



PROF. DR. ZOBORY ISTVÁN

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
 Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
 Vasúti Járművek és Járműrendszeranalízis Szakcsoport
 H-1521 Budapest

A vontatási energetika első főfeladatának megoldása

Összefoglaló

A jelen tanulmány bemutatja a vontatási energetika I. főfeladatának megoldását. Ez a feladat az adott vonattovábbítási feladathoz energetikailag legkedvezőbb vontatójármű hozzárendelését fogalmazza meg. A végigvitt gondolatmenet motorvonatok esetében is helytálló. A tárgyalásban bemutatjuk, hogy miképp lehet a versenyre bocsátott (konkurrens) vontatójármű típusok vonóerő karakterisztikái és kimenő teljesítmény jellegfelületei ismeretében, valamint az adott vonalon adott műszaki jellemzőjű járművekből összeállított vonat tervezett menete során meghatározni a menethez tartozó teljesítményszükségletet és a kialakuló (realizált) terhelésszállapot eloszlásfüggvényt. Kimutattuk, hogy ez az realizált terhelésszállapot eloszlásfüggvény a versengő vontatójármű típusok közül melyik esetében fekszik legközelebb az illető vontatójárműre nézve a legkedvezőbb energiahasznosítást biztosító „optimális terhelésszállapot-eloszláshoz”. A vontatójármű adott vontatási feladathoz rendelése a kidolgozott algoritmus alapján készült programmal minden nehézség nélkül végrehajtható. Természetesen a tervezett vonatmenettel kapcsolatos számítások elvégzéséhez rendelkezésre kell állnia számos, a pályára és a járművekre vonatkozó műszaki jellemzőnek.

PROF. DR. ISTVÁN ZOBORY
 Dipl.-Ing. für Verkehrstechnik
 Dipl. Angewandter Mathematiker
 DSc der Ungarischen Akademie der Wissenschaften (MTA)

Technische und Wirtschaftswissenschaftliche
 Universität Budapest
 Fakultät für Verkehrs- und Fahrzeugingenieurwesen
 Group für Schienenfahrzeuge und Fahrzeugsystem
 analyse

Lösung der ersten Hauptaufgabe der Zugförderungsenergetik

Kurzfassung:

Die vorliegende Studie gibt die Lösung für die I. Hauptaufgabe der Zugförderungsenergetik an. Diese Aufgabe beinhaltet die Zuordnung des energetisch günstigsten Triebfahrzeugs zu der gegebenen Zugförderungsufgabe. Der verfolgte Gedankengang trifft auch auf/für Triebzüge zu. Es wird gezeigt, wie man in Kenntnis der Zugkraft-Kennlinien und der Ausgangsleistung-Flächen der zu bewertenden (miteinander konkurrierenden) Triebfahrzeugtype, sowie während der geplanten Fahrt auf einer vorgegebenen Strecke des aus Fahrzeugen gegebener technischer Parameter zusammengestellten Zuges die der Fahrt zugeordnete Leistungsbedarf, und die sich ergebende (realisierte) Belastungszustand-Verteilungsfunktion ermittelt werden können. Es wird gezeigt, wonach diese realisierte Belastungszustand-Verteilungsfunktion bei welchem der verglichenen (miteinander konkurrierenden) Triebfahrzeugtype am besten der die höchste Energieeffizienz gewährenden „optimale Belastungszustand-Verteilung“ – bezogen auf das betroffene Triebfahrzeug - nahekommt. Die Zuordnung des Triebfahrzeugs zu der gegebenen Zugförderungsufgabe ist unter Heranziehen eines nach einem Algorithmus erstellten Programms ohne jegliche Schwierigkeiten durchführbar. Natürlich müssen für die in Verbindung mit der geplanten Zugfahrt durchzuführenden Berechnungen viele technischen Parameter über die Strecke und die Fahrzeuge vorliegen.

PROF. DR. ISTVÁN ZOBORY
 MSc in Transportation Engineering
 MSc In Applied Mathematics
 Doctor of the Hungarian Academy of Sciences (MTA)

Budapest University of Technology and Economics
 Faculty of Transportation and Vehicle Engineering
 Group of Railway Vehicles and Vehicle System
 Analysis

The Solution of the 1st Main Task of Traction Energetics

Summary:

The present study demonstrates the solution for the 1st main task of the traction energetics. This task draws up the energetically optimum assignment of the traction unit to a given traction duty. The train of thoughts, as followed in case of the traction units, is right also for the multiple units. In the discussion, we perform how to define the necessary demand of power and the realised load conditions as the traction characteristics' distribution function of the competing traction unit types running on the examined line and hauling a determined train composition. We demonstrated that, which of the examined competing traction units meet the optimum of the realised load condition distribution function the best. The traction units' assignment to the given traction duty can be computed by the software of the elaborated algorithm, without any difficulties. Of course, it is necessary to know the parameters related to the infrastructure and the rolling stock.

A vonattovábbítás költségei között jelentős hányaddal szerepelnek az energiaköltségek. Valamely vontatójármű teljes élettartam költségében (LCC= Life Cycle Costs) kb. 30...35 %-os súllyal szerepelnek a vontatás megvalósítása során elfogyasztott energiával kapcsolatos költségek (villamosenergia költség vagy gázolajköltség). A vasúttársaságok természetes törekvése ezért olyan vontatójárművek beszerzése és üzemeltetése, melyek hatásfoka és névleges teljesítménydotációja lehetővé teszi az energia-

takarékos vonattovábbítás megvalósítását. A vontatójárművek alapvető konstrukciós jellemzője az energiaátviteli hatásfok, mely ismert módon a jármű V sebességétől és a kifejtett F_v vonóerőtől függő kétváltozós függvényvel adható meg. Ismeretes, hogy a nagyobb névleges teljesítményű járművekkel megvalósított vonattovábbítás kisebb energiaköltséggel jár, mivel az intenzív gyorsítás rövidebb idő alatt vezet el a kívánt haladási sebességhez, és a megállító fékezések előtt jelentős hosszúságú (esetleg 2 km-es) vonóerő-

mentes – és így vontatási energiafogyasztás-mentes kifuttatás realizálható az előírt menetrend betartásának megvalósulása mellett is. A jelen tanulmány a vontatási energetika I. főfeladatának megoldásával foglalkozik, amely adott tervezett vonatmenet-höz (adott vonal, adott megálló- és állomásközpök, előírt menetsebesség, megadott indítási- és fékezési gyorsulások, a megállító fékezések előtti kifuttatási hosszak és az előbbiekhöz kapcsolódóan kiadódó tiszta menetidő) mellett keresi a rendelkezésre álló vontató-

jármű fajták közül azt, amellyel a tervezett vonatmenet a legkedvezőbb energiahasznosítással valósítható meg. A jelzett feladat megoldásához a vonatvábbítás dinamikájában és energetikájában ismert alapelveket összekapcsoljuk a vontatójárművek hatásfokfüggvényében lévő információval, és a tervezett vonatmenet során kialakuló „megkívánt terhelésállapot-eloszlást” vetjük össze a rendelkezésre álló vontatójármű fajtákhoz a saját hatásfokfüggvényük és a tervezett vonatmenet során szükséges vonóerőeloszlás figyelembevételével az egyes vontatójárműfajták legkedvezőbb energiahasznosításához tartozó terhelésállapot-eloszlásokkal. Mármint azon vontatójárművet célszerű hozzárendelni a tervezett vonatmenethez, amelyre a vonatmenethez megkívánt terhelésállapot-eloszlás a legközelebb fekszik a vontatójármű legkedvezőbb energiahasznosítását megvalósítani képes terhelésállapot-eloszláshoz. A feladatmegoldás során számítógépes szoftverek alkalmazása szükséges, melyek részben vontatási mechanikai és energetikai, részben pedig többváltozós szélsőérték-feladatok numerikus megoldásához szükségesek.

Kulcsszavak: járműdinamika, járműenergetika, vonatvábbítás, szélsőérték-feladat, lineáris programozás, numerikus optimalás

1. Bevezetés

A vasúti közlekedés alapja a menetrend. A vonatot adott emelkedési és görbületi viszonyokkal bíró vasúti pályán kell továbbítani az állomásközlőként ill. megállóhelyközönlőként a pályára előírt sebességkorlátok betartása mellett. A vonat megindításai, ill. megállításai során megvalósítható gyorsulásértékek előírhatók ugyan, de egy ilyen előírásnál már figyelembe kell venni a vonó- és fékezőerő kifejtési viszonyokat, elsődlegesen a maximális megvalósítható vonóerőt és fékezőerőt, ill. a legnagyobb kifejthető vontatási és fékezési teljesítmény értéket. Mindez azt jelenti, hogy a vonatvábbítás előírható pusztán mozgástani feltételei is bizonyos kapcsolatban (függőségben) állnak az alkalmazásra

