

Időzítesi problémák kezelése kritikus kommunikációs hálózatokban

Kún Gergely

kun.gergely@kvk.uni-obuda.hu

orcid: 0000-0003-0572-5177

Híradástechnika és Infokommunikáció Tanszék, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Óbudai Egyetem, 1034 - Budapest, Bécsi út 96/b.

KTI – Közlekedéstudományi Intézet, 1119 - Budapest, Than Károly u. 3-5.

Wührl Tibor

wuhrl.tibor@kvk.uni-obuda.hu

orcid: 0000-0002-7522-3511

Híradástechnika és Infokommunikáció Tanszék, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Óbudai Egyetem, 1034 - Budapest, Bécsi út 96/b.

KTI – Közlekedéstudományi Intézet, 1119 - Budapest, Than Károly u. 3-5.

Az információs és kommunikációs technológiák gyors fejlődése jelentős hatást gyakorol a kritikus infrastruktúrákat kiszolgáló adathálózatokra, mely rendszerek közé tartoznak a közlekedést támogató megoldások is. Kutatásunk a vasúti közlekedést kiszolgáló biztonságkritikus kommunikációs hálózatokra fókuszál. A hagyományosan hosszú élettartamú és nagy megbízhatóságú vasútspecifikus eszközöket és rendszereket egyre inkább gyorsan fejlődő, folyamatosan változó digitális technológiák váltják fel. Ez az átállás jelentős műszaki és rendszerszintű kihívásokat eredményez a megbízhatóság, a rendelkezésre állás és a tervezett élettartam fenntartása szempontjából. A vasúti alkalmazások speciális követelményei miatt sok, széles körben használt kommunikációs technológia és protokoll vagy alkalmatlan, vagy csak korlátozottan alkalmazható a biztonságkritikus infrastruktúrákban, melyek megértéséhez ismerni kell a vasúti környezetben alkalmazott megbízhatósági kritériumokat és feltételeket. A magas megbízhatóság eléréséhez szükséges a hálózatot fenyegető kockázatok szisztematikus elemzése is. A releváns szabványok foglalkoznak a lehetséges kockázati tényezőkkel és azok kezelésével, de nem teljes körűen, így további kutatások szükségesek a jövőbeli vasúti kommunikációs hálózatok magas megbízhatósági szintjének biztosításához.

Kulcsszavak: vasút, kritikus, kommunikáció, késleltetés, szinkronizáció, megbízhatóság

1. Bevezetés

A korszerű vasúti rendszerek biztosító berendezései, valamint a vonatbefolyásoló rendszerek komponensei is digitális infokommunikációs infrastruktúrát használnak a kommunikációra. Ezen és hasonló ipari rendszerek működésbiztonságának megvalósítása korunk jelentős kihívásai közé tartozik.

A vasúti közlekedés teljes automatizálását és biztonságának növelését az Automatic Train Control (ATC) rendszerek fejlesztése szolgálja. Ezek a korszerű, számítógép-alapú vasút-felügyeleti integrált rendszerek nemcsak a pályaelemek, hanem a járművek és a forgalom teljes körű irányítását és felügyeletét is lehetővé teszik. Az ATC rendszerek világszerte számos országban működnek, különböző változataik léteznek és számos vasúti és metróhálózatokon találhatók meg. [1]

Európában az European Train Control System (ETCS) kiépítése zajlik, mellyel – a megvalósított szinttől függően – valós időben nyomon követhető a vonatok pozíciója, állapotadatai, továbbá a közlekedésükre vonatkozó utasítások is továbbíthatók, ezzel biztosítva a vasúti közlekedés akár teljes körűen automatizált, biztonságos és hatékony működését. A GSM-R (Global System for Mobile Communications – Railway) biztosítja az ETCS által igényelt vezetéknélküli kommunikációs infrastruktúrát, amely a modern vasúti forgalomirányítás egyik legfontosabb eleme. A GSM, bár kiforrott és robusztus technológia, napjainkban viszont már elavultnak tekinthető. Az 5G mobil kommunikáció már a jelen és a közeli jövő technológiája, amely a vasúti kommunikáció következő generációját I képviseli: FRMCS (Future Railway Mobile Communication System) néven lesz a GSM-R utódja. [2,3]

2. Vasúti kommunikációs rendszerek

2.1. Számítógép alapú biztosítóberendezés

A vasúti biztosítóberendezések fejlesztésének és alkalmazásának elsődleges célja mindig a vasúti közlekedés biztonságának és hatékonyságának növelése. A számítógép alapú biztosítóberendezés (Computer Based Interlocking - CBI) rendszere a biztosítóberendezési funkciókat megvalósító központi szerverből, a terepi eszközökből és az ezeket összekötő hálózathoz áll. A leggyakrabban CBI-nek nevezett szerver az adott területet kiszolgáló biztosítóberendezés rendszer központja.

