

Vasúti biztosítóberendezések tervezésének formális modellezése Petri-háló alkalmazásával: vágányutak azonosítása T-invariánsok felhasználásával¹

Farkas Balázs* Dr. Bartha Tamás**

***Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 1111 Stoczek u. 2. (e-mail: farkas.balazs@kjk.bme.hu).*

****Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 1111 Stoczek u. 2. (e-mail: bartha.tamas@kjk.bme.hu).*

Absztrakt: A vasúti közlekedés “veszélyes üzem”, melynek során a forgalomlebonyolítás hatékony és biztonságos irányítására a vasúti biztosítóberendezések szolgálnak. Az állomási biztosítóberendezések tervezése jelenleg többnyire manuálisan történik, amit több eszköz is támogat. Az elkészült tervek ellenőrzésére nincsen kidolgozott, szisztematikus módszertan. Írásunkban meghatároztuk a tervezési folyamat lépéseit, melyek közül az elsőt, a vágányutak azonosítását dolgoztuk ki Petri-háló felhasználásával. A vágányutak azonosítása a Petri-háló modell strukturális tulajdonságaira vezethető vissza, ezért a megoldáshoz T-invariánsokat használtunk. A vágányhálózatot elemi objektumokra bontottuk, melyeket egyenként modelleztünk. A vágányúti elemekhez definiált objektumok modelljeiből felépítettünk egy esettanulmányt, amelynek segítségével bemutattuk a vágányutak azonosításának egy lehetséges módját. Eredményeink a menetterv és az elzárási terv elkészítéséhez használhatók fel, illetve segítségével meghatározhatók a foglaltságérzékelésbe bevonandó szakaszok is.

¹ EFOP-3.6.3-VEKOP-16-2017-00001: Tehetséggondozás és kutatói utánpótlás fejlesztése autonóm járműirányítási technológiák területén – A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.



1. BEVEZTÉS

A vasúti közlekedésben – a többi közlekedési alágazathoz hasonlóan – számos veszélyeztetés jelenik meg. A nagy sebességgel mozgó nagy tömegű járművek balesete esetén jelentős károk keletkezhetnek. Ezért a veszélyekből származó kockázatok ellen valamilyen módon védekezni kell. Erre műszakilag elsősorban vasúti biztosítóberendezések alkalmazásával van lehetőség.

Míg nyílt vonalon jellemzően csak két vonat utolérése és szembeközlekedése ellen kell védekezni, vasútállomások területén – elsősorban a vasúti kitérők (váltók) alkalmazásának szükségességéből – számos újabb veszélyeztetés adódik (pl. oldalirányú veszélyeztetés, váltó helytelen állása, stb.). Az ezekből bekövetkező balesetek megelőzése miatt az állomások területén csak lezárt vágányúton lehet közlekedni. Egy lezárt vágányút azt jelenti, hogy a biztosítóberendezés olyan függőségeket valósít meg, amelyek alkalmazásával egy menet csak abban az esetben engedélyezhető (egy jelző csak akkor állítható szabad állásba egy vonat számára), ha az biztonságosan leközlekedtethető. Pontosabban, ha a menet által igénybe venni kívánt vágányúti elemek (pl. váltók) megfelelő állásban állnak és a menet közlekedésének idejére ebben az állásukban rögzítve vannak. Ezen kívül az oldalirányú veszélyeztetések kizárása is a vágányutakhoz kapcsolódik.

Az állomási vágányutak meghatározása a biztosítóberendezési tervezők feladata. A biztosítóberendezési tervek (vagy grafikus vagy táblázatos formában) tartalmazzák a vágányutakat és a hozzájuk kapcsolódó függőségeket. A táblázatos függőségi tervek két alapvető formája a menetterv és az elzárási terv. Előbbi tartalmazza az egyszerre megengedhető és az egymást kizáró vágányutakat, míg utóbbi az egyes vágányutakhoz tartozó váltóállásokat szemlélteti.

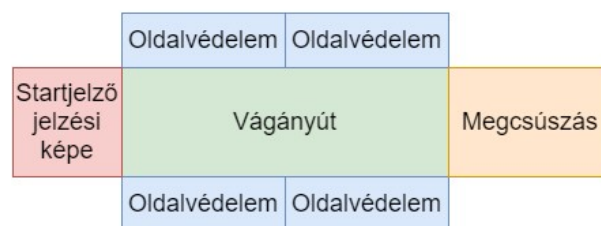
A vasúti biztosítóberendezések tervezését számos jelenleg is elérhető eszköz segíti (Magyarországon pl. a FEDIT [1], [2], Németországban pl. a ProSig [3]). Az eszközök által létrehozott tervek végső ellenőrzése jelenleg jellemzően továbbra is manuálisan történik. Kutatásunk célja, hogy az ilyen módon elkészített tervek ellenőrzésére egy szisztematikus tervellenőrzési (verifikációs) módszertant dolgozzunk ki a biztosítóberendezési tervek készítő mérnökök számára. Az általunk javasolt módszertan segítségével – a szükséges korlátozások és megszorítások figyelembevételével mellett – lehetőséget teremtünk az elkészített tervek megfelelőségének teljeskörű ellenőrzésére. Célkitűzéseink között szerepel, hogy a módszertan egyes lépéseit automatizált formában is elérhetővé tegyük a hatékonyabb tervellenőrzés elősegítése érdekében. Jelen írásunkban a biztosítóberendezés tervezés egyik alapvető lépését, azaz a vágányutak azonosítását mutatjuk be.

