

Vezeték nélküli energiaátviteli hálózatok alkalmazása rugalmas anyagáramlási rendszerekben

Lévai Emese, Bohács Gábor, Gyórváry Zsolt

*Anyagmozgatási és Logisztikai Rendszerek Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Budapest, Magyarország, (e-mail: gabor.bohacs@logisztika.bme.hu)*

Absztrakt: Kutatásunk célja az iparban többek között vezeték nélküli targoncás rendszerek energiaellátására szolgáló induktív energiaátviteli (IPT) rendszerek alkalmazásának továbbfejlesztése. A cikk azt vizsgálja, hogy egy IPT-vel részben lefedett rendszer esetén, hogyan valósítható meg célszerűen, az energetikai szempontok figyelembe vételével együtt, a feladatokhoz tartozó, határidők betartásáért felelős irányító algoritmus.

1. BEVEZETÉS

Az gyártást kiszolgáló anyagáramlási rendszerek jelenkori fejlettségi fokán az információ-áramlás mellett kiemelten fontos az energiaáramlás kérdése is. Az utóbbinál a gazdaságosság, rugalmasság és környezetkímélő megvalósítás kiemelt figyelmet kap. Az Inductive Power Transfer (IPT) rendszerek ezen a téren biztosítanak újszerű, rugalmasabb megoldásokat. Legfőbb előnyként a környezetvédelmi szempontokat fogalmazhatjuk meg, hiszen alkalmazásával az egyes gépekben jóval kisebb akkumulátorra van szükség, mely így kisebb környezetterheléssel jár együtt.

kontaktust emberi munkaerőtől nem igényelnek, valamint, hogy olyan komponensekből állnak, melyek érintésre sem okoznak áramütést. Bizonyos típusokat kötött pályán, síneken közlekedő berendezésekhez, például függősín-pálya lehet használni (IPT Rail). A sín mellett, azzal párhuzamosan, folytonosan fut a töltő berendezés, ami a akár a teljes pályán folyamatosan biztosítja az induktív áramellátást. A járműben lévő jelfogó fizikailag nem is érintkezik az energiaforrással, így közöttük egyik oldalon sem jelentkezik kopás. Emiatt alacsonyabbak a karbantartási költségei is. Mivel a kocsik meghajtása is megvalósítható induktív úton, nincs szükség mozgó alkatrészekre a berendezésekben, ezzel szintén a karbantartás költségeit, és annak rendszerességét spórolhatjuk meg. A szintkülönbséget jelentő síneket nem mindenhol lehet



1. ábra: A három rendszer, balról jobbra: IPT Rai, IPT Floor, IPT Charge

2. AZ “INDUCTIVE POWER TRANSPORT” RENDSZER JELLEMZŐI

2.1 Rendszerek csoportosítása

Az IPT rendszereket kivitel szerint három csoportba oszthatjuk, ezek közös jellemzője, hogy közvetlen, fizikai

biztonságos használni, így az IPT rendszerek másik verziójában a padlóba ágyazott induktív hurok (IPT Floor) képes mozgásban tartani a vevőegységgel felszerelt szállítóeszközöket. Ezzel a megoldással az IPT nyomvonal már fizikailag teljesen elválhat a vevőegységtől, így rendkívül rugalmas alkalmazásra van lehetőség. A harmadik jellemző kivitel az előző megoldás pontszerű változatát

jelenti (IPT Charge), melynek alkalmazása viszont korlátozott, hiszen itt a berendezések akkumulátorát csak helyben lehet tölteni. Ez olyan esetekben jelent megoldás, mint például autóbuszok, ahol az egy helyben tartózkodás egyes megállóban úgyszólván szükséges. Bár olyan alkalmazás is elképzelhető, hogy a három megoldást együttesen alkalmazzuk mi a vezeték nélküli targoncák szempontjából releváns IPT Floor rendszert helyeztük a középpontba, mely természetesen megállás közbeni töltés esetén az IPT Charge speciális eseteként is felfogható.

