



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
HÍRADÁSTECHNIKAI TANSZÉK

**Használhatóság számítása és garantálása hálózatokban
többszörös hibák esetén**

**Assessing and Guaranteeing Availability in Networks with Multiple
Failures**

Ph.D. értekezés téziséhez

szerző:

Pándi Zsolt

témavezetők:

Dr. Do Van Tien, BME
Dr. Andrea Fumagalli, UTD
Dr. Marco Tacca, UTD

Budapest, 2006

1 Bevezető

A távközlő hálózatok szolgáltatásaiban tapasztalható kiesések részben a nagy kapacitású linkeken kialakult példátlan forgalomkoncentráció miatt, részben pedig az elfogadhatatlan lehetséges gazdasági következményeik miatt minden eddiginél nagyobb kockázatot jelentenek. Ráadásul a hálózati szolgáltatók bevételeinek mind nagyobb része függ a felhasználókkal kötött szerződések teljesítésétől, amelyek tartalmazznak a szolgáltatás minőségére vonatkozó kitételeket (Service Level Agreement, SLA) is. Ezért fokozott figyelem fordult a közelmúltban a távközlő hálózatok használhatóságának javítása felé.

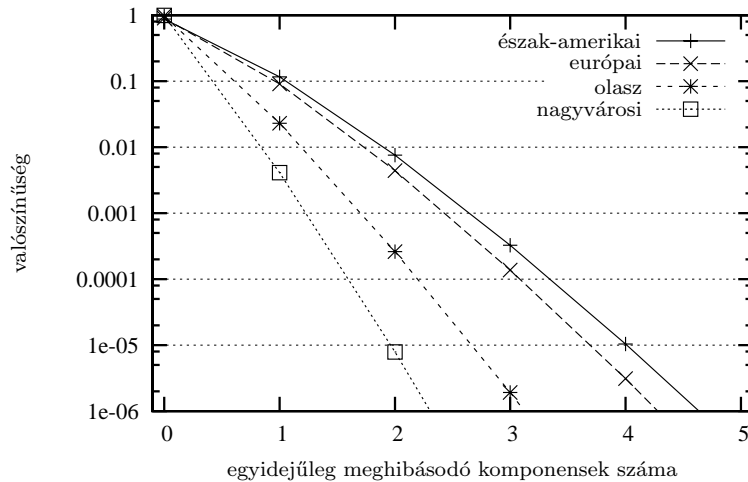
A területhez kapcsolódóan elvégzett jelentős mennyiségű kutatómunka eredményeként napjainkra már bőséges mennyiségű védelmi és helyreállítási módszert publikáltak, amelyek a hálózati komponensek hibáinak következményeit igyekeznek enyhíteni. A hibatűrő megoldásokkal foglalkozó művek döntő többsége a kapcsolatok használhatóságát aszerint minősíti, hogy mennyi hálózati komponens egyidejű hibája esetén lehet a kapcsolatot tartalék utak segítségével helyreállítani. Mindazonáltal ez a fajta minősítés nehezen alakítható át a kapcsolatok megszakadt állapotban töltött idejének felső korlátját megadó használhatósági garanciákra. A szolgáltatás minőségét rögzítő szerződések azonban tipikusan ilyen garanciákat tartalmazznak, mivel a felhasználók számára ezek bírnak könnyen értelmezhető jelentéssel. Emellett a meghibásodó komponensek száma szerinti kategorizálás alapján nem lehet megfelelő finomsággal beállítani az erőforrásigény és a biztosított használhatóság közötti egyensúlyt.

Az irodalomban hozzáférhető védelmi módszerek többsége a kapcsolatok egyszeres hibákkal szembeni ellenállását biztosítja, azaz garantálja, hogy a kapcsolat helyreállítható bármely komponens meghibásodása esetén. Ez a megközelítés technikailag és szerkezetileg is ésszerű, gazdaságos erőforrásfelhasználást biztosít, valamint — némileg meglepő módon — általában a többszörös hibák jelentős része ellen is védelmet nyújt [6].

A hálózatok kapacitásának, méreteinek és az eszközök számának növekedésével a többszörös hibaállapotok valószínűsége jelentősen megnövekszik (1. ábra), következésképpen a nagyobb használhatósági igényeket támogató alkalmazásoknak olyan használhatósági garanciákra van szüksége, amelyek többszörös hibák esetére is vonatkoznak.

Megbízhatóságelméleti eredmények alapján ismert, hogy a kapcsolatok használhatóságának számításával rokon általános problémák a bonyolultak közül valók [18]. Ezért két lehetőség közül kell választani: vagy olyan speciális eseteket kell vizsgálni, amikor a pontos számítások ésszerű időn belül elvégezhetőek, vagy pedig olyan módszereket kell találni, amelyek garantáltan alulról becslik a kapcsolatok használhatóságát.

A pontos számítások eredményére vonatkozó korlátok számítására többféle módszer is használható. Ha a hálózatot véges állapotú rendszerként modellezzük, akkor a hibaállapotok terét mintavételező módszereket alkalmazhatunk, mint például



1. ábra: Hibaállapotok valószínűségei az egyszerre meghibásodó komponensek száma szerint, különböző hálózatokban.

a jól ismert Monte-Carlo módszer [4], a rétegzett mintavételezés [2] vagy az adaptív approximáció [15].

Egy hibarétegbe az egyik általánosan használt definíció szerint azok az állapotok tartoznak, amelyekben ugyanannyi a meghibásodott komponensek száma. Azaz egy hibarétegbe tartoznak például mindazok a hibaállapotok, ahol pontosan kettő komponens nem működik. A hibarétegekbe tartozó állapotok összvalószínűségének, röviden a hibaréteg valószínűségeinek a meghatározása igen fontos a hibaállapotok terének mintavételezésén alapuló módszerek számára.

Egy másik lehetséges megközelítés, hogy a kapcsolatok használhatóságának pontos számítása helyett általános módszerek segítségével származtatunk korlátokat. Az ún. szita-formulát gyakran alkalmazzák ilyen esetekben, ti. ha a keresett érték egy valószínűség [5]. A szita-formula alkalmazása kapcsán felmerül azonban a következő nehézség. Ha a tartalékerőforrásokon több kapcsolat is osztozik, amely távközlő hálózatok esetében tipikus esetnek tekinthető, a formula kiértékelésekor kezelendő események nem tekinthetők függetlennek, és a megfelelő adatok hiánya, valamint az ilyen események valószínűségeinek becslési nehézségei miatt az ilyen, általános módszerek meglehetősen korlátozottan alkalmazhatóak. Ezzel szemben ha kihasználjuk azt, hogy ismerjük a modellezett rendszer szerkezetét, lehetőség nyílik az ezt figyelembe vevő, specifikus alsó becslések megadására. Ezeknek a becsléseknek különösen nagy szerepük van akkor, amikor a kapcsolatok számára használhatósági garanciákat kell biztosítani.

Ha a különböző kapcsolatok közösen használhatnak tartalék erőforrásokat, és a többszörös hibák hatását sem lehet elhanyagolni, akkor egy dinamikus hívásengedélyező algoritmusnak egy új kapcsolat felépítése előtt nemcsak arról kell meggyőződnie, hogy a kapcsolat felépítéséhez elegendő, a kapcsolat által igényelt használhatóságot biztosító erőforrás áll rendelkezésre, hanem arról is, hogy az új

kapcsolat felépítése nem csökkenti a már felépített kapcsolatok használhatóságát az általuk megadott követelmények szintje alá.