szóba kerülő vontatójármű műszaki paramétereivel. Valamely vontatójármű esetén a vontatási feladat ellátása során megvalósuló energiahasznosítási viszonyokat alapvetően a realizálható sebesség-vonóerő értékpárok, valamint a vonóerőtől és a sebességtől függő hatásfokfüggvény specifikálja. Természetesen bizonyos további adatok is szükségesek a kielégítő folyamat-leíráshoz, hiszen ismerni kell a vontatójármű és a mozgatni tervezett kocsisor tömegét és a forgó tömegeket jellemző arányszámokat mint a mozdonyra mind a kocsisorra, továbbá a vontatójármű és a kocsisor sebesség függvényében másodfokú polinommal megadott alapellenállás-erő függvény együtthatóit. A vonatvábbítás során befutandó vasúti pálya jellemzése a pályaihossz függvényében megadott emelkedési iránytényező és görbület függvényel történik. Ezen adatok birtokában az adott vonalon az adott vonóerőgörbével és hatásfokfüggvényel bíró mozdonyal megvalósuló vonatmozgás sebesség $= f(\text{befutott úthossz})$ menetábrája és ehhez szükséges vonóerőmunka-bevezetés meghatározható a vonatmozgás differenciálegyenletének numerikus megoldásával, illetve a kialakult menetábra, az ismert vonóerőgörbe és a hatásfokfüggvény adta információra támaszkodó utófeldolgozással. A most említett szimulációs eljárással elvileg lehetőség nyílik a rendelkezésre álló vontatójárművek mindegyikével az adott vonatterhelés és pályaviszonyok mellett „leszimulálni” a vonatvábbítás energiafelhasználási folyamatát és a szimuláció eredményeképpen kiválasztani a legkisebb energiafelhasználást biztosító vontatójármű típust és ezt a típust hozzárendelni az adott vonat továbbítására. A vonóerőkifejtés természetesen nem csak mozdonyos vontatással, hanem motorvonat esetében is megvalósul. A következőkben amikor vontatójárművet említünk, akkor az ottani állítások a motorvonatokra is érvényesek. A jelen tanulmányban általánosabb keretekben vizsgáljuk az energetikai szempontból kedvező vontatójármű hozzárendelését a vonatvábbítási feladathoz. A terve-

zett vonatmenet menetábrájához első lépésben meghatározásra kerül a szükséges vonóerő ábra, mint a befutott pályahossz függvénye, és kiértékelhető az összetartozó sebesség-vonóerő párok előfordulásának relatív gyakorisága, ill. az ezekre támaszkodva kiadódó sebességtől és a kifejtett vonóerőtől függő kétváltozós terhelésállapot-eloszlásfüggvény. Második lépésben a tervezett vonatmenethez tartozó adatokra és az egyes szóba jött vontatójármű típusokra jellemző hatásfokfüggvények ismeretében minden egyes típushoz alkalmas feltételes szélsőérték-keresési eljárással meghatározásra kerül az a menetsebességtől és a kifejtett vonóerőtől függő kétváltozós terhelésállapot eloszlás, amelynek érvényesülése esetén az illető vontatójármű típus a szerkezeti felépítéséből következően a lehető legkedvezőbb energiahasznosítást mutatja. A hozzárendelési feladat megoldását azon vontatójármű típus kiválasztása jelenti, amelynek saját legkedvezőbb energiahasznosítást adó terhelésállapot-eloszlásfüggvénye a legközelebb esik a legkisebb négyzetes eltérések értelmében a vonatvábbítási feladat során megvalósítani szükséges terhelésállapot-eloszlásfüggvényhez.

2. A tervezett vonatmenet jellemzése

Az L össz-hosszúságú vonalra nézve az egyes állomásközlők alkotta L_1, L_2, \dots, L_n távolságsorozat ismertnek vehető, ahol

$$L = \sum_{i=1}^n L_i$$

A tervezett vonatmenet egyik alapadata a teljes vonal befutásának tiszta menetideje. Ez az időérték összetevődik az egyes állomásközlők befutásához szükséges tiszta részmenetidőkből, azok egyszerű összegeként. Ha t_1, t_2, \dots, t_n jelöli az egyes állomásközlők befutásához tartozó tiszta részmenetidőket, akkor a tervezett tiszta teljes menetidő:

$$T = \sum_{i=1}^n t_i$$

Jelölje az egyes állomásközökre vonatkozóan megkívánt menetábrákat (sebességprofilokat) a pályáivhossz függvényében meghatározott $v_1(s), v_2(s), \dots, v_n(s)$ függvényrendszer. Az itt szereplő minden egyes függvény tartóintervalluma (amelynek csak a végpontjaiban tűnik el, különben pozitív értéket vesz fel) az adott indexű állomásköz intervallum. Valamely sebességprofil saját tartóintervallumán kívül azonosan zérus értéket vesz fel. Ezen előkészület után számíthatóak az egyes állomásközök befutásához tartozó időtartamok a

$$t_1 = \int_{l_1} \frac{ds}{v_1(s)}, t_2 = \int_{l_2} \frac{ds}{v_2(s)}, \dots, \\ t_n = \int_{l_n} \frac{ds}{v_n(s)}$$

integrálok kiszámításával.

Így az megadott sebességprofil kívánalomhoz kiadódnak az egyes állomásköz-befutási idők, és összegezve ezeket a T teljes tiszta menetidő kiadódik. A vizsgálat ezen pontján mód nyílik a T idő kívánalom szerinti módosítására, mivel a közlekedési szolgáltatás fejlesztése természetesen igényli a tiszta menetidő lehetőség szerint minimumra csökkentését.

A részmenetidőket megadó integrálkifejezésekből világos, hogy a sebességprofilok konkrét módosításával érhető el a részmenetidők csökkentése. Ez a menetciklusok során megvalósuló sebesség-értékek növelésével történhet, ami egyrészt a ciklusra megengedett maximális sebesség növelését, másrészt az indítási és fékezési gyorsulások intenzívebbé tételét kívánja. Az állomásközönként megvalósítandó sebességprofilok közelítéssel való meghatározása alapesetben az állandó indítási és fékezési gyorsulásérték felvételével, az állandó sebességszint megválasztásával és a fékezés megkezdése előtti kifuttatás hosszának megadásával történhet. Az ilyen sebességprofil specifikáció a későbbi konkrét vonattovábbítást végző vontatójárművek tulajdonságaitól függetlennek tűnik. Mindjárt látszik

azonban, hogy az ilyen „független” sebességprofil megválasztás mozgásteret szűkítendő, mivel a vonattovábbításhoz szóba jöhető vontatójárművek által kerékperdülés-mentesen kifejthető legnagyobb vonóerő és a hajtó gépezet beépített névleges teljesítménye egyaránt korlátos. A kifejthető vonóerő korlátja felülről behatárolja a vonat legnagyobb tekintetbe vehető indítási gyorsulását, a beépített névleges teljesítmény rögzített értéke miatt az ezen teljesítménykorlát belépéséhez tartozó ún. „átmeneti sebesség” felett a kezdeti gyorsítási szakaszban érvényesülő állandó gyorsulás értéke már nem tartható fenn. Ily módon az adott tömegű és forgótömeg-tényezőjű vonat továbbításához elvileg rendelkezésre álló vontatójárművek vonóerőgörbéinek sajátosságai már befolyásolják a tervezhető sebességprofilok alakulását. Hasonlóképp befolyással bír a vonat alapellenállás-erejének alakulása, mely alapellenállás-erőt másodfokú parabola írja le a sebesség függvényében. Elektrodinamikus visszatápláló fékezés megvalósításakor hasonló probléma lép fel a fékezési folyamatszakasz sebességprofiljával kapcsolatosan, tehát az ekkor érvényesülő átmeneti sebesség és a névleges fékezési teljesítmény itt is mértékadó lehet. A fékezési sebességprofil esetén azonban az állandó fékezési lassulás értéke ilyen esetben is megvalósítható a járművön mindig jelenlévő légfék megfelelő alkalmazásával, amellyel a szükséges mértékű kiegészítő fékezőerő kifejthető, és így a közelítőleg állandó fékezési lassulás a vonat teljes megállítási folyamata során fenntartható. Rátérünk az állomásközi sebességprofil konkrét esetben való meghatározásának tárgyalására. A következőkben elegendő egyetlen állomásköz esetre vizsgálni a viszonyokat, majd a nyert összefüggéseket az egymás után következő állomásközökre sorozatosan alkalmazva adódik a feladat teljes megoldása.

A sebességprofil adott állomásközre érvényes $v(s)$ függvényének a gyorsítási szakaszt leíró része két függvény-szakasz folytonos kapcsolódásával áll elő.