A számítógépes biztosítóberendezések általában két részből állnak: az egyik rész a biztonsági funkciókat valósítja meg, rájuk vonatkozó követelmények közel hibamentes működést írnak elő (SIL4 szint). A másik rész az úgynevezett „nem

létfontosságú” funkciókat valósítja meg, mint például a kézi beavatkozó eszközök, állapotjelzők, visszajelző monitorok üzeme.

A biztosítóberendezés központjában a pályamenti biztosítóberendezések információinak gyűjtése, kiértékelése történik, és beavatkozásokat hajtanak végre az előírt és biztonságos vonatközlekedési követelményeknek megfelelően.

Egy vasúttársaságnak rendszerint több biztosítóberendezés központja van, melyek egy-egy terület ellátásért felelősek. Az egyes területek biztosítóberendezéseinek szerverei össze vannak kötve egymással információcsere céljából, de a fő feladatuk a saját régiójuk biztonságának és folyamatos üzemének biztosítása. [1]

2.2. Központi Forgalmellenőrzés

A Központi Forgalmellenőrzés (KÖFE) nagyobb forgalmi körzetek, csomópontok, illetve hosszabb vonalszakaszok gépi úton megtámogatott, központból történő forgalmi állapotellenőrzését valósítja meg, de a forgalom irányítása helyi kezeléssel történik [4].

2.3. Központi Forgalomirányítás

A Központi Forgalomirányítással (KÖFI, vagy CTC - Centralized Traffic Control) lehetővé válik a vasúti járművek mozgásának távoli felügyelete, irányítása egy központi vezérlőhelyről. A központi forgalomirányító rendszer az általa felügyelt területen belül irányítja a vonatközlekedést és a tolatási műveleteket. A rendszer a biztosító berendezéseken keresztül biztosítja a központi vezérlést. A KÖFI elsődleges célja a vasúti közlekedés hatékonyságának és rugalmasságának növelése.

A KÖFI rendszer egy központi forgalomirányító központból áll, ami összeköttetésben áll tipikusan az állomási biztosítóberendezésekkel. A forgalomirányító személyzet számítógépes felületen keresztül figyelemmel kíséri a vonatok mozgását, módosíthatja azokat a biztosítóberendezéseken keresztül a jelzők és váltók állapotának változtatásával. Az információátvitel történhet többféle fizikai közegen és technológiával. Jelenleg a korszerű IP-alapú rendszerekre való áttérés a jellemző és ez kutatásunk fő irányvonala is.

A KÖFI rendszer decentralizált és autonóm tervezési elvekre épül, elosztott számítási és vezérlési technológiát alkalmaz. Ennek köszönhetően képes térben és időben azonosítani a vonatközlekedés és a tolatási műveletek során fellépő problémákat, valamint a szükséges műveleti korrekciókat a tervezett ütemezéshez igazítva végrehajtani. Ezáltal biztosítja a közlekedési és tolatási folyamatok hatékony és összehangolt vezérlését.

2.4. Egységes Európai Vasúti Közlekedésirányítási Rendszer

Az ERTMS (European Railway Traffic Management System), azaz Egységes Európai Vasúti Közlekedésirányítási Rendszer célja, hogy megvalósítsa az országhatárokon átívelő egységes vonatfelügyeletet és irányítást minden aspektusból.

Az ERTMS egyik része az ETML (European Traffic Management Layer), mely a forgalommenedzsment és forgalomirányítási feladatok megoldását jelenti.

A másik rész az EIRENE (European Integrated Railway Radio Enhanced Network), ami a rádiós kapcsolat megoldását jelenti a fedélzeti és a pályamenti eszközök között. Ez jelenleg a GSM-R rendszert jelenti, és jövőbeli tervek szerint az 5G alapú FRMCS lesz.

A harmadik része az ETCS, amit a következő rész tekint át.

2.5. Európai egységes vonatbefolyásoló rendszer

Az egy rendszerbe integrált rendszerelemek komplex szolgáltatásokat nyújtanak a vonatirányítás számára. Ezt igyekeznek megvalósítani Európában az ETCS (European Train Control System) automatikus vonatbefolyásoló rendszer, ami jelenleg is kiépítés alatt áll. Ennek a rendszernek az elsődleges feladata legkülönbözőbb üzemi helyzetekben a vonatforgalom felügyelete és biztonságának garantálása.