Ennek a problémának a vizsgálatát kevés eddigi kutatás tűzte ki céljául. [13, 16, 19, 22, 23] olyan módszereket javasolnak, amelyek képesek használhatósági garanciákat biztosítani a kapcsolatoknak megosztott tartalék erőforrások használatának feltételezésével dinamikus vagy statikus forgalom esetén. Mindazonáltal egyetlen módszer sem képes garantáltan alsó becslést számítani a használhatóság meghatározásakor, így az általuk adott korlátok valójában nem tekinthetők garanciáknak.

[21] egy olyan hálózatméretezési módszert mutat be, amely az [1]-ben publikált, garantáltan alsó becslést adó számításokat alkalmazza a használhatóság garantálásához. Garantált használhatóságú kapcsolatok dinamikus felépítésének problémáját azonban további kutatási célkitűzésként fogalmazzák csak meg. [20] egy olyan hálózatméretezési módszert javasol, amely szintén garantáltan alsó becslést adó használhatósági számításokat használ. Sajnos mivel azonban [20] célkitűzése egy többszörös hibákkal szemben is strukturálisan ellenálló védelmi módszer kidolgozása, az eredmények gyakorlati alkalmazhatóságát erősen korlátozza a javasolt eljárás bonyolultsága, valamint az, hogy a módszer nagy átlagos fokszámmal rendelkező hálózati topológiát feltételez.

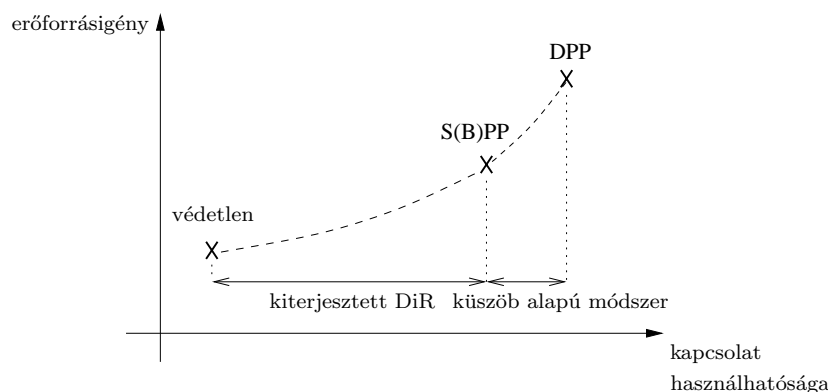
Röviden összefoglalva, számos eddigi kutatási eredmény foglalkozik garantáltan hibatűrő kapcsolatfelépítési módszerekkel. A garanciák azonban leggyakrabban az egyidejűleg meghibásodó komponensek legnagyobb elviselt száma alapján mérik a kapcsolatok hibatűrését, és kevés cikk foglalkozik kimondottan a használhatóságra vonatkozó garanciákkal. A garantált használhatóság biztosításához kulcsfontosságú egy olyan becslési módszer alkalmazása, amely alsó korlátot ad a kapcsolat használhatóságára. A szerző tudomása szerint összesen két ilyen módszer található az irodalomban [1, 20], amelyek közül egyik sem alkalmazható közvetlenül kapcsolatok felépítéséhez dinamikus forgalom esetén. Ezért érdemes közelebbről megvizsgálni ezt a területet.

2 Kutatási célkitűzések

A kutatás általános célkitűzése a kapcsolatok használhatóságának számításával és garantált használhatóságú kapcsolatok felépítésével foglalkozó szakmai eredmények bemutatott hiányosságainak pótlása.

A kutatás során általános hálózati modellt feltételeztem, amely egymástól függetlenül meghibásodó, kétállapotú komponenseket tartalmaz. Általában mind a csomópontokat, mind pedig a linkeket tökéletlennek tekintettem, kivéve azokban az esetekben, ahol a tárgyalás követhetősége érdekében az ettől való eltérést szükségesnek ítélttem.

Egy ilyen hálózati modellben gondolkodva az első célkitűzés egy olyan hatékony algoritmus keresése volt, amely meghatározza a hibaréteg valószínűségeket. Egy ilyen



2. ábra: Az értekezés eredményeinek viszonya a korábban javasolt módszerekhez.

algoritmus segítségével megmutatható az is, hogy ismert struktúrájú rendszerekben a hibaréteg valószínűsége egyszerűen meghatározható, ha kihasználjuk a rendszer szerkezetének ismeretét.

A kutatás legfontosabb célkitűzése olyan útvonal- és hullámhosszválasztó módszerek keresése volt, amelyek képesek dinamikus forgalom esetén is használhatósági garanciákat biztosítani a kapcsolatoknak osztott tartalékutas védelem (Shared (Backup) Path Protection, S(B)PP) használata mellett úgy, hogy erőforrásigényük a dedikált tartalékutas védelemé (DPP) alatt marad. A DiR (Differentiated Reliability, igény szerinti megbízhatóság, bővebb magyarázat a 4.2 szakaszban) elv alkalmas a kapcsolatok használhatóságának egyedi megkülönböztetésére. A DiR elv többszörös hibák esetére való kiterjesztésével pedig lehetővé válik, hogy a kapcsolatok számára immár abszolút használhatósági garanciákat biztosítsunk a védetlentől az S(B)PP által a maximális tartalékerőforrás-megosztás mellett elérhető szintig.

Az ezeknél jobb garanciák biztosítása végett további korlátozásokat kell bevezetni a tartalékerőforrások megosztásának szabályozására, amely megoldható egy küszöbérték jellegű paraméternek a hívásengedélyezési folyamatba történő bevezetésével. Az ily módon némileg megnövekedett bonyolultságért cserébe szigorúbb garanciák biztosíthatók (2. ábra).

A csomóponti hibák jelentőségét az irodalomban gyakran teljesen figyelmen kívül hagyják, vagy elhanyagolhatónak tekintik. A kutatás egyik további célkitűzése az, hogy megvizsgáljuk tisztán optikai hálózatokban a csomóponti hibák végpontok közötti használhatóságra gyakorolt hatását.

A kutatás célkitűzése volt emellett az is, hogy elemezze a javasolt algoritmusok és módszerek alkalmazhatóságát is.

Annak ellenére, hogy a javasolt megoldások általánosíthatóak lennének, nem célja az értekezésnek, hogy más védelmi vagy helyreállítási módszerekhez kapcsolódó megoldásokat tárgyaljon, amelyek alkalmasak használhatósági garanciák nyújtására. Más hálózati technológiákkal — beleértve a csomagkapcsolt működésű hálózatokat

is — nem foglalkoztam a jelen kutatás keretei között. Nem tartozik továbbá a célkitűzések közé, hogy a *garantált* és a *valós* használhatóság közötti különbségeket elemezzem. A használhatóságon és a hívásblokkolás valószínűségén kívül más QoS paramétereket, mint például a helyreállításhoz szükséges időt, ugyancsak nem vizsgálok a jelen munka keretei között. Hullámhossz-konverziós képességekkel rendelkező optikai hálózatokat sem tárgyalok az értekezésben. Mindazonáltal az említett területek fontosságát elismerve azokat jövőbeli kutatási célokként fogalmazom meg.

