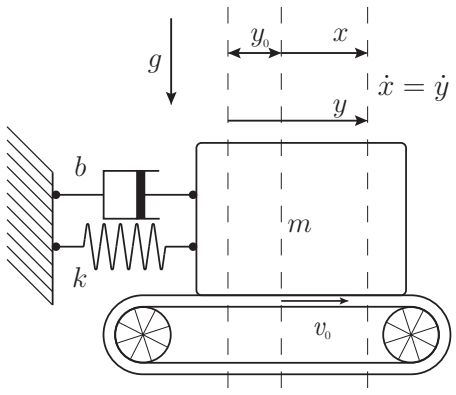
Akadozó csúszás környezetszimulációja: modellezés, analízis, kísérlet

Verasztó Zsolt[†], konzulens: Dr. Stépán Gábor[‡]

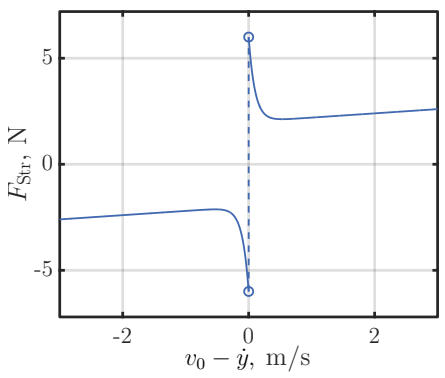
Absztrakt

A szakdolgozat témája egy egy szabadsági fokú, Stribeck-súrlódó felület által gerjesztett rezgőrendszer dinamikai vizsgálata. Az ilyen esetekben megjelenő öngerjesztett rezgések számos műszaki rendszerben kritikusak lehetnek. A dolgozat célja, hogy megmutassa, milyen elméleti megfontolások szükségesek az úgynevezett környezetszimulációs (hardware-in-the-loop, HIL) módszer használatához, majd bemutasson egy lehetséges kísérleti megvalósítást. A lokális stabilitási analízis és a globális dinamikai vizsgálatok eredményeit összevetjük a MATLAB környezetben elkészített program numerikus eredményeivel. Később összeállítjuk egy HIL kísérlet mint digitálisan szabályozott rendszer matematikai modelljét, mely idealizált szabályzót tartalmaz, azonban a mintavételezésből adódó időkésést figyelembe veszi. A diszkrét modell analitikus és numerikus vizsgálata után bemutatjuk a megépített kísérleti elrendezést, közöljük a mérések eredményeit és ebből következtetéseket vonunk le a környezetszimuláció alkalmazására és valósághűségére vonatkozóan.

1. Az akadozó csúszás mechanikai modellje



a): Szerkezeti ábra



b): Stribeck karakterisztika

1. ábra: Mechanikai modell

Az akadozó csúszás leírható egy Stribeck súrlódó felület által gerjesztett, csillapított egy szabadsági fokú rezgőrendszerként:

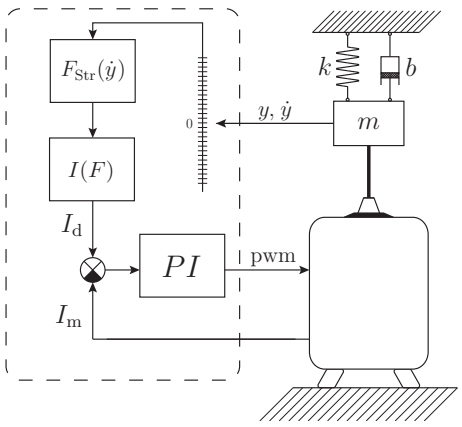
$$\ddot{y}(t) + 2\zeta\omega_{\mathrm{n}}\dot{y}(t) + \omega_{\mathrm{n}}^2 y(t) = F_{\mathrm{Str}}(\dot{y}(t))/m. \tag{1}$$

$$F_{\mathrm{Str}}(\dot{y}) = \left(C + (C_0 - C)\mathrm{e}^{-c_{\mathrm{v}}|v_0-\dot{y}|}\right)\mathrm{sgn}(v_0 - \dot{y}) + b_{\mathrm{Str}}(v_0 - \dot{y}), \tag{2}$$

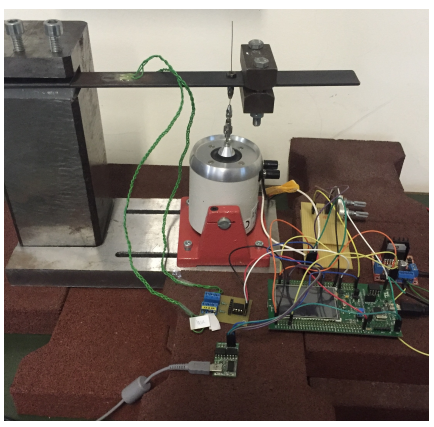
ahol a rezgőrendszer az ω_{n} csillapítatlan sajátkörfrekvenciájával, ζ relatív csillapítási tényezőjével és m modális tömegével jellemzett.

A test és a v_0 egyenletes sebességgel mozgó felület között a kevert száraz-folyadékos súrlódást a Stribeck karakterisztika írja le. A F_{Str} erőt számos paraméter segítségével lehet leírni, melyek közül a tapadási és a csúszási súrlódás C_0, C illetve a viszkózus határhelyzet b_{Str} könnyen azonosíthatóak.

2. Környezetszimuláció



a): Elvi elrendezés



b): Megvalósult kísérlet

2. ábra: HIL kísérlet

A környezetszimulációs kísérlet matematikai modelljének felállításához figyelembe kell vennünk a digitális szabályozó mintavételezéséből adódó τ időkésést. Ez az (1) mozgásegyenletet

$$\ddot{y}(t) + 2\zeta\omega_{\mathrm{n}}\dot{y}(t) + \omega_{\mathrm{n}}^2 y(t) = F_{\mathrm{Str}}(\dot{y}(t_j - \tau))/m\,,\ t \in [t_j, t_j + \tau),\ j = 1, 2, \dots, \tag{3}$$

alakra módosítja, ahol $t_j = j\tau$ jelöli a j-edik időlépést.

3. Stabilitásvizsgálat

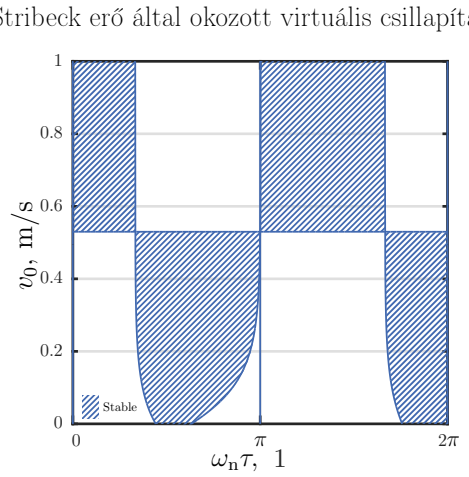
A F_{Str} erő szakaszonként állandó, ezért a (3) rendszer a $\mathbf{x}_j = \left[x_j,\, \dot{x}_j,\, \Delta F_{\mathrm{Str},j-1}\right]$ változó három dimenziós diszkrét leképezésévé transzformálható.

Mivel a köynezetszimulációs kísérlet egyik fő célja a a bifurkációs paraméter kritikus értékeinek kísérleti meghatározása (ezzel a normális működési tartomány azonosítása), a diszkrét idejű rendszer stabilitási viszonyait össze kell vetni az eredeti rendszerével (1. ábra). A diszkrét rendszert a $\mathbf{x}_j = \mathbf{0}$ fixpont körül linearizálható, mely az eredeti rendszernek is egyensúlyi helyzete. Az analitikus vizsgálathoz a rezgőrendszer saját csillapításától eltekintünk, tehát $\zeta = 0$.

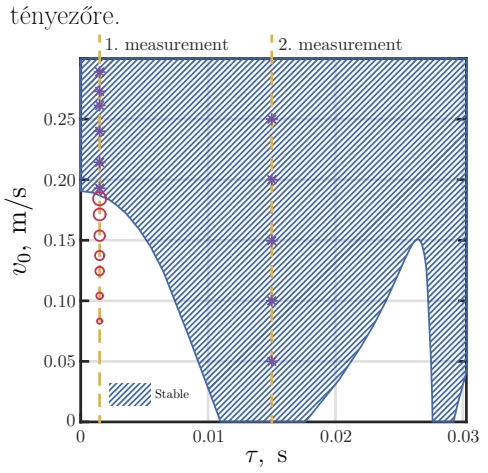
Az így kapott lineáris leképezést a

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_{\mathrm{n}}\tau) & \frac{1}{\omega_{\mathrm{n}}}\sin(\omega_{\mathrm{n}}\tau) & -\frac{1}{k}(\cos(\omega_{\mathrm{n}}\tau) - 1) \\ -\omega_{\mathrm{n}}\sin(\omega_{\mathrm{n}}\tau) & \cos(\omega_{\mathrm{n}}\tau) & \frac{\omega_{\mathrm{n}}}{k}\sin(\omega_{\mathrm{n}}\tau) \\ 0 & -b_{\mathrm{e}}(v_0) & 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

mátrix definiálja, a $-b_{\mathrm{e}}(v_0) := \partial F_{\mathrm{Str}}(\dot{x})/\partial\dot{x}|_{\dot{x}=0}$ jelölést használva a virtuálisan megjelenő Stribeck erő által okozott virtuális csillapítási tényezőre.



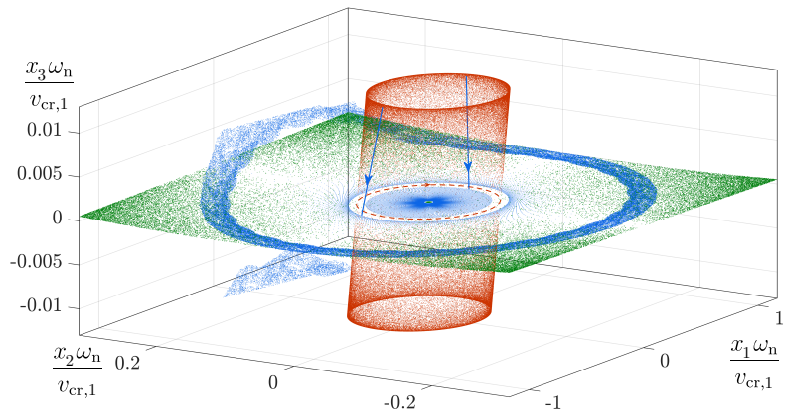
a): Csillapítatlan rendszer (analitikus)



b): Csillapított rendszer (numerikus)

3. ábra: Stabilitási térképek

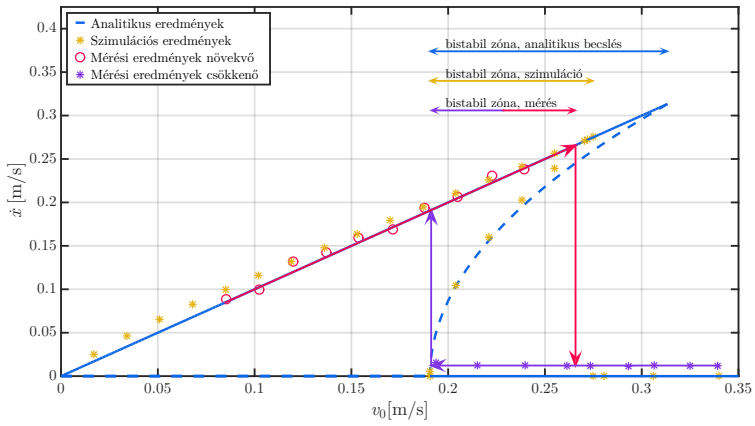
Az 3. ábra mutatja a lokális stabilitásvizsgálat eredményét. A digitális szabályozás által okozott időkésés a dinamikai viselkedést szokatlanul módosítja, rendkívül erős stabilizáló hatást mutat. A 3a) ábra stabilitási határai analitikus eredmények, míg csillapított esetet numerikusan kezeltük. A 3b) ábrán a kísérleti eredmények is láthatóak, ahol a piros körök átmérője a kialakult rezgések amplitúdójára utal.



4. ábra: A diszkrét rendszer jellemző trajektóriái

A 4. ábrán látható a diszkrét idejű rendszer bifurkációs vizsgálatának eredménye. A zöld felület egy két dimenziós központi sokaság másodfokú közelítése, míg a piros henger a Neimark-Sacker bifurkáció invariáns amplitúdójához tartozik. Megfigyelhető az eredeti rendszer stabil határciklusa helyén megjelenő feltehetően kaotikus attraktor.

4. Következtetések



5. ábra: Bifurkációs diagram

Az 5. ábra analitikus és numerikus eredményei az eredeti mechanikai rendszeren (1. ábra) végzett vizsgálat eredményeit mutatják, míg a mérési adatok a 2. ábrán látható kísérletből származnak. Az eredmények alapján az akadozó csúszás jelensége vizsgálható környezetszimulációs kísérletben, de a mintavételezési idő helyes megválasztása elengedhetetlen az általa okozott időkésés hatásai miatt.

További vizsgálatok tárgyát képezhetik a digitálisan szabályozott rendszer globális dinamikai analízise, illetve bonyolultabb rendszerek, mint az öngerjesztett szerszámgép- vagy szárnyrezgések vizsgálata, különösen szubkritikus Hopf-bifurkáció környezetében.

[†]Verasztó Zsolt (zsoltveraszto@gmail.com)

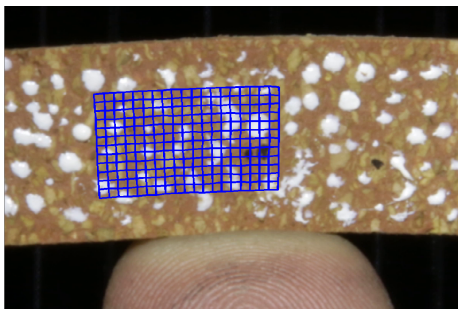
[‡]Dr. Stépán Gábor (stepan@mm.bme.hu), Műszaki Mechanikai tanszék, Gépészmérnöki kar

Nemlineáris anyagi videlkedések analízise saját fejlesztésű DIC szoftver használatával

Bilik Péter
Mechatronikai mérnöki BSc, Gépészeti Modellezés Specializáció, 2017/2018/I.
Témavezető: Dr. Kossa Attila, egyetemi docens, kossa@mm.bme.hu

1. Bevezetés

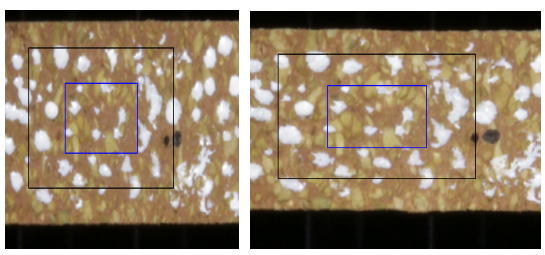
A digitális képkorreláción alapuló képelemzés egy modern módja az anyagvizsgálatnak. Segítségével olyan anyagi jellemzők határozhatóak meg, melyeket a hagyományos módszerekkel nem lehetne, illetve nagyon körülményes lenne meghatározni.



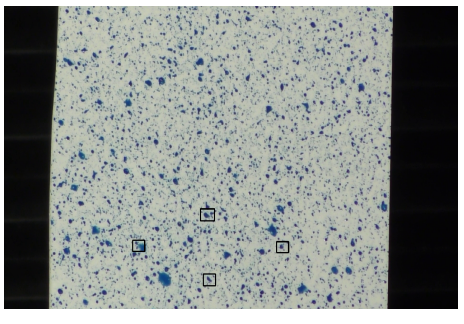
1. ábra. Az elkészült DIC szoftver működés közben

2. Alkalmazott módszerek

A DIC szoftver elkészítését gyakorlatilag a nulláról kezdtem így rengeteg mindennek kellet utánanéznem, hogy elkészíthessem a szoftvert. Így foglalkoztam a DIC szoftverekhez készült próbatestek felfestésével a "speckle-pattern"-el (3. ábra), a DIC képelemzés során használatos "matching" algoritmusokkal (2. ábra), illetve fejlesztéseket próbáltam ki az eredeti használatukhoz képest. Végül elkészítettem a DIC szoftvert, és felhasználtam, hogy vizsgáljak nemlineáris viselkedésű anyagokat.