2.6. ETCS kiszolgáló rendszerelemek

2.6.1. Balíz, LEU

A balíz egy olyan eszköz, amely elektromágneses elven működik, és adatokat továbbít a felette elhaladó mozdony számára. A balízek a sínek között, fixen vannak elhelyezve. A kiolvasást tekintve teljesen passzív eszközök, a bennük eltárolt információ továbbításához szükséges energiát az elhaladó mozdony balíz olvasó egysége (Balise Transmission Module - BTM) szolgáltatja induktív módon. Az átadott adatok többek között lehetnek például kilométerszelvényre, haladási adatokra, fékezési parancsokra, jelzőképekre vonatkozó adatok.

A balízek a pontszerű vonatbefolyásolás alapvető elemei, ami részben a később ismertetett ETCS Level 1-hez tartozik.

Alapvetően kétféle balíz létezik: fix és vezérelt balízek:

- A fix balízkok csak statikus adatokat tudnak továbbítani. Általában a pontos helymeghatározáshoz szükséges információk továbbítására használják őket.
- A vezérelt balízkok változó adatokkal dolgoznak, melyeket a LEU, avagy pályamenti elektronikus egység (Lineside Electronic Unit) vezérli. A LEU a biztosítóberendezés és a vezérelt balíz közötti információcserét valósítja meg. Pl. térköz határon a jelzőképet és az új menetengedélyt továbbítja a szerelvény számára. Jellemzően az ETCS 1-es szintjén használják, mivel ez a működési mód kizárólag pontszerű vonatbefolyásolást valósít meg.

Az ETCS 2-es és 3-as szinteken rádiós interfészen keresztül juttathatók el a vonatbefolyásoláshoz szükséges fix és változó információk a járművekre. A balízkok feladata ezeken a szinteken már nem a változó jelzési képek átvitele, ellenben a pontos helymeghatározásban veszik ki a részüket, mint egyfajta stabil, fix kilométerkövek.

2.6.2. GSM-R

Az ETCS 2-es szint bevezetésével a vonat és a pályamenti berendezések, illetve központok közötti folyamatos kommunikáció iránti igény vált szükségessé. Ennek kiszolgálására olyan rádiós technológiára volt szükség, amely nagy területek lefedésére alkalmas, megbízható, robusztus és cella alapú. A választás akkor egyértelműen a polgári alkalmazásban már jól bevált GSM technológiára esett. A GSM-R (Global System for Mobile Communications – Railway) speciálisan vasúti célú cellás földi mobil rádiórendszer, melynek szolgáltatási területe lefedi a kiépített ETCS 2-es és 3-as szintű vonalszakaszok teljes hosszát. Ez a rendszer a GSM mobiltelefon-technológia vasúti adaptációja. Célja, hogy akár világszinten egységes, megbízható és biztonságos kommunikációs csatornát biztosítson a vasúti személyzet és a vasútirányítás részére. Jelenleg elsősorban az ETCS rendszer kommunikációs hordozószolgáltatása, mivel biztosítja az adatátviteli csatornát a vonat és a földi infrastruktúra közötti kommunikációhoz, amely elengedhetetlen a vonat pozíciójának követéséhez, az automatikus sebességszabályozáshoz, menetengedélyek kiadásához és további biztonsági funkciókhoz.

A GSM-R alapvető célja volt, hogy helyettesítse a korábbi, nemzetközi szinten nem egységes és általában inkompatibilis vasúti rádiórendszereket. Ennek köszönhetően lehetővé teszi az egységes kommunikációt a különböző országok vasúti hálózatai között is. Alkalmazása az európai országokban kötelező a főbb nemzetközi vonalakon TEN-T (Trans-European Transport Network), de találunk GSM-R rendszert Európán kívül Kínában, Indiában, Dél-Afrikában, Ausztráliában és a Közel-Keleten is [5,6,7].

A GSM-R fokozott biztonsági protollokkal rendelkezik, amelyek biztosítják, hogy a kommunikáció megbízható és zavartalan maradjon, még nagy sebességű vonatok esetében is. A rendszer támogatja a folyamatos és valós idejű kommunikációt egyrészt a vonatok (mozdonyok) és a pályamenti biztosító és vonatvezérlő rendszerek, másrészt a vasúti személyzet között. [8]

Rádiós lefedettségnek szakadásmentesnek kell lenni, mert a rádiós rendszer feladata, hogy az adott területet kiszolgáló RBC (Radio Block Center) központ és a közlekedő, ETCS képes, vonatok között folyamatos adatkapcsolatot tartson fent. A kapcsolat megszűnése esetén – rögzített időzítés letelte után – előre definiált reakcióra (pl. vészfékezésre) kényszerítik a vonatot.