3 Alkalmazott módszertan

Először a felvetett problémákat matematikai jelölések segítségével formálisan is definiáltam. Ez a kezdeti lépés elkerülhetetlen a feltételek, fogalmak és kapcsolatok pontos és egyértelmű leírásához.

A bevezetett jelölésekre alapozva ezután modelleket alkottam a gráfelmélet és a valószínűségszámítás eredményeire építve. Alapvető algebrai és sorbanálláselméleti technikákat és eredményeket is felhasználtam, amikor pontos vagy közelítő megoldásokat származtattam, vagy teljesítményparaméterek értékét határoztam meg. A megoldandó problémák némelyikének nehézségét a számításelmélet eredményeire támaszkodva bizonyítottam, ami a megoldásukra javasolt heurisztikus módszerek létjogosultságát igazolja.

A bemutatott, használhatóságot garantáló hullámhossz- és útvonalválasztási módszerek vizsgálatát szimulációval végeztem. Ehhez egy szimulátort implementáltam, amely az eseményvezérelt szimuláció általános alapelveit alkalmazza [10]. A szimuláció paramétereit mindig úgy választottam, hogy a szimulált rendszer viselkedése valós hálózatokét tükrözze. A szimulációs eredményeket megfelelő konfidenciaintervallumokkal mutatom be, amelyeket statisztikai módszerekkel lehet meghatározni.

A következtetéseket vagy matematikai bizonyítások, vagy pedig szimulációs eredmények alapján vontam le, és minden esetben igyekeztem kitérni a bemutatott módszerek alkalmazhatóságainak korlátaira is.

4 Új tudományos eredmények

Az értekezés új tudományos eredményei a következőképpen csoportosíthatók. Az első téziscsoport a hibaréteg valószínűségek meghatározásával foglalkozik. A második téziscsoport kiterjeszti a DiR elvet többszörös hibák és meghibásodó csomópontok figyelembevételével, amelynek eredménye egy abszolút használhatósági garanciákat biztosító módszer. Végül a harmadik téziscsoport egy megosztási korláton alapuló hullámhossz- és útvonalválasztó algoritmust mutat be, amely a kiterjesztett DiR módszernél jobb használhatósági garanciákat is képes nyújtani.

4.1 Hibaréteg valószínűségek hatékony számítása

1.1 tézis ([J1]). *Új algoritmust javasoltam a hibaréteg valószínűségek számítására, amelynek lépésszáma $O(KN)$, ahol K a vizsgált hibarétegek száma, N pedig a rendszerben levő komponensek száma.*

Az irodalomban korábban erre a célra javasolt algoritmus [2] lépésszáma $O(K^2N)$, mivel minden egyes hibaréteg valószínűségének kifejezéséhez külön származtat egy-egy rekurzív formulát, amely kiszámítása $O(KN)$ lépést igényel. Következésképp az 1.1 tézisben javasolt algoritmus hatékonyabbnak tekinthető.

Az 1.1 tézisben javasolt algoritmus általános rendszermodellt feltételez, amely független, kétállapotú komponensekből épül fel. A komponensek vagy *működőképes*, vagy *hibás* állapotban lehetnek, és minden egyes komponensnél ismertnek feltételezem annak a valószínűségét, hogy a komponens bármely időpillanatban vizsgálva hibás állapotban van.

Az algoritmus alapja a komponensek halmazában értelmezett hibaréteg valószínűségek diszkrét valószínűségeloszlásként történő felírása. Ezen eloszlás generátorfüggvényének segítségével a komponenshalmazok egyesítésekor elvégzendő konvolúció polinomok szorzásaként számítható akkor is, ha legfeljebb K réteg valószínűségét kell csak meghatározni, de a műveleteket ilyenkor $(\text{mod } z^{K+1})$ kell végezni.

Ha a vizsgálandó rendszer a fenti feltételeknek megfelelő modellel leírható, akkor a javasolt algoritmus alkalmazható a rendszer vizsgálatához. Elmondható tehát, hogy az 1.1 tézisben javasolt algoritmus az általános megbízhatóságmodellezési eszköztárat fejleszti tovább, ezért a távközlési környezeten kívül is hasznosítható.

1.2 tézis ([J1]). *Megmutattam, hogy ha a modellezendő rendszer szerkezete alrendszerek soros és párhuzamos kombinációiból épül fel, akkor a rendszer egészére vonatkozó hibaréteg valószínűségek egyszerűen származtathatóak az alrendszerek hibaréteg valószínűségeinek ismeretében.*

Az 1.2 tézis tulajdonképpen a soros-párhuzamos rendszerek használhatóságát meghatározó jól ismert számítási módszer hiberéteg-valószínűségekre történő kiterjesztése. Másképpen fogalmazva az előbbi az 1.2 tézis speciális eseteként áll elő.

Ennek az eredménynek a jelentősége az, hogy ha az alrendszerek elemzésének eredménye rendelkezésre áll, akkor könnyebben tudunk a rendszer egészére vonatkozó teljesítményjellemzőket származtatni. Példaképpen tekintsünk egy több alhálózatra osztott hálózatot, ahol a felosztás megfelel a fenti feltételeknek. Ha végpontok közötti teljesítményelemzés szükséges és állapottér-mintavételezést alkalmazunk, akkor az 1.2 tézis segít meghatározni a teljes rendszer hibaállapotai mintavételezésének mikéntjét, feltéve, hogy az alhálózatokra már elvégeztük az elemzést.

4.2 A DiR elv kiterjesztése abszolút használhatósági garanciákhoz

A DiR elv [11] alapötlete, hogy elveti azt az általánosan alkalmazott feltételezést, mely szerint egy kapcsolatnak az üzemi útján bekövetkező minden egyszeres hibával szemben védettnek kell lennie. Ha a kapcsolat használhatósági követelményei alacsonyabbak, de azért elég magasak ahhoz, hogy az üzemi út önmagában ne legyen elégséges, akkor lehet, hogy csupán az üzemi út által használt linkek egy részhalmazának meghibásodása esetén van szükség a tartalékútra. Ennek eredményeképpen a tartalékerőforrások megosztási szabályai némileg enyhébbek, ami kisebb erőforrásigényt, avagy dinamikus forgalom esetében alacsonyabb blokkolási valószínűséget eredményez. A DiR elv közvetlenül használhatósági garanciákat biztosít, de csupán egyszeres hibák esetében, azaz a használhatósági garancia csak azzal a feltétellel érvényes, hogy egyszerre legfeljebb egy komponens hibásodik meg a hálózatban.

A következőkben bemutatott eredmények egy egyrétegű, hullámhosszankénti útvonalválasztással működő WDM hálózati modellt feltételeznek.