Legyen s_0 a vizsgált sebességciklus tartóintervallumának alsó végpontja. Legyen a kerék/sín kapcsolatban biztonságosan (perdülésmentesen) átvihető vonóerő F_0 , a vontatójármű sajátosságként rögzített átmeneti sebesség v_0 , és legyen a vontatójármű névleges teljesítménye P_0 . Tegyük fel, hogy a vonat teljes m tömege és eredő γ forgótömeg jellemzője is adott. A sebességprofil kezdő szakasza ezen feltételek mellett konstans $a_g > 0$ gyorsulású mozgást ír le, melynek függvényvonala az s_0 pontban induló gyökös másodfokú parabola lesz. Ennek a parabolának az egyenlete a következő kifejezéssel meghatározott:

$$v(s) = \sqrt{2a_g(s - s_0)}; \text{ ha } s_0 \leq s \leq s_1$$

ahol s_1 a v_0 átmeneti sebesség eléréséhez tartozó pályahossz:

$$s_1 = s_0 + v_0^2/2a_g.$$

Az átmeneti sebesség meghaladása után a névleges teljesítmény állandó értéke melletti négyzetgyökös sebességváltozás tovább már nem állandó, hanem csökkenő gyorsulású, azonban továbbra is növekvő sebességű (pozitív gyorsulású) mozgás alakul ki. Ezen függvényszakasz származtatásához vegyük tekintetbe, hogy a vonatra ható eredő erő az állandó névleges teljesítménykifejtéshez tartozó, a sebesség függvényében hiperbola mentén csökkenő F_v vonóerő és a vele szembe dolgozó, a sebességtől $F_{ea} = a v^2 + c$ közelítő alakban négyzetesen függő alapellenállás-erő összegéből adódik. Sík egyenes pályát feltételezve a vonat mozgásegyenlete (Newton 2. törvénye szerint) most a következő alakot nyeri:

$$m(1 + \gamma) \frac{dv}{dt} = F_v - F_{ea} = \\ = \frac{P_0}{v} - (av^2 + c).$$

Figyelembe véve, hogy

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{ds} \frac{ds}{dt} = \frac{dv}{ds} v,$$

adódik az

$$m(1 + \gamma) \frac{dv}{ds} v = \frac{P_0}{v} - (av^2 + c),$$

majd rendezve a

$$\frac{dv}{ds} = \frac{1}{m(1 + \gamma)} \left[\frac{P_0}{v^2} - \left(av + \frac{c}{v} \right) \right] = f(v)$$

elsőrendű nemlineáris autonóm differenciálegyenlet adódik. Ezt a differenciálegyenletet az $s=s_1$ pályahossznál a $v=v_0$ kezdeti feltétellel numerikusan megoldva adódik a keresett

$$v = v(s) ; s \geq s_1$$

sebességfelfutási profil. Ha a menetellenállást közelítéssel élve konstansnak tekintenénk, akkor a sebességfelfutási függvényprofilnak az állandó gyorsulású gyökös másodfokú parabolához csatlakozó második szakasza zárt alakban adódó gyökös harmadfokú parabolaként nyerhető. Ez utóbbi esetben azonban a maximális sebességre történő felfutási idő mintegy 10%-kal kisebb lesz a reálisnál, tehát ez a közelítés nem ad megfelelő eredményt. A levezetett differenciálegyenletre vonatkozó kezdeti érték feladat megoldását a numerikus megoldás lépésközével meghatározott időpontosorozaton ismertnek lehet tekinteni a következő vizsgálatok során, így a sebességfelfutási szakaszra az s_0 pontból zérus sebességről induló $v_1(s)$ függvény $s \geq s_0$ ívhossz értékekre meghatározott.

A sebességciklus konstrukciójának második lépéseként kijelölendő a ciklus v_{max} legnagyobb megengedett sebessége. Ennek ismeretében a korábbiakban meghatározott $v_1(s)$ függvényprofil alapján kiadódik azon s_2 ívhossz érték, ahol fennáll a $v_{max} = v_1(s_2)$ egyenlőség. Ezen s_2 -től jobbra a $v_2(s) = v_{max}$ konstans sebességfüggvény lesz érvényes azon $s = s_3$ ívhosszig, amelynél bekövetkezik a vonóerőbevezetés megszüntetése (vasúti szaknyelven: bekövetkezik a „lezárás”) és megkezdődik a csupán az alapellenálláserő mozgást akadályozni kívánó hatása melletti szabad kifutás

üzemállapota. A vizsgálat ezen pontján tehát a pályaelenállásokat (emelkedési és görbületi ellenállás) egyelőre figyelmen kívül hagyjuk. A kifuttatás során kialakuló sebességcsökkenés számbavételek első lépésben azon közelítéssel lehet élni, hogy az alapellenálláserő értéke közelítőleg a v_{max} sebesség mellett adódó értékkel egyenlő, azaz

$$F_{ea}^* = a v_{max}^2 + c.$$

A vonóerőkifejtés-mentes kifuttatási üzemállapot közelítőleg konstans lassulását az

$$a_k \approx -F_{ea}^* / m(1 + \gamma)$$

képlet szolgáltatja. Mármint a kifuttatás kezdetét jelző s_3 pályaivhossz érték alapján a kifuttatás során érvényesülő közelítő sebességprofil egyenlete már felírható. A közelítőleg állandó lassulású kifutás esetében azon s_k pályaivhossz, ahol az állandó lassulással kifutó vonat megállna az az $s_k = s_3 - v_{max}^2 / (2a_k)$ képlet szerint adódik. Figyelembe véve az a_k negatív előjelét, különösebb magyarázat nélkül felírható a kifutás esetében négyzetgyökös parabolával meghatározott $v_3(s)$ sebességprofil az $s \leq s_3$ ívhosszakra:

$$v_3(s) = \sqrt{2a_k(s - s_k)} = \sqrt{2a_k(s - [s_3 - v_{max}^2 / (2a_k)])}$$

A menetciklus sebességfüggvényének negyedik szakasza a megadott állandó $a_f < 0$ lassulású fékezési szakasz. Itt feltételezzük, hogy a vonat fékberendezése által megvalósított fékezési teljesítményelvonás mindig biztosítja a konstans fékezési lassulás kialakulását. Ez tisztán pneumatikusan fékezett vonatnál teljesül, elektrodinamikusan fékezett vonatnál pedig (pl. villamos motorvonat) a nagyobb sebességeken megfelelő pneumatikus fékrásegítéssel érhető el. A konstans lassulású fékezés $v_4(s)$ másodfokú gyökös parabola-függvénye az L állomástávolsággal meghatározott $s_4 = s_0 + L$ ívhossznál éri el a zérus értéket. Ezek figyelembevételével a fékezési sebességprofil egyenlete az $s \leq s_4$ ívhosszakra:

$$v_4(s) = \sqrt{2a_f(s - s_4)}$$

A fentiekben meghatározott $v_1(s)$, $v_2(s)$, $v_3(s)$ és $v_4(s)$ nemnegatív sebességfüggvények ismeretében az L állomástávolság fölötti teljes sebességfelfutás (maga a menetábra) egyszerűen megadható az $s_0 \leq s \leq s_0 + L$ ívhossz értékekre:

$$v(s) = \min_{s \in [s_0, s_0 + L]} \{v_1(s), v_2(s), v_3(s), v_4(s)\}$$

A most kapott összefüggés lehetőségét ad az állomásközi kívánt menetábra sebességfüggvényének a meghatározására, a következő 10 paraméterként szereplő mennyiség megválasztása mellett: $s_0, s_3, L, a_g, a_f, v_{max}, v_0, P_0, a, c$. A szereplő paraméterek közül csupán az s_3 paraméter olyan, amely a vonat vezetésének konkrét alakulásától függ. Értékét elvi alapon korlátozza a sebességfelfutás befejeződéséhez tartozó s_2 ívhossz és a megállító fékezés szükségyszerű megkezdéséhez tartozó $s_f = s_0 + L - v_{max}^2 / (2|a_f|)$ ívhossz-koordináta, azaz érvényesülnie kell az $s_2 \leq s \leq s_f$ korlátozó feltételnek.

Tekintettel arra, hogy a gyakorlati vonatüzem tervezéséhez célszerűbb a kifuttatás s_k hosszát megadni paraméterként, az s_3 értéket ezen kifuttatási ívhosszal célszerű kifejezni. Ez a tárgyalásmód szükségessé teszi a fékparabola és a kifuttatási parabola metszésponti abszcisszájának meghatározását a

$$\sqrt{2a_k(s - [s_3 - v_{max}^2 / (2a_k)])} = \sqrt{2a_f(s - s_4)}$$

egyenlet megoldásával. Mindkét oldal négyzetre emelése és rendezés után a metszésponti s_m ívhossz-abszcissza

$$s_m = -\frac{1}{(a_f - a_k)} [s_3 - v_{max}^2 / (2a_k)] + \frac{a_f}{(a_f - a_k)} s_4$$

alakban írható fel.

Figyelembe véve, hogy másrészt definíció szerint $s_m = s_3 + s_k$, továbbá, hogy $s_4 = s_0 + L$, adódik az s_k kifuttatási hossz és a kifutás megkezdéséhez

tartozó s_3 ívhosszkoordináta

$$s_3 = \frac{(a_f - a_k)}{1 - (a_f - a_k)} s_k - \frac{v_{\max}^2 / (2a_k) + a_f(s_0 + L)}{1 - (a_f - a_k)} = As_k - B$$

lineáris függvénykapcsolata. Normális esetben $a_f \ll a_k$, ezért a szereplő A együttható negatív, amiből leolvasható, hogy a kifuttatási hossz növekedése a kifuttatás kezdetéhez tartozó pályapont ívhossz-koordinátájának csökkenésével jár együtt, ami egybevág a várakozásunkkal. A most elmondottak megadják az alapját annak, hogy a gyakorlati számításoknál a tekintett mozgásciklus sebességfüggvénye az $s_0, s_k, L, a_g, a_f, v_{\max}, v_0, P_0, a, c$ paraméterekkel jellemezhető. Tekintettel arra, hogy a vizsgált mozgásciklus sebességfüggvényének szakaszai ismertek, a sebességfüggvény megvalósításához biztosítandó gyorsítóerő pályaiív hossz menti vagy időbeli lefutása meghatározható. Fennáll ugyanis a

$$\frac{dv(t)}{dt} = \frac{dv(s)}{ds} \frac{ds}{dt} = \frac{dv(s)}{ds} v$$

összefüggés, tehát a mozgásciklus tetszőleges pontjában (bármely s pályaiív hosszhoz tartozóan) meghatározható az ott kifejtetni szükséges F_g gyorsító erő értéke az

$$F_g(s) = m(1 + \gamma)a(s)$$

képlettel.