A GSM-R rádióhálózat RBC-kből, bázisállomás-vezérlőkből és bázisállomásokból áll. Ez a pályamenti és a fedélzeti berendezések közötti kommunikáció hordozószolgáltatása.

2.6.3. Future Railway Mobile Communication System

A GSM-R az 1990-es évek technológiájára épül, és bár robusztus és megbízható, kezd már elavulni. Adatátviteli képességei (kis adatsebesség és viszonylag magas késleltetés) korlátozzák az újabb vasúti alkalmazások támogatását.

Jelenleg már egyértelműen az 5G-alapú FRMCS tekinthető a jövő vasúti mobilkommunikációs rendszerének, amely a GSM-R rendszer helyébe lép. Az FRMCS átviteli képességei jelentősen meghaladják a GSM-R technológia képességeit. Az EU tervei szerint hamarosan kezdődhet a bevezetése. A szabványosítás már elért egyféle készültségi fokot és a rendszer tesztelését már több helyen megkezdték, ugyanakkor továbbra is kihívást jelent a vasúti kommunikációra jellemző, magas megbízhatósági követelmények maradéktalan teljesítése.

Átmeneti fejlesztési irányvonalnak vehetjük a 4G alapú megoldást, azaz az LTE-R (Long Term Evolution – Railway) rendszerét, ami rádiós szempontból részben kompatibilis a későbbiekben megvalósuló 5G alapú hálózatokkal. [9]

2.6.4. Rádiós irányítóközpont

Az ETCS 2-es és 3-as szintjében jelenik meg a rádiós irányítóközpont (Radio Block Center – RBC), ami a vasúti automatikus vonatbefolyásoló rendszer pályamenti központi berendezése. Egy pályahálózat-működtető társaságnak több RBC-je is van (hasonlóan a CBI-khez), számuk az RBC-k kapacitásának függvénye, hogy mennyi vonatot képesek egy időben nyilván tartani (tipikusan 50-100, de ez sok tényezőnek a függvénye). Egy RBC kapcsolatban van a szomszédos RBC-kkel, és összeköttetésben lehet az adott területért felelős biztosítóberendezés szerverével (CBI), a központi forgalomirányítással (CTC – Centralized Traffic Control) és esetleg más elemekkel.

Az RBC-k feladata többek között a szerelvények menetengedélyeinek kezelése, vezérlőparancsok generálása a biztosítóberendezés és a pályamenti eszközök információinak felhasználásával, és ezek rádiós továbbítása a GSM-R hálózaton keresztül a fedélzeti berendezés felé.

2.6.5. Az ETCS szintjei

Az ETCS rendszer bevezetése fokozatosan történik, mindenhol a korábbi, különböző nemzeti rendszerek mellett működik. Az ETCS rendszernek szolgáltatási képességei szerint három szintje van. Jelenleg a kettes szint használata és kiépítése zajlik a legtöbb helyen. Európában – és az országokon belül is – vannak vonalak, ahol már kiépítésre került a rendszer valamelyik szintje és vannak vonalak, ahol még nem. [2,10] A következő részekben összefoglalás olvasható az egyes szintek főbb tulajdonságairól.

1. szintű ETCS

Az ETCS rendszer 1-es szintje (L1 – Level 1) csak úgynevezett pontszerű vonatvezérlést tud megvalósítani, ez a szint a hagyományosnak mondható biztosítóberendezéseken alapul.



1. ábra

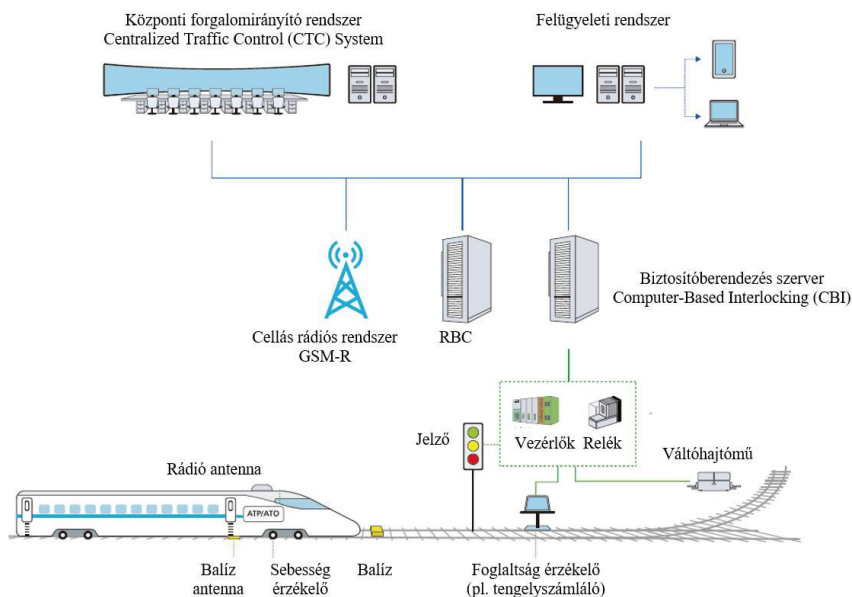
Az 1-es szintű ETCS csak pontszerű vonatvezérlést valósít meg [11]

