

# Az Axon 6M Kft. vasúti erőáramú szimulációs rendszere

© Dolhay Márk

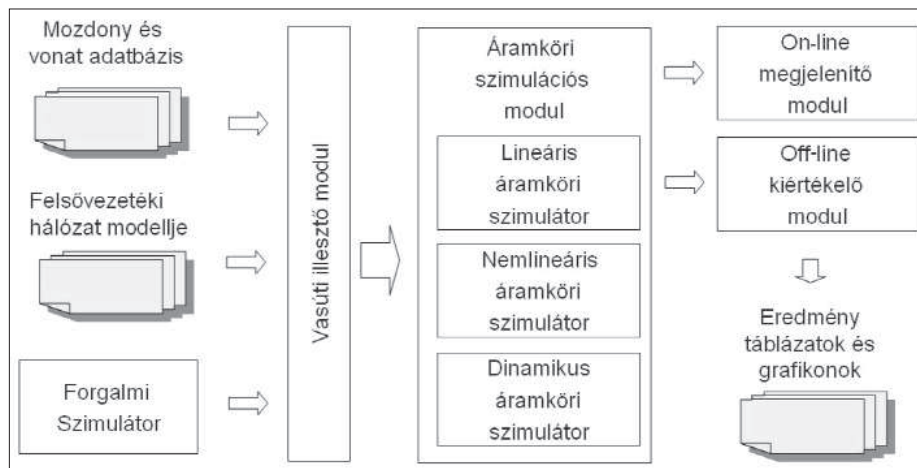
Pillanatnyilag több nagy volumenű vasúti tervezési projekt is folyamatban van hazánkban. Ezek közös tulajdonsága, hogy az elkészített tervek úgy forgalmi, mint erőáramú szimulációs vizsgálattal alá kell támasztani. Ez a tény ráirányította a figyelmet a vasúti szimuláció kérdéskörére. Az Axon 6M Kft. 14 éves gyakorlattal rendelkezik a területen, jelenleg is több ilyen munkában vesz részt. Ebben a cikkben az erőáramú szimulációs rendszer kerül bemutatásra.

## Bevezető

A 2010 második negyedében megjelent, „A Budapest–Győr vonalszakasz forgalmi és erőáramú vizsgálata” című

cikkben többek között említést tettem egy saját fejlesztésű, nem lineáris erőáramú szimulációs rendszerről, érintőlegesen ismertetve annak főbb jellemzőit, szolgáltatásait. A visszajelzésekből arra következtettem, hogy egyrészt az írást sokan elolvasták, másrészt ilyen vagy olyan okból szívesen megtudtak volna többet az ismertetett szoftverről, annak működési elvéről, illetve szolgáltatásairól. Egy szíves megkeresésnek eleget téve 2010 júliusában a TEB központban nagyjából 20 szakember előtt részletesebben is bemutattam a rendszert, továbbá ígéretet tettem arra, hogy egy hiánypótló cikk formájában megválaszolom a felmerülő kérdéseket. Ennek jött most el az ideje. Megpróbálok teljes képet adni a rendszerről, így a korábbi cikkben megjelenteket óhatatlanul kénytelen vagyok részben megismételni.

## A rendszer felépítése



1. ábra: Az erőáramú szimulátor alkotóelemei

**Áramköri szimulációs modul:** A rendszer magját általános célú, áramköri szimulációs algoritmusok képezik.

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

**On-line megjelenítő modul** – a különböző grafikus felületek áttekintést adnak a hálózat egészéről, megjelenítve valamennyi mérhető feszültség- és áramértéket egy adott időpontban vagy ezen értékek egy részének időbeni alakulását egy időtartományban.

**Off-line kiértékelő modul** – egy bizonyos időtartományt átfogó szimulációs folyamat egyes paramétereinek táblázatos vagy grafikus formában történő rögzítését végző eszközök összessége.

## Áramköri szimulációs modul

Ezen modul tartalmazza azon alapvető általános matematikai és áramköri kalkulációs eljárásokat, amelyek a konkrét erőáramú szimulációs feladat megoldásához szükségesek.

### Lineáris áramköri szimulátor

Kezdeként nem tudom elkerülni, hogy röviden visszautaljak a lineáris egyenletrendszer iskolában tanult definíciójára. Javaslom, essünk gyorsan túl rajta.