2.2 Az Ipar 4.0 fogalma

Az Európai Parlament 2016-ban megfogalmazott állásfoglalása szerint: Az ipar 4.0 a termelési folyamatok olyan szervezését írja le, melynek keretében az eszközök önállóan kommunikálnak egymással az értéklánc mentén: a jövő egy olyan „okos” gyárat hozva létre ezzel, amelyben a számítógép-vezérelt rendszerek nyomon követik a fizikai folyamatokat, létrehozzák a fizikai valóság virtuális mását és decentralizált döntéseket hoznak önszervező mechanizmusok alapján.” [Department, 2016].

A fent említett önszervező rendszert, mely a mai fejlett gyárak alapját szolgálja, Magyarországon Ipar 4.0-ként nevezzük. Ebbe a fogalomkörbe tartozik minden olyan rendszer, aminek gépi tagjai és alrendszerei önállóan kommunikálnak egymással, emellett szenitívek az előre nem látott eseményekre (akadály, célváltás, baleset), és ezekre rugalmas módon reagálnak anélkül, hogy ehhez közvetlenül emberi beavatkozás kelljen.

2.3 Fogyasztók az IP rendszerben

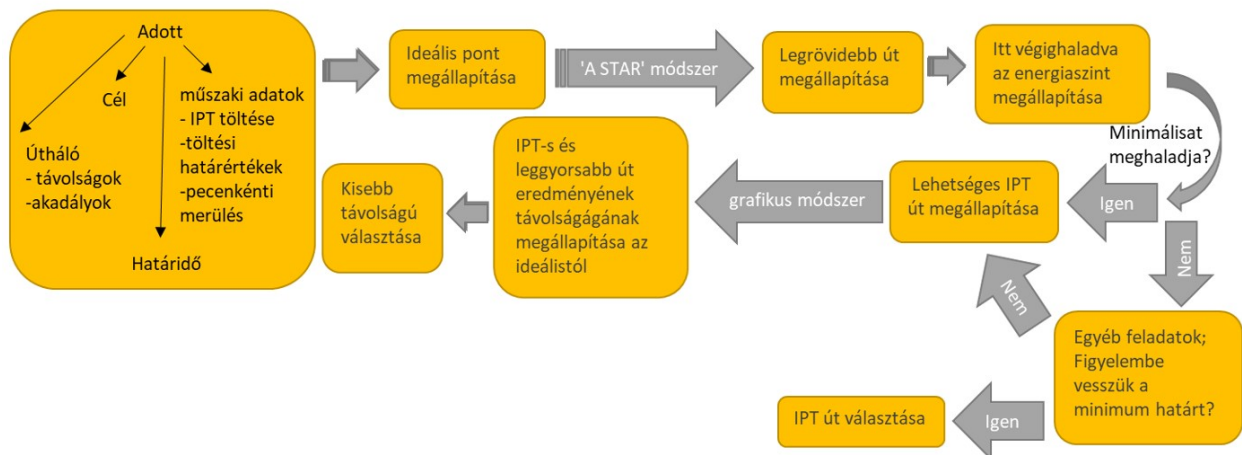
Az IPT rendszerek többféle berendezésnél is használatosak. Ilyenek a különböző gépek (pl.akkumulátoros késziszerszámok), járművek (például az IPT Technology által 2012-ben sikeresen modellezett IPT Charge Bus), mobil gépek, telefonok, szerszámok, PDA, egyéb mobil eszközök, de ide soroljuk az anyagmozgatásban használt vezeték nélküli targoncákat (AGV) is. Közös jellemzői a fogyasztóknak,

hogy nem kapcsolódnak vezetékkel ahhoz a szerkezethez, ami tölti őket, ez a töltés a fent említett induktív módon történik. A pálya mentén elhelyezett primer hurokban (ami a transzformátorból ismert primer tekercshez hasonló funkciót tölt be) a váltakozó áram feszültséget indukál. A szekunder tekercset a fogyasztó tartalmazza, ezért nevezik “pickup”-nak is. Ennek a tekercsnek nem szükséges érintkeznie a hurokkal, ezért valósulhat meg a vezeték nélküli töltés. Fontos különbség, hogy a mobiltelefonok, PDA készülékek és az akkumulátoros kézi szerszámok töltése közben nem feltétlenül szükséges azok folyamatos elmozdíthatósága (tehát egy vezeték nélküli töltőállomáson töltőhetnek), míg a járművek (például buszok), vagy az AGV működtetésében szinte elengedhetetlen, hogy haladás közben is megvalósulhasson a töltés.