Tekintettel arra, hogy a vonatmozgás során a gépezet által kifejtendő F_v vonóerőt fenti képlet alapján adódó nemnegatív gyorsítóerőkön kívül az alapellenálláserők és a pálya emelkedési és irányviszonyaival meghatározott járulékos menetellenálláserők (emelkedési- és görbületi ellenálláserők) lényegesen modulálják, ezen utóbbi erőket is számítani kell a vizsgált mozgásciklus L hosszát befutó pontsorozaton. Az alapellenálláserő a kívánt sebességprofil ismeretében számítható, a pályaellenálláserőket pedig a vizsgált vonalszakaszra meg kell adni az emelkedési iránytangens függvény

és a pályagörbület függvény lineáris interpolációval való származtatására alkalmas ívhossz/emelkedő és ívhossz/görbület pontpárok koordinátasorozatával. Képletszerű meghatározást az alábbiak szerint lehet megadni:

$$F_v(s) = \max\{0, m(1 + \gamma)a(s)\} + (av^2 + c) + \max\{0, mge(s)\} + mgH[G(s)]$$

A fenti képletben szereplő két maximum-operátor jelenlétét a gépezeti vonóerőszükséglet gyorsítással kapcsolatos erőreszének a pozitív vonatgyorsulás esetében jelentkező szerepe, továbbá az emelkedési ellenálláserővel kapcsolatos erőresznek a hegymeneti üzemművekben kialakuló vonóerőszükségletet befolyásoló szerep magyarázza. Az emelkedési iránytangens $e(s)$ függvényét töröttvonal jellemzi, mivel konstans emelkedésű pályarészeket $e = \text{áll}$, míg két különböző konstans emelkedésű részeket összekötő lekerékítő köríves szakaszokat másodfokú parabola szakaszokkal közelítve ezek derivált függvényei lineárisak az ívhossz függvényében. A pálya $G(s)$ görbületi viszonyainak leírása szintén szakaszonként lineáris töröttvonalal lehetséges, mivel a köríves részek görbületei konstansok, az egyenes szakaszon pedig a görbület zérus értékű. Az átmeneti íveket klotoidnak véve itt a görbület a pályaiív hosszának definíció szerint lineáris függvénye. Az L ciklushosszon belül tehát az emelkedési viszonyokat az

$$e(s) = e_i + \frac{e_{i+1} - e_i}{s_{i+1} - s_i} (s - s_i) ;$$

$$s_i \leq s \leq s_{i+1} ; i = 0, 1, 2, \dots, m - 1$$

és a

$$G(\sigma) = G_i + \frac{G_{i+1} - G_i}{\sigma_{i+1} - \sigma_i} (\sigma - \sigma_i) ;$$

$$\sigma_i \leq \sigma \leq \sigma_{i+1} ; i = 0, 1, 2, \dots, k - 1$$

interpolációs formulák biztosítják. A görbületi ellenállás kifejezésében szereplő H függvény a G -től lineárisan függ, az együttható pedig a futómű tengelytáv lineáris függvénye (Protopadakis formula, [8]).

3. A tervezett vonatmenet vonóerő és teljesítményszükségletének meghatározása

A 2. fejezetben tárgyaltak szerint rendelkezésre áll a vizsgált ciklusra vonatkozó számítás minden lépésében a kifejtendő gépezeti vonóerő $F_v(s)$ és a haladási sebesség $v(s)$ értéke, így ezek szorzataként a szorzat alakban előálló $P(s) = F_v(s)v(s)$ gépezeti teljesítményfüggvény lefutása is meghatározott a vizsgált ciklusra nézve. A számítások elvégezhetők a tekintett vasútvonalon szóba jövő összes L_1, L_2, \dots, L_n állomásközzre, amivel a tervezett vonatmenet gépezeti vonóerő és teljesítményigénye teljes mértékben meghatározottá válik.

A vizsgált vonalon megvalósítandó vonatmenetet jellemző függvényeket statisztikai kiértékelésnek kell alávetni, annak jellemzése érdekében, hogy az üzemművek milyen valószínűséggel fordulnak elő. A statisztikai elemzésnek ki kell terjednie a menet során megvalósuló maximális vonóerő- és teljesítményszükségleti értékek meghatározására és a sebesség-gépezeti vonóerő vektorfolyamat kétváltozós eloszlásfüggvényének meghatározására. A maximális vonóerő és teljesítményszükségleti értékek korlátot állítanak, és előszelektálási kritériumot jelentenek a tervezett vonattovábbítás megvalósítására szóba jöhető vontatójárművek paramétereire nézve. Amennyiben a maximális szükséges vonóerő és teljesítmény értékek valamely vontatójármű típusra a névleges értékeken belül esnek, akkor következhet az energiahasznosítás szempontját figyelembe vevő optimalizálási feladat megoldása.

4. A vontatójármű terhelésállapot-eloszlása a tervezett vonatmenet során – statisztikai jellemzés

A vonatmenet statisztikai jellemzése a teljes vonal befutására meghatározott szimulációval meghatározott $F_v(t)$ vonóerőfüggvény és $V(t)$ sebességfüggvény ekvidisztáns időpontosorozaton rendelkezésre álló $\{F_v(t_i)\}_{i=1}^n$ és $\{V(t_i)\}_{i=1}^n$ minta-sorozatait használjuk fel. A vonatvábbításhoz igényelt teljesítmény-maximum meghatározásához képezzük a két sorozat szorzataként a szükséges kerületi teljesítmény

$$\{P(t_i)\}_{i=1}^n = \{F_v(t_i)V(t_i)\}_{i=1}^n$$

sorozatát, és meghatározzuk a

$$P_{\max} = \max \{P(t_i)\}$$

maximális értéket és ezt additíve pótlékoljuk a maximális segédüzemi teljesítményszükséglet értékével. Az így kapott érték már mértékadó arra nézve, hogy valamely ismert névleges teljesítményű vontatójármű típus egyáltalán alkalmas lehet-e a vizsgált vonatvábbítási feladat adott követelmények szerinti realizálására.

A kétdimenziós terhelésállapot-eloszlás-függvény becsléséhez a fenti két numerikus sorozatot az együttes szint el nem érési gyakoriságok kiszámításával értékeljük ki. Az eljárás előkészítéséhez tekintsük a lehetséges (előfordult) sebesség értékek $[0, V^{\max}]$ intervallumának és a lehetséges vonóerő értékek $[0, F_v^{\max}]$ intervallumának direkt szorzataként adódó $H = [0, V^{\max}] \times [0, F_v^{\max}]$ zárt téglalattartományt. Ezt a tartományt a két tényező-intervallumban választott ekvidisztáns felosztássorozatok figyelembevételével rácsszerűen felbontjuk, és a kiadódó rácspontok sorozatát mátrixba rendezük. Így rendelkezésre áll a

$$\{V_s, F_r\}_{s=0, r=0}^{n_s, n_r}$$

osztáspontok rendszere és minden ilyen osztáspont választásra meghatározható annak relatív gyakorisága, hogy a szimulációs eredmények $\{V(t_i)\}_{i=1}^n$ és $\{F_v(t_i)\}_{i=1}^n$ mintavételezési sorozataiban a különböző i -indexekhez rendelt $V(t_i), F_v(t_i)$ sebesség- és vonóerő értékpárok közül hányra tel-

jesül a $\{V(t_i) < V_s \wedge F_v(t_i) < F_r\}$ esemény. Jelölje ezen események számát $f_{s,r} = \text{num} \{V(t_i) < V_s \wedge F_v(t_i) < F_r\}$, akkor ez az általunk vizsgált $\{V(t) < V \wedge F(t) < F\}$ esemény gyakoriságát jelenti az n -elemű teljes realizációs sorozatra nézve. Képezve az $f_{s,r}/n$ hányadost, akkor az $\{V(t_i) < V_s \wedge F_v(t_i) < F_r\}$ esemény relatív gyakoriságát kapjuk, ami a nagy számok törvénye szerint - elegendően nagy n esetén - az $\{V(t) < V_s \wedge F_v(t) < F_r\}$ esemény előfordulási valószínűségének jó közelítését adja. Figyelembe véve a terhelésállapot eloszlásfüggvény definícióját, ezzel az

$$F_{\xi_v, \xi_{F_v}}(V_s, F_r) =$$

$$P\{\xi_v < V_s \wedge \xi_{F_v} < F_r\} \approx f_{s,r} / n$$

közelítő összefüggést kapjuk, ami most már a H tartomány összes s,r indexű rácspontjához megadja a terhelésállapot eloszlásfüggvény becslését. A statisztikai feldolgozás tehát a jelzett $f_{s,r}/n$ relatív gyakoriságok meghatározását és az s,r rácsponti indexek szerinti mátrixba rendezését jelenti. A terhelésállapot-eloszlásfüggvény fentiek szerinti diszkrét rácsponti helyettesítési értékei között azután bármely közbenső (V, F_v) értékpárhoz a legközelebb fekvő négy rácspontozat rendelt függvényértékek alapján alkalmas numerikus interpolációval nyerhető.