#### Lineáris egyenletrendszer:

Tegyük fel, hogy van  $N$  darab egyenletünk, ahol az együtthatók valamely számtest (pl. valós számok) elemei, és  $N$  ismeretlenünk ( $x_1, \dots, x_N$ ). Továbbá az egyenletek formája ez:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1N}x_N &= b_1 \\ \dots \\ a_{N1}x_1 + a_{N2}x_2 + \dots + a_{NN}x_N &= b_N \end{aligned}$$

Akitől nem idegen a mátrixalgebra, így is felírhatja:

$$A \cdot \underline{x} = \underline{b},$$

ahol  $A$  egy  $N \times N$ -es mátrix az adott számtest felett,  $\underline{x}$  és  $\underline{b}$   $N$  elemű oszlopvektorok, ahol  $\underline{b}$  a további együtthatókat,  $\underline{x}$  pedig a változókat tartalmazza.

Amennyiben bizonyos – most nem részletezett – matematikai feltételek teljesülnek, egyértelműen meghatározható ( $x_1, \dots, x_N$ ) megoldás az adott számtestben, ami kielégíti az egyenleteket.

Az a jó hír, hogy egyszerű, gyors algoritmusok léteznek a fenti problémára (pl. Gauss-elimináció, LU-algoritmus), ezért nagyon szeretjük azokat a feladatokat, amelyek visszavezethetők egy lineáris egyenletrendszer megoldására (a továbbiakban: LER).

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

Például:

Áramgenerátor egyenlete:

$$I_g = \text{<konstans>}$$

Feszültséggenerátor egyenlete:

$$U_g = \text{<konstans>}$$

Ellenállás egyenlete:

$$U_r - R \cdot I_r = 0 \quad (\text{mj. } R \text{ konstans})$$

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 objektumok (lásd fent),  $N$  további egyenletet pedig a Kirchhoff-törvények szisztematikus alkalmazásával nyerünk (huroktörvény, 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.

### Nem lineáris váltakozó áramú körök számítása

Nem lineárisnak tekintünk – legalábbis ebben a cikkben – egy olyan kétpólust, amelynek a karakterisztikája (feszültség és áram kapcsolata) nem írható le egy egyenessel, azaz az áramára, feszültségére vagy azok kapcsolatára nem tudunk felírni egy lineáris egyenletet, így az egész hálózat kiszámítását nem tudjuk visszavezetni egy LER megoldására.

Először is szeretném tisztázni, miért láttuk szükségesnek nem lineáris szimulátort készíteni. Képzeljünk el egy tehervonatot V63 mozdonnyal, amely egy 8 ezrelékes emelkedőn kapaszkodik, és igyekszik tartani a 80 km/órás sebességet. Ehhez fel kell vennie a hálózathoz 1 MW villamos teljesítményt. Korábbi erőáramú szimulációs vizsgálatoknál, a feszültségesés kiszámításakor a mozdonyok által felvett áramot 25 kV-os feszültséget feltételezve határozták meg, és onnantól lényegében áramgenerátorként számoltak vele. Az áramgenerátor a fenti értelemben lineáris elem, tehát a probléma visszavezethető lenne egy LER megoldására.

Amiért nem ezt a vélhetően könnyebb utat választottuk, az a tény, hogy a többi vonattól és egyéb körülményektől függően a mozdony áramszedőjén üzemszerűen és tartósan eshet 19 kV, de akár 27,5 kV is. Az utóbbi érték az előbbinél 45%-kal nagyobb. Miután a szükséges mechanikai teljesítmény adott, alacsony feszültség esetén a mozdony kénytelen arányosan nagyobb áramot felvenni, hogy tartani tudja a sebességet, ezzel vi-

szont az „áramgenerátoros” módszer nem számol. Vagyis a lineáris eljárás pont az „érdekesebb”, túlterhelés közeli állapotokban válik bántóan pontatlanná.

Némileg leegyszerűsítve a helyzetet mondhatjuk, hogy adott pillanatban a mozdony által felvett áram és a feszültség szorzata állandó, feltéve, hogy a mozdony hatásfoka és  $\cos \varphi$ -je állandó. Természetesen még ez sem teljesen igaz, hiszen egy tirisztoros hajtásnál a gyújtászög kihat az eredő  $\cos \varphi$ -re, de ennek elhanyagolása még mindig jóval kisebb egyszerűsítés, mint az előbbi. (A villany-mozdony nem lineáris modelljéről később lesz szó.) A rossz hír az, hogy ha az egyenletben két változó szorzata szerepel, akkor arra már nem alkalmazható a LER.