Üzemi környezetben az IPT töltésű berendezések egyrészt anyagmozgató gépeket jelentenek (targonca, daru stb.), másrészt lehetnek mobil átadóállomások pl. robot alapú rendszerek is. Ezen kívül kisebb fogyasztású áttelepíthető technológiai berendezések, azonosító eszközök. Lényeges, hogy az IPT rendszerek segítségével egy energia szempontú integráló elvet lehet kialakítani az IPT-s berendezések, a pálya geometriája és a folyamatok változása által megkívánt rekonfigurált topológia között. Ennek feltárása a kutatás további fontos konzekvenciája lehet.

2.5 Rugalmas gyártó-és anyagáramlási rendszerek

A rugalmas gyártó- és anyagáramlási rendszerekben [Manu 2018] rendszerben a berendezések szerkezete és elhelyezése is különbözik a hagyományos gyártósortól. A berendezések alkalmasak arra, hogy több különböző terméket, gyakorlatilag átállási idő nélkül állítsanak elő. A rendszerben alkalmazott eszközök nagyon magas automatizáltsági szinten működnek. Szembetűnő különbség, hogy egy rugalmas gyártórendszerben a technológiai sorrendnek nem mindig pontos mása a gépi sorrend, más szóval az egymás után lévő gyártási lépéseket elvégző gépek fizikailag gyakran más sorrendben vannak elhelyezve, mint ahogy azt a technológiai sorrend diktálná. Ezzel analóg módon rugalmas



2. ábra: Matematikai modell vázlat

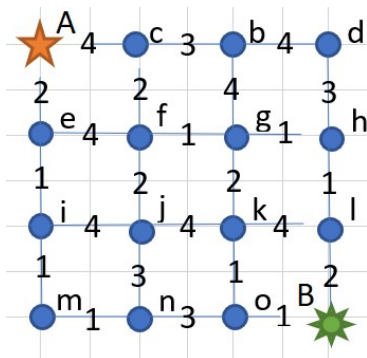
anyagmozgató rendszerben a gépek változó termékek kezelésére is képesek, és a kötött pálya helyett egy szerteágazóbb pályarendszer áll rendelkezésükre, hiszen a rugalmas anyagáramlási rendszer szállítóeszközei képesek az elágazásoknál a pillanatnyi körülmények alapján "önállóan" dönteni. Ezt a tulajdonságot az IPT rendszerekben is felhasználtuk. Rendszerstruktúra szempontjából ezek a rendszerek többféle kivitelben létezhetnek: lehetnek lineárisak, hurokszerűek, robotos anyagkezelésre optimalizáltak, illetve rugalmas összeszerelő sorok, melyek az egyes szerelési lépések rugalmas elrendezését jelentik [Abreu, 2000].

3. MATEMATIKAI MODELL, PÉLDA A DÖNTÉS MÖGÖTT ÁLLÓ SZÁMÍTÁSOKA

A kutatás korábbi szakaszában már történtek vizsgálatok arra vonatkozóan, hogy egy részben IPT-vel lefedett rendszerben működő AGV rendszerre milyen elvek mentén érdemes a

Points	h (n)	Road		l-h(n)	Decision
c	1	A->c	=	4-1=3	HOLD
b	1	A->e	=	2-1=1	
d	1				
e	1	e->i	=	4-1=3	HOLD
f	1	e->f	=	1-1=0	
g	1				
h	1	f->c	=	2-1=1	HOLD
j	1	f->g	=	1-1=0	
k	1	f->j	=	2-1=1	HOLD
l	1				
m	1	g->b	=	4-1=3	HOLD
n	1	g->h	=	1-1=0	
o	1	g->k	=	2-1=1	HOLD
B	2				
		h->d	=	3-1=2	HOLD
		h->l	=	1-1=0	
		l->k	=	4-1=3	HOLD
		l->B	=	2-2=0	

