

EGYEDI TERHELŐ MODUL KONCEPCIONÁLIS TERVEZÉSE LINEÁRIS AKTUÁTOROK SZÁMÁRA

CONCEPTIONAL DESIGN OF A UNIQUE LOAD MODULE FOR LINEAR ACTUATORS

Mózer András*, Dr. Farkas Zsolt József**

ABSTRACT

Linear actuators are used in nearly every modern production line. They are capable of creating precise and fast movements, while not taking up as much space as a conventional, purely mechanical drivetrain. Pneumatic actuators can be used in special environments, such as explosion-prone industries, medical and food production lines. Hydraulic systems have high power density, thus they can be found in heavy machineries. These systems can be analysed in place, creating the most precise but an expensive and complex process. For this time the system is also unable to take part in the production, generating additional revenue losses. A separate load module is used to analyse linear actuators outside of production environments. The benefit of such modules includes lower overall costs, being able to carry out these studies in other locations than the production facilities and to create additional load-cases, thus future proofing the system. This paper introduces the conceptual design of a special load module, created for these specific purposes.

1. BEVEZETÉS

A modern gyártósorokon a magas fokon és precízen vezérelhető aktuátorok alapozzák meg a termelékeny és versenyképes gyártást. Az aktuátorok kritikus szerepére való tekintettel, ezen rendszerek kiesése jelentős veszteségeket hoz magával [1]. Ez a kiemelt fontosság okozza az aktuátorok teljeskörű vizsgálatára való igényt. Mivel a helyben történő vizsgálat sokszor nem megvalósítható, így célszerű külön vizsgálóberendezések kiépítése. Ebben az esetben a rendszerrel szemben támasztott legfontosabb kritérium, hogy a valós felhasználási környezetet és az ott jelentkező terhelési eseteket a lehető legjobban közelítse.

Már a tervezési folyamat során célszerű a tervezett berendezést a valós környezethez igazítani. Ennek az elérésében jelentős potenciált mutat a Digital Twin (DT) modellek felhasználása [2]. A korszerű számítógéppel segített folyamatok közvetlenül integrálhatók a DT modellek készítésébe. A számítógépes tervezőrendszerekkel létrehozott modellek direkt bemenetként szolgálhatnak a fizikai építőelemeken alapuló modellezési folyamatoknak [3].

A műszaki gyakorlatban több különböző típusú és jellegű terhelést különböztethetünk meg [4]. A vizsgálóberendezések és terhelő modulok kialakításának egyszerűsége sok esetben azt eredményezi, hogy ezekből a terhelésekből csak néhány valósítható meg. Jellemzően ezek időben és irányukban állandó terhelések. Ezen berendezések előnye az egyszerűségük és a vizsgálatok könnyű kivitelezhetősége. Kellő validálás után a kapott eredmények akár közvetlenül hasznosíthatók. Jelen cikk egy olyan komplex terhelő modul tervezését mutatja be, mely képes akár időben, így a lineáris aktuátor lökete mentén változó nagyságú és irányú terhelések létrehozására is. Ezzel ugyan növelve a vizsgáló berendezés komplexitását, de az így megvalósítható terhelés profilok jobban megközelítik a valóságos terheléseket.

Az előzetes vizsgálatokkal lehetőségünk nyílik az aktuátorok rendszerszintű optimalizálására. Ennek során az ismert terhelési ciklusok alapján a működéshez megválaszthatók azok az üzemi paraméterek, amik biztosítják a rendszer energiahatékony működését.

A berendezés képes az optimálási folyamatokban való részvétel mellett különböző működési elvű aktuátorok vizsgálatára és azok sajátosságainak meghatározására. Az oktatási gyakorlatban sok esetben terheletlenül történik a lineáris aktuátorok bemutatása és vizsgálata, esetleg egy fojtáson keresztül befolyásolva a pneumatikus és hidraulikus lineáris aktuátorok viselkedését. Jelen vizsgáló berendezés képes a teljes löket mentén dinamikusan fellépő terhelések kialakítására, így az oktatásban is pontosabban bemutatathatók a valós üzemi körülmények hatásai.