A vasúti biztosítóberendezések tervezési lépései egy jól meghatározott folyamat alkalmazásával hajthatók végre. Kutatásunk során felismertük, hogy a tervezés során megoldandó feladatok egymásra épülnek, ugyanakkor a legtöbb lépés egymástól függetlenül is kezelhető. A

biztosítóberendezési tervezési folyamat során a következő részfeladatok különböztethetők meg:

1. a bejárando vágányutak azonosítása,
2. oldelvédlem keresése (a vágányutak elágazási pontjainak védelme más járművekkel való ütközés elkerülése érdekében),
3. megcsúszások kezelése (a célpont mögötti meghatározott hosszúságú vágányszakaszok lefoglalása a menet számára arra az esetre, ha az nem tudna megállni a célpont előtt),
4. startjelző jelzési képeinek meghatározása (a bejárt vágányút geometriájától, illetve a következő jelző lehetséges jelzési képeitől függően – sebességjelzési rendszer esetében),
5. vágányúti optimalizálások a hatékony forgalomlebonnyolítás érdekében:
 - a. alap- és kerülővágányutak kiválasztása [1],
 - b. megcsúszások optimalizálása [2],
 - c. egyéb optimalizálási célok.

Jelen írásunkban az 1. pont szerinti részfeladat egy lehetséges megoldását ismertetjük formális módszerek alkalmazásával. Az egyes tervezési lépések egymásra épülését az 1. ábra szemlélteti. A vágányutak meghatározása egy útvonalkeresési feladat, amire a tervezésben használt algoritmusok jelenleg is képesek. Ezek az eszközök azonban szisztematikus hibákkal terhelték lehetnek. A problémát formális módszerekre visszavezetve és minősített eszközökkel megoldva, az eredmények helyesnek fogadhatók el.



1. ábra. A vasúti biztosítóberendezési tervezés lépéseinek egymásra épülése egy példa állomáson

Jelen írásunkat a kapcsolódó kutatási eredmények összefoglalásával kezdjük (2. fejezet). Ezután a 3. fejezetben ismertetjük a kutatás elméleti háttérét: a formális módszereket és az esettanulmányhoz alkalmazott Petri-hálókat, illetve releváns tulajdonságaikat, felvázolva a megoldás menetét. A 4. fejezetben bemutatunk egy esettanulmányt, amely segítségével szemléltetjük a vágányutak azonosításához definiált módszert. Az 5. fejezetben a modellezést, a 6. fejezetben pedig az eredmények felhasználását mutatjuk be. Végül az 7. fejezetben összefoglaljuk a kutatás során

megszerzett tapasztalatokat és a lehetséges kutatási irányokat.

2. KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Számos kutatás foglalkozik vasúti infrastruktúra vagy vasúti biztosítóberendezések modellezésével. Jelenleg népszerű kutatási terület egy adott infrastruktúrán az optimális forgalom megszervezése, a késések hatékony kezelése. Ezekhez az elemzésekhez elegendő a vágányutak egyszerűsített modellezése, ahogy azt [4] szerzői is tették.

Emellett számos kutatás foglalkozik a biztosítóberendezések belső logikájának matematikailag, formális módszerekkel történő leírásával. Az elérhető eszközök összehasonlításáról, alkalmazhatóságáról az [5] cikkben közöltek összefoglaló elemzést. Egy korábbi kutatásunkban Petri-hálókkal és időzített automatákkal, az UPPAAL eszköz alkalmazásával modelleztük és modellellenőriztük a vágányútbeállítás és -feloldás folyamatait [6]. Egy komplexebb vágányhálózat, több funkcióra kiterjedő vizsgálatát mutatja be [7]. Az előbbieken hivatkozott kutatások a biztosítóberendezések dinamikus működését vizsgálják.

A biztosítóberendezési tervek ellenőrzése formális módszerek segítségével jelenleg kevésbé képezi kutatások fókuszát. A [8] kutatás véges automatákat és NuSMV szimbolikus modellellenőrzőt használ biztosítóberendezési tervek verifikációjára. Az egymást kizáró vágányutakat vonatok közlekedésének modellezésével deríti fel. Táblázatos formájú biztosítóberendezési tervek színezett Petri-hálókkal történő modellezését, illetve verifikációját mutatják be a [9] és [10] cikkek. A vágányutak beállítását, feloldását és az oldalvédelem függőségeit szintén haladó járművek modellezésével ellenőrzi a szerző. Az előbbi eredményekhez képest kutatásunkban a tervek ellenőrzése statikus módon történt, vonatmozgásokkal nem foglalkoztunk.