Innentől **nem lineáris egyenletrendszerről** beszélünk, amelyre univerzálisan alkalmazható direkt megoldás nincs. Amennyiben nem találunk direkt módszert, akkor szokás egy alkalmas numerikus megoldás után nézni, ezek 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 nem lineáris egyenletrendszerekre. Példaként (nem teljesen véletlenül) álljon itt egy széles körben ismert és alkalmazott módszer.

#### Fokozatos közelítés (successive approximation)

Tegyük fel, hogy az egyenleteinket át tudjuk fogalmazni így:

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

vagy vektorjelöléssel:

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

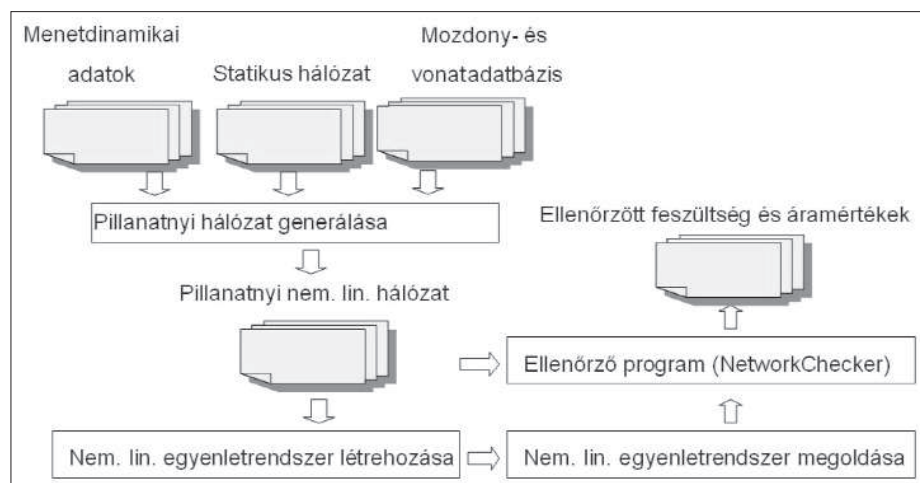
Amennyiben igaz az, hogy az adott vektortérben definiálható egy távolságfüggvény ( $M$ ) és  $\underline{\Psi}$  függvény kontrakció, azaz  $M(\underline{x}_A, \underline{x}_B) > M(\underline{\Psi}(\underline{x}_A), \underline{\Psi}(\underline{x}_B))$ , akkor a tetszőleges  $\underline{x}_{(0)}$  kezdőérték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

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

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

Tegyük fel, hogy jelen sorok írója, aki a szimulátor vezető fejlesztője, azt 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 megnyugtatásunkra) létrehoztunk egy ellenőrző algoritmust (Network Checker), amelynek a működése a következő. Bemenő adatként megkapja a nem lineáris hálózatot, valamint az említett közelítő eljárás által kiszámított feszültség- és áramértékeket. Ezek után szisztematikusan ellenőrzi 1. a Kirchhoff-törvények teljesülését, 2. az egyes objektumok karakterisztikájának érvényesülését – mindezt természetesen megfelelő abszolút és relatív hibatűrés mellett, ami a mi viszonyaink között lehet akár 1 V, 1 A, illetve 1%.

Az objektumszintű ellenőrzés a lineáris, illetve nem lineáris elemek karakterisztikájának teljesülését vizsgálja. A Network Checker futásideje elhanyagolható a nem lineáris megoldó programéhoz képest, így azt automatikusan minden számítás után futtatjuk.



2. ábra: A nem lineáris felsővezetéki hálózat számításának folyamata

### Dinamikus áramköri szimulátor

A fent ismertetett lineáris és nem lineáris szimulátorok tulajdonképpen mindent tudnak, ami egy statikus állapot kiszámításához szükséges. Nem alkalmasak viszont transziens 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  $\Delta t$  lépésközzel kiszámítjuk egy meghatározott időintervallumban az egyes objektumokon mérhető pillanatnyi áram- és feszültségértékeket.

Teljesülnie kell a korábban említett Ohm- és Kirchhoff-törvényeknek, az induktívitasokra és kapacitásokra jellemző differenciálegyenleteknek ( $U_L = (dI_L/dt) \cdot L$ ,  $I_C = (dU_C/dt) \cdot C$ ), illetve adott időben be kell következnie a vizsgált esemény(ek)nek, amelyek hatását vizsgáljuk.

