

Elektromágnesek modellezéséhez szükséges mérőberendezés fejlesztése

Development of a special-purpose measurement system for electromagnet modeling

Kapitány Pálma*, Dr. Szabó Tamás**, Dr. Rónai László***

ABSTRACT

This paper reports on research related to an energy-based modeling process of electromagnets. It presents the development of a special-purpose measurement system designed to perform three types of measurements on solenoids. First type is force-measurement with respect to the current and position values of iron core. The second type investigates the pull-in phenomenon, while the third measurement is related to drop test. Article includes the design of mechanical elements and conception, electrical consideration and the method of data acquisition.

1. BEVEZETÉS

A behúzótekercecsek alkalmazásának számos területe ismert, mint például gépjárművek indítómotorjában, relék és mágneskapcsolók használata, hidraulikus- és pneumatikus szelepek vezérlésében, ipari automatizálásban reteszelési, adagolási és pozicionálási feladatokban, biztonsági rendszerek esetében pedig ajtózárok, mágneszárok, vészleállító mechanizmusok működtetésében.

A behúzótekercecsek modellezése segíti a pontosabb tervezést, figyelembe venni a dinamikus viselkedést és a nemlineáris hatásokat a működés során. A modellezés csökkenti a prototípusgyártás idejét és költségeit, lehetőséget biztosít a hatásfok és a megbízhatóság növelésére, továbbá támogatja a diagnosztika és kutatás-fejlesztés folyamatát. A behúzótekercecsek modellezése több módszer segítségével is történhet. Az analitikus módszer egyszerűsítéseket alkalmaz, gyors számításokat tesz lehetővé, a reluktancia (mágneses ellenállás) és induktancia alapján becsül behúzóerőt és lökethosszt; a módszer erősen idealizált [1], [2]. A numerikus módszerek, mint például a végeelem (FEM), a végestérfogat (FVM) vagy határelem (BEM) módszer során mind a mágneses tér alakulását, mind a kölcsönhatásban résztvevő elemek anyagtulajdonságát figyelembe veszi [3] – [5]. Az ilyen típusú módszerek előnye, hogy pontos eredményeket szolgáltat a Maxwell-egyenletek megoldásával, hátrányai között szerepel a nagy számítási kapacitás igénye, illetve a modellezett alkatrészek anyagi jellemzőinek pontos ismerete. A

harmadik modellalkotási szemlélet részben analitikus, részben pedig empirikus, ún. energia-alapú. A módszer erő-áram-löklet karakterisztika méréseken alapul, továbbá a mérési pontok sűrítése érdekében interpolációt alkalmaz. Az ilyen modellezés előnye a gyakorlati pontosságban rejlik, hátránya pedig az, hogy csak az adott geometriával rendelkező behúzótekercecsekre alkalmazható.

Az alábbi cikk egy olyan kutatáshoz kapcsolódik, amely az utóbb említett modellezési eljárást alkalmazza [6]. Állandó mágneset is tartalmazó behúzótekercecsek vizsgálata érdekében egy speciális mérőberendezés tervezése és fejlesztése történt meg, amely három típusú mérést tesz lehetővé a felszereléstől és a beállításoktól függetlenül. A mérőberendezés lehetővé teszi, hogy

- rögzített vasmagpozíciók mellett mérni lehessen a vasmagra ható erő nagyságát, a tekercsen folyó áram erősségét és a vezérlő kapocsfeszültségeket;
- gerjesztetlen tekercs esetén a vasmag adott pozíciókból való beejtését elvégezve mérhető legyen a tekercs végpontjain a mozgásból adódó indukált feszültség mértéke és a vasmag pozíciójának változása az idő függvényében;
- a különböző kapocsfeszültségek hatására, eltérő kezdeti pozíciók esetén a vasmag berántása megtörténjen és eközben mérhető legyen a tekercs áramfelvétele és a vasmag pozíciójának változása az idő függvényében.

A behúzótekercecsek házában rögzítése és a vasmag pozicionálása gépészeti tervezést igényelt, erről számol be részletesen az alábbi cikk 2. fejezete. A kapocsfeszültség vezérlése, a mérőkörben elhelyezett szenzorok kalibrálása és a mérési adatok rögzítésére szolgáló mérőkártya integrálása elektronikai megfontolásokat igényelt, erről a cikk 3. fejezetében lehet olvasni. A tanulmány végén található a tapasztalatok összegzése és a jövőre irányuló tervek.