5. Adott vontatójármű energiahasznosítása, a számára legkedvezőbb energiahasznosítású terhelési viszonyok meghatározása

Adott vontatójármű valamely F_v gépezeti vonóerőkifejtéshez és V haladási sebességhez tartozó stacionárius üzemmódban az energiaátviteli viszonyok meghatározottak az $\eta(V, F_v)$ kétváltozós hatásfokfüggvénnyel, amely az adott üzemmódban a gépezeti vonóerő $P_2(V, F_v) = F_v V$ teljesítményének és a teljesítmény biztosításához felhasznált $P_1(V, F_v)$ energiaáramnak (hálózatból való villamos energiafelvétel vagy a dízelmotor gázolaj-fogyasztásból adódó energiabevitel) a hányadosaként van értelmezve:

$$\eta(V, F_v) = \frac{P_2(V, F_v)}{P_1(V, F_v)}$$

A fenti formulával kapcsolatban hangsúlyozni kell, hogy a hatásfok értéke a számlálóban szereplő $P_2(V, F_v) = F_v V$ szorzat kifejezés miatt szükségképp nulla, ha a szorzat legalább egyik tényezője zérus értéket vesz fel. Ez egyben azt is jelenti, hogy a V vagy az F_v koordinátatengely közel környezetébe eső üzemmódban az energiahasznosítás nagyon rossz lesz. A tényleges üzem energiahasznosítási viszonyai nagyban függenek attól, hogy a tervezett vonatvábbítás során az egyes üzemmódban (terhelésállapotok) milyen valószínűséggel esnek az alacsony vagy a jó hatásfokú tartományokba. A vonatmenet során realizálódott terhelésállapotok valószínűségét az előzőekben statisztikai analízis útján meghatározott

$$F_{\xi_v, \xi_{F_v}}(V, F_v) = P\{\xi_v < V \wedge \xi_{F_v} < F_v\}$$

kétváltozós valószínűségi eloszlásfüggvény jellemzi. Ennek az eloszlásfüggvénynek az ismeretében azután már lehetővé válik a vonatmenet tényleges energiahasznosításának értékelése, és kialakítható a maximális energiahatékonysághoz vezető stratégia is. A következőkben felírjuk a vonatvábbítás során leadott hasznos munkát, valamely T_0 időkeret esetén. A T_0 össz-időnek az a $\Delta T(V, F_v)$ -vel jelölt része, amelyet a vontatójármű a (V, F_v) üzemmódban kis környezetében a vizsgált menet során eltölt, a fentebb bevezetett eloszlásfüggvény $\Delta F_{\xi_v, \xi_{F_v}}(V, F_v)$ megváltozásával számítható

$$\Delta T(V, F_v) = T_0 \Delta F_{\xi_v, \xi_{F_v}}(V, F_v)$$

Mármost a $\Delta T(V, F_v)$ részdő alatt a (V, F_v) üzemmódban kis környezetében érvényes $\eta(V, F_v)$ hatásfokfüggvény-értékre támaszkodva felírható az ezen üzemmódban kis környezetében leadott hasznos vonóerőmunka kifejezése:

$$\begin{aligned} \Delta W_v(V, F_v) &= \\ &= \eta(V, F_v) P_1(V, F_v) T_0 \Delta F_{\xi_v, \xi_{F_v}}(V, F_v) \end{aligned}$$

A teljes T_0 időkeretben leadott össz-vonóerőmunka meghatározása pedig a fenti $\Delta W_v(V, F_v)$ részmunkák összegzését követő határátmenettel a következő Stieltjes-integrálra vezet:

$$W_v(T_0) = T_0 \int_Q \eta(V, F_v) P_1(V, F_v) dF_{\xi_v, \xi_{F_v}}(V, F_v)$$

A kapott kifejezés szerint tehát a lehetséges üzemiállapotok Q tartománya fölött kell integrálni a $\eta(V, F_v) P_1(V, F_v)$ kifejezést a vonatmenethez tartozó eloszlásfüggvényre nézve. Itt a szorzatalakban megjelenő $\eta(V, F_v) P_1(V, F_v)$ kétváltozós függvény a vonatjármű műszaki sajátosságaihoz van meghatározva, mely sajátosságok függetlenek a ténylegesen előforduló üzemiállapoteloszlás sajátosságaitól. Az így értelmezett szorzatfüggvényre bevezetjük a $\psi(V, F_v)$, jelölést. A megadott integrálkifejezés rendezi – kombinálja – egységbe a műszaki rendszer sajátosságait az üzemben jelentkező követelményeket tükröző eloszlásfüggvényekkel. Nyilvánvaló, hogy a műszakilag meghatározott jó energiaátviteli tulajdonságok – magas hatásfok értékek – akkor tudnak kedvezően érvényesülni, ha ezek a tulajdonságok összhangban vannak az üzem által megszabott kívánalmakkal, másképp kifejezve: ha a jó hatásfokú üzemiállapotok fedésbe kerülnek a nagy valószínűséggel fellépő (gyakori) üzemiállapotokkal.

Az elmondottak szerint adott műszaki paraméterekkel rendelkező vonatjármű akkor valósít meg a vonatjavítás feladat ellátása során kedvező energiahasznosítást, ha a vonatjavítás feladat által igényelt $F_{\xi_v, \xi_{F_v}}(V, F_v) = P\{\xi_v < V \text{ és } \xi_{F_v} < F_v\}$ terhelésállapot eloszlás a lehető legjobb összhangban van a vonatjármű felépítésével meghatározott tulajdonságaival.

A feladat ilyen megfogalmazása természetessé teszi azt a kérdésfelvetést, hogy adott energiaátviteli jellemző függvénnyel bíró vonatjármű esetén milyen terhelésállapot eloszlás esetén lehet maximális értékű a lehetséges üzemiállapotok (terhelésállapotok) Q tartományán vett integrál. Az tehát a

kérdés, hogy milyen üzemi terhelési viszonyok mellett lenne a legkedvezőbb az adott felépítésű – és ezért adott energiaátviteli jellemző függvénnyel bíró – vonatjármű energiahasznosítása. Így tehát a vonatjárműhöz legjobban illeszkedő üzemiállapot feladat sajátosságait azonosító kétváltozós terhelésállapot-eloszlásfüggvényt kell a feladat ismeretleneként tekintenünk. A most körvonalazott feladat megoldásához az $F_{\xi_v, \xi_{F_v}}(V, F_v)$ kétváltozós eloszlásfüggvényt véges sok adattal leírható közelítő felírással állítjuk elő. A kétváltozós eloszlásfüggvény ismeretében ugyanis egyértelműen meghatározott a két perem-eloszlásfüggvény az $F_{\xi_{F_v}}(F_v) = F_{\xi_v, \xi_{F_v}}(\infty, F_v)$ és az $F_{\xi_v}(V) = F_{\xi_v, \xi_{F_v}}(V, \infty)$ összefüggésekkel, továbbá minden rögzített F_v vonóerő értékhez az $F_{\xi_v|F_v}(V|F_v)$ feltételes sebesség-eloszlásfüggvény. Ezek alapján a kétváltozós terhelésállapot eloszlásfüggvény az F integrációs változó alkalmazásával előállítható a következő alakban:

$$F_{\xi_v, \xi_{F_v}}(V, F_v) = P\{\xi_v < V \text{ és } \xi_{F_v} < F_v\} = \int_0^{F_v} F_{\xi_v|F_v}(V|F_v) dF_{\xi_{F_v}}(F_v)$$

A fenti összefüggés sorozatos alkalmazásával meghatározzuk a kétváltozós terhelésállapot-eloszlásfüggvény differenciáljának közelítését a $\Delta F_{\xi_v, \xi_{F_v}}(V, F_v)$ véges növekmény felírásával:

$$\begin{aligned} \Delta F_{\xi_v, \xi_{F_v}}(V, F_v) &= \\ &= \int_0^{F_v + \Delta F_v} F_{\xi_v|F_v}(V + \Delta V|F_v) dF_{\xi_{F_v}}(F_v) - \\ &- \int_0^{F_v} F_{\xi_v|F_v}(V + \Delta V|F_v) dF_{\xi_{F_v}}(F_v) - \\ &- \int_0^{F_v + \Delta F_v} F_{\xi_v|F_v}(V|F_v) dF_{\xi_{F_v}}(F_v) + \\ &+ \int_0^{F_v} F_{\xi_v|F_v}(V|F_v) dF_{\xi_{F_v}}(F_v) \end{aligned}$$

Figyelembe véve, hogy ΔF kicsi és az $F_{\xi_v|F_v}(V|F_v)$ feltételes eloszlásfüggvények folytonosak minden $V > 0$ értékre, a következő közelítő összefüggés adódik:

$$\begin{aligned} \Delta F_{\xi_v, \xi_{F_v}}(V, F_v) &= \\ &= \int_{F_v}^{F_v + \Delta F_v} F_{\xi_v|F_v}(V + \Delta V|F_v) dF_{\xi_{F_v}}(F_v) - \\ &- \int_{F_v}^{F_v + \Delta F_v} F_{\xi_v|F_v}(V|F_v) dF_{\xi_{F_v}}(F_v) \\ &= \int_{F_v}^{F_v + \Delta F_v} [F_{\xi_v|F_v}(V + \Delta V|F_v) - F_{\xi_v|F_v}(V|F_v)] dF_{\xi_{F_v}}(F_v) \approx \\ &\Delta F_{\xi_v|F_v}(V|F_v) \Delta F_{\xi_{F_v}}(F_v) \end{aligned}$$

A kapott kifejezés mutatja, hogy a kétváltozós eloszlásfüggvény kis növekménye előáll a konstans vonóerő melletti feltételes sebesség-eloszlásfüggvény és a vonóerő-eloszlásfüggvény differenciális növekményei szorzataként:

$$dF_{\xi_v, \xi_{F_v}}(V, F_v) = dF_{\xi_v|F_v}(V|F_v) dF_{\xi_{F_v}}(F_v)$$

Az energiahasznosítás értékeléséhez kialakított integrálkifejezésben érvényesítve a most kapott összefüggést az adott T_0 időkeretben leadott vontatási munkára a

$$W(T_0) = T_0 \int_0^{F_v^{\max}} \int_0^{V^{\max}} \psi(V, F_v) dF_{\xi_v|F_v}(V|F_v) dF_{\xi_{F_v}}(F_v)$$

kifejezés adódik.

