

Egyenirányítóval táplált DC motor bond gráf alapú vizsgálata

Bond graph-based analysis of a DC motor powered by a rectifier

KATONA Kornél

Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Járműmérnöki és Mechatronikai Intézet, Villamosmérnöki és Mechatronikai
Tanszék, tanársegéd, katona.kornel@eng.unideb.hu, +36 52 512 900/77785

Abstract

The bond graph method provides a unified framework for describing various energy conversion processes and dynamic phenomena, enabling the investigation of interactions between mechanical, electrical, and other domains. The combination of a rectifier bridge connection and a DC motor provides a classic example for the integrated analysis of electrical and mechanical systems. The 20-sim application can be used to perform simulations to study the behavior of the system.

Keywords: bond graph modeling, rectifier, DC motor, 20-sim, dynamic analysis

Kivonat

A bond gráf módszer egységes keretet biztosít a különböző energiakonverziós folyamatok és dinamikai jelenségek leírására, lehetővé téve a mechanikai, villamos és egyéb domének közötti kölcsönhatások vizsgálatát. Az egyenirányító hidkapcsolás és a DC motor kombinációja klasszikus példát nyújt a villamos és mechanikai rendszerek integrált elemzésére. A 20-sim alkalmazással szimulációkat lehet végezni a rendszer viselkedésének tanulmányozására.

Kulcsszavak: bond gráf modellezés, egyenirányító, DC motor, 20-sim, dinamikai elemzés

1. BEVEZETÉS

A modern villamos hajtások és motorvezérlő rendszerek modellezése és elemzése kulcsfontosságú a tervezés, optimalizálás és vezérlés szempontjából. A bond-gráf (Paynter & Briggs 1961, Rai & Umanand 2009) egy mechatronikai modellezési technika, amelyet összekapcsolt, kölcsönhatásban lévő fizikai rendszerek modellezésére használnak. [1] [2] A bond-gráfokat úgy tervezték, hogy a rendszer összetevőin belüli folyamatos energiaáramlást vagy energiacserét ábrázolják. Ezért az áramlás hirtelen változásai, mint például egy közös kapcsoló működése a hibrid rendszerekben, nem ábrázolhatók közvetlenül a módszer módosítása nélkül. Az évek során számos módszert javasoltak és vizsgáltak a hibrid rendszerek bond-gráfokkal történő ábrázolására. Ahogyan azt Mosterman & Biswas (1998) említette, a hibrid rendszerek bond-gráfokkal történő modellezése két alkategóriát hoz létre: olyan modelleket, amelyeknek az oksági viszonyai a kommutáció során változatlanok maradnak (fix oksági viszonyok), és változóik nem függnak a kapcsoló ON-OFF üzemmódjától, valamint olyan modelleket, amelyeknek változó oksági viszonyai vannak, és amelyekben az integrális oksági viszony a kommutáció során változik. [3]

Jelen munkában egy bond gráf alapú modellt készítettem a rendszer teljes dinamikájának leírására, majd a 20-sim szoftver segítségével szimulációkat végeztem a rendszer viselkedésének tanulmányozására. A modell lehetőséget biztosít a feszültség- és áramváltozások, valamint a motor forgó részének dinamika vizsgálatára, miközben rávilágít a rendszer paramétereinek szerepére a teljesítmény és stabilitás szempontjából. A dolgozat célja, hogy bemutassa a bond gráf modellalkotás előnyeit az integrált villamos-mechanikai rendszerek elemzésében, és szemléltető példaként szolgáljon egy DC motoros egyenirányító rendszer vizsgálatához.

2. MODELLEZÉS BOND GRÁFFAL

2.1. A Bond gráf elemei

A teljesítmény két teljesítménytényező, az effort (e) és a flow (f) szorzataként áll elő: $P = e \cdot f$. Ezek a teljesítménytényezők a különböző rendszerekben különböző módon értelmezhetők. [2] [5] [6] A dolgozat két elkülönült, elektromos és mechanikai rotációs fizikai rendszert tartalmaz. Az elektromos rendszerben az effort a feszültség, a flow az áramerősség. A rotációs rendszerben pedig az effort a nyomaték, a flow pedig a szögsebesség.