A modellalkotás során mind a három típusú mérést szükséges elvégezni egy behúzótekercecsek esetében. A kapott erőfüggvényt a vasmag pozíciója szerint integrálva kiegészítő mágneses energiát lehet előállítani.

A bővített Hamilton-elv és mért indukált feszültség segítségével előállíthatók a mechanikai és elektromos paraméterek. A szimulációs eredményeket pedig össze lehet hasonlítani a berántás kísérleti mérési adataival.

* egyetemi tanársegéd, Miskolci Egyetem Robert Bosch Mechatronikai Intézet Tanszék

** óraadó, Miskolci Egyetem Robert Bosch Mechatronikai Intézet Tanszék

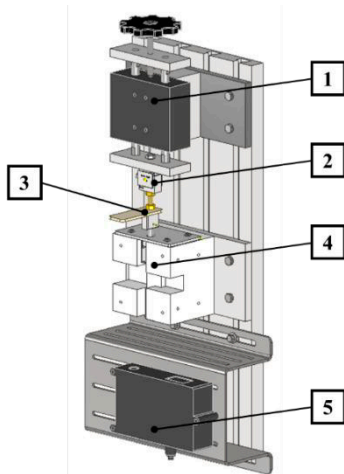
*** egyetemi docens, Miskolci Egyetem Robert Bosch Mechatronikai Intézet Tanszék

2. GÉPÉSZETI TERVEZÉS

Az alábbi fejezet a mérőberendezés gépészeti tervezésével foglalkozik.

2.1. Rögzített vasmagpozíciók mellett végzett erőmérés

Az 1. ábrán látható az elektromágnesek modellezéséhez szükséges erőmérés első konstrukciós vázlatja. A mérés során az elektromágnes háza rögzítve van a 4 jelű, polioximetilén (POM) műanyagból készült tartóba, amely egyedi gyártásának köszönhetően több különböző behúzótekercs rögzítésére képes, csupán 90 fokkal elfordítva kell beszerelni az egységet. Az ábrán látható egy lehetséges elrendezés, amely során a vasmag pozicionálását az 1 jelű egység végzi. Ez egy ikerdugattyús pneumatikus munkahengert tartalmaz a megvezetés érdekében, az egyik végén egy menetesszárral fokozatmentesen állítható az emelés mértéke, míg az alsó kapcsolódási pontján a 2 jelű, S-típusú erőmérő szenzor csatlakoztatható. A pozicionáló egység végső elemcsoportja a 3 jelzést kapta, feladatai között szerepel, hogy nem ferromágneses (Al, Cu) fémes anyag segítségével kapcsolódjon a vasmag az erőmérő cellához, továbbá, hogy a vasmaghoz legközelebb egy lemez segítségével felületet biztosítson a lézeres távolságmérő számára. Ez utóbbi érzékelő az ábrán 5 jellel szerepel.

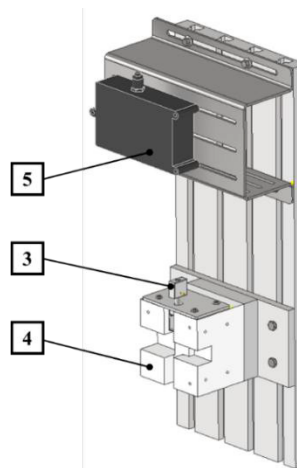


1. ábra: A mérőrendszer 3D-s modellje rögzített vasmagpozíciók mellett végzett erőmérésekhez

Ez a konstrukció statikus mérések elvégzését teszi lehetővé tetszőleges vasmag-pozíciókban. A használat során először ütközésig kell engedni a vasmagot a ház belsejébe. Majd a menetesszár segítségével adott értékkel kintebb mozdítható a vasmag. Ezt követően automata kapcsolófeszültség vezérlés mentén mérhető a tekercs áramfelvétele, az erőmérő szenzor adatai és a vasmag pozíciójának esetleges változása is. A pozícióváltás és automata adatgyűjtés iteratív ismételt az elektromágnes teljes lökethosszán. Az automata mérés folyamata a 3. fejezetben olvasható.