A transziens jelenségek vizsgálatánál ajánlott eljárás, hogy első lépésként a nem lineáris algoritmussal kiszámítjuk a statikus állapotot, majd a kiválasztott fázishelyzet alapján legeneráljuk a dinamikus szimulátor  $T_0$ -beli kiinduló adatait.

### Vasúti illesztő modul

E modul feladata az áramköri szimulációs algoritmusok megfelelő adatokkal való ellátása. Ehhez pillanatnyi menetdinamikai adatokat, a hálózat statikus modelljét, valamint a vonatadatbázist használja fel.

### Vasúti forgalmi szimulátor szerepe az erősáramú szimulációban

Számításainkhoz szükségünk van menetdinamikai adatokra (nagyjából: adott időpontban melyik vonat hol tart és mekkora a pillanatnyi teljesítményigénye). Ezeket a vasúti forgalmi szimulátortól kapjuk meg.

A vasúti forgalmi szimulátor egy komplex szoftvereszköz, amely élethűen modellezi a vonatok mozgását, a kültéri elemek, a biztosítóberendezés, valamint a menetrendi vezérlő időbeli és logikai működését, ezzel lehetővé téve különböző forgalmi helyzetek valós idejű vagy off-line vizsgálatát. E program működésének egyik mellékterméke a felsővezetési számításokhoz szükséges menetdinamikai adatbázis.

### Felsővezetési hálózat statikus modellje

A dinamikus adatokon túl természetesen szükség van a felsővezetési hálózat modelljére is. A MÁV-tól kapott iránymutató alapján ez tartalmazza az állomásokban található hosszláncot, az állomás-

si megkerülő vezetékeket, vonali tápvezetéket. Továbbá mindennel, ami az állomás területén fogyasztóként működik (váltófűtés, felsővezetéről üzemelő biztonsági energiaellátás, biztosítóberendezés, állomáson tartózkodó vonatok, szelvények előfűtése stb.), úgy kell számolnunk, mintha azok az állomás középpontjában kapcsolódnának a hálózathoz.

### Mozdony- és vonatadatbázis

A pontos számításokhoz szükség van mind a villanymozdony, mind a kocsik villamos paramétereire (segédüzemi teljesítmény, hatásfok,  $\cos \varphi$ , maximális áramfelvétel, az egyes kocsikra eső teljesítmény, például fűtés). Megjegyzendő, hogy a korábban ismertetett nem lineáris, numerikus eljárás kezelni tudja a teljesítmény vagy áram függvényében változó hatásfok- vagy  $\cos \varphi$ -értékeket, amennyiben erről megbízható adatok állnak rendelkezésre. Ellenkező esetben a „legkedvezőtlenebb” értékkel célszerű számolni.

### On-line megjelenítő modul

A vasúti erősáramú szimulátor kétfajta kezelőfelületet nyújt a felhasználónak. Az egyik a teljes hálózatról ad áttekintést, adott időpontban megmutatva az egyes objektumokon mérhető feszültség- és áramértékeket, ezzel lehetőséget adva, hogy a felhasználó akár saját maga is utánaszámoljon az eredményeknek. További funkciója ennek a felületnek, hogy bizonyos objektumokhoz kapcsolódó kezelések lehessen végezni rajta, például

rövidzárat, szakadásokat vinni a hálózatba, egyúttal átmenetni a pillanatnyi hálózatot a dinamikus szimulátorba, hogy egy eseményhez kapcsolódó transziens jelenséget megvizsgáljunk (3. ábra).

Egy másik megjelenítő modul a transziens vizsgálatokhoz kapcsolódik. Az ablak bal oldalán lehet beállítani a futtatás paramétereit (kezdő fázis,  $\Delta T$ , iterációk száma), illetve a megjelenítendő mennyiségeket. A jobb oldalon pedig a kért grafikonok látszanak (4. ábra).

