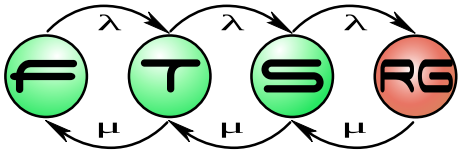
Rendszermodellezés

Hibatűrő Rendszerek Kutatócsoport



Bergmann Gábor
Darvas Dániel
Molnár Vince
Szárnyas Gábor
Tóth Tamás

2016. június 18.

Tartalomjegyzék

1. fejezet

Bevezető

Vajon mennyi programkódot képes átlátni egy programozó? Hány sorból áll a Windows 7 forráskódja?[1] Hogyan lehetséges mégis kézben tartani ekkora szoftverek fejlesztését? Hogyan garantálhatjuk, hogy a végső termék nem lesz hibás, megfelelő lesz a teljesítménye, és a rajta dolgozó mérnökökön kívül később más is képes lesz megérteni és módosítani a programot? Ezekre a kérdésre ad választ a Rendszermodellezés tárgy a komplex rendszerek modellezésének alapvető aspektusainak bemutatásával.

A *modellezés* egy jól bevált technika a bonyolult rendszerek komplexitásának kezelésében. A tárgy célja ezért a hallgatók megismertetése a szoftver- és hardverrendszerek modellezésének eszközeivel és módszereivel. A modellezés alapfogalmainak bevezetése után a modellek két nagy csoportjával, a struktúra-alapú és viselkedés-alapú modellekkel foglalkozunk. Szó lesz a modellek fejlesztéséről, illetve az elkészült modellek ellenőrzéséről, különböző felhasználásairól is.

[1] Körülbelül 40 millió sorból [3].

Példa. Vállalatunk a kezdeti sikereken felbuzdulva úgy dönt, hogy belép a közösségi taxizás piacára egy saját szolgáltatás indításával. Ehhez ki kell fejleszteni egy nagyméretű, elosztott rendszert, amelynek részét képezi majd a cég belső gépeire telepített központi szerver és a felhasználók okostelefonjain futó mobilalkalmazás, valamint kapcsolatban fog állni egy bank rendszerével is a fizetések lebonyolításához.
A szenior szoftvermérnök a kezdetektől modellalapú fejlesztésben gondolkodik, hiszen a rendszer mérete és összetettsége több szempontból is indokolja a modellek használatát. Először is a tervezés első lépései során nem lenne szerencsés alacsony szintű technikai problémákkal foglalkozni. Egy megfelelően *absztrakt* modell segítségével a részletkérdések kezdetben elhanyagolhatók, így a mérnökök elsőként a legfontosabb jellemzők kialakítására fókuszálhatnak.
Mivel a megcélzott terület a cég számára új, mindenekelőtt a kapcsolódó fogalmak és a köztük húzódó összefüggések feltárása lesz a cél. A rendszer elosztottsága miatt szükség lesz az egyes összetevők (szerver, mobiltelefon, bank, hálózat stb.) kapcsolatainak modellezésére is. Az ezekhez szükséges eszközöket a *struktúra alapú modellezés* nyújtja.
Amint elkészül a rendszer architektúrája, a mérnökök nekiláthatnak az egyes komponensek viselkedésének tervezéséhez. Itt két kapcsolódó feladat is felmerül: meg kell tervezni a rendszer *folyamatait* (pl. autórendelés, regisztráció, egyenleg feltöltése stb.), illetve ennek megvalósításához az egyes komponensek belső *állapotait* és lehetséges állapotváltozásait. Az ezekhez szükséges eszközöket az *viselkedés alapú modellezés* nyújtja.
Természetesen a vezetőség szeretné elkerülni a tervezési hibák miatti többletköltségeket. A szenior mérnök javaslatára a megszokott *tesztelésen* kívül már a rendszer modelljein is *ellenőrzéseket* fognak végrehajtani, így a hibák azelőtt kiderülhetnek, hogy a tényleges implementációt (drága emberi erőforrás felhasználásával) elkészítenék.
A szoftverek hibátlan működése mellett legalább ilyen fontos, hogy a rendszer *teljesítménye* megfelelő legyen. Ha a szolgáltatásunk nem elérhető vagy lassan válaszol, a felhasználók minden bizonnyal a konkurenciához menekülnek majd, a vállalkozásunk pedig kudarcba fullad. Szerencsére a leendő rendszer teljesítménye is jól becsülhető a modellek alapján, ehhez a *teljesítménymodellezés* nyújt majd eszköztárat.
Részben ide tartozik az is, hogy a legtöbb viselkedésmodell *szimulálható*. Ez több szempontból is a hasznunkra válik majd, hiszen egyrészt már a fejlesztés korai fázisában ki lehet próbálni az alapfunkciókat, másrészt a szimulációk eredményét is felhasználhatjuk a teljesítmény becslésére. Akár a szimulációkból, akár később az elkészült rendszer monitorozásából rengeteg információ is a rendelkezésünkre áll majd. Ahhoz, hogy ezekből használható tudást állítsunk elő, és adott esetben problémákat, vagy a rendszer rejtett tulajdonságait felfedezhessük, a *felderítő adatelemzés* eszköztárát is bevethetjük majd.
Korábban szóba került már a mindenek felett álló költséghatékonyság és a drága emberi erőforrás is. Szerencsére a szenior mérnöknek erre is van válasza: a kellően precíz modellekből akár *kódot is generálhatunk*, amivel rengeteg mérnökórát spórolhatunk meg.
Nincs más hátra, mint elküldeni a cégünk egyébként kiváló programozóit egy rendszermodellezés témájú tanfolyamra – vagy felbérelni egy fejvadász céget az ilyen téren (is) jól képzett műegyetemisták levadászására...

Ebben a jegyzetben a tárgyhoz tartozó legfontosabb témákat mutatjuk be. Az alapfogalmak definícióit releváns mérnöki példákkal illusztráljuk és magyarázzuk, illetve gyakorló feladatokkal segítjük a bemutatott módszerek megértését. Ehhez különböző színű keretes írásokat fogunk használni. Amint az előzőekben látszott, a példák és a definíciók keretben kerülnek kiemelésre, míg a kiegészítő megjegyzéseket kisebb betűmérettel szedtük. A jegyzetben szerepelnek majd feladatok is kék háttérrel, valamint hasznos tippek zöld keretben.

Definíció. A *definíció* egy fogalom pontos, precíz meghatározása.

Megjegyzés. Időnként megjegyzésekkel fogjuk árnyalni a bemutatott anyagot.

Feladat. Gyakorlásképp oldja meg az egyes fejezetekhez tartozó feladatokat!

Tipp. A feladatokhoz hasonló kérdések előfordulhatnak a számonkéréseken is.

A jegyzethez tárgymutató is tartozik, amely tartalmazza az előforduló kifejezések magyar és angol megfelelőjét, továbbá egyes angol kifejezések brit angol szerinti kiejtését az IPA jelölésrendszerével.

A jegyzetről

A jegyzet LaTeX nyelvű forráskódja elérhető a `https://github.com/FTSRG/remo-jegyzet` oldalon.

A jegyzet jelenleg fejlesztés alatt áll. Amennyiben az elkészült részekben hibát vagy hiányosságot találnak, kérjük jelezzék a GitHubon egy új *issue*[2] felvételével. A javítási ötleteket szívesen fogadjuk *pull requestek*[3] formájában is.

[2] `https://help.github.com/articles/about-issues/`
[3] `https://help.github.com/articles/using-pull-requests/`

2. fejezet

Modellezés és metamodellezés

Ebben a fejezetben a modellezés alapfogalmaival fogunk megismerkedni. Az itt bevezetett fogalmak újra és újra megjelennek majd a későbbi fejezetekben, ahol részletesen ki fogunk térni az adott területen történő értelmezésükre.

2.1. Modellezés

Mi értelme van modellezni? Fejben szinte mindig modellezünk, bármilyen probléma kerül elénk. Nincs ez másképp egy szoftver fejlesztésekor sem. Lássuk hát, miről beszélünk, amikor a modell szót használjuk.

Definíció. *Modell*: egy valós vagy hipotetikus világ (a „*rendszer*") egy részének egyszerűsített képe, amely a rendszert helyettesíti bizonyos megfontolásokban. Egy modell elkészítésének mindig egy kérdés megválaszolása a célja.

A modell tehát egy többnyire bonyolult rendszer egyszerűsített reprezentációja, amiben csak az aktuális probléma szempontjából lényeges vonásokat szerepeltetjük. Egy adott rendszer modellé történő leképezésének általában két fontos előnye van:

- A modell az eredeti rendszernél *kisebb*, hiszen az aktuális problémához nem (vagy lazábban) kapcsolódó, elhanyagolható információk nem jelennek meg benne.
- A modell az eredeti rendszernél *áttekinthetőbb*, hiszen csak az adott probléma szempontjából érdekes, releváns információkat és kapcsolatokat kell vizsgálni.

Példa. Modellekre sok példát láthatunk a hétköznapokban is. Nem csak gyerekek körében népszerű játék a modellvasút. Itt valóban modellről beszélhetünk, hiszen a játékvonatok számos tekintetben hűen reprezentálják a valódi vonatokat, azonban például „szemet hunyunk" a méretükkel, tömegükkel, a bennük lévő villanymotor paramétereivel és még sok egyéb hasonló tulajdonságukkal kapcsolatban.
Az informatika egyik leggazdagabb modellforrása a matematika. Amikor gráfelméletet tanulunk, valójában rengeteg, bizonyos szempontból hasonló probléma közös modelljét vizsgáljuk. Valóban, a matematika egyik célja az ilyen modellek azonosítása és minél hatékonyabb eszköztárak kidolgozása a rajtuk megfogalmazott feladatok megoldására. A gráfoknál maradva (gráfokról bővebben a *Struktúra alapú modellezés* c. segédanyagban és a *Bevezetés a számításelméletbe 2.* c. tárgyban lehet tájékozódni) egy város úthálózata jól reprezentálható egy élsúlyokkal ellátott gráffal, ahol a csomópontok a kereszteződések, az élek az útszakaszok, az élsúlyok pedig a szakaszok hosszait jelölik. Ez a modell kiválóan alkalmas legrövidebb útvonalak tervezésére (mi kellene még a *leggyorsabb* útvonal tervezéséhez?), de figyelmen kívül hagy számos egyéb paramétert, például az utakon lévő kanyarulatokat, a legnagyobb megengedett sebességet stb.

Megjegyzés. Az, hogy a modell kisebb, nem mindig „kényelmi" szempont. Gyakran lehet olyan problémával találkozni, aminek a mérete bizonyos szempontból *végtelen* (például végtelen sok állapota van, folytonos változók vannak benne,

esetleg részét képezi az *idő*), viszont egy alkalmas *véges* modellen a számunkra releváns tulajdonságok továbbra is jól vizsgálhatók maradnak. Egy autót fizikai szempontból modellezhet a pillanatnyi sebességvektora, ami három valós szám, tehát a modellünk így végtelen. Ha viszont feltételezzük, hogy a sebesség nagysága nem lehet 200 km/h-nál több, és két tizedesjegy pontossággal adjuk meg a vektor koordinátáit (tehát *diszkrét értékekkel* jellemezzük a rendszert), akkor máris véges modellt kapunk. Természetesen ez a modell kicsit torzítani fog a valósághoz képest, de számos problémánál ez a hiba elhanyagolhatóan kicsi lesz (ráadásul végtelen modellen lehet, hogy nem is tudnánk megoldást adni).

Fontos kérdés, hogy hogyan lehet ábrázolni egy modellt. Maga a modell ugyanis többnyire egy hipotetikus struktúra, nem kézzel fogható és nem is mindig célszerű teljes részletességgel ábrázolni.

Definíció. *Diagram*: a modell egy nézete, amely a modell bizonyos aspektusait grafikusan ábrázolja.

Megjegyzés. Fontos megjegyezni, hogy nem minden modell, ami modellnek látszik.

- *A modell nem a valóság*: az általunk definiált modellen bizonyos állítások igazak lehetnek, amik a valóságban nem állják meg a helyüket.
- *A modell nem a diagram*: a diagram csak egy ábrázolás módja a modellnek, amivel olvashatóvá tesszük.

2.2. Modellezési nyelvek

A modellek leírásához nem elég, ha diagramokat rajzolunk. Egy modell precíz megadásához szükség van egy *modellezési nyelvre*. A modellezési nyelvek legfőbb célja a kommunikáció gép-gép, ember-gép, vagy akár ember-ember között is. Egy modellezési nyelv lehet *szöveges* (pl. Verilog, VHDL, Java stb.) vagy *grafikus* (pl. webes konyhatervező, UML diagramok stb.). Gyakori, hogy egy modellezési nyelv szöveges és grafikus jelölésrendszert is definiál, ugyanis mindkettőnek megvannak a saját előnyei és hátrányai: jellemzően modellt építeni könnyebb szöveges nyelv használatával, míg a modell olvasása grafikus nyelvek (diagramok) segítségével egyszerűbb.

Definíció. Egy *modellezési nyelv* négy részből áll:

- *Absztrakt szintaxis* (más néven *metamodell*): meghatározza, hogy a nyelvnek milyen típusú elemei vannak, az elemek milyen kapcsolatban állhatnak egymással, és a típusoknak mi a viszonya egymáshoz. Ezt a reprezentációt használják gépek a modell belső tárolására.
- *Konkrét szintaxis*: az absztrakt szintaxis által definiált elemtípusokhoz és kapcsolatokhoz szöveges vagy grafikus jelölésrendszert definiál. Ezt a reprezentációt használják az emberek a modell olvasására és szerkesztésére.
- *Jólformáltsági kényszer*: Megadja, hogy egy érvényes modellnek milyen egyéb követelményeknek kell megfelelnie.
- *Szemantika*: az absztrakt szintaxis által megadott nyelvi elemek jelentését definiáló szabályrendszer.

Egy modellezési nyelvhez több konkrét szintaxis is adható.

Az absztrakt szintaxis tekinthető a modellezési nyelv modelljének, ezért hívjuk *metamodellnek* is. A konkrét szintaxis a metamodellhez képest annyival több, hogy a definiált elemekhez megjeleníthető reprezentációkat rendel, ezáltal válik olvashatóvá és szerkeszthetővé egy modell leírása. Ha nem okoz félreértést, akkor a szintaxis szót leggyakrabban az absztrakt és konkrét szintaxis együttes jelölésére használjuk (tehát az elemkészletre és a jelölésekre együtt). A jólformáltsági kényszerek tovább szűkítik a lehetséges modellek körét olyan szabályokkal, mint például az azonos nevű elemek tiltása. Végül a szemantika megadja, hogy az így leírt modell pontosan mit is jelent, vagy hogyan „működik”. A szemantika fogalmát strukturális és viselkedési modellek esetén kissé eltérően értelmezzük majd, erre a későbbi fejezetekben térünk vissza.

Példa. A C nyelv egy szöveges nyelv, melyben elemeknek tekinthetjük az `if`, `for`, `switch`, `változónevek`, `metódusnevek`, `típusok` stb. részeket. Ezek azonban nem tetszőleges sorrendben állhatnak egymás mellett, hanem egy jól meghatározott szabályrendszer szerint. Ez a szintaxis. Azt, hogy az `if` kulcsszóval elágazást, a `for` kulcsszóval pedig egy ciklust definiálunk és nem pedig valami teljesen más dolgot, a szemantika határozza meg. Vagyis a szemantika jelentéssel tölti meg a nyelvi elemeket.

Példa. A Yakindu Statechart Tools[a] egy állapotgépek specifikálását és fejlesztését lehetővé tévő nyílt forráskódú eszköz, mely az Eclipse IDE alapjaira épül. Kényelmi funkcióihoz tartozik az elkészített modell validációja, szimulálásának lehetősége, ill. a modellalapú kódgenerálás is. A szöveges (XML) nyelv mellett egy könnyen használható grafikus felületet is biztosít, ahol lehetőségünk van állapotokat és átmeneteket definiálni. Ezek nyelvi elemként, mint dobozok és nyilak jelennek meg. A grafikai szintaxis meghatározza, hogy a dobozokból csak nyilakkal lehet összekötni más dobozokat. Ekkor igazából azt adjuk meg, hogy egy adott állapotból alkalmazásunk milyen másik állapotba kerülhet. Ez a szemantikai jelentés. Az állapot alapú modellek leírásával részletesen a 4. fejezetben fogunk foglalkozni.