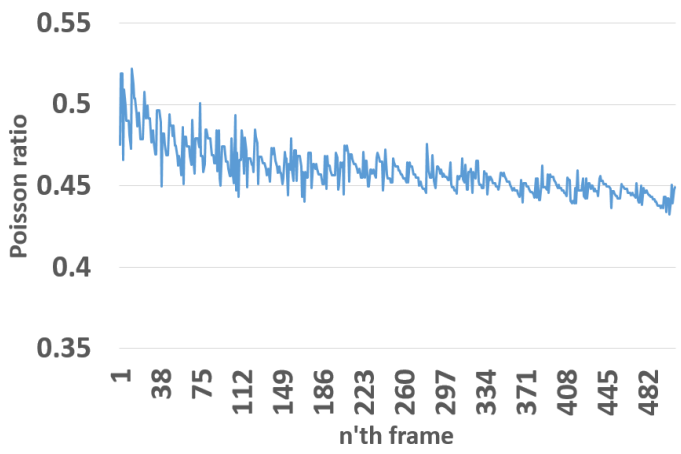
2. ábra. Matching algoritmusok fejlesztése



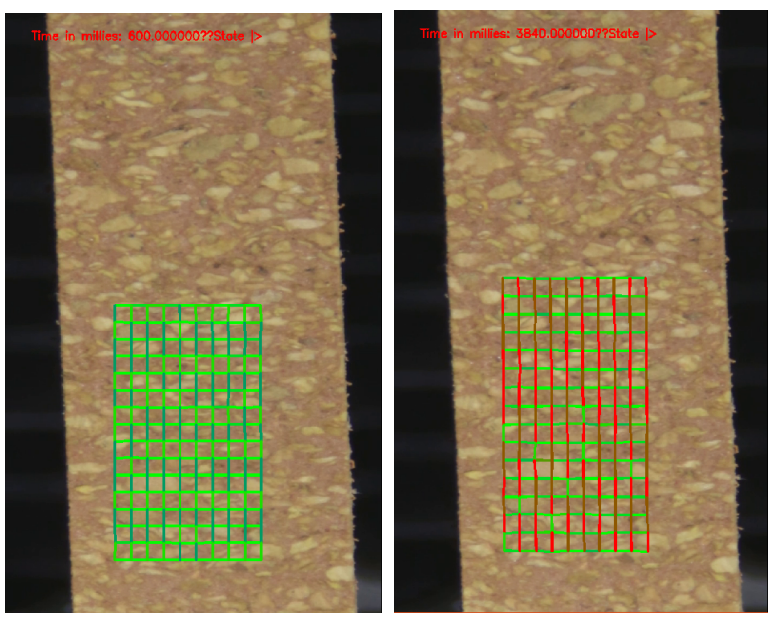
3. ábra. Különböző anyagokon használt speckle-pattern

3. Eredmények

A DIC szoftver használatával sikerült az egyes anyagok Poisson-tényezőit időben ábrázolnom (4. ábra). Továbbá sikerült a teljes elmozdulásmezőt mérnem és megjelenítenem (5. ábra).



4. ábra. Különböző mérésekhez tartozó $\nu(t)$ diagram



5. ábra. Az elmozdulásmező megjelenítése

4. Összefoglalás

A DIC eljárás egy nagyon sokoldalú megoldást nyújt elmozdulásmezők vizsgálatára. Így bármely mérnöki területen, legyen az áramlástani vizsgálatok, vagy mikron nagyságú alkatrészek vizsgálata, nagy előnyöket jelenthet a használata. Ezen okokból kifolyólag érdemes megismerni, és fejleszteni.

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar, Műszaki Mechanikai Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5.
www.mm.bme.hu

Szelektív forrasztás optimalizálása

GENDA ATTILA
Mechatronikai mérnöki BSc, Gépészeti Modellezés Specializáció, 2017/2018/I.
Témavezető: Dr. Bachrathy Dániel, egyetemi adjunktus, bachrathy@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Mindennapjaink meghatározó részét képezik az elektronikai eszközök. Létezésünket már-már el sem tudjuk képzelni nélkülük. Nem csak a háztartási eszközeinkben, de autóinkban is megjelentek az utóbbi évtizedekben ezek a berendezések.

A dolgozatot a hatvani székhelyű Robert Bosch Elektronika Kft-nél készítettem, ahol legfőképpen közúti járművekbe gyártanak vezérlő elektronikákat. A részleg, ahol a dolgozatomat írtam, ilyen elektronikai panelek furatszerelt alkatrészeinek forrasztásáért felelős. A technológia, amelyet alkalmaznak az úgynevezett merülő szelektív forrasztás technológiája.

A kézzel beültetett nyáklap egy gyártósoron halad végig, ahol a furatokon átlógó lábakat az *1. ábrán* látható bélyegek segítségével forrasztják meg, melyek olvadt ónt tartalmaznak.

1. ábra–A szelektív-forrasztószerszám bélyegei

A folyamat során néha selejt is keletkezik. Ennek egyik gyakori esete, amikor a furaton felfutó ón a nyákkal és az alkatrészlábbal érintkezve idő előtt kihűl és megszilárdul, ezáltal nem jut elég magasra a furatban. A dolgozatban ezt a jelenséget elemeztem.

2. Alkalmazott módszerek

A problémát először analitikus módszerekkel közelítettem meg. Megvizsgáltam a lezajló hőátadási folyamatokat, az anyagon belüli hővezetést, a tégelyek körül áramoltatott nitrogén hűtő hatását, valamint a hősugárzás okozta hőveszteségeket.

Ezt követően az itt kapott eredményekre is alapozva, levezettem a hővezetés differenciálegyenletét hengerkoordinátarendszerben ortotróp anyagmodell esetére, amelyet a geometria forgásszimmetriáját kihasználva egyszerűsítettem:

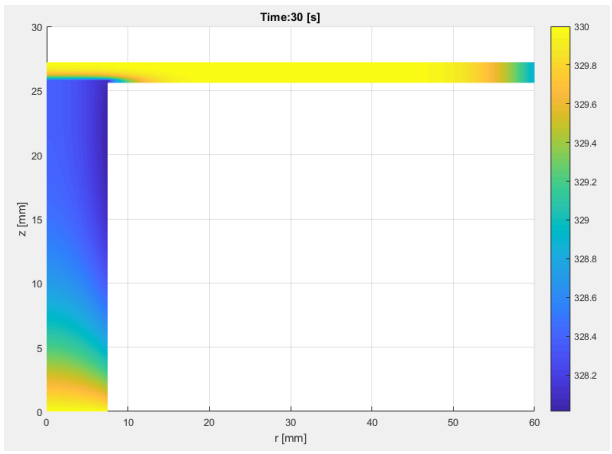
$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = k_{11}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}\right) + k_{33}\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

Az egyenletet a véges differenciák módszerével térben a centrális differenciák alkalmazásával, időben pedig szemi-implicit sémát használva diszkretizáltam, ezáltal a numerikus hibát másodfajúra sikerült csökkentenem, és feltétel nélkül stabil közelítő egyenleteket kaptam.

A számolások alátámasztására mérést is végeztem a szabadon hűlni hagyott bélyegeken, amelyre fizikai megfontolásokkal alátámasztott formájú exponenciális görbét illesztettem.

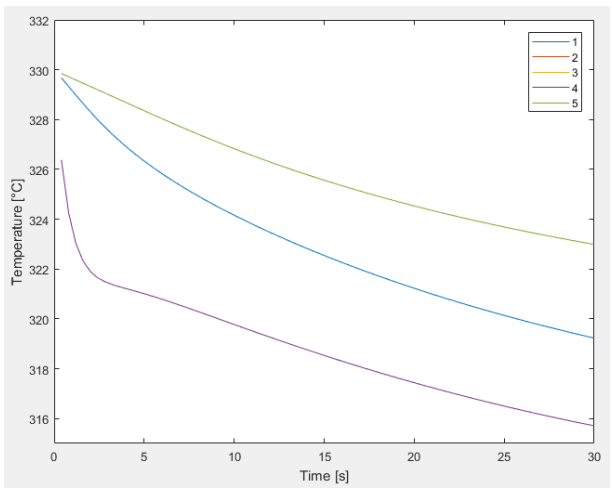
3. Eredmények

A bélyegek kihűlésében a hősugárzás okozta veszteségek elhanyagolható mértékűek. De a nitrogén okozta hűlés is csekély jelentőségűnek bizonyult.



2. ábra–A nitrogén hűtő hatása a bélyegen

A hűlést, ahogyan az analitikus eredmények alapján is várható volt, leginkább a nyáklap hőelvonása okozza.



3. ábra A szerszám különböző pontjainak hőmérséklet-idő grafikonja; a nyáklap hűtő hatása

4. Összefoglalás

Az elemzés által átfogó képet kaptam a forrasztáskor lezajló termikus folyamatokról, és a számítógépes modell eredményei alapján javaslatot tettem a szerszám konstrukciójának megváltoztatására. Ennek részletei azonban nem publikusak.

Development of a Balance Board to Improve Balancing Abilities

Máté Gerlei
Mechatronics Engineering BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2017/2018/I.
Supervisor: Dr. Tamás Insperger, associate professor, insperger@mm.bme.hu

1 Introduction

This thesis discusses the development of an electrically assisted balance board balancing in human body's frontal plane, which uses proportional-derivative (PD) control system based on data from Bosch inertial sensors to help stabilize its equilibrium position with a user on top of the board. This balance board consist of an axle with two wheels, a housing with bearings and drive components and a board mounted on the housing.

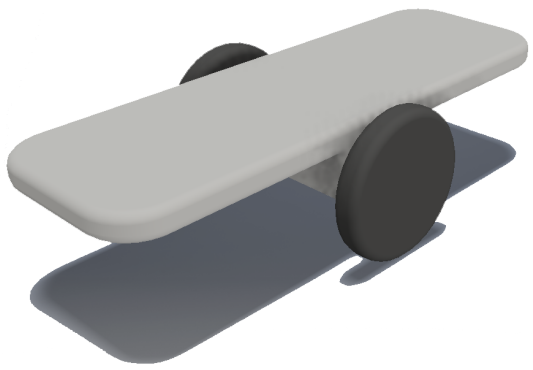


Figure 1: 3D design of the balance board

2 Applied methods

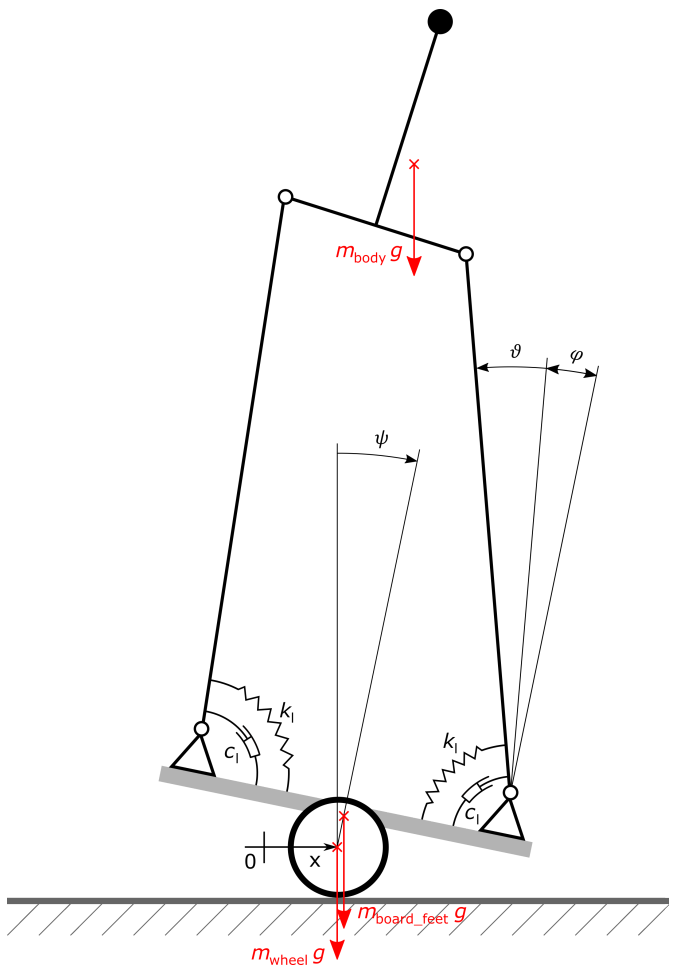


Figure 2: Mechanical model with 3 degrees of freedom in perturbed position

Combined 2 and 3 degrees of freedom mechanical models of the system, which include the human body on the board, are stated based on the concept of inverted pendulum. The 2 degrees of freedom model substitutes the body with only one concentrated mass and its moment of inertia, while the 3 degrees of freedom model extends it with the motions of the body. Instead of determining active control of human nervous system, this model uses passive components as a replacement. System equations are deducted with both Newtonian and Lagrangian method. Feedback-delays are introduced to the system equations and the stability of both continuous and discrete models are investigated in order to determine optimal geometry of the balance board as well as optimal parameters of the controller.

3 Results

Movements of the balance board are simulated including saturation of the available geared electric motor with 50 Nm maximum torque. Investigations of stability show that this balance board is controllable even with feedback-delay and motor saturation.

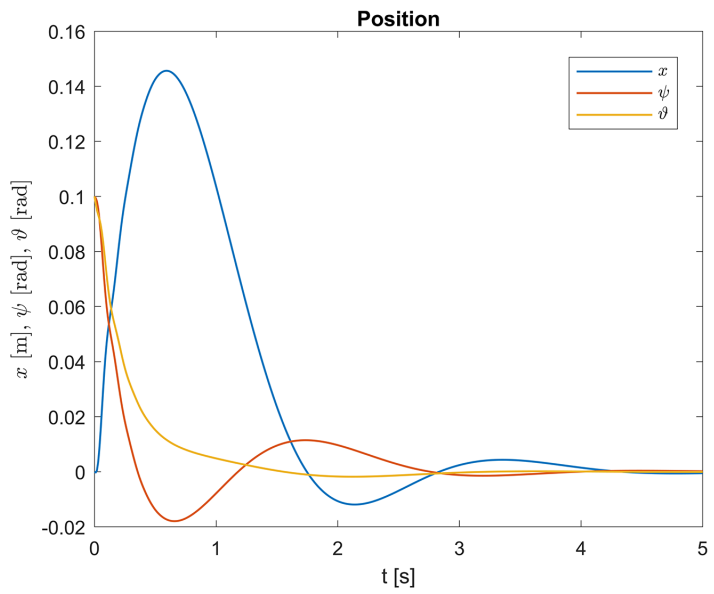


Figure 3: Simulation of the 3 degrees of freedom discrete model

4 Summary

This thesis confirms that bigger wheels and lower board deck heights contribute to a more stable system. It recommends an 80 mm wheel radius and a 150 mm board deck height for this balance board and also contains recommendations for the control parameter values. Further investigations with different controller types are recommended to consider.

Budapest University of Technology and Economics
Faculty of Mechanical Engineering
Department of Applied Mechanics
H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5. – www.mm.bme.hu

Két szabadságfokú mechanikai rendszer digitális pozíciószabályozása

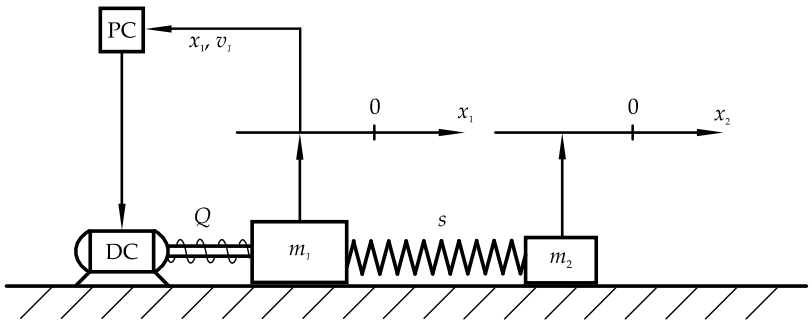
HODRUSZKI ZALÁN

Mechatronikai mérnöki BSc, Gépészeti Modellezés Specializáció, 2017/2018/I.

Témavezető: Dr. Antali Máté, egyetemi adjunktus, antali@mm.bme.hu

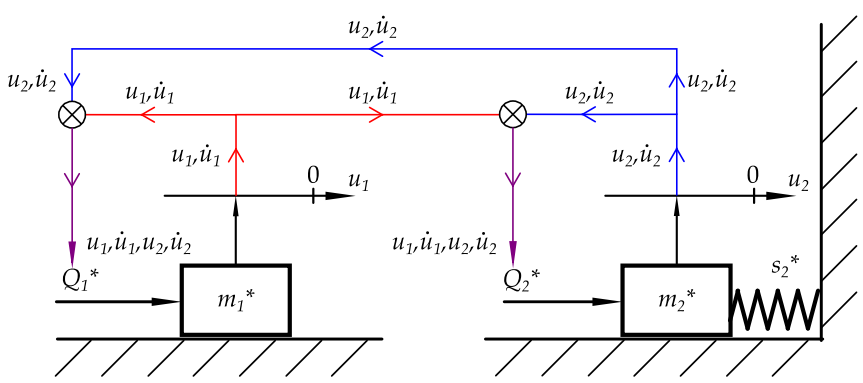
1. Bevezetés

Az ipari folyamatokban egyre nagyobb tere van az automatizálásnak. Az automatizált folyamatokban résztvevő gépeket szabályozni kell, hogy azok megfelelően lássák el a feladataikat. Az egyik alapvető szabályozás a pozíciószabályozás. Szakdolgozatomban a pozíciószabályozás témakörével foglalkoztam. Vizsgáltam, hogy a digitális pozíciószabályozás stabilitása miként módosul, ha a szabályozandó rendszer nem egy merev test, hanem egy két szabadságfokú, rugalmas konstrukció.



