinků

OSTATNÍ FAKTORY OVLIVNUJICI POHYB OLEJE

Další faktory, které ovlivňují pohyb oleje ve vaně je komprese pístů ve válci. Změny tlaku pod pístem mají vliv na tvar objemu oleje. Dalším faktorem je rotace klikové hřídele v prostoru klikové skříně. Tato rotace vyvolává víření olejové mlhy a má vliv na tvar objemu oleje.

Výpočty

V práci se vyskytuje celá řada návrhových výpočtů, z důvodu omezeného rozsahu příspěvku zde bude uvedeno jen shrnutí několika nejdůležitějších výpočtů.

VÝPOČET VÝKONU POHONŮ NAKLÁPĚNÍ

Návrhový výpočet pohonu naklápění a výběr komponent je shrnut v Tabulce 1 a2. Tyto výpočty vycházejí ze základního vzorce, který říká, že moment potřebný k pohonu sestavy o daném tvaru a hmotnosti a daném úhlovém zrychlení kolem dané osy je roven součinu momentu setrvačnosti a úhlového zrychlení této sestavy:

$$M = I \cdot \alpha \quad (2)$$

Shrnutí těchto návrhových výpočtů a výběr konkrétních komponent je uveden v Tabulce 1 a 2. Původní požadavek na dimenzování pohonů (který odráží tabulka 2) byl dosáhnout při naklopení (kolem obou os) úhlu 45° za 1s. Dle těchto požadavků byla hodnota potřebného točivého momentu u sekundárního naklápění 25,8 Nm (rotuje pouze se spalovacím motorem kolem podélné osy). Primární pohon (rotuje se spalovacím motorem a navíc s celým primárním rámem by dle těchto požadavků musel mít točivý moment 1272,3 Nm. Po výpočtech testovacího cyklu (rozvedeno dále) se ale ukázalo, že tyto hodnoty jsou nedostatečné a dimenzování bude vhodnější provést právě na základě nejvyšších dat potřebných točivých momentů z výpočtů testovacího cyklu. Po zohlednění testovacího cyklu je tedy točivý moment sekundárního pohonu 139,5 Nm a točivý moment primárního pohonu je nakonec 3 395,5 Nm.

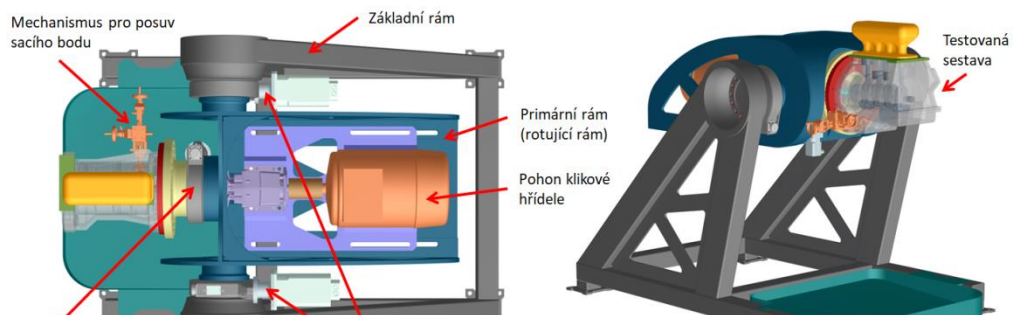
| Návrhové výpočty | | | | Sekundární naklápění | | Primární naklápění | |
|--------------------------------|-------------|------------------------------|------------|----------------------|-------------|--------------------|----------------|
| Sekundární naklápění | | Primární naklápění | | Typ motoru | TGN3-0350 | Typ motoru | TGN6-4400 x 2 |
| m_s [kg] | 303,4 | m_p [kg] | 685 | M [Nm] | 3 | M [Nm] | 36,5 |
| I_s [kg*m ²] | 8,2 | I_p [kg*m ²] | 405 | P [kW] | 0,942 | P [kW] | 7644 |
| φ [°] | 45 | φ [°] | 45 | n [1/min] | 3000 | n [1/min] | 2000 |
| $\dot{\varphi}$ [rad] | 0,785398163 | $\dot{\varphi}$ [rad] | 0,785398 | n [1/s] | 50 | n [1/s] | 33,33333333 |
| ω [rad/s] | 1,570796327 | ω [rad/s] | 1,570796 | m [kg] | 3,4 | m [kg] | 22,5 |
| t [s] | 0,5 | t [s] | 0,5 | Typ přev. | WD-LA 0223 | Typ přev. | WD-LA 0223 x 2 |
| α [rad/s ²] | 3,141592654 | α [°/s ²] | 3,141592 | i [-] | 62 | i [-] | 62 |
| M_{sp} [Nm] | 25,76105976 | M_{pp} [Nm] | 1272,34476 | η [-] | 0,75 | η [-] | 0,75 |
| i_s [-] | 62 | i_p [-] | 62 | M_s [Nm] | 139,5 | M_p [Nm] | 3394,5 |
| η [-] | 0,75 | η [-] | 0,75 | n_s [1/min] | 48,38709677 | n_p [1/min] | 32,25806452 |
| M_{sm} [Nm] | 0,554001285 | M_{pm} [Nm] | 27,3622529 | n_s [1/s] | 0,806451613 | n_p [1/s] | 0,537634409 |
| | | | | m [kg] | 48 | m [kg] | 48 |