[a] `http://statecharts.org`

Megjegyzés. A metamodell ugyanúgy modell, mint a segítségével leírható modellek. Ebből kifolyólag ugyanúgy adható hozzá modellezési nyelv, aminek szintén lesz egy metamodellje. A gyakorlatban ez addig folytatódik, amíg az egyik metamodellt már egy szabványos modellezési nyelv segítségével írjuk fel. Érdekesség, hogy az UML metamodell-hierarchiájának gyökerében egy *önleíró modell* található: önmaga a saját metamodellje is egyben.

Példa. Modellekre és metamodellekre számos példa kerül majd elő a későbbi tanulmányok során:
- Az UML [11] objektum diagramján ábrázolt objektummodelleket az osztálydiagramokon ábrázolt metamodelljeik szerint adhatjuk meg (*Szoftvertechnológia* tárgy).
- Az XML dokumentumok metamodelljét az XML sémák adják (*Szoftvertechnológia* tárgy).
- Egy adatbázis tábla metamodellje a relációs adatbázisséma (*Adatbázisok* tárgy).

A konkrét szintaxist (jelölésrendszert) mindegyik esetben külön határozzák meg, az UML esetében többféle grafikus és szöveges szintaxis is definiált.

Tipp. Minden fejezetben, ahol modellezési formalizmusokkal ismerkedünk meg, szerepelni fog az adott modelltípus metamodellje is.

2.3. Nyílt és zárt világ feltételezés

Egy modell szemantikájának definiálása során több feltételezésből is kiindulhatunk. Ezeket rögzíteni kell, és a modell értelmezésekor döntő szerepük van a különböző állítások igazságtartalmának eldöntésekor.

Definíció. *Zárt világ feltételezés*: Minden állítás, amiről nem ismert, hogy igaz, hamis.

Definíció. *Nyílt világ feltételezés*: Egy állítás annak ellenére is lehet igaz, hogy ez a tény nem ismert.

A két feltételezés között az egyik legfontosabb különbség, hogy a nyílt világ feltételezés elismeri és használja az *ismeretlen* fogalmát, míg a zárt világban minden tudás ismertnek tekintett. Mindkét feltételezésnek megvan a maga szerepe és helye, ahogy azt a következő két példa is illusztrálja.

Példa. A zárt világ feltételezést olyankor alkalmazzuk, amikor egy rendszernek a teljes szükséges információ a rendelkezésére áll. Erre példa egy tömegközlekedési adatbázis: ha megkérdezzük, hogy közlekedik-e közvetlen járat a Magyar Tudósok körútja és a Gellért tér között, és ilyen járat nincs az adatbázisban, akkor a válasz egyértelmű „nem". Ebben az esetben valóban ez az elvárt és helyes válasz.
A nyílt világ szemantika olyankor alkalmazandó, amikor nem feltételezhetjük, hogy minden információ a rendelkezésünkre áll. Például egy orvosi nyilvántartó rendszerben előfordulhat (sőt, számítani kell rá), hogy egy beteg annak ellenére allergiás valamire, hogy ez a nyilvántartásban nem szerepel.

2.4. Absztrakció és finomítás

A modell definíciójának szerves része az *egyszerűsítés*, az adott probléma szempontjából irreleváns információk elhanyagolása. Ugyanannak a rendszernek több modelljét is elkészíthetjük más-más részletek kihagyásával. Ráadásul egy elkészített modellből további részleteket hagyhatunk el, vagy éppen újabb részleteket vehetünk bele, így a modellek a részletgazdagság szerint egyfajta hierarchiába rendezhetők.

Különbséget kell tennünk azonban egy modell részletekkel gazdagítása és megváltoztatása között. Ehhez segít, ha megkülönböztetjük a modellt (illetve a modellezett rendszert) és a környezetét.

Definíció. *Rendszer* és *környezete*: a környezet (vagy kontextus) a rendszerre ható tényezők összessége. Modellezéskor a modellezett rendszernek mindig egyértelműen definiálni kell a *határait*. A határon belül eső dolgokat a rendszer részének tekintjük, az azon kívül esők adják a környezetet. Szokás még a környezet elemeit két csoportba sorolni: *releváns* környezeti elemek azok a dolgok, amik a rendszerrel közvetve vagy közvetett módon kapcsolatban állnak, míg *irreleváns* környezeti elem, ami a rendszerrel nincs kapcsolatban.

Megjegyzés. Gyakori, hogy egy rendszer környezetéről (is) készítünk modelleket. Ennek haszna a rendszer és a környezet interakcióinak pontosabb megértése, tervezése és analízise. Az elkészült rendszerek tesztelésekor például gyakran nem az éles környezetben tesztelünk, hanem a környezet modellje alapján szimuláljuk az interakciókat.

A környezet szempontjából nézve a rendszert tekinthetjük *fekete doboznak* vagy *fehér doboznak*. Előbbi esetben a rendszer belső felépítését és viselkedését nem ismerjük, míg utóbbi esetben ezek az információk rendelkezésre állnak. Ez a két fogalom főleg tesztek tervezésekor érdekes, erről bővebben a 7. fejezetben fejezetben lesz szó.

Példa. Sportautók tervezésekor a rendszer jól körülhatárolható. Aerodinamikai szempontból releváns külvilágnak tekinthető az autó körül áramló levegő. Tervezéskor célszerű a karosszéria (rendszer) és a légáramlás (környezet) modelljét is elkészíteni, hogy minél pontosabb szimulációkkal megfelelő jóslatokat tudjunk tenni a terv minőségét illetően. Később, amikor az elkészült prototípus tesztelése folyik, a szélcsatorna tekinthető a légáramlás egy pontosabb, fizikai modelljének.

A környezet segítségével definiálhatjuk, hogy mit jelent a modell részletekkel gazdagítása.

Definíció. *Finomítás*: a modell olyan részletezése (pontosítása), hogy a környezet szempontjából nézve a finomított modell (valamilyen tekintetben) helyettesíteni tudja az eredeti modellt.

A finomítás mindig többletismeret bevitelét jelenti a modellbe. A finomítás konkrét módja és a helyettesíthetőség pontos definíciója problémafüggő, amikre sok példát láthatunk majd a későbbi fejezetekben. Természetesen a finomításnak ellentétes művelete is van.

Definíció. *Absztrakció*: a finomítás inverz művelete, vagyis a modell részletezettségének csökkentése, a modellezett ismeretek egyszerűsítése.

A szabályos finomítás után az eredeti modell mindig visszakapható egy szabályos absztrakcióval. Érdemes megjegyezni, hogy finomítás során többnyire tervezői döntést hozunk annak tekintetében, hogy

egy adott részletet hogyan illesztünk a modellbe, míg az absztrakció során a részlet elhagyása egyértelmű. Következésképpen egy finomítási lépésnek általában sokféle eredménye lehet, de egy adott absztrakciós lépésnek mindig csak egy.

Példa. Egy közlekedési lámpának megadható egy absztrakt és egy részletes modellje is. Az absztrakt modellben a lámpának két állása van: *tilos* és *szabad*. A részletesebb modellben a *szabad* állapotnak megfelelhet a *zöld* állapot, a *tilos* állapotban pedig a *sárga*, *piros* és *piros-sárga*.
Figyeljük meg, hogy az absztrakt modellből a részletesebbe lépés (finomítás) során többlet ismeretet vittünk a modellbe, mégpedig a lámpákkal kapcsolatban. Ráadásul mivel az új állapotok mindegyike egyértelműen megfeleltethető egy réginek, a környezet számára a rendszer továbbra is leírható az absztrakt modellel.
Azt is láthatjuk, hogy a finomítási lépésnek („bontsuk szét a *tilos* állapotot") több megoldása is lehetett volna, míg az ennek megfelelő absztrakciós lépésnek („vonjuk össze a *sárga*, *piros* és *piros-sárga* állapotokat") csak egyetlen megoldása van (az elnevezésektől eltekintve).

Tipp. A későbbi fejezetekben az adott témakör vonatkozásában számos példát adunk majd absztrakcióra és finomításra.

3. fejezet

Struktúra alapú modellezés

Hogyan épül fel egy rendszer? Milyen részekre bontható és ezek között milyen kapcsolat van? Ahhoz, hogy a rendszerünkkel kapcsolatos problémákat megválaszoljuk, fontos, hogy ezekre a kérdésekre tudjuk a választ. Ebben a fejezetben az egyes rendszerek *struktúrájának* jellemzésével foglalkozunk. Bemutatjuk a strukturális modellezés motivációját, a leggyakrabban alkalmazott formalizmusokat és azok matematikai alapjait.

3.1. A strukturális modellezés alkalmazásai

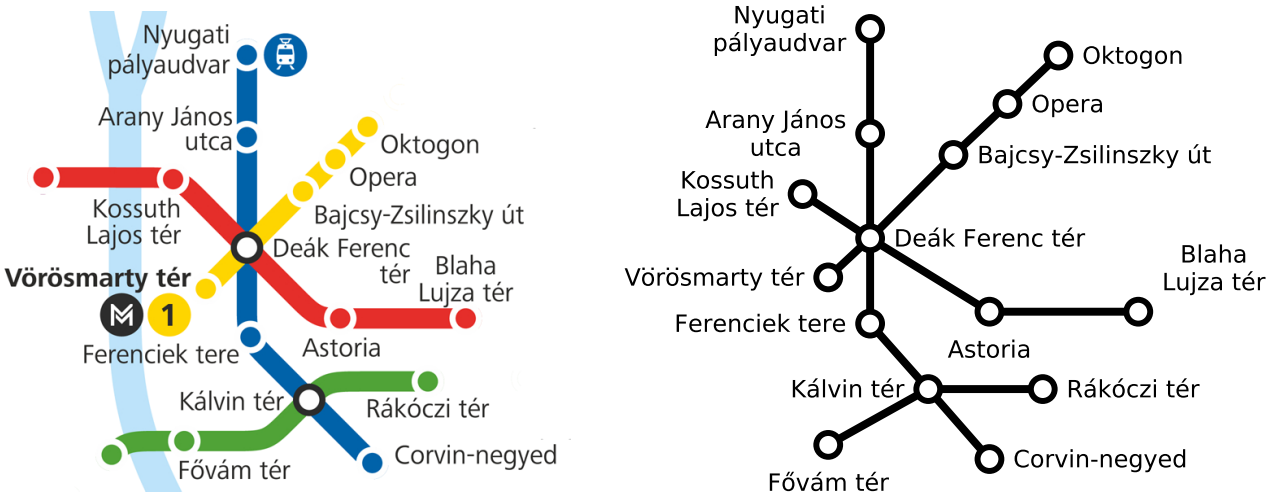
Mind a természetben, mind az ember alkotta rendszerekben fellelhetők bizonyos szabályszerűségek: egyesek a rendszer elemei közötti kapcsolatokat, míg mások magukat az elemeket jellemzik. Bár sok mindenben eltér egy közlekedési hálózat, egy számítógép-hálózat, egy épület vagy egy város felépítése, a strukturális modellezés eszköztárával olyan „nyelvet” kapunk, amivel ezeket hasonlóan modellezhetjük.

3.1.1. Hálózatok

Egy rendszert gyakran úgy jellemezhetünk a legjobban, ha bizonyos elemeit megkülönböztetjük és leírjuk az ezek közötti *kapcsolatokat*.

Példa. Egy nagyváros közlekedése az autóutak és sínhálózatok, a százezernyi járműnek és a rajta utazó embereknek szövevényes rendszere. A közlekedők folyamatosan mozgása mellett az infrastruktúra is rendszeresen változik a különböző fejlesztések, átalakítások és karbantartások miatt.
Egy ilyen rendszer precíz modellezése lehetetlen vállalkozás lenne, ezért helyette tipikusan olyan absztrakciókkal dolgozunk, amik az adott probléma megoldásához szükséges információkat tartalmazzák. Például az útvonalkereső alkalmazások ismerik a helyi tömegközlekedés járatait és segítséget nyújtanak abban, hogy az indulási pontunktól a célállomásig közlekedő járműveket és a közöttük lehetséges átszállásokat listázzák.
Vizsgáljuk meg például Budapest metróhálózatát! Az egyszerűség kedvéért a példában a hálózatnak csak a Nagykörúton belüli részével foglalkozunk.

A metróhálózat egyszerűsített térképe a 3.1(a) ábrán látható. A térképből is látható, hogy a hálózat könnyen ábrázolható egy *gráffal*, ahol a gráf minden *csomópontja* egy-egy metróállomást jelöl. A csomópontok címkéje a metrómegálló neve. Két csomópont között akkor fut *él*, ha a két megálló közvetlenül össze van kötve metróval (azaz nincs közöttük másik megálló). A metróhálózatot modellező gráf a 3.1(b) ábrán látható.



(a) A metróhálózat térképe [18]

(b) A metróhálózat egyszerű gráfként ábrázolva

3.1. ábra. Budapest metróhálózata a Nagykörúton belül

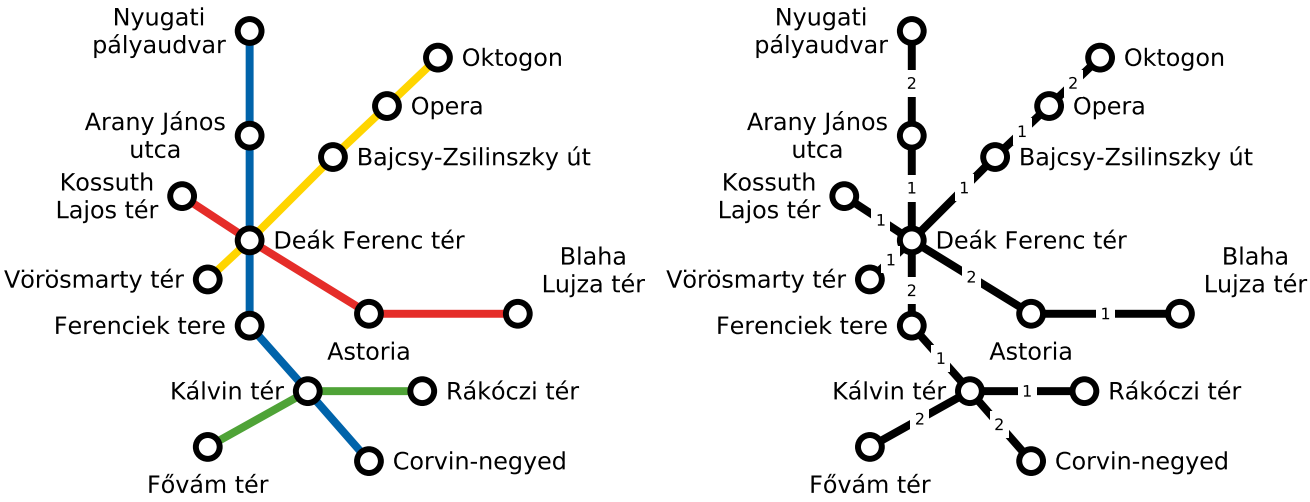
A modellünk segítségével választ kaphatunk például a következő kérdésekre:

1. Milyen megállók érhetők el a Vörösmarty térről indulva?
   Vizsgáljuk meg, hogy a Vörösmarty teret reprezentáló csomópontból kiindulva milyen csomópontok érhetők el. Ehhez elemi gráfbejáró algoritmusok használunk.
   Megjegyzés. Elemi útkereső algoritmusok pl. a *szélességi keresés* vagy *mélységi keresés*.
2. Legalább hány megállót kell utaznunk a Kossuth Lajos tér és a Kálvin tér között?
   A legrövidebb utat szintén kereséssel határozhatjuk meg.
   Megjegyzés. Például egy *szélességi kereséssel*.

Vannak azonban olyan metróközlekedéssel kapcsolatos kérdések, amelyek megválaszolásához a modell nem tartalmaz elég információt:

1. Milyen megállók érhetők el a Fővám térről indulva *legfeljebb egy átszállással*?
2. A menetrend szerint *hány percig tart* az út a Kossuth Lajos tér és az Astoria között?

Ezeknek a kérdéseknek megválaszolásához egészítsük ki a gráfot! Az első kérdéshez szükséges, hogy az egyes metróvonalakat meg tudjuk különböztetni, amit például az élek címkézésével érhetünk el. A 3.2(a) ábrán színekkel jelöltük a különböző élcímkéket. Induljunk ki a Fővám térről: átszállás nélkül az Astoria és a Rákóczi tér megállókat érhetjük el, míg egy átszállással elérhetjük az M3-as metró vonalán található megállókat is.



(a) A gráf élcímkékkel kiegészítve

(b) A gráf élsúlyokkal kiegészítve

3.2. ábra. A metróhálózatot ábrázoló gráf kiterjesztései

A második kérdés megválaszolásához az egyes megállók közötti utazási időt kell jellemeznünk. Ehhez vegyünk fel *élsúlyokat* a gráfba. A 3.2(b) ábrán élsúlyokkal jelöltük az egyes megállók között menetidőt. Ezek ismeretében meghatározható a Kossuth Lajos tér és a Kálvin tér közötti út menetrend szerinti időtartama. Ez a modell arra is alkalmas, hogy meghatározzuk a legrövidebb utat a két csomópont között, például a *Dijkstra algoritmus* segítségével.

