

Az Axon 6M Kft. vasúti erősáramú szimulációs rendszere

© Dolhay Márk

Hasonló témában jelentettünk már meg írást ugyanitt 2011-ben. Az eltelt idő alatt számos fejlesztés történt a rendszerünkben, ugyanakkor a megrendelői igények is jelentősen változtak.

Jelen cikkkel egyfelől a szimuláció iránt érdeklődőknek szándékozunk remélhetőleg érdekes információkat nyújtani, másfelől a témával hivatalból, magas szinten foglalkozóknak szeretnénk bemutatni, pontosan hol tartunk, merre látjuk a fejlődési irányokat.

A „Javaslatok” részben leírjuk, mi az, amit a speciális magyar körülmények között fontosnak tartunk egy erősáramú szimulációs vizsgálatnál.

Bevezető

Kedves Kollégák! Az immár 19 éve létező, számos területen aktív Axon 6M Kft.-nek ha nem is a legfontosabb, de

mindenképpen a legrégebbi tevékenységi köre a szimulációs terület. Rövid számolás után ijedten konstatáltam, hogy már körülbelül 50 szimulációs projektben vettünk részt mint vállalkozók. Oktató- és tesztszimulátorok, erősáramú és forgalmi szimulációs tanulmányok hosszú sora „szárad a lelkünkön”.

Ebben a cikkben az erősáramú szimuláció eszközeit mutatjuk be, továbbá az utolsó részben a javaslatainkat szeretnénk megosztani úgy a vállalkozói, mint a megrendelői oldallal.

A rendszer felépítése, főbb komponensei

Az 1. ábra mutatja az erősáramú szimulátor főbb komponenseit és azok kapcsolódási pontjait.

Forgalmi szimulátor: az erősáramú szimuláció ma már szinte kizárólag forgalmi szimuláció alapján történik. Ehhez nélkülözhetetlen egy eszköz, ami ezt megfelelő pontossággal el tudja végezni.

Áramköri szimulációs modul: a rendszer magját képező általános célú, áramköri és elektromágneses szimulációs algoritmusok.

A *vasúti illesztő modul* a felsővezeték tápellátó hálózat statikus modelljéből, a vonatadatbázisból, valamint a pillanatnyi menetdinamikai adatokból létrehozza a szimulációs algoritmusok bemenő paramétereit.

Online megjelenítő és beavatkozó modul: grafikus felület, mely áttekintést ad a hálózat egészéről, megjelenítve valamennyi számított feszültség- és áramértéket egy adott időpontban, vagy ezen értékek egy részének időbeni alakulását egy időtartományban.

Offline kiértékelő modul: egy bizonyos időtartományt átfogó szimulációs folyamat egyes paramétereinek táblázatos vagy grafikus formában történő ábrázolását végző eszközök összessége.

Forgalmi szimulátor

A forgalmi szimulátorral részletesen nem foglalkozunk. Ez tipikusan egy igen összetett alkalmazás, mely egyszerre szimulálja a vonatmozgásokat, kültéri elemeket, biztosítóberendezés funkciókat. Képes a vonatforgalmat és tolatási tevékenységeket, akár interaktívan, akár előre programozottan, akár „vegyes” üzemmódban lebonyolítani.

Áramköri szimulációs modul

E modul tartalmazza azokat az alapvető általános matematikai és áramköri kalkulációs eljárásokat, melyek a konkrét erősáramú szimulációs feladat megoldásához szükségesek.

Lineáris áramköri és elektromágneses modul

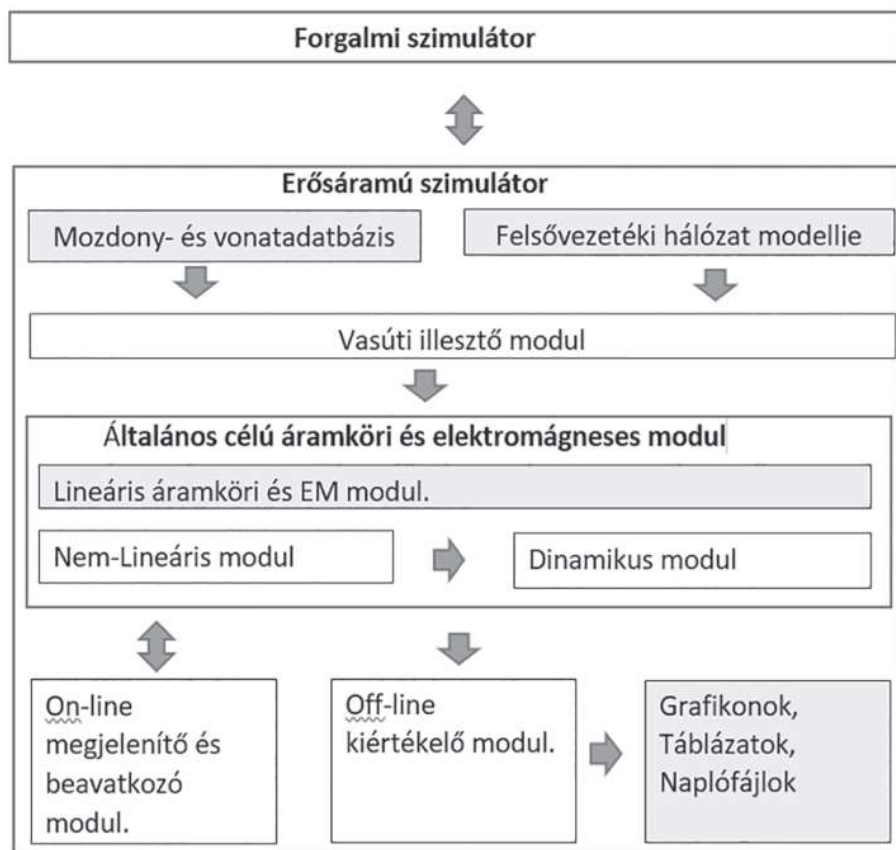
A lineáris áramköri szimulátor bemenete egy lineáris objektumokból álló hálózat. A lineáris objektum a továbbiakban olyan kétpólust jelent, amelynek feszültsége, árama vagy a kettő kapcsolata egy lineáris egyenletben kifejezhető (a továbbiakban **LER**).

