

Vasúti járművek energiafogyasztásának csökkentése prediktív optimalizáció alkalmazásával

Bécsi Tamás, Aradi Szilárd, Tarnai Géza, Sághi Balázs, Cseh Attila

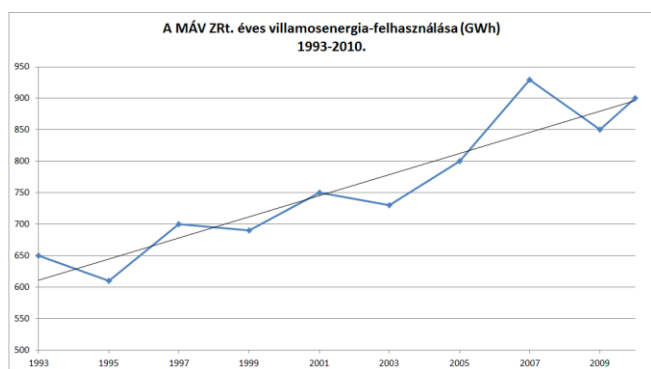
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék
(e-mail: aradi.szilard | becsi.tamas | tarnai.geza | saghi.balazs | cseh.attila @mail.bme.hu)

Absztrakt: Cikkünk a vasúti járművek energiaoptimalizációjának kérdéseivel foglalkozik. A közlekedés energiafogyasztásának kérdése hosszú évek óta folyamatosan napirenden van mind a kutatások, mind pedig a hétköznapiak tekintetében. Írásunkban részletes kitekintést adunk a korábbi kutatásokról és azok eredményeiről. Ezt követően felvázoljuk a vasúti járművek két állomás közötti mozgásának fizikai alapjait, valamint a megoldandó problémát. Végül bemutatunk egy prediktív optimalizációs módszert, amellyel a menetrendi tartalékidőt, valamint a lejtviszonyokat kihasználva szignifikáns energiamegtakarítás érhető el.

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a közlekedés energiafogyasztásának csökkentése folyamatosan napirenden van, egyrészt a széndioxid kibocsátás csökkentésére tett nemzetközi egyezmények, másrészt a folyamatosan növekvő energiaárak miatt. Míg a közúti járművek energiahatékonysági fejlesztését az utóbbi években, elsősorban a folyamatosan szigorodó szén-dioxid kibocsátási előírások motiválják, addig a vasúti közlekedésben az üzemeltetési költségek csökkentése a fő cél, mivel a vontatási költségek jelentős hányadát az energiaköltségek adják.

A MÁV Zrt. közvetlen villamosenergia költsége is évről-évre növekszik, a felhasználáshoz tartozó közvetett költségekkel együtt meghaladja az évi 21 Mrd Ft-ot (2010. évi adat) [12], így láthatóan (1. ábra) minden tervezett és megoldott villamosenergia-megtakarítás 1%-a jelenértékben mintegy 200 millió Ft közvetlen megtakarítást jelenhet.



1. ábra: A MÁV Zrt. éves villamosenergia-felhasználása 1993-2010. (forrás:)

Látható, hogy a motiváció hosszú évek óta adott az energiahatékonyságot növelő fejlesztésekhez. Másrésztől fontos változás a vasúti közlekedésben, hogy egyre több mozdony (vonat) kerül felszerelésre olyan fedélzeti

berendezésekkel, amelyek minden szükséges információval rendelkeznek az energiaoptimalis irányítási funkciók megvalósításához. Ezek egyrészt lehetnek a közlekedésbiztonságot támogató rendszerek, mint például az Egységes Európai Vonatbefolyásoló Rendszer (ERTMS/ETCS), másrészt a vasúti üzemvitelt támogató fedélzeti rendszerek. Ezek a rendszerek sok esetben már most is információval rendelkeznek a pályáról, a sebességkorlátozásokról, a vonat pozíciójáról, sebességéről, vonó- és fékerő karakterisztikákról, továbbá rendelkeznek olyan rádiós interfésszel, amelyen keresztül az ideiglenes sebességkorlátozások és egyéb, operatív közlekedési információk továbbíthatók a vonat felé. Mindezek lehetővé teszik akár egy vezetéstámogató, akár egy automatikus vonatvezetési rendszer kialakítását.