Példa. Melyik metróvonalak között tudunk átszállni? A kérdésre választ kaphatunk a fenti modell segítségével. Nagyméretű hálózat esetén azonban már sokáig tarthat a válasz meghatározása, ezért érdemes olyan modellt készíteni, ami a válaszhoz nem szükséges részeket *absztrahálja*.

3.3. ábra. Átszállási lehetőségek a metróvonalak között a Nagykörúton belül

A 3.3. ábrán látható modellből azonnal kiderül, hogy mely metróvonalak között van átszállási lehetőség. A modell segítségével tehát hatékonyabban tudunk válaszolni erre a kérdésre, de a korábbi kérdésekhez szükséges információt elvesztettük az absztrakció során.

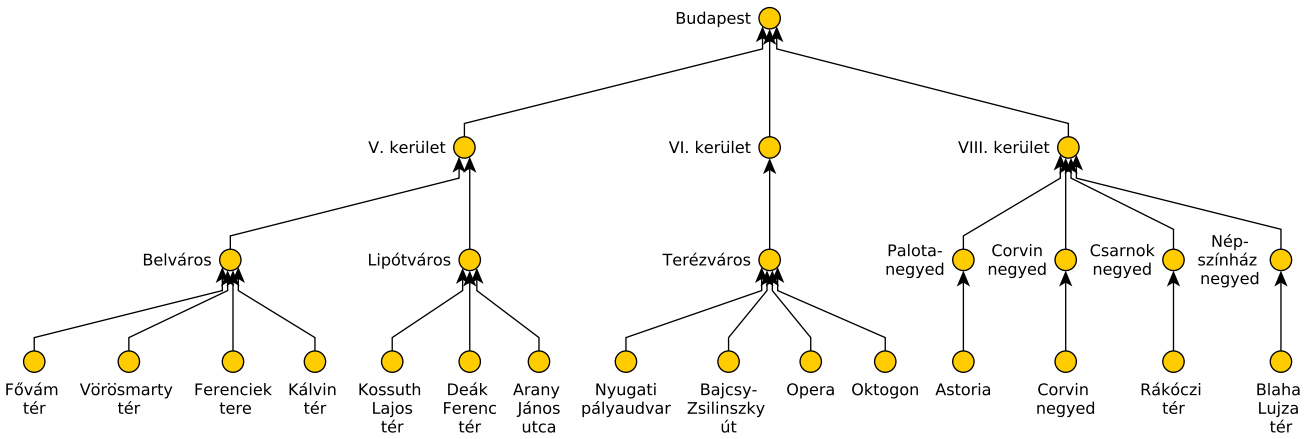
A közlekedési hálózathoz hasonlóan sok rendszer jól modellezhető gráffal: az élőlények táplálkozási lánca, a közösségi hálók, az úthálózat, telekommunikációs hálózatok stb.

3.1.2. Hierarchikus rendszerek

Példa. Budapestnek 23 kerülete van, amelyek további városrészekből állnak. Melyik városrészben van az Opera metrómegállója? Melyik városrészben van a legtöbb metrómegálló? Ezekhez hasonló kérdésekre úgy tudunk hatékonyan válaszolni, ha készítünk egy *hierarchikus modellt* a problémáról.

Készítsünk modellt, amely ábrázolja Budapest, a kerületek, a városrészek és a metrómegállók viszonyát! A 3.4. ábra modellje négy szintet tartalmaz:

1. A hierarchia legfelső szintjén Budapest szerepel.
2. A második szinten a város kerületei találhatók.
3. A harmadik szinten az egyes városrészek vannak.



3.4. ábra. Budapest kerületei, városrészei és metrómegállói (részleges modell)

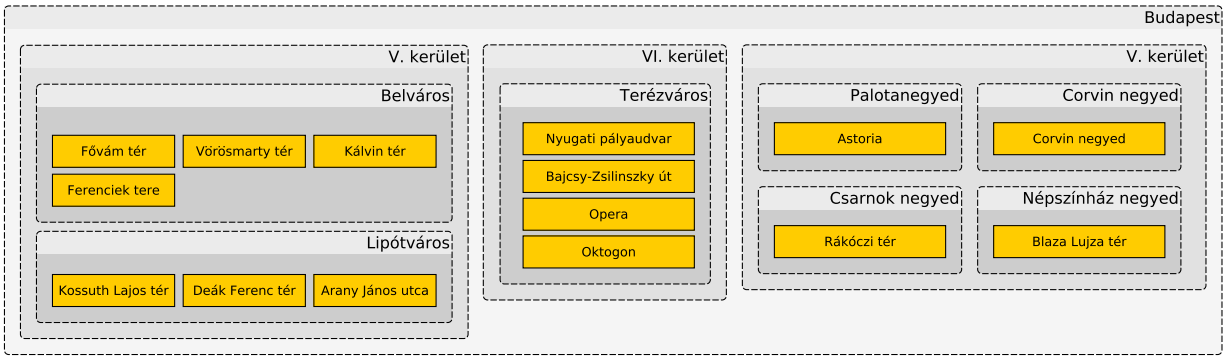
4. A negyedik szinten a metrómegállók találhatók.

Látható, hogy a hierarchikus modellt is ábrázolhatjuk gráfként. A csomópontok a modell különböző szintű elemeit reprezentálják, míg az élek a *része* viszonyt fejezik ki, például az Opera megálló a VI. kerület része. A gráf *gyökér csomópontja* a hierarchiában legmagasabban szereplő elem, Budapest.

Amennyiben egy rendszert hierarchikusan részekre bontunk, nem fordulhat elő, hogy egy elem tartalmazza a szülő elemét, ezért a hierarchikus modelleket reprezentáló gráfok körmentesek. A gyökér elemet leszámítva minden elemnek van szülője, tehát a gráf összefüggő is, így a hierarchikus modellek gráfjai egyúttal *fák*.

Megjegyzés. A fa struktúrában a gráf élei *explicit módon* jelölik a tartalmazási hierarchiát. A gyakorlatban nem mindig jelenítjük meg explicit módon a tartalmazási viszonyokat.

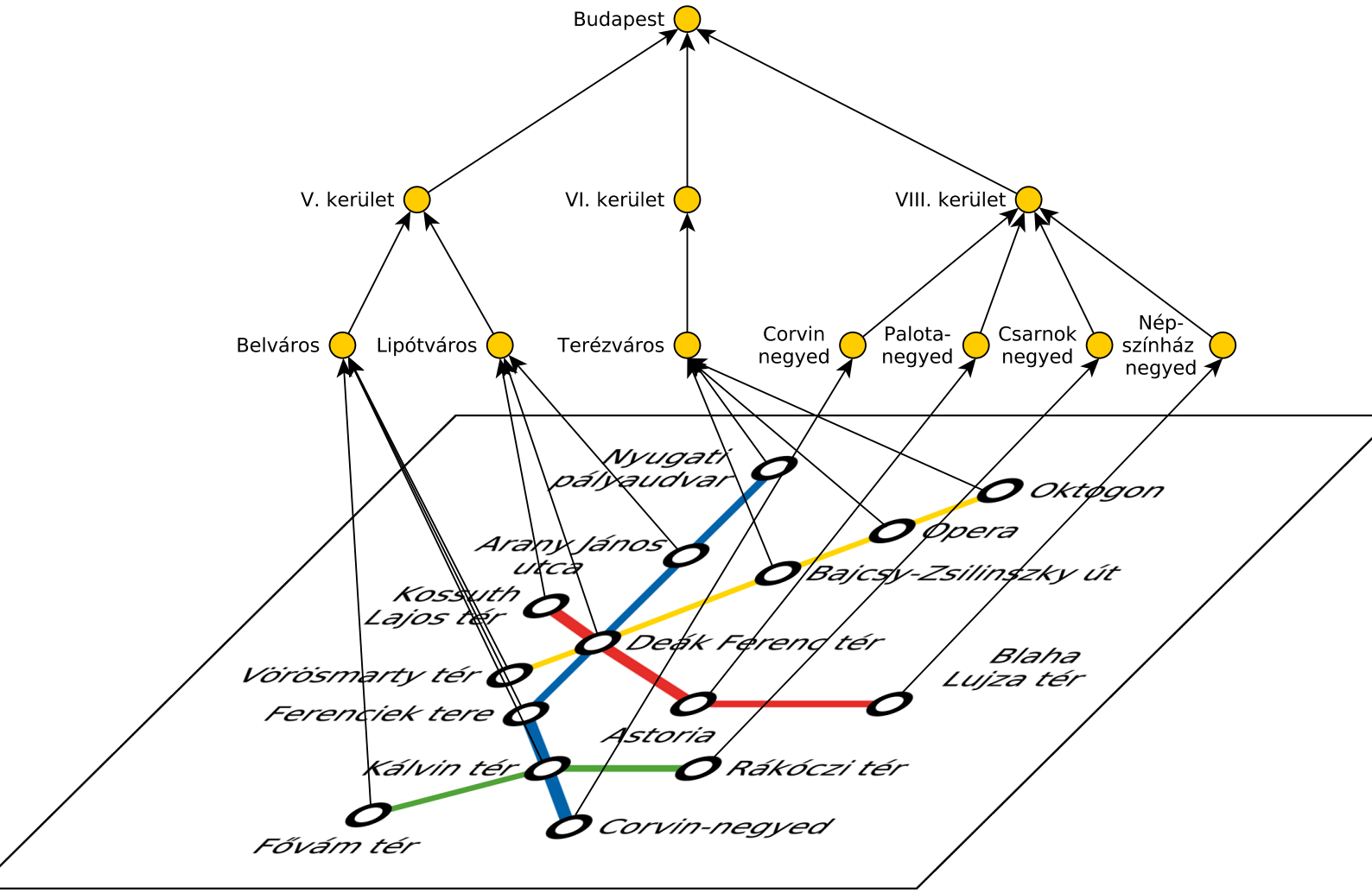
A tartalmazási hierarchia ábrázolható a tartalmazási viszonyok *implicit megjelenítésével* is:



3.5. ábra. A tartalmazási viszonyok implicit módon jelölve

A 3.5. ábrán egy olyan diagramot látunk, amelyben az egyes síkidomok közötti bennfoglaló ábrázolása reprezentálja a modellben szereplő tartalmazási viszonyt.

Láthattuk tehát, hogy mind a modellelemek közötti kapcsolat, mind a modellhierarchia hatékonyan ábrázolható gráfként. A 3.6. ábrán látható modell a 3.2(a) és a 3.4. ábrákon található metróhálózatot és a területek hierarchiáját is tartalmazza.



3.6. ábra. Budapest metróhálózata és a városrészek, kerületek hierarchiája

3.1.3. Tulajdonságok

Példa. A közlekedési vállalat üzemen kívüli járművei telephelyeken parkolnak és itt végzik rajtuk a szükséges karbantartásokat. A metrók telephelyeinek neve metró *járműtelep*, a buszoké az *autóbuszgarázs*.
Mennyi üzemanyag tárolható a legnagyobb autóbusz garázsban? Milyen hosszú a Kőér utcai metró járműtelep vágányhálózata? Ezek a kérdések a modellünk elemeinek tulajdonságaival kapcsolatban merülnek fel. Építsünk modellt a problémára!

A telephelyeket például az alábbi modellel írhatjuk le:

azonosító	*helyszín*	*funkció*	*kapacitás*	*vágányhossz*	*max. üzemanyag*
T1	Mexikói út	metró járműtelep	24	8 500 m	
T2	Kőér utcai	metró járműtelep	60	16 512 m	
T3	Cinkota	autóbuszgarázs	265		250 000 liter
T4	Kelenföld	autóbuszgarázs	322		200 000 liter

3.1. táblázat. A BKK telephelyei (részleges modell)

A modellünk elemei a táblázat sorai. A táblázat fejlécében definiált *tulajdonságokból* (pl. helyszín, vágányhossz) az egyes modellelemek eltérő értékeket vehetnek fel. Látható, hogy a táblázatnak nem minden celláját töltöttük ki, mivel az egyes jellemzők nincsenek mindenhol értelmezve.

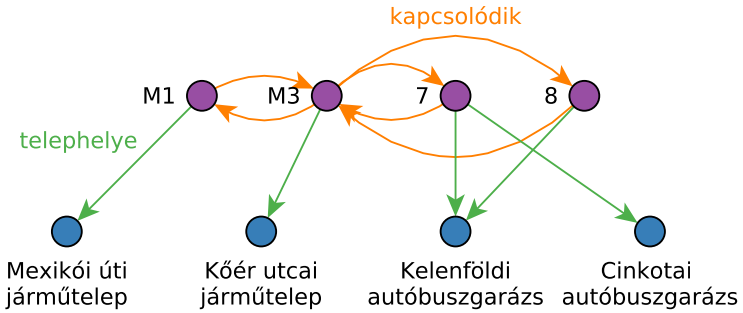
Megfigyelhetjük azonban, hogy az azonos funkcióval rendelkező modellelemek azonos tulajdonságokra vesznek fel értéket. Mindkét típusú telephelynek van *azonosító*, *helyszín*, *funkció* és *kapacitás* attribútuma. Az autóbuszgarázs esetén a *max. üzemanyag*, a metró járműtelep esetében a *vágányhossz* attribútumot rögzítjük.

3.1.4. Típusok

A 3.1. táblázatban láthattuk, hogy a *funkció* jellemzővel megkülönböztethetjük az egyes a telephelyeket. Ha a *funkció* jellemzőt a modellelemek *típusának* tekintjük, akkor úgy is fogalmazhatunk, hogy a *vágányhossz* jellemző csak a metró járműtelep típusú elemekre értelmezett, a *max. üzemanyag* jellemző csak az autóbuszgarázs típusra. A típusokat felhasználhatjuk a gráfok jellemzésére is.

Példa. A korábbi metróhálózatot szeretnénk kiegészíteni a buszhálózatra vonatkozó információval. Szeretnénk tárolni azt is, hogy az egyes vonalakon közlekedő járművek melyik telephelyen parkolnak. Az autóbuszvonalon közlekedő járművek autóbuszgarázsban, a metróvonalon közlekedő járművek metró járműtelepen parkolnak.

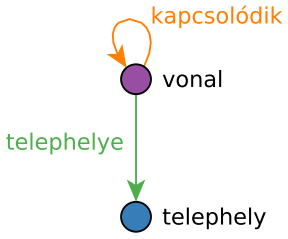
Készítsünk egy példánygráfot, amelyen ábrázoljuk az M1 és M3-as metróvonal, valamint a 7-es és a 8-as buszvonalak kapcsolódásait (*kapcsolódik*) *élek*, valamint azt, hogy az egyes vonalak melyik telephelyhez tartoznak (*telephelye*) *élek*.



3.7. ábra. Közlekedési vonalak és telephelyek

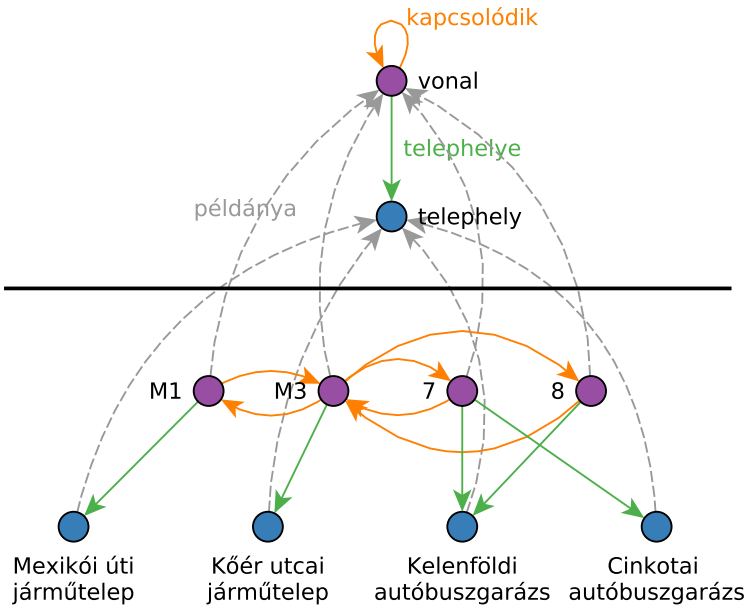
A példánygráfot követve a problémához tartozó *típusgráfban* meg kell jelennie a *vonal* és a *telephely* fogalmaknak. Az egyes vonalak kapcsolódhatnak egymáshoz a *kapcsolódik* él mentén, míg a vonal telephelyét a *telephelye* él jelzi.