Például:

Áramgenerátor egyenlete:
 $I_g = \text{<konstans>}$

Feszültséggenerátor egyenlete:
 $U_g = \text{<konstans>}$

Ellenállás egyenlete:
 $U_r - R \cdot I_r = 0$ (mj. R konstans)



1. ábra: Az erősáramú szimulációs rendszer komponensei

N db lineáris objektum esetén 2N változónk van, hiszen kíváncsiak vagyunk valamennyi objektum áramára és feszültségére, amiből következik, hogy 2N egyenletre van szükség. N egyenletet szolgáltatnak maguk az objektumot (lásd fenn), N további egyenletet pedig a Kirchoff-törvények szisztematikus alkalmazásával nyerünk (mj. Hurok-törvény, Csomóponti-törvény). Ilyen módon valamennyi, lineáris objektumok által felépített hálózat áram- és feszültségértékeinek kiszámítása visszavezethető egy lineáris egyenletrendszer megoldására.

Felmerülhet a kérdés: mi a helyzet váltakozó áramú lineáris körökben, ahol a generátorok szabályos „szinuszos” váltakozó áramot és feszültséget produkálnak, illetve nem ellenállásokról, hanem impedanciákról beszélünk. A válasz nagyon egyszerű: ha valós számok helyett komplex értékekkel számolunk, akkor pontosan ugyanazon az elven számítható ki a váltakozó áramú kör, mint azt az egyenáramú esetben láttuk.

A képet némileg árnyalja, ha az egyes komponensek között elektromágneses kapcsolat is van. Erről egy későbbi részben részletesen írunk.

Nem lineáris váltakozó áramú körök számítása

Nem lineárisnak tekintünk – legalábbis ebben a cikkben – egy olyan kétpólust, melynek a karakterisztikája (feszültség és áram kapcsolata) nem írható le egy lineáris egyenlettel, így az egész hálózat kiszámítását nem tudjuk visszavezetni egy LER megoldására. Sajnos a vasúti vontatási rendszer tartalmaz ilyen elemeket, ezért a vasúti erőáramú szimulációt nem tudjuk megoldani a fentebb ismertetett egyszerű módszerrel. Innentől nem lineáris egyenletrendszer-ről beszélünk, amire univerzálisan alkalmazható direkt megoldás nincs.

Amennyiben nem találunk direkt módszert, akkor szokás alkalmas numerikus megoldások után nézni, melyek tipikusan *közelítő* eljárások. Itt fontos megjegyezni, hogy a „közelítő” eljárás nem egyenlő a „pontatlan” eljárással, sokkal inkább „tetszőleges pontosságú” eljárást jelent.

Több numerikus megoldás is létezik nemlineáris egyenletrendszerekre. Példaként (nem teljesen véletlenül) álljon itt egy széles körben ismert és alkalmazott módszer.



2. ábra: A nem lineáris felsővezetési hálózat számításának folyamata

Fokozatos közelítés

(*successive approximation*)

Tegyük fel, hogy az egyenleteinket át tudjuk fogalmazni a következőképpen:

$$\begin{aligned}x_1 &= \Psi_1(x_1, x_2, \dots, x_N) \\x_2 &= \Psi_2(x_1, x_2, \dots, x_N) \\&\dots \\x_N &= \Psi_N(x_1, x_2, \dots, x_N)\end{aligned}$$

vagy vektor jelöléssel:

$$\underline{x} = \underline{\Psi}(\underline{x})$$

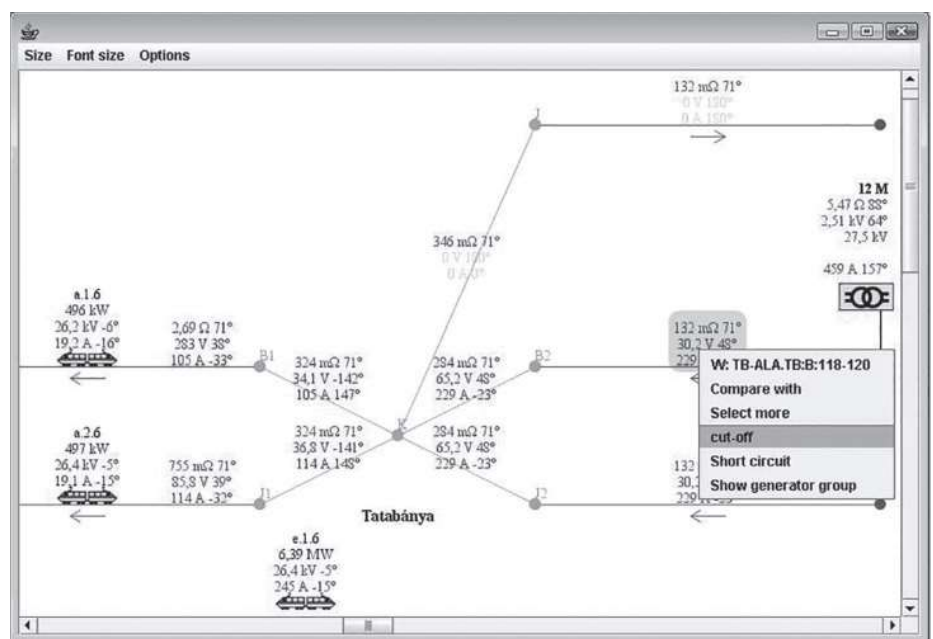
Amennyiben igaz az, hogy az adott vektortérben definiálható egy távolság függvény (M), továbbá $\underline{\Psi}$ függvény kontrakció, azaz $M(\underline{x}_A, \underline{x}_B) > M(\underline{\Psi}(\underline{x}_A), \underline{\Psi}(\underline{x}_B))$, akkor a tetszőleges $\underline{x}_{(0)}$ kezdőérték mellett képzett $\underline{x}_{(k+1)} = \underline{\Psi}(\underline{x}_{(k)})$ sorozat a megoldáshoz fog konvergálni.

Sok mindent le lehet még írni peremfeltételekről, konvergencia mértékéről, egyebekről, de most megelégszünk az alapelv ismertetésével.

A fokozatos közelítés módszere leírva egyszerű. Már csak egy alkalmas $\underline{\Psi}$ függvényt kell találni – nos, ez nem mindig triviális.

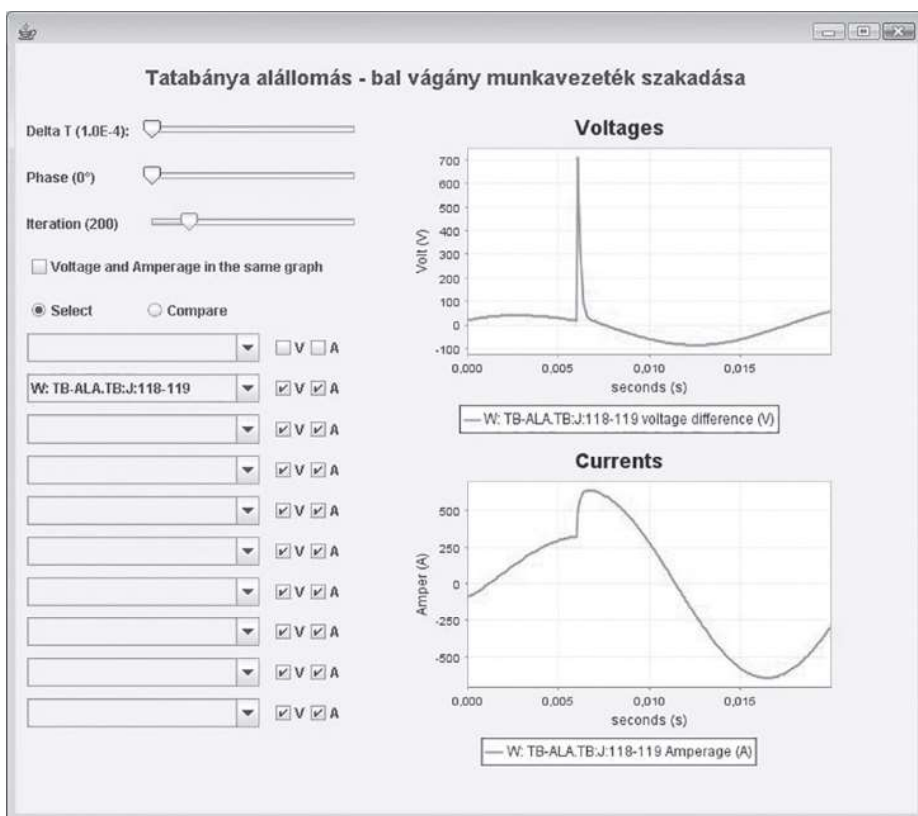
Tegyük fel, hogy jelen sorok írója állítja: tudunk automatikusan megfelelő $\underline{\Psi}$ függvényt generálni a bemenetül szolgáló nem lineáris hálózatokhoz. Szinte azonnal felmerül a kérdés: hogyan bizonyíthatjuk be, hogy nem hibázunk és valóban helyes eredményre jut a programunk? Az esetleges kételyek eloszlatására (és saját megnyugtatónkra) létrehoztunk egy ellenőrző algoritmust, amely szisztematikusan ellenőrzi (1) a Kirchoff törvények teljesülését, (2) az egyes objektumok karakterisztikájának érvényesülését – mindezt természetesen megfelelő abszolút és relatív hibatűrés mellett, ami a mi viszonyaink között lehet akár 1V, 1A, illetve 1%.