A kutatás célja, olyan optimalizációs eljárások kidolgozása, amelyek egyrészt képesek vezetéstámogató információkat nyújtani a mozdonyvezető számára, másrészt az automatikus vezetés alapjául szolgálhatnak. Fontos szempont továbbá, hogy a kisebb számítási kapacitással rendelkező fedélzeti berendezéseken is futtatható legyen valós időben. A feladatot röviden megfogalmazva, a vonatot A és B állomások között minimális energia felhasználásával, a megadott menetidőn belül (vagy a késés minimalizálásával) kell leközeledtetni, figyelembe véve a korlátozásokat, melyek a következők:

- Vonó- és fékerő korlátozások (a sebesség függvényei).
- Sebességkorlátozások (a pozíció függvényei).
- Horizontális és vertikális pályaprofilból adódó erők (lejtviszonyok és ívsugarak, melyek a pozíció függvényei). Előfordulhatnak olyan mértékű emelkedők, ahol nem lehet kihasználni a maximális vonóerőt.

A cikk 2. fejezetében részletes kitekintést adunk a korábbi kutatásokról, majd a 3. fejezetben felvázoljuk a megoldandó problémát. A 4. fejezet a probléma matematikai

formalizációjával foglalkozik, míg az 5. fejezetben a prediktív optimalizáció alapelveit ismertetjük. Végül ismertetjük a megvalósított algoritmus alapján készült szimulációk eredményeit.

2. KITEKINTÉS

A fellelhető irodalmak legnagyobb része a feladatot egy optimális irányításméleti problémaként formalizálják, ahol a kontrollváltozókat úgy kell meghatározni, hogy a vonat két állomás között a korlátozásokat betartva, a legkevesebb energia felhasználásával leközeledjen. Következésképpen a költségfüggvényünk az energiafogyasztás egy adott utazási idővel számolva, azonban a költségfüggvény több módon is megközelíthető. Egyrészt számolhatunk egy menetrendben megadott idővel, ahol a menetrendi tartalékidő használható fel az energiafogyasztás csökkentésére. Másrészt figyelembe vehetjük az utazás teljes költségét, így a költségfüggvényt az energiafogyasztás és utazási idő súlyozott összege adja.

A vonatkozó kutatások a '60-as években kezdődtek meg elsősorban a volt Szovjetunióban. A főként elméleti megoldásokat tartalmazó publikációk [13] [1] megoldásairól leginkább csak rövid összefoglalókat [7] [4] találni, a teljes publikációkat már nem.

Az első kutatásokban általában sok egyszerűsítéssel találkozunk a modellre vonatkozóan, mint például az ellenállások linearizációja, konstans korlátozások alkalmazása stb. [3] [6] [9] [14]. Közös ezekben a korai munkákban, hogy minden esetben azzal a feltételezéssel éltek, hogy a vonatra ható külső erők függetlenek a pozíciótól, azaz a lejtviszonyok konstansok két állomás között. Azonban könnyen belátható, valamint az esettanulmányok [8] is bizonyítják, hogy a lejtviszonyok kihasználása alapvető fontosságú az energiamegtakarítás szempontjából. Már egyszerűbb mozdonyvezetési technikákat és a pályaismeret felhasználva is szignifikáns megtakarítás érhető el a lejtök kihasználásával.

A lejtviszonyok hatásaival munkássága során sokat foglalkozott Iakov M. Golovitcher először a Szovjetunióban, később az Egyesült Államokban. Egy 2003-as cikkében [7] foglalja össze, mely szerint már a '80-as években megoldást mutatott be változó lejtviszonyokat és sebességkorlátozásokat tartalmazó modell optimalizációjára.