A [11] kutatás az állomási biztosítóberendezési tervek formális módszerekkel (NuSMV és SPIN modellellenőrzőkkel) történő vizsgálatának korlátait elemezte. Megállapították, hogy közepes, illetve nagyobb méretű állomások esetén az állapotter robbanás problémája miatt az ellenőrzés nehézkéssé válhat. Állapotter robbanás alatt azt értjük, hogy összetett rendszerek (pl. elosztott rendszerek) esetén a nagyszámú állapot és lehetséges állapotátmenet miatt a modellezett rendszer állapottere olyan méretűre növekszik, hogy annak teljes bejárása nem lehetséges a jelenleg elérhető számítási teljesítmény mellett. Jelen írásunkban azonban csak strukturális tulajdonságok ellenőrzésével foglalkoztunk, így az állapotter robbanás problémájával nem kellett számolnunk.

A [12] cikkben bemutatásra került egy a gyakorlatban is használható, biztosítóberendezési tervek ellenőrzését lehetővé tevő eszköz, a RailCOMPLETE. Az eszköz CAD alapú tervek formalizálásával, statikus módon ellenőrzi a tervek szakterületi követelménynek való megfelelését. A vágányutakhoz kapcsolódó tervezési feladatokon (pl. oldalvédelem) kívül egyéb követelmények teljesülését is vizsgálták, pl. minimális szakaszhosszok, bejárati jelző távolsága az első váltótól, stb.

3. MÓDSZERTAN

A formális módszerek olyan diszkrét matematikai és matematikai logika alapú módszerek, amelyek segítségével a modellezett rendszer teljes állapottere bejárható, és így a vizsgált feltételek teljesülése a rendszer valamennyi állapotában, teljeskörűen ellenőrizhető [13].

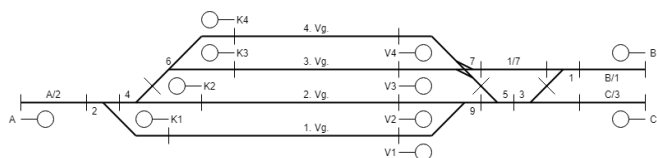
A Carl Adam Petri, német matematikus által kifejlesztett Petri-háló egy speciális formalizmus [14]. Alkalmas elosztott rendszerek kompakt módon, de szemléletesen, átláthatóan történő modellezésére. A Petri-háló irányított, súlyozott, páros gráfok, melyekben a két típusú csomópontot – a helyeket és tranzíciókat – irányított élek kötik össze. Egy él mindig csak két különböző típusú csomóponttal lehet kapcsolatban. A modellezett rendszer állapotát a tokeneloszlás (az egyes helyeken található tokenek száma) határozza meg. Egy állapotváltozást egy tranzíció eltűnése hoz létre, aminek során az összes bemeneti élsúlyának megfelelő tokenet vesz el a bemeneti helyekről, a kimeneti helyekre pedig a kimenő élek súlyának megfelelő mennyiségű tokenet helyez el. Egy tranzíció tüzelhet (engedélyezett), ha az összes bemeneti helyén az élsúlyoknak megfelelő számú token található. Az engedélyezett tranzíciók közül a választás véletlenszerűen történik. Az egyszerű Petri-hálóknak számos kiterjesztése létezik, melyek alkalmassá teszik ezt a formalizmust összetettebb problémák modellezésére is.

A Petri-háló egy speciális, a modell kezdőállapotától független strukturális tulajdonsága a T-invariáns. A T-invariánsok olyan tranzíció halmazok, melyek eltűnése a hálót ugyanabba az állapotba (tokeneloszlásba) juttatják vissza. Erre az egyik jellemző példa különböző körfolyamatok modellje (pl. forgalomirányító berendezés működése [15]). A T-invariánsok másik jellemző megjelenése a forrás (csak kimeneti helye van) és nyelő (csak bemeneti helye van) tranzíciókat tartalmazó háló. Az ilyen modellekben egy T-invariáns egy forrás és egy nyelő tranzíció közötti útvonalat ír le. Ezt a tulajdonságot alkalmazta például Portinale egy diagnosztikai kérdés megoldására [16]. Felismertük, hogy a vágányutak azonosítása egy ehhez hasonló probléma, ezért azt a T-invariánsok használatával oldottuk meg.

A tervezési folyamat bemenete az állomási vágányhálózat (topológia vagy helyszínrajz) az állomási váltókkal, jelzőkkel. A vágányhálózatot felbontjuk több objektumra, melyeket egyenként, tipizálva modellezünk, majd azokat a topológiának megfelelően a modellben egymással összekapcsoljuk. Ezt követően a topológia modell meghatározott helyeire (a vágányutak lehetséges kezdő- és végpontjaira) forrás és nyelő tranzíciókat helyezünk, illetve az objektumokhoz dedikált tranzíciókat rendelünk. Strukturális elemzéssel, a T-invariánsok segítségével megkapjuk a vágányutakat. Egy állomáson a vágányutak kétféle irányultságúak lehetnek (a két közlekedési iránynak megfelelően), ezért két, iránytól függő modellt kell készíteni. Előbbi következménye, hogy egy állomás lehetséges vágányútjainak teljes körű azonosításához a T-invariánsokat mindkét modellen meg kell határozni.