Egyszerű, csak egy működési elvet kihasználó aktuátorok mellett, komplex hibrid megoldások is vizsgálhatók. Ezeknél nem csak az energiahatékonyág, hanem az egymást kiegészítő funkciók megjelenése is előnyös lehet, például egy hibrid architektúrába beépítve javítható a pneumatikus munkahengerek pozícionálási pontossága [5].

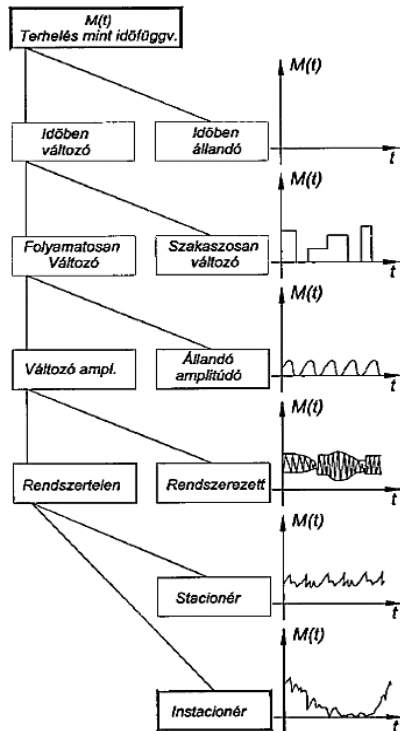
* tanszéki mérnök, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék

** adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék

2. A TERHELŐ MODUL SZERKEZETI FELÉPÍTÉSE

2.1. A terhelési profilok megválasztása

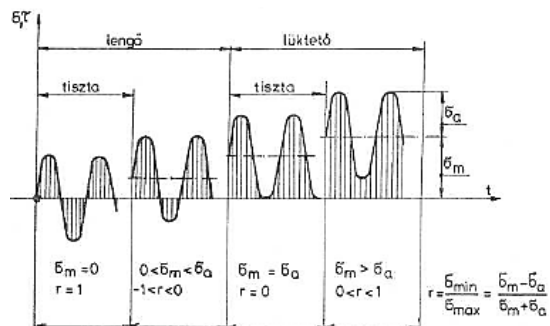
A kutatás célja a lehető legtöbb és leginkább különböző terhelés együttes megvalósítása volt a teljes mozgási tartományon belül.



1. ábra A lehetséges terhelések [4]

Az 1. ábra összefoglalja a lehetséges terheléseket, de csak időfüggésük alapján. Az aktuátorok szempontjából a terhelések időfüggése helyett a löket során adott pozíciónál megjelenő terhelés nagysága a mérvadó. Ezek csoportosítása megfelel az 1. ábrán látottaknak. A terhelőmodullal szemben támasztott másik fő követelmény, hogy ezek a terhelések irányuk szerint is változhassanak.

Ezen terhelések hatására az egyes gépelemekben különböző feszültségek lépnek fel (2. ábra.). Hasonlóan a feszültségekhez, az ismétlődő terhelések esetén is meghatározható egy középérték és egy amplitúdó.



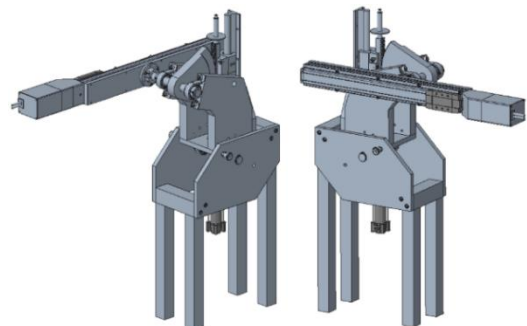
2. ábra Ismétlődő terhelések okozta feszültségek [6]

A terhelések és hatásukra ébredő feszültségek középértékei és amplitúdói egymáshoz való viszonyulása alapján megkülönböztethetünk lengő, tiszta lengő, lüktető és tiszta lüktető terheléseket illetve feszültségeket. A rendszerezéshez a műszaki gyakorlatban 2. ábrán látható aszimmetria tényező (r) használata a járatos.