Az energiahatékonyság témakörével egyéb - nagy vasúti múlttal rendelkező - országokban is foglalkoznak (pl. Nagy-Britannia és Svájc), azonban általában komplex - a teljes vasúti közlekedést vizsgáló - tanulmányokat találni, amelyek foglalkoznak az energiahatékony vonatvezetés témakörével [5] [8].

A német kutatások közül fontos megemlíteni a drezdai egyetemen kifejlesztett ENAFlex-S rendszert, amely a már hivatkozott Strobel vezetésével készült. Kutatásaik [15] az elővárosi, ütemes menetrenddel közlekedő "S-Bahn" hálózattal foglalkozik és a járműszintű optimalizáción túl kiterjed a csatlakozások optimalizációjára is.

Végül egy más jellegű megközelítést jelent a kutatások [19] [20] [21] azon csoportja, amelyek beavatkozásként csak a kifuttatás pont eltolását használják fel. Ezek a megoldások metaheurisztikus (általában genetikus) algoritmusokat alkalmaznak a kifuttatás kezdőpontjának meghatározására állomásközi közlekedés esetén. Jellegükből adódóan ezek a megoldások korlátozottan képesek a sebességkorlátozások változásait figyelembe venni.

A magyar vasúti szakemberek és a témában jártas kutatók is régóta foglalkoznak a témával. A középpontban itt is a jármű energioptimális irányítása, valamint a menetrend és a megfelelő vontatójármű kiválasztása áll [22]. Ezen felül magyar sajátosságként sok vizsgálat trágyát képezi a pályák állapotából adódó sűrű sebességkorlátozások (lassújelek) műszaki és gazdasági hatásai [16] [17] [18].

3. PROBLÉMA MEGFOGALMAZÁSA

Ahogy a bevezetőben már röviden összefoglaltuk, a feladat egy vonat két állomás közötti leközeledtetése az energiafogyasztás minimalizálása mellett, a korlátozó feltételek betartásával. A megoldásnak alkalmasnak kell lennie arra, hogy egy vezetéstámogató rendszer algoritmusát képezze, illetve a későbbiekben az automatikus vonatközlekedést (ATO) is támogassa. Ahogy az irodalmi összefoglalóban is kitértünk rá, a korábbi kutatások legnagyobb része egy u kontrollváltozó meghatározását tűzte ki célul oly módon, hogy a vonat maximális vonó- és fékerejét ezzel módosítva a vonat energioptimálisan leközeledjen. Kutatásunk során egy másik fajta megközelítésből indultunk ki, mely szerint szükséges meghatározni a két állomás közötti vonalszakaszra azt a sebességprofil, amelynek betartásával a minimális energiafogyasztás elérhető. Az ilyen módon megközelített probléma a következőképpen formalizálható.

Egy vonatnak A állomástól B állomásig kell közlekednie úgy, hogy az adott, S hosszúságú szakaszra meghatározott T menetidőt betartsa, és a vontatási energiafogyasztás E minimális legyen, figyelembe véve a sebességkorlátozásokat.

A feladat tehát megtalálni azt a $v(s)$, $s \in (0, S)$ sebességfüggvényt, ahol:

$$t(S) = T, \text{ ha} \\ t(0) = 0 \quad (1)$$

$$E_0^S = \int_0^S F_{trac}(s) ds \rightarrow \min$$

ahol $t(s)$ a futás ideje, $F_{trac}(s)$ a vontatásra felhasznált erő.

Emellett a valós körülmények minél részletesebb figyelembe vétele miatt a rendszernek ki kell elégítenie néhány korlátozó feltételt.