### Off-line kiértékelő modul

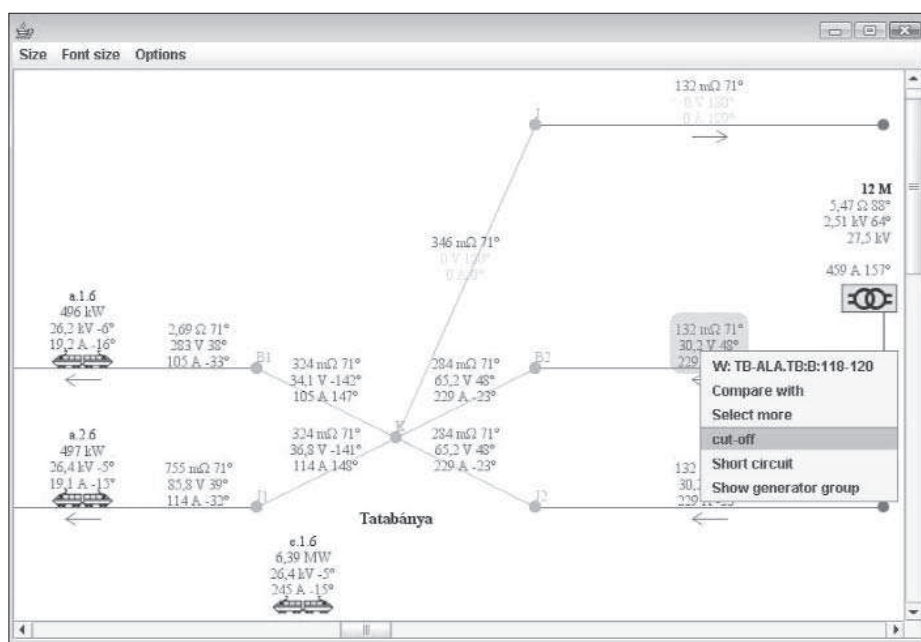
A fentiekben bemutatásra került, miképpen áll össze egy szimulációs folyamat, illetve mely elvek szerint történnek a számítások. Itt essen néhány szó arról, milyen formában készülnek a kimenetek. Az eredményfájlok formája tipikusan a megrendelő igényeit követi.

### Transzformátorteljesítmény-vizsgálat

A transzformátor teljesítménydiagramja egy táblázaton belül mutatja meg az átlagteljesítmény alakulását 5, 15 és 120 perces időablakkal (5. ábra).

A transzformátor pillanatnyi teljesítménye a mértékadó túlterhelés környezetében a transzformátorvédő kapcsolások paraméterezéséhez nyújthat segítséget (6. ábra).

Fontos kérdés lehet a  $\cos \varphi$  időbeli alakulása a betápláló transzformátor felől nézve. Az illusztrációként szolgáló ábrán az eredő  $\cos \varphi$  értékét követhetjük egy 24 órás időszakra vetítve. „Érdekessége” a képnek, hogy a vizsgált ütemes menetrendben az éjszakai órákban a V43 és



3. ábra: Áttekintő kép a hálózat egy részéről. Erről a felületről is lehet kezdeményezni bizonyos eseményeket, amelyek időbeni lefutását megvizsgálhatjuk a dinamikus szimulátorban

V63 mozdonyok által húzott tehervonatok domináltak, míg napközben inkább a modernebb – jobb  $\cos \varphi$ -vel rendelkező – mozdonyoké volt a főszerep. A  $\cos \varphi$  alakulása ennek megfelelően éjszaka sokkal kedvezőtlenebb, mint nappal (7. ábra).

#### Feszültségesés-vizsgálat

A szabvány szerint csak rövid időre csökkenhet a 25 kV-os felsővezetékben 19 kV alá a feszültség, 17,5 kV alá pedig egyáltalán nem. A MÁV mozdonyain levő védő áramkörök ennél még szigorúbbak, ezért egy pillanatra sem csökkenhet 19 kV alá a mozdony áramszedőjén mérhető feszültség. A szimulátor kiértékelő modulja

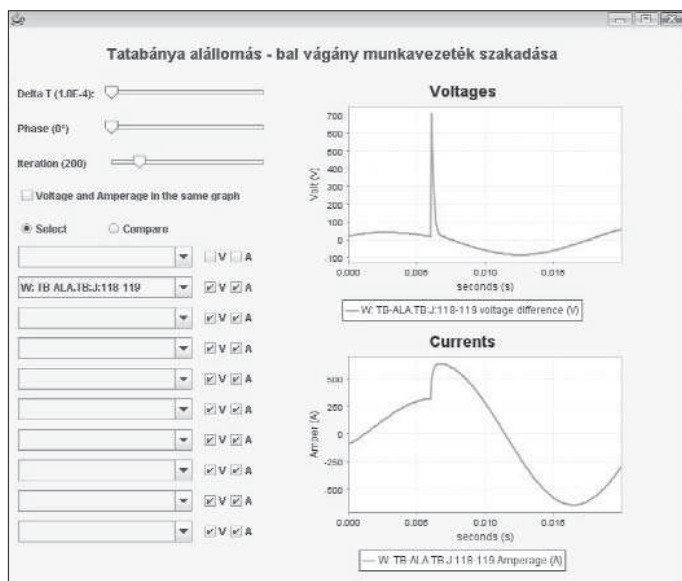
egy 24 órás vizsgálat alatt tetszőleges szakaszokra meghatározza az ott mérhető minimális feszültségeket, és azokat táblázatos formában prezentálja, így adva támpontot annak meghatározására, mely felsővezetéki szakaszok igényelnek további fejlesztést.