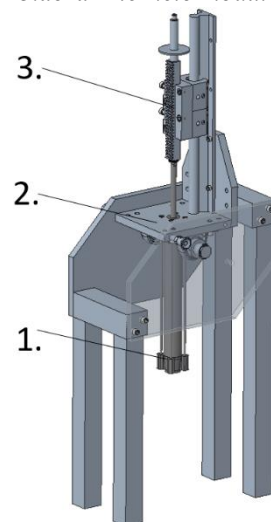
A komplex terheléseket használó vizsgálóberendezések esetén a terhelés középértékét legegyszerűbben egy súlyterhelés szolgáltatja. Ezzel alacsonyabb rendű terhelések, például egy időben állandó terhelés is megvalósítható. A terhelésamplitúdót egy vezérelhető nagyságú erő adja. Jelen terhelő modul esetén ez egy változtatható erőkarral rendelkező, így változó nagyságú nyomatékot kifejtő alegység, mely egy áttételen keresztül erőként fejt ki hatását.

2.2. A terhelő modul felépítése

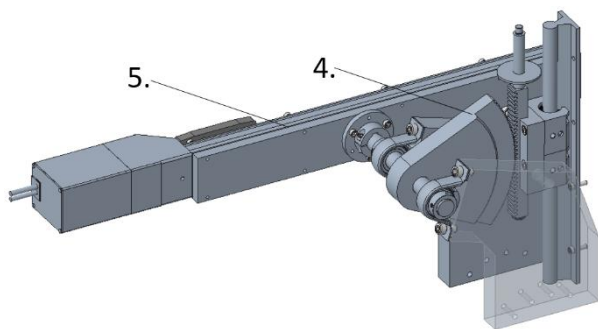
A 3. ábra szemlélteti a terhelő modul felépítését. Jelen esetben a beépített aktuátor egy pneumatikus munkahenger (4. ábra 1.). A pneumatikus munkahengerek ugyan az egyszerűbb felépítésű lineáris aktuátorok közé tartoznak, de az általuk használt sűrített levegő összenyomhatósága miatt működésük pontos megértése további vizsgálatokat igényel. A berendezés két fő részre bontható. az első a terhelés középértékét szolgáltató rész (4. ábra). A második, vezérelhető egység a terhelés amplitúdóját adja. (5. ábra).



3. ábra A terhelő modul

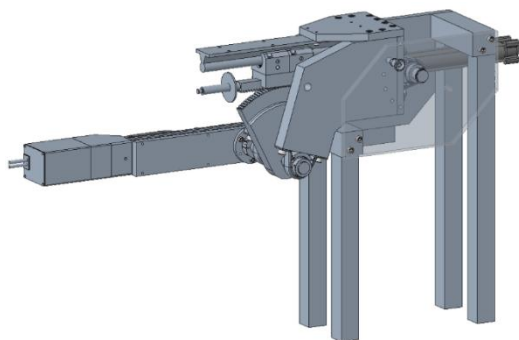


4. ábra A terhelés középértékét megvalósító egység



5. ábra A terhelés amplitúdóját megvalósító egység

A terhelés középértékét a pneumatikus hengerrel egytengelyűen felszerelt súlytartóra helyezett különböző méretű hitelesített súlyok adják. A munkahenger (4. ábra 1.) egy billenthető asztalhoz van rögzítve (4. ábra 2.), így különböző beépítési helyzetek is megvalósíthatók. Szélső esetben az asztal (4. ábra 2.) teljesen átfordítható és a munkahenger az eredeti függőleges helyzethez képest 180 fokkal elforgatva is vizsgálható. A munkahengert és a súlytartót egy fogasléc köti össze. Mozgásukat egy lineáris vezeték segíti, így kihajlás ellen kellően védett a rendszer, akár döntött helyzetben is.



6. ábra A terhelő modul döntött állapotban

A döntött állapot (6. ábra) kiemelet pozíciója a teljesen vízszintes helyzet. A függőleges és vízszintes helyzetek között diszkrét szöghelyzetekben állítható a berendezés egy rugós rögzítőtüske segítségével. A különböző szöghelyzetekben mutatott eltérő viselkedések vizsgálata kiemelt szerepet tölt be a megfelelő üzemeltetési paraméterek megválasztásánál. Ilyen lehet az alkalmazott fojtások finomhangolása, amik a munkahengerek sebességszabályozást valósítják meg. A vizsgálóberendezés robosztus alapként szolgál a pneumatikus munkahengerekre jellemző eltérő fojtások (primer és szekunder ági) összehasonlításához, illetve azok jellegzetességeinek vizsgálatához. Ilyen lehet például a primer ági fojtás esetén megjelenő akadozó mozgás (stick-slip) jelensége.