Megjegyzés. Az egyes telephelyek tulajdonságait nem ábrázoltuk az ábrán.



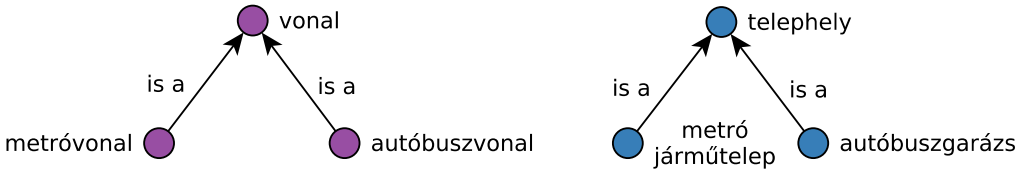
3.8. ábra. Közlekedési vonalak és telephelyek típusgráfja

A példánygráfot és a típusgráfot egy gráfban is jelölhetjük. Ekkor az egyes példányok és a típusok között egy *példánya* él fut.



3.9. ábra. Közlekedési vonalak és telephelyek példány- és típusgráfja

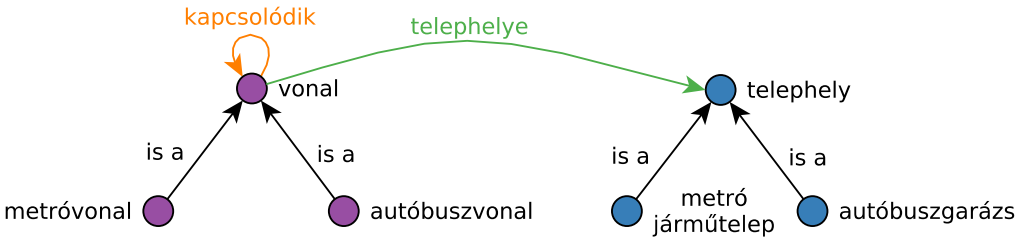
A 3.10. ábra bemutatja a problémához tartozó *típushierarchiát*. A típushierarchia egy hierarchikus modell, amely az egyes típusok leszármazási (*is a*) viszonyait ábrázolja.



3.10. ábra. Közlekedési vonalak és telephelyek típushierarchiája

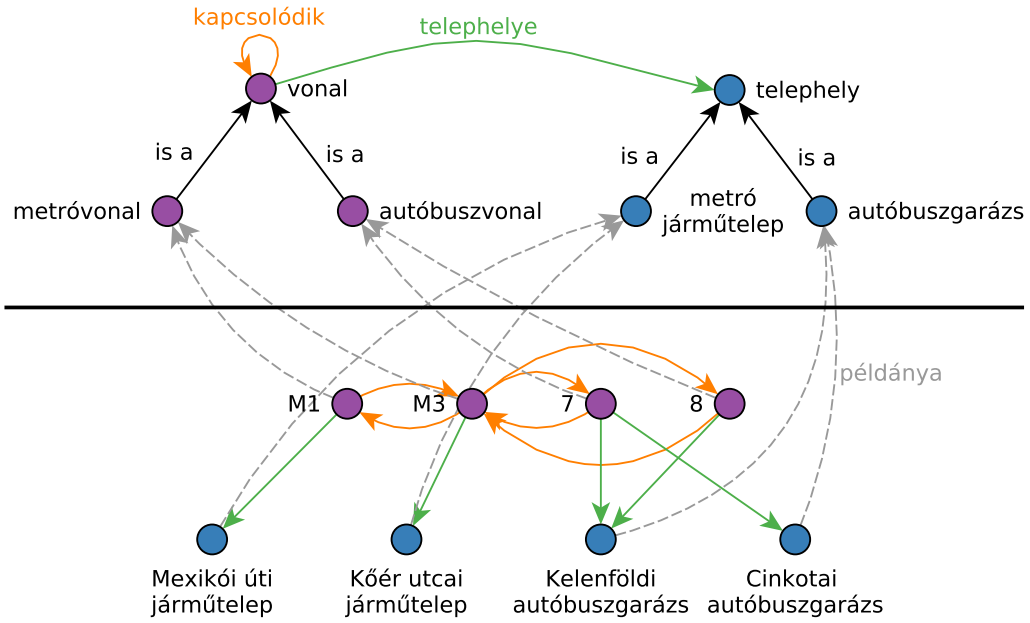
A rendszer fejlesztésekor gyakran fontos, hogy a típusgráfot és a típushierarchiát együtt lássuk. A *metamodell* tartalmazza a típusgráfot, a típusok hierarchiáját, a tulajdonságmodellt (ill. további, itt nem részletezett szabályokat, pl. multiplicitási kényszerek, jólformáltsági kényszerek).

A típusgráfban és a típushierarchiában tartalmazott információt, valamint tulajdonságmodellt együtt modellezve megkapjuk a terület metamodelljét. A metamodell részlete a 3.11. ábrán látható. Bár az ábrán a csomópontok elrendezése alapján következtethetünk arra, hogy melyik vonalakat látjuk, ezt az információt elvesztettük: ebben a reprezentációban az egyes metróvonalakat nem tudjuk megkülönböztetni.



3.11. ábra. Közlekedési vonalak és telephelyek (részleges) metamodellje

A példánymodellt és a metamodellt ábrázolhatjuk egyszerre is, a két modell elemei között a *példánya* viszony teremt kapcsolatot (szürke szaggatott nyíl).



3.12. ábra. Közlekedési vonalak és telephelyek példánymodellje és (részleges) metamodellje egy gráfon ábrázolva

Feladat. Az egyes járműtelepek is valamelyik városrészhez tartoznak. Készítsünk olyan metamodellt, amelyben ábrázolható az egyes járműtelepek és városrészek kapcsolata is!

3.2. A strukturális modellezés elmélete

Ahogy az eddigi példákban láttuk, a strukturális modellezés célja, hogy a rendszer felépítését jellemezze, beleértve az egyes elemek típusát, a közöttük lévő kapcsolatokat és hierarchiát, valamint az elemek tulajdonságait. Egy rendszer strukturális modellje tehát alkalmas arra, hogy az alábbi kérdésekre (nem feltétlenül kimerítő) választ nyújtson:

- Milyen elemekből áll a rendszer?
- Hogyan kapcsolódnak egymáshoz az elemek?
- Milyen hierarchia szerint épül fel a rendszer?
- Milyen tulajdonságúak a rendszer elemei?

A strukturális modellre az alábbi tömör definíciót adhatjuk.

Definíció. A *strukturális modell* a rendszer felépítésére (*struktúrájára*) vonatkozó tudás. A strukturális modell a rendszer alkotórészeire, ezek tulajdonságaira és egymással való viszonyaira vonatkozó statikus (tehát változást nem leíró) tudást reprezentál.

Megjegyzés. Fontos, hogy maga a strukturális modell változhat az idő során (pl. a metróhálózat fejlődik), de maga a modell nem ír le időbeli változásokat (pl. hogy miként mozognak a szerelvények).

A következőkben a korábbi példákra építve bemutatjuk a strukturális modellezés elméleti hátterét és precízen definiáljuk a szükséges fogalmakat.

3.2.1. Tulajdonságmodell

Definíció. A *jellemző* egy, a modell által megadott *parciális függvény*, amelyet a modellelemeken értelmezünk.

Megjegyzés. A H halmazon értelmezett *parciális függvény* nem jelent mást, mint a H valamely (nem megnevezett) részhalmazán értelmezett *függvény*. Konkrét esetünkben az egyes jellemzőket a modellelemek egy-egy részére értelmezzük (nem feltétlenül az összesre).

A jellemzőket gyakran táblázatos formában ábrázoljuk. Vizsgáljuk meg például a 3.1. táblázat jellemzőit:

azonosító	*helyszín*	*funkció*	*kapacitás*	*vágányhossz*	*max. üzemanyag*
T1	Mexikói út	metró járműtelep	24	8 500 m	
T2	Kőér utcai	metró járműtelep	60	16 512 m	
T3	Cinkota	autóbuszgarázs	265		250 000 liter
T4	Kelenföld	autóbuszgarázs	322		200 000 liter

Megjegyzés. A tulajdonságmodell mögötti matematikai struktúra az ún. *reláció*. A reláció pontos halmazelméleti definíciójával és a relációkon értelmezett műveleteket definiáló *relációalgebrával* bővebben az *Adatbázisok* tárgy foglalkozik.

A modellelemeket az *azonosító* jellemzőjükkel különböztetjük meg egymástól. A *kapacitás* jellemzőhöz tartozó függvény *kapacitás*$(e) \to n$, ahol e egy modellelem azonosítója, n egy nemnegatív egész szám. Például

$$\textit{kapacitás}(\mathsf{T2}) = 60, \quad \textit{kapacitás}(\mathsf{T3}) = 265.$$

A *funkció* jellemzőhöz tartozó függvény *funkció*$(e) \to t$, ahol e egy modellelem azonosítója, t a $\{\mathsf{metró\ járműtelep}, \mathsf{autóbuszgarázs}\}$ halmaz eleme. Például

$$\textit{funkció}(\mathsf{T2}) = \mathsf{metró\ járműtelep}, \quad \textit{funkció}(\mathsf{T3}) = \mathsf{autóbuszgarázs}.$$

A fentiekhez hasonlóan, a *vagányhossz* jellemzőhöz tartozó parciális függvény *vagányhossz*$(e) \to n$, ahol e egy modellelem azonosítója, n egy nemnegatív egész szám. Fontos különbség viszont az eddigiekhez képest, hogy ezt jellemzőt csak bizonyos modellelemekre értelmeztünk, másokra nem: a metró járműtelepek esetén vesz fel értéket, az autóbuszgarázsok esetén viszont nem. Vagyis látható, hogy a *vagányhossz* jellemző csak akkor vesz fel értéket, ha a *funkció* attribútum értéke metró járműtelep.

Ha tehát a *funkció* attribútumot a telephely *típusának* tekintjük, akkor úgy is fogalmazhatunk, hogy a *vágányhossz* jellemző csak a metró járműtelep típusú elemekre értelmezett. Általánosan:

Definíció. A *típus* egy kitüntetett jellemző, amely meghatározza, hogy milyen más jellemzők lehetnek értelmezettek az adott modellelemre, illetve milyen más modellelemekkel lehet kapcsolatban. A többi jellemzőt *tulajdonságnak* hívjuk.
Megjegyzés. Jelen anyagban az egyszerűség kedvéért feltételezzük, hogy a modellelemeknek pontosan egy típusa van.

A modellünkben két típus van: az autóbuszgarázs és a járműtelep. Például a cinkotai telephely az autóbuszgarázs, míg a mexikói úti telephely a metró járműtelep típus példánya.

Definíció. Egy adott t típus *példányainak* nevezzük azon modellelemeket, amelyek típusa t.

A modellezési gyakorlatban elterjedt (de nem univerzális) megkötés, hogy az egyes elemek típusát állandónak tekintjük. Ha az elem típusa a rendszer működése során nem változhat meg, akkor olyan típust kell hozzárendelni, amely az elem teljes életciklusa során előforduló összes lehetséges jellemzővel, kapcsolattal összhangban van.

3.2.2. Gráfmodellek

Formális definíciók (∗). A definíciók támaszkodnak a gráfelmélet alapjaira, ezért röviden összefoglaljuk a felhasznált definíciókat.

A *gráf* egy olyan $G = (V, E)$ struktúra, ahol V halmaz a csomópontok, E az élek halmaza. Az élek csomópontok között futnak, *irányítatlan gráf* esetén az E halmaz csomópontok rendezetlen $\{v_1, v_2\}$ párjaiból áll (tehát nem különböztetjük meg a $\{v_1, v_2\}$ és a $\{v_2, v_1\}$) párokat, míg *irányított gráf* esetén csomópontok rendezett (v_1, v_2) párjaiból.

Címkézett gráf esetén a gráf elemeit (csomópontjait és/vagy éleit) *címkékkel* láthatjuk el. A címkézés célja lehet *egyedi azonosító* hozzárendelése vagy bizonyos tulajdonság leírása (pl. a csomópontok kapacitása, élek típusa). Ha precízen szeretnénk jellemezni a gráfot, a következő terminológiát használhatjuk: ha csak a csomópontokhoz rendelünk címkéket, *csúcscímkézett* gráfról beszélünk, míg ha csak a gráf éleihez rendelünk címkéket, *élcímkézett* gráfról beszélünk.

A típusok gráf jellegű modellek esetén is fontos szerepet játszanak. A gráfmodell elemeit (külön-külön a csomópontokat és az éleket is) típusokba sorolhatjuk. A típusok meghatározzák, hogy az egyes csomópontok milyen élekkel köthetők össze.

Az egyes csomópont- és éltípusok viszonyát gráfként is ábrázolhatjuk.

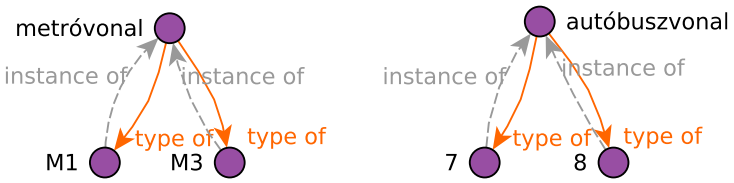
Definíció. A *típusgráf* egy olyan gráf, amelyben minden csomóponttípushoz egy típuscsomópont, minden éltípushoz egy típusél tartozik.

A gráfmodelleken is értelmezzük a *példány* fogalmát.

Definíció. Egy adott típusgráf *példánygráfja* alatt olyan gráfmodellt értünk, amelynek elemei a típusgráf csomópont- és éltípusainak példányai, valamint minden él forrása és célja rendre az éltípus forrásának és céljának példánya.

A típusgráfot és példánygráfot egy gráfon ábrázolva a típus-példány viszonyok is megjeleníthetők: a példánygráf csomópontjaiból a típusgráf csomópontjaira *instance of* (*példánya*) élek mutatnak. Szintén *instance of* viszony áll fenn a példánygráf élei és a típusgráf élei között.

Megjegyzés. Az *instance of* viszony helyett gyakran annak inverzét, a *type of* (x *típusa* y-nak) viszonyt. Gráfban ábrázolva az *példánya* és *típusa* élek adott csomópontok között egymással ellentétes irányúak.



3.13. ábra. Példány és típusgráf *type of* élekkel

Definíció. Egy rendszer *metamodellje* tartalmazza a típusgráfot, az egyes típusok közötti kapcsolatokat, ill. további megkötéseket is.
Megjegyzés. A további megkötések között szerepelhetnek jólformáltsági kényszerek, multiplicitási kényszerek stb. Ezekkel most nem foglalkozunk részletesen.

3.2.3. Hierarchia

Formális definíciók (∗). A *séta* szomszédos csúcsok és élek váltakozó sorozata, mely csúccsal kezdődik és csúcsban végződik. Az *út* olyan séta, amely nem metszi önmagát, valamint első és utolsó csúcsa különbözik. A *kör* olyan séta, amely nem metszi önmagát, valamint első és utolsó csúcsa megegyezik. A körmentes, összefüggő gráfokat *fának* nevezzük. (A körmentes gráfokat *erdőnek* nevezzük.) A fák esetén gyakran kiemelt szerepet tulajdonítunk egy csomópontnak: a *gyökér csomópont* a fa egy megkülönböztetett csomópontja. A *gyökeres fa* olyan fa, ami rendelkezik gyökér csomóponttal. *Gyökeres, szintezett fa* esetén a fa csomópontjaihoz hozzárendeljük a gyökértől vett távolságukat is.

A hierarchikus modellezésben kiemelt szerepet játszanak az irányított körmentes gráfok. Egy gráf DAG (*directed acyclic graph*), ha nem tartalmaz irányított kört.

Egy rendszer hierarchiája a rendszer dekompozíciójával állítható elő.

Definíció. A *dekompozíció* (*faktoring*) egy rendszer kisebb *komponensekre* bontása, amelyek könnyebben érthetők, fejleszthetők és karbantarthatók.

A rendszer így kapott egyes komponensei (részrendszerei) gyakran további dekompozícióval még kisebb részekre bonthatóak. Természetesen a dekompozíció során ügyelnünk kell arra, hogy az egyes részekből visszaállítható legyen az eredeti rendszer, különben a kapott strukturális modellünk hiányos.

Definíció. Egy dekompozíció *helyes*, ha a dekompozícióval kapott rendszer minden elemének megfeleltethető az eredeti rendszer valamelyik eleme, és az eredeti rendszer minden eleméhez hozzárendelhető a dekompozícióval kapott rendszer egy vagy több eleme.

3.3. Nézetek

A struktúramodellekből különböző *nézeteket* állíthatunk elő.