Az 1. ábrán egy lokálisan megvalósított kommunikációs példa látható, amelynek során az aktuális jelzőkép a vonatra kerül továbbításra; az ábrán megjelenik egy LEU, valamint balízek is, mint az ETCS 1-es szintjének jellemző rendszerelemei. Ebben a változatban korszerű kommunikációs adatátviteli módok nem alkalmazottak, így ez nem képezi kutatsunk fókuszát.

2. szintű ETCS

A 2. szintű ETCS (ETCS L2) is hagyományos biztosítóberendezéseken alapul, azaz a vonatérzékelést továbbra is sínáramkörökkel vagy tengelyszámlálókkel valósítják meg. A biztosítóberendezés kapcsolatban áll az RBC-vel, ami működési területén belül kezeli a vonatok menetengedélyeit, automatizálva a közlekedésüket. A menetengedélyek, vezérlési- és állapotinformációk a GSM-R hálózaton keresztül jutnak el a szerelvények mozdonyaihoz. Állapotinformációk

terén a legfontosabb a vonatok helyzete. Az ETCS L2 képes mozdony részben a meghaladott balizokból kiolvasott adatokból állapítja meg a helyzetét és továbbítja az RBC felé. A mozgásparamétereket a balizokból kinyert helyinformációk mellett a mozdonyban található odométer, GPS vevő, gyorsulásmérő, giroszkóp is szolgáltatja. A 2. ábra egy tipikus felépítésű ETCS L2 rendszert szemléltet.



2. ábra

2-es szintű ETCS rendszer blokkvázlata [12]

3. szintű ETCS

Az ETCS 3. szintje a jelenlegi legmagasabb szintű szolgáltatásokkal bíró változat. Ezzel a rendszerrel a rádiós vonatvezérlés teljes mértékben megvalósul: a folyamatos sebességfelügyelettől kezdve, az elméletben jó ötletnek tűnő mozgó blokkos rendszerig (fix térközös megoldás helyett). Ezen a szinten lehetőség van a jelzőberendezések teljes elhagyására is (a mozdonyvezető is elméletileg feladat nélkül marad). A fedélzeti elemek számára új feladatként jelenik meg a vonatintegritás ellenőrzése, ezzel új követelményszint jelenik meg a fedélzeti kommunikáció terén, mivel a mozdonyra kapcsolt vagonok is belépnek a fedélzeti kommunikációba. és folyamatos kommunikációs kapcsolatban állnak a mozdonyban kialakított integritást felügyelő rendszerelemmel. Ezzel a pályamenti eszközök száma csökken, így a fenntartási költségek terén is jelentős megtakarítás érhető el. Jelenleg ez a szint még nem került üzemzerű alkalmazásba sehol. Legnagyobb kihívás ennél a szintnél a vonatintegritás infrastruktúrájának kialakítása, továbbá a pályamenti-vonat kommunikációs hálózat olyan szintű

megbízhatósága, hogy a pályamenti eszközök elhagyása és ezzel együtt az emberi felügyelet megszüntetése ne okozza a biztonsági színvonal csökkenését. Pilot projektek vannak e téren Európa szerte. [13]

3. Megbízható hálózatok megvalósítása

Vasúti alkalmazások esetében sok, egymástól elkülönülő rendszer együttműködése valósítja meg a különböző feladatokat. Ennek oka, hogy az egyes funkciók fontossága, a rájuk vonatkozó követelmények különbözőek, rendszerint eltérő biztonsági követelményekkel is rendelkeznek.

3.1. Redundáns adatátvitel megvalósítása

Kommunikációs téren, ha folyamatos és megbízható adatátvitelt szeretnénk biztosítani, bizonyos fokú redundancia lesz a kézenfekvő megoldás, amivel egy meglévő rendszer megbízhatósága is jelentősen növelhető.