4. ESETTANULMÁNY

A 3. fejezetben megadott vágányút-azonosítási módszer gyakorlati alkalmazásához egy négyvágányos állomást választottunk, melyhez kezdőpont felől egy egyvágányos, végpont felől egy kétvágányos nyílt vonal csatlakozik. A választott topológiát a 2. ábra szemlélteti. Az állomást kezdőponti oldalról az „A” jelű, a végponti oldalról a „B” és „C” jelű bejárati jelzők határolják. A kijárat jelzők jelölése a kezdőpont, illetve a végpont szavak első betűjéből, illetve a fogadóvágányok számából áll. A vágányutak startpontjai minden esetben jelzők, a célpontok viszont vagy valódi jelzők, vagy kijárat vágányutak esetében a bejárati jelzők vonalához rendelt virtuális céljelzők lehetnek.



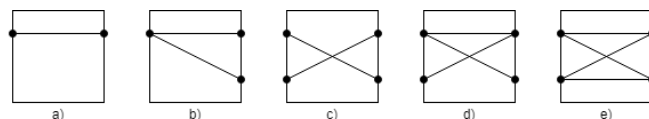
2. ábra. A modellezett állomás helyszínrajza

A kezdőponton három váltó található (2, 4, 6), míg a végponton öt (1, 3, 5, 7, 9), melyek közül a 7-es számú egy átszelési kitérő. Az állomáson nyolc egyszerű foglaltságérzékelési szakasz található, a négy fogadóvágányé, a három bejárati jelző mögött található szakaszé („Megállj!”-ra ejtő szakaszok), illetve egy szakasz az 1-es és a 7-es váltók között. Utóbbi szakaszok jelölésüket a szomszédos objektumok alapján kapták. Az állomás átmenő fővágánya a 2. vágány, mely mindkét csatlakozó irányból egyenes állású váltókon érhető el.

A vágányhálózatban betöltött szerepük, illetve funkcionalitásuk alapján a topológia felbontható objektumokra. Ez a megközelítés hasonló a biztosítóberendezések belső logikáját leíró nyomvonalas elvhez [6]. Az ilyen elven felépülő biztosítóberendezések közös vonása a modularizáltság, az elosztott jelleg. A hasonló funkciókhoz (pl. váltók, jelzők) azonos elven felépülő (jelfogó-, szoftver- vagy hardver-) egységek tartoznak, melyeket az adott állomás helyszínrajzában megfelelően kötnek össze egymással (vezetékekkel, adatkommunikációval). A berendezés a feladatát ezen egységek funkcionalitása és kapcsolatai alapján látja el.

A vágányutak biztosításához elengedhetetlen a vasúti járművekkel elfoglalt (röviden: foglalt) szakaszok ismerete. Ezt az információt a foglaltságérzékelő berendezések, jellemzően sínáramkörök vagy tengelyszámláló berendezések állítják elő. Egy-egy foglaltságérzékelési szakasz tartozhat egy egyszerű vágányszakaszhoz, egy kitérőhöz, egy keresztezéshez vagy átszelési kitérőhöz. A foglaltságérzékelési szakaszok határán vagy szigetelt sínillesztés vagy tengelyszámláló fej (kerékerzékelő) található. A foglaltságérzékelési szakaszok megfeleltethetők a felsorolt vágányúti objektumoknak, így a hálózat felbontását is ezek mentén végeztük el.

A vasútvonalaknak megkülönböztetjük kezdő- és végpontját, ennek megfelelően beszélhetünk állomások kezdőponti, illetve végponti oldaláról. Ilyen megközelítés mellett minden objektumnak lesz kezdőponti és végponti oldala. Továbbá mindkét oldalukon legfeljebb két-két másik objektumhoz kapcsolódhatnak. Azt, hogy a kapcsolódási pontok közül az adott objektumon belül melyek között lehetséges átjárás, az objektum típusa határozza meg (pl. egy átszelési kitérő esetén a két oldal bármely csatlakozási pontja között lehetséges menet). Az objektumok lehetséges belső kapcsolatait a 3. ábra szemlélteti (a: szakasz, b: egyszerű kitérő, c: egyszerű keresztezés, d: félátszelési kitérő, e: átszelési kitérő).



3. ábra. A vágányúti objektumok lehetséges belső kapcsolatai

Az egyszerű szakaszon csak egyféle menet lehetséges, a két ellenoldali végpontja között. Az egyszerű kitérő csúcsa felől két irányba biztosít eljutást. Ez az objektum a függőleges tengelyre nem szimmetrikus, ezért kétféle irányultsággal szerepelhet a topológián (elágazás a kezdőpont felől/elágazás a végpont felől). A váltóknak csúcs felől nézve megkülönböztetjük jobb (j) és bal (b) szárát, illetve egyenes vagy kitérő állását. A váltók kialakításából adódóan az egyenes irány jellemzően a nagyobb sebességgel járható irány. Az egyszerű keresztezés két vágányszakasz közös modellje, amin két egyirányú menet lehetséges. Fontos azonban egyetlen objektumnak tekinteni, mivel egyidejűleg csak egy vágányútban szerepelhet érintett elemként. A félátszelési kitérő az átszelési kitérő egy (kevesebb menetet lehetővé tevő) egyszerűsítése. Egy félátszelési kitérőn három, egy átszelési kitérőn négy különböző irányú mozgás valósítható meg. Az átszelési kitérő minden ellenoldali végpontja között lehetséges menet. Az átszelési kitérők elnevezése szerint a főirány (f) az átmenő fővágánnyal párhuzamos állás, a mellékirány (m) az ezt keresztező állás.