Az objektumszintű ellenőrzés a lineáris, illetve nem lineáris elemek karak-

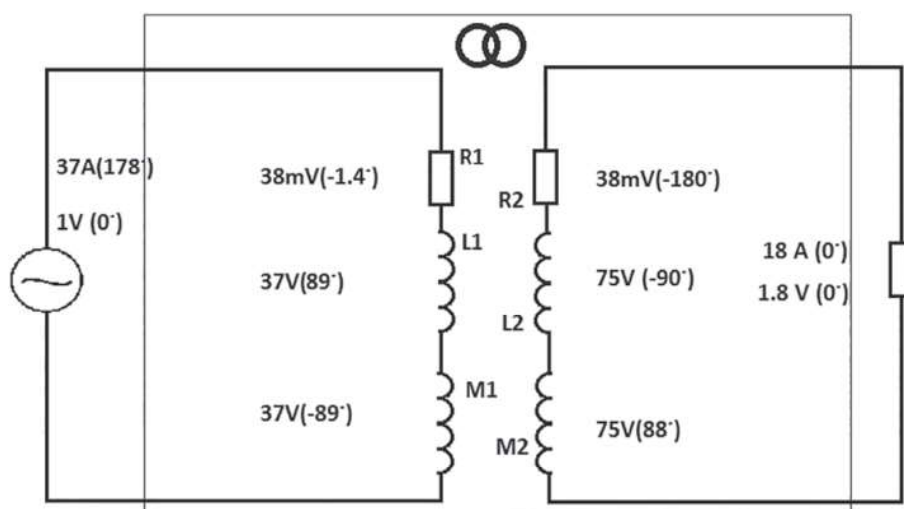


3. ábra: Áttekintő kép a hálózat egy részéről.

Erről a felületről is lehet kezdeményezni bizonyos eseményeket, melyek időbeni lefutását megvizsgálhatjuk a dinamikus szimulátorban



4. ábra: Az előző képen létrehozott, a bal oldali munkavezetékben keletkezett szakadás tranziens következményei számoltathatók ki a dinamikus szimulátorral. Itt a jobb oldali vezető megnövekedett áramát és a feszültségingadozást figyelhetjük meg



5. ábra: Egyfajta transzformátormodell számítása a lineáris áramkör-számítási módszerrel

terisztikájának teljesülését vizsgálja. Az ellenőrző algoritmus futásideje elhanyagolható a nem lineáris megoldó programéhoz képest, így azt automatikusan minden számítás után futtatjuk.

Dinamikus áramköri szimulátor

A fent ismertetett lineáris és nem lineáris áramköri szimulátorok tulajdonképpen mindent tudnak, ami egy statikus, váltakozóáramú állapot kiszámításához szükséges. Nem alkalmasak viszont tranziens jelenségek és felharmonikusok

vizsgálatára. Ezt az űrt tölti be a dinamikus áramköri szimulátor.

Az algoritmussal szemben támasztott elvárás nagyon egyszerű. Van egy hálózatunk, egy t_0 időpontunk és egy kezdőfázisunk, továbbá meghatározott az egyes tagok induló árama és feszültsége. Innentől adott Δt lépésközzel kiszámítjuk egy meghatározott időintervallumban az egyes objektumokon mérhető pillanatnyi áram- és feszültségértékeket.

Teljesülnie kell a korábban említett Ohm- és Kirchhoff-törvényeknek, az induktivitásokra és kapacitásokra jellemző differenciálegyenleteknek (mj. $U_L =$

$(dI_L/dt) \cdot L$, $I_C = (dU_C/dt) \cdot C$), valamint az elektromágneses hatásokat leíró egyenleteknek, továbbá adott időben be kell következnie a vizsgált esemény(ek)nek, amely(ek) hatását vizsgáljuk.

A nem lineáris és dinamikus áramköri szimulátorok kapcsolata

A tranziens jelenségek vizsgálatánál alkalmazott eljárás, hogy első lépésként egy statikus algoritmussal kiszámítjuk a kiinduló állapotot, majd a kiválasztott fázishelyzet alapján legeneráljuk a dinamikus szimulátor T_0 -beli kiinduló adatait.

A program képes arra, hogy tetszőleges váltakozó áramú nem lineáris vagy lineáris hálózatból legenerálja a dinamikus szimulátor bemenő adatait, majd tetszőleges tranziens esemény vizsgálatát elvégezze. A 3. és 4. ábra egy ilyen esetet mutat be.