1. ábra. Mechanikai modell

2. Alkalmazott módszerek

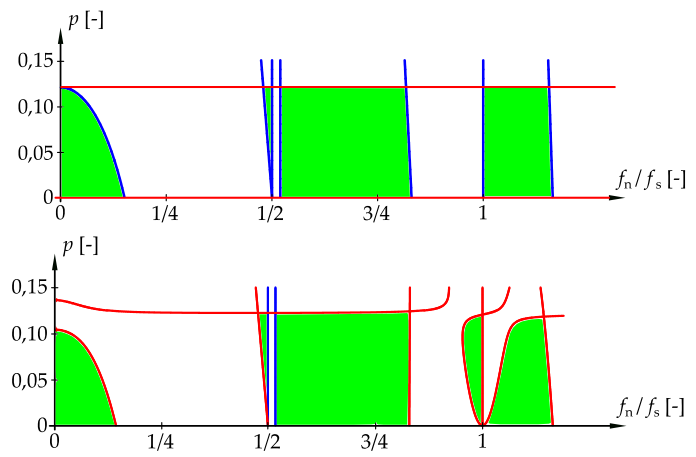


2. ábra: Modális modell

A rugalmas rendszer mozgásegyenletét sajátlengéseinek terében rögzítettem. A modális térben a rendszer mechanikai modellje két részmodellre bomlott, melyek a szabályozó erőn keresztül csatoltak. A két részmodell stabilitásvizsgálatát először egymástól függetlenül végeztem el, a közöttük lévő csatolást megszűntettem. A két függetlenített rendszer vizsgálatából adódó, stabilitáshoz vezető szabályozási paraméterek közül meghatároztam azokat, melyek mindkét rendszert stabilizálták. Ezek alapján közelítettem a két szabadságfokú rendszer stabilitástérképét. Ezután a két szabadságfokú (modális térben csatolt) rendszer stabilitását vizsgáltam digitális szabályozás mellett. Az adódó stabilitástérképeket ellenőrzésképpen összehasonlítottam a függetlenített, egy szabadságfokú esetekből nyert közelítő stabilitástérképekkel.

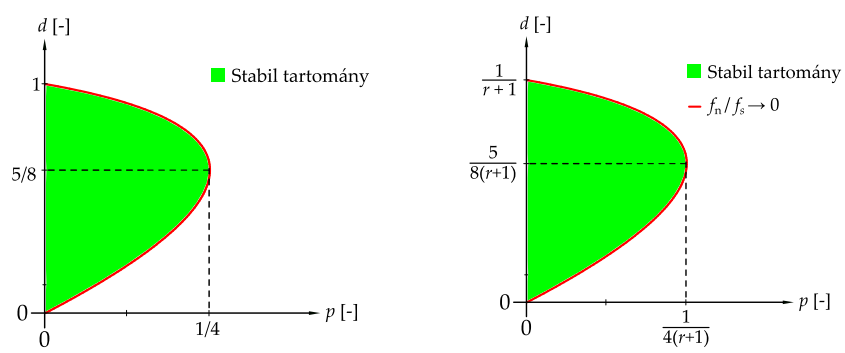
3. Eredmények

A két szabadságfokú (modális térben csatolt) rendszer stabilitástérképe hasonlónak adódott az egy szabadságfokú részmodellek vizsgálata alapján meghatározott közelítő stabilitástérképhez.



3. ábra: A közelített és a pontos stabilitástérkép

A két szabadságfokú mechanikai rendszer stabilitástérképének alakja magas mintavételi frekvencia mellett közelíti az egy szabadságfokú merev test stabilitástérképének alakját. A stabilitási határokat a rendszer tömegaránya ($r = m_2 / m_1$) módosítja.



4. ábra: Merev és rugalmas rendszer stabilitástérképe

4. Összefoglalás

Szakdolgozatomban beláttam, hogy minél nagyobb a közvetlenül nem szabályozott szabadságfok tömege a szabályozottéhoz képest, annál kisebb dimenziótlan p és d tényezők mellett stabilizálható a szabályozás. A gyakorlatban jellemző mintavételi frekvencia a szabályozott rendszer sajátfrekvenciájánál akár három nagyságrenddel is nagyobb. Magas mintavételi frekvencia mellett a rugalmas rendszer stabilitástérképe jól közelíthető a merev test szabályozásának stabilitástérképével. Ekkor a stabil tartomány határai a két szabadságfokú konstrukció esetében $1+m_2 / m_1$ -gyel fordítottan arányosan változik.

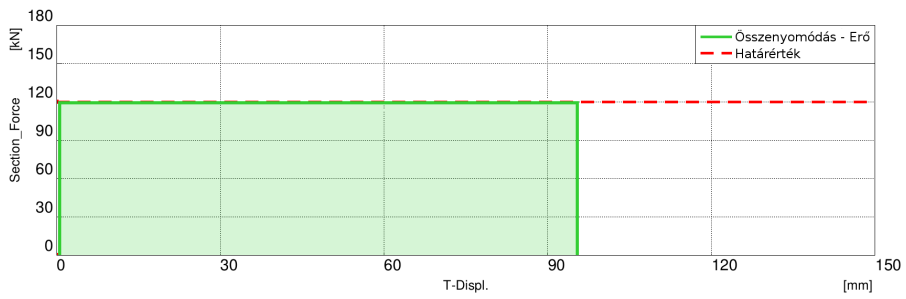
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar, Műszaki Mechanikai Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5.
www.mm.bme.hu

Ütközési energia elnyelő elem (crashbox) kézi és gépi optimalizálása (angol)

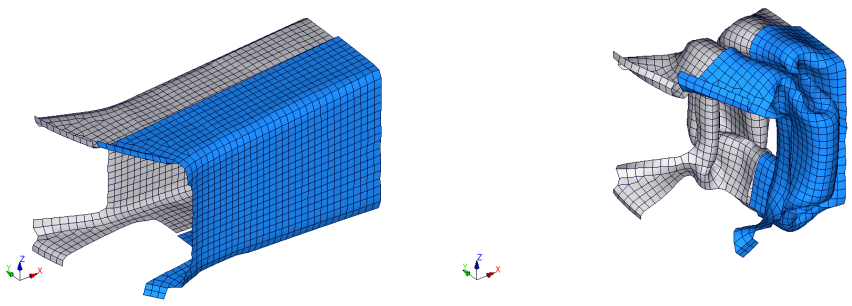
HORVÁTH ANDRÁS LEVENTE
Mechatronikai mérnöki BSc, Gépészeti Modellezés Specializáció, 2017/2018/I.
Témavezető: Dr. Kossa Attila, egyetemi docens, kossa@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A crashbox egy ütközési energia elnyelő elem, ütközés esetén a jármű mozgási energiáját képlékeny alakváltozással nyeli el. Célja, hogy alacsony sebesség ütközések (max. 15 km/h) során megóvja az autó vázszerkezetét a károsodástól, ezáltal csökkentve a javítás költségeit. Emiatt a vázszerkezetre átadható erőre egy határértéket írunk elő. További cél a deformációs hossz minimalizálása az egyéb alkatrészek védelmében. Így adódik az ideális viselkedés, melyben az átadott erő az ütközés során a határértéken fut végig. A geometria optimalizálásának célja minél jobban közelíteni ezt a viselkedést. Én az autó elején lévő crashbox optimalizálásával foglalkoztam.



1. ábra. Az ideális "Összenyomódás - Erő" görbe



2. ábra. Az alapgeometria ütközés előtt és után

2. Kézi és automatizált optimalizáció

Az optimalizáció végeselem szimuláció segítségével történik, melyben a crashboxot és a hozzá csatlakozó alkatrészeket egy egyszerű autómodellre "rögzítjük". Ezt a modellt egy valós töréstesthez hasonló módon egy akadálynak ütköztetjük, és vizsgáljuk a crashbox viselkedését. Az iparban elterjedt módszer a kézi optimalizáció. Ez általában egész jó eredményt ad, viszont igen sok munkaórába kerül a próbálgatások miatt. Ezt én is elvégeztem a fenti geometrián 80 munkaóra alatt, a "hagyományos" elveket követve.

A dolgozat célja egy olyan automatizált módszer elkészítése, amely ezt a folyamatot képes önállóan elvégezni, jelentősen csökkentve az emberi időráfordítást. Ehhez természetesen minden lépést automatizálni kell, beleértve az új geometria létrehozását, a szimuláció futtatását az új alkatrésszel, illetve a kiértékelést. Ezt a rendszert egy genetikus optimalizáló programmal és a különböző CAE (pre-processor, solver, postprocessor) programok Python scriptből történő vezérlésével oldottam meg.

3. Eredmények

Az automata optimalizálót először egy egyszerűsített modellen teszteltem, majd megkapta ugyan azt a feladatot, amin én kézzel dolgoztam. Kb. 130 óra és 2000 variáns tesztelése után a program a 3. ábrán látható megoldást hozta létre. Fontos megjegyezni, hogy 14 óra után már készített olyan formát, ami jobb volt a kézzel létrehozottnál. Megfigyelhető, hogy a gépi megoldáshoz tartozó kék vonal lényegesen pontosabban követi az ideális viselkedést. Az automatizált optimalizáció indításához legfeljebb 1-2 óra szükséges a korábbi 80 munkaórához képest.

3. ábra. A kézi (bal) és gépi (jobb) optimalizáció eredménye

4. Összefoglalás

Az automata módszerrel sikerül elérni a kitűzött célt. Az ezáltal készített formák kevesebb, mint 24 óra alatt mutattak olyan jó viselkedést, mint a legjobb kézzel készített geometria. Ha a program elég futásidőt kapott, akkor a készített változatok lényegesen pontosabban követték az ideális viselkedést, mint a manuálisan létrehozott crashboxok bármelyike. Az általam készített automatizált módszerrel a szükséges emberi időráfordítás több, mint 95%-al csökkenthető.

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar, Műszaki Mechanikai Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5.
www.mm.bme.hu

Gyakorlati modell pneumatikus fékszerkezetek hőmérséklet becsléséhez

Horváth Hanna Zsófia
Mechatronikai mérnöki BSc, Gépészeti Modellezés Specializáció, 2017/2018/I.
Konzulens: Gangel Kálmán, Kutatási-Fejlesztési Csoportvezető, Knorr-Bremse Fékrendszerek Kft.
Témavezető: Dr. Magyar Bálint, adjunktus, Műszaki Mechanikai Tanszék

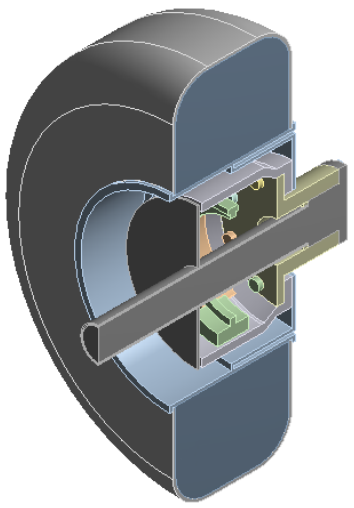
1. Bevezetés

Napjainkban számos helyen alkalmaznak haszongépjárműveket. Ahhoz, hogy a gépjármű biztonságosan tudjon közlekedni és a funkcióját ellátni, elengedhetetlen, hogy a fékek megfelelően működjenek, ezért nagyon fontos azok hőmérsékletének ismerete. A fékhőmérsékletet lehet mérni vagy becslő algoritmus segítségével közelíteni, végeselemes szimuláció használatával pedig pontos képet lehet kapni a hőmérséklet-eloszlásról.

2. Alkalmazott módszerek

A hőmérsékletbecslés validálására készültek referencia-, ill. validációs mérések. Az algoritmus különböző körülmények (pl. esős időjárás, tartós lejtmenet) között lett tesztelve.

Dobféken termikus végeselemes vizsgálatot végeztem, melyet *ANSYS 18.0* szoftverbe implementáltam. A 3 dimenziós, állandósult állapotbeli szimuláció eredményeképpen adódik a hőmérséklet-eloszlás. A forgásszimmetrikus részek miatt elegendő félmodellt készíteni (ld. 1. ábra), ezzel csökkenthető az elemszám, azaz a számítási kapacitásigény, tehát rövidebb idő alatt érhető el a konvergens eredmény.



1. ábra. Az elkészített 3 dimenziós modell

A végeselemes szimuláció elkészítéséhez meg kell határozni a peremfeltételeket. A hővezetés definiáláshoz minden alkatrész anyagának hővezetési tényezőjét kell kigyűjteni anyagtáblázatokból, ill. az irodalomban olvastottakból, valamint az alkatrészek közötti kontaktokat kell meghatározni. A hőátadási tényező tapasztalati képlet alapján a geometria adott $v(r)$ sebességű pontjára:

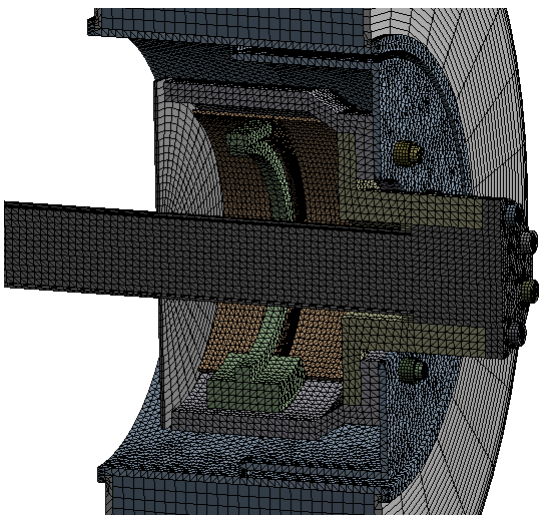
$$\alpha = 6.4 \cdot v(r)^{0.75} \,. \tag{1}$$

A hősugárzás a különböző felületpárokra az emissziós tényező megadásával definiálható, jelen szimuláció során 0.8, ill. 0.5 értékeket adtam meg a megfelelő felületcsoportokra. Végül a súrlódó felületekre meg kell határozni a fékezéskor a mozgási energiából keletkező disszipált hő nagyságát az i-edik kerékre, melyet az ébredő súrlódási erő teljesítményével lehet számolni:

$$P_{\mathrm{s},i} = -\frac{C_{\mathrm{w}}(p_i - p_{\mathrm{t}})v_i}{r_i} \,, \tag{2}$$

ahol C_{w} a fékkonstans, p_i az adott kerékre kivezérelt kamranyomás, p_{t} a felfekvési nyomás, v_i az adott kerék sebessége, r_i az adott kerék sugara. A kapott teljesítmény értéke analitikusan ellenőrizhető. Mivel a szimulációval kapott eredményeket valós mért eredményekhez kívánom hasonlítani, az ennek megfelelő környezeti hőmérséklet: $T_\infty = 22\ ^\circ\mathrm{C}$.

Az elkészített háló egy részletét mutatja a 2. ábra. Ahhoz, hogy a háló a lehető legstrukturáltabb legyen, különböző módszerek alkalmazhatóak (pl. *Sweep*, *Multizone*, *Map*).



2. ábra. Az elkészített háló egy részlete

3. Eredmények

A szimulációval kapott hőmérséklet-eloszlást szemlélteti a 3. ábra.

3. ábra. Hőmérséklet-eloszlás

Látható, hogy a legnagyobb hőmérséklet a fékdobon alakul ki. Hálófüggetlenségi vizsgálatot végezve négyféle hálón, elmondható, hogy a szimulációs eredmények hálófüggetlenek. A szimulált, ill. mért maximális hőmérsékletekre a relatív hiba csupán 3.68%, ami elfogadhatónak mondható.

4. Összefoglalás

A hőmérsékletbecslő algoritmus validálására készültek mérések és végeselemes szimuláció. Az így kapott fékdobhőmérsékletek nem térnek el nagyban egymástól. A hőmérséklet-eloszlás segítségével pontosan meghatározható, hol alakul ki a legnagyobb hőmérséklet a fékdobon. Ezt felhasználva, a további mérések során a legkritikusabb eset vizsgálható.