2.1 tézis ([J2, C5]). *Kiterjesztettem az osztott tartalékutas védelem DiR elvvel kombinált változatát (SPP-DiR) csomóponti hibák figyelembevételére és abszolút használhatósági garanciák biztosítására (SPP-eDiR).*

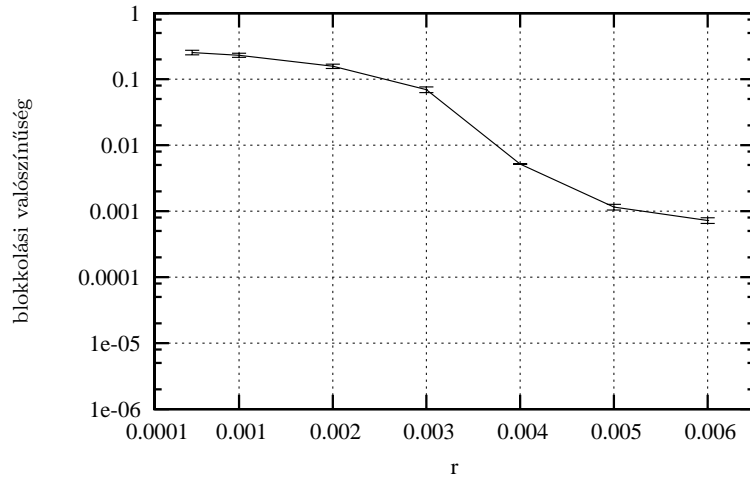
A kiterjesztés alapgondolata egy a kapcsolatok használhatóságára garantáltan alsó becslést adó számítási módszer, amely alkalmazható dinamikus forgalmi környezetben is. Egy kapcsolatot akkor tekintünk megszakadtnak, ha a következő feltételek bármelyike teljesül:

- az üzemi út védetlen linkjei vagy csomópontjai közül bármelyik meghibásodik, vagy
- az üzemi út védett linkjei vagy csomópontjai közül bármelyik meghibásodik és legalább még egy, az üzemi út által nem használt hálózati komponens is meghibásodik.

Ez az alsó becslést adó módszer egyszerűen implementálható, és magától értetődően biztosítja, hogy az újonnan felépített kapcsolatok a korábban felépítettek használhatóságát nem csökkentik a garantált érték alá.

A módszerre épülő hullámhossz- és útvonalválasztó algoritmus hatékonyságát a 3. ábra illusztrálja. Az r használhatósági követelmény annak a maximális valószínűsége, hogy bármely időpontban vizsgálva a kapcsolat megszakadt állapotban található, másnéven a *downtime ratio* (DTR). r alacsonyabb értékei ezért jobb garanciákat jelentenek. Az ábrán látható, hogy az algoritmus a használhatósági követelmény csökkentésekor, azaz r növelésekor képes jelentősen javítani a visszautasított kapcsolati kérések arányát.

Kihasználva az előre kiszámolt lehetséges üzemi és védelmi utak halmazának csomópontpáronkénti ismeretét lehetővé válik, hogy meghatározzuk a legjobb



3. ábra: Blokkolási valószínűség az olasz nemzeti hálózatban az r használhatósági követelmény függvényében.

hálózat	r_{\min}	
	SPP-eDiR	DPP
észak-amerikai	0.00236885	0.000586236
európai	0.00133932	0.000301568
olasz	0.0000754779	0.0000212594
nagyvárosi	0.00000374488	0.00000192799

1. táblázat: Teljesíthető legjobb használhatósági garanciák különböző hálózatokban csomóponti hibák nélkül az SPP-eDiR és a dedikált tartalékutas védelem esetében.

vállalható használhatósági garanciát (r_{\min}), amely bármely kapcsolat számára teljesíthető a hálózatban. Ezeket az értékeket tartalmazza az 1. táblázat különböző hálózatok esetében csomóponti hibák feltételezése nélkül az SPP-eDiR, valamint dedikált tartalékutas védelem (DPP) használatát feltételezve. Csomóponti hibákat is figyelembevéve a bemutatott értékek értelemszerűen megnövekednek.

Az SPP-eDiR, a későbbiekben a 3.1. tézisben bemutatott módszer és a DPP összehasonlítása megtalálható a 6. ábrán (a hozzá tartozó magyarázatot lásd a 4.3. szakaszban), valamint további, az SPP-eDiR módszer segítségével kapott eredményeket mutat be az 5.2 szakasz.

2.2 tétel ([J2]). *Bizonyítottam, hogy az SPP-DiR módszer dinamikus forgalom esetén történő alkalmazásakor megoldandó hullámhossz- és útvonalválasztási feladat NP-teljes.*

A bizonyítás alapötlete, hogy a fenti feladat redukálható az osztott tartalékutas védelem dinamikus forgalom esetén történő alkalmazásakor felmerülő hullámhossz- és útvonalválasztási feladatra, amelynek NP-teljességét korábban bizonyította [17].

Az eredmény érvényes egyúttal az SPP-eDiR módszer alkalmazása esetére is. Ezzel megindokolható az utóbbi módszer alkalmazásához javasolt heurisztikus hullámhossz- és útvonalválasztó algoritmus létjogosultsága.

4.3 Egy megosztási küszöb alapú algoritmus jobb használhatósági garanciákhoz

Ahogy az az 1. táblázatból is látszik, jelentős különbség van a teljesíthető legjobb használhatósági garanciák között attól függően, hogy a tartalék erőforrások megosztását engedélyezzük-e az osztott tartalékutas védelmi módszer szerint, avagy dedikált tartalék erőforrásokat alkalmazunk. Különösen a kontinentális hálózatok esetében érdekes, hogy ezt a nagy különbséget hogyan lehet áthidalni.

A *megosztás miatti elérhetetlenséget* az értekezésben egy tartalék erőforrás használhatóságának csökkenéseként definiálom, amely abból ered, hogy más kapcsolatok is használják az adott tartalék erőforrást.

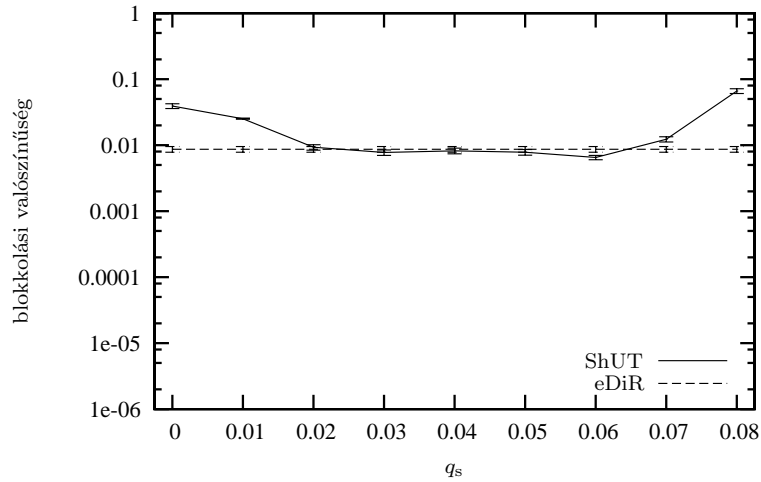
Ha egy dinamikus hullámhossz- és útvonalválasztó algoritmus korlátozni tudja a megosztás miatti elérhetetlenséget, akkor a használhatósági számítások leegyszerűsödnek. Ennek a lehetővé tételére bevezettem a $q_s^{(e,w)}(d)$ küszöbértéket minden $e \in E$ link, w hullámhossz és d kapcsolat számára. Ha egy dinamikus hullámhossz- és útvonalválasztó algoritmus működése közben teljesül, hogy a megosztás miatti elérhetetlenség felső becslése minden esetben kisebb, mint $q_s^{(e,w)}(d)$, akkor

1. $q_s^{(e,w)}(d)$ meghatározza, hogy az egyes kapcsolatok milyen mértékben osztozhatnak ugyanazon a tartalék erőforráson, és
2. $q_s^{(e,w)}(d)$ egyúttal garantálja, hogy a tartalék erőforrások megosztás miatti elérhetetlensége felülről korlátos, ezért a jövőbeli kapcsolatok nem csökkentik a már felépült kapcsolatok használhatóságát a garantált érték alá. Más szavakkal a tartalékerőforrásoknak a dinamikus forgalomból eredően változó megosztási viszonyok miatt általában időfüggő használhatósága többé nem függ az időtől.