3. ábra: "A star" módszer eredménytábla



3. ábra: úthálózat modell

berendezések irányítását elvégezni. Arra jutottunk, hogy célszerű a rendszer töltöttségének elvesztését megakadályozó irányítási logikát kidolgozni, melyet ötvözzünk a feladatokra vonatkozó anyagmozgatósi határidők betartásával. Szeretnénk egyesíteni az energetikai szempontokat a határidő tartással. Ennek szemléltetésére képzeljük el azt az esetet

amikor az AGV-k töltöttsége rendszerszinten alacsony. Ezek alapján az AGV kétféle utat választhat: IPT útvonalat, és egy IPT nélküli, továbbiakban "legrövidebb" útvonalat. Ezek az útvonalakon kétféle szempontot kell figyelembe venni: a választott út hosszát, és az út által igényelt töltöttségi szintet, illetve, hogy ezutóbbi elegendő-e számára, vagy az IPT szakaszt tartalmazó utat kell választania. A választás abból a szempontból is fontos, hogy az a szakasz, amin tölteni lehet, nem biztos, hogy egyben a legrövidebb is, emiatt nem mindig egyértelmű, melyik verzió a költséghatékonyabb.

Működés közben az útvonalat végső soron az üzemeltetés költségei alapján határozzuk meg. Az eszköz számára a feladat elvégzése határidős, minden, amit a határidő lejártá után tesz, az késedelmes. Ha pedig a határidő lejártá előtt a célhoz ér, várakoznia kell. Ennek a várakozásnak éppúgy költségei vannak, mint a haladásnak (hiszen itt sem kapcsoljuk ki az eszközt), ezért az A és B pont között a szállító költségeit a

$$cost_{AB} = \Delta t_{haladás} + \Delta E_{várakozás}$$

összefüggéssel határozhatjuk meg ahol

- $\Delta t_{haladás}$: ténylegesen haladással töltött idő

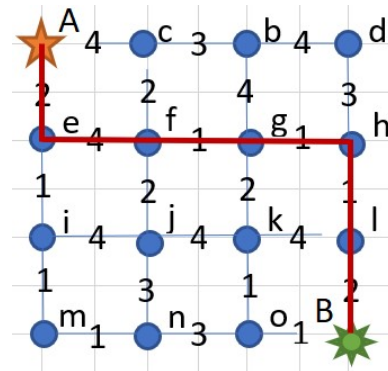
- $\Delta E_{várakozás}$: várakozás közben felhasznált energia.

Annak az energiának a költsége, amit a munkafolyatba fektetünk a szakaszon:

$$cost_{r,AB} = \Delta E_{haladás} + \Delta E_{várakozás} + \Delta E_{töltés},$$

ahol

$\Delta E_{töltés}$ a gép töltésébe fektetett energia.

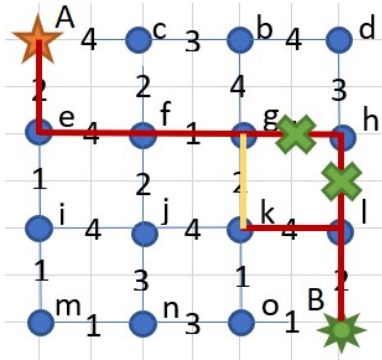


5. ábra: Leggyorsabb útvonal

A legrövidebb út és az IPT szakaszt tartalmazó út között ezeknek az összefüggéseknek figyelembevételével fogunk dönteni.

A leggyorsabb út megtalálására az „A STAR” módszert alkalmazzuk [Rana, 2011]. Ezt minden útvonaltervezésnél meg kell határozni, hiszen nagyobb töltöttség esetén ez jelentheti a reális alternatívát. A leggyorsabb út ismeretében tudunk arról határozni, hogy az AGV energiaszintje a pálya végén lehetővé teszi-e annak bejárást, vagy inkább

választania kell egy IPT szakaszt tartalmazó útvonalat. Vegyük például a 4. ábra szerinti üzemi elrendezést.