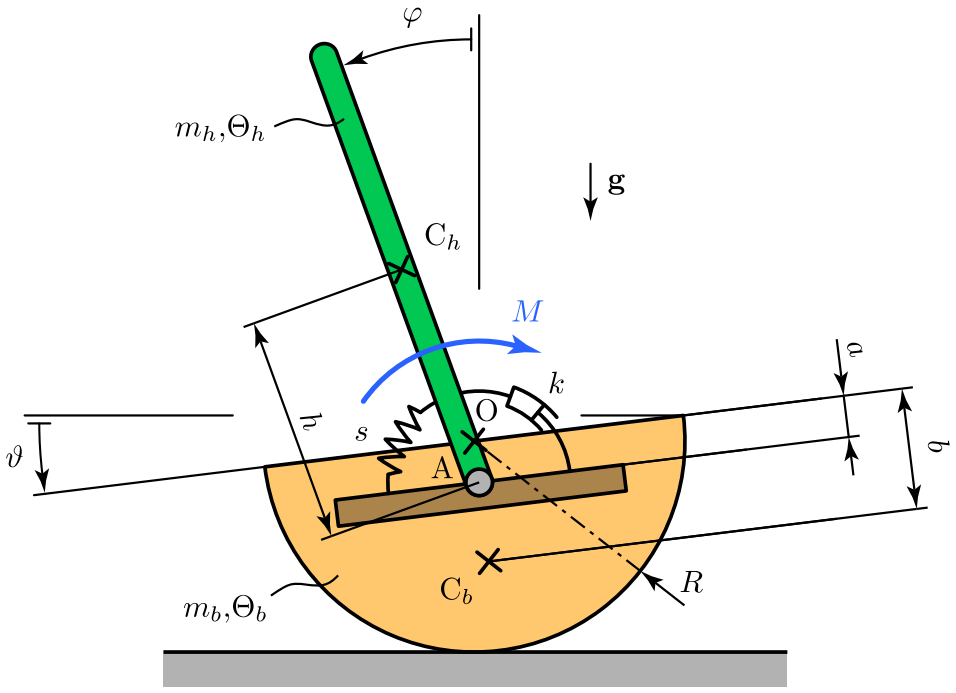
Knorr-Bremse Fékrendszerek Kft.
1119 Budapest, Major u. 69., www.knorr-bremse.com
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar, Műszaki Mechanikai Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5., www.mm.bme.hu

Emberi egyensúlyozás különböző érzékszervi információk alapján

Hu Jia Lin
Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2017/2018/I.
Témavezető: Várszegi Balázs, tanársegéd, varszegi@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A dolgozatom során a különböző érzékszervekből érkező információk egyensúlyozásra gyakorolt hatását vizsgálom. Az egyensúlyozás folyamata lényegében egy rendszer instabil egyensúlyi helyzete körüli stabilizálás. Az általam vizsgált rendszer egy síkbeli modell, melynek része egy koncentrált paraméterű rúd, ami az embert modellezi, és egy félkör alakú egyensúlyozó deszka (ld. 1. ábra).



1. ábra. Egyensúlyozás síkbeli 2 DoF modellje

A modell legfőbb része az agyi szabályzás révén a bokában létrejövő szabályzó nyomaték, ami két időkésleltetéses PD szabályzóként van modellezve

$$M = P_\varphi\,\varphi(t-\tau_1)+D_\varphi\,\dot\varphi(t-\tau_1)+P_\vartheta\,\vartheta(t-\tau_2)+D_\vartheta\,\dot\vartheta(t-\tau_2)\,.$$

Az ember szöghelyzetéhez és szögsebességéhez tartozó tagok a fül (vesztibuláris) szabályzó hatását, a deszka szöghelyzetéhez és szögsebességéhez tartozó tagok a szem (vizuális) szabályozását modellezik.

2. Alkalmazott módszerek

A rendszer mozgásegyenletének felírásához másodfajú Lagrange-egyenletet alkalmaztam. A kapott egyenlet nemlineáris, ezért linearizáltam az egyensúlyi helyzet körül, azt feltételezve, hogy egyensúlyozásnál a szögkitérések kicsik. Majd alkalmaztam a Cauchy-féle átírást, hogy elsőrendű rendszert kapjak

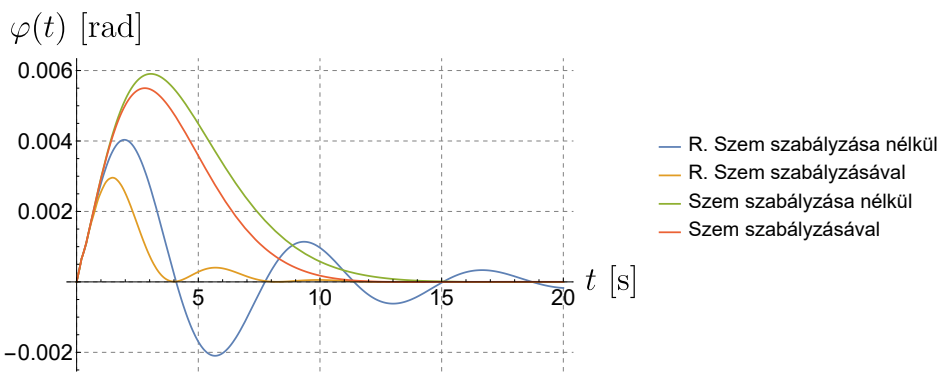
$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\,\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_\varphi\,\mathbf{x}(t-\tau_1) + \mathbf{B}_\vartheta\,\mathbf{x}(t-\tau_2)\,.$$

A mozgásegyenlet ismeretében, pedig megvizsgálható a rendszer stabilizálhatósága. A késleltetett differenciálegyenlet rendszer miatt az alkalmazott módszerek a D-szeparáció és a szemi-diszkretizáció. Ezen módszerekkel két kijelölt rendszer paraméter síkjában, ismerve a többi paramétert, vizsgálható a stabilitás egy úgynevezett leképezési mátrix legnagyobb abszolút értékű sajátértéke alapján.

Legelőször zérus szem paraméterekkel megkerestem a legjobb fül paramétereket, majd ezekkel megkerestem az azokhoz tartozó legjobb szem paramétereket is. Az eredeti esettel való összehasonlítás céljából, minimálisan rontott fül paraméterekkel megint csak megkerestem legjobb szem paramétereket. Ezen paraméterekkel végeztem numerikus szimulációkat, hogy megvizsgáljam a különböző esetek hatását a rendszer mozgására. A szimulációk összehasonlíthatóság érdekében szükséges az azonos kezdeti feltétel, illetve késleltetett rendszer révén a kezdeti feltétel egy intervallumra van értelmezve.

3. Eredmények

Az eredmények alapján kimondható, hogy a szem szabályzásának megléte segít az egyensúlyozásban, azonban az is észrevehető, hogy a rontott fül paraméterek esetében a szemnek a javító hatása jelentősebb, sőt az eredmény még stabilabb mozgást eredményez, mint az eredeti nem rontott esetben.



2. ábra. Numerikus szimulációra példa

4. Összefoglalás

A dolgozat során meghatározott eredmények alapján egy durva becslés adható, hogy milyen hatása van a két érzékszervnek az egyensúlyozásban. Felmerült a dolgozat készítése során, hogy érdemes lenne a jövőben méréseket is végezni a szabályzók hatásának megismerésére. A bokában található passzív csillapítás értékének vizsgálata szintén szükséges, mivel a vizsgálatom során alkalmazott érték bizonytalan. A modell fejlesztésére lehetőség további szabályzó tagok bevezetése, például integráló és gyorsulással arányos tag.

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar, Műszaki Mechanikai Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5.
www.mm.bme.hu

A transzformátorok vasszerkezete és az ott fellépő szilárdságtani problémák végeselemes és analitikus modellezése

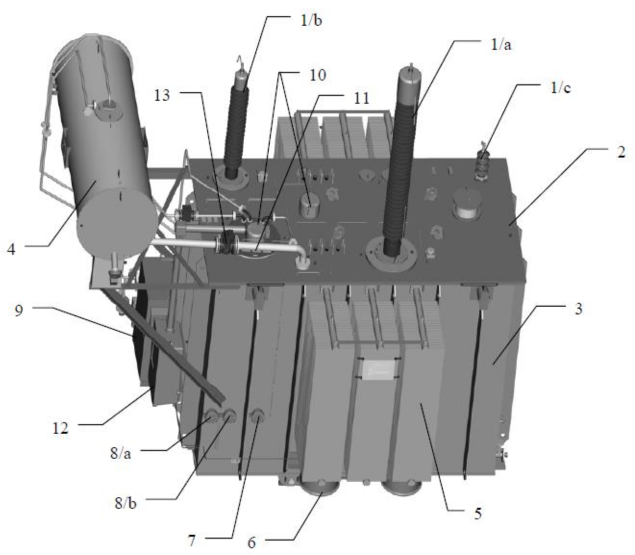
KÁCSOR SZABOLCS

Mechatronikai mérnöki BSc, Mechatronikai Berendezések Tervezése Specializáció, 2017/2018/I.

Témavezető: Dr. Kovács Ádám, egyetemi docens, adamo@mm.bme.hu

1-2. Bevezetés, A transzformátorok vasszerkezete

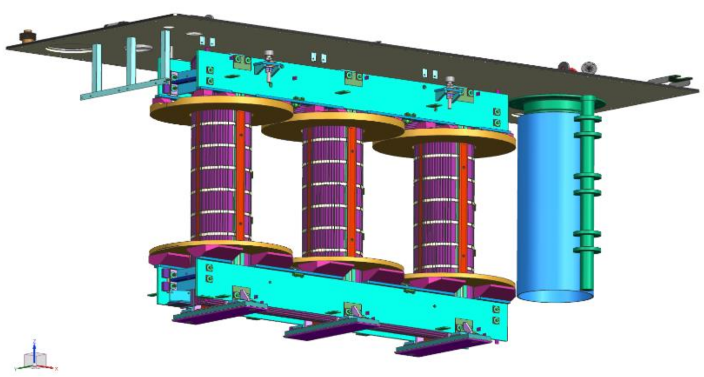
Dolgozatomban rövid bevezető után először a transzformátorok történetét, működési elvét mutattam be, majd a berendezés vasszerkezeti konstrukciójára tértem ki, ismertetve annak részeit, konstrukciót lehetőségeit, különös figyelmet szentelve az általam vizsgált szilárdságtani probléma, a fedélnek az fokozatkapcsoló (OLTC) súlyából származó lehajlásának szempontjából fontos részeknek.



1. ábra. A transzformátor vasszerkezete

3. Ipari példák a fedél lehajlására

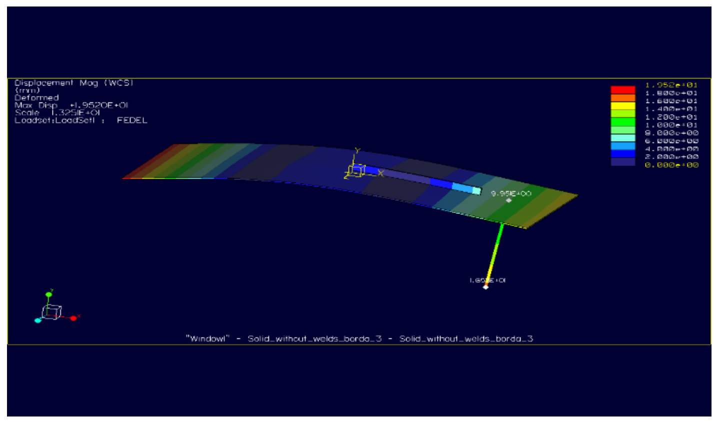
A második fejezetben olyan transzformátorokat mutattam be, melyeknél a fedél lehajlása problémákat okozott, valamint az ebből származó problémákat ismertettem, s a lehetséges megoldási módokat. Kitértem néhány olyan vasszerkezeti kialakítási lehetőségre is, amelyeknél a fedél és a rajta lévő OLTC lehajlásának veszélye különösen fennáll.



2. ábra: Fedélorsók a vasmagoszlopok távolságán belül.

4. A lehajlás elemzése FEM-mel

A különböző módszereket a lehajlás javítására egy FEM-es program, a Wildfire 5.0 Promechanika moduljának segítségével vizsgáltam, s végül ezek közül a megfelelő helyre való, s megfelelő geometriai méretekkel rendelkező bordaberakást találtam a legmegfelelőbbnek.



3. ábra: A lehajlás csökkentésének vizsgálata borda felrakásával

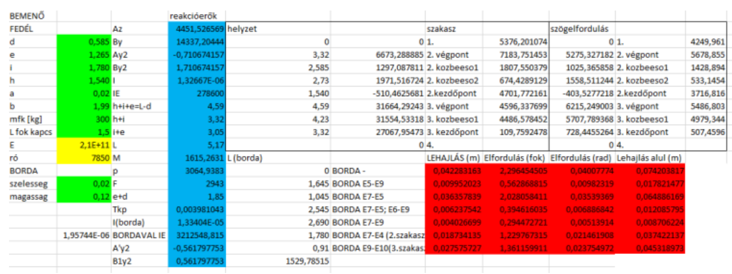
5-6. A lehajlás elemzése Betti-tétellel, számítófájl készítése

A szilárdságtan egyik munkatételének felhasználásával számoltam analitikus módon a legmegfelelőbbnek talált lehajlásjavítási módszert, mely megfelelő pontossággal adta vissza a FEM-es eredményeket.

$$f = \int_0^L \left(\frac{N}{AE} n + \frac{M_h}{EI_z} m_h + \frac{M_t}{GI_p} m_t\right) ds$$

A számításokhoz használt legfontosabb egyenlet

Az elvégzett kalkulációk alapján egy fájlt készítettem, melynek segítségével számolható „pesszimista” becsléssel a bemenő paraméterek megadása után, hogy mekkora lesz az OLTC aljának elmozdulása, így megrövidítve a lehajlásbecslés folyamatát, hiszen kevesebbszer kell a FEM-es modellezéssel próbálkozni. Ezt követte munkám rövid összefoglalása.



4. ábra: A számítófájl kezelőfelülete

Kísérleti eszköz fejlesztése és vizsgálata egyenáramú motor pozíciószabályozásához

KÁNTOR TAMÁS
Mechatronikai mérnöki BSc, Gépészeti Modellezés Specializáció, 2017/2018/I.
Témavezető: Dr. Zelei Ambrus, tudományos munkatárs, zelei@mm.bme.hu

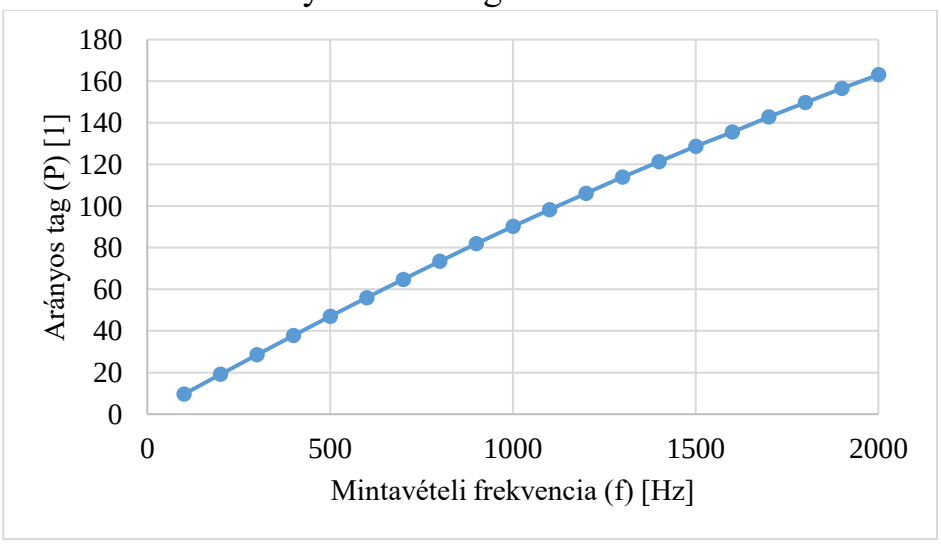
1. Bevezetés

A mechatronika egyik legfontosabb területe a számítógépes szabályozás. Modern világunkban elengedhetetlen a robotok pozíciószabályozása, ezért jelentős kutatások folynak ezen területeken. Dolgozatom során egy egyenáramú motor tengelyére kapcsolt tárcsa pozíciószabályozásával foglalkoztam. Ehhez egy már meglévő kísérleti összeállítást fejlesztettem tovább. Vizsgáltam, hogy a mintavételi idő függvényében hogyan változik a P taggal történő pozíciószabályozás stabil tartománya. Numerikus szimulációval és kísérleti mérésekkel is elvégeztem a stabilitásvizsgálatot, végül a két eredmény értékelésével foglalkoztam. Mivel a stabilitás érzékeny a kezdeti és a megkívánt pozíció közti eltérésre, ezért mind a numerikus szimuláció, mint a kísérleti mérések során azonos kezdeti pozícióból indítottam a vizsgálatokat.

2. Numerikus stabilitásvizsgálat

A valós fizikai rendszer modelljét alkottam meg Matlab Simulink környezetben, ahol a motor visszaható elektromotoros erejét viszkózus csillapításként modelleztem. A numerikus szimuláció során a motor súrlódását a Coulomb-modell szerint értelmeztem. A rendszer bemeneti feszültségét egy P szabályozó segítségével állítottam elő.

A stabilitásvizsgálatot a kísérleti eredményekkel való összehasonlíthatóság miatt 100 – 2000 Hz között végeztem, 100 Hz-es lépésekkel. A numerikus szimuláció során megkerestem azt a maximális proporcionális tag értéket, ahol a szabályozott rendszer még nem veszti el a stabilitását. A szimuláció eredményét az 1. diagram tartalmazza.