Ezen feltételek közül az első, hogy a vonóerő sohasem haladhatja meg a modellezett vontatómozdony fizikai

képességeit, tehát a vonóerő minden esetben a jármű sebességfüggő $F_{trac}^{max}(v)$ vonóerőgörbéje alatt kell, hogy legyen, amelyet a valóságban az adhéziós erő is korlátoz:

$$F_{trac}(s) \leq F_{trac}^{max}(v(s)) = \min(F_{eng}^{max}(v(s)), F_{adh}^{max}(v(s))) \quad (2)$$

A fékerőt tekintve a modell még összetettebb lehet, amennyiben az adott mozdony, valamint a vonatban lévő kocsik fékezési tulajdonságait is számításba szeretnénk venni. Jó közelítést ad a szimulációs szoftverekben is alkalmazott fékezési karakterisztika felvétele, amely adott sebességintervallumokon belül konstans lassulással számol. Ilyen példát mutat be az alábbi egyenlet.

$$a = \begin{cases} -0.6 \text{ m/s}^2, & \text{ha } 0 < v \leq 40 \text{ km/h} \\ -0.5 \text{ m/s}^2, & \text{ha } 40 < v \leq 100 \text{ km/h} \\ -0.4 \text{ m/s}^2, & \text{ha } 100 < v \leq v_{max} \text{ km/h} \end{cases} \quad (3)$$

A menet során a jármű sebessége sohasem haladhatja meg az adott pozícióban érvényes sebességkorlátozást:

$$0 \leq v(s) \leq v_{reg}(s), \quad \forall s \in (0, S) \quad (4)$$

Horizontális és vertikális pályaprofilból adódó erők esetén azzal a feltételezéssel élünk, hogy a pálya minden pontján kihasználható a mozdony vonóerőgörbe által határolt $F_{trac}^{max}(v(s))$ elméleti maximális vonóereje.

Végül korlátozásokat tehetünk a gyorsulásra, illetve lassulásra, melynek szerepe az utaskomfort miatt fontos. Alkalmazása esetén a fenti vonó- és fékerő korlátozást érdemes kibővíteni a további korlátozással.

4. MATEMATIKAI FORMALIZÁCIÓ

A vonat mozgását az alábbi differenciálegyenletekkel írhatjuk le:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= v \\ \dot{v} &= \frac{1}{m} (F_{trac}(v) - F_{brake}(v) - F_{res}(v) - F_{slope}(s)) \end{aligned} \quad (5)$$

ahol

s – pozíció

m – tömeg

$F_{trac}(v)$ – vonóerő

$F_{brake}(v)$ – fékerő

$F_{res}(v)$ – menet-ellenállási erő

$F_{slope}(s)$ – a lejtő ellenállási ereje

Az F_{res} a menet-ellenállási erő általános alakja a sebesség másodfokú polinomfüggvényével írható le:

$$F_{res}(v) = m(\alpha + \beta v + \gamma v^2) \quad (6)$$

Ennek a vasúti energiaszámításokban alkalmazott egyik speciális formája, amikor az elsőfokú tag elhanyagolásra kerül, azaz $\beta = 0$:

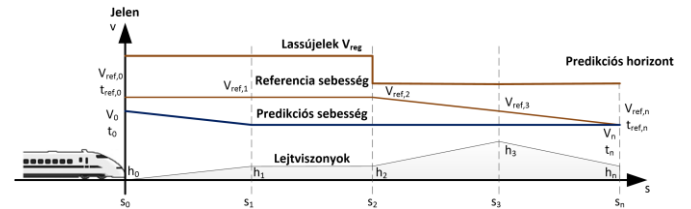
$$F_{res}(v) = m(\alpha + \gamma v^2) \quad (7)$$

Ilyen felépítésű a német szakirodalomban elterjedt Sauthoff-formula, vagy a MÁV Zrt. által használt menetellenállási képletek is.

5. PREDIKTÍV OPTIMALIZÁCIÓ

A kutatás során a lejtők kihasználására fókuszáltunk oly módon, hogy a feltételeztük, hogy létezik egy referenciafutás, amely a sebességkorlátozások által adott maximális sebességek alatt közlekedve minél optimálisabban próbálja kihasználni a menetrendi tartalékidőt.