Elektromágneses kiterjesztés

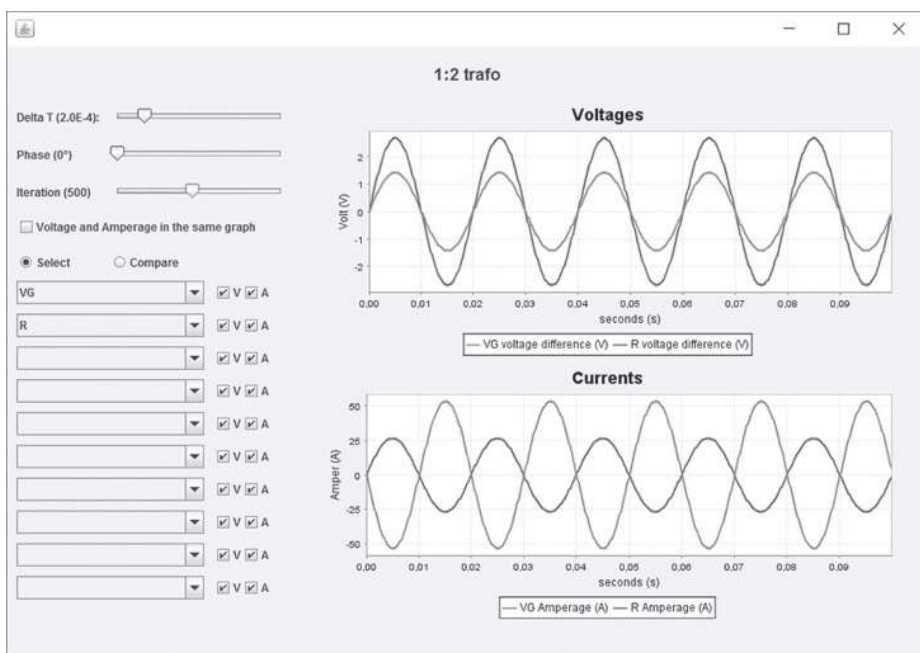
Az elektromágneses kiterjesztés a legfrissebb fejlesztéseink közé tartozik. Egy tipikus áramköri szimulátor csak „atomi” alkatrészekkel tud számolni, melyek a többi objektumhoz kizárólag a kivezetésein kapcsolódnak. Az elektromágneses kiterjesztéssel lehetővé vált, hogy objektumok között a Kirchhoff-törvényken túlmutató, elektromágneses kapcsolat is létrejöjjön. Ezzel lehetőség nyílt arra, hogy egymásra ható távvezetéseket, transzformátorokat, különböző induktív csatlósokat is definiálhassunk a hálózatunkban.

A transzformátorok esetében az induktív kapcsolat két tekercs között viszonylag könnyen számítható. Ugyanez nem annyira triviális légvezetékek között. Ennek megoldására implementálásra került egy könyvtár, mely tetszőleges alakú és átmérőjű vezetékek saját és kölcsönös induktív állandóját képes kiszámítani.

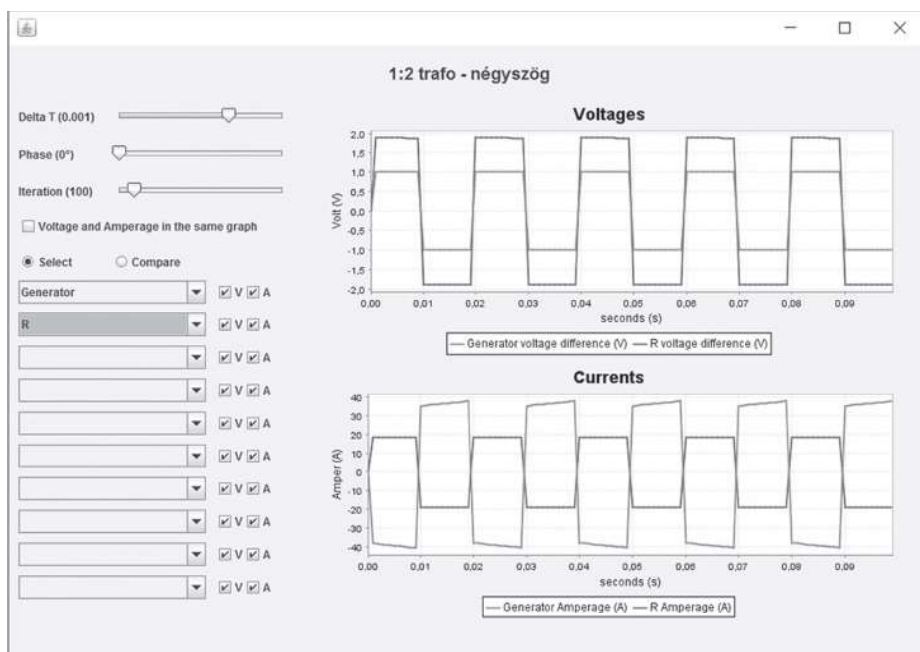
Mire jó mindez? Többek között tetszőleges felsővezetési elrendezés fajlagos impedanciájának kiszámítására, amivel egy későbbi részben foglalkozni is fogunk.

Az elektromágneses kiterjesztés a lineáris, a nem lineáris és a dinamikus szimulációban is elérhető.

Az 5., 6. és 7. ábra egyfajta transzformátormodell háromféle számítását mutatja be. Az első képen a statikus állapotot látjuk, melynek a feszültség- és áramértékeit a lineáris áramkörszámító adta meg. A statikus modellt a szimulátor átkonvertálta egy dinamikus modellé, melynek a bemenő és kimenő ára-



6. ábra: Ugyanannak a transzformátorkapcsolásnak a vizsgálata dinamikus szimulátorral. A grafikonon a bemenő és kimenő áramokat és feszültségeket látjuk



7. ábra: A kapcsolat még mindig ugyanaz, de a sinusos feszültséggenerátort kicseréltük egy négyszögjel generátorra

mának és feszültségének időfüggvényeit a dinamikus szimulátor jeleníti meg a következő ábrán. A harmadik ábrán a generátort kicseréltük egy négyszögjel generátorra. E helyzet korrekt vizsgálata már csak dinamikus szimulátorral lehetséges.