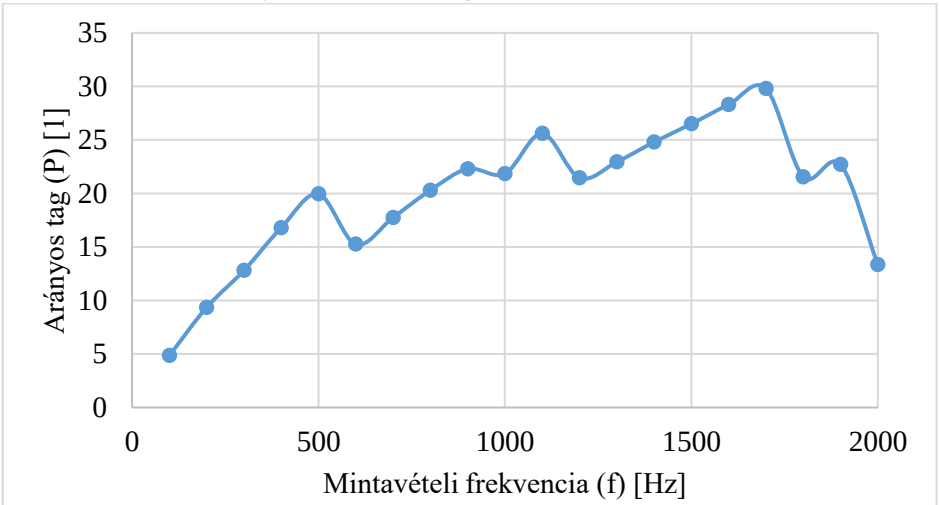


1. diagram - Numerikus szimulációval kapott stabil tartomány

A diagramról leolvasható, hogy a stabil tartomány közel lineárisan nő a mintavételi frekvenciával. A tartományt határoló görbe kismértékű telítődést mutat, ami a Coulomb-súrlódásnak köszönhető.

3. Kísérleti mérés

A kísérleti eszközzel szintén elvégeztem a már említett méréseket. A tárcsa elfordulását mérő inkrementális jeladó adatait mikrovezérlő dolgozta fel, és továbbította a számítógépnek, ahol Simulink környezetben megvalósított P szabályozó számította ki a motorra kapcsolt szükséges feszültségértéket. A kísérleti eredményeket a 2. diagram tartalmazza.



2. diagram - Kísérleti mérésekkel kapott stabil tartomány

Látható, hogy ebben az esetben a stabil tartomány közel sem olyan szabályos. A diagramon négy frekvenciaérték esetén is jelentős csökkenés tapasztalható a stabil tartományban, ami több tényező együttes hatása. A tárcsa egy áttétellel kapcsolódik a motor tengelyéhez, aminek a holtjátékát számításaim során elhanyagoltam. Mivel a tárgyalt csökkenések 600, 1200 és 1800 Hz esetén találhatók, feltehetőleg a rendszer sajátfrekvenciája is közrejátszott a stabilitás elvesztésében. A legnagyobb frekvencia esetén (2000 Hz) a mintavételi idő jelentősen lecsökkent a számítási időhöz képest, ami szintén negatív hatással volt a stabil tartományra.

4. Összefoglalás

A numerikus szimulációval, illetve a kísérleti mérésekkel kapott stabil tartományok nem korrelálnak. Előbbi esetén a maximális arányos tag értéke közel lineárisan nő a mintavételi frekvencia függvényében, míg utóbbinál a görbe csak szakaszonként mondható lineárisnak. A legnagyobb stabil P értékek között egy nagyságrendnyi különbség van.

Egyik, legjelentősebb oka az eltérésnek, hogy a valós fizikai rendszerre ható súrlódást egyszerű Coulomb-súrlódásként modelleztem. A Stribeck görbe által leírt súrlódási modell alkalmazásával reálisabb eredmények kaphatók. Továbbá az áttétel holtjátékát is elhanyagoltam, valamint a rendszer sajátfrekvenciájának hatását sem vettem figyelembe a szimuláció során. További mérésekkel igazolható lenne az alacsony mintavételi idő stabilitásra gyakorolt negatív hatása is.

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar, Műszaki Mechanikai Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5.
www.mm.bme.hu

Súrlódási veszteségek beépítése ablaktörlő rendszer végeselemes modelljébe

KÉTSZERI BENCE
Mechatronikai mérnöki BSc, Gépészeti Modellezés Specializáció, 2017/2018/I.
Témavezető: Dr. Magyar Bálint, egyetemi docens, magyar@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Szakdolgozatomban az ablaktörlő rendszerek jelenleg használatban lévő végeselemes szimulációs modelljébe kellett a súrlódási veszteségeket beépítenem. Mérések alapján a végeselemes szimuláció konzervatív, vagyis nagyobb feszültségeket számolunk az egyes alkatrészeken, mint amennyit a valóságban mérünk. Feltételezéseink szerint a súrlódás csökkenti az alkatrészek terhelését, mivel energia disszipálódik, ezáltal a szimuláció jobban közelíti majd a valóságot.

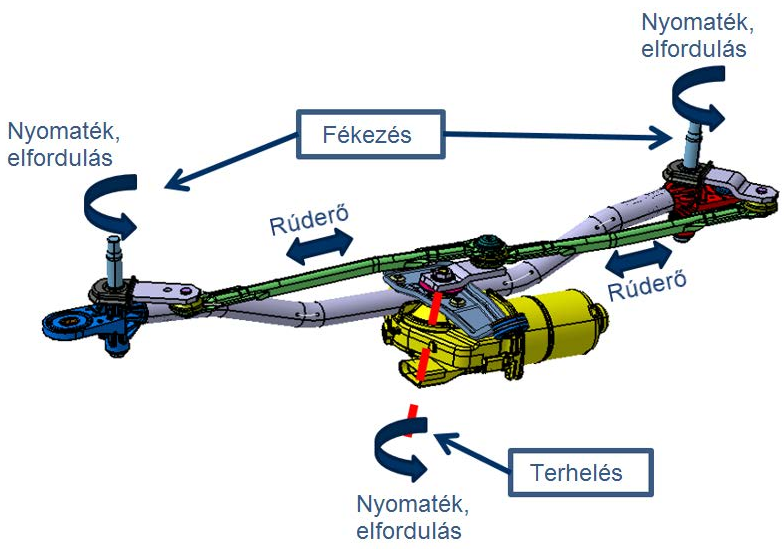
1. ábra - Komplett ablaktörlő rendszer CAD modellje

2. Alkalmazott módszerek

A súrlódási veszteségek beépítéséhez ismerni kell a végeselemes modell felépítését, ezért először ezt ismertettem. A modell elég összetett, nagyjából 100 különböző kapcsolat van definiálva a rendszerben. Első feladatom azon kapcsolatok megkeresése volt, ahol a súrlódásnak jelentős hatása lehet. Azokat a csatlakozásokat vettem számításba, ahol van relatív elmozdulás.

Ezt követően különböző súrlódásmodellezési eljárásokat kellett keresnem, amelyek relevánsak egy ablaktörlő rendszer szempontjából és analitikusan ellenőrizhetők. Három ilyen eljárást találtam, amiből kettőt sikerült is egyszerű modelleken tesztelni. Ablaktörlő rendszerbe viszont már csak az egyik módszert implementáltam, azt viszont kétféleképp is. Ezeket összehasonlítva sikerült az ideális módszert megtalálnom.

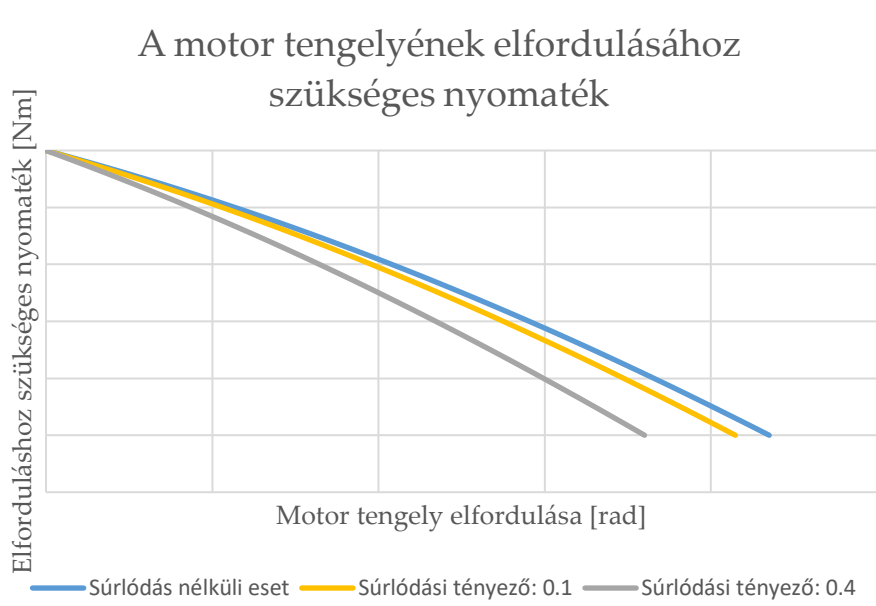
Mivel a súrlódási tényező értékéről nincs mérési eredményünk, ezért kitaláltunk egy módszert, amivel a számított és a mérési eredmények összehasonlíthatók lesznek. A motor kihajtó rudat különböző pozíciókba állítva terheljük a rendszert, miközben az egyik kihajtó rudat fékezzük. A szimulációs esetek és a mérendő mennyiségek *2. ábrán* láthatók, egy ablaktörlő rendszerhez 48 modellt építettem.



2. ábra - szimulációs esetek

3. Eredmények

Minden szimulációs esetet 0.1-es és 0.4-es súrlódási tényezővel is lefuttattam, hogy pontos képet kapjunk a súrlódás hatásairól.



3. ábra - a motor tengelyének elfordulásához szükséges nyomaték egy esetben

A *3. ábrán* láthatók az eredmények. A különböző súrlódási tényezőkkel futtatott számítások alapján látszik, hogy adott terhelés esetén annál kisebb elmozdulás ébred a rendszerben, minél nagyobb a súrlódási tényező. A szimulációk alapján a rúdban ébredő erőt az hajtómotor elfordulása befolyásolja leginkább, így ezek alapján a rúdban ébredő erő csökkenni fog. Ezt a szimulációk is igazolják.

4. Összefoglalás

A szimulációs esetek mérései folyamatosan folynak, valamint súrlódási tényező mérés is várható az elkövetkező időszakban.

Az eredmények biztatók, a súrlódásnak jelentős hatása van az ablaktörlő rendszerben, és a súrlódási veszteségek beépítése a valóság irányába mozdította el a számított eredményeket.

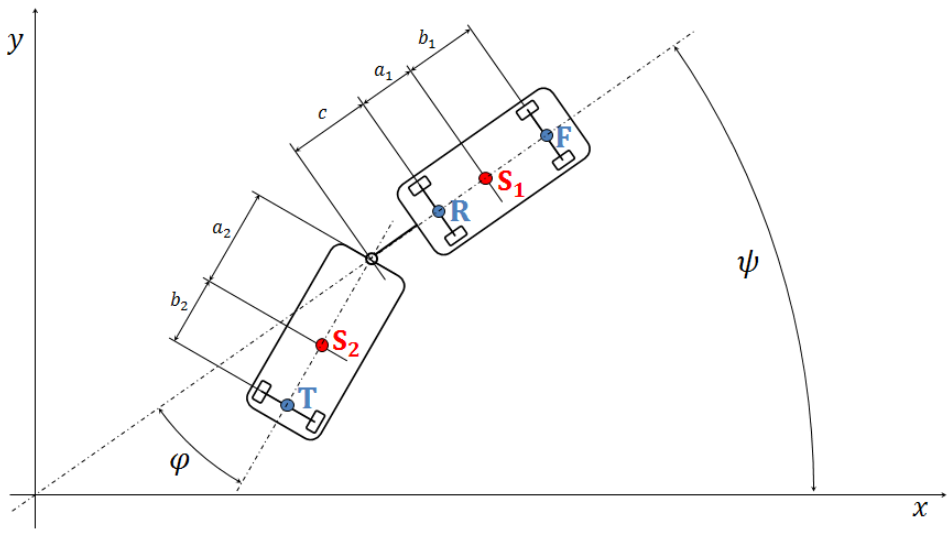
A szakdolgozat készítés közben azt élveztem a legjobban, hogy szabad kezet kaptam a súrlódások beépítésében, rengeteg szimulációt futtattam, mindig újabb és újabb problémákra keresve megoldást. Így mindig nagy örömet okozott, amikor egy működőképes modell létrejött és a várt eredményeket produkálta.

Pótkocsis járműszerelvény dinamikai vizsgálata

KILIÁN DÁNIEL
Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2017/2018/I.
Témavezető: Várszegi Balázs, egyetemi tanársegéd, varszegi@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A szakdolgozatom témája egy nyerges vontatóval összekapcsolt pótkocsi viselkedésének vizsgálata. Az utakon tapasztalható az a jelenség, hogy egy hirtelen fékezés hatására a vontató mögül a pótkocsi elkezd kifordulni. A kifordulások egyes esetekben egyre nagyobbak, lengésszerűek lesznek, ami jelzi, hogy az egyenes vonalú mozgás elvesztette stabilitását, ekkor a gyakorlatban bekövetkezik a baleset (a pótkocsi a többi közlekedő autónak vagy úthatároló szalagkorlátnak ütközik). A feladat tehát tulajdonképpen egy stabilitási probléma, melynél stabilitási kritérium a vontatóhoz képesti ψ kifordulási szögre vonatkozik. A modellben a kerék-talaj kapcsolatot az úgynevezett ’brush model’-lel modelleztem.



1. ábra. A vontató és a pótkocsi egyszerű mechanikai modellje

2. Alkalmazott módszerek

A dinamikai rendszer mozgását leíró első rendű differenciál egyenletrendszer az Appel-Gibbs egyenletekkel van levezetve. Ez a módszer a mozgási energia mintájára felírt gyorsulási energiából indul ki, így származtatja a dinamikai egyenlet bal oldalát:

$$S = \frac{1}{2} m_1 \boldsymbol{a}_{S_1} \cdot \boldsymbol{a}_{S_1} + \frac{1}{2} m_2 \boldsymbol{a}_{S_2} \cdot \boldsymbol{a}_{S_2} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}_1^T \cdot \boldsymbol{\theta}_{S_1} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_1 + \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}_2^T \cdot \boldsymbol{\theta}_{S_2} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_2$$

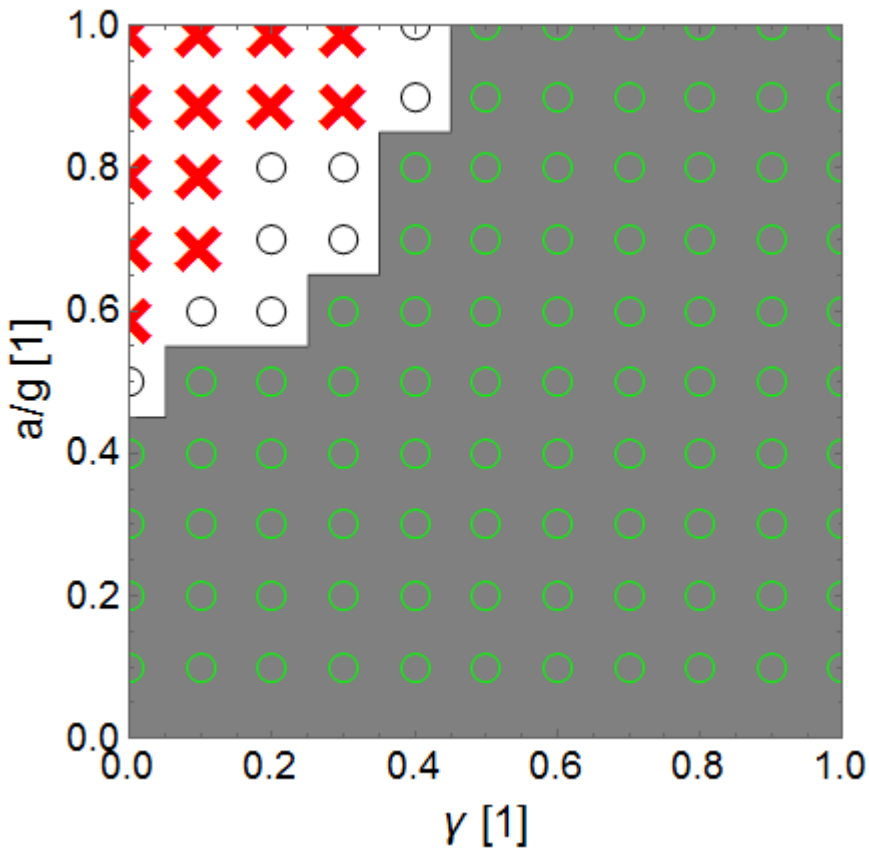
$$\frac{\partial S}{\partial \dot{\sigma}_i} = \Gamma_i.$$

A jobb oldal felírása a virtuális teljesítmény segítségével történik:

$$\delta P = \boldsymbol{\Gamma} \cdot \boldsymbol{\delta\sigma}.$$

A teljesítmény kifejezhető a pszeudóerők és a pszeudósebességek szorzatával is, így a pszeudóerőkre (Γ_i) a virtuális teljesítményből is kapunk egy kifejezést. A gyorsulási energia pszeudógyorsulások szerinti deriváltjaiból kapott kifejezések azonos indexű tagjai megegyeznek a virtuális teljesítményből kapott pszeudóerőkkel.

A szimulációk során a járműszerelvényre ható fékerőt a vontató és a pótkocsi között osztottuk meg és a fékerő eloszlás változtatásának hatását vizsgáltuk. A fékerő γ-szorosa terhelte a pótkocsit, és $(1-\gamma)$-szorosa a vontatót. A legnagyobb fékerő úgy lett megszabva, hogy az általa létrehozott lassulás kisebb legyen, mint *1g*.