A célunk a 2. ábra által bemutatott topológián az összes vágányút azonosítása. Az egy start- és egy célpontot közvetlenül (közben lévő jelző érintése nélkül) összekötő vágányutakat egyszerű vágányutaknak nevezzük. Ha ugyanazon start- és célpont között több, eltérő útvonalon vezető vágányút is lehetséges, akkor kerülővágányutakról beszélünk. (Ezek közül az optimális, alapértelmezett vágányút kiválasztása szintén a tervezés egyik lépése, lásd 1. fejezet, 5. pont.) A vizsgált topológián egyszerű vágányutak a bejárati vágányutak (egy bejárati jelzőtől egy kijárat jelzőig), illetve a kijárat vágányutak (egy kijárat jelzőtől egy bejárati jelzőhöz rendelt virtuális céljelzőig). Összetett vágányutaknak nevezzük a több egyszerű vágányút sorozataként előálló vágányutakat. A bejárati és kijárat vágányutakból álló összetett vágányutat áthaladó vágányútnak nevezzük. Az összetett vágányutak meghatározása is célunk volt, mivel egyes biztosítóberendezések képesek ezek egyidejű beállítására is.

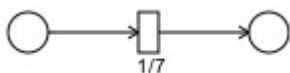
Egy adott topológián az összes lehetséges vágányút meghatározása a tervezés többi lépéséhez képest kevésbé összetett feladat, ezért nem szükséges minden objektumot minden részletében leképező modellt létrehozni (pl. a szakaszhosszok ismerete nem szükséges a megoldáshoz). Kutatásunkban csak az 1. részfeladat (lásd 1. fejezet) megoldását tűztük ki célul, ezért az objektum modelleket is csak az ehhez szükséges funkcionalitással ruháztuk fel. Ennek a lehatárolásnak az előnye, hogy a modell kevesebb (építő)elemet tartalmaz, ezáltal az elemzés is hatékonyan, gyorsan végrehajtható.

5. MODELLEZÉS

Az esettanulmány modellezését PetriDotNet eszközzel végeztük el, ami a Petri-hálóok szerkesztésére, szimulációjára és analízisére szolgáló keretrendszer [17]. Beépített strukturális elemzője a T-invariánsokat is képes meghatározni.

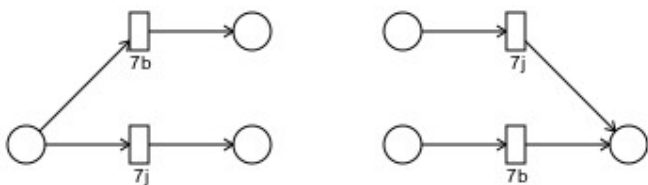
A modellezés alapötlete a teljes vágányhálózat tipizált objektumokból való felépítése. Az objektumok határait helyek jelölik. Egy objektumnak legfeljebb négy szomszédja lehet (2-2 a kezdőponti, illetve a végponti oldalán). A vizsgált objektum belső struktúráját a tranzíciók írják le. Egy tranzíció egy, az adott objektumon át vezető menetnek felel meg. Az objektumok adott vágányúthoz rendelt tranzíciói ezáltal egyben a kitérők vágányútban elvárt állását is megadják.

A 4. ábrán egy egyszerű vágányszakasz modellje látható, mely egyetlen tranzícióból áll.



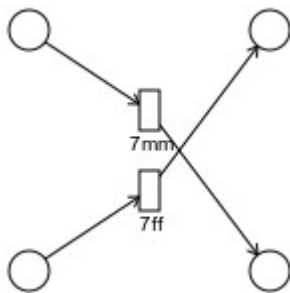
4. ábra. Vágányszakasz modellje

Egy egyszerű kitérő két, eltérő irányultságú modelljét mutatja be az 5. ábra.



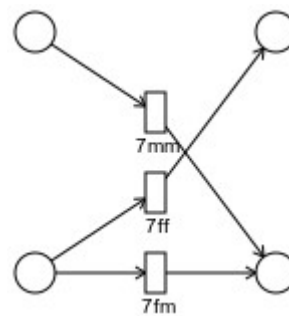
5. ábra. Egyszerű kitérők kétféle irányultságú modellje

Az 6. ábra egy egyszerű keresztezés modelljét szemlélteti.



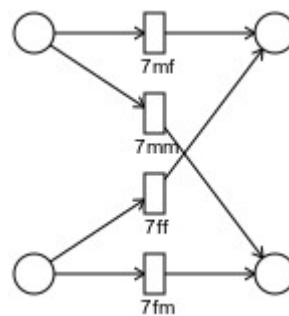
6. ábra. Keresztezés modellje

A félátszelési kitérő modelljét a 7. ábra szemlélteti.



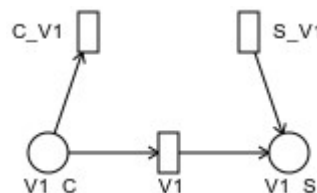
7. ábra. Félátszelési kitérő modellje

A legösszetettebb objektum, az átszelési kitérő modelljét 8. ábra mutatja be.