A lejtők kihasználást a közúti járművek esetén több kutatásban használt [10] [2] [11] prediktív optimalizációs eljárással valósítjuk meg. A prediktív optimalizálási feladat áttekintését a 2. ábra ismerteti.



2. ábra: A prediktív optimalizációs feladat

Az n távolságú predikciós horizonton a térben diskretizált rendszer ekvidisztáns osztással rendelkezik, azaz:

$$\Delta s = s_i - s_{i-1} = \text{const} \quad (8)$$

Minden lépésben ismert a pálya tengerszint feletti magassága. Az adott magasságpontok között a pályát állandó meredekségűnek feltételezzük.

Emellett minden elemi $(i, i+1)$ szakaszra definiált az adott szakaszhoz tartozó sebességkorlátozás. Ismertek ezek mellett a referenciafutáshoz tartozó sebességek és idők. Az optimumkeresési feladat a sebesség- és vonóerőkorlátozások betartása mellett a sebességek $v_i (i = 1..n-1)$ szekvenciájának megtalálása, az alábbi feltételekkel:

$$\begin{aligned} v_n &= v_{ref,n} \\ t_n &= t_{ref,n} \end{aligned} \quad (9)$$

$$E_0^n = \sum_{i=1}^n F_{trac,n} \Delta s \rightarrow \min$$

Tehát a predikció $i=n$ horizontján a referencia sebesség, és az optimumkeresés kimenetként kapott sebesség meg kell, hogy egyezzen. Erre azért van szükség, hogy az esetleges energianyereség ne a mozgási energia elvesztésének árán valósuljon meg. Emellett a predikciós optimumkeresési feladatban is megfogalmazható a teljes útra igaz

optimumkeresési feltétel, mely szerint a v_i szekvenciának az adott idő alatt kell minimális E_0^n energiafelhasználás mellett lefutnia.

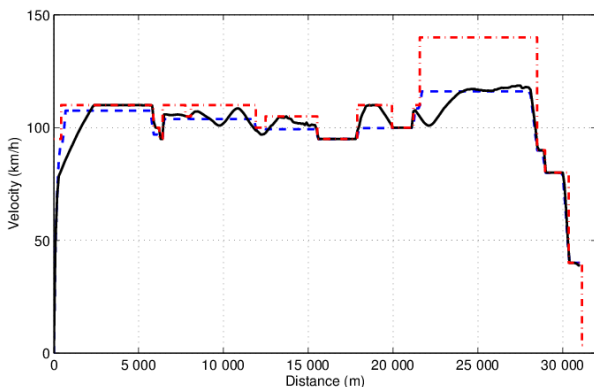
A fenti optimalizációs feltételek nem azonos optimum felé mutatnak, miután a minimális energiafelhasználás általában lassabb haladás mellett érhető el, amivel azonban nem lehet betartani az előírt menetidőt. Azonban előfordulhat, hogy az idő betartása egy adott keresztmetszeten nem lehetséges, így célszerű a korlátozó feltételt az időeltérések minimalizálására átírni, így az optimumkeresési feladat egy többkritériumos feladatként jelentkezik. A két optimumfeltételt célszerű lehet közös célfüggvényben összevonni:

$$f(v_i) = W_E E_0^n + W_t \frac{|t_n - t_{ref,n}|}{t_{ref,n} - t_{ref,0}}, \text{ ahol} \quad (10)$$

$f(v_i)$ a közös optimum célfüggvénye, W_E és W_t az egyes kritériumokhoz tartozó súlyok.

6. SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK

A megvalósított szimuláció során az SBB már hivatkozott esettanulmányában [8] található vonalszakaszt vettük alapul, amely több változó lejtviszonyokat tartalmaz és minden szükséges paraméter ismert, beleértve a pálya, a menetrend és a járműadatokat.