A bond-gráfokban csupán négy alapvető szimbólumcsoportot különítünk el:

- 3 különböző egyportos passzív elem (R , C , I),
- 2 egyportos aktív elem (Se , Sf),
- 2 kétportos elem (TF , GY),
- 2 két vagy több portos csomópont (0 , 1).

Az R -elem olyan elem általában energiát disszipál. Ez igaz elektromos ellenállásra, mechanikai csillapítókra. A Bond gráf terminológiájában egy olyan elemet, amely veszteség nélkül tárol és ad le energiát, egyportos kondenzátornak nevezzük. Ez a C -elem. Fizikai értelemben a kondenzátor olyan eszközök idealizált modellje, mint például a rugók, torziós rudak, elektromos kondenzátorok, tartályok és akkumulátorok stb. Az energiatárolók másik csoportját az olyan elemek alkotják, amelyeket elektromos rendszerekben az induktivitás, mechanikai rendszerekben pedig a tömeg vagy tehetetlenség modellezésére alkalmaznak. Ezeket inerciális elemeknek, röviden I -elemeknek nevezik.

Az aktív egyportos elemek a teljesítményváltozók forrását modellezik, amelyek reagálnak a külső hatásokra. Az Se effort-t szolgáltat, míg az Sf flow-t szolgáltat a rendszernek.

A kétportos elemek közül a transzformátor (jele: TF) nem hoz létre, nem tárol és nem semmisít meg energiát. Az energia fenntartása mellett a transzformátor modulusa által meghatározott megfelelő változtatással továbbítja a teljesítménytényezőket. Az elem szimbolizálhat egy ideális elektromos transzformátort, vagy például egy tömeg nélküli kart. A transzformátor a flow-t a flow-hoz és az effort-ot az effort-hoz viszonyítja. Ezzel szemben a gyrator (jele: GY) kapcsolatot hoz létre a bemenő flow és a kimenő effort, valamint a bemenő effort és a kimenő flow között, miközben a portok teljesítménye nem változik.

A csomópontok a rendszer topológiáját reprezentálják. Az 1 -es típusú csomópontokban a flow állandó, és az effort-k összege nulla. Egy ilyen csomópont egy mechanikai rendszerben közös tömegpontot, egy elektromos hálózatban soros összeköttetést (ahol min-den elemben ugyanaz az áram folyik) képvisel. Az effort-k algebrai összegének előjelét a gráfban szereplő félnyílak iránya határozza meg. A 0 -s típusú csomópont esetén az effort állandó és a flow-k összege nulla. Az elektromos rendszerekben a párhuzamos kapcsolást jelöli. A flow-k algebrai összegének előjelét a gráfban szereplő félnyílak iránya határozza meg. [2] [4] [5] [6]

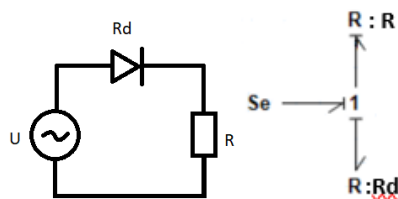
2.3. Kauzalitás

A kauzalitás a teljesítménytényezők közötti ok-okozati összefüggéseket állapítja meg. A bond gráfokban a bemeneteket és a kimeneteket a kauzalitást jelölő vonás jellemzi. Ez a függőleges vonal azt az irányt jelzi, amely felé az effort hat. Ebből következik, hogy a csomópontnak az a vége, amely nem rendelkezik vonással, azon vége felé irányul a flow [4].

3. HÁLÓZATI KOMMUTÁCIÓS EGYENIRÁNYÍTÓ MODELLEZÉSE

3.1. A dióda modellezése

A dióda nyitóirányú előfeszítéskor a lineáris szakaszon jól közelíthető egyetlen R -elemmel (1. ábra).