2. ábra: A járműszerelvény viselkedése különböző nagyságú fékerők és fékerő eloszlások esetén

3. Eredmények

A szimulációkból azt lehet kiolvasni, hogyha csak a vontató van fékezve, akkor az erős fékezéseket kerülni kell, mert a pótkocsi kifordulhat. Az optimális megoldás ezek alapján a pótkocsi fékezése, mivel ez esetben még a rá ható erősebb fékezés esetén is beáll a vontató mögé a kezdeti kitérülésből. A gyakorlatban mind a pótkocsit, mind a vontatót fékezik, viszont mivel általában más cég üzemelteti a pótkocsit, mint a vontatót, ezért a fékbetét beszerzése a pótkocsira plusz költséggel jár.

Pneumatikus trélerszimulátor tervezése és építése tesztpadi és járműves környezethez

Nádházi Tünde
Mechatronikai mérnöki BSc, Gépészeti Modellezés Specializáció, 2017/2018/I.
Témavezető: Dr. Szabó Zsolt, egyetemi docens, szazs@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A Knorr-Bremse Fékrendszerek Kft. elektronikus levegőelőkészítő rendszerek (EAC) tervezésével és tesztelésével foglalkozó csoportjának tagjaként az egyik jelentős levegőfogyasztó egységgel, a pótkocsival foglalkoztam.

A szakdolgozatom célja egy olyan trélerszimulátor megtervezése és építése volt, amelyet tesztfali környezethez vagy tehergépjárműhöz csatolva egy pótkocsi levegőfogyasztása jól szimulálható, ezzel gazdaságosabb és környezetbarátabb megoldást kínálva a teszteléshez. Egy nyergesvontatót és egy pótkocsit lehet látni az alábbi ábrán:

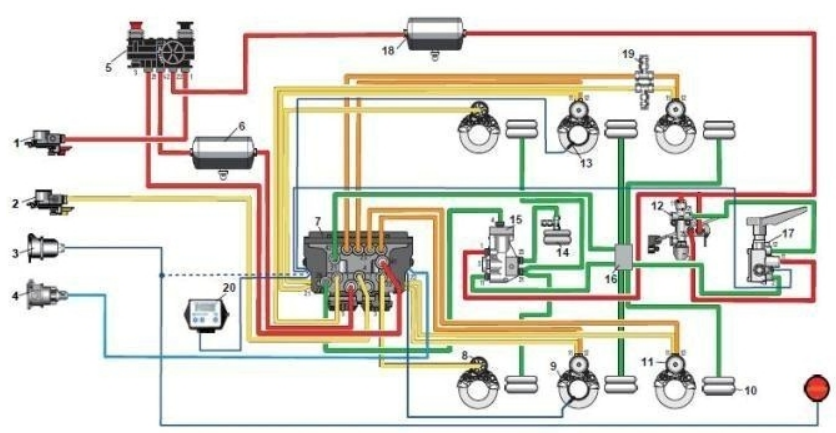
1. ábra. Kamion és többtengelyes pótkocsi

Global trailermag
http://www.globaltrailermag.com/news/article/breaking-knorr-bremse-enters-race-for-haldex-take-over, 2017.12.14. 18:00

2. Tervezés

A tervezés első lépéseként irodalomkutatást végeztem a pótkocsik levegőfogyasztásának témakörében. A pótkocsi két fő levegőfogyasztó rendszere az üzemi fék rendszer és a légrugókör. Többféle konfiguráció megvizsgálása után felállítottam a szimulátorral szemben támasztott követelményeket, amelyeket később is szem előtt tartva terveztem meg a modult.

Egy pótkocsi üzemi fék és légrugó rendszerének lehetséges kialakítását lehet látni az alábbi ábrán:



2. ábra. Pótkocsi üzemi fék rendszere és légrugóköre

MOGI, közúti járműrendszerek szerkezettana
http://www.mogi.bme.hu/TAMOP/kozuti_jarmurendszerek_szerkezettana/math-ch16.html 2017.12.14.15:00

A tervezett szimulátor többféle kialakítású pótkocsit képes szimulálni (például más tengelyszám, féktípus).

A trélerszimulátor fontosabb komponenseiben szenzorok segítségével mérhető a nyomás is.

3. Eredmények

A trélerszimulátor felépítése után méréseket végeztem a szimulátorral és egy referencia-pótkocsival is, majd összehasonlítottam ezek levegőfogyasztását. Az összehasonlítás a fékezéskor mért meghatározott nyomáskülönbségeken alapult. A pneumatikus trélerszimulátor légfogyasztása jól közelítette a referenciajármű légfogyasztását.

4. Összefoglalás

A szimulátor segítségével különböző funkciókat lehet tesztelni gazdaságosabban és akér hatékonyabban is, mintha egy valós pótkocsit használnánk. Emellett pedig pótkocsi helyett használva egy teherautón a szimulátort, a fogyasztása kisebb lesz, mintha egy valós pótkocsit csatlakoztattunk volna hozzá.

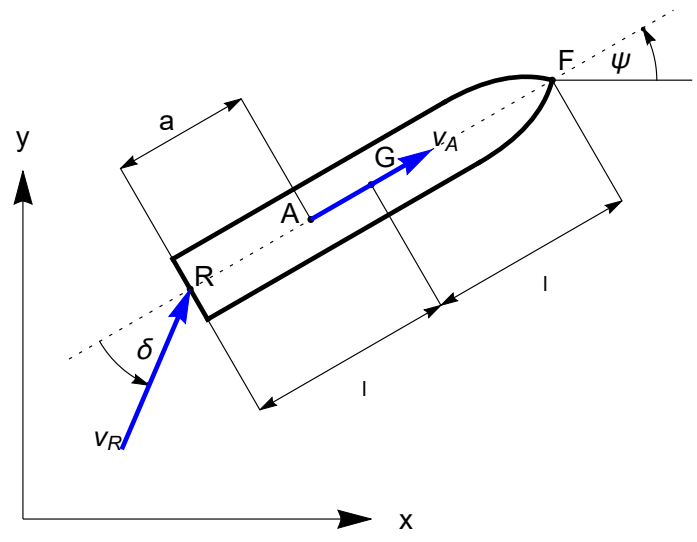
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar, Műszaki Mechanikai Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5.
www.mm.bme.hu

Hajók kormányzása predikción alapuló módszerekkel

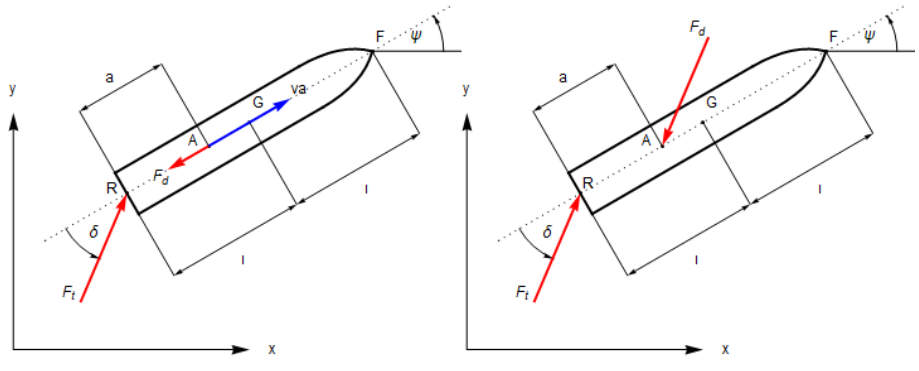
Palkó Dávid
Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2017/2018/I.
Témavezető: Várszegi Balázs, egyetemi tanársegéd, varszegi@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A dolgozatban a hajózás vizsgálatára alkalmas egyszerű mechanikai modellek felállításán keresztül bemutattuk, hogy a prediktív szabályozási módszerek hogyan segítik elő a hajók kormányzását. A szakirodalomban alkalmazott hajó modellek vizsgálata után, megalkottunk három egyszerű modellt.



1. ábra. 1. modell: kinematikai kényszerek



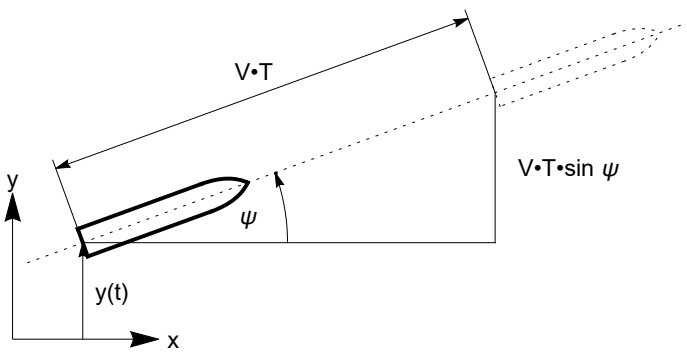
2. ábra. 2. és 3. modell: kinematikai kényszerek és erők

2. Alkalmazott módszerek

Az első modell a legegyszerűbb, ebben csak kinematikai kényszereket alkalmaztunk. Azt feltételeztük, hogy a hajó hátsó pontjának sebessége ismert, és van egy pont a hajó hossztengelyén, melynek nincs oldalirányú sebessége. Ezen lényeges egyszerűsítések ellenére nincs nagy eltérés a bonyolultabb modellekhez képest.

A második és harmadik modellben, a sebességkényszereket erőkre cseréltük, továbbá figyelembe vettük a hajó tömegét és tehetetlenségi nyomatékát. Így már a valóságot jobban leíró modellt kaptunk. A bonyolult áramlástani jelenségeket természetesen itt is figyelmen kívül hagytuk, ehhez részletesebb vizsgálat szükséges.

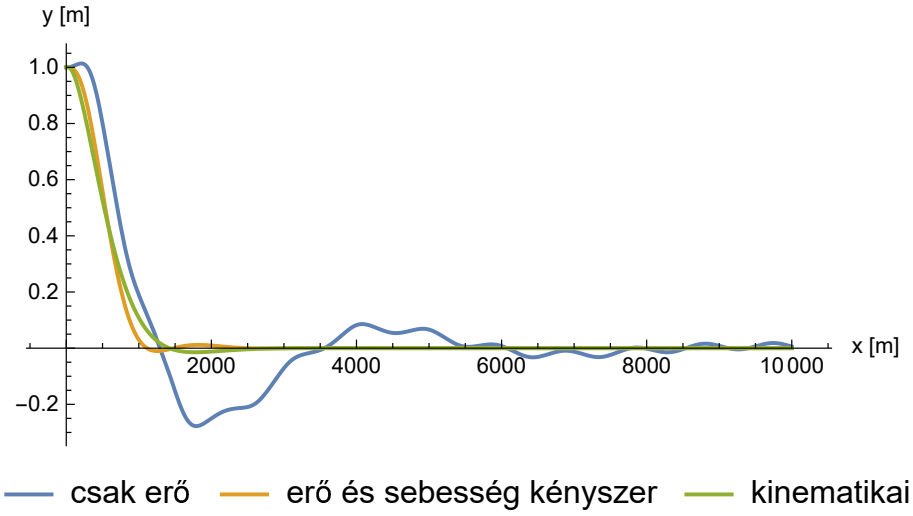
A megalkotott modellekkel szimulációt végeztünk és a pozíció szabályzást vizsgáltuk. A szabályzásban egy időben későbbi állapotot csatoltunk vissza, ahogy a 3. ábrán látható.



3. ábra. Preview

3. Eredmények

A stabil tartományból kiválasztott értékekkel szimulációt végeztünk. Az első két modellnél a prediktív szabályzással elértük a kívánt hatást, vagyis a hajó áttért a megadott egyenesen való haladásra. A harmadik modell esetén az ilyen típusú szabályzás nem megfelelő, mert a hajó csak hosszas oszcillálás után tér át az előírt egyenesre.



4. ábra. Prediktív szabályzás mozgáspályák

4. Összefoglalás

Összegezve, ha az s előrevetített út nagyságát megfelelően választjuk meg, akkor a sebesség nagysága nem befolyásolja a stabil mozgást. A prediktív szabályzással, tehát az emberek számára könnyen alkalmazható technikát kaptunk, ugyanis, ha a kormányos egy megfelelően választott távolságra előrenéz, és a hajót úgy kormányozza, mintha már ezzel a távolsággal előrébb lenne, akkor a sebesség nagyságától függetlenül elérhető a stabil kormányzás.

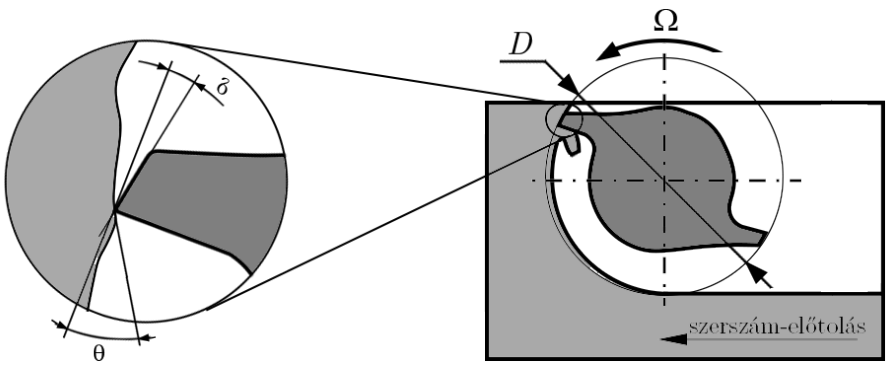
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar, Műszaki Mechanikai Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5.
www.mm.bme.hu

Hátlapkontakt vizsgálata marási folyamatokban

Zsiros Ádám
Mechatronikai mérnöki BSc, Gépészeti Modellezés Specializáció, 2017/2018/I.
Témavezető: Hajdu Dávid, doktorandusz, hajdu@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Az ipari versenyképesség szempontjából a különböző forgácsolási eljárások hatékonysága kiemelt szerepet játszik. A megmunkálási paraméterek megfelelő módon történő megválasztása javíthatja az anyagleválasztás sebességét, valamint a felületi minőséget, ellenkező esetben pedig nemkívánatos rezgéseket vonhat maga után. A mérések és a számítási eredmények között azonban eltérések tapasztalhatók, ezeknek egyik oka lehet a szerszám és a munkadarab közti hátlapkontakt. 1. ábra szerinti elrendezésben $\theta < -\delta$ esetén létesül hátlapkontakt.



1. ábra. A hátlapkontakt egyenirányú marás esetén

2. Alkalmazott módszerek

A probléma matematikai modellezése során egy időkésleltetett, periodikus együtthatós differenciálegyenlet adódik modális tömeg-csillapítás-rugó paraméterekkel. A szerszámél mozgása (1) és (2) egyenletek alapján leírható egy periodikus megoldás és az akörüli perturbáció (tranziens) összegeként.

$$m\ddot{y}_\mathrm{p}(t) + c\dot{y}_\mathrm{p}(t) + ky_\mathrm{p}(t) = Q(t) \tag{1}$$

$$m\ddot{\eta}(t) + c\dot{\eta}(t) + k\eta(t) = G(t)\left(\eta(t) - \eta(t-\tau)\right) \tag{2}$$

A $Q(t)$ periodikus gerjesztőfüggvény (3) egyenlet alapján történő Fourier-sorba fejtését követően $y_\mathrm{p}(t)$ periodikus megoldás (4) egyenletben leírt Fourier-sora (5) egyenlet alapján meghatározható [2].

$$Q(t) \approx A_0 + \sum_{n=1}^{N_\mathrm{F}} A_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{\tau}\right) + B_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{\tau}\right) \tag{3}$$

$$y_\mathrm{p}(t) \approx C_0 + \sum_{n=1}^{N_\mathrm{F}} C_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{\tau}\right) + D_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{\tau}\right) \tag{4}$$

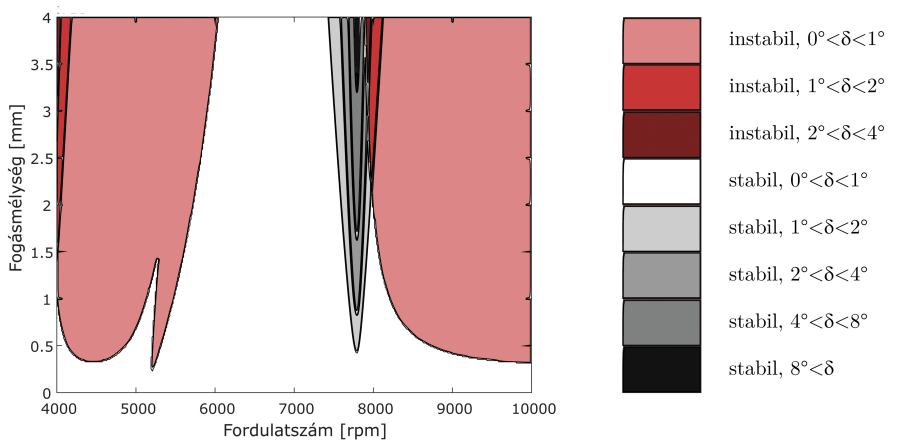
$$\begin{bmatrix} C_n \\ D_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k - \left(\frac{2\pi n}{\tau}\right)^2 m & c\left(\frac{2\pi n}{\tau}\right) \\ -c\left(\frac{2\pi n}{\tau}\right) & k - \left(\frac{2\pi n}{\tau}\right)^2 m \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_n \\ B_n \end{bmatrix} \tag{5}$$

A (2) egyenlet stabilitása szemidiszkretizációs módszerrel vizsgálható [1], mely során a periodikus rendszer Floquet-multiplikátorai kerülnek közelítésre.