3. ábra: Sebességprofilok az adott szakaszon

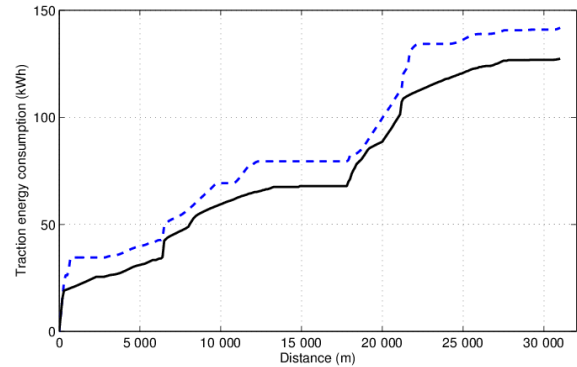
A 3. ábrán látható sebességprofilok az alábbiak:

- piros – sebességhatárzás
- kék – referenciarfutás a menetrendi tartalékidőt kihasználva
- fekete – prediktív optimalizáció a lejtviszonyok kihasználásával.

Látható, hogy az engedélyezett sebességeket nem szükséges teljes mértékben kihasználni a menetrend betartásához. A felesleges gyorsításokat elkerülve kalkulálható egy referenciarfutás, amely már önmagában is energiamegtakarításhoz vezet. E vezetési mód akár oktatással, akár vezetéstartogató rendszer segítségével

történi bevezetése – a hivatkozott SBB tanulmány szerint – önmagában is 5% feletti megtakarítást hozhat.

A 4. ábrán látható a referenciarfutás és a prediktív optimalizáció eredményeként kapott futás energiafelhasználása.



4. ábra: Energiafogyasztások az adott szakaszon

Megállapítható, hogy további kb. 10% fogyasztáscsökkenés érhető el az adott szakaszon a lejtők optimális kihasználásával. Ebben az esetben a sebességprofil közvetlenül nem alkalmas egy vezetéstartogató rendszerben történő felhasználásra, azonban további feldolgozással meghatározhatók a mozdonyvezetőnek adandó információk. Végül egy ilyen sebességprofil felhasználható egy automatikus vonatirányító rendszerben, valamint a mozdonyvezetők oktatásában is.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Cikkünkben részletes kitekintést adtunk a vasúti járművek energiaoptimalis irányításával foglalkozó kutatásokról. Bemutattuk a probléma fizikai alapjait és matematikai formalizációját. Felvázoltunk egy kétszintű optimalizációs lehetőséget, mellyel a menetrendi tartalékidőt és a lejtviszonyokat kihasználva energiamegtakarítás érhető el.

Az szimulációs eredmények jól mutatják, hogy szignifikáns fogyasztáscsökkenés érhető el, amely jelentős megtakarítást jelenthet a vasúttársaságoknak. A következőkben ki kell fejleszteni a menetrendi tartalékidőt kihasználó referenciarfutás optimalizálásának eljárását is. Módszerünk így továbbfejlesztve alkalmas lehet fedélzeti vezetéstartogató, automatikus vonatirányító és oktatást támogató rendszerekben történő felhasználásra.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

„TÁMOP-4.2.2.C-11/1/KONV-2012-0012: „Smarter Transport” - Kooperatív közlekedési rendszerek infokommunikációs támogatása - A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.”

„TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0012: Hibrid és elektromos járművek fejlesztését megalapozó kutatások - A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.”