Tulajdonságmodelleken a leggyakrabban használt műveletek a *szűrés* és a *vetítés*. Ezek során úgy *absztraháljuk* a modellt, hogy bizonyos modellelemeket és/vagy azok egyes jellemzőit elhagyjuk.

Megjegyzés. A relációalgebrában a *szűrés* művelet neve *szelekció*, a *vetítés* művelet neve *projekció*.

3.3.1. Szűrt nézet

Ismét idézzük fel a 3.1. táblázat telephelyeket tartalmazó tulajdonságmodelljét.

azonosító	*helyszín*	*funkció*	*kapacitás*	*vágányhossz*	*max. üzemanyag*
T1	Mexikói út	metró járműtelep	24	8 500 m	
T2	Kőér utcai	metró járműtelep	60	16 512 m	
T3	Cinkota	autóbuszgarázs	265		250 000 liter
T4	Kelenföld	autóbuszgarázs	322		200 000 liter

Definíció. A *szűrés* művelet során a modell elemein kiértékelünk egy feltételt és azokat tartjuk meg, amelyek megfelelnek a feltételnek.

Tulajdonságmodellek esetén a szűrés az elhagyott modellelemek a modell sorai lehetnek, gráf jellegű modellek esetén a gráf csúcsai vagy élei.

Tulajdonságmodell szűrése

Példa. Szeretnénk megtudni, hogy mely telephely alkalmas legalább 100 jármű befogására.

Azokra az elemekre szűrünk, amelyeknél a kapacitás jellemző értéke 100-nál nagyobb vagy egyenlő.

Az eredmény:

azonosító	*helyszín*	*funkció*	*kapacitás*	*vágányhossz*	*max. üzemanyag*
T3	Cinkota	autóbuszgarázs	265		250 000 liter
T4	Kelenföld	autóbuszgarázs	322		200 000 liter

Példa. Szeretnénk megtudni, hogy mely metró járműtelep alkalmas legalább 50 jármű befogására.

Végezzünk szűrést azokra a modellelemekre, ahol a *funkció* attribútum értéke metró járműtelep, a *kapacitás* attribútum értéke nagyobb vagy egyenlő 50-nél.

Az eredmény:

azonosító	*helyszín*	*funkció*	*kapacitás*	*vágányhossz*	*max. üzemanyag*
T2	Kőér utcai	metró járműtelep	60	16 512 m	

Gráfmodell szűrése

Egy gráfmodellből a szűrés a modell egy *részgráfját* állítja elő.

Példa. Soroljuk fel az M2-es és az M4-es metró megállóit.

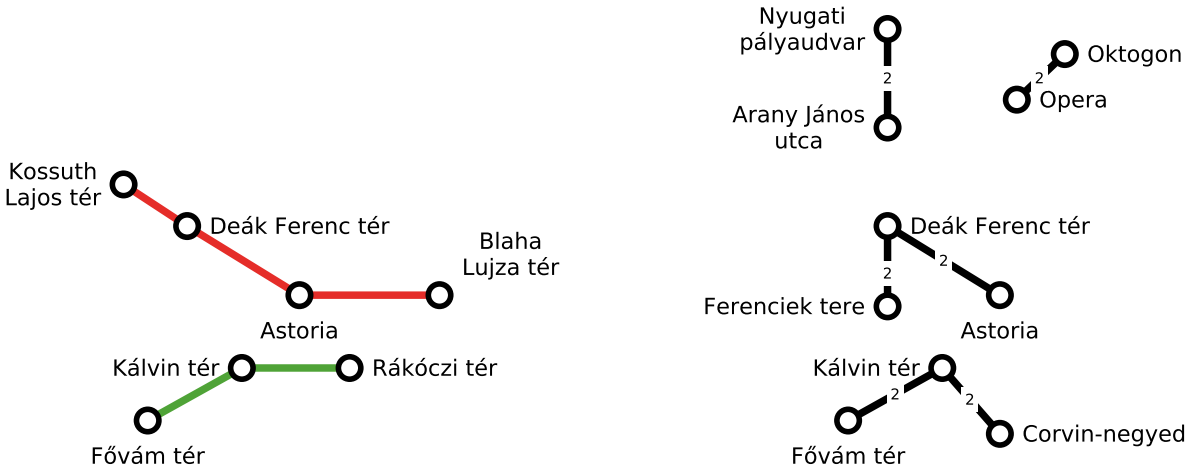
A modellen szűrést végzünk, ami csak azokat a csomópontokat tartja meg, amelyekhez tartozik olyan él, amelynek a címkéje M2 vagy M4. A kapott részgráf a 3.14(a) ábrán látható.

Példa. Határozzuk meg, hogy mely szomszédos metrómegállók között hosszabb egy percnél a menetidő.

A modellen szűrést végzünk, ami

- csak azokat a csomópontokat tartja meg, amelyekhez tartozik 1-nél nagyobb súlyú él,
- csak az 1-nél nagyobb súlyú éleket tartja meg.

A kapott részgráf a 3.14(b) ábrán látható.



(a) Az M2 és az M4 metróvonalak megállói

(b) Az 1 percnél távolabbi metrómegállók

3.14. ábra. Szűrések a metróhálózatot tartalmazó gráfon

3.3.2. Vetített nézet

Definíció. *Vetítés* során a modell egyes jellemzőit kiválasztjuk és a többit elhagyjuk a táblázatból.
Megjegyzés. Érvényes vetítés művelet az is, ha a tulajdonságmodell összes jellemzőjét megtartjuk.

Tulajdonságmodell vetítése

Példa. Olyan kimutatásra van szükségünk, ami csak az egyes telephelyek helyszínét, funkcióját és kapacitását tartalmazza.

Végezzünk szűrést a tulajdonságmodelleken a *helyszín*, *funkció* és a *kapacitás* attribútumokra.

helyszín	*funkció*	*kapacitás*
Mexikói út	metró járműtelep	24
Kőér utcai	metró járműtelep	60
Cinkota	autóbuszgarázs	265
Kelenföld	autóbuszgarázs	322

3.4. Strukturális modellezési technikák

A modellezési formalizmusok után bemutatunk néhány strukturális modellezési technikát.

3.4.1. Hierarchia modellezése

Korábban láttuk, hogy a modellelemek közti szigorú hierarchia kifejezhető fa (ill. erdő) gráfokkal. Ezek a fajta modellek képesek kifejezni a (rész)rendszerek és alkotóelemeik közti tartalmazási viszonyt, akár többszintű tartalmazással is (a részrendszerek is további részeket tartalmaznak). Azonban a gyakorlatban a modellnek sokszor ennél jóval több információt kell tartalmaznia; egy-egy adott modellelemmel kapcsolatban nem csak a tartalmazó és tartalmazott komponenseivel való tartalmazási viszonyát kell ismerni, hanem egyéb modellelemekkel való kapcsolatait.

Ilyenkor a strukturális modell (gráf jellegű része) két rétegre tagozódik: egyrészt a modell szerkezeti vázát alkotó tartalmazási hierarchiára (fa/erdő), amely az alkotóelemek rész-egész viszonyait reprezentálja, másrészt ezen felüli *kereszthivatkozás* élekre, amelyek a tartalmazási rendtől függetlenül, a körmentesség korlátozása nélkül köthetnek össze elemeket. Ennek megfelelően egy metamodell megmondhatja, hogy mely éltípusok példányait fogjuk az említett szerkezeti vázat alkotó tartalmazási éleknek tekinteni.

A hierarchikus modellek megalkotása, illetve az összetett rendszerek tervezése során többféleképp választható meg az egyes elemek elkészítésének sorrendje. Jól illusztrálja a választási szabadságot két polárisan ellentétes megközelítés: a *top-down* és a *bottom-up* modellezés.

Definíció. *Top-down* modellezés során a rendszert felülről lefelé (összetett rendszerből az alkotóelemei felé haladva) építjük. A modellezés alaplépése a *dekompozíció*.

Egy top-down modellezési / tervezési folyamatot úgy kell tehát elképzelni, hogy a kezdetektől fogva az egész rendszer modelljét építjük; azonban eleinte hiányoznak még a részletek. Idővel a modellt finomítjuk: tartalmazott alkotóelemekre bontjuk a rendszert, megadva azok tulajdonságait és keresthivatkozásait is; majd később magukat az alkotóelemeket ugyanúgy strukturális dekompozíciónak vetjük alá.

A top-down modellezés fontos jellemzői:

- ⊕ Részrendszer tervezésekor a szerepe már ismert
- ⊖ „Félidőben” még nincsenek működő (teljes részletességgel elkészített) részek
- ⊖ Részek problémái, igényei későn derülnek ki

Definíció. *Bottom-up* modellezés során a rendszert alulról felfelé (elszigetelt alkotóelemekből az összetett rendszer felé haladva) építjük. A modellezés alaplépése a *kompozíció*: az egész rendszer összeszerkesztése külön modellezett vagy fejlesztett részrendszerekből.

Egy bottom-up modellezési / tervezési folyamatot úgy kell tehát elképzelni, hogy a kezdetektől fogva részletes modelleket építünk; azonban eleinte csak a rendszer izolált, egyszerű komponenseivel foglalkozunk. Ahogy fokozatosan egyre több komponens készül el, nagyobb részrendszerekké foglalhatjuk őket össze, az egymáshoz való kapcsolódásukat is tisztázva. Idővel az így kapott összetettebb részrendszereket is további kompozíciónak vethetjük alá.

A bottom-up modellezés fontos jellemzői:

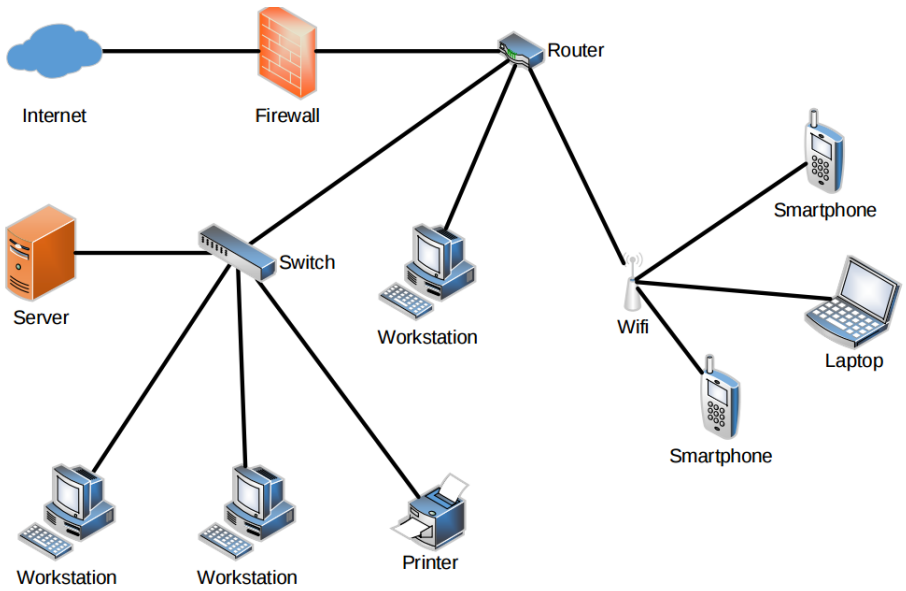
- ⊕ A rendszer részei önmagukban kipróbálhatók, tesztelhetők
- ⊕ Részleges készültségnél könnyebben előállítható a rendszer prototípusa
- ⊖ Nem látszik előre a rész szerepe az egészben

Természetesen a gyakorlatban a kétféle szélsőséges megközelítés közti kompromisszum is elképzelhető.

3.5. Gyakorlati alkalmazások

3.5.1. Számítógéphálózat modellezése

Számítógép-hálózatok kiválóan modellezhetők gráfokkal, amelyben a gráf csomópontjai a hálózat elemei (pl. számítógép, router, tűzfal), a kapcsolatok pedig ezek összeköttetései.



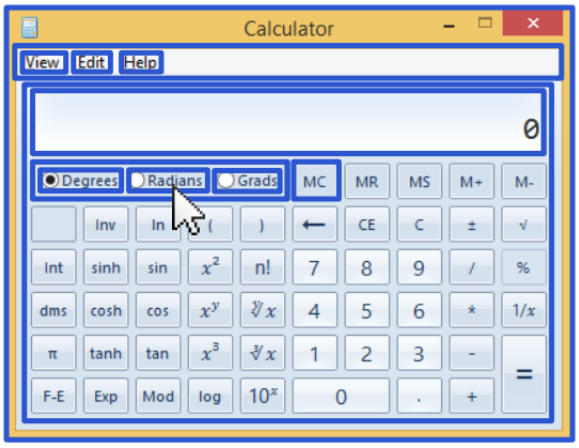
3.15. ábra. Hálózat

- Milyen elemekből áll a rendszer, milyen kapcsolatok lehetségesek?
- Van-e egyszeres hibapont a rendszerben?
- Milyen hosszú úton, milyen típusú elemeket érintve lehet elérni az internetet?
- Hány gép van a wifi hálózaton?
- Egy elem hibája meddig terjedhet?
- Elérhető-e az internet?

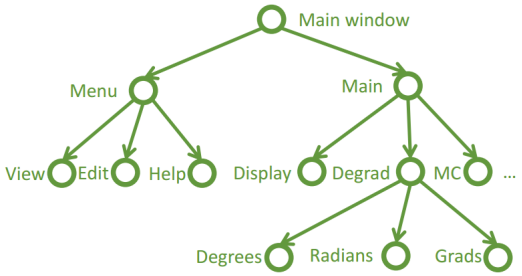
Feladat. Milyen típushierarchiát készíthetünk egy számítógép-hálózathoz?

3.5.2. Grafikus felhasználói felület

Egy szoftver alkalmazás *grafikus felhasználói felülete* (GUI) is egy hierarchikus modell.



(a) A számológép alkalmazás grafikus felülete



(b) A komponensek hierarchiája

3.16. ábra. A metróhálózatot ábrázoló gráf kiterjesztései

Feladat. Mi történik, amikor egy alkalmazás ablakán kattintunk – hogyan határozza meg a rendszer, hogy melyik komponensre kattintottunk?

3.6. Összefoglalás

A fejezetben bemutattuk *struktúra alapú modellezés* motivációját, a használt formalizmusukat és azok alkalmazásait. Ismertettük *típusok* fontosságát és a típusrendszer ábrázolásának lehetőségeit.

A következő fejezetekben a *viselkedés alapú modellezést* és annak formalizmusait mutatjuk be.

3.7. Kitekintés: technológiák és technikák*

Az alábbiakban bemutatunk néhány, a strukturális modellezés témaköréhez kapcsolódó gyakorlati technológiát, specifikációt és eszközt. Az itt felsorolt fogalmak nem részei a számonkérésnek, gyakran előkerülnek viszont a későbbi tanulmányok és munkák során, ezért mindenképpen érdemes legalább névről ismerni őket.

3.7.1. Technológiák

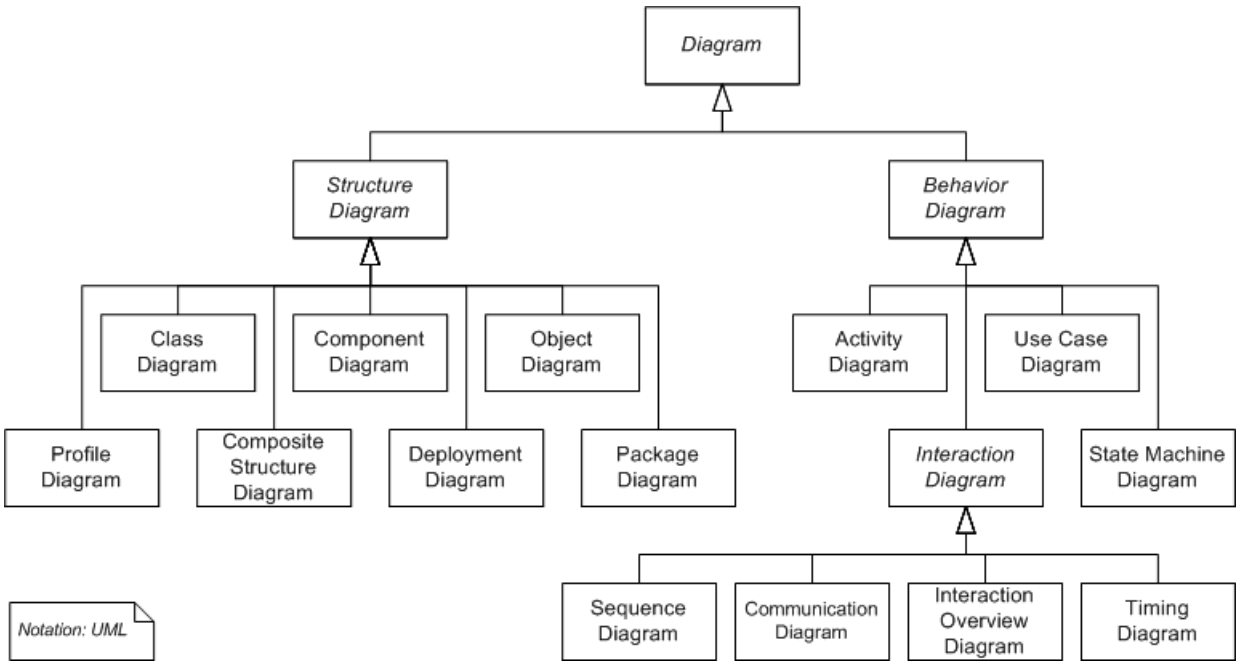
A gyakorlatban sokféle modellezési nyelvet és technológiát használnak. Ezek közül mutatunk be most azokat, amelyek a később tanulmányok során előkerülnek.