2.2. Indukált feszültség mérése beejtési kísérlettel

Az energia-alapú modell felállításához szükség van olyan ejtőtesteztetek elvégzésére is, amely során meghatározható a tekercs gerjesztetlen állapota esetén, csupán a vasmag mozgásából indukálódó feszültség csúcserővére. Ezen ejtőtesteztetek során továbbra is alkalmazni kell az 5 jelű lézeres távolságmérő szenzort, amely a vasmag pozícióját figyeli.



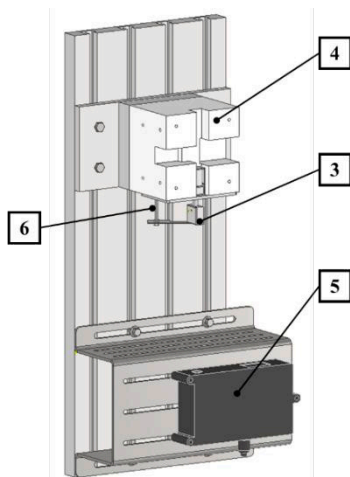
2. ábra: Mérőrendszer kialakítása indukált feszültség méréséhez beejtési kísérlettel

Ahogy az a 2. ábrán is látható, ebben az esetben is függőleges elrendezést alkalmazunk, legfelül helyezünk el a távolságmérőt, lentebb pedig megtalálható a 4 jelű, rögzítőhasáb, benne az elektromágnes házával. A 3 jelű kötőelem a vasmaggal együtt mozog, megfelelő felületet biztosítva a lézersugárnak a távolságméréshez.

2.3. Behúzási folyamat mérése

A moduláris mérőberendezés behúzási kísérletekhez készült koncepcióvázlata látható a 3. ábrán. Ebben az esetben is függőleges elrendezést részesítjük előnyben annak érdekében, hogy a tekercs kezdeti, gerjesztetlen állapota esetén a vasmag nyugalmi helyzetét a gravitációs erő biztosítsa. A 6 jelű ütköző egység egy menetes szár segítségével fokozatmentesen képes állítani az ütközőlemez magasságát, mely meghatározza a vasmag kezdeti helyzetét. A tekercsre kapcsolt kapcsolófeszültség mágneses teret indukál, amely hatására a vasmag függőlegesen felfelé mozdul el, és adott esetben megtörténik a teljes behúzás.

Ezt a berántási folyamatot a már említett lézeres távolságmérő is figyeli, így a kísérlet végeztével megkapható a tekercs áramerősségének és a vasmag pozíciójának változása az idő függvényében. Mind az ejtőtesteztetek, mind a teljes behúzás folyamatát végző mérések esetében szükséges alkalmazni egy olyan segédelemet, amely a 4 jelű rögzítőhasábot kitéríti a korábbi felfogatási pontjához képest, így a vasmagot a távolságmérő sugarába kényszeríti.



3. ábra: Behúzási kísérletek elvégzéséhez kialakított mérőrendszer

Az elektromágnesek modellezéséhez szükséges mérőberendezés fejlesztése során egyedi alkatrészek kerültek tervezésre, köztük találhatóak lemezalkatrészek és forgácsolástechnikával előállított darabok is.

A triangulációs távolságmérő szenzor rögzítésénél olyan lézervágott és élhajlított alkatrész látható, amely a hosszirányú kikönnnyítések mentén másfajta felszerelést is biztosít, míg a merevségének köszönhetően megfelelő stabilitást nyújt. További, alumíniumból legyártott lemezalkatrészeket használunk az elektromágnes házának rögzítéséhez, és a behúzási kísérletek pozicionálásához is. Az ilyen típusú lemezalkatrészek gyártását az AR-Robotics Kft. támogatta. A polioximetilén rögzítőhasáb, az alumínium szerelőlapok, réz kötőelemek és ütköző elemek egyedi gyártását a Miskolci Egyetem Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet CNC megmunkálóállomásain gyárthattuk le. Az elkészült mérőberendezés látható a 4. ábrán.

3. ELEKTRONIKAI TERVEZÉS

Az elektromágnesek modellezéshez készített mérőberendezés két mechanikai- és két elektromos mennyiség mérését hivatott szolgálni, továbbá a kísérletek kapcsán mért adatok rögzítését az idő függvényében: erő, elmozdulás, valamint áramerősség és kapocsfeszültség. A mérések kalibrált szenzorokkal, egyedileg tervezett analóg céláramkörrel és egy mérési adatgyűjtő kártyával történtek.