1. ábra. A dióda áramköri kapcsolása és bond-gráfja, amelyben egy R_d ellenállással van helyettesítve

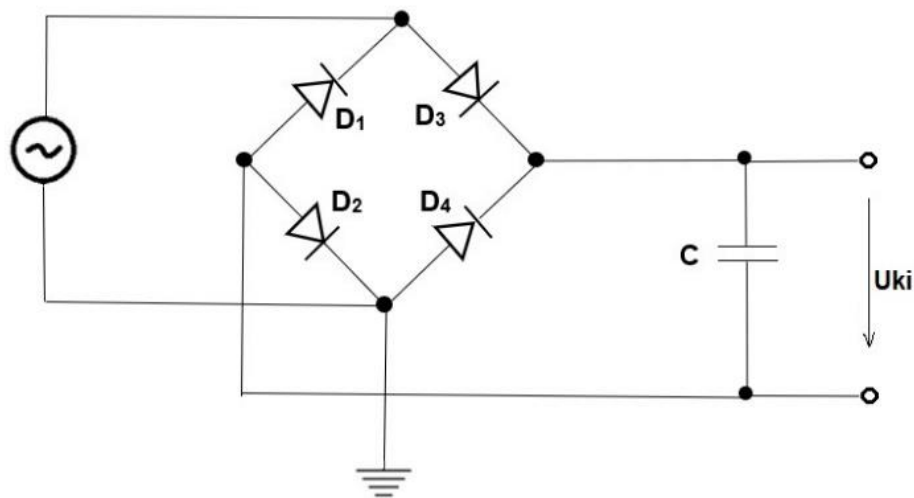
Az áram-feszültség karakterisztikájának pontosabb leírásához a jól ismert dióda-egyenletet (Schockley-egyenlet) használjuk [4]:

$$I = I_s \cdot (\exp(qV/(nkT)) - 1)$$

ahol I_s a szaturációs áram, ami záróirányban folyik záróirányú feszültség esetén, q az elemi töltés, melynek értéke kb. $1,602 \cdot 10^{-19}$ C, k a Boltzmann-állandó (kb. $1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K), T az abszolút hőmérséklet Kelvin egységekben, n a diódára jellemző idealitási faktor, melynek alapértéke 1, egyébként pedig $1 \leq n \leq 2$.

3.2. Ideális egyfázisú, kétutas, kétütemű hálózati kommutációs áramirányító modellezése

A 2. ábrán látható ideális egyfázisú, kétutas, kétütemű (1F 2U 2Ü) hálózati kommutációs áramirányító.



2. ábra. Ideális vezérletlen egyenirányító hídkapcsolás szűrőkapacitáttal

Amennyiben egy diódapár vezet, a vezető diódákat rövidzárnak tekinthetjük, a nem vezető diódák feszültsége pedig:

$$u_{D1} = u_{D4} = u$$

$$u_{D2} = u_{D3} = -u$$

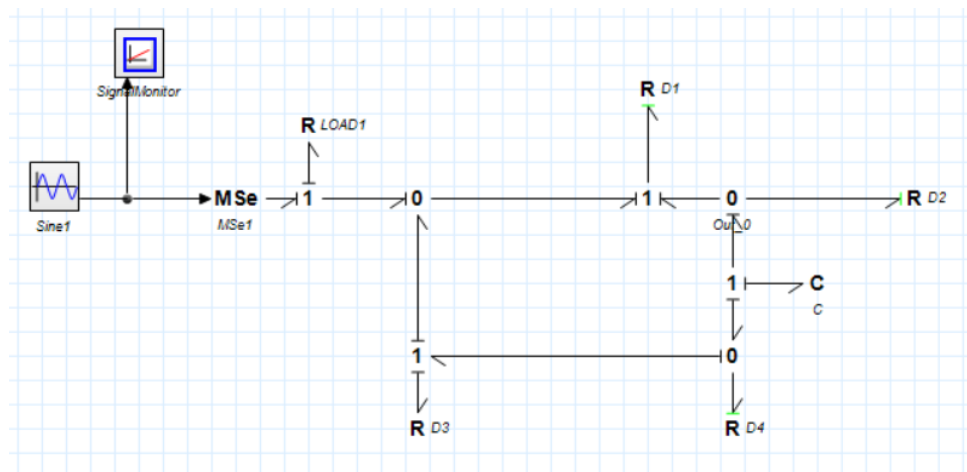
A fenti egyenirányító kapcsolás Bond gráf modelljét a 3. ábra mutatja be. A modell a 20-sim nevű számítógépes alkalmazásban készült. A bemeneti jel amplitúdója 8 V, frekvenciája 50 Hz. A terhelő ellenállás értéke 0.0001Ω . A diódákat reprezentáló ellenállások paraméterei: $I_s = 10^{-9}$, $n = 2$, $VT = 0,02585$, $G_{rev} = 10^{-8}$, $E_{max} = 20$; az egyenletek:

$$x = p \cdot e / (n \cdot VT);$$

$$x_s = E_{max} \cdot \tanh(x/E_{max});$$

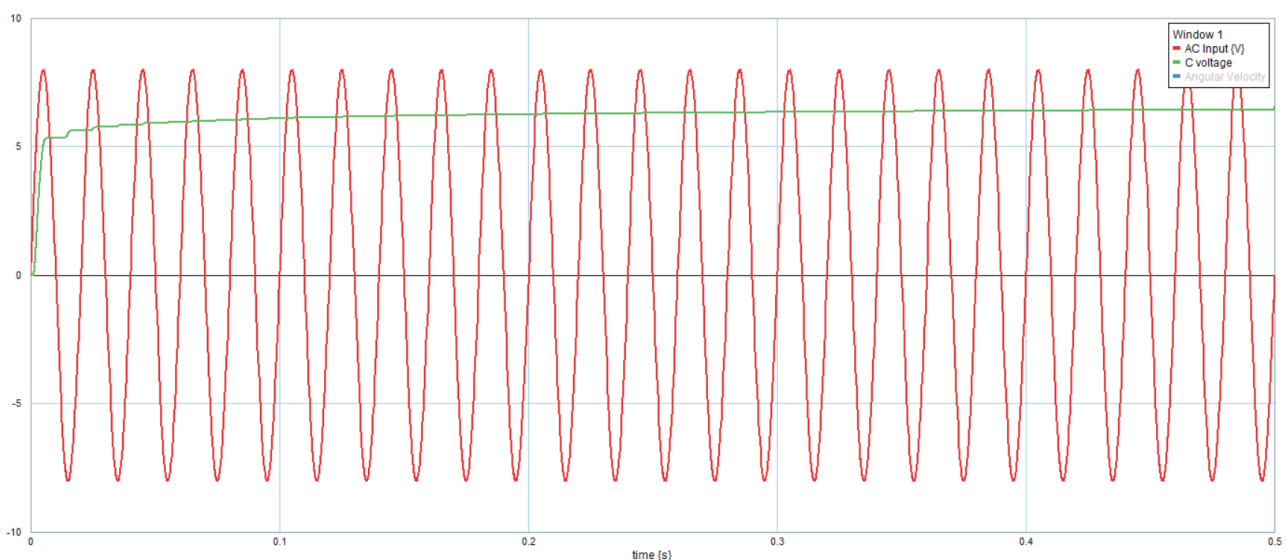
$$p \cdot f = I_s \cdot (\exp(x_s) - 1) + G_{rev} \cdot p \cdot e;$$

A kapacitás értéke: $C = 10^{-4}$ F.



3. ábra. Egyenirányító hídkapcsolás Bond gráf modellje

A 20-sim programban lefutott szimuláció eredményét mutatja az 4. ábra, ahol piros vonal jelzi a bemeneti szinusz feszültségjelet, a zöld színű vonal a hídkapcsolás kimenetét, ami egyúttal a kapacitás feszültsége is. A 20-sim jelzi, hogy a jel nem tisztán folytonos, hanem van egy diszkrét esemény is amit a diódák vezetésének és nem vezetésének váltakozása okoz. A vastag vonal általában a lehetséges értéktartományt (envelope) mutatja, a vékony pedig a tényleges integrált görbét.