UML

Az UML (*Unified Modeling Language*) egy általános célú modellezési nyelv az [11]. Az UML három fő diagramtípust definiál:

- *Structure Diagram:* strukturális modellek leírására. A *Class Diagram* az osztályok (metamodell), míg az *Object diagram* a példányok (modell) leírására alkalmas. A *Composite Structure Diagram* egy rendszer struktúráját és a rendszer komponenseinek kapcsolatát mutatja be.
- *Behaviour Diagram:* viselkedési modellek leírására, pl. a *State Machine Diagram* segítségével állapotgépek az *Activity Diagramon* folyamatok ábrázolhatók. A *Behaviour Diagramek* között megkülönböztejük az *Interaction Diagrameket*. Ezeknek szintén a viselkedés leírása a célja, de a hangsúly a vezérlés- és adatáramlás bemutatásán van. Ilyen pl. a *Sequence Diagram* (szekvenciadiagram), amely az egyes objektumok közötti interakciót mutatja be üzenetek formájában.

Az UML nyelvvel részletesen foglalkozik a *Szoftvertechnológia* tárgy. A nyelvről egy jó összefoglalót a [6] oldal.



3.17. ábra. UML diagramok típusai és a közöttük lévő viszony osztálydiagramként ábrázolva [32]

EMF

Az Eclipse fejlesztőkörnyezet[1] saját modellezési keretrendszerrel rendelkezik, ez az EMF (*Eclipse Modeling Framework*). Az EMF metamodellező nyelve, az Ecore lehetővé teszi saját, ún. *szakterület-specifikus nyelv* (*domain-specific language*, DSL) definiálását. Az EMF mára több területen is *de facto* modellezési keretrendszer.

Az Eclipse fejlesztőkörnyezettel és az EMF keretrendszerrel foglalkozik az *Eclipse alapú technológiák* szabadon választható tárgy.

3.7.2. Haladó strukturális modellezési technikák

A struktúramodellek definiálására és fejlesztésére különböző technikák léteznek. Korábban tárgyaltuk a *top-down* és a *bottom-up* tervezést. Itt két további, általánosan alkalmazható technikát mutatunk be.

Tervezési minták

Az *objektum-orientált* tervezés során gyakran előforduló problémákra különböző *tervezési minták* (*design patterns*) léteznek. A tervezési minták között külön szerepet kapnak a rendszer struktúráját leíró *szerkezeti minták* (*structural patterns*). A tervezési mintákkal bővebben a *Szoftvertechnikák* tárgy foglalkozik.

Refaktoring

A *dekompozícióhoz*, azaz *faktoringhoz* szorosan kapcsolódik a *refaktoring* (*refactoring*) fogalma [8]. Refaktoringon egy rendszert definiáló programkód vagy modell átalakítását értjük. A refaktoring lényege, hogy az átalakítás során a rendszer megfigyelhető működése változatlan marad, de a kapott programkód vagy modell érthetőbb, karbantarthatóbb lesz. Tipikus refaktoring műveletek pl. változók átnevezése, ismétlődő programrészletek megszüntetése (pl. külön metódusba vagy osztályba kiszervezéssel).

[1] `http://www.eclipse.org/`

3.7.3. Struktúramodellező eszközök és vizualizáció

Gráfok automatikus megjelenítésére alkalmas pl. a GraphViz[2] programcsomag. Gráfok feldolgozására gyakran alkalmazzák az igraph[3] programcsomagot. Manapság több gráfadatbázis-kezelő rendszer is elterjedt, pl. a Neo4j[4] és a Titan[5] rendszerek.

Gráfok manuális rajzolására szintén több eszköz elterjedt. Egyszerűen használható online felületet biztosít a draw.io[6] és az Arrow Tools[7]. A jegyzetben szereplő ábrák a yEd eszközzel[8] készültek. Sok információt tartalmazó gráf esetén érdemes lehet vektorgrafikus rajzoló-, ill. prezentáló eszközök, pl. a Microsoft Visio vagy Microsoft PowerPoint alkalmazás.

3.8. Elméleti kitekintés*

A strukturális modellezésnek komoly matematikai eszköztára is van. Az alábbiakban ezekből mutatunk be néhány részletet.

3.8.1. Tudásreprezentáció

Predikátumkalkulus

Elsőrendű logika

3.8.2. Bináris relációk tulajdonságai

Hasznos ismerni a kétváltozós relációkon értelmezett tulajdonságokat [34].

Tipp. Az elnevezések egyezése nem véletlen, a *kétváltozós reláció* egy alesete a *reláció* fogalomnak.

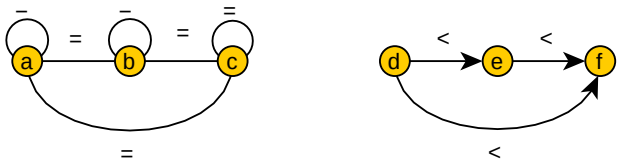
Definíció. Egy S halmazon értelmezett r kétváltozós reláció *reflexív*, ha bármely $a \in S$-re $r(a, a)$ teljesül.

Definíció. Egy S halmazon értelmezett r kétváltozós reláció *szimmetrikus*, ha bármely $a, b \in S$-re $r(a, b)$ teljesülése esetén $r(b, a)$ is teljesül. A nem szimmetrikus relációkat *aszimmetrikusnak* nevezzük.

Definíció. Egy S halmazon értelmezett r kétváltozós reláció *tranzititív*, ha bármely $a, b, c \in S$-re $r(a, b)$ és $r(b, c)$ teljesülése esetén $r(a, c)$ is teljesül.

[2] http://www.graphviz.org/
[3] http://igraph.org/
[4] http://neo4j.com/
[5] http://thinkaurelius.github.io/titan/
[6] http://draw.io/
[7] http://www.apcjones.com/arrows/
[8] https://www.yworks.com/products/yed

Példa.



3.18. ábra. Az *egyenlő* (=) és a *kisebb* (<) relációk gráfon ábrázolva

Tranzitív relációk:
- Az *egyenlő* (=) és a *kisebb* (<) relációk tranzitívak, mert
  - $a = b$ és $b = c$ esetén $a = c$,
  - $d < e$ és $e < f$ esetén $e < f$.

  A 3.18. ábrán ábrázoltuk a fenti relációkat. Az = reláció szimmetrikus, ezért irányítatlan gráffal, a < reláció aszimmetrikus, ezért irányított gráffal reprezentálható.

Nem tranzitív relációk:
- A *nemegyenlő* reláció ($\neq$) nem tranzitív, mert
  - $a \neq b$ és $b \neq c$ esetén $a \neq c$ nem mindig áll fenn, például
  - $1 \neq 2$ és $2 \neq 1$ esetén $1 \neq 1$ nem teljesül.
- Személyek közötti *őse* reláció tranzitív, mert *őse*(a, b) és *őse*(b, c) esetén *őse*(a, c) is fennáll.
- Személyek közötti *ismerőse* reláció nem tranzitív, mert *ismerőse*(a, b) és *ismerőse*(b, c) esetén nem garantált, hogy *ismerőse*(a, c) fennáll.

3.9. Ajánlott irodalom

A gráfelmélettel behatóan foglalkozik a *Bevezetés a számításelméletbe 2.* tantárgy és Fleiner Tamás jegyzete [30]. Különböző gráfalgoritmusokat mutat be – pl. *legrövidebb út* és minimális összsúlyú *feszítőfa* keresésére – az *Algoritmuselmélet* tárgy. További keresőalgoritmusok a *Mesterséges intelligencia* tárgyban szerepelnek.

Olvasmányos összefoglalót nyújt az UML nyelvről Martin Fowler „UML distilled” című könyve [9].

A tulajdonsággráfokról egy jól érthető tudományos cikk Marko Rodriguez és Peter Neubauer munkája [26]. Rodriguez a Titan elosztott gráfadatbázis-kezelő rendszer egyik fő fejlesztője, míg Neubauer a Neo4j gráfadatbázis-kezelőt fejlesztő cég alapítója (mindkét rendszert említettük a 3.7.3. szakaszban). Az elosztott gráfadatbázis alkalmazását, elméleti és gyakorlati kihívásait kiváló prezentációkban mutatja be [24, 25].

Barabási-Albert László magyar fizikus nemzetközileg elismert kutatója a komplex *hálózatok* elméletének. Barabási „Behálózva” című könyve közérthető stílusban mutatja be a hálózatok elemzésének elméleti kihívásait a kutatási eredmények gyakorlati jelentőségét [1]. A szerzővel több interjú is készült.[9,10,11]

[9] `http://index.hu/tudomany/bal080429/`
[10] `http://index.hu/tudomany/2010/06/02/az_elso_cikk_utan_majdnem_leharaptak_a_fejunket/`
[11] `http://index.hu/tudomany/2015/02/20/az_nsa_primitiven_hasznalta_a_begyujtott_adatokat/`

4. fejezet

Állapotalapú modellezés

Az alábbi dokumentum egy háromfényű közúti jelzőlámpa fokozatosan kidolgozott modelljén keresztül mutatja be az állapot alapú modellezés alapfogalmait.

A bemutatott modellek a Yakindu Statechart Tools[1] eszközzel készültek.

4.1. Egyszerű állapotgépek

A példa kidolgozását azzal az egyszerű esettel kezdjük, amikor a modellező nyelv lényegében a *Digitális technika* tárgyból megismert *Mealy-automata* formalizmus.

4.1.1. Állapottér

Ehhez első lépéseként meg kell határozni a rendszer *állapotterét*. Az állapottér elemeit *állapotoknak* nevezzük. Az állapottérnek az alábbi két kritériumnak kell megfelelnie:

Definíció. *Teljesség.* Minden időpontban az állapottér legalább egy eleme jellemzi a rendszert.

Definíció. *Kizárólagosság.* Minden időpontban az állapottér legfeljebb egy eleme jellemzi a rendszert.

Egy adott időpontban a rendszer *pillanatnyi állapota* az állapottér azon egyetlen eleme, amelyik abban az időpontban jellemző a rendszerre. A rendszer egy *kezdőállapota* olyan állapot, amely a vizsgálatunk kezdetekor (például a $t = 0$ időpillanatban) pillanatnyi állapot lehet.

Példa. Határozzuk meg egy jelzőlámpa egyszerű állapotterét!

-  Off: kikapcsolt állapot
-  Stop: piros jelzés
-  Prepare: piros-sárga jelzés
-  Go: zöld jelzés
-  Continue: sárga jelzés

Kezdetben a rendszer legyen kikapcsolva, vagyis a rendszer egyetlen kezdőállapota legyen Off.

4.1.2. Állapotámenet, esemény

A rendszer időbeli viselkedésében kulcsfontosságú, hogy a pillanatnyi állapot hogyan változik az idővel. Bizonyos mérnöki diszciplínákban ez a változás folytonos függvénnyel jellemezhető (ilyen rendszerekkel a Rendszerelméletcímű tárgy foglalkozik részletesebben). Például egy repülő állapota lehet a tengerszint feletti magasság, amely egy időben folytonosan változó mennyiség. Azonban az informatikai

[1] `http://statecharts.org`

gyakorlatban a *diszkrét állapottereknek* van kiemelt jelentősége, ahol nem létezik folytonos átmenet az állapotok között, tehát a rendszer pillanatnyi állapota mindaddig állandó, amíg egy pillanatszerű esemény hatására egy másik állapotba át nem megy.

Az ilyen diszkrét rendszerek viselkedése *állapotátmenetekkel* (más néven *tranzíciókkal*) jól modellezhető. Egy állapotátmenet megengedi, hogy a rendszer állapotot váltson egy forrás- és egy célállapot között. Amennyiben a rendszer pillanatnyi állapota a forrásállapot, az állapotátmenet *tüzelését* követően a rendszer új állapota a célállapot lesz. (Az, hogy a tüzelés pillanatában a rendszer pillanatnyi állapota a forrás- vagy a célállapot-e, megállapodás kérdése.)

Egy állapotátmenet tüzelését egy adott *esemény* bekövetkezte váltja ki. (Ennek speciális esete a spontán állapotátmenet, amikor a kiváltó esemény kívülről nem megfigyelhető.) Ezen felül állapotátmenetek *akciókat* hajthatnak végre, például maguk is válthatnak ki eseményeket. Sokszor praktikus egy adott rendszer szempontjából bemenet és kimeneti események elkülönítése.

Példa. Definiáljuk a jelzőlámpa modelljéhez az alábbi bemeneti eseményeket:

- onOff: ki- és bekapcsolás kérése
- switchPhase: jelzésváltás kérése

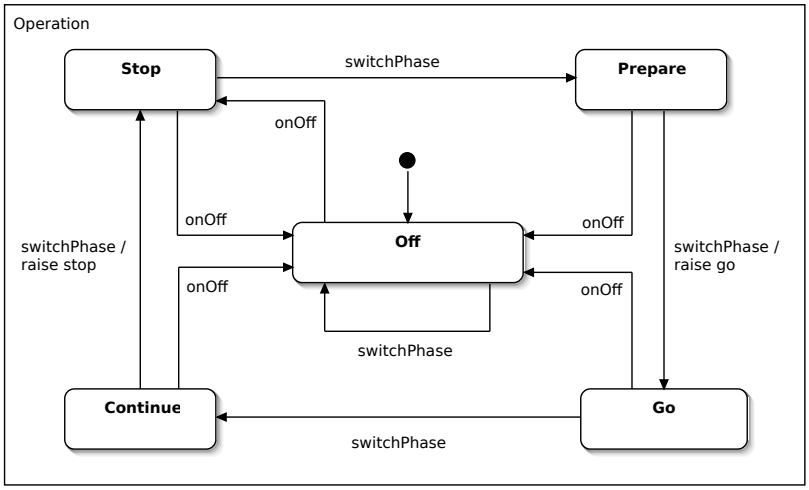
A jelzőlámpa a működését a balesetek reprodukálását segítendő folyamatosan naplózza egy külső fekete dobozba. Ennek megfelelően legyenek a rendszer output eseményei a következők:

- Stop: a rendszer sárga jelzésből vörös jelzésbe váltott
- Go: a rendszer zöld jelzésbe váltott

Az események definíciója a Yakindu szerkesztőjében a következőképpen adható meg:

```
interface:
  in event onOff
  in event switchPhase
  out event stop
  out event go
```

Ekkor a jelzőlámpa modellezhető a 4.1. ábra állapotgépével.



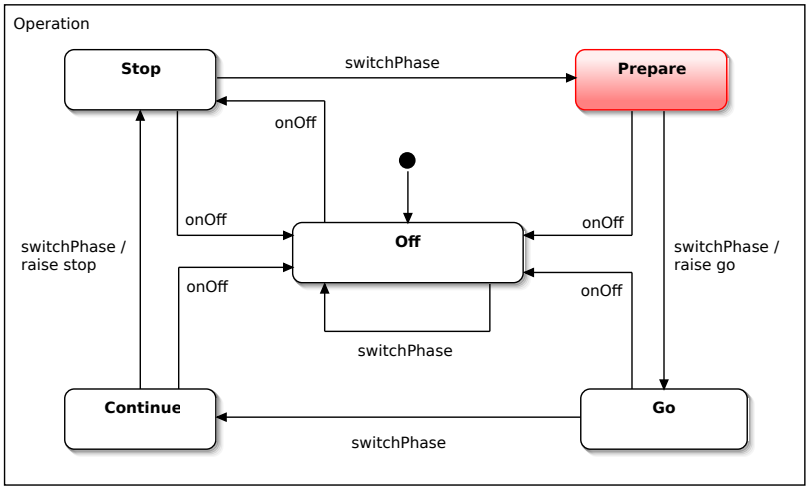
4.1. ábra. Jelzőlámpa egyszerű állapotgépe

A diagramon a rendszer állapotait (Off, Stop, Prepare, Go, Continue) lekerekített téglalapok jelölik. Az állapotgép kezdőállapotát (Off) a tömör fekete korongból húzott nyíl jelöli ki. A téglalapok között húzott nyilak a megfelelő állapotok közötti tranzíciókat jelképezik. A nyilakra írt címkék a tranzíciót kiváltó, illetve a kiváltott eseményekre hivatkoznak (Yakinduban az esemény kiváltását `raise` kulcsszó jelöli).