HIVATKOZÁSOK

- [1] E. Erofeyev, "Calculation of optimum train control using dynamic programming method," *Proceedings of Moscow Railway Engineering Institute (Trudy MIIT)*, no. 811, pp. 16–30, 1967.
- [2] E. Hellstrom, M. Ivarsson, J. Aslund, and L. Nielsen, "Look-ahead control for heavy trucks to minimize trip time and fuel consumption," *Control Engineering Practice*, vol. 17, no. 2, pp. 245–254, 2009.
- [3] K. Ishikawa, "Application of optimization theory for bounded state variable problems to the operation of trains," *Bulletino of JSME Nagoya University*, vol. 11, no. 47, pp. 857–865, 1968.
- [4] L. Ke-Ping, G. Zi-You, and M. Bao-Hua, "Energy-optimal control model for train movements," *Chinese Physics*, vol. 16, no. 2, pp. 359–364, 2007.
- [5] S. Kent, "Driver advisory information for energy management and regulation, STAGE 1, TECHNICAL REPORT," *Rail Safety and Standards Board Ltd.*, 2009.
- [6] P. Kokotovic and G. Singh, "Minimum-energy control of a traction motor," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 17, no. 1, pp. 92–95, 1972.
- [7] R. R. Liu and I. M. Golovitcher, "Energy-efficient operation of rail vehicles," *Transportation Research Part A*, no. 37, pp. 917–932, 2003.
- [8] M. Meyer, S. Menth, and M. Lerjen, "Potentialermittlung energieeffizienz traktion bei den SBB, TECHNICAL REPORT," *Emkamatik GmbH.*, 2007.
- [9] I. Milroy, *Minimum-energy control of rail vehicles*. South Australian Institute of Technology, 1981.
- [10] B. Nemeth and P. Gaspar, "Lpv-based control design of vehicle platoon considering road inclinations," in *Proceedings of the 18th IFAC World Congress*, vol. 18, no. 1, 2011, pp. 3837–3842.
- [11] B. Passenberg, Kock, and O. Stursberg, "Combined time and fuel optimal driving of trucks based on a hybrid model," in *Proceedings of the European Control Conference*, 2009.
- [12] O. Pálmai and I. Bodnár, "A MÁV felsővezeteki rendszerén létrejövő veszteség keletkezése és számítása," *Vezetékek Világa*, vol. XVI, no. 4, 2011.
- [13] V. Sidelnikov, "Computation of optimal controls of a railroad locomotive," *Proceedings of State Railway Research Institute*, vol. 2, pp. 52–58, 1965.
- [14] H. Strobel and P. Horn, "On energy-optimum control of train movement with phase constraints," *Electric, Informatics and Energy Technique Journal*, vol. 6, pp. 304–308, 1973.
- [15] H. Strobel and S. Oettich, "DIE FLEXIBLE S-BAHN: energiesparende und anschlussoptimierende flexibilisierung der fahrweisen und fahrzeiten - das neuartige fahrerassistenzsysteme ENAFLEX-S, TECHNICAL REPORT," *Technische Universität Dresden*, 2005.
- [16] B. Tóth and K. Kovács, "Menetrendben nem tervezett kényszerű lassítások, rendkívüli megállások vontatásenergetikai és jármű karbantartási következményei a vasúti vontatásban," *Vasútgépészet*, no. 3, pp. 41–44, 2011.
- [17] —, "Menetrendben nem tervezett kényszerű lassítások, rendkívüli megállások vontatásenergetikai és jármű karbantartási következményei a vasúti vontatásban (2. rész)," *Vasútgépészet*, no. 4, pp. 29–36, 2011.
- [18] —, "Menetrendben nem tervezett kényszerű lassítások, rendkívüli megállások vontatásenergetikai és jármű karbantartási következményei a vasúti vontatásban (3. rész)," *Vasútgépészet*, no. 1, pp. 29–34, 2012.
- [19] K. Wong and T. Ho, "Coast control of train movement with genetic algorithm," in *Evolutionary Computation, 2003. CEC '03*, vol. 2, 2003, pp. 1280–1287.
- [20] —, "Coast control for mass rapid transit railways with searching methods," *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 151, no. 3, pp. 365–376, 2004.
- [21] —, "Dynamic coast control of train movement with genetic algorithm," *International Journal of Systems Science*, vol. 35, no. 13-14, pp. 835–846, 2004.
- [22] I. Zobory, "A vasúti közlekedés energetikai optimalizálásának három fő feladata," *Vasútgépészet*, no. 2, pp. 25–27, 2010.