Tehát a megosztás miatti elérhetetlenség korlátja a hívásengedélyező mechanizmus paramétereiként értelmezendő.

3.1 tézis ([C4]). *Javasoltam egy megosztás miatti elérhetetlenségi korláton (sharing unavailability threshold, ShUT) alapuló dinamikus hívásengedélyezési módszert, amely képes az SPP-eDiR módszernél jobb használhatósági garanciák nyújtására, ugyanakkor a hívásblokkolás valószínűségét a dedikált tartalékutas védelemhez képest alacsonyabb szinten tartja.*

A módszer kulcsa egy szigorúan felső becslés a megosztás miatti elérhetetlenségre, amelyből származtatható egy szigorúan alsó becslés a kapcsolat használhatóságára. A megosztás miatti elérhetetlenség a d kapcsolat és az (e, w) tartalék erőforrás esetében felülről becsülhető annak a valószínűségével, hogy hiba történik bármely olyan $d_i \neq d$



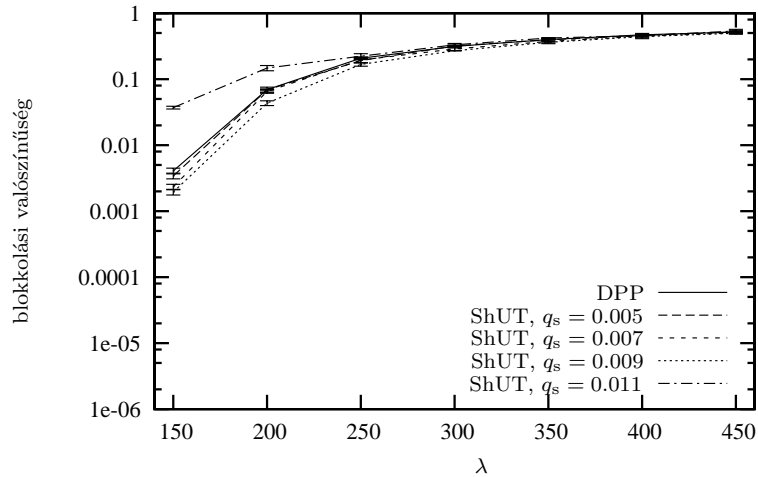
4. ábra: Blokkolási valószínűség q_s függvényében $\lambda = 200$ terhelésnél, $r = 0.005$ használhatósági követelmény esetén.

kapcsolat üzemi útján, amely az (e, w) tartalék erőforráson osztozik a d kapcsolattal. A kapcsolat használhatóságának alsó becslését ezután úgy kaphatjuk, hogy a tartalékerőforrások használhatóságát csökkentjük a megosztás miatti elérhetlenségi korlát értékével, és a számításokat a továbbiakban ugyanúgy végezzük, mint a dedikált tartalék erőforrások esetében.

Az értekezésben egyetlen $q_s^{(e,w)}(d) = q_s$ értéket feltételezek, amely minden kapcsolatra és tartalék erőforrásra egyaránt érvényes. A bemutatott eredményeket az európai WDM hálózat szimulációjával kaptam. A λ paraméter a csomópontpárok között egyenletes eloszlás szerinti forgalmat generáló Poisson-folyamat paramétere. A kapcsolatok tartási ideje exponenciális eloszlású $\mu = 1$ paraméterrel, így a λ intenzitás megegyezik az Erlangban mért terheléssel.

Az 4. és a 5. ábrán látható, hogy az ShUT módszer esetén a hívásblokkolás valószínűsége függ a korlátozó paraméter, q_s értékétől. q_s megfelelő választásával azonban ez a valószínűség megegyezhet az SPP-eDiR módszerrel mérhetővel megegyező használhatósági követelmények esetén (4. ábra). Ha azonban a használhatósági követelmény nagyobb, mint amit az SPP-eDiR módszer teljesíteni képes, a q_s megfelelő választása feleakkora blokkolási valószínűséget is eredményezhet, mint ami a dedikált tartalékutas védelemnél mérhető (5. ábra). A módszer $q_s = 0$ speciális esetben a dedikált tartalékutas védelemmel azonosan működik, ezért az ábrán szereplő eredmények is ennek a tulajdonságnak a kihasználásával készültek.

Az 4. ábrán látható görbe alakja egy kád keresztmetszetére emlékeztet. A jelenség magyarázata a következő. Ahogyan q_s -t növeljük nullától kezdve egyre több megosztást engedélyezünk, ami hatékonyabb erőforráskihasználáshoz, és ezen keresztül alacsonyabb blokkolási valószínűséghez vezet. Ha q_s -t tovább növeljük, akkor a távolabbi csomópontpárok közötti útvonalak egyre növekvő számban lesznek alkalmatlanok a kapcsolatok elvezetésére a tartalékerőforrások látszólagosan



5. ábra: Blokkolási valószínűség a hálózat terhelésének függvényében $r = 0.001$ használhatósági követelmény esetén.

megnövekedett elérhetetlensége miatt. Következésképpen a blokkolási valószínűség megnövekszik.

Általában igen nehéz megjósolni, hogy $q_s^{(e,w)}(d)$ milyen értéke esetén lesz a hálózat működése optimális, főleg azért, mert ehhez minden egyes $q_s^{(e,w)}(d)$ -t külön-külön, de egymással összefüggésben kell beállítani a hálózati topológia, a használni kívánt útvonalak és a használhatósági követelmények figyelembevételével. Ellenben ha az általános problémát leegyszerűsítjük egyetlen $q_s = q_s^{(e,w)}(d)$ érték megkeresésére, továbbá feltételezzük, hogy minden igény azonos $r = r^{(d)}$ használhatósági követelményt támaszt, akkor q_s egy megfelelő értéktartományát meghatározhatjuk.

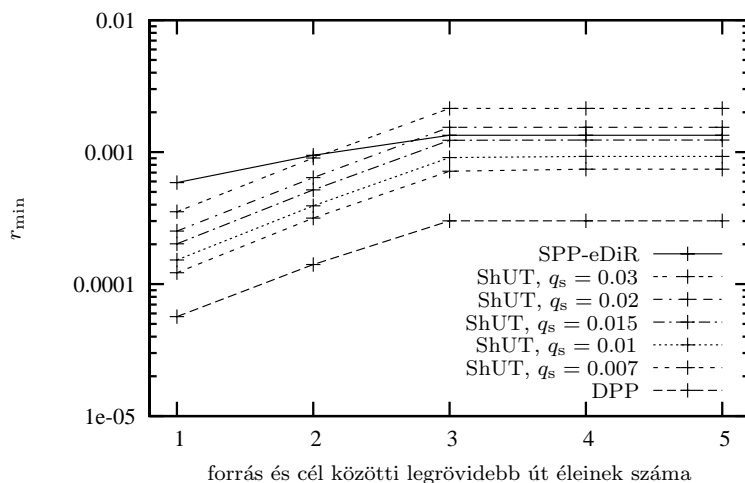
3.2 tézis. *Algoritmusokat javasoltam q_s megfelelő értéktartományainak az azonosítására a kapcsolatok által használni kívánt útvonalak előzetes ismeretében. A javasolt algoritmusok segítenek meghatározni a küszöb megfelelő értékét nagyszámú szimulációs vizsgálat elvégzése nélkül.*