A forgalmi és az erősáramú szimulátorok közötti adatáramlás irányáról

Miért fontos kérdés ez? A hagyományos erősáramú szimulációs vizsgálata-

latoknál a forgalmi szimulátor napló-fájlokban rögzíti a pillanatnyi vonat-dinamikai adatokat, amit később az erősáramú szimulátor feldolgoz. Vagyis a kapcsolat a két fő komponens között egyirányú.

Ezzel szemben, ha a valóságban az áramszedőn mérhető feszültség a névleges érték alá csökken, akkor a villanymozdony nem lesz képes a maximális teljesítményt leadni, vagyis: ha pontos szimulációt szeretnénk, akkor módot kell arra találnunk, hogy a forgalmi szimulátor hozzáférhessen az erősáramú szimulátor eredményeihez. Ahhoz, hogy

ez megvalósulhasson, szükséges a kétirányú adatkapcsolat a két szimulátor között (8. ábra).

Klasztering

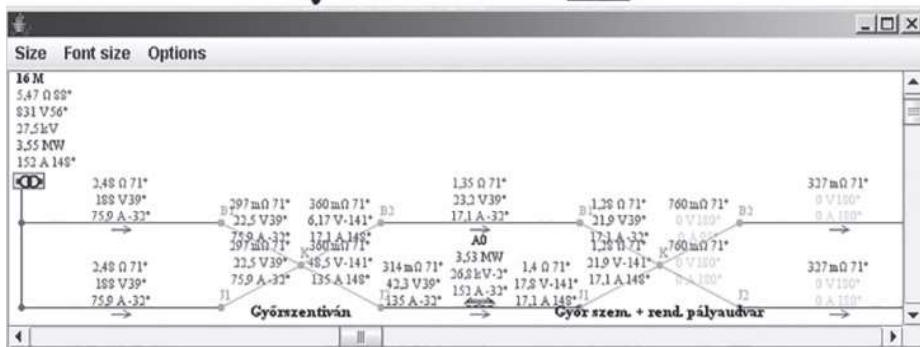
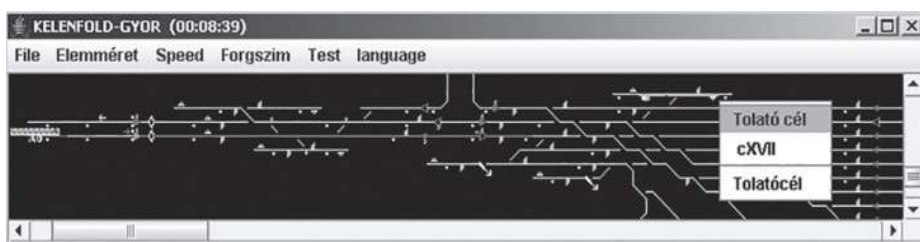
Ez a kicsit sem magyaros szó azt jelenti, hogy egy bonyolult számítási folyamatot egyszerre több processzorra, esetleg számítógépre szétosztunk, így gyorsítva meg a számításokat. Miért van erre szükség a mi esetünkben? Időről időre felmerül a megrendelői igény, hogy egyszerre nagyobb egységeket, teljes országrészeket vizsgáljunk együtt, az eddig szokásos kb. 15–20 állomást + 2–3 alállomást magába foglaló körzetek helyett. Az Axon 6M Kft. elébe ment ennek az igénynek. Tetszőleges számú gépből alkotható szimulációs környezet, melyben úgy a forgalmi szimuláció, ahogyan az erősáramú szimuláció folyamata is szétoszthatók különálló számítógépekre. A különálló számítógépeken futó szimulátorok folyamatosan kicserélik egymás közt a forgalmi és erősáramú adatokat (9. ábra).

Felsővezetéki impedanciát számító eszköz

A szimulátorhoz tartozó segédprogramra akkor van szükség, ha az vizsgálandó felsővezetéki elrendezéshez nem áll rendelkezésre megbízható, mért impedancia adat. A lineáris áramköri szimulátorral és a korábban tárgyalt elektromágneses kiterjesztéssel nagy pontossággal meghatározhatjuk a föld feletti kábelrendszer impedanciáját, amennyiben a sínektől és a föld vezetőképességétől eltekintünk. Mivel ezt nem tehetjük meg, ezért szükséges volt a számítási eljárást tovább finomítani.

A föld és a sínek figyelembevételét nehezíti, hogy sokféle sín és sokféle talaj található Magyarországon, ezért az a döntés született, hogy ezeket összevonjuk és egy vezetővel helyettesítjük. Ennek a „sín-föld-vezetőnek” három lényeges paramétere van: az ohmos- és az induktív ellenállása, valamint a földfelszíntől mért távolsága. Az első kettő jelentősége magától értetődő, a harmadik azért fontos, hogy az egyes felsővezetéki sodronyokkal való kölcsönös induktivitását meghatározzuk.