Ezt követően a szerszámpálya meghatározásának segítségével összehasonlíthatóvá vált annak meredeksége a hátlapszöggel, így egyértelműen adódott, hogy létesült-e hátlapkontakt adott hátlapszög esetén vagy nem.

3. Eredmények

Az elvégzett szimulációk eredményei (2. ábra) alapján lehet következtetni, hogy az egyes esetekben a biztonságos, gyors és minőségi munka érdekében milyen irányba érdemes eltérni a rezonanciafrekvenciától.



2. ábra. Különböző hátlapszögek esetén előforduló kontakt

A 2. ábra során felhasznált paraméterek: $m = 2,701$ kg modális tömeg, $c = 62,647\frac{\mathrm{Ns}}{\mathrm{m}}$ modális csillapítás, $k = 7,206 \cdot 10^6 \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$ modális rugómerevség $a_\mathrm{e} = 1$ mm radiális fogásmélység és $f_\mathrm{z} = 0,05$ mm fogankénti előtolás.

4. Összefoglalás

A dolgozatban felhasznált paraméterkombinációk alapján mérések végezhetők, amelyek alátámaszthatják a szimulációk eredményeit. Emellett a kapott értékek felhasználásával megvizsgálható, hogy a hátlapkontakt mennyire befolyásolja a stabil tartományt. Ezen eredmények fényében már eldönthető, hogy a hátlapkontakt milyen mértékben ad választ a matematikai modell mérésektől való eltérésére.

Hivatkozások

[1] Insperger, T., Stepan, G.: Semi-Discretization for Time-Delay Systems (Stability and Engineering Applications). vol. 178. New York: Springer, 2011.

[2] Bachrathy, D., Insperger, T., Stépán, G.: Surface properties of the machined workpiece for helical mills. Taylor & Francis Group. 2009.

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar, Műszaki Mechanikai Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5.
www.mm.bme.hu

Pneumatikus trélerszimulátor tervezése és építése tesztpadi és járműves környezethez

Nádházi Tünde
Mechatronikai mérnöki BSc, Gépészeti Modellezés Specializáció, 2017/2018/I.
Témavezető: Dr. Szabó Zsolt, egyetemi docens, szazs@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A Knorr-Bremse Fékrendszerek Kft. elektronikus levegőelőkészítő rendszerek (EAC) tervezésével és tesztelésével foglalkozó csoportjának tagjaként az egyik jelentős levegőfogyasztó egységgel, a pótkocsival foglalkoztam.

A szakdolgozatom célja egy olyan trélerszimulátor megtervezése és építése volt, amelyet tesztfali környezethez vagy tehergépjárműhöz csatolva egy pótkocsi levegőfogyasztása jól szimulálható, ezzel gazdaságosabb és környezetbarátabb megoldást kínálva a teszteléshez. Egy nyergesvontatót és egy pótkocsit lehet látni az alábbi ábrán:

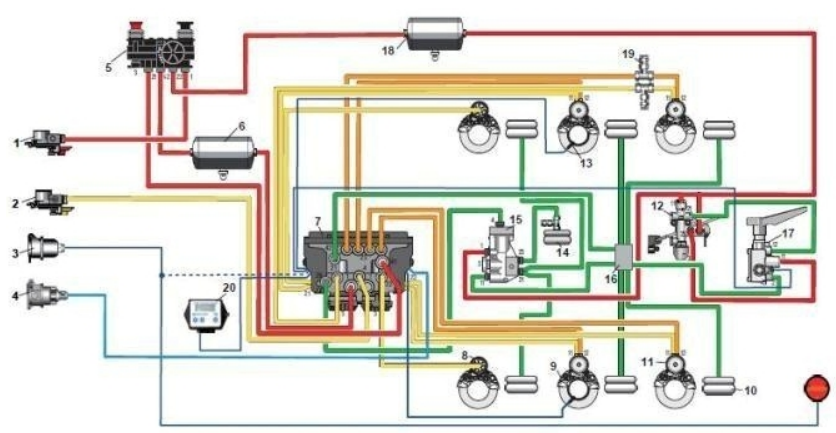
1. ábra. Kamion és többtengelyes pótkocsi

Global trailermag
http://www.globaltrailermag.com/news/article/breaking-knorr-bremse-enters-race-for-haldex-take-over, 2017.12.14. 18:00

2. Tervezés

A tervezés első lépéseként irodalomkutatást végeztem a pótkocsik levegőfogyasztásának témakörében. A pótkocsi két fő levegőfogyasztó rendszere az üzemi fék rendszer és a légrugókör. Többféle konfiguráció megvizsgálása után felállítottam a szimulátorral szemben támasztott követelményeket, amelyeket később is szem előtt tartva terveztem meg a modult.

Egy pótkocsi üzemi fék és légrugó rendszerének lehetséges kialakítását lehet látni az alábbi ábrán:



2. ábra. Pótkocsi üzemi fék rendszere és légrugóköre

MOGI, közúti járműrendszerek szerkezettana
http://www.mogi.bme.hu/TAMOP/kozuti_jarmurendszerek_szerkezettana/math-ch16.html 2017.12.14.15:00

A tervezett szimulátor többféle kialakítású pótkocsit képes szimulálni (például más tengelyszám, féktípus).

A trélerszimulátor fontosabb komponenseiben szenzorok segítségével mérhető a nyomás is.

3. Eredmények

A trélerszimulátor felépítése után méréseket végeztem a szimulátorral és egy referencia-pótkocsival is, majd összehasonlítottam ezek levegőfogyasztását. Az összehasonlítás a fékezéskor mért meghatározott nyomáskülönbségeken alapult. A pneumatikus trélerszimulátor légfogyasztása jól közelítette a referenciajármű légfogyasztását.

4. Összefoglalás

A szimulátor segítségével különböző funkciókat lehet tesztelni gazdaságosabban és akér hatékonyabban is, mintha egy valós pótkocsit használnánk. Emellett pedig pótkocsi helyett használva egy teherautón a szimulátort, a fogyasztása kisebb lesz, mintha egy valós pótkocsit csatlakoztattunk volna hozzá.

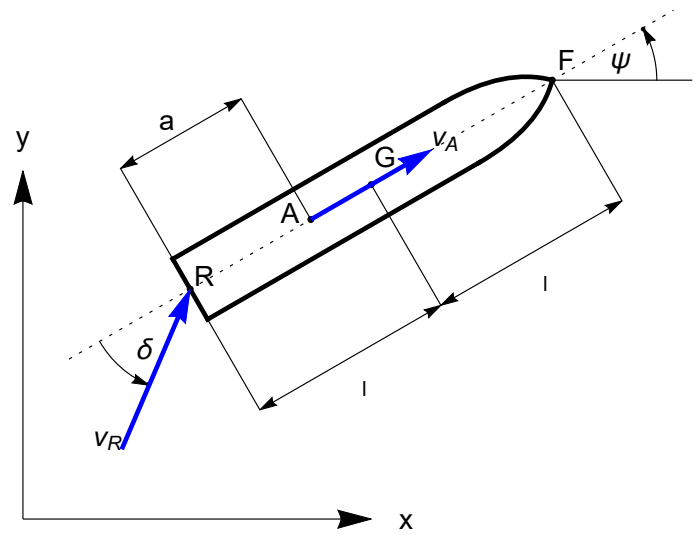
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar, Műszaki Mechanikai Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5.
www.mm.bme.hu

Hajók kormányzása predikción alapuló módszerekkel

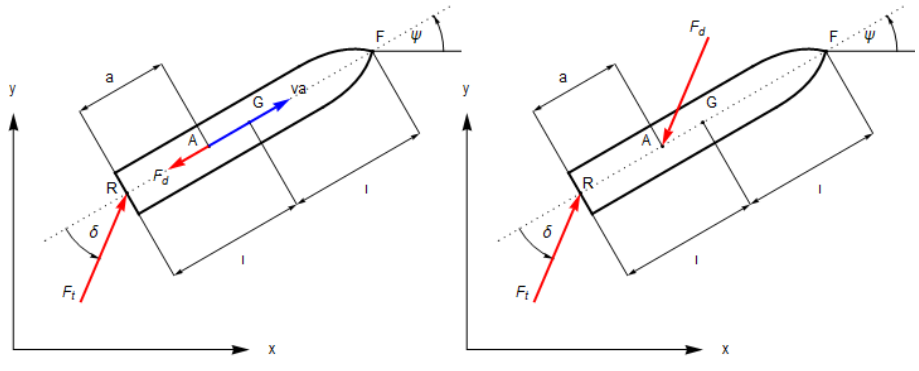
Palkó Dávid
Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2017/2018/I.
Témavezető: Várszegi Balázs, egyetemi tanársegéd, varszegi@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A dolgozatban a hajózás vizsgálatára alkalmas egyszerű mechanikai modellek felállításán keresztül bemutattuk, hogy a prediktív szabályozási módszerek hogyan segítik elő a hajók kormányzását. A szakirodalomban alkalmazott hajó modellek vizsgálata után, megalkottunk három egyszerű modellt.



1. ábra. 1. modell: kinematikai kényszerek



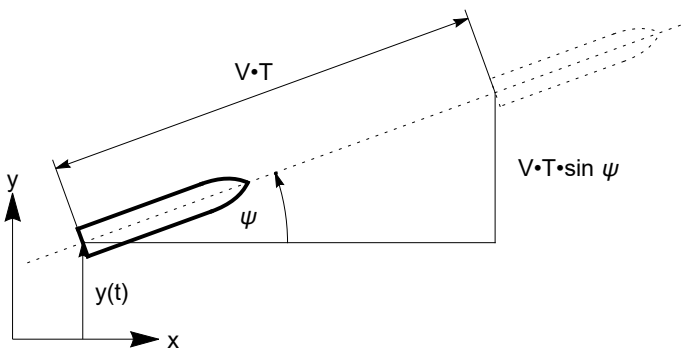
2. ábra. 2. és 3. modell: kinematikai kényszerek és erők

2. Alkalmazott módszerek

Az első modell a legegyszerűbb, ebben csak kinematikai kényszereket alkalmaztunk. Azt feltételeztük, hogy a hajó hátsó pontjának sebessége ismert, és van egy pont a hajó hossztengelyén, melynek nincs oldalirányú sebessége. Ezen lényeges egyszerűsítések ellenére nincs nagy eltérés a bonyolultabb modellekhez képest.

A második és harmadik modellben, a sebességkényszereket erőkre cseréltük, továbbá figyelembe vettük a hajó tömegét és tehetetlenségi nyomatékát. Így már a valóságot jobban leíró modellt kaptunk. A bonyolult áramlástani jelenségeket természetesen itt is figyelmen kívül hagytuk, ehhez részletesebb vizsgálat szükséges.

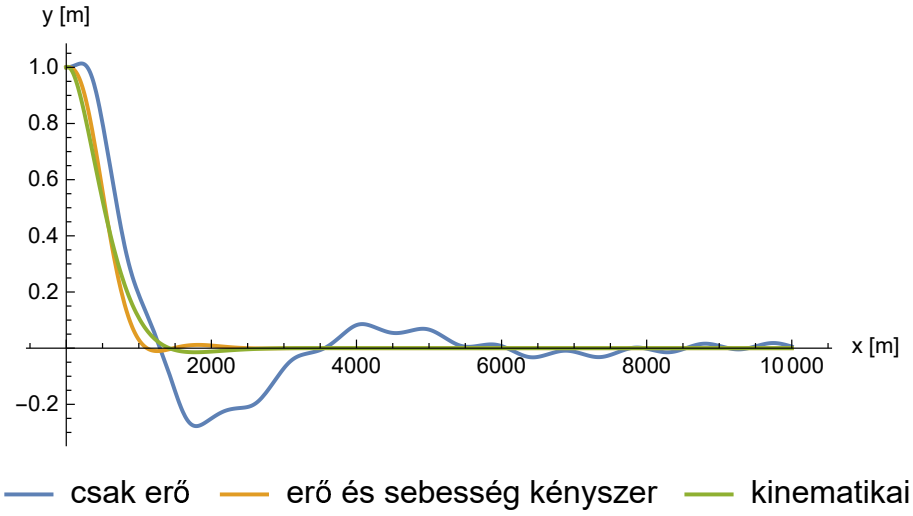
A megalkotott modellekkel szimulációt végeztünk és a pozíció szabályzást vizsgáltuk. A szabályzásban egy időben későbbi állapotot csatoltunk vissza, ahogy a 3. ábrán látható.



3. ábra. Preview

3. Eredmények

A stabil tartományból kiválasztott értékekkel szimulációt végeztünk. Az első két modellnél a prediktív szabályzással elértük a kívánt hatást, vagyis a hajó áttért a megadott egyenesen való haladásra. A harmadik modell esetén az ilyen típusú szabályzás nem megfelelő, mert a hajó csak hosszas oszcillálás után tér át az előírt egyenesre.



4. ábra. Prediktív szabályzás mozgáspályák

4. Összefoglalás

Összegezve, ha az s előrevetített út nagyságát megfelelően választjuk meg, akkor a sebesség nagysága nem befolyásolja a stabil mozgást. A prediktív szabályzással, tehát az emberek számára könnyen alkalmazható technikát kaptunk, ugyanis, ha a kormányos egy megfelelően választott távolságra előrenéz, és a hajót úgy kormányozza, mintha már ezzel a távolsággal előrébb lenne, akkor a sebesség nagyságától függetlenül elérhető a stabil kormányzás.

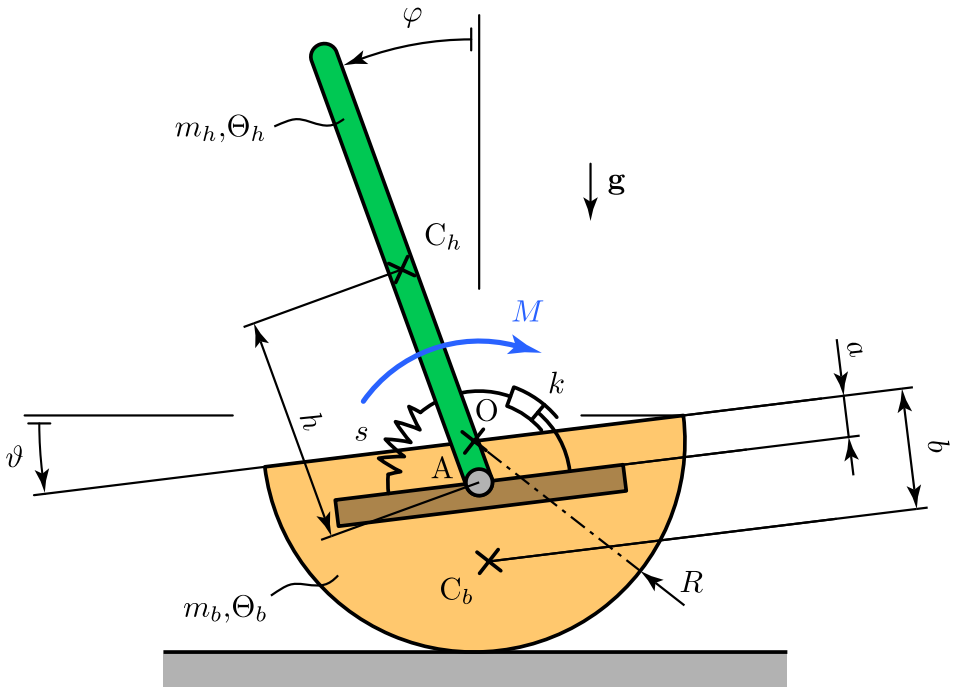
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar, Műszaki Mechanikai Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5.
www.mm.bme.hu

Emberi egyensúlyozás különböző érzékszervi információk alapján

Hu Jia Lin
Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2017/2018/I.
Témavezető: Várszegi Balázs, tanársegéd, varszegi@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A dolgozatom során a különböző érzékszervekből érkező információk egyensúlyozásra gyakorolt hatását vizsgálom. Az egyensúlyozás folyamata lényegében egy rendszer instabil egyensúlyi helyzete körüli stabilizálás. Az általam vizsgált rendszer egy síkbeli modell, melynek része egy koncentrált paraméterű rúd, ami az embert modellezi, és egy félkör alakú egyensúlyozó deszka (ld. 1. ábra).



1. ábra. Egyensúlyozás síkbeli 2 DoF modellje

A modell legfőbb része az agyi szabályzás révén a bokában létrejövő szabályzó nyomaték, ami két időkésleltetéses PD szabályzóként van modellezve

$$M = P_\varphi\,\varphi(t-\tau_1)+D_\varphi\,\dot\varphi(t-\tau_1)+P_\vartheta\,\vartheta(t-\tau_2)+D_\vartheta\,\dot\vartheta(t-\tau_2)\,.$$

Az ember szöghelyzetéhez és szögsebességéhez tartozó tagok a fül (vesztibuláris) szabályzó hatását, a deszka szöghelyzetéhez és szögsebességéhez tartozó tagok a szem (vizuális) szabályozását modellezik.