Az értekezésben javasoltam egy algoritmust, amely meghatározza $q_{s,max}$ értékét a fenti feltételek mellett. $q_{s,max}$ a legnagyobb megengedett értéke q_s -nek, amely mellett az r használhatósági követelmény még bármely végpontok közötti kapcsolat számára teljesíthető a hálózatban. Egy másik algoritmust is mutattam, amelyik $q_{s,maxS}$ értékét határozza meg. $q_{s,maxS}$ a legkisebb olyan értéke q_s -nek, amely esetében a küszöb már gyakorlatilag nem jelent korlátozást a tartalék erőforrások megosztásában egy adott használni kívánt útvonalakészlet mellett. Az algoritmusok kimeneteit a 2. táblázat összesíti az európai WDM hálózatra.

A táblázat és a szimulációs eredmények összevetéséből látszik, hogy $q_{s,max}$ mindig jó felső korlátja q_s megfelelő értéktartományának. Definíció szerint ugyanis nincs értelme ennél nagyobb értéket választani. Igaz azonban az is, hogy $q_{s,maxS}$ -nél nagyobb értéket

r	$q_{s,\max S}$	$q_{s,\max}$
0.0007	0.0815029	0.0063394
0.001	0.0815029	0.0111975
0.0015	0.0815029	0.0193748
0.005	0.0815029	0.0840775

2. táblázat: A q_s releváns értéktartományaira vonatkozó becslések eredménye az európai hálózatban.



6. ábra: Teljesíthető legjobb használhatósági garanciák különböző hosszúságú kapcsolatok esetén az európai hálózatban.

sincs értelme választani, mivel ekkor már gyakorlatilag korlátlan a tartalék erőforrások megosztásának a lehetősége.

Ugyanakkor látható, hogy nincs mindig szükség a maximális megosztás engedélyezésére, ami egybecseng a [C3, C1, J3]-ban tett megállapításokkal. Ennek több oka is van. Az egyik megegyezik azzal, amelyet az 4. ábrán látható blokkolási valószínűség görbének a küszöb magasabb értékei felé tapasztalható emelkedő menetével kapcsolatban említettünk. Egy további okként megemlíthető, hogy a használhatósági követelmény nem mindig teszi szükségessé minden kapcsolat számára a tartalékutak használatát. Következésképp a hívásengedélyező algoritmus nem mindig törekszik egy olyan hálózati állapot kialakítására, ahol a tartalék erőforrások maximálisan megosztottak.

[9] a kapcsolat végpontjai fizikai távolságának megfelelően definiálja a standard használhatósági követelményeket. Az alkalmazott használhatósági becslések eltérése miatt az ShUT módszer ebben a tekintetben jobban teljesít a kiterjesztett DiR módszernél, ahogyan az a 6. ábrán is látható.

A 3.2. tételhez kapcsolódóan $q_{s,\max S}$ meghatározása érdekében a következő feladatot kell megoldani, amelyről beláttam, hogy számítási értelemben bonyolult.

3.3 tézis. *Bizonyítottam, hogy megadott kapcsolatok legnagyobb olyan részhalmazának megkeresése, amelyek oszthatnak egy adott tartalék erőforráson, NP-teljes probléma még akkor is, ha a kapcsolatok által használni kívánt utakat előre ismerjük.*

A bizonyítás alapötlete az, hogy a definiált feladatot redukálni lehet egy gráfban a legnagyobb független csomóponthalmaz megkeresésére (IS). Az IS feladatról ismert, hogy NP-teljes, valamint az is, hogy létezik hozzá egy igen jó megoldást adó mohó algoritmus [12]. Ennek az egyszerű algoritmusnak az alapötlete alkalmazható a $q_{s, \max S}$ meghatározásához is.

5 Az értekezésben bemutatott eredmények felhasználása

Körültekintő tudományos munkának a tanulmányozott problémára kidolgozott megoldások bemutatásán kívül tartalmaznia kell az azok alkalmazhatóságának feltételeit érintő vizsgálatokat is. Az értekezés ezzel is foglalkozik, amiből itt csak a legfontosabb megállapításokat összegzem. Emellett példákkal illusztrálom a bemutatott módszerek alkalmazását.

5.1 Az alkalmazhatóság korlátai

Talán a legfontosabb probléma a pillanatnyi hálózati állapot teljes és pontos ismeretére építő hullámhossz- és útvonalválasztó algoritmusok alkalmazhatóságával kapcsolatban az állapotinformációk érvénytelenségéből eredő hibás döntés. Ezt az általánosnak tekinthető problémát egy elméleti modell segítségével vizsgáltam [C2].

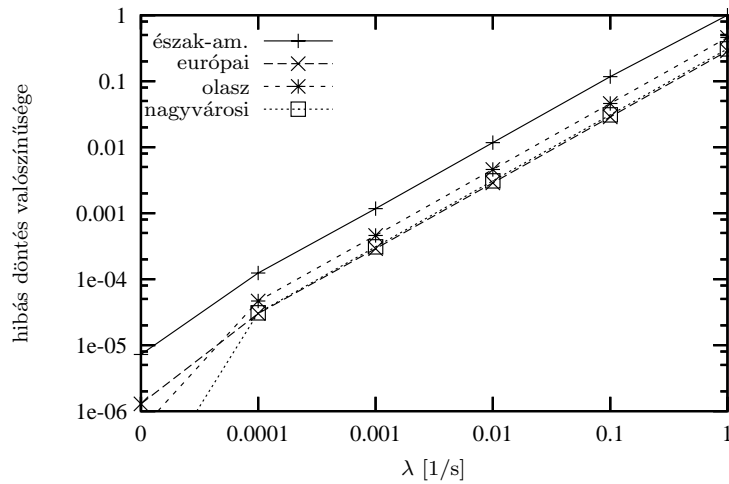
A modell a link állapot adatbázisok karbantartásához egy teljesen általános intra-domain útvonalválasztó protokoll alkalmazását feltételezi, és felső becslést ad annak a valószínűségére, hogy érvénytelen állapotinformációkon alapuló döntést hoz egy hívásengedélyező algoritmus. A becslés az állapotváltozást leíró információ terjedési és feldolgozási sebességének a figyelembe vételén alapul.

A modell segítségével megvizsgálható, hogy a valós hálózatokban alkalmazott link állapot adatbázist karbantartó protokolloknak milyen a teljesítménye, amely végső soron meghatározza a hívásengedélyező algoritmusok teljesítményét is. Ezt a vizsgálatot elvégeztem és az OSPF protokoll megfelelő kiterjesztése (pl. [7, 8]) alkalmazásának esetére becslést adtam a fenti valószínűségekre [C2].

A 7. ábra illusztrálja az eredményeket. Megjegyzendő, hogy a megbecsült valószínűség egy felső korlát, azaz a „valódi” valószínűségek ennél várhatóan alacsonyabbak, továbbá hogy az itt feltüntetett terhelés értékek mértékegysége [1/s], a korábbiakban alkalmazott normalizált skálával szemben.