E három paraméter optimális megválasztásához egy 3 dimenziós, pozitív valós értékű függvényt alkottunk, mely-



8. ábra: Kétirányú adatforgalom a forgalmi és erőáramú szimulátorok között



Forgalmi szimulátor számítógépek



Erőáramú szimulációs számítógépek



9. ábra: Egy szimulációs folyamat tetszőleges számú számítógépre szétoztható, így gyakorlatilag megszűntek a méretbeli korlátok

nek a minimum pontját kellett megke-
resnünk.

A függvény bemenő paraméterei az előbb említett három paraméter. A függvényérték kiszámításához vettünk négy ismert felsővezetési elrendezést, melyekhez megbízható mért vonali impedanciaértékekkel rendelkeztünk. Az egyes ismert elrendezéseket kiegészítettük a földvezetővel, kiszámítottuk a teljes vezetékrendszer impedanciáját és összehasonlítottuk a kapott értéket a mért értékekkel. A valós és a képzetes

részekhez tartozó differenciák négyzetét mind a négy felsővezetési elrendezésnél összeadva megkaptuk a minimalizálandó függvényt (lásd: „legkisebb négyzet-összegek módszere”).

Az optimalizáló algoritmusnak a gradiens módszert választottuk, mely igen alkalmas a többdimenziós, folytonos, differenciálható függvények minimumhelyének megkeresésére. A differenciálhatóság természetesen nem áll fenn, de a függvényt adott helyen polinommal közelítve ez a probléma áthidalható (10. ábra).

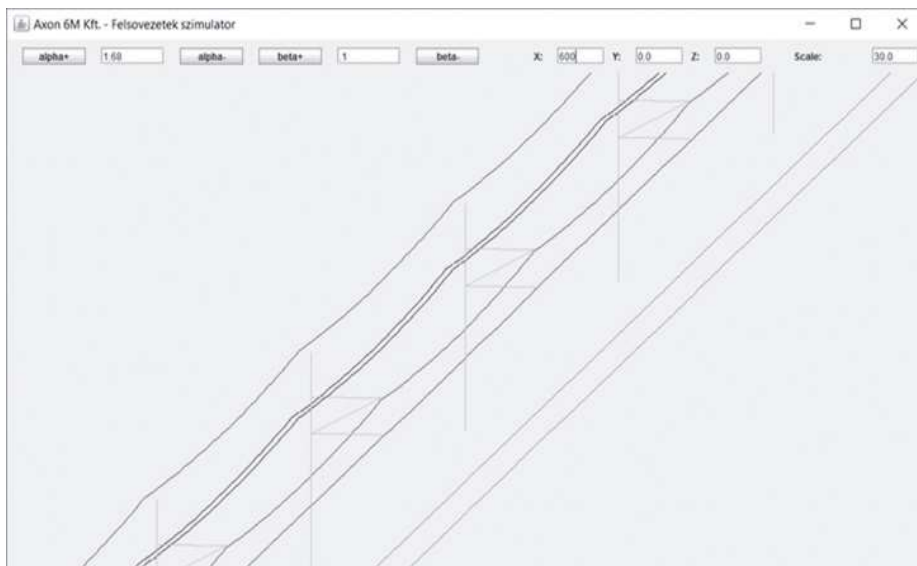
Felsővezetési mechanikai szimulátor

Az erőáramú rendszerhez tartozik egy végeelem-módszerrel működő felsővezetési mechanikai szimulátor. A 3 dimenziós felsővezetési modell alatt tetszőleges számú és fajtájú áramszedőt mozgatva egy 3D kijelzőn megfigyelhetők, mérhetők és regisztrálhatók a keletkező hullámok, maximális erők és kilengések (11. ábra).