Amint azt a fenti definíciókból láthatjuk, az „állapot” kifejezés két különböző jelentéssel bír:

– *Szintaktikai jelentés.* Az állapotgráf egy csomópontja, melyet lekerekített téglalap jelöl (*állapotcsomópont*).
– *Szemantikai jelentés.* Az állapottér egy eleme.

Egyszerű állapotgépek esetében elmondható, hogy a két fogalom által jelölt objektumok megfeleltethetőek egymásnak. Az állapotgép formalizmus új szintaktikai elemekkel történő kiterjesztésével (változók, összetett állapotok, ortogonális állapotok – ld. később) ugyanakkor ez a kapcsolat a továbbiakban nem áll fenn.



4.2. ábra. Pillanatnyi állapot nyomonkövetése szimulációval

Tipp. A Yakindu eszköz lehetőséget biztosít az állapotgép *szimulációjára.* Szimuláció során nyomon tudjuk követni, hogy a adott események hatására időben hogyan alakul a rendszer pillanatnyi állapota.

Például az onOff, majd switchPhase események a szimulátor felületén történő kiváltását követően a rendszer Prepare állapotba kerül, amit a Yakindu az állapotot jelképező téglalap átszínezésével ábrázol (ld. 4.2. ábra).

A fenti modell két fontos tulajdonsággal bír:

Definíció. *Determinisztikus.* Az állapotgépnek legfeljebb egy kezdőállapota van, valamint bármely állapotban, bármely bemeneti esemény bekövetkeztekor legfeljebb egy tranzíció tüzelhet.

Megjegyzés. A Yakindu csak determinisztikus modellek létrehozását támogatja.

Definíció. *Teljesen specifikált.* Az állapotgépnek legalább egy kezdőállapota van, valamint bármely állapotban, bármely bemeneti esemény bekövetkeztekor legalább egy tranzíció tüzelhet.

Megjegyzés. Ennek egyik következménye, hogy a rendszer *holtpontmentes*, azaz nem tartalmaz olyan állapotot, amelyből nem vezet ki tranzíció.

4.1.3. Végrehajtási szekvencia

A rendszer időbeli viselkedését annak *végrehajtási szekvenciái* jellemzik. Egy végrehajtási szekvencia állapotok és események egy

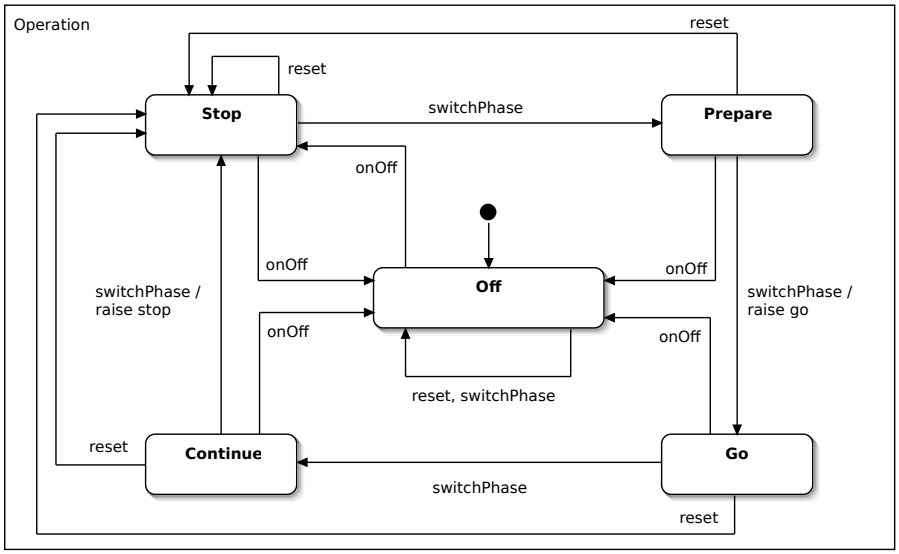
$$s_0 \xrightarrow{i_0/o_0} s_1 \xrightarrow{i_1/o_1} \dots$$

(véges vagy végtelen) alternáló sorozata, ahol s_0 a rendszer egy kezdőállapota, $s_j \xrightarrow{i_j/o_j} s_{j+1}$ pedig a rendszer egy állapotátmenete minden j-re. Egy állapot *elérhető*, ha a rendszernek létezik véges végrehajtási szekvenciája az állapotba.

Példa. Az $Off \xrightarrow{onOff} Stop \xrightarrow{switchPhase} Prepare \xrightarrow{switchPhase/go} Go$ sorozat a jelző egy véges végrehajtási szekvenciája; ennek megfelelően biztosan tudjuk, hogy például a Go állapot elérhető állapot. Az $Off \xrightarrow{onOff} Stop \xrightarrow{onOff} Off \xrightarrow{onOff} \ldots$ egy végtelen végrehajtási szekvencia.

Az állapotgép végrehajtási szekvenciái vezérelten bejárhatóak szimuláció segítségével, ami jó módot ad az állapotgép ellenőrzésére. A Yakindu beépített szimulátora erre lehetőséget biztosít.

4.2. Hierarchia



4.3. ábra. Jelzőlámpa állapotgépe reset eseménnyel

Példa. Egészítsük ki a fenti modellt egy reset bemeneti eseménnyel, melynek hatására bekapcsolt állapotban a jelzőlámpa alaphelyzetbe (Stop állapotba) áll.
Az eddig megismert eszközökkel elkészített modellt szemlélteti a 4.3. ábra.

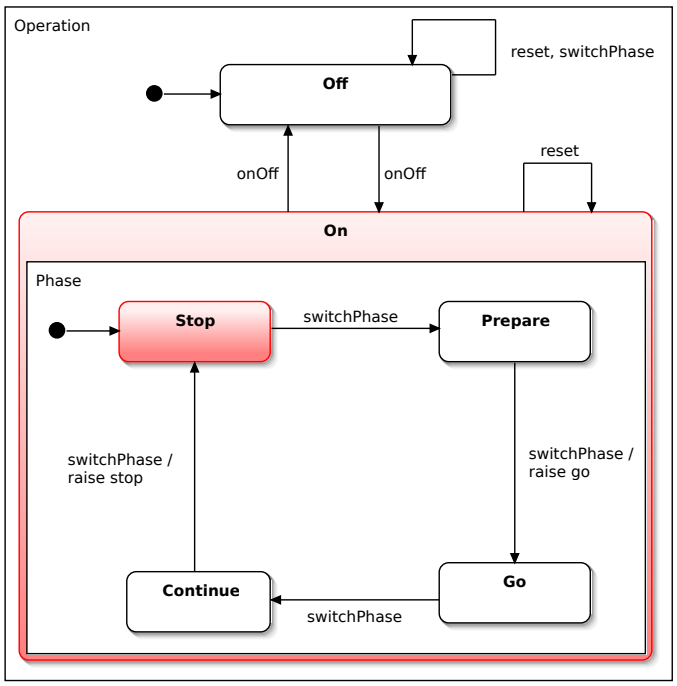
Vegyük észre, hogy a rendszer a reset eseményre a Stop, Prepare, Go és Continue állapotok mindegyikében egyformán viselkedik. Ebben az esetben ez annak köszönhető, hogy ezen állapotok mindegyikében a rendszer bekapcsolt állapotban van. Ezt a kapcsolatot a modellben explicit módon meg lehet jeleníteni egy *összetett állapot* bevezetésével, amely a négy állapot közös tulajdonságait és viselkedését általánosítja.

4.2.1. Összetett állapot, állapotrégió

Egy összetett állapot szintaktikailag megfelel egy egyszerű állapotnak, azzal a kivétellel, hogy saját *régióval* rendelkezik, mely további állapotokat (beleértve a kezdőállapotokat) és köztük tranzíciókat tartalmazhat. Régiók közül kiemelt jelentőséggel bír a legfelső szintű régió, mely magát az állapotgépet tartalmazza.

A 4.4. ábra szemlélteti az On összetett állapot bevezetésével kapott modellt.

A teljes állapotgépet az Operation, míg az összetett állapot belsejét a Phase régió tartalmazza. A Phase régió kezdőállapota a Stop állapot, így a régióba való belépéskor ez az állapot lesz a rendszer pillanatnyi állapota. A reset esemény az On állapotból On állapotba vezet, így hatására valóban a Stop állapot lesz aktív.



4.4. ábra. Hierarchikus állapot pillanatnyi állapotként

A fenti példát szimulálva az onOff esemény Off állapotban történő fogadását követően az elvárásoknak megfelelően a Stop állapot a rendszer pillanatnyi állapota lesz. Ugyanakkor a Stop állapotot tartalmazó On állapot is pillanatnyi állapot lesz:

Általánosságban ha egy tartalmazott (egyszerű vagy összetett) állapot aktív, akkor az őt tartalmazó összetett állapot is aktív. Ezt fejezi ki az *állapotkonfiguráció* fogalma, ami állapotok egy olyan maximális (azaz nem bővíthető) halmaza, melyek egyszerre lehetnek aktívak a rendszerben.

Példa. A jelzőlámpa állapotkonfigurációi:
- { Off }
- { On, Stop }
- { On, Prepare }
- { On, Go }
- { On, Continue }

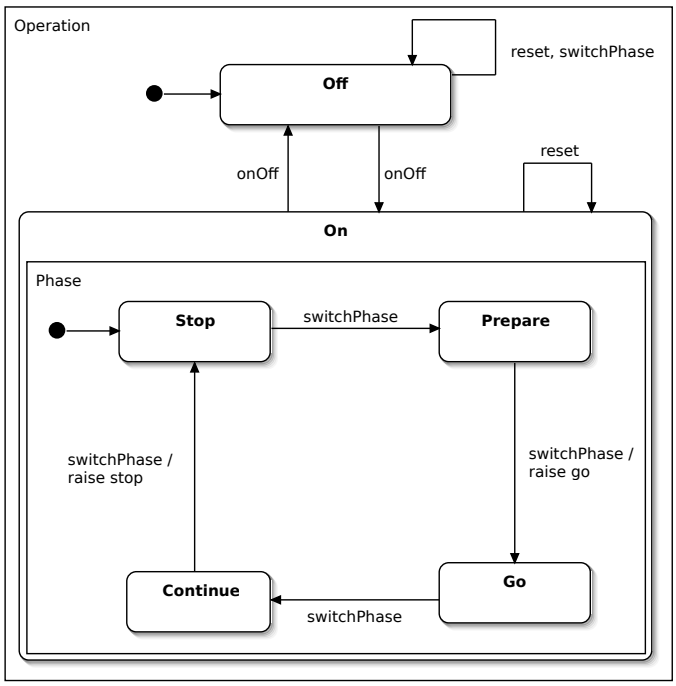
Tartalmazó és tartalmazott állapot között tehát nem érvényesül a kizárólagosság. Ennek megfelelően a hierarchikus állapot bevezetésével többféle érvényes állapottér adódik.

Példa. A jelzőlámpa érvényes állapotterei:
- { Off, On }
- { Off, Stop, Prepare, Go, Continue }

Ezen felül az állapotkonfigurációk halmaza is tekinthető állapottérnek:
- { { Off }, { On, Stop }, { On, Prepare }, { On, Go }, { On, Continue } }

Ugyanakkor az { Off, On, Stop, Prepare, Go, Continue } nem jó állapottér, hiszen ebben az esetben például az { On, Prepare } részhalmaz sérti a kizárólagosságot. Általános szabály, hogy egy állapottér vagy az összetett állapotot, vagy annak összes részállapotát tartalmazza, de nem mindkét változatot.

A { Stop, Prepare, Go, Continue } részállapottér az On állapotot *finomítja*, míg az On állapot a { Stop, Prepare, Go, Continue } állapotokat *absztrahálja*. Jó modellezési gyakorlat a modell állapotainak fokozatos finomítása.



4.5. ábra. Jelzőlámpa állapotgépe összetett állapottal

4.2.2. Többszintű állapothierarchia

Amint a következő példából kiderül, az állapotok közötti hierarchia nem feltétlenül egyszintű.

Példa. A 4.6. ábrán szemléltetett modell az On állapotot tovább bővíti egy Alert állapottal, mely a jelző sárgán villogó, figyelmeztető állapotát modellezi. A rendes üzem jelzéseit a Normal összetett állapot tartalmazza. A Normal és Alert állapotok közötti váltás a switchMode bemeneti esemény hatására történik, a *Normal* → *Alert* állapotváltás Alert kimeneti eseményt vált ki.

4.3. Változók és őrfeltételek

Finomítsuk az Alert állapotot LightOn és LightOff alállapotokkal, melyek fél másodpercenként váltakozva a sárga fény villogását modellezik! A villogás modellezéséhez feltételezzünk egy tick bejövő eseményt, amely a specifikáció szerint egy 8 Hz frekvenciájú órajel, tehát egyenletes ütemben, másodpercenként nyolcszor jelez.

Ahhoz, hogy a 2 Hz-es váltakozást modellezzük, a tick esemény minden negyedik bekövetkeztekor kell váltani LightOn és LightOff között. Ezért az állapotokat tovább kell finomítanunk, hogy a bekövetkező órajeleket számolni tudjuk.

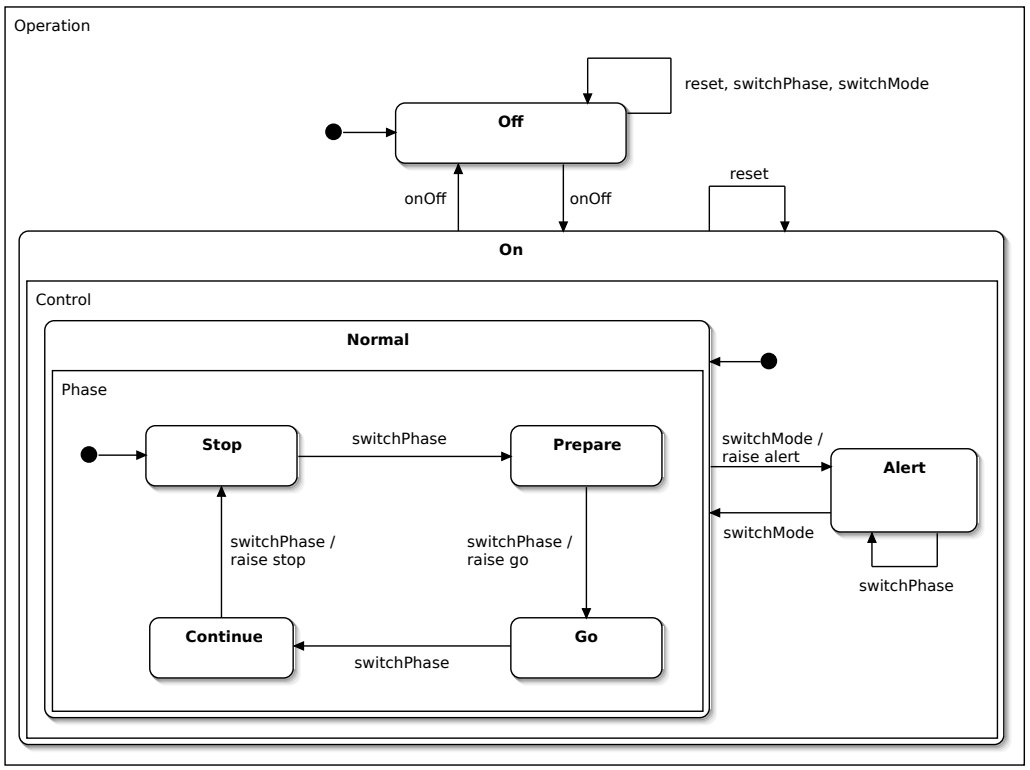
Egy lehetséges megvalósítást szemléltet a 4.7. ábra.

A fenti állapotgép valóban a kívánt viselkedést modellezi: az állapotgép Alert állapotban pontosan minden negyedik tick eseményre vált LightOn és LightOff állapotok között.