A redundancia nem feltétlenül jelenti az adott eszközök duplikációját. Hálózati kommunikáció esetében a duplikáció kiváltható a legtöbb esetben gyűrű topológiával, ami nagymértékben képes emelni a rendelkezésre állást és költséghatékony megoldás is. Gyűrűs szerkezet esetén, ha a gyűrűben egy kapcsolat megszakad, az adott csomópont a másik irányban továbbra is elérhető marad. Bár a hibásan működő kapcsoló és a hozzá kapcsolódó eszközök persze kiesnek a kommunikációból, de a hálózat többi része és eszközei tovább működhetnek és kommunikálhatnak. A gyűrűs topológiákban az alkalmazott kapcsolási protokollnak képesnek kell lennie a hálózatban lévő hurok kezelésére, és hiba esetén a megfelelő és gyors helyreállítási képessége a fontos.

Biztonságkritikus rendszerekben, milliszekundum nagyságrendben, vagy az alatt kell a helyreállítási időnek maradni. A PRP (Parallel Redundancy Protocol) és a HSR (High-availability Seamless Redundancy) protokollok [14,15] ezt az elvárást maradéktalanul teljesítik, és zero helyreállítási időt produkálnak.

3.2. A késleltetési kérdések

Az egyre nagyobb sebességű vasutak esetén a kommunikációs hálózat késleltetésének nagysága egyre fontosabb kérdés. Létfontosságú, hogy a valós pályainformációk, sebességadatok és menetengedélyek időben a fedélzeten legyenek, mert egy vonat egy másodperc alatt akár több 10 métert is haladhat. A szükséges adatok késedelmes megérkezése felesleges vészmegállításhoz, rosszabb esetben balesethez is vezethet.

Napjaink kihívása, hogy a korábban alkalmazott szinkronizált időosztásos hálózatok helyett az összes kommunikációs hálózat tekintetében csomagkapcsolt hálózatok kerülnek kiépítésre. Csomagkapcsolt környezetben az átviteli késleltetés nagysága nem nyilvánvaló, mivel az a csomagok változó kezelési időigényein alapulnak. Ezzel szemben a régi szinkron rendszerekben ez a paraméter csak egy egyszerű konstans érték volt. A vasúti kommunikációs hálózatok esetében kulcsfontosságú tényező, hogy olyan hordozó szolgáltatások és protokollok kerüljenek kiválasztásra, amelyek képesek kielégíteni és folyamatosan biztosítani az időzítési követelményeket. [2]

Egy hálózat determinisztikus viselkedését leginkább az átviteli idő előre való kiszámíthatósága és garantálása adja. Ezt a kritikus hálózatok esetén mindenképp biztosítani kell. Azonban a hálózat determinisztikussága időbeli skálán nem csak az adott technológia által nyújtott alacsony késleltetésértéktől függ, hanem beletartozik ebbe a kapcsolatfelépítéshez szükséges idő, a torlódások és útválasztásokhoz szükséges időtartamok is.

A szabvány által kezelt késleltetést érdemes tovább bontani, hogy a kommunikációban résztvevő részrendszerekre megfelelő követelményeket lehessen megfogalmazni.

Tehát az alapvető üzenet-hibák közül a késleltetést több összetevő eredőjeként kell kezelni és részrendszerekre bontva meghatározni az alábbi késleltetési veszélyforrások hatását és lehetőség szerinti csökkentésének módjait:

- kapcsolat kiépítési idő, vagy késleltetés,
- átviteli késleltetés,
- forgalmi túlterhelésből eredő késleltetés,
- linkhiba, hálózati hiba esetén helyreállási idő,
- mobilitásból származó késleltetések (pl. handover).

Például az ETCS 2-es szint esetén a T_NVCONTACT paraméter a mozdony fedélzeti berendezése és a pályamenti Radio Block Centre (RBC) közötti kommunikáció szüneteinek maximálisan megengedett idejét határozza meg. Ez azt jelenti, hogy a mozdony által fogadott legutóbbi üzenet időbélyege és a fedélzeti aktuális idő közötti különbség nagyobb, mint ezzel a paraméterrel meghatározott érték, akkor a fedélzeti rendszernek végre kell hajtania a pályamenti rendszer által az M_NVCONTACT paraméterben meghatározott reakciót (pl. vészfékezést vagy fékezést). Az időlimit értéke nincs meghatározva a vonatkozó subsetben [16], ez Magyarországon, a nemzeti előírások szerint, 18 másodperc.

Ez időtartam alatt – a legrosszabb esetet feltételezve – a kommunikációs rendszernek képesnek kell lennie az átviteli csatorna újbóli felépítésére. Ennek

során a GSM-R rendszernek biztosítania kell a rádiós csatornát, valamint az RBC felé irányuló kapcsolatot az aggregációs hálózaton keresztül.