A statikus kísérletek esetében a vasmagra ható erő mérését egy DYLY-106, S-típusú erőmérő szenzor végzi, amely egy beépített Wheatstone-híd kapcsolással és nyúlásmérő bélyegek segítségével képes a csavarodásból származó erőket kioltani, így csak a tengelyirányú erőkkel arányos analóg feszültségértéket szolgáltat. A szenzor feszültségforrása 12 V, és az érzékenysége 2 mV/V, a kalibrációját pedig hitelesített mérő súlyokkal végeztük el. A vasmag pozíciójának figyelésére egy Micro Epsilon optoNCDT-2220 típusú háromszögletű

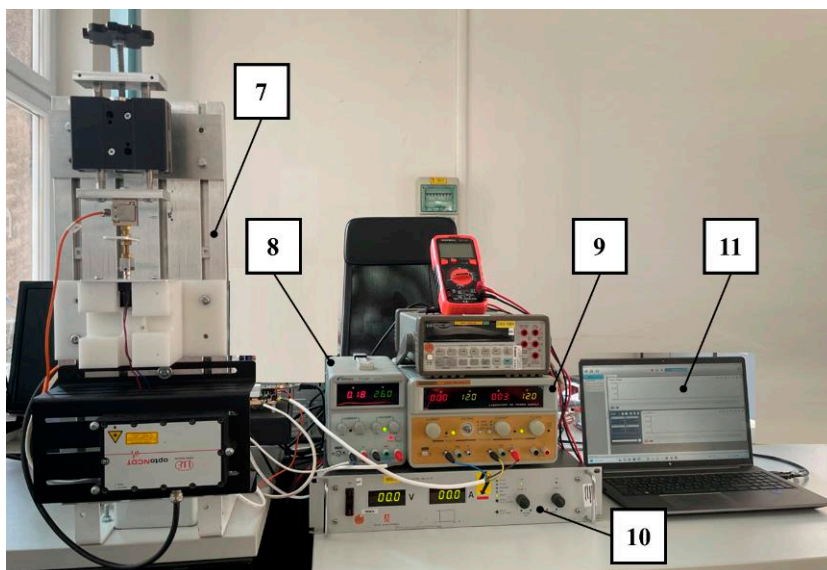
lézeres távolságmérő került beépítésre, amelynek mérési tartománya ± 100 mm, analóg kimeneti jele arányosan ± 5 V.

Mindkét szenzor analóg mérőjelét a kifejlesztett céláramkör LM358 típusú, általános célú műveleti erősítők segítségével felerősíti az MC-USB-205 típusú mérési adatgyűjtő kártya analóg bemeneteihez. Az eszköz analóg mérési tartománya ± 10 V, 12 bit felbontással maximum 500 kS/s mintavételi sebességgel rendelkezik. Mivel négy különböző csatornát használtunk, így ez utóbbi mennyiség maximum 125 kS/s értékre korlátozódott.

A vizsgált tárgyat képező behúzótekerces – ami akár állandó mágnessel szerelt kivitelű is lehet – áramfelvételének mérését az áramkörbe helyezett 0,1 Ω -os mérőellenálláson eső feszültség mérésével végeztük. INA181 típusú árammérő és LM358 műveleti erősítő segítségével tettük érzékelhetővé a jelet, mivel a legtöbb vizsgált elektromágnes áramfelvétele a 100 mA-es intervallumba esett. Abban az esetben, amikor ennek az 1-2 szerese volt jellemző, akkor két 0,1 Ω -os mérőellenállást kapcsolunk párhuzamosan, mint mérőellenállást és az LM358 műveleti erősítők ellenálláspárjait változtattuk meg. A kísérletek során a 12 V és 14 V üzemi feszültséggel rendelkező behúzótekerceseket vizsgáltunk, így a kapocsfeszültség ellenőrzését feszültségosztó kapcsolással kötöttük a mérőkártya bementére.