4. ábra. A kapcsolat be- és kimeneti jelei

4. PMDC MOTOR MODELLEZÉSE

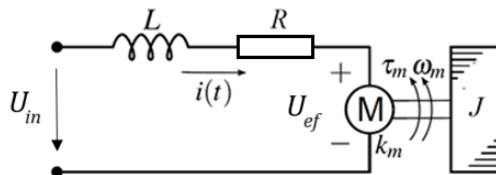
Az egyenáramú motor villamos modelljét mutatja be a 5. ábra, ahol L és R képviseli az armatúra induktivitását és ellenállását. A kimenő tengelyét J tehetetlenségi nyomaték reprezentálja illetve a tengely csapággal rendelkezik. A motor időben változó $i(t)$ armatúra árama U_L feszültséget indukál az armatúrában, amely az áramváltozást késlelteti (Lenz-törvény).

$$U_L = -L \frac{di}{dt}$$

A feszültségek a következő módon alakulnak:

$$U_L = U_{in} - U_R - U_{ef}$$

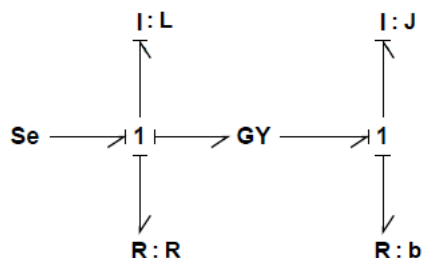
ahol U_{ef} a motor (indukált) elektromotoros ereje.



5. ábra. A PMDC motor villamos modellje

A motor τ_m forgatónyomatékokat és ω_m szögsebességet ad le a tengelyének.

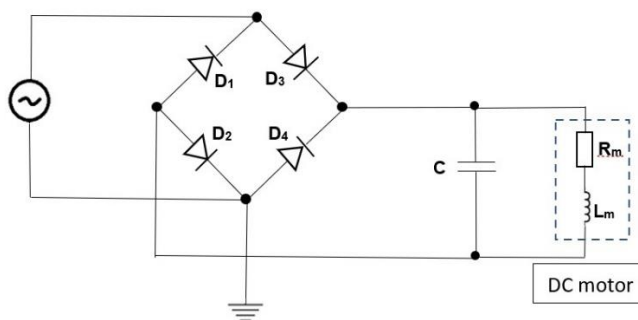
A PMDC motor Bond gráfja a 6. ábrán látható. Az L induktitás és a J tehetetlenségi nyomaték I elemként, az R ellenállás és a b csillapítási tényezőjű csapágy R elemként szerepel a modellben. A motor egy girátor, melynek k_m a motorkonstansa. [5]



6. ábra. PDCM motor Bond gráfja [5]

5. ÖSSZETETT RENDSZER MODELLJE

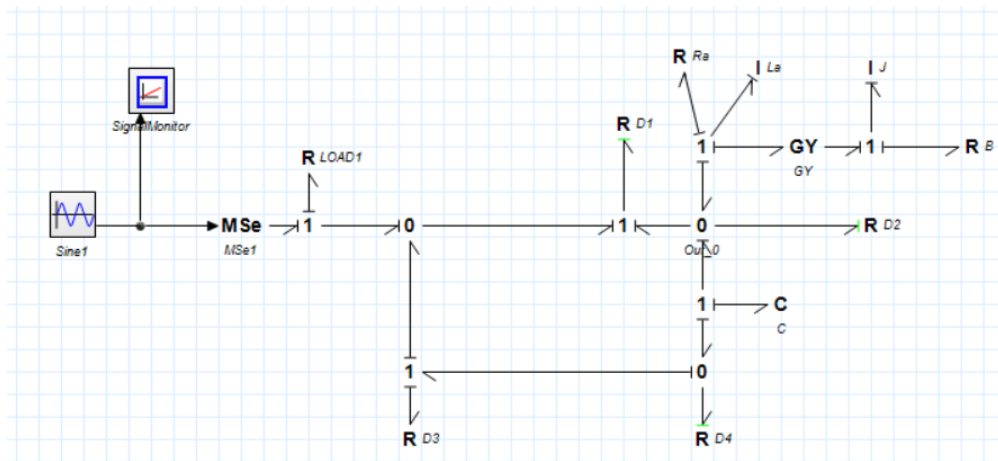
A modellezni kívánt teljes rendszer a 7. ábrán látható. Az ábrán a motor armatúra ellenállása: $R_m = R_a$, illetve armatúra induktivitása: $L_m = L_a$.