A nyert kifejezésben megjelent Stieltjes-integrálok zárt alakú számítása nehézségbe ütközik, mivel a szereplő $F_{\xi_v|F_v}(V|F_v)$ feltételes eloszlásfüggvény és az $F_{\xi_{F_v}}(F_v)$ perem eloszlásfüggvény képletszerű alakja nem ismert. Ugyancsak nem ismert az integrálandó kimenő $\psi(V, F_v)$ teljesítmény-függvény képletszerű felírása. Ezért a feladat numerikus kezelése válik szükségessé.

A tárgyalás ezen pontján érdemes hangsúlyozni, hogy a tekintett vonatjavítás feladat esetén szóba jöhető N -számú vonatjárműre az azokra érvényes

$$\psi_k(V, F_v); k = 1, 2, \dots, N$$

kimenő teljesítmény függvények numerikus adatrendszerrel történő megadása birtokában a vizsgált menetre vonatkozó terhelésállapot-eloszlásfüggvény ismeretében, az utóbbiból származtatott feltételes eloszlásfüggvények és a vonóerő peremeloszlás ismeretében

meghatározható a

$$W_k(T_0) = \int_0^{F_v^{\max}} \int_0^{V_{\max}} \psi_k(V, F_v) dF_{\xi_v|F_v}(V|F_v) dF_{\xi_v}(F_v) \quad k = 1, 2, \dots, N$$

vonóerőmunka érték sorozat. Ennek ismeretében az adott vontatási feladat megvalósítására azon k^* index-szel jellemzett vontatójármű alkalmazása célszerű, amelyhez a fenti sorozatban a legnagyobb energiahasznosítási érték tartozik, azaz:

$$W_{k^*}(T_0) = \max!$$

Az elmondottak szerint azt a vontatójárművet kell tehát előnyben részesíteni, és hozzárendelni az adott vontatási feladathoz, amely az adott terhelésállapot-eloszlási viszonyok mellett a legnagyobb energiaátviteli hatékonyságot valósítja meg. A követett eljárásunk lényegét tekintve úgy mutatható be, hogy az adott vonattovábbítási viszonyokhoz tartozó terhelésállapot-eloszlás előzetes szimulációval történt meghatározása után „kipróbáltuk” hogy melyik vontatójármű illeszkedik legjobban a megkívánt üzemi feltételekhez.

Az üzemeltető vasút járműbeszerzési igény esetén a fent követett eljárást abban a változatban utalhatja az ajánlattevő járműgyár hatáskörébe, hogy a járműgyár szállítson számára olyan vontatójárművet, amely a vasút által előre megadott $F_{\xi_v, \xi_F}(V, F_v)$ terhelésállapot-eloszlásfüggvény mellett maximalizálja a hasznosított vonóerőmunkát. Természetes, hogy az így kialakítandó jármű hajtásrendszere most is jellemezhető egy $\psi(V, F_v)$ hasznosított teljesítményre jellemző függvénnyel, azonban most a ψ függvény független változói között fel kell tüntetni egy optimalizálást biztosító \mathbf{q} akcióparaméter vektort, melynek megfelelő $\hat{\mathbf{q}}$ megválasztása megvalósítja a megkívánt

$$W(\hat{\mathbf{q}}) = \int_0^{F_v^{\max}} \int_0^{V_{\max}} \psi_k(V, F_v, \hat{\mathbf{q}}) dF_{\xi_v, \xi_F}(V, F_v) = \max!$$

feltétel teljesülését, azaz maximalizálja az integrálkifejezéssel megadott többváltozós skalár célfüggvényt [4].

A következőkben egy általánosabb megközelítésben tárgyaljuk az 1. főfeladat megoldását, természetesen kihasználva az adott vonattovábbítási feladat keretében a korábbiakban már definiált terhelésállapot-eloszlásfüggvény ismeretét, illetve az abból származtatott – egyelőre ismeretlen – feltételes eloszlásfüggvényeket és perem-eloszlásfüggvényeket.

A gondolatmenet lényege az, hogy a véges számú rögzített F_{v_i} vonóerő szint estében lineáris programozással megkeressük azokat az $F_{\xi_v}(V|F_{v_i})$ feltételes sebesség-eloszlásfüggvényeket, amelyek mellett a tekintett F_{v_i} vonóerőszintek esetében a tekintett vontatójárművet jellemző $\psi(V, F_v)$ függvényből $F_v = F_{v_i}$ helyettesítéssel adódó, már csupán V -függő, egyváltozós $\psi(V, F_{v_i})$ feltételes kimenő teljesítmény függvény esetén a leghatékonyabb energiaátvitel valósulna meg. Az így sorozatosan, tehát különböző F_{v_i} vonóerő-szintekhez nyert feltételes sebesség-eloszlásfüggvények ismeretében azután felépíthető a vizsgált jármű energiaátviteli tulajdonságait teljesen jellemző rögzített $\psi(V, F_v)$ kimenő teljesítmény függvényhez tartozó legkedvezőbb (energiaátvitel szempontjából optimális) terhelésállapot-eloszlásfüggvény, mint a tekintett vontatójármű $\hat{F}_{\xi_v, \xi_F}(V, F_v)$ típusjellemzője.

Hangsúlyozzuk, hogy az eddig megtett lépések során még nincs figyelembe véve a valamely konkrét vonattovábbítási feladat során érvényesülő terhelésállapot-eloszlásfüggvény, eddig csupán a vontatójármű szerkezeti felépítéséből fakadóan került behatárolásra a hajtásrendszer felépítéshez legjobban illeszkedő azon $\hat{F}_{\xi_v, \xi_F}(V, F_v)$ terhelésállapot-eloszlásfüggvény, amely a leghatékonyabb energiafelhasználást jelent, másképp: amely $\hat{F}_{\xi_v, \xi_F}(V, F_v)$ terhelésállapot-eloszlásfüggvény mellett az erőátviteli rendszerben (egyébként felépítéséből adódóan szükségszerűen) megvalósuló energiavesztés a lehető legkisebb.

6. Az adott f_v vonóerőhöz tartozó optimális feltételes sebesség-eloszlásfüggvény meghatározása lineáris programozással

A lineáris programozásra alapozott optimalizálási feladat lényegének bemutatásához jelölje a vontatójármű valamely rögzített F_v vonóerőszinthez tartozó kimenő teljesítmény függvényét $\psi(V)$, ahol $0 \leq V \leq V_{\max}$.

Tételezzük fel, hogy a sebességtengelyen adott egy ekvidisztáns felosztás, pl. 5 km/h osztásközzel, azaz adott a $V_0, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_n = V_{\max}$ sebességérték-sorozat. A V_0 értéket zérusnak választva, így n -számú nem zérus, monoton növekvő sorozatba rendezett sebesség érték adódik.

Legyen most $\xi_i = 0,5(V_i + V_{i-1})$; $i=1, 2, \dots, n$ a kiindulási sebesség-osztáspontokkal meghatározott n -számú sebesség-intervallum felezőponti abszcisszáiból képzett sorozat. A bevezetett $\psi(V)$ kimenő teljesítmény függvényt az utóbbi intervallum felezési pontsorozaton felvett helyettesítési értékeivel reprezentálva az $\psi_1 = \psi(\xi_1), \psi_2 = \psi(\xi_2), \dots, \psi_i = \psi(\xi_i), \dots, \psi_n = \psi(\xi_n)$ sorozat adódik.

Tételezzük fel, hogy az üzemben realizálódó haladási sebességet megjelenítő, értékeit a $0 \leq V \leq V_{\max}$ intervallumból felvevő ξ_v valószínűségi változó $F_{\xi_v}(V)$ eloszlásfüggvényének a kiindulási $V_0=0, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_{\max}$ sebességérték-sorozathoz tartozó jellemzői, a $V_0=0$ helyi $F_0 = F_{\xi_v}(V_0^+)$ jobb-oldali határérték, és az

$$F_1 = F_{\xi_v}(V_1), F_2 = F_{\xi_v}(V_2), \dots, F_n = F_{\xi_v}(V_n)$$

helyettesítési-értékek ismertek. Ismeretes [1], hogy a vizsgált egyszerűsített esetben (konstans vonóerőszint fennállását feltételezve) a hajtásrendszer által leadott hasznos vontatási energia a ξ_v sebességjellemző valószínűségi változónak a kimenő teljesítmény függvénybe helyettesítéssel nyert $\psi(\xi_v)$ valószínűségi változó várható értékével arányos, ezen várható értéket pedig a következő integrálkifejezés adja:

$$E\psi = \int_0^{V_{\max}} \psi(V) dF_{\xi_v}(V).$$

A kapott Stieltjes-integrál közelítő értékének konkrét meghatározását a

reprezentáns sebesség osztáspontokra és az ezekhez tartozó eloszlásfüggvény-értékekre alapozva az integrálközelítő összeg kiszámításával végezzük el, azaz az:

$$E\psi \approx \sum_{i=1}^n \psi_i (F_i - F_{i-1})$$

véges összegkifejezés adódik. Itt figyelembe vettük, hogy a kimenő teljesítmény függvény a zérus sebességnél zérus értéket vesz fel.