Tabulka 13: Návrhové výpočty pohonů nakláp

Tabulka 12: Výběr a výpočet konkrétního pohonu

KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ

Navržené zařízení (testovací stolice) dokáže simulovat vlivy působící na pohyb oleje v olejové vaně a díky tomu a ověřit vhodnou polohu sacího bodu, při které bude motor odolný vůči nasátí olejové pěny (vzduchu). Nasátí vzduchu zařízení detekuje změnou tlaku za olejovým čerpadlem motoru. Zařízení dokáže simulovat statické náklony, dynamické účinky pohybu v podélném a příčném směru a díky pohonu klikové hřídele uvnitř testovaného spalovacího motoru lze také simulovat rotaci klikové hřídele a kompresi válců.

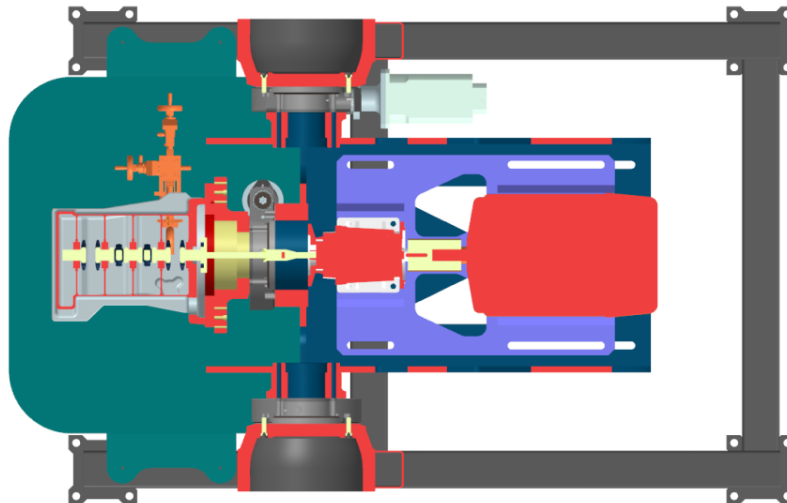


Obrázek 33: CAD zobrazení testovací stolice

Velmi hmotný pohon klikové hřídele není umístěn na totožném kinematickém členu jako testovaný motor, ale je přesunut na kinematický člen blíže k základnímu rámu (na primární rám). Díky tomuto konstrukčnímu řešení může mít pohon, který rotuje s testovaným motorem výrazně nižší točivý moment.

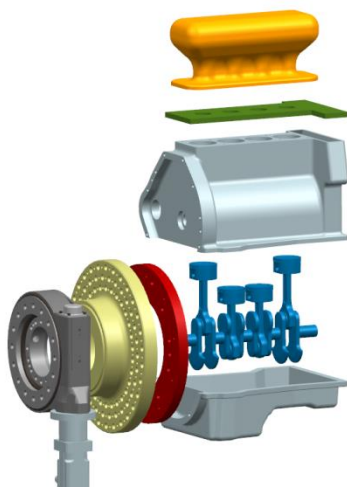
Zmíněné konstrukční řešení sebou ale nese nutnost vyřešit jak spojit testovaný motor s pohonem, které je na jiném kinematickém členu. Tato konstrukční otázka byla vyřešena použitím šnekové převodovky skrz jejíž dutý rotor je vedena hřídel, která pohání klikovou hřídel testovaného motoru (Obrázek 8).