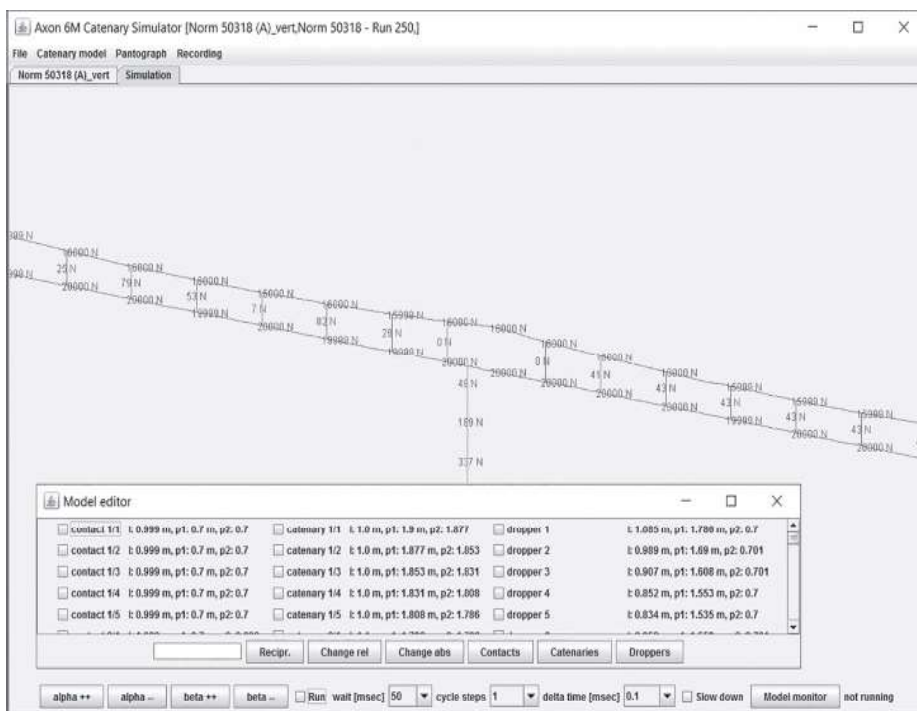
Javaslatok

A következőkben megkísérlem összefoglalni azokat a pontokat, amelyeket a megrendelők hol megkövetelnek, hol nem, tapasztalataink szerint mégis szükségesek ahhoz, hogy egy erőáramú szimulációs vizsgálat megfelelően pontos és informatív eredményt szolgáltatson. Az észrevételek jelentős része a forgalmi szimulációra vonatkozik, ami nem véletlen: pontatlan forgalmi szimulátorral a legjobb áramkörti számítás is csak fals eredményt produkálhat.

- Fontos a forgalmi zavarések vizsgálata. A kissé előregedett magyar vasúton a forgalmat akadályozó műszaki hibákkal még hosszú ideig számolni kell. Ezért legalább a fővonalakon a leggyakoribb forgalmi zavarhelyzetek energetikai hatását vizsgálni szükséges. (pl. egypályás közlekedés, térbiztosító berendezés hibája, behaladás csak „hívóval” stb.). Az utóbbi időben már elő-előfordul, hogy a megrendelő ezt megköveteli, de nem árt hangsúlyozni ennek fontosságát, még ha ez a vállalkozó számára többletmunkát jelent is.
- Az előző ponttól nem teljesen független, hogy a forgalmi szimulátornak képesnek kell lennie a fenti alapvető forgalmi zavarhelyzetek hazai előírások szerinti kezelésére.
- A tolató- és a hívómenetek sebességét a Magyarországon engedélyezett értékekhez kell igazítani. Kezeleni kell tudni olyan magyar specialitásokat, mint a hívásfeloldó jelző.
- Fontos az oldalvédelmi és megcsúszási vágányúti lezárások pontos modellezése. Csak olyan egyidejű meneteket lehessen beállítani a szimulációban, amelyek nem vezetnek ütközéshez.



10. ábra: Az úgynevezett „2 visszavezetős” felsővezetéki elrendezés 3 dimenziós képe a megjelenítőn



11. ábra: A felsővezetéki mechanikai szimulátor működés közben

mulátorban, amelyeket a valóságban is. Itt kell megjegyezni, hogy a hazai és a külföldi előírások e

tekintetben nem feltétlenül esnek egybe. A nem magyar fejlesztésű szimulátorokat csak akkor helyes

használni, ha lehet őket a magyar viszonyoknak megfelelően paraméterezni.

- A vágányút-beállítási idők igazodjanak a valósághoz.
- Szükséges a Magyarországon használatos mozdonyok villamos karakterisztikájának megfelelő pontosságú szimulációja. Ez vonatkozik úgy a hagyományos mozdonyok (pl. V43, V63) jelleggörbéire, mint például a modernebb mozdonyok regeneratív fékező hatásfokára.
- Feltétlenül szükségesnek tartjuk a forgalmi szimulációba bevenni az állomási tolatómozgásokat is, részben ezek energetikai, részben a forgalmi hatásuk miatt.

Úgy látjuk, hogy több hazai cég is igen magas szintre jutott a vasúti szimuláció területén, számos esetben külföldi sikereket is elérve. Ahogyan külföldön sem lehet labdába rúgni olyan szimulációs szoftverrel, ami nem 100%-ban az ottani viszonyokat modellezi, ugyanúgy elvárhatónak tűnik, hogy a magyarországi vállalkozók megjelenítsék a hazai specialításokat, előírásokat a szimulációkban, a megrendelők pedig mindezt megköveteljék.

Összefoglaló

Végezetül nincs más hátra, mint megköszönni azok elszántságát, akik a cikket részben vagy egészben elolvasták. A szerző reméli, hogy sikerült érthetően és talán élvezhetően bemutatni a tárgyalt erőáramú szimulációs rendszert. A javaslatok hangsúlyozottan magánvéleményt tükröznek, amit körülbelül 20 év szimulációs tapasztalata alakított ki.

Stromversorgungssimulator von der Firma Axon 6M GmbH

Der Artikel vermittelt einen Einblick in das „Innenleben“ des Stromversorgung-Simulator-Systems. Die Software beruht auf drei Kalkulationsalgorithmen, einer linearen, einer non-linearen und einer dynamischen Methode. Als Neuentwicklung sind jetzt elektromagnetische Relationen zwischen einzelnen Objekten zu definieren. Auf die Grundmethoden basierend bietet das System eine Vielfalt von Simulationsfunktionen, die auf die Bedürfnisse der MAV maßgeschneidert sind.

Electric supply system simulator of Axon 6M Ltd.

The article gives an inside look at the core modules of the Electric supply system simulator. The simulation processes are based on 3 algorithms – a linear, a non-linear and a dynamic method. A new development makes it possible to define electromagnetic relation between objects. On this basis, the software offers a variety of features specialized for the needs of the MAV.