Az adott kialakítású erőátviteli rendszerrel bíró vontatójárműhöz legkedvezőbb – legnagyobb energia-hasznosítást biztosító – üzemi viszonyaihoz tartozó sebesség-eloszlásfüggvényt a vontatási üzem sajátosságait figyelembe vevő feltételes szélsőérték számításal határozzuk meg. A kimenőteljesítmény függvény várható értékének fenti közelítő kifejezésére tekintve látható, hogy az a sebesség-eloszlásfüggvény $\Delta F_i = F_i - F_{i-1} \geq 0$ nem negatív növekményi értékeinek lineáris kombinációjaként írható fel az alábbi n tagú összeggel:

$$E\psi \approx \sum_{i=1}^n \psi_i (F_i - F_{i-1}) = \sum_{i=1}^n \psi_i \Delta F_i$$

A képletben a szerepeltetett ψ_i együtt-hatók energetikai jelentése az előző-ekből nyilvánvaló. A feladat mármost keresni azon $\Delta F_1, \dots, \Delta F_n$ nemnegatív értékeket, amelyek az adott kimenő – teljesítmény függvény helyettesítési értékeivel meghatározott ψ_1, \dots, ψ_n konstans együtthatók mellett maximalizálják $E\psi$ várható értéket. A cél-függvény tehát:

$$\sum_{i=1}^n \psi_i \Delta F_i = \max!$$

A $\Delta F_1, \dots, \Delta F_n$ nemnegatív eloszlás-függvény-növekmény értékekkel – mint akcióparaméterekkel kapcsolatban korlátozó feltételeket is ki kell szabni, ugyanis a legkedvezőbb energetikai viszonyokat eredményező eloszlás nem koncentrálódhat egyszerűen a legmagasabb kimenő teljesítmény értéket adó sebességnél, mivel a $[0, V_{\max}]$ sebességtartomány gyengébb teljesítményátviteli értékeket felmutató

részhalmaiba is – az azokon való áthaladás időhányada mellett (gyorsítások, fékezések, sebesség-előírások) – szükségszerűen tartózkodni kénytelen a rendszer. Az eredeti sebességfelosztás minden részintervallumához hozzárendelhető egy m_i alsó és egy M_i felső valószínűségi korlát az adott intervallumban megvalósuló üzemre nézve. A feltételrendszer a következő egyenlőtlenségrendszerrel fogalmazható meg:

$$\begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_{n-1} \\ m_n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F_1 \\ \Delta F_2 \\ \vdots \\ \Delta F_{n-1} \\ \Delta F_n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_{n-1} \\ M_n \end{bmatrix}$$

A fent megadott alulról és felülről korlátozó lineáris egyenlőtlenség-rendszeren túl egy további, lineáris összefüggéssel meghatározott korlátozó feltételnek is teljesülnie kell, éspedig az eloszlásfüggvény tulajdonság érvényesítése miatt még a

$$\sum_{i=1}^n \Delta F_i = 1 - F_0$$

egyenlőségnek is fenn kell állnia. Triviális ugyan, de rögzíteni kell még, hogy az n számú mindegyike nem negatív kell, hogy legyen, azaz érvényesülnie kell a

$$\Delta F_1 \geq 0, \Delta F_2 \geq 0, \dots, \Delta F_n \geq 0$$

feltételeknek is.

A fenti gondolatmenet alapján világos, hogy itt egy olyan lineáris programozási feladatról van szó, amely a $\Delta F_1, \dots, \Delta F_n$ nem negatív akcióparaméterekre nézve n számú két oldalról megadott egyenlőtlenséggel és egy határozott egyenlőség-gel van korlátozva. A korlátozó egyenlőtlenségek az R^n egy téglartományát jelölik ki, míg a szereplő egyenlőség egy n -dimenziós hipersíkot határoz meg. A feladat megoldása tehát a jelzett hipersíknak a téglartománnyal adódó közös részeként adódó hipersík rész valamely pontjában fog adódni. Tekintettel arra, hogy a feladatban szereplő egyenlőtlenség rendszer az R^n „pozitív tér- 2^n -edében” fekvő téglartomány, és mint ilyen egy P -jelű konvex poliéderként azonosítható, ezért a korlátozó feltételként szereplő $\sum_{i=1}^n \Delta F_i = 1 - F_0$ egyenletű S hipersíkkal vett közös része egy, ugyanezen korlátozó hipersíkra eső zárt

részhalma lesz, melyet a $P \cap S$ „hipersíkbeli poligon” határol. Ezen poligonnak a sarokpontjai adják a lehetséges extrémálisokat. Az a sarokpont lesz extrémális, amelynek koordinátáit a

$$\sum_{i=1}^n \psi_i \Delta F_i$$

lineáris célfüggvénybe helyettesítve a kiadódott érték maximális lesz. A véges sok lehetséges sarokpontot egy ciklussal bejárva az egyértelmű megoldás kiadódik, vagy pedig valamely sarokpont-pár összekötő hiperegyesének minden pontja megfelel, ez utóbbi esetben tehát végtelen sok megoldás létezik.

Tekintettel arra, hogy a vontatójárművek esetében a hatások nem csupán egyváltozós, hanem mindenképpen függ még az éppen kifejtett vonóerőtől, vagy áttételesen annak vezérlési változójától (hajtásvezérlés) is, a most végigvitt gondolatmenetünket úgy kell tekinteni, hogy az egy adott – rögzített – vonóerőérték mint feltétel mellett érvényes. Tehát ily módon feltételes kimenő teljesítmény függvény figyelembe vételével dolgoztunk, és ezen feltételes kimenőteljesítmény függvényhez tartozó feltételes, optimális sebesség-eloszlásfüggvényt nyertük.

7. A vontatójármű kétváltozós teljesítményátviteli függvényéhez tartozó optimális kétváltozós terhelésállapot-eloszlás meghatározása

A tényleges vontatójármű üzemre vonatkozóan szükséges az előforduló vonóerők intervallumában felvett vonóerő felosztás értékei mint feltételi értékek mellett sorozatosan meg kell ismételnünk az előző gondolatmenet szerinti eljárást és ezzel adódnak az adott vonóerői értékekhez tartozóan a legkisebb energiaveszteséget biztosító feltételes sebességeloszlás-függvények.

A fentiek alapján tehát rendelkezésre áll a tekintett vontatójármű típus erőátviteli rendszerének energiahasznosítási szempontból feltételes optimális sebességeloszlásfüggvény sorozat, amely a vizsgált vontatójármű **típus-jellemző-sorozata**.

Mivel a megvalósítandó tényleges vonattovábbítási feladat jellemzőjeként, menetdinamikai szimuláció végrehajtása után ismert a menet során alkalmazandó vonóerő értékek előfordulási valószínűségeit jellemző $F_{\xi_F}(F_v)$ eloszlásfüggvény, a kimenő teljesítmény függvényével jellemzett vontatójárműhöz a fentiek szerint meghatározott legkisebb energiavesztéshez tarozó feltételes sebesség-eloszlásfüggvények ismeretében a teljes valószínűség tételén alapuló súlyozott összegzéssel meghatározható most már az energetikailag legkedvezőbb üzemszervezést rögzítő $\hat{F}_{\xi_v, \xi_F}(V, F_v)$ kétváltozós terhelésállapot eloszlásfüggvény.

Fontos kiemelni, hogy ez a legkedvezőbb $\hat{F}_{\xi_v, \xi_F}(V, F_v)$ kétváltozós terhelésállapot eloszlásfüggvény azonban *már nem típusjellemző*, mert a tekintetbe vett vonóerő értékek valószínűség-eloszlása az adott vontatási feladathoz (vonattömeg, megkívánt sebesség és gyorsulás-viszonyok, pályajellemzők) kapcsolódóan van meghatározva.

Tárgyalásunk jelen szakaszában feltelevizük, hogy a vizsgált vontatási feladatra vonatkozó menetdinamikai szimulációval már meghatározásra került a kívánt feltételek melletti vontatási feladat megvalósításához szükséges F_v vonóerőváltozást jellemző ξ_F valószínűségi változó szint el nem érési valószínűségeit rögzítő $F_{\xi_F}(F_v)$ perem-eloszlásfüggvény.

A vontatási feladat természetéből adódóan a ξ_F valószínűségi változó kevert eloszlású. A zérus vonóerő érték üzemszervezési előfordulásával már csak a kifuttatások célszerűsége és a fékezési üzemszervezések jelenléte miatt is számolni kell. Azaz a zérus vonóerő kifejtés eseményéhez diszkrét nem zérus valószínűség tartozik. Így az $F_{\xi_F}(F_v)$ eloszlásfüggvénynek az $\Delta F_v = 0$ helyen ugrása van, jelölje ezt az $F_v > 0$, az $F_{\xi_F}(F_v)$ eloszlásfüggvény zéróhelyi jobb oldali határértéke, azaz $F_{v0} = F_{\xi_v}(0^+)$. A vonóerő eloszlásfüggvénye a $(0, F_v^{\max}]$ intervallumon már folytonos.