#### Maximális áramerősségek naplózása

A kiértékelő modul feljegyzi minden egyes vezető szakaszra az ott mért maximális áramerősséget egy 24 órás szimulációs folyamatra vetítve. Több okból is fontos tudni, hogy adott vezetőkön mekkora maximális áram mérhető normál és szükségüzemi táplálási esetekben. A szimulátor kiértékelő modulja egy 24 órás vizsgálat alatt valamennyi vezetőre automatikusan kigyűjti a maximálisan mérhető áramokat, és azokat egy táblázatban rögzíti.

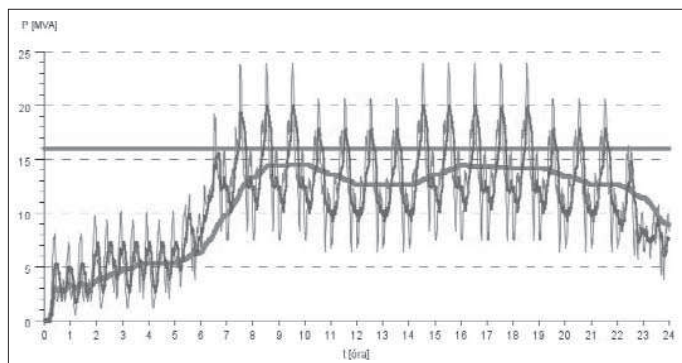
#### Összefoglaló

Végezetül nincs más hátra, mint megköszönni azok elszántságát, akik a cikk végére jutottak. A szerző reméli, hogy sikerült érthetően és talán élvezhetően bemutatni a tárgyalt erőáramú szimulációs rendszer működési elvét és képességeit.



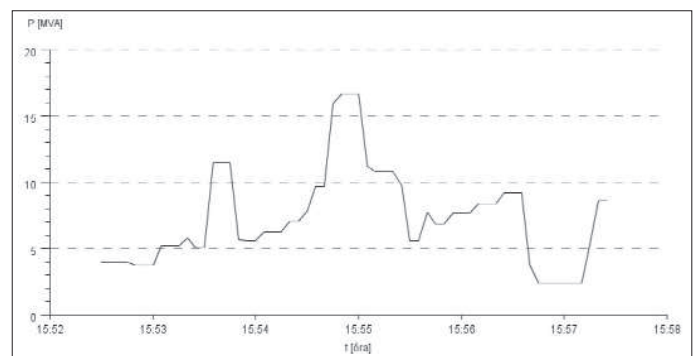
4. ábra:

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

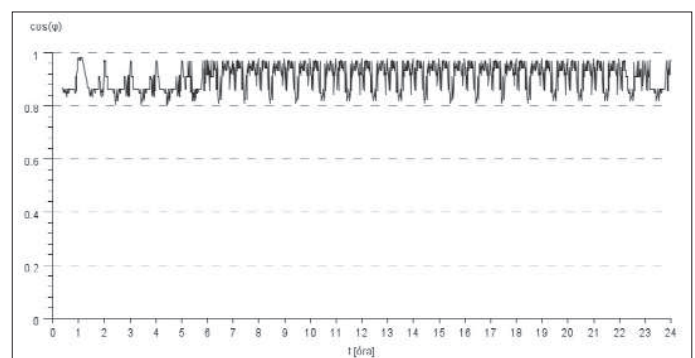


5. ábra:

Transzformátor teljesítménydiagramja



6. ábra: Mértékadó túlterhelés diagram



7. ábra

#### Stromversorgungssimulator von der Firma Axon 6M GmbH

Der Artikel vermittelt einen Einblick in das „Innenleben“ des Stromversorgungssimulatorsystems. Die Software beruht auf drei Kalkulationsalgorithmen, eine lineare, non-lineare und eine dynamische Methode. 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. On this basis, the software offers a variety of features specialized for the needs of the MAV.