A fogasléc alá beépíthető erőmérő cella biztosítja a terhelés visszaigazolhatóságát. A berendezés üzemeltethető csak súlyterheléssel is. Ebben az esetben a terhelés középértéke külön mérhető, így egy terhelési ciklus részeire bontva is vizsgálható. A munkahenger elmozdulását többek között induktív útdóval mérhetjük,

illetve az egyes kamrákban megjelenő nyomásokat, térfogatáramokat és hőmérsékletet mérve a munkahenger pontos működési paraméterei is meghatározhatók.

1. táblázat A vizsgált munkahenger főbb paraméterei

Paraméter	Érték
Dugattyúátmérő	32 mm
Dugattyúrúd átmérő	12 mm
Löket	200 mm
Típus	SMC C96SDB32-200C

Az átmenő dugattyúrúddal rendelkező munkahengereket leszámítva minden munkahenger esetén a kifejtett nyomóerő nagyobb, mint a húzóerő. Ez azonos nyomásszintek esetén az eltérő nagyságú hatásos felületekből adódik.

$$\frac{F_{nyomó}}{F_{húzó}} = \frac{\frac{D_{dugattyú}^2 \cdot \pi}{4}}{\frac{(D_{dugattyú}^2 - D_{dugattyúrúd}^2) \cdot \pi}{4}} \quad (1)$$

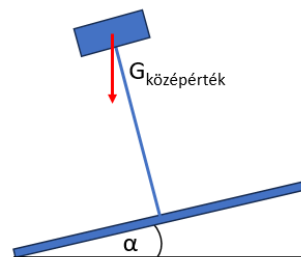
Jelen berendezés esetén a változtatható terhelések miatt képesek vagyunk mindkét irányba a maximálisan kifejezhető erőnek megfelelően terhelni a munkahengert.

A súlyterhelés mozgatása mellett a munkahenger egy fogaslécen (4. ábra 3.) keresztül meghajt egy fogasívet (5. ábra 4.). Utóbbihoz rögzítve található egy elektromos lineáris hajtás (5. ábra 5.), melynek kocsiára súlyok szerelhetők. Az itt elhelyezett súlyok folyamatos pozicionálásával hozható létre egy időben, így az aktuátor lökete mentén változó nyomaték (8. ábra), ami az összterhelés megváltozását okozza a munkahengeren.

2. táblázat

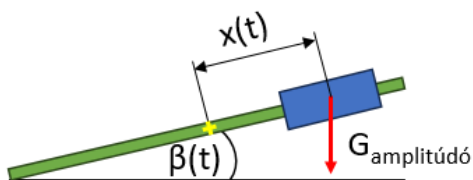
Az elektromos lineáris hajtás főbb paraméterei

Paraméter	Érték
Löket	450 mm
Max. mozgatható tömeg vízszintes mozgásnál	30 kg
Max. mozgatható tömeg függőleges mozgásnál	5 kg
Típus	SMC LEFS32S3-450



7. ábra A terhelés középértékének származtatása

$$F_{középérték} = G_{középérték} \cdot \cos \alpha \quad (2)$$



8. ábra A terhelés amplitúdójának származtatása

$$r(t) = x(t) \cdot \cos\beta(t) \quad (3)$$

$$M(t) = G_{amplitudo} \cdot r(t) \quad (4)$$

Ezzel a munkahengerre jutó teljes terhelés a következőképpen adódik.

$$F_{terhelő}(t) = F_{középtérték} + \frac{M(t)}{r_{fogasív}} \quad (5)$$

A löket során az elektromos lineáris hajtás szöge folyamatosan változik (8. ábra), ezt a rajta elhelyezett tömeg pozicionálásával kell kompenzálni állandó nyomaték eléréséhez. Ugyanígy az indítás során a terhelő modul vezérelhető részének tehetetlenségi nyomatéka miatt megjelenő erőtöbbletet is lehetséges ellensúlyozni a megfelelő elhelyezkedés megválasztásával, mivel az elektromos lineáris hajtás képes a munkahengerre vetítve nyomó és húzó irányú terhelést is létrehozni.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk során egy olyan komplex terhelési eseteket is megvalósítani képes terhelő modult mutattunk be, mely képes a helyszíni vizsgálatokat teljeskörűen kiváltani. A vizsgálatok során a valós üzemi környezetben megjelenő terhelések mellett a berendezés képes akár teljesen új terhelési ciklusokat is létrehozni, ezzel segítve a jövőbeni tervezési folyamatokat. Ezek célszerűen tervezés alatt lévő gépek termékfejlesztési folyamatába illeszkedő terhelések. Mindez a DT modellekkel kiegészítve a konkurens termékfejlesztés egyik meghatározó eleme lehet.