Szerepeltessünk m -elemű ekvidisztáns felosztást a vonóerő tengelyen,

akkor az $F_{v0} = 0$ és $F_{v1}, \dots, F_{vm} = F_v^{\max}$ osztáspontok adódnak. Ertelmezzük a $\Delta F_{\xi_F}(F_{vi}) = F_{\xi_F}(F_{vi}) - F_{\xi_F}(F_{v(i-1)}) \geq 0$

nem negatív perem-eloszlásfüggvény növekményeket, melyek minden $i > 0$ -indexre a ξ_F vonóerő valószínűségét jelentik.

A fentiek alapján már könnyen nyervehető az adott vontatójármű adott vontatási feltételeinek részbeni figyelembevétele mellett, nevezetesen a tekintett vontatójárműhöz tartozóan a tervezett vonatmenet megvalósításakor érvényesülő vonóerő-eloszláshoz a jármű felépítésével meghatározott viszonyok között legkedvezőbb energetikai viszonyokat megadó $\hat{F}_{\xi_v, \xi_F}(V, F_v)$ optimális terhelésállapot eloszlásfüggvény.

Jelölje a korábbiakkal összhangban $\hat{F}_{\xi_v}(V|F_{vi})$ az F_{vi} vonóerő kifejtés feltétele mellett meghatározott optimális feltételes sebesség eloszlásfüggvényt, akkor a tekintett vontatási feladat ellátásához a vizsgált vontatójárműre vonatkozóan

$$\hat{F}_{\xi_v, \xi_F}(V, F_v) \approx \sum_{i=1}^m \hat{F}_{\xi_v|F_{vi}}(V|F_{vi}) \Delta F_{\xi_F}(F_{vi})$$

ennek a kétváltozós terhelésállapot-eloszlásfüggvénynek kellene realizálnia a megvalósítandó vonatmenet során – ekkor lenne ugyanis minimális a hajtásrendszer energiavesztése.

Ismételten ki kell emelnünk, hogy az így felépített energiahasznosítás szempontjából optimális $\hat{F}_{\xi_v, \xi_F}(V, F_v)$ terhelésállapot eloszlás egyrészt a jármű felépítésével meghatározott – mivel a $\psi(V, F_v)$ kimenő teljesítmény függvény a jármű saját alapjellemzője –, másrészt a megvalósítani kívánt, tervezett vonattovábbításra vonatkozóan szimulációval meghatározott $F_{\xi_F}(F_v)$ vonóerő eloszlásfüggvény ismeretere támaszkodik.

Természetesen elképzelhető eljárás lenne valamely közelítő érvényességű a-priori vonóerő eloszlásfüggvény felvétele is (amely korábbi speciális esetekre vonatkozó eredmények statisztikai általánosításból adódhat), amely esetben a most megfogalmazott optimális terhelésállapot-eloszlásfüggvény már tisztán közelítő járműjellemzőként lenne azonosítható.

Mivel azonban a vontatási energetika 1. főfeladata megoldásához amúgy is szükséges a kívánt vonatmenet dinamikai szimulációja és az eredmények statisztikai kiértékelése, ezért az adott vonattovábbításhoz szükséges kétváltozós „a vonattovábbítási üzemszervezés által igényelt terhelésállapot-eloszlás”-nak a menetdinamikai kiértékelés eredményeként rendelkezésre kell állnia, és ennek perem eloszlásai is ismerteknek tekinthetők. Így az energiahasznosítás szempontjából legkedvezőbb vontatójármű kiválasztáshoz határozottan indokolt egy becsült a-priori vonóerő-eloszlás helyett a vizsgált vonatmenetre végrehajtott szimuláció eredményeinek kiértékelésével meghatározott tényleges vonóerőigény $F_{\xi_F}(F_v)$ eloszlásfüggvényével dolgozni.

8. Az energiahasznosítás szempontjából legkedvezőbb vontatójármű hozzárendelése az adott vonattovábbítási feladathoz

A vontatási energetika 1. főfeladatának megoldásához minden rendelkezésre áll. Egyrésztől a tervezett vonatmenet számítógépes dinamikai szimulációjával kapott eredmények kiértékelése alapján rendelkezésre áll a vonatmenethez tartozó $G(V, F_v)$ kétváltozós terhelésállapot-eloszlásfüggvény. Másrészt a szóba jöhető véges sok ($k=1, 2, \dots, N$ -számú) „versenyre bocsátott” (konkurrens) vontatójármű típusra az adott vonattovábbítási feladat által igényelt $F_{\xi_F}(F_v)$ vonóerő eloszlásfüggvény ismeretében kiértékelésre került (lineáris programozással) a legkedvezőbb energiahasznosítást biztosító terhelésállapot-eloszlásfüggvények $\hat{F}_{\xi_v, \xi_F}^k(V, F_v)$, $k=1, 2, \dots, N$ sorozata.

A hozzárendelési feladat megoldásakor azon vontatójármű kiválasztását kell végrehajtanunk, amelynek a típushoz rendelt legkedvezőbb energiahasznosítást biztosító terhelésállapot-eloszlásfüggvénye legközelebb esik a tervezett vonatmenethez tartozó $G(V, F_v)$ kétváltozós terhelésállapot-eloszlásfüggvényhez. A közelséget itt a függvényértékek eltérése négyzetének minimuma értelmében tekintjük.

A hozzárendelési feladat megoldása most tehát az

$$D_k = \int_0^{F_v^{\max}} \int_0^{V^{\max}} (\hat{F}_{\xi_v, \xi F_v}^k(V, F_v) - G(V, F_v))^2 dV dF_v = \underset{k}{Min}!$$

szélsőérték feladatra vezet. A feladatnak csak numerikus megoldása jöhet szóba (az integrandusban szereplő függvények egy pontrácson felvett numerikus értékekkel ismertek), éspedig oly módon, hogy a szóba jött $k = 1, 2, \dots, N$ vontatójármű változatokra meghatározzuk a D_1, D_2, \dots, D_N számokat és azon k indexű vontatójárművet választjuk, amelyre $D_k = \underset{k}{Min}!$ teljesül.

Ezzel a vontatási energetika 1. főfeladatát megoldottuk. Természetszerű, hogy a feladat megoldásának a tárgyalat elvek alapján történő tényleges kivitelezéséhez jelentős adatbázis és szoftverháttér megléte szükséges.

10. Irodalomjegyzék

[1] Szüle, D.: Összefüggés az üzemállapotok előfordulásának gyakorisága és a motoros jármű üzemi jellemzői között. Közlekedéstudományi szemle, Budapest, No 11, 1967.
 [2] Zobory, I.: Motoros járművek üzeme során a gépi berendezésben fellépő terhelésállapotok elméleti vizsgálata statisztikai módszerrel. Járművek és Mezőgazdasági Gépek, 20, 1973, p.77-79.
 [3] Zobory, I.: On real-time simulation of the longitudinal dynamics of trains on a specified railway line. Proceedings of VSDIA , 94. (Ed. by Prof. I. Zobory). BME, Department of Railway Vehicles, Budapest, 1995, p. 88-100.
 [4] Zobory I.: Sztocasztikus terhelési viszonyok között dolgozó hidrodinamikus hajtásrendszer hatások optimalizálásáról. Járművek Építőipari és Mezőgazdasági Gépek 41, 1996 (11), p. 215-219.
 [5] Zobory, I. – Békefi, E.: Longitudinal dynamics of vehicle systems and traffic flows. Proceedings of VSDIA, 96, (Ed. by Prof. I. Zobory),

BME, Department of Railway Vehicles, Budapest, 1996. p. 81-93.
 [6] Kósa A.: Optimumszámítási modellek. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979.
 [7] Zobory, I.: A vonattovábbítás energetikájának három főfeladata. Vasútgépészet, Budapest, 2010, p.25-27.
 [8] Megyeri, J.: Vasútéptéstan. Közlekedési Dokumentációs Vállalat. Budapest. 1991.

A jelen cikk eredményeit adó kutatómunka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségi-orientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja. A tanulmány korábban a Közlekedéstudományi Szemlében megjelent, Katona András főszerkesztő hozzájárulásával adjuk közre.

Bussnang, 2017 június 16.

Kigördült az első bimodális FLIRT

A Stadler Bussnang 2017. június 15-én bemutatta az olasz Valle d’Aosta régióknak szállított az első hibrid FLIRT-et.



1. ábra: Az olaszoknak gyártott Hibrid FLIRT

A környezetbarát jármű a 3 kV DC villamosított vonalakon és nem villamosított hálózaton a beépített dízel-motoros-elektromos hajtásnak köszönhetően egyaránt közlekedhet. A pályakímélő konstrukciója kiemelkedő, a FLIRT-eknél megszokott alacsony, legfeljebb 18 tonna tengelyterhelésű.

Mint minden FLIRT, a hibrid FLIRT is alumínium profilokból épül. Ez eredményezi a könnyű és energiatakarékos kivitel.

A három részből álló jármű a felsővezetékes üzemhez és a villamos erőátvitelhez szükséges egységeken túl a dízelerőforrásokat és a szükséges segédüzemi berendezéseket is tartalmazza.

A dízel erőforrás: 2 Deutz V8 dízelmotor (Euro IIIB). A jármű 66,8 m hosszú, 2,82 m széles és 4,12 m magas. A felsővezeték alatti üzemben 160 km/h, és a dízel-elektromos üzemmódban 140 km/h a legnagyobb sebessége.



2. ábra: A Stadler hibrid FLIRT dízelerőforrása