7. ábra. A teljes rendszer

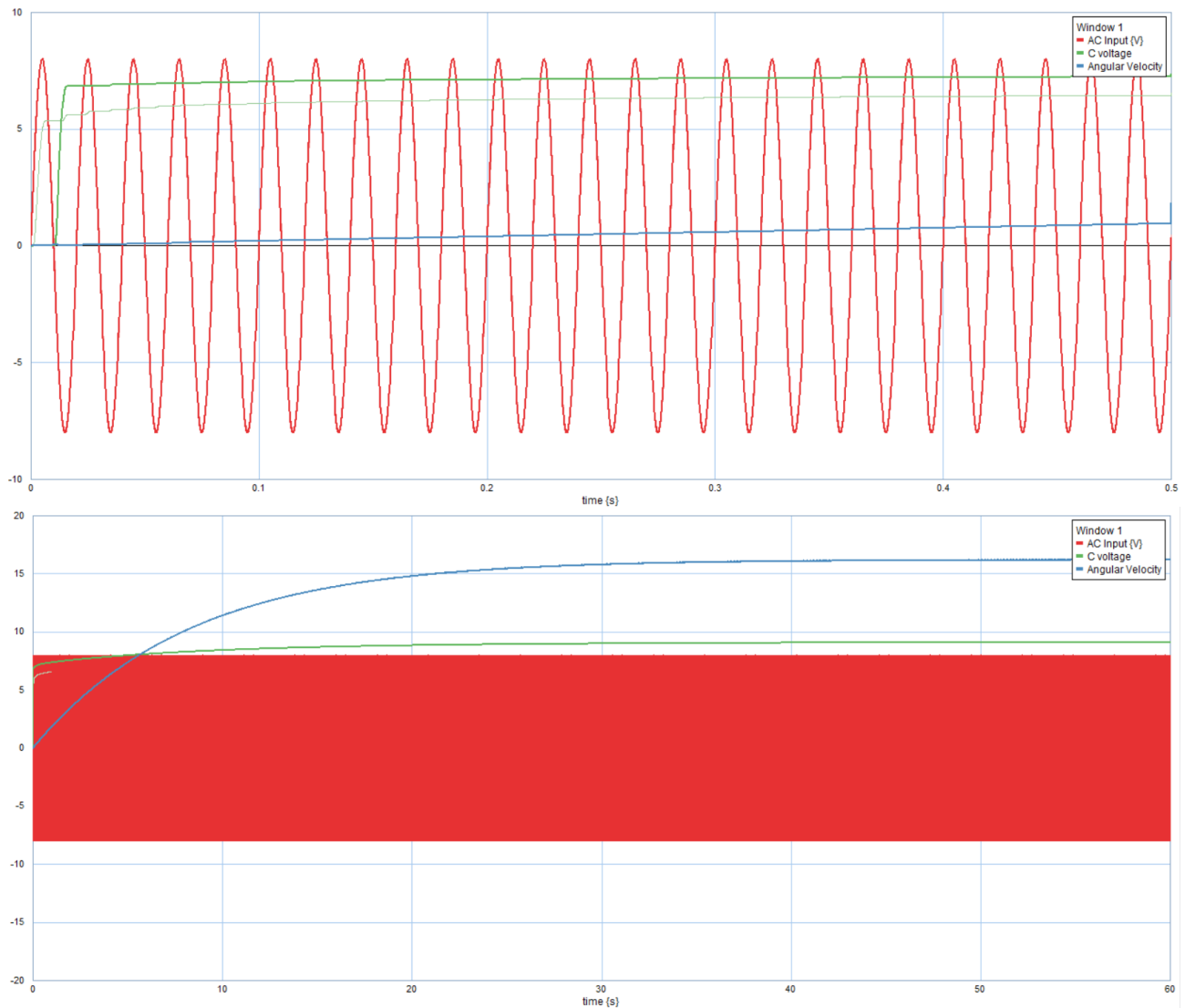
Maga a modellezését a 20-sim alkalmazással a 8. ábra mutatja be. A girátor paramétere $r = 0.1$. Az armatúra paramétere: $RL = 0.5$, $i = 0.002$. A tengely paraméterek: $i = 0.01$; $r = 0.001$.