8. ábra. Átszelési kitérő modellje

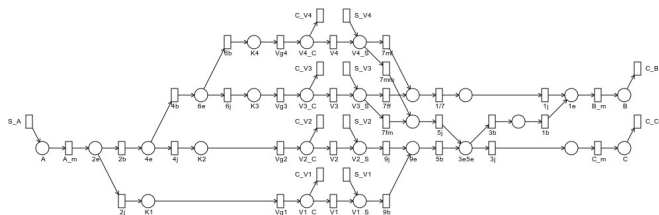
A jelzők azért jelennek meg külön objektumként – annak ellenére, hogy nem hasonlíthatók egy menet által ténylegesen bejárando vágányszakaszhoz – a modellben, mert ezek jelentik a vágányutak start- és célpontjait. Elhelyezkedésük a topológián foglaltságérzékelési szakaszok határához kötődik. Egy startjelzőhöz egy forrás, egy céljelzőhöz egy nyelő tranzíció tartozik. Ha egy jelző a megadott helyszínrajzon egyszerre lehet start és cél is, akkor a forrás és nyelő tranzíciók külön helyhez kapcsolódnak. A vágányút irányából tekintve egy jelzőnek először a cél majd a start oldala szerepel a modellen, melyeket egy, a jelzőhöz tartozó tranzíció köt össze. Ezt az elrendezést a 9. ábra mutatja be. Ennek a modellezési döntésnek a háttérében az áll, hogy nem szerettünk volna előállítani olyan T-invariánsokat, melyek csak két (egy forrás- és egy nyelő) tranzícióból állnak, illetve célunk volt, hogy összetett vágányutak esetén az érintett közbenső jelző is a T-invariánsok részét képezze. A vizsgált irányból „háttal álló”, azaz az adott irányból irreleváns jelzőket egy-egy hellyel modelleztük (két foglaltságérzékelési szakasz határan).



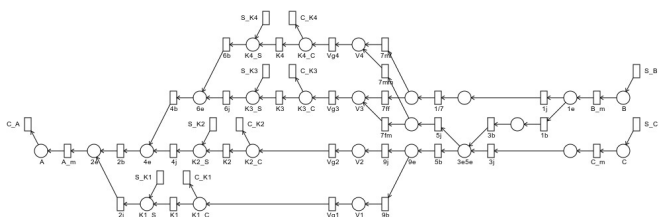
9. ábra. Jelző modellje

A biztosítóberendezés tervezés első lépésének, a vágányutak azonosításának vizsgálatához a 10. ábra és a 11. ábra által szemléltetett modelleket készítettük el. A 4. fejezetben

bemutatott esettanulmányként szolgáló topológiát a fent ismertetett objektum modellekből építettük fel. A lehetséges vágányutak listájának T-invariánsok segítségével történő meghatározásához iránytól függő (szimmetrikus) modelleket hoztunk létre.



10. ábra. A választott topológia kezdőpont → végpont irányú modellje



11. ábra. A választott topológia végpont → kezdőpont irányú modellje

A két szimmetrikus modell közötti különbséget az irányultságuk adja. Az egyik kezdőpont → végpont, míg a másik végpont → kezdőpont irányú. Az irányfüggő modellezés háttérben a következő szempontok álltak:

1. A modellek irányítottasága megegyezik a vonatok tényleges haladási irányával, így nem jöhetnek létre nem lehetséges vágányutak (pl. egy váltó két szára közötti menet).
2. Megkülönböztethetővé válnak az egy menet során szemben (releváns) vagy háttal álló (nem releváns) jelzők. Ezáltal egy vágányút csak szemben érintett jelzőtől szemben érintett jelzőig terjedhet (valódi céltól valódi startig).

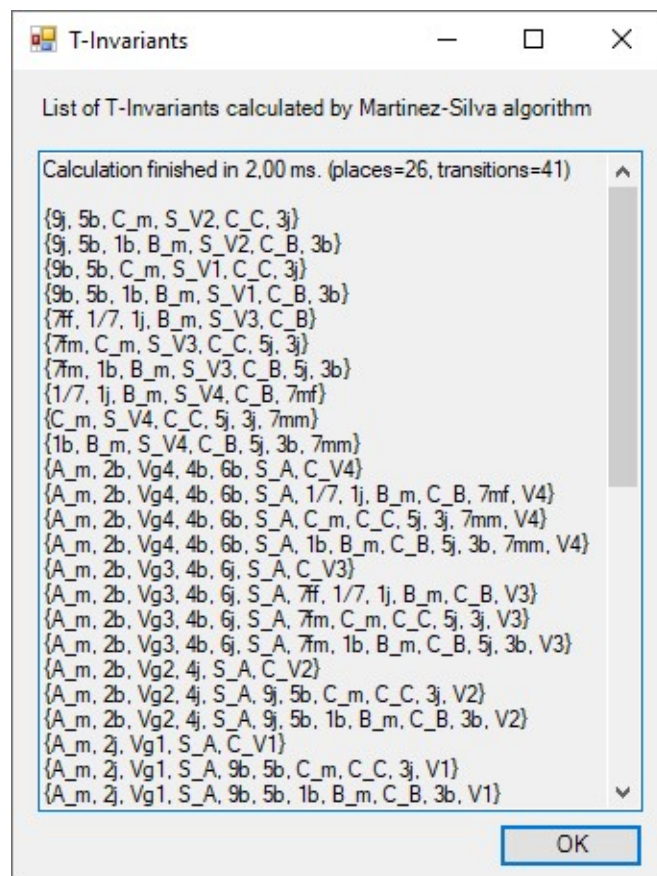
A két modell között tehát az azonos helyeket és tranzíciókat összekötő élek irányításában van különbség, illetve abban, hogy az adott irányban releváns jelző helyek további tranzíciókkal egészülnek ki.