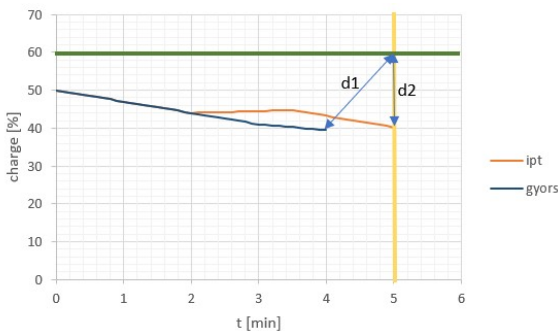


6. ábra: IPT-s útvonal

A szállítási feladatnak A és B pont között kell megvalósulnia. A klasszikus módszert annyiban igazítottuk a valósághoz, hogy az érintési pontok heurisztikus értékei negatív előjellel számítanak, hiszen mindig a kisebb utat választjuk szakaszonként, így befolyásoljuk az AGV-t, hogy ezeket a pontokat részesítse előnyben, amennyiben az lehetséges.

Kisbetűvel jeleztük a bejárható utak "ellenőrző" pontjait. Ezek színe eltérő, attól függően, hogy érintésük a feladat végrehajtása során az adott határidőn belül mennyire fontos (heurisztikus érték). A kék pontok heurisztikus értéke 1, a zöldeké 2. A pontok közti vonalakon a két pont valószínűsége van feltüntetve. Az „A star” módszert elvégezve, gráfként kezelve a pályát az 5. ábrán jelölt piros útvonalhoz jutunk.

A pirossal jelölt út tehát az egyik lehetőség, ez a leggyorsabb útvonal. Az útvonal végső kiválasztását a továbbiakban példákon keresztül szemléltetjük.



7. ábra: töltöttség az idő függvényében (5 perces határidő)

A legrövidebbhez képest alternatív útvonalat jelent a sárgával kiegészített, ami egy IPT szakaszt jelöl. Ezen a szakaszon tölteni tudunk. Induláskor a gép aktuális töltöttségi szintje 50%. A kritikus töltöttségi szint 40% (ez alá ennek a feladatnak a végrehajtásakor nem mehet, például más, eltervezett későbbi feladatokra való tartalékolás miatt). Mivel az aktuális töltöttség nagyon közel van a minimálshoz, arra számíthatunk, hogy a határidőtől függetlenül a második, IPT szakasszal rendelkező utat választja majd, annak ellenére,

hogy nem az a leggyorsabb. Két esetet vizsgálunk, egyikben szem előtt tartjuk, hogy nem mehetünk a minimális 40% alá, a másik esetben a leghamarabb célhoz akarunk érni, függetlenül ettől a határtól.

A leggyorsabb úton való a végighaladás 3 percbe kerül. A feladatra adott határidő 5 perc. Az eszköz IPT nélküli útvonalon halad, perceként 3%-ot merülve. Amikor áll, de nincs kikapcsolva, percenként 1,5%-ot merül. Rendszerszintű késés még nincs. A leggyorsabb útvonalon történő haladáskor a várakozási idő 1 perc. Az ideális töltöttségi szint 70%.

Ebben az esetben az AB szakaszon való szállítás költsége

$$cost_{AB} = \Delta t_{haladás} + c1 * \Delta E_{várakozás}$$

összege adódik. A c1 konstans a dimenziók egyeztetése miatt szerepel. Mértékegysége $\left[\frac{s^3}{kg \cdot m^2} \right] = \frac{1}{W}$. Itt a munka a várakozásba fektetett munka nagysága a rendszer oldaláról egységnyi várakozási idő alatt. Emiatt

$$c1 * \Delta E_{várakozás} = \Delta t_{várakozás}$$

Ebben az esetben

$$cost_{AB} = \Delta t_{haladás} + c1 * \Delta E_{várakozás} = \Delta t_{haladás} + \Delta t_{várakozás} = 3 \text{ min} + 1 \text{ min}$$

azaz 4 perc út anyagi terheit viseli az adott út.