Az egyes hálózatok között tapasztalható különbségek oka az átlagos foksámok eltéréseiben és a topológiák „átmérőinek” a különbségében keresendő.

Megállapítható, hogy alapvetően a beérkező kapcsolatfelépítési igények gyakorisága határozza meg a link állapot adatbázisok inkonzisztens állapotának



7. ábra: Felső becslés a hibás döntések valószínűségére tetszőleges csomópont esetében különböző hálózatokban a λ terhelés függvényében.

előfordulási valószínűségét, és a berendezésekben és kábelekben bekövetkező meghibásodásoknak kisebb a jelentősége. Ez a görbék bal szélén, a nulla érkezési intenzitáshoz tartozó értékeknek a görbe többi részével történő összevetéséből látható. Ha a hálózati forgalom nem túlzottan dinamikus (az igény érkezési intenzitások 0.001/s alatt maradnak), akkor az eredmények alapján a link állapot adatbázisok esetleges inkonzisztenciájának hatása elhanyagolható. Nagyobb dinamikájú forgalom esetében azonban valószínűleg az értekezésben bemutatottnál részletesebb elemzésre van szükség.

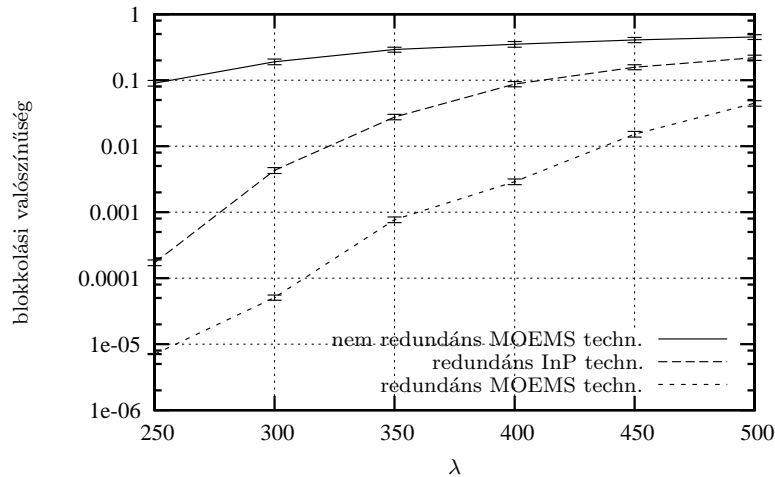
5.2 Alkalmazási példák

A 2.1 tézisben hivatkozott algoritmus segítségével elemeztem a csomóponti hibák hatását a végpontok közötti használhatóságra és a hívásblokkolás valószínűségére tisztán optikai hálózatokban különböző csomóponti berendezés architektúrákat és komponens technológiákat feltételezve.

Az elemzés eredményeit illusztrálja a 8. ábra, ahol λ ismét az Erlangban mért terhelést jelenti. Az ábrán összehasonlított három különböző csomóponti berendezéstípus megbízhatóság szerint növekvő sorrendben a következő: szerkezetileg nem redundáns, mikro-elektromechanikus rendszerű (MEMS) tükrös kapcsoló; szerkezetileg redundáns, indium-foszfid alapú integrált optikai kapcsoló; szerkezetileg redundáns, MEMS tükrös kapcsoló. Látható, hogy az egyes berendezéstípusok alkalmazása között jelentős különbségek tapasztalhatók a blokkolási valószínűségben a 8. ábrán vizsgált, nagyvárosi méretű hálózatban azonos használhatósági követelményeket feltételezve.

A disszertációban részletesen közölt elemzés végeredménye az, hogy a kontinentális hálózatokban alapvetően a linkek határozzák meg a kapcsolatok

használhatóságát. Következésképp nem ésszerű nagy költségekkel járó és/vagy redundáns csomóponti berendezésekre áldozni. Másrészt viszont a csomóponti berendezések architektúrájának és az alkalmazott komponensek technológiájának nagy szerepe van egy nagyvárosi hálózatban, és a megfelelő választás akár két nagyságrendbeli különbséghez is vezethet a használhatóságot tekintve.



8. ábra: Blokkolási valószínűség az európai hálózat 1:50-re kicsinyített változatában a λ terhelés függvényében.

A ShUT módszert megvalósító szimulátor segítségével előállított eredmények részét képezik a Magyar Telekom által (korábban Matáv) az IST MUPBED projektben bemutatott eredményeknek. Az IST MUPBED projekt az Európai Unió által a hatodik keretprogramban finanszírozott kutatási projekt. Legfontosabb célkitűzése, hogy az európai kutatási infrastruktúra, közelebbről a kutatási célú teszhálózatok jövőbeli továbbfejlesztésénél szöba jövő ASON/GMPLS technológián alapuló hálózati megoldásokat vizsgáljon [14].

Ezen kívül a [J1, J3, C1, C2, C3, C5] publikációkban közölt eredmények az Európai Unió COST 270 számú kutatási projektjében megjelent magyar eredmények is egyben [3]. A COST 270 projekt az „Optikai komponensek és eszközök megbízhatósága kommunikációs rendszerekben és hálózatokban” címet viseli. Legfontosabb célkitűzései a következők: (1) olyan módszerek kialakítása, amelyek biztosítják vagy továbbfejlesztik az új típusú optikai komponensek és eszközök megbízhatóságát kommunikációs rendszerekben és hálózatokban, (2) hálózati és berendezés költségek, működési feltételek és telepítési módszerek tanulmányozása különböző hálózati környezeteket feltételezve, (3) az eredmények és a tapasztalatok továbbítása a szabványosítással foglalkozó szervezetek felé.

6 Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönetet mond a következő cégeknek, szervezeteknek és intézményeknek, amelyektől a kutatási munka különböző szakaszaiban anyagi támogatást kapott: Siemens, Alapítvány a Távközlési és Telematikai Felsőoktatásért, Hungarian Fulbright Commission, The University of Texas at Dallas, IST MUPBED projekt, COST 270 projekt, és az OTKA (T048985 számú kutatási szerződés).

References

- [1] D. Arci, G. Maier, A. Pattavina, D. Petecchi, and M. Tornatore. Availability models for protection techniques in wdm networks. In *International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN)*, 2003.
- [2] J. Carlier, Y. Li, and J. Lutton. Reliability evaluation of large telecommunication networks. *Discrete Applied Mathematics*, 76:61–80, 1997.
- [3] COST 270 "Reliability of Optical Components and Devices in Communications Systems and Networks". URL <http://www.cost270.com>.
- [4] W. E. Deming. *Some Theory of Sampling*. Dover Publishers, Inc., 1966.
- [5] K. Dohmen. Improved inclusion-exclusion identities and bonferroni inequalities with applications to reliability analysis of coherent systems. Humboldt University, Berlin, Germany, 2000. Habilitation thesis.
- [6] J. Doucette, M. Colocqueur, and W. D. Grover. On the availability and capacity requirements of shared backup path-protected mesh networks. *SPIE Optical Networks Magazine*, 4(6):29–44, 2003.
- [7] D. K. et al. Traffic Engineering (TE) Extensions to OSPF Version 2. RFC3630, 2003.
- [8] K. K. et al. OSPF Extensions in Support of Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS). RFC4203, 2005.
- [9] European Telecommunications Standards Institute. Network aspects (na); availability performance of path elements of international digital paths. ETSI EN 300 416, 1998.
- [10] P. A. Fishwick. *Simulation Model Design and Execution*. Prentice Hall, 1995.
- [11] A. Fumagalli and M. Tacca. Optimal design of differentiated reliability (dir) optical ring networks. In *International Workshop on QoS in Multiservice IP Networks (QoS-IP)*, 2001.