3.2.1. Késleltetés

Magas késleltetés értékek problémát jelentenek a valós idejű alkalmazáskor, ahol a haladó vonat számára fontos menetengedélyek, forgalmi utasítások időben kell, hogy megérkezzenek. Magas értékű késleltetéseket a hálózati torlódások, az útválasztás magas protokoll rétegbeli megvalósítása, az algoritmusok lassúsága okozhat. Hálózati hiba esetén a redundáns útvonal kiépítése miatti késlekedés is lehet számottevő.

3.2.2. Késleltetés ingadozás

Késleltetés ingadozás (jitter) a csomagalapú IP hálózatok alapvető tulajdonsága, ha csak hálózati réteg alap funkcionalitását tekintjük. A best-effort jellegű csomagátvitel esetén nincs garancia a csomagok időbeli kezelésére, időben egyenletes továbbítására.

3.2.3. Hálózati szinkronizáció

Időszinkron hibák, azaz a hálózati elemek közötti időszinkron megszakad, az eszközök eltérő időt látnak, emiatt az időkritikus műveletek, a prioritáskezelés, stb. nem megfelelően működik.

A kifutóban lévő SDH (Synchronous Digital Hierarchy) hordozó hálózatok ezekre a problémákra mind megoldást nyújtottak, de az Ethernet-IP alapú hálózatok többszolgáltatásai, rugalmas konfigurálhatósága miatt egyre inkább kiszoruló félben vannak. Az SDH hálózatok elemei szigorú időszinkronban voltak egymással, központi óra ütemében dolgozott a hálózat összes eleme, ezzel megbízható alapot adott az időkritikus alkalmazásoknak. Stabil hálózati kapcsolatot biztosított redundanciával, gyors helyreállítással, alacsony késleltetéssel és jitterrel, amik miatt speciális esetekben még a fentiek ellenére sem kerültek leváltásra.

Az időszinkron megléte az FRMCS esetében alapvető fontosságú. Ez az 5G alapú mobil hálózati technológia rádiós időosztásos rendszere precíz időszinkron nélkül képtelen működni [17,18,19].

Az időszinkron kezelése nagyon fontos probléma az Ethernet-IP alapú hálózatokban, mert alapvetően a hálózat jellege aszinkron, viszont a determinisztikus működéshez fontos az időszinkron megléte, ami egyébként a korábbi generációs szinkron SDH hálózatokban meg is volt. Ha időszinkronizációs hiba van jelen, az eszközök nem ugyanazt az időt „látják”, belső óráik eltérnek egymástól, aminek hatására rosszul időzítik az üzeneteket.

A hálózati elemek szinkronizációs eltérései fokozatosan alakulhatnak ki, ha az időalap lassan, de folyamatosan egyre inkább eltér a referenciaértéktől. Ez az időbélyegek eltolódását, jitter növekedést vagy más időzítési inkonzisztenciákat okozhat. Az ilyen eltérések különösen az időkritikus kommunikációs és vezérlési folyamatokban veszélyesek. Ezért volt jó a klasszikus SDH rendszerekben, hogy a szinkronitást a hálózat működőképessége magában hordozta. Jelenleg ezt a PTP (Precision Time Protocol) és egyre inkább a TSN (Time-Sensitive Networking) megoldások szolgáltatják az aszinkron alaptulajdonságú IP alapú átvitel felett.

4. Következtetések

Az előírások és szabványok a legtöbb esetben nem konkrét technológiák használatát írják elő, hanem csak minőségi mutatókat, tervezési irányelveket adnak meg. Napjainkban a technológia gyors fejlődése miatt a biztonsági irányelveket megfogalmazó szabványokba sok esetben nem is érdemes konkrét technológiákat belevenni, mert hamar elavulttá válhatnak. Erre példa a GSM-R előírása az európai tagországoknak, ami jelenleg módosítás alatt áll és következőként az FRMCS-t írja elő a vasúti rendszerek kötelezően használandó rádiós hordozószolgáltatásként. Erre a kivételre abból a szempontból van szükség, hogy Európa-szerte a globális átjárhatóságot biztosan meg lehessen valósítani.

A cikkben áttekintésre kerültek jelenlegi és jövőbeli kommunikációs technológiák és megoldások, amelyek alkalmasak lehetnek az egyre szigorúbb követelmények teljesítésére. A technológiaváltás ugyanakkor új kihívásokat is felvet, amelyekkel a korábbi, egyszerűbb megoldások esetében még nem kellett számolni.