2. Alkalmazott módszerek

A rendszer mozgásegyenletének felírásához másodfajú Lagrange-egyenletet alkalmaztam. A kapott egyenlet nemlineáris, ezért linearizáltam az egyensúlyi helyzet körül, azt feltételezve, hogy egyensúlyozásnál a szögkitérések kicsik. Majd alkalmaztam a Cauchy-féle átírást, hogy elsőrendű rendszert kapjak

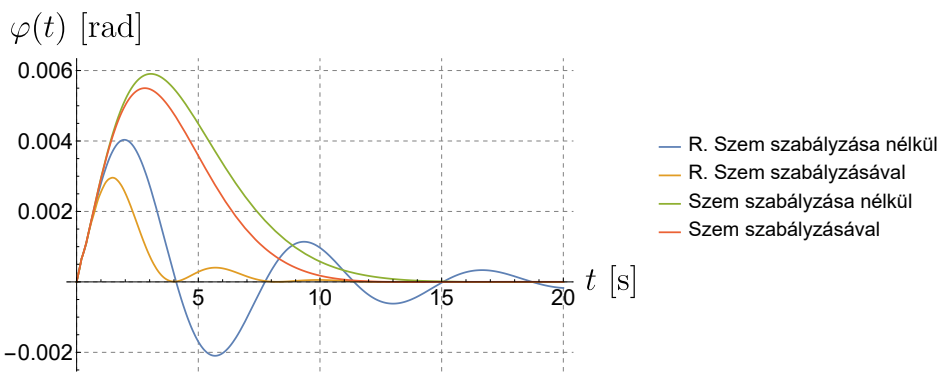
$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\,\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_\varphi\,\mathbf{x}(t-\tau_1) + \mathbf{B}_\vartheta\,\mathbf{x}(t-\tau_2)\,.$$

A mozgásegyenlet ismeretében, pedig megvizsgálható a rendszer stabilizálhatósága. A késleltetett differenciálegyenlet rendszer miatt az alkalmazott módszerek a D-szeparáció és a szemi-diszkretizáció. Ezen módszerekkel két kijelölt rendszer paraméter síkjában, ismerve a többi paramétert, vizsgálható a stabilitás egy úgynevezett leképezési mátrix legnagyobb abszolút értékű sajátértéke alapján.

Legelőször zérus szem paraméterekkel megkerestem a legjobb fül paramétereket, majd ezekkel megkerestem az azokhoz tartozó legjobb szem paramétereket is. Az eredeti esettel való összehasonlítás céljából, minimálisan rontott fül paraméterekkel megint csak megkerestem legjobb szem paramétereket. Ezen paraméterekkel végeztem numerikus szimulációkat, hogy megvizsgáljam a különböző esetek hatását a rendszer mozgására. A szimulációk összehasonlíthatóság érdekében szükséges az azonos kezdeti feltétel, illetve késleltetett rendszer révén a kezdeti feltétel egy intervallumra van értelmezve.

3. Eredmények

Az eredmények alapján kimondható, hogy a szem szabályzásának megléte segít az egyensúlyozásban, azonban az is észrevehető, hogy a rontott fül paraméterek esetében a szemnek a javító hatása jelentősebb, sőt az eredmény még stabilabb mozgást eredményez, mint az eredeti nem rontott esetben.



2. ábra. Numerikus szimulációra példa

4. Összefoglalás

A dolgozat során meghatározott eredmények alapján egy durva becslés adható, hogy milyen hatása van a két érzékszervnek az egyensúlyozásban. Felmerült a dolgozat készítése során, hogy érdemes lenne a jövőben méréseket is végezni a szabályzók hatásának megismerésére. A bokában található passzív csillapítás értékének vizsgálata szintén szükséges, mivel a vizsgálatom során alkalmazott érték bizonytalan. A modell fejlesztésére lehetőség további szabályzó tagok bevezetése, például integráló és gyorsulással arányos tag.

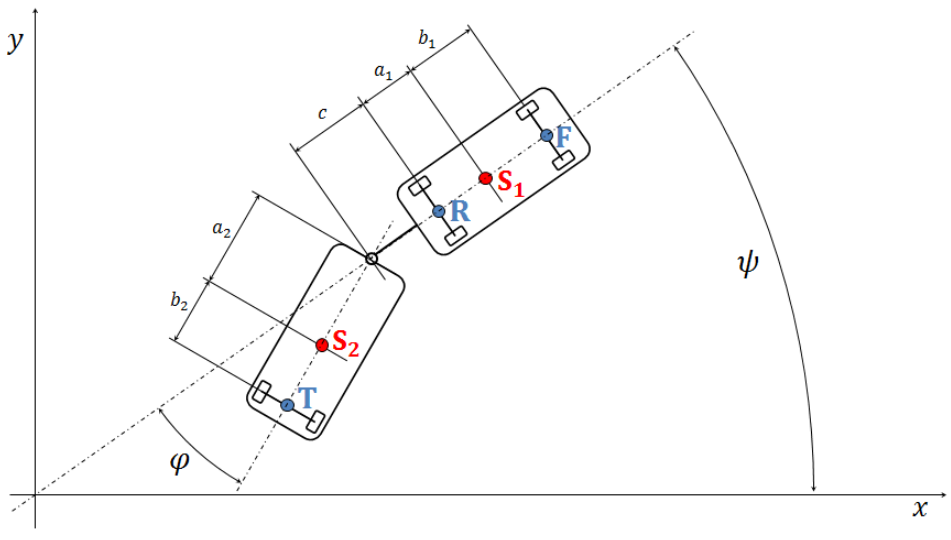
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar, Műszaki Mechanikai Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5.
www.mm.bme.hu

Pótkocsis járműszerelvény dinamikai vizsgálata

KILIÁN DÁNIEL
Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2017/2018/I.
Témavezető: Várszegi Balázs, egyetemi tanársegéd, varszegi@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A szakdolgozatom témája egy nyerges vontatóval összekapcsolt pótkocsi viselkedésének vizsgálata. Az utakon tapasztalható az a jelenség, hogy egy hirtelen fékezés hatására a vontató mögül a pótkocsi elkezd kifordulni. A kifordulások egyes esetekben egyre nagyobbak, lengésszerűek lesznek, ami jelzi, hogy az egyenes vonalú mozgás elvesztette stabilitását, ekkor a gyakorlatban bekövetkezik a baleset (a pótkocsi a többi közlekedő autónak vagy úthatároló szalagkorlátnak ütközik). A feladat tehát tulajdonképpen egy stabilitási probléma, melynél stabilitási kritérium a vontatóhoz képesti ψ kifordulási szögre vonatkozik. A modellben a kerék-talaj kapcsolatot az úgynevezett ’brush model’-lel modelleztem.



1. ábra. A vontató és a pótkocsi egyszerű mechanikai modellje

2. Alkalmazott módszerek

A dinamikai rendszer mozgását leíró első rendű differenciál egyenletrendszer az Appel-Gibbs egyenletekkel van levezetve. Ez a módszer a mozgási energia mintájára felírt gyorsulási energiából indul ki, így származtatja a dinamikai egyenlet bal oldalát:

$$S = \frac{1}{2} m_1 \boldsymbol{a}_{S_1} \cdot \boldsymbol{a}_{S_1} + \frac{1}{2} m_2 \boldsymbol{a}_{S_2} \cdot \boldsymbol{a}_{S_2} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}_1^T \cdot \boldsymbol{\theta}_{S_1} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_1 + \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}_2^T \cdot \boldsymbol{\theta}_{S_2} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_2$$

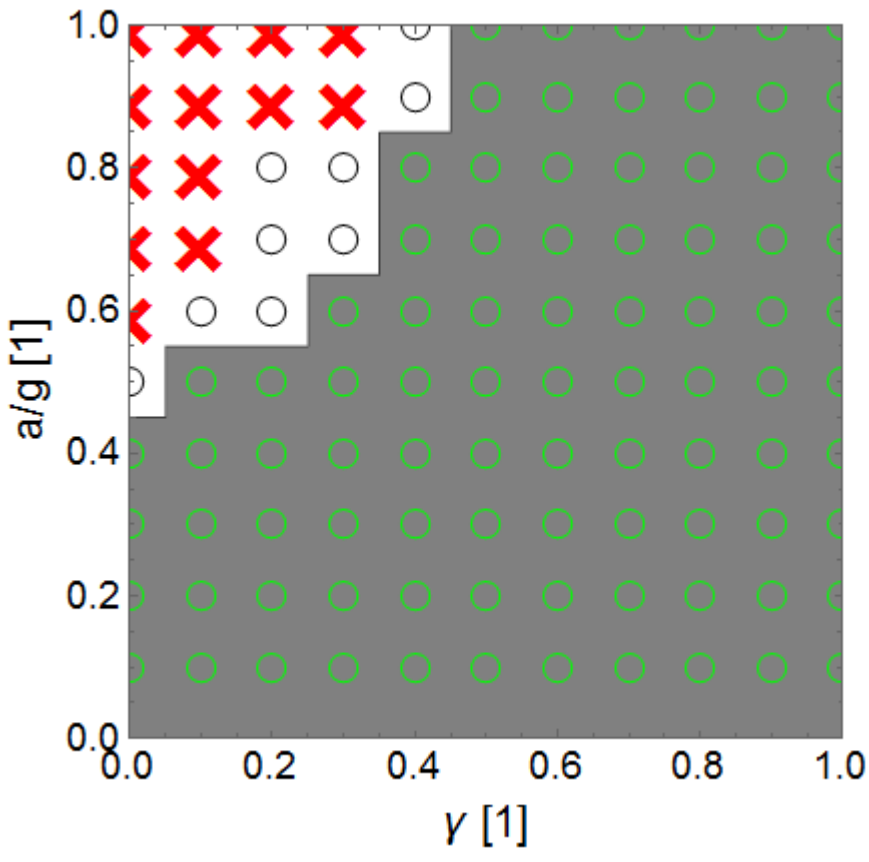
$$\frac{\partial S}{\partial \dot{\sigma}_i} = \Gamma_i.$$

A jobb oldal felírása a virtuális teljesítmény segítségével történik:

$$\delta P = \boldsymbol{\Gamma} \cdot \boldsymbol{\delta\sigma}.$$

A teljesítmény kifejezhető a pszeudóerők és a pszeudósebességek szorzatával is, így a pszeudóerőkre (Γ_i) a virtuális teljesítményből is kapunk egy kifejezést. A gyorsulási energia pszeudógyorsulások szerinti deriváltjaiból kapott kifejezések azonos indexű tagjai megegyeznek a virtuális teljesítményből kapott pszeudóerőkkel.

A szimulációk során a járműszerelvényre ható fékerőt a vontató és a pótkocsi között osztottuk meg és a fékerő eloszlás változtatásának hatását vizsgáltuk. A fékerő γ-szorosa terhelte a pótkocsit, és $(1-\gamma)$-szorosa a vontatót. A legnagyobb fékerő úgy lett megszabva, hogy az általa létrehozott lassulás kisebb legyen, mint *1g*.



2. ábra: A járműszerelvény viselkedése különböző nagyságú fékerők és fékerő eloszlások esetén

3. Eredmények

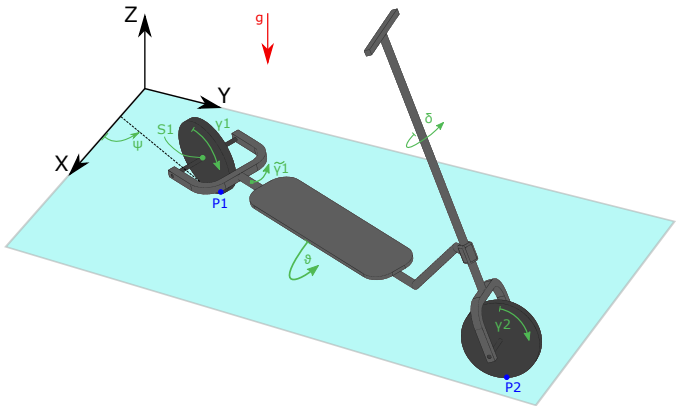
A szimulációkból azt lehet kiolvasni, hogyha csak a vontató van fékezve, akkor az erős fékezéseket kerülni kell, mert a pótkocsi kifordulhat. Az optimális megoldás ezek alapján a pótkocsi fékezése, mivel ez esetben még a rá ható erősebb fékezés esetén is beáll a vontató mögé a kezdeti kitérülésből. A gyakorlatban mind a pótkocsit, mind a vontatót fékezik, viszont mivel általában más cég üzemelteti a pótkocsit, mint a vontatót, ezért a fékbetét beszerzése a pótkocsira plusz költséggel jár.

Elektromos roller mechanikai modellezése

Vass Márk
Gépészmérnöki BSc Gépészeti fejlesztő specializáció, 2017/2018/I.
Témavezető: Várszegi Balázs, Egyetemi tanársegéd, varszegi@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Napjainkban közkedvelt kutatási terület a különféle járművek minél pontosabb mechanikai modelljeinek a megalkotása. A legnehezebb dolog ezeknél a feladatoknál talán az, hogy időben és térben kell látni a mozgást. A feladatomban egy térbeli gördülési problémának, a rollerezésnek határoztam meg a mozgásegyenleteit és megvizsgáltam azt, hogy a sebesség növelésének milyen hatása van a rendszerre.



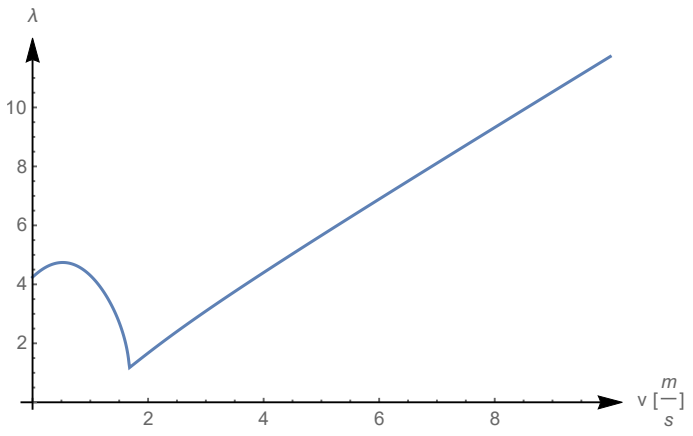
1. ábra. Mechanikai modell

2. Alkalmazott módszerek

A mozgásegyenletek **Routh-Voss egyenletek** segítségével határoztam meg, aminek az volt az oka, hogy a *másodfajú Lagrange-egyenlethez* hasonlóan szinte gépiesen felírhatók a mozgásegyenletek. Ahhoz, hogy a mozgásegyenletek felállítása nyomon követhető maradjon *forgatási mátrixokat* definiáltam, amik segítségével az általános helyzetet le lehetett írni. Mivel próbáltuk a rendszert a lehető legáltalánosabban leírni, ezért nagyon nagy méretű , differenciálalgebrai ("kevert") egyenletrendszerhez jutottunk. Mivel ez az egyenletrendszer még számítógép segítségével is csak nehézkesen volt kezelhető, ezért linearizáltam a mozgásegyenleteket az egyensúlyi helyzet körül és a linearizált mozgásegyenleteken vizsgáltam meg a sebesség hatását. Arra is készítettem néhány koncepciót, hogy az embert miként lehet figyelembe venni a modellben. A sebesség vizsgálatánál az embert tömegpontként vettem figyelembe, hiszen ezt a modellt lehet a legjobban kezelni. Ennek a modellnek a jóságának egyik legfőbb bizonyítéka az, hogy más neves tudományos cikkekben is csak tömegpontként modellezik az embert az ehhez hasonló feladatoknál.

3. Eredmények

Az eredeti egyenletrendszert, a nagy terjedelme miatt, itt most nem tudom közölni. Helyette csak azt mutatom be, hogy a sebességnek milyen hatása van a stabilitásra. A 2. ábrán látható, hogy sikerült találni egy olyan részt, aminél a sebesség növelése javít a stabilitáson de ettől még ugyanúgy instabil maradt a rendszer az általam felvett roller paramétereknél.



2. ábra. Sebesség hatása

4. Összefoglalás

A dolgozatomban egy (elektromos) roller modellezésével foglalkoztam. A mozgásegyenletek linearizálása után megvizsgáltam a sebesség hatását a rendszerre. Eredményként az adódott , hogy a rendszer instabil viselkedést mutat bármely sebességnél, ami tulajdonképpen nem mond ellent a fizikai képünknek, hiszen ha egy rollert csak úgy "elgurítunk" , akkor az nem fog olyan stabilan gurulni, mint mondjuk egy bicikli. A későbbiekben a modell kibővíthető lehet azzal, hogy az embert mint szabályozót is modellezzük és nem csak egy merev testként aki nem tud beleavatkozni a mozgásba.

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar, Műszaki Mechanikai Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5.
www.mm.bme.hu