Mivel az árat az energiafelhasználáson keresztül tudjuk legjobban megközelíteni, így az energia költségek az adott útra vetítve

$$cost_{AB(E)} = \Delta E_{haladás} + \Delta E_{várakozás} + \Delta E_{töltés}$$

A plusz és mínusz közötti különbség, hogy míg egy sima úton a várakozás energiavesztés (tehát pozitív költség), az IPT szakaszokon töltés mellett nyereség. Ebben az esetben a várakozás sima úton történik, így a függvény:

$$cost_{AB(E)} = \Delta E_{haladás} + \Delta E_{várakozás} + \Delta E_{töltés} = (3 * 3) + (1 * 1,5) + 0 = 10,5$$

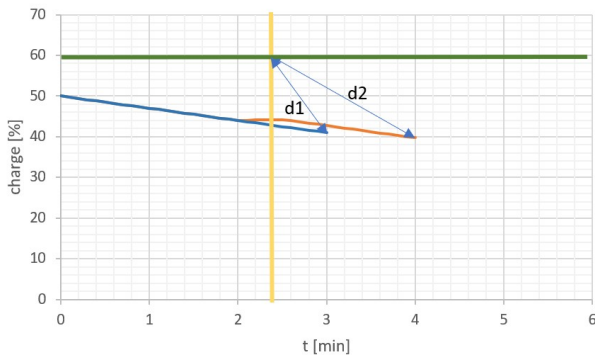
Láthatjuk, hogy a leggyorsabb úton a töltöttségi szint 10,5%-kal esett. A teljes útra iaz, hogy

$$E_B = E_A - 4,6\% = 50\% - 10,5\% = 39,5\%$$

ahol

- E_B : célpontnál a gép töltöttsége
- E_A : kezdőpontnál a gép töltöttsége

Ez a megszabott 40% alatt van. Ezt az utat választva tehát nem marad elég energiánk a későbbi feladatokra. Tehát az IPT utat kell választanunk.



8. ábra: töltöttség az idő függvényében (2 perc 24 másodperces határidő)

Az IPT szakasz beiktatásával az út 4 percig tart. Haladás közben itt percenként 0,5%-ot tölt (pontosabban 3%-ot merül a haladással és 3,5%-ot tölt az IPT úton haladással), ugyanígy akkor is, ha itt várakozik. A kezdeti és a kritikus energiaszint változatlan.

A 6. ábrán látható sárga szakasz az IPT-s út, az újonnan rajzolt piros útvonalon tud legrövidebben visszatérni az iménti leggyorsabb útra.

Az áthúzott szakaszokat most nem érintjük.

A rendszer 0,5 percet halad az IPT vonalon. Mivel rendszerszintű késés nincs, és az eszköz a határidő előtt jár, várakozhat az IPT szakaszon.

A várakozási idő:

$$t_{vár} = t_{hat} \quad t_{haladás} = 5 \text{ min} \quad 4 \text{ min} = 1 \text{ min}$$

ahol t_{hat} : a feladatra adott határidő.

A teljes költség időegységben kifejezve:

$$cost_{AB}(t) = \Delta t_{haladás} + \Delta t_{várakozás} = 4 \text{ min} + 1 \text{ min} = 5 \text{ min}$$

A legrövidebb úton ebben az esetben 2,5 percet töltünk, a haladás pozitív költségteher. Ellenben a várakozás már negatív, hiszen ha úgy szervezzük, hogy az IPT úton várakozunk, és ne a célnál, ott töltés valósul meg.

Energia szempontjából vizsgálva az út költsége töltöttség százalékban :

$$cost_{AB}(E) = \Delta E_{haladás} + \Delta E_{várakozás} + \Delta E_{töltés} = (3,5 * 3) - (1 * 0,5) + (0,5 * 0,5) = 7,75$$

A töltést, bár a saját költségünkön végeztük el, az energiaszintet növelte, így a rendszer energiaesését a

$$\Delta E_{haladás} + \Delta E_{várakozás} - \Delta E_{töltés} = -(3,5 * 3) + (1 * 0,5) + (0,5 * 0,5) = -9,75$$

összefüggéssel számíthatjuk.