Další funkcí testovací stolice je možnost přestavovat sací bod bez nutnosti demontáže testované sestavy. Tuto funkci umožňuje pohybový mechanismus, který je z boku zvenku připevněný na olejové vaně. Rameno tohoto mechanismu prochází stěnou vany a pomocí soustavy ozubení přestavuje polohu sacího bodu ve dvou souřadnicích.



Obrázek 34: Pohon vedený dutou hřídelí šnekové převodovky

Pro účely testování polohy sacího bodu je žádoucí kompletně nastrojený motor zjednodušit tak, aby na něm zbyly jen ty komponenty, které ovlivňují děje spojené s pohybem (přeléváním) oleje uvnitř olejové vany. Jak již bylo řečeno v předešlých kapitolách, tyto děje jsou: statický náklon, setrvačné účinky při dynamické jízdě vozidla, změna tlaku vlivem přímočarého vratného pohybu pístů a rotace klikové hřídele. Kompletní motor je tedy zjednodušen na tyto komponenty: blok motoru, olejová vana, kompletní klikový mechanismus, olejové čerpadlo s příslušným pohonným rozvodem od klikové hřídele, senzor hladiny oleje, olejový separátor (odděluje prostor klikové skříně a olejové vany), část olejového okruhu motoru včetně trysek pro mazání pístů ve válci, kompenzátor objemu s redukcí, pohybový mechanismus sacího bodu s vlastní sací trubicí.



Obrázek 35: Testovaná sestava

Jelikož motor nemá uzavřené spalovací prostory hlavou motoru, je třeba je nějakým způsobem uzavřít, protože v opačném případě by se malé množství oleje dostávalo přes těsnící a stírací kroužky nad píst, což by znečišťovalo celé zařízení. Zároveň ale není možné jednoduše zakrýt prostor nad každým individuálním pístem, protože by v tomto prostoru nebylo možné nijak vyrovnávat tlak. Při pohybu do horní úvratě by píst stlačoval nekonečně malý objem a při pohybu do dolní úvratě by zase působil proti podtlaku nad pístem. Řešením tohoto problému je dodatečný díl, kompenzátor objemu. Tento díl jednoduše spojuje všechny „spalovací prostory“ (k žádnému spalování zde ale samozřejmě nedochází, kliková hřídel je poháněna elektrickým motorem). Díky tomuto řešení nedochází k únikům oleje a problémům s vyrovnáváním tlaku. Takto zjednodušený motor je ještě přizpůsoben pro zástavbu pohybového mechanismu sacího bodu a flexibilní sací trubice.

Testovací cyklus

Práce se zabývá i návrhem testovacího cyklu, který budou motory podstupovat. Je to soubor pohybů, které budou simulovat jízdu na zkušebním okruhu.

Automobilky mají k dispozici skutečné testovací vozy. Ale data o podélných a příčných zrychleních na testovacím okruhu se dají získat i jinak – pomocí počítačového závodního simulátoru.

Pro vytvoření testovacího cyklu byl vybrán okruh Nürburgring v Německu, kde testuje své vozy velké množství automobilek.

Jako referenční vůz byla zvolena Mazda MX-5 ND a vzorkovací frekvence stanovena na 20 Hz.

Ze simulátoru Asseto Corsa lze exportovat data o příčném a podélném zrychlení (a spoustu dalších údajů v čase)

Data ze simulátoru lze následně otevřít v programu pro zobrazování telemetrických dat MoTec.

Z telemetrie je možné data dále exportovat do Excelu. Zde se filtrují vstupní



Obrázek 36: Simulátor

hodnoty zrychlení na okruhu získané ze simulátoru (pro klidnější průběh křivky v čase) a dále se z nich počítá úhlová dráha (slouží jako řídicí instrukce pro pohon), rychlost, zrychlení, potřebné pohonné momenty a otáčky motorů.

Vyfiltrované hodnoty úhlové dráhy pro jednotlivé osy lze poté nahrát do dynamické simulace v programu NX a přehrát si kompletní pohyb testovací stolice simulující pohyb objemu oleje na okruhu (Obrázek 11), analyzovat jednotlivé jízdní situace a porovnávat je se záznamem z jízdy v simulátoru.