- [12] M. Halldórsson and J. Radhakrishnan. Greed is good: approximating independent sets in sparse and bounded-degree graphs. In *Proceedings of the twenty-sixth annual ACM symposium on Theory of computing*, 1994.
- [13] Y. Huang, J. P. Heritage, B. Mukherjee, and W. Wen. Availability-guaranteed service provisioning with shared-path protection in optical wdm networks. In *Optical Fiber Communications Conference and Exhibit (OFC)*, 2004.
- [14] IST MUPBED "Multi-Partner European Testbeds for Research Networking". URL <http://www.ist-mupbed.org>.
- [15] J. Levendovszky, L. Jereb, Z. Elek, and G. Vesztergombi. Adaptive statistical algorithms in network reliability analysis. *Elsevier Performance Evaluation*, 48 (1–4):225–236, 2002.
- [16] D. A. A. Mello, J. U. Pelegri, R. P. Ribeiro, D. A. Schupke, and H. Waldman. Dynamic provisioning of shared-backup path protected connections with guaranteed availability requirements. In *IEEE BroadNets Conference*, 2005.
- [17] C. Ou, J. Zhang, H. Zang, L. H. Sahasrabudde, and B. Mukherjee. New and improved approaches for shared-path protection in wdm mesh networks. *IEEE J. of Lightwave Technology*, 22(5):1223–1232, 2004.
- [18] D. Shier. *Network Reliability and Algebraic Structures*. Clarendon Press, New York, NY, USA, 1991.
- [19] L. Song, J. Zhang, and B. Mukherjee. Dynamic provisioning with reliability guarantee and resource optimization for differentiated services in wdm mesh networks. In *Optical Fiber Communications Conference and Exhibit (OFC)*, 2005.
- [20] M. Tacca, A. Fumagalli, and F. Unghváry. Double-fault shared path protection scheme with constrained connection downtime. In *International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks Conference (DRCN)*, 2003.
- [21] M. Tornatore, G. Maier, and A. Pattavina. Availability design of optical transport networks. *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, 23(8):1520–1532, 2005.
- [22] J. Zhang, K. Zhu, B. Mukherjee, and H. Zang. Service provisioning to provide per-connection-based availability guarantee in wdm mesh networks. In *Optical Fiber Communications Conference and Exhibit (OFC)*, 2003.
- [23] J. Zhang, K. Zhu, H. Zang, and B. Mukherjee. A new provisioning framework to provide availability-guaranteed service in wdm mesh networks. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2003.

Publikációk

Folyóiratcikkek

- [J1] Zs. Pándi, M. Tacca and A. Fumagalli. Efficient Computation of Multi-Component Failure Stratum Probabilities. *IEEE Communications Letters*, (9)10:939-941, 2005.
- [J2] Zs. Pándi, M. Tacca, A. Fumagalli and L. Wosinska. Dynamic Provisioning of Availability-Constrained Optical Circuits in the Presence of Optical Node Failures. submitted to *IEEE Journal of Lightwave Technology*.
- [J3] Zs. Pándi and Á. Gricser. Improving Connection Availability by Means of Backup Sharing Restrictions. *OSA Journal of Optical Networking*, to appear
- [J4] Á. Gricser and Zs. Pándi. Szegmensalapú védelmi megoldások GMPLS környezetben. *Híradástechnika*, LX(2):50-55, 2005.

Cikkek nemzetközi konferenciákon

- [C1] Zs. Pándi and Á. Gricser. Analysis of the Trade-off between Availability and Backup Resource Sharing. In *IEEE International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Barcelona, Spanyolország, 2005 július.
- [C2] Zs. Pándi and L. Wosinska. On Temporary Inconsistency of the Link State Database with Prompt Update Policies. In *IEEE International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Barcelona, Spanyolország, 2005 július.
- [C3] Zs. Pándi and Á. Gricser. Availability Analysis of Shared Protection Schemes for On-line Connection Provisioning. In *Proceedings of the IV Workshop in G/MPLS Networks*, Girona, Spanyolország, 2005 április.
- [C4] Zs. Pándi, M. Tacca and A. Fumagalli. A Threshold Based On-line RWA Algorithm with Reliability Guarantees. In *Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, Milánó, Olaszország, 2005 február.
- [C5] Zs. Pándi, A. Fumagalli, M. Tacca and L. Wosinska. Impact of OXC Failures on Network Reliability. In *Proceedings of SPIE Reliability of Optical Fiber Components, Devices, Systems, and Networks II (Photonics Europe Conference)*, Strasbourg, Franciaország, 2004 március.
- [C6] T. Kárász, Zs. Pándi and T. Jakab. Network Consolidation — How to Improve the Efficiency of Provisioning Oriented Optical Networks. In *Proceedings of Workshop on the Design of Reliable Communications Networks (DRCN)*, Ischia, Olaszország, 2005 október.

- [C7] T. Kárász and Zs. Pándi. Optimal Reconfiguration of Provisioning Oriented Optical Networks. In *Proceedings of the 3rd International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks (HET-NETs)*, Ilkley, Nagy-Britannia, 2005 július.
- [C8] R. Chakka, T. V. Do and Zs. Pándi. A Generalized Markovian Queue to Model an Optical Packet Switching Multiplexer. In *Proceedings of the 10th International Conference on Analytical and Stochastic Modelling Techniques and Applications*, Nottingham, Nagy-Britannia, 2003 június.
- [C9] Cs. Király, Zs. Pándi and T. V. Do. Analysis of SIP, RSVP and COPS Interoperability. In *Quality of Service in Multiservice IP Networks (Proceedings of the QoSIP 2003 Conference)*, Lecture Notes in Computer Science (LNCS) series No. 2601 pp. 717-728, Springer-Verlag, Milánó, Olaszország, 2003 február.
- [C10] T. V. Do, R. Chakka and Zs. Pándi. Novel Analysis Method for Optical Packet Switching Nodes. In *Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, Budapest, 2003 február.
- [C11] Zs. Pándi, T. V. Do and Cs. Király. Planning of UMTS Networks Containing Stratospheric Platforms. In *Proceedings of the Networks Symposium*, München, Németország, 2002 június.
- [C12] Zs. Pándi, T. V. Do and Cs. Király. Network Planning Aspects of the HeliNet Telecommunications Architecture. In *Proceedings of the Data Systems in Aerospace Conference (DASIA)*, Dublin, Írország, 2002 május.
- [C13] T. V. Do, B. Kálmán, Cs. Király and Zs. Pándi. A Tool for the Service Planning and Management of Multi-layer Networks. In *Proceedings of the Networks Symposium*, Toronto, Kanada, 2000 szeptember.
- [C14] T. V. Do, Zs. Mihály, B. Kálmán, Cs. Király, Zs. Molnár and Zs. Pándi. WWW Applications for an Internet Integrated Service Architecture. In *Proceedings of the EUNICE'99 Conference*, Barcelona, Spanyolország, 1999 szeptember.