Láthatjuk, hogy a leggyorsabb úton a töltöttségi szint 9,75%-kal esett.

$$E_g = E_A - 5\% = 50\% - 9,75\% = 40,25\%$$

Ez a megszabott 40% felett van. Ezt az utat választva tehát marad elég energiánk a későbbi feladatokra. Tehát ezt az IPT utat választhatjuk.

A 8. ábra azt az esetet szemlélteti, ha nem vesszük figyelembe a töltöttségi határt, és mindenképpen a leggyorsabban szeretnénk a feladatot elvégezni.

Az ideális helyzetben akkor lennénk, ha az ideális töltöttségi szinten, pontosan a határidő lejártával végeznénk el a feladatot.

Ezt a helyzetet a 7. és 8. ábrán a zöld és a sárga vonalak metszéspontjánál látjuk. Energiavizsgálatkor azt kell megfigyelni, hogy melyik eredmény van közelebb ehhez a ponthoz.

Itt láthatjuk, hogy a leggyorsabb útnál az IPT-s út kedvezőbb, még akkor is, ha nem vesszük figyelembe, hogy a minimális 40% töltöttségi szintet meg kell tartani. Fentiekben azt az ideális esetet vettük figyelembe, hogy nincs rendszerszintű késés.

Ha azonban ugyanezekkel a paraméterekkel úgy érkezik meg a feladat, hogy 2 perc 36 másodperc a rendszer késedelme, újra meg kell vizsgálnunk a helyzetet.

Arra számítunk, ebben az esetben már a gyorsabb út lesz kedvezőbb, hiszen késésben van a gép. Ebben az esetben egyik gép sem várakozik, és a sürgősség miatt továbbra sem vesszük figyelembe a 40%-os küszöböt.

Itt már a várakozásoknak megfelelően a gyorsabb út a kedvezőbb.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben bemutatunk egy olyan algoritmust, melynek segítségével a töltés és a határidő szempontjából optimalizált utak közül választani lehet, valamint az optimális útvonalat is megadja. A kutatás folytatásaként a módszer lépésein már nem kívánunk módosítani, viszont fel kívánjuk használni különböző topológiák összehasonlítására. A további időszak célkitűzése ugyanis adott feladattípushoz tartozó optimális IPT elrendezés meghatározását jelenti.

4. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk az INEXT – „Kutatások az ipari digitalizáció által nyújtott potenciál minőségi kiaknázására” elnevezésű projekt (projekt azonosítója: ED_18-2018-0006) támogatásával készült.

REFERENCES

- Abreu, Alice & Beynon, Huw & Ramalho, José. (2000). 'The Dream Factory': VW's Modular Production System in Resende, Brazil. *Work Employment and Society - WORK EMPLOY SOC.* 14. 265-282. 10.1177/09500170022118400.
- Grant Covic (2013): *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Modern Trends in Inductive Power Transfer for Transportation Applications, 10.oldal, Institute of Electrical and Electronics Engineers
- Inductive Power Transfer (2012) *IPT®Charge for Electric Vehicles*, 8.oldal, Inductive Power Transfer IPT Technologies. <https://ipt-technology.com/industrial-mobility-power-transfer-becomes-smart/>
- Manu, G. & Kumar M, Vijay & Nagesh, H. & Jagadeesh, D. & Gowtham, M.B.. (2018). Flexible Manufacturing Systems (FMS), A Review. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development.* 8. 323-336. 10.24247/ijmperdapr201836.
- Raj Shah (2020): *Open PR, Wireless Electric Vehicle (EV) Charging Market With Top Companies Bombardier, Elix Wireless, Evatran, Hella KGaA Hueck & Co., Qualcomm, Robert Bosch*, 1.oldal, Worldwide Public Relations, Germany, Berlin
- Pintér M (2019). Induktív töltésű automatizált anyagmozgató rendszer szimulációs modelljének kifejlesztése, 2. fejezet, 3.oldal. *Budapesti Műszaki és gazdaságtudományi Egyetem, Budapest.*
- Rana K. and Zaveri M., "A-star algorithm for energy efficient routing in wireless sensor network," in *Trends in Network and Communications*, ed: Springer, 2011, pp. 232-241.