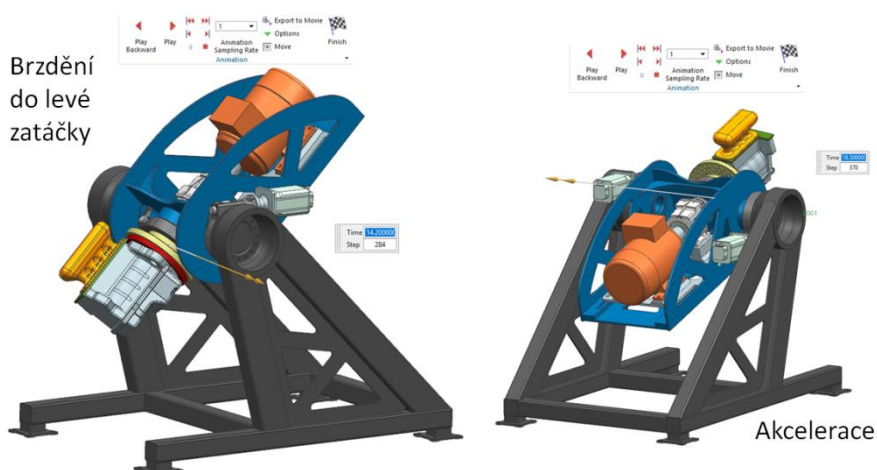
Závěr

Podařilo se zkonstruovat zařízení, které dokáže simulovat vlivy působící na pohyb oleje v olejové vaně a díky tomu jednoduchým principem měření rozdílů tlaků za sacím čerpadlem oleje motoru ověřit vhodnou polohu sacího bodu, při které bude motor odolný vůči nasátí olejové pěny (vzduchu).

Použití zařízení podobného druhu není při hledání optimální polohy sacího bodu nezbytné, ale zvyšuje jistotu správnosti návrhu mazací soustavy v rané fázi konstrukce spalovacího motoru. Čím dříve se v rámci návrhu odhalí případné nedostatky mazacího systému, tím je jejich řešení dražší. Jen během posledních dvou desetiletí lze vyzorovat, že příkladů takto špatně navržených motorů je celá řada a tyto nedostatky pak snižují prodeje a zájem o jednotlivé motorizace, nebo dokonce konkrétní model vozu, což může mít nakonec i vážný důsledek na pověst výrobce automobilu.

Použití zařízení má také největší opodstatnění v případě motorů, u kterých se při jízdě předpokládají velké dynamické síly, které mohou narušit zásobování motoru olejem. Další rizikovou skupinou jsou terénní vozidla, extrémní statické náklony se u těchto vozidel dají poměrně jednoduše nasimulovat, zařízení by zde ale našlo využití například při simulování přechodů mezi více extrémními náklony, kdy vozidlo projíždí náročný terén.

S rychlým příchodem elektromobility se zdá, že se nevyplatí investovat do drahých testovacích zařízení určených pro spalovací motory. Zařízení konstruované v této práci se ale dá využít k testování chování libovolných systémů, které jsou zatěžovány dynamickými silami. Primárně je zařízení konstruováno tak, aby simulovalo chování vozidla, v sekundárních aplikacích ale může simulovat například chování určitého systému dronu při letu, nebo třeba naklápění lodě ve vlnách. Zařízení je v tomto ohledu poměrně variabilní a je zde pamatováno na možnosti budoucího rozšíření jako například zvýšení, nebo naopak snížení výkonu naklápěcích pohonů, výměnu pohonu klikové hřídele, změnu upínací části apod.



Obrázek 37: Animace pohybu sestavy

Zdroje

- [1] Příslušenství spalovacích motorů. JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily: Motory*. Brno: Avid, spol., 2012, s. 148. ISBN 978-80-87143-06-3.
- [2] In: *Forum-mercedes* [online]. [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <http://www.forum-mercedes.com/img/members/3/circuit-d-huile.png>
- [3] NEKUT, Karel. *Návrh mechanismu pro optimalizaci polohy sacího bodu oleje v olejové vaně během testování*. Plzeň, 2017. Bakalářská práce. ZČU FST. Vedoucí práce Ing. Michal Křížek Ph.D.
- [4] In: *Daciaclub* [online]. [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <http://daciaclubmd.ru/wp-content/uploads/2018/05/Mercedes-G-Class-2018-10.jpg>
- [5] In: *Mercedes-benz* [online]. [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <https://www.mercedes-benz.com/content/dam/brandhub/mercedes-benz/vehicles/passenger-cars/g-class/g-class-2019-conquering-the-punta-negra-dam/01-mercedes-benz-g-class-2019-w463-conquering-punta-negra-dam-argentina-1700x720.jpg>