Bemutatásra kerültek a vasúti kommunikációs hálózatokat érintő teljesítménymutatókat befolyásoló műszaki jellegű veszélyforrások. Az áttekintés célja a hibatípusok és a kritikus rendszerelemekre jelentett kockázatok pontosabb azonosítása volt, amely alapot nyújt a nagy megbízhatóságú vasúti kommunikációs architektúrák kialakításához. Ennek során kiemelten fontos a redundancia és szinkronizáció megfelelő tervezése, valamint a késleltetés minimalizálása, hiszen ezek a tényezők fontos szerepet játszanak a kritikus adatok megbízható és időben történő továbbításában a biztonságkritikus rendszerekben.

Köszönetnyilvánítás

Köszönjük az Óbudai Egyetemnek és a Közlekedéstudományi Intézetnek kutatásunk támogatását.

Források

- [1] P. Bacsoni, “Vonali biztosítóberendezések”, MÁV Szolgáltató Központ Zrt. Baross Gábor Oktatási Központ, Budapest, 2019, ISBN 978-963-9852-34-1
- [2] MÁV Feltétfüzet, „Az ETCS L1 és L2 pályamenti alrendszerére vonatkozó alkalmazási követelményeire, 0.1.1. verzió, MÁV P-5600, 2008.
- [3] B. Jóvér, “ETCS, Az Egységes Európai Vonatbefolyásoló Rendszer”, MÁV Szolgáltató Központ Zrt. Baross Gábor Oktatási Központ, Budapest, 2006
- [4] G. Tarnai: “Távvezérlés, KÖFE, KÖFI”, BME Közlekedésautomatikai Tanszék, 2012
- [5] „GSM-R Frequencies India” Chapter 8 Mobile communications – GSM-R. Indian Railways. May 2012.
- [6] Australian Railway Association, „Australian Rail Industry Submission to the Minister for Broadband, Communications and the Digital Economy 1800 MHz Spectrum Licenses”. March 2019.
- [7] Lin Junting¹, Dang Jianwu¹ and Min Yongzhi. „NGCTCS: Next-generation Chinese Train Control System”, Journal of Engineering Science and Technology Review, pp. 122- 130, 2016.
- [8] D. Maros, D. Tokody, Zs. Tiszavölgyi, „A GSM-R rendszer jelene és jövője”, Vezetékek világa 2015, pp. 17-21. 2015.
- [9] K. Smith, “Beyond GSM-R: the future of railway radio”, International Rail Journal. Simmons-Boardman Publishing Inc., 2017. https://www.railjournal.com/in_depth/beyond-gsm-r-the-future-of-railway-radio/ (letöltve: 2024.09.11.)
- [10] D. Kurhan, et al., “Development of the High-Speed Running of Trains in Ukraine for Integration with the International Railway Network”, Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 19, No. 3, pp. 207-218, 2022
- [11] Kapsch, “European Railway Traffic Management System - ERTMS”, White paper, 2020.
- [12] Hollsys whitepaper, “ERTMS/ETCS LEVEL 2 Solution”, Beijing, China, 2023. <https://www.hollsys.com/cms/show-754.html> (letöltve: 2024.06.23.)
- [13] E. Kretschmer: „ETCS Hybrid Level 3”. In: Jochen Trinckauf, Ulrich Maschek, Richard Kahl, Claudia Krah (Hrsg.): „ETCS in Deutschland”. 1. Auflage. Eurailpress, Hamburg 2020, ISBN 978-3-96245-219-3, S. 351–360.
- [14] IEC 62439-3:2021, “Industrial communication networks – High availability automation networks - Part 3: Parallel Redundancy Protocol (PRP) and High-availability Seamless Redundancy (HSR)”, 2021.

- [15] M. Ostertag, “Seamless Redundancy with PRP and HSR”, 2022.
- [16] SUBSET-026, „System Requirements Specification”, Chapter 3, Principles, REF :SUBSET-026-3, ISSUE:4.0.0, 05/07/2023
- [17] K. Mészáros, T. Wühlrl, P. J. Varga, S. Gyányi, R. Kovács, M. T. Baross, and G. Kún, “RF kutatások a Kandón, kiemelten 5G vonatkozásában”, in XXXVIII. Kandó Konferencia 2022 - Absztrakt kötet, 2022, pp. 53–53.
- [18] R. Kovács, P. J. Varga, G. Kún, S. Gyányi, T. Wühlrl, and K. Mészáros, “5G hálózatok strukturáltsági vizsgálata” in XXXVIII. Kandó Konferencia 2022 - Absztrakt kötet, 2022, pp. 46–46.
- [19] K. Gergely, J. V. Péter, W. Tibor, W. Dóra, G. Sándor, N. László, and K. Róbert, “ ‘Opened’ or ‘Closed’ RAN in 5G”, in IEEE 20th Jubilee World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics SAMI (2022), 2022, pp. 347–351.