Élek találkozásai és elágazásai a váltók csúcsát reprezentáló helyeknél találhatók. Minden tranzícióhoz legfeljebb egy bemeneti és egy kimeneti él csatlakozik. Tokenek nem szerepelnek a modellben, mivel a dinamikus tulajdonságok (állapotok) vizsgálata nem szükséges a probléma megoldásához.

6. EREDMÉNYEK

A beállítható vágányutak T-invariánsok segítségével való azonosítását jelen fejezetben ismertetjük. Mivel a modellben nincsenek hurkok (amik eltüzelése a modellt ugyanabba az állapotba juttatná vissza), így minden T-invariánsnak tartalmaznia kell egy forrás és egy nyelő tranzíciót. A forrás és nyelő tranzíciókat a start- és céljelző között található objektumok és a rajtuk keresztül lehetséges meneteknek megfelelően transziciók kapcsolják össze.

Az alapul vett topológia kezdőpont → végpont irányú modellje 26 helyet és 41 tranzíciót tartalmaz. Összesen 24 T-invariáns azonosítottunk (ld. 12. ábra). Ezek közül 14 egyszerű (4 bejárati és 10 kijárat) vágányút, pl. {S_V3, 7ff, 1/7, 1j, B_m, C_B}. Az egyszerű vágányutak között két-két kerülővágányúti lehetőség adódik a V3 – B, illetve V4 – B jelzők vonatkozásában, pl. az előbbi egy lehetséges kerülővágányútja: {S_V3, 7fm, 5j, 3b, 1b, B_m, C_B}. Az összetett (áthaladó) vágányutakból tízet tárt fel az elemzés, ezek között négy (A – C jelzők közötti) és hat (A – B jelzők közötti) alternatíva adódik, pl. {S_A, A_m, 2b, 4b, 6j, Vg3, V3, 7ff, 1/7, 1j, B_m, C_B }.



12. ábra. A kezdőpont → végpont irányú modell T-invariánsainak listája

A végpont → kezdőpont irányú modell elemzése a helyszínrajz szimmetriájából adódóan hasonló eredménnyel járt, azzal a különbséggel, hogy az egyszerű vágányutak közül négy volt kijárat és tíz bejárati.

A T-invariánsok által szolgáltatott információk a következő bekezdésekben leírtaknak megfelelően használhatók fel.

Egy objektum egyszerre csak egy vágányútban lehet érintett, ezért azok a vágányutak, melyek ugyanazt az elemet tartalmazzák, egy időben nem beállíthatók. Az egymást kizáró menetek meghatározása a menetterv elkészítéséhez szükséges.

Mivel az objektumokhoz tartozó tranzíciók a modellezett elemek lehetséges valamennyi menetét leírják, így a

T-invariánsok segítségével vágányutanként meghatározásra került az érintett elemek elvárt állása is. Ez az információ az elzárási terv elkészítéséhez szükséges.

Vágányutak biztosításához kapcsolódik a különböző szakaszok foglaltságérzékelésének ellenőrzése. A T-invariánsok segítségével meghatározott objektumok foglaltságát a vizsgált vágányutak függőségeihez kell hozzárendelni.

A kapott eredmények mindhárom előbbi esetben csak a függőségi tervek részleges elkészítésére elegendők. További függőségek (további kizárt menetek, beállítandó elemek, foglaltságellenőrzésbe bevont szakaszok) felderítése a tervezés későbbi lépéseinek (oldalvédelem, megcsúsztatások meghatározása) végrehajtása során történhet meg. Mivel az egyes lépések egymástól függetlenül végrehajthatók, ezek egymást kiegészítik, nincsenek hatással egymásra.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Az állomási biztosítóberendezések tervezése elsősorban a vágányutak és a hozzájuk kapcsolódó függőségek meghatározására irányul. A folyamat első lépése a vonatok által bejárható vágányutak, a ténylegesen érintett vágányúti elemek és állapotuk (állásuk) meghatározása. Cikkünkben bemutatunk egy lehetséges, hatékony megoldást állomási biztosítóberendezések kezdő tervezési lépésére, azaz a vágányutak azonosítására. Bár a tervezési folyamatot jelenleg is több eszköz segíti, az ellenőrzések manuálisan történnek. Kutatásunk fókuszában az ellenőrzési folyamatok automatizálttá és teljeskörűvé tétele áll. Erre hatékony megoldást nyújt a formális módszerek alkalmazása.

A vágányút-azonosítás kérdésének megoldásához a Petri-hálókat választottuk, mert a rájuk jellemző strukturális tulajdonság, a T-invariánsok bizonyítottan jól alkalmazhatók ilyen jellegű problémák leírására. A vágányutak azonosításhoz elegendőnek bizonyult az egyszerű, kiterjesztés nélküli Petri-hálóok alkalmazása. Az általunk kidolgozott módszertan alapvető lépése a vasúti vágányhálózatra jellemző speciális elemek (szakaszok, váltók, stb.) modellezése volt, amelyek segítségével bármely topológia modellje felépíthető.