A szinusz generátor önmagában csak egy vezérlőjel. Ahhoz, hogy a bond gráf hálózatban valós feszültségforrásként viselkedjen, a kimenetét egy modulált source effort (MSE) elemhez kell csatolni.



8. ábra. A teljes rendszer modellje

A rendszer szimulációjának az eredménye látható a 9. ábrán, piros színnel a bement, zöld színnel a kimenet, és kék színnel pedig a szögsebesség van jelölve.



9. ábra. A teljes rendszer modellje

Az ábra felső részén a szimuláció mindössze 0.5 s-ig tartott, míg az alsó részén 60 s-ig.

6. KÖVETKEZTETÉSEK, JÖVŐBELI TERVEK

Ebben a dolgozatban összekapcsolt elektromos és forgó mechanikus rendszer bond gráf modellje került bemutatásra. A rendszer tesztelése és szimulációja 20-sim szoftver segítségével történt. A rendszeregyenletek a modell alapján levezethetők, meghatározhatók.

A szimulációs vizsgálatok igazolták, hogy a Bond gráf alapú modell alkalmas az egyenirányítóval táplált DC motor dinamikus viselkedésének elemzésére. A szimuláció során kapott eredmények alapján megállapítható, hogy a bond gráf modell megalkotása sikeres volt. A megfelelő szűrőkondenzátor beiktatásával a kimeneti feszültség közel állandó értékre állt be, hullámossága elhanyagolható, ami a motor egyenletesebb működését eredményezte. Az is megállapítható, hogy a motor nem azonnal éri el a stacionárius fordulatszámot, a tehetetlensége miatt fokozatosan gyorsul.

A későbbi munka során a modell további elemzésére kerül sor. Fontos kérdés például, hogy hogyan befolyásolja a működést a különböző motor paraméterek (ellenállás, induktivitás) változtatása. Különböző nyomtatékok esetén is vizsgálható a görbék változása.

Emellett a szimuláció során kapott eredményeket össze kívánom hasonlítani egy valós megépített rendszer vizsgálatokor kapott eredményekkel.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönöm a segítséget munkatársaimnak, Taleb Mayarnak és Korsoveczki Gyulának a szakmai segítségnyújtásért, támogatásért.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Paynter H. M., Analysis and Design of Engineering Systems, Boston: MIT Press, 1961.
- [2] J. A. Kypuros, System Dynamics and Control with Bond Graph Modeling, U.S.: CRC Press Taylor & Francies, 2013.
- [3] Markakis A., Holderbaum W. és Potter B., „Bond graph models of DC-DC converters operating in both CCM and DCM,” *International Journal of Power Electronics*, pp. 6 (1). pp. 18-41. ISSN 1756-6398, 2014.
- [4] Shockley W., „The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors,” *Bell system technical journal*, %1. kötet28, %1. szám3, pp. 435-489, 1949.
- [5] Korsoveczki Gy., Pál P. és Husi G., The Simulation of a PID Controlled Robotic Drive Based on Bond Graph Modelling, Cluj-Napoca: Műszaki Tudományos Közlemények, 2022.
- [6] Husi G. és Abdulkareem A. H.:, *Mechatronics Systems in the Cyber-physical Space*, Debrecen: Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, 2018.