A berendezés a változatos terhelésprofilok létrehozásával aktív szerepet tölthet be a különböző rendszeroptimalizálási folyamatokban. Az energiahatékony üzemeltetési paraméterek meghatározása mellett az élettartam vizsgálatok, dinamikus működési állapotok, például indítási folyamatok vizsgálatának, sőt akár tömítés vizsgálatok alapját is szolgáltathatja a berendezés. Mivel az üzemi paraméterek meghatározása sok esetben empirikus úton történik, így a vizsgálóberendezés a DT technológiával és mesterséges intelligencia (MI) alkalmazásával képes a rendszer Pareto-optimumát meghatározni. Kimenatként pedig az üzemi paraméterek mellett a lineáris aktuátor konkrét vezérlése is meghatározható.

A vizsgálható üzemi közbeni jelenségek közé tartoznak például a pneumatikus és hidraulikus munkahengerek eltérő sebességszabályozási stratégiái a különböző fojtásokon keresztül, az indításkor megjelenő

tapadási súrlódás okozta többleterő-szükséglet, adott körülmények melletti akadozó mozgás (stick-slip). Elektromos aktuátorok esetén pedig az indítás során és a löket mentén fellépő dinamikus terhelések okozta nagyobb áramfelvétel pontos vizsgálatát is lehetővé teszi a berendezés.

Ugyan a jelen cikkben csak egy pneumatikus munkahenger beépítésével kerül bemutatásra a vizsgáló berendezés, de hidraulikus vagy elektromos elven működő lineáris aktuátor vizsgálatára is van lehetőség. A különálló lineáris aktuátorok mellett hibrid architektúrák is beépíthetők. Ezen architektúrák vizsgálatához és optimális üzemeltetési paramétereinek meghatározásához a DT modellek prediktív MI-val felruházva képesek a legmodernebb ipari kívánalmaknak is megfelelni. A MI nyújtotta lehetőségeket nem csak a vizsgált lineáris aktuátorok kapcsán alkalmazhatjuk, hanem már magánál a vizsgálóberendezésnél is. Az egyedi követelmények által meghatározott új terhelési profilok automatikus lekövetéséhez és a vizsgálóberendezés pontos vezérlésének meghatározásához is kulcsszerepet tölthet be egy robosztus MI-án alapuló predikciós algoritmus. Ezzel egy változatos felhasználású, az oktatásba és a kutatásba egyaránt beépíthető berendezés koncepcionális terveit hoztuk létre.

4. IRODALOM

- [1] M. BEVILACQUA, M. BRAGLIA: *The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection*, Reliability Engineering & System Safety, Volume 70, Issue 1, 2000, ISSN 0951-8320, [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(00\)00047-8](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(00)00047-8)
- [2] H. ZHANG, Y. LI, D. XUE, X. TONG, B. GAO, J. YU, *Digital twin technology facilitates precision improvement in complex product assembly: A progressive deduction method of data-driven tolerance allocation*, Advanced Engineering Informatics, Volume 62, Part C, 2024, 102790, ISSN 1474-0346, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102790>
- [3] <https://www.mathworks.com/products/simscape.html> elérés dátuma: 2026.10.07.
- [4] TÓTH S., MOLNÁR L., BISZTRAY S., MAROSFALVI J.: *Gépelemek I.*, Műegyetemi Kiadó, 2007
- [5] MÓZER A., FARKAS Zs.: *Analysis of an electro-pneumatic hybrid lifting system*, EXPRESS 2024, 14th International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources and Efficiency, Subotica, SERBIA, April 04-06 2024, ISBN-978-86-82912-00-2
- [6] Tóth Laboncz J.: *Gépészeti szerkezetek szilárdságtani méretezésének alapjai*, Piros Napló Média Kft, 2006