Az egyes objektumokhoz tartozó tranzíció(k) egy-egy, az objektumon lehetséges menetet írnak le. A vágányúti startpontként szereplő objektumokhoz (jelzőkhöz) forrás tranzíciók, a vágányúti célpontokhoz (elsősorban jelzőkhöz) pedig nyelő tranzíciók tartoznak. Azokhoz a jelzőkhöz, amik egyaránt start- és célpontok is lehetnek, egy további tranzíció tartozik, mely csak összetett vágányutak esetén lesz része a megfelelő T-invariánsoknak. A vágányúti elemekhez definiált objektumok modelljeiből felépítettünk egy esettanulmányt, és megvalósítottuk rajta a vágányutak azonosítását.

Kutatásunk eredményei felhasználhatók a menetterv, az elzárási terv, illetve a foglaltságérzékelésbe bevont szakaszok megtervezéséhez. Célunk a tervezési folyamat minden lehetséges lépésének vizsgálata a (formális) modellezhetőség és ellenőrizhetőség szempontjából, amivel a biztosítóberendezés tervező mérnökök munkáját kívánjuk támogatni.

HIVATKOZÁSOK

- [1] Boldis Bálint, Farkas Balázs és Székely Béla: Optimalizálási feladatok megoldása biztosítóberendezések tervezése során – 1. rész, Vasúti Vezetékvilág, III/1, 2019, pp. 3-8.
- [2] Boldis Bálint, Farkas Balázs és Székely Béla: Optimalizálási feladatok megoldása biztosítóberendezések tervezése során – 2. rész, Vasúti Vezetékvilág, III/2, 2019, pp. 3-7.
- [3] WSP Infrastructure Engineering GmbH: ProSig, URL: <http://www.prosig.de/> (letöltve: 2021.09.01.)
- [4] László Lindenmaier, István Ferenc Lövetei, Gábor Lukács, Szilárd Aradi: Infrastructure Modeling and Optimization to Solve Real-time Railway Traffic Management Problems, Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 49(3), 2021, pp. 270–282.
- [5] Alessio Ferrari, Franco Mazzanti, Davide Basile, Maurice ter Beek: Systematic Evaluation and Usability Analysis of Formal Tools for Railway System Design, IEEE Transactions on Software Engineering, Preprint 2021
- [6] G. Lukács, B Farkas, T Bartha: Experiences with the Formal Modeling of the Geographical and Tabular Principles of Interlocking Systems, In: Kaunas, University of Technology (szerk.) Proceedings of 21st International Scientific Conference. Transport Means 2017, Kaunas University of Technology, 2017, pp. 499-504.
- [7] Somsak Vanit-Anunchai: Modelling and simulating a Thai railway signalling system using Coloured Petri Nets, International Journal on Software Tools for Technology Transfer (STTT) Volume 20 Issue 3, 2018, pp. 243-262.
- [8] Ahmad Mirabadi, Mohammad B. Yazdi: Automatic Generation and Verification of Railway Interlocking Control Tables Using FSM and NuSMV, Transport Problems, 2009, pp. 103-110.
- [9] Somsak Vanit-Anunchai: Modelling Railway Interlocking Tables using Coloured Petri Nets, In: Clarke D., Agha G. (eds) Coordination Models and Languages. COORDINATION 2010, Lecture Notes in Computer Science, vol 6116. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010, pp. 137-151.
- [10] Somsak Vanit-Anunchai: Verification of Railway Interlocking Tables using Coloured Petri Nets, 2010, pp. 139-158.
- [11] Ferrari A., Magnani G., Grasso D., Fantechi A.: Model Checking Interlocking Control Tables. In: Schnieder E., Tarnai G. (eds) FORMS/FORMAT 2010. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011, pp. 107-115.
- [12] Luteberget, B., Johansen, C.: Efficient verification of railway infrastructure designs against standard regulations In: Formal Methods in System Design 52, 2018, pp. 1-32.

[13] Bartha Tamás, Majzik István: Biztonságra tervezés és biztonságigazolás formális módszerei, 2019, URL:
https://mersz.hu/dokumentum/m534btbfm__1/

[14] Tadao Murata: Petri nets: Properties, analysis and applications, Proceedings of the IEEE, Vol. 77, No. 4, 1989, pp. 541-580.

[15] Tamás Tettamanti: Wireless Traffic Signal Controller with Distributed Control System Architecture Periodica Polytechnica Civil Engineering, 63(3), 2019, pp. 918–925.

[16] Luigi Portinale: Exploiting T-invariant Analysis in Diagnostic Reasoning on a Petri Net Model, Application and Theory of Petri Nets 1993, 14th International Conference, Chicago, Illinois, USA, Proceedings, 1993, pp. 339-356.

[17] BME MIT, Hibatúró Rendszerek Kutatócsoport: PetriDotNet, URL:
<https://inf.mit.bme.hu/research/tools/petridotnet>
(letöltve: 2021.09.01.)