A mérőkártyához tartozó DAQami szoftver segítségével definiáltuk a csatornák konfigurálását és a mintavételi frekvenciát. Az adatrögzítés trigger-jelét külső jel gyanánt definiáltuk, melyet egy Cypress PSoC 5LP CY8CKIT-059 típusú fejlesztői platform vezérelt. A céláramkör ezt az eszközt is magába foglalta, programozása által pedig a statikus mérések automata mérését valósította meg. A vasmag pozíciójának beállítását követően egyetlen gombnyomás indította a mérést: trigger-jelet kapott a mérőkártya, a fejlesztői platform pedig analóg kimenetén keresztül az SM35-45 típusú szabályozható tápegységet vezérelte. Ez utóbbi biztosította a stabilizált kapocsfeszültséget a tesztelt behúzótekerces számára. Adott vasmag-pozíció esetén az automata mérés során a kapocsfeszültség nulláról indult, 0,5 V-os lépésekben, melyek 80 ms ideig tartottak elérte az üzemi maximális kapocsfeszültséget. Eközben mind a négy adat mérésre és rögzítésre került, a szoftver segítségével pedig .csv formátumban exportálásra.

Az egyedi mérőberendezés látható a 4. ábrán, ahol a 7 jelű egység a korábbi fejezetekben bemutatott moduláris szerelőplatform. A céláramkör és szenzorok energiaforrását a 8 és 9 jelű laboratóriumi tápegység biztosítja (stabilizált 26 V és ± 12 V), míg a 10 jelű a szabályozható SM35-45 feszültségforrás. A mérésadatgyűjtőhöz tartozó DAQami szoftver a 11 jelű számítógépen működött.



4. ábra: Elektromágnesek modellezéséhez fejlesztett mérőberendezés

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Ez a tanulmány olyan mérőberendezés fejlesztéséről számolt be, amely elektromágnesek modellezéséhez kapcsolódó erőmérésekre, ejtési és behúzási kísérletek elvégzésére alkalmas, miközben rögzíti: az áramerősség, a vasmag pozíció, kapocsfeszültség és vasmagra ható erő értékeit az idő függvényében. Részletes ismertetésre került a moduláris szerelhető platform a különböző típusú kísérletek céljából. Továbbá egyedi céláramkör tervezését is ismertette, ami az a szükséges szenzorjelek feldolgozását és a kapocsfeszültség vezérlését hajtja végre. A mért értékeket az alkalmazott mérőkártya szoftveres beállításain keresztül lehetett rögzíteni és exportálni adatfájlként. Ezen adatok szükségesek az energiaalapú modell és szimuláció validálásához.

5. SUMMARY

This study reported on the development of a measuring device that is suitable for force measurements related to the modeling of electromagnets, for performing drop and pull-in experiments, while recording: current, core position, terminal voltage and force acting on the core as a function of time. The modular mounting platform for different types of monitoring was described in detail. Furthermore, the design of a custom target circuit was described, which performs the necessary sensor signal processing and terminal voltage control. The measured values could be recorded and exported as a data file through the software settings of the applied measuring card. These data are necessary for the validation of the energy-based model and simulation.

6. IRODALOM

- [1] TIAN H., ZHAO Y.: *Coil Inductance Model Based Solenoid on-off Valve Spool Displacement Sensing via Laser Calibration*, Sensors, 2018, Article 4492, <https://doi.org/10.3390/s18124492>
- [2] Demarchi A., Farçoni L., Pinto A., Lang R., Romero R., Silva I.: *Modelling a Solenoid's Valve Movement*, RoboCup 2017: Robot World Cup XXI, pp. 290-301, https://doi.org/10.1007/978-3-030-00308-1_24
- [3] DÜZGÜN E., ŞEFKAT G.: *The Design and Analysis of a Proportional Solenoid with Experimental Validation of Static and Dynamic Behavior*, Applied Sciences, 2024, Article 11990 <https://doi.org/10.3390/app142411990>
- [4] YUNHONG Z., ZONGJIE Z., and RONGSHENG D.: *Simulation and optimisation design of the solenoid valve*, The Journal of Engineering, Vol. 2019, No. 23, <https://doi.org/10.1049/joe.2018.9087>
- [5] HUCKO S., TAO X., SCHMITZ K.: *Real-Time Models of Valve Solenoids: an Evaluation of Measurement And Simulation-Based Parameter Identification*, 14th International Fluid Power Conference, 2024, <https://doi.org/10.13052/rp-9788770042222C84>
- [6] KAPITÁNY P.: *Mérőeszköz fejlesztése állandó mágneset tartalmazó elektromágnes vizsgálatához*, XXVI. Tavaszí Szél Konferencia 2023: Tanulmánykötet I., pp. 494-500.