Abban az esetben azonban, ha csak minden századik eseményre kellene váltani LightOn és LightOff között, mindkét összetett állapot száz alállapotot tartalmazna. Látható tehát, hogy ez nem lesz jó modellezési gyakorlat, hiszen az így bemutatott modell elkészítése nagy erőfeszítést igényel, sok hibalehetőséget rejt és nehezen átlátható; valamint a számszerű paraméterek megváltozása esetén jelentős módosítást igényel.

4.3.1. Belső változók

A probléma megoldható *változók* alkalmazásával. A változó típussal rendelkezik, ez Yakinduban lehet boolean, integer, real vagy string, ezek a programozási nyelveknél megszokott logikai, egész, lebegő-



4.6. ábra. Jelzőlámpa állapotgépe többszintű összetett állapottal

pontos, illetve karakterlánc típusoknak felelnek meg. Változók jelenlétében a rendszer állapotát már nemcsak a vezérlés állapota (állapot csomópontok), hanem az éppen érvényes *változóértékelés* is meghatározza.

Példa. A bekövetkezett tick események számlálására a rendszer interfészdefinícióját kiegészítjük a counter egész típusú változóval:

```
var counter : integer
```

A változó értékét *utasítással* lehet módosítani, amely – az eseménykiváltáshoz hasonlóan – tranzícióhoz kapcsolható *akció*. Akció ezen felül kapcsolható állapothoz is az entry és exit triggerek segítségével, melyek az állapotba való belépéskor, illetve az állapotból történő kilépéskor aktiválódnak.

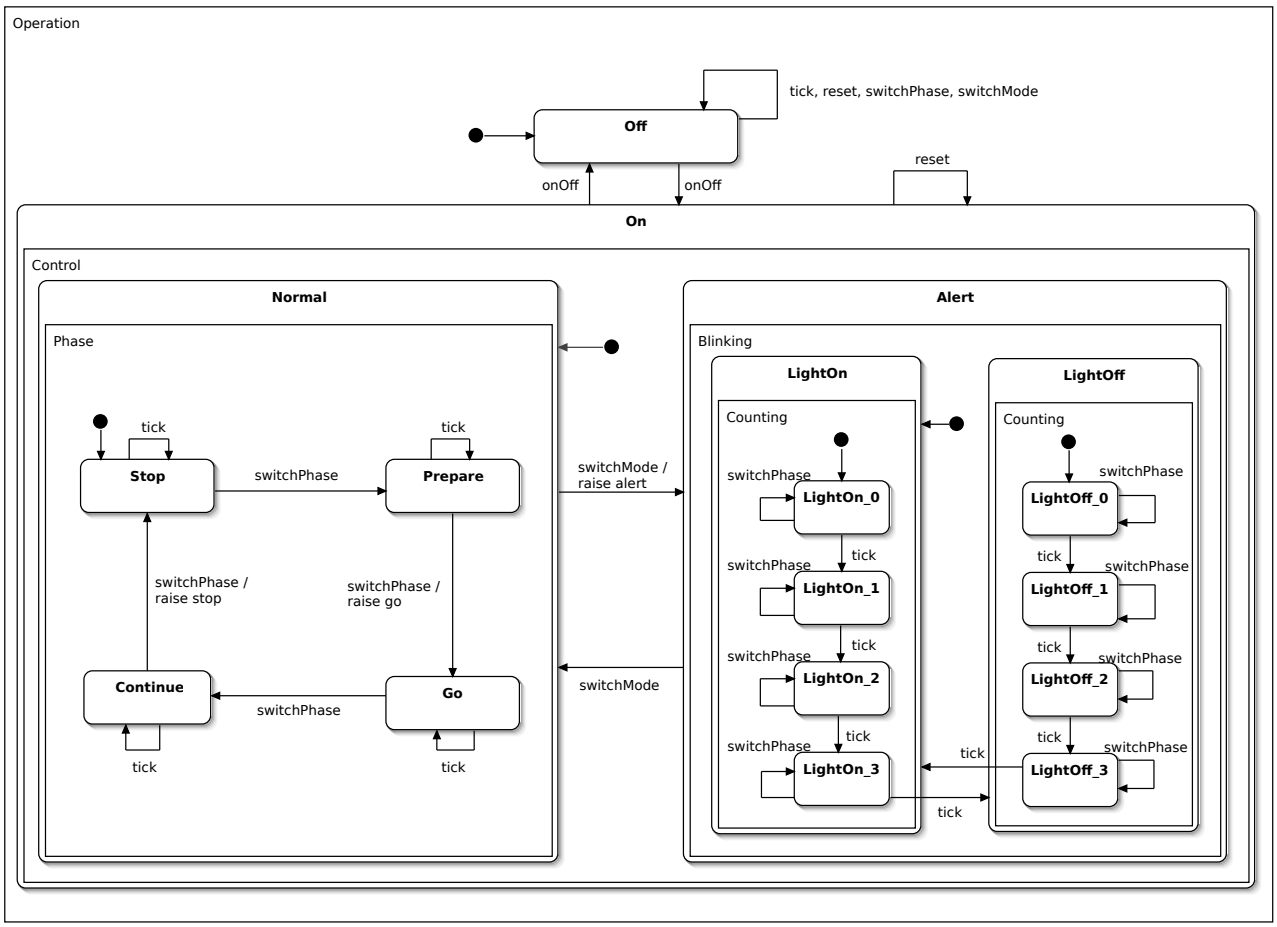
Azt, hogy a változó aktuális értéke befolyással lehessen a vezérlésre, a tranzíciókra felírt őrfeltételekkel lehet megvalósítani. Az őrfeltétel biztosítja, hogy a tranzíció csak akkor tüzelhessen, ha az őrfeltételbe felírt logikai kifejezést az aktuális állapot változóértékelése kielégíti.

Példa. A tick események számlálása változóval megvalósítható a 4.8. ábra állapotgépe szerint. Figyeljük meg, hogy a változó értékét szögletes zárójelekbe tett őrfeltételek használják.

Példa. A fenti rendszer egy végrehajtásiszekvencia-részlete:

$$\langle LightOn, \{counter \mapsto 0\}\rangle \xrightarrow{tick} \langle LightOn, \{counter \mapsto 1\}\rangle \xrightarrow{tick} \langle LightOn, \{counter \mapsto 2\}\rangle \xrightarrow{tick}$$
$$\langle LightOn, \{counter \mapsto 3\}\rangle \xrightarrow{tick} \langle LightOff, \{counter \mapsto 0\}\rangle$$

Feladat. Hogyan módosul őrfeltételek jelenlétében a *determinizmus* definíciója?



4.7. ábra. Villogó jelzés külső órával

4.3.2. Interfészváltozók

A vörös, sárga ill. zöld színű fények állapotának nyilvántartására felvesszük red, yellow és green logikai változókat. A korábban bevezetett counter változóval ellentétben ezek a változók nem csak az állapotgéppel leírt vezérlő belső működésében játszanak szerepet; úgy tekintjük, hogy a különböző színű fények villanyégőit közvetlenül ezek az *interfészváltozók* kapcsolják. Általánosságban a be- és kimeneti események mellett interfészváltozókon keresztül kommunikálhat az állapotgép a külvilággal.

Mivel a vezérlési állapotokat úgy vettük fel, hogy egyértelműen meghatározzák a fényeket leíró változók értékét, ezen változóknak értéket adó utasításokat entry triggerhez rendeljük – ez egy tömör jelölése annak, hogy az adott állapotba lépő összes állapotátmenet végrehajtson egy adott akciót.

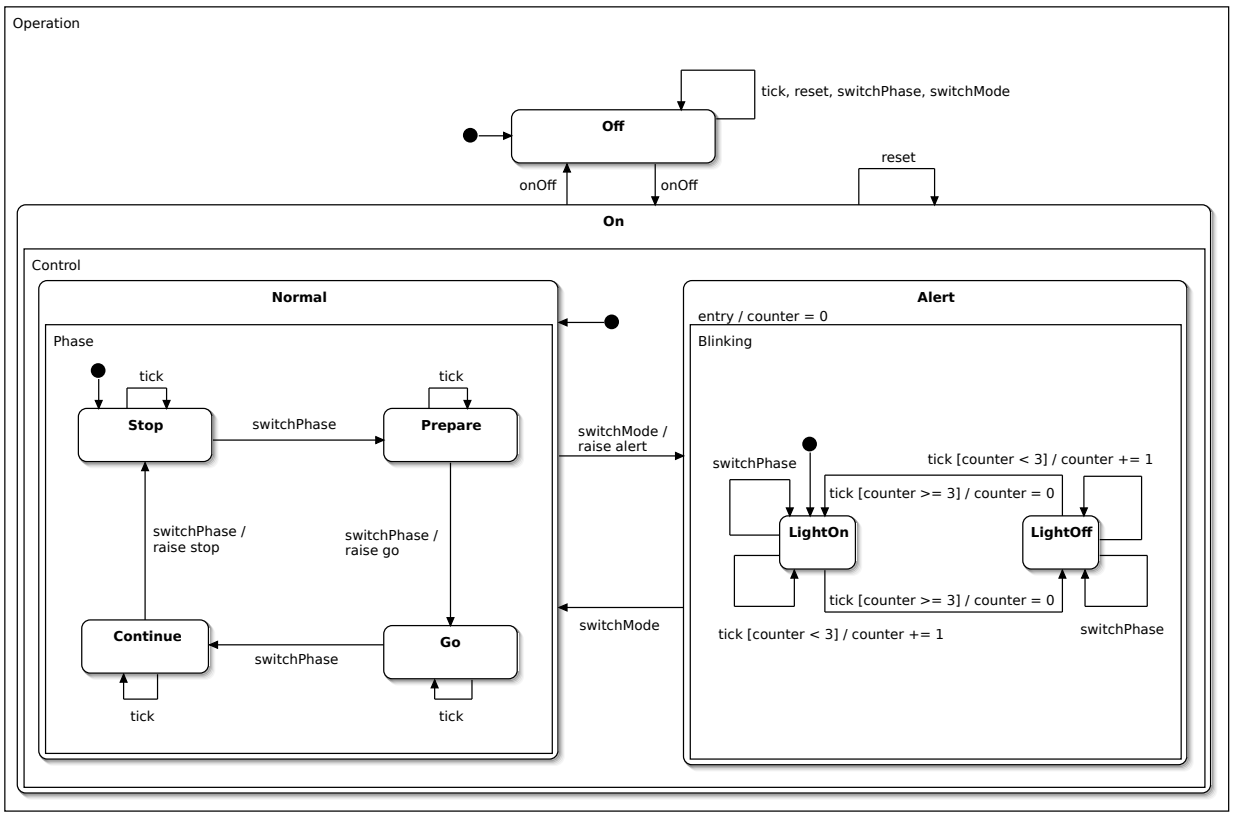
A bővített állapotgépet a 4.9. ábra szemlélteti.

4.4. Időzítés

A modell időbeli viselkedését eddig egy külső óra által szolgáltatott, megszabott frekvenciájú órajelet feltételezve modelleztük. A Yakindu azonban lehetőséget biztosít időzített események explicit modellezésére az after kulcsszóval. Ezen felül az after és every trigger használatával időzített esemény állapothoz is rendelhető.

Az időzítés explicit modellezésével a modell tömörebb, kifejezőbb lehet, és a későbbi tényleges technikai megvalósítás apró részleteitől (órajel frekvenciája) függetlenül érvényes.

Az időzítést használó modellt a 4.10. ábra szemlélteti.



4.8. ábra. Villogó jelzés számlálóval

4.5. Ortogonális dekompozíció

Bővítsük a modellt járműérzékelő[2] funkcióval!

Tipp. A jelzőlámpa (bekapcsolt állapotban) periodikus trafficPresent és trafficAbsent bemeneti események fogadásával értesül arról, hogy tartózkodik-e jármű a lámpa előtti útszakaszon. A jelző ezt az információt a queue logikai változóban tárolja (ennek értéke kezdetben true). A foglaltság nyilvántartásának értelme, hogy ilyenkor csak akkor kell Stop állapotból switchPhase esemény hatására jelzést váltani, ha van a lámpa előtt várakozó jármű, vagyis *queue* = true.

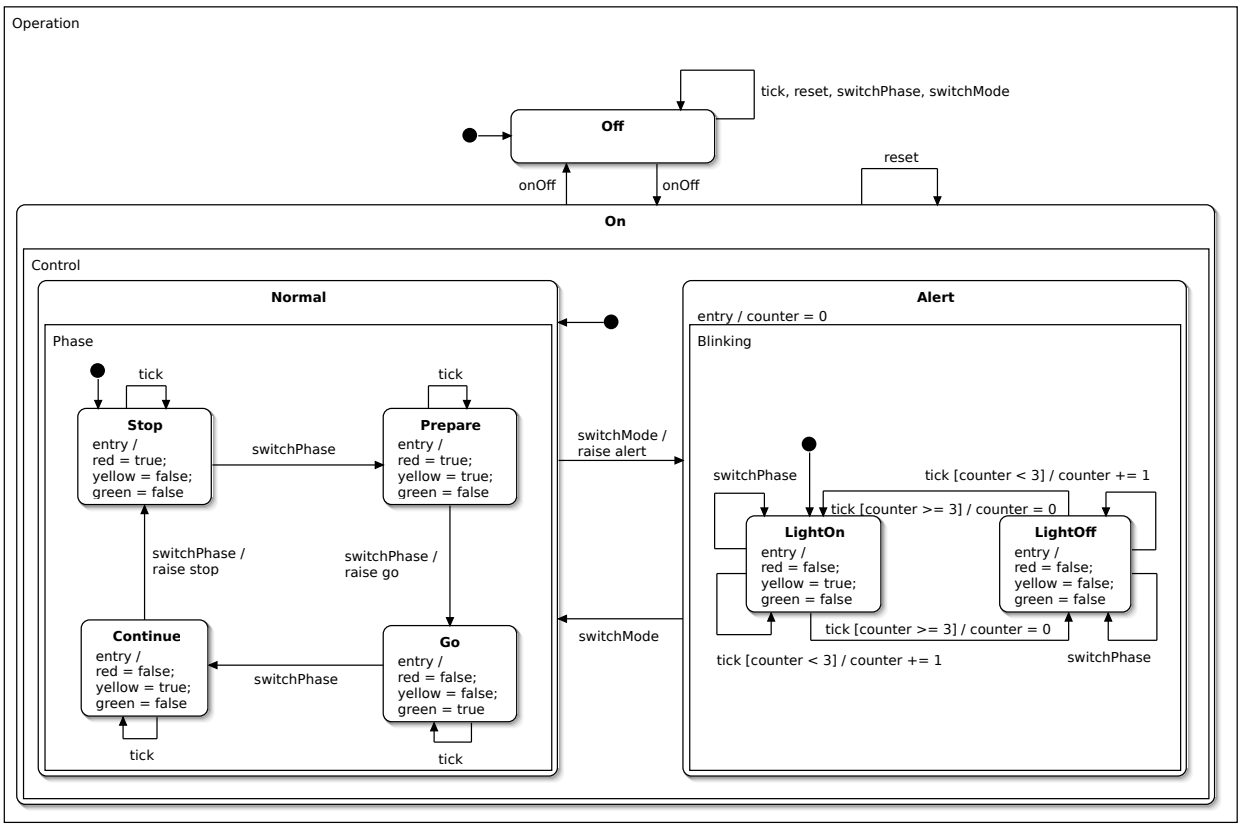
A járműérzékelő jeleinek fogadását a 4.11. ábrán szemléltetett állapotgép valósítja meg.

4.5.1. Állapotgépek szorzata

Gondoljuk végig, hogyan lehet a fenti Detect régió viselkedését kombinálni a már meglévő modellel! Mivel a foglalátságérzékelés On állapotba lépve kezd működni, így elég a meglévő modell Control régióra koncentrálni. Ekkor az eredeti modell pillanatnyi állapota Stop. Ahhoz, hogy a bővített modellben ilyenkor mind a switchPhase, mind a trafficAbsent és trafficPresent eseményeket megfelelően kezelni tudjuk, szükséges egy Stop_Present kezdőállapot és egy Stop_Absent állapot felvétele. Ugyanebből az okból kifolyólag szükséges a Prepare, Go, Continue, LightOn és LightOff állapotok megkettőzése, valamint a származtatott állapotok között a két működésnek megfelelő tranziciók felvétele.

A fent vázolt művelet az állapotgépeken értelmezett *aszinkron szorzás*, melynek eredményét *szorzatautomatának* is nevezik. Jól látható, hogy a szorzatautomata vonatkozó régiójában az állapotok száma a két összeszorzott régió (egyszerű) állapotai számának szorzata (innen a név). Könnyen végiggondolható, hogy ha öt állapotgép együttes működését vizsgálnánk, amelyeknek külön-külön négy állapota

[2] `https://en.wikipedia.org/wiki/Induction_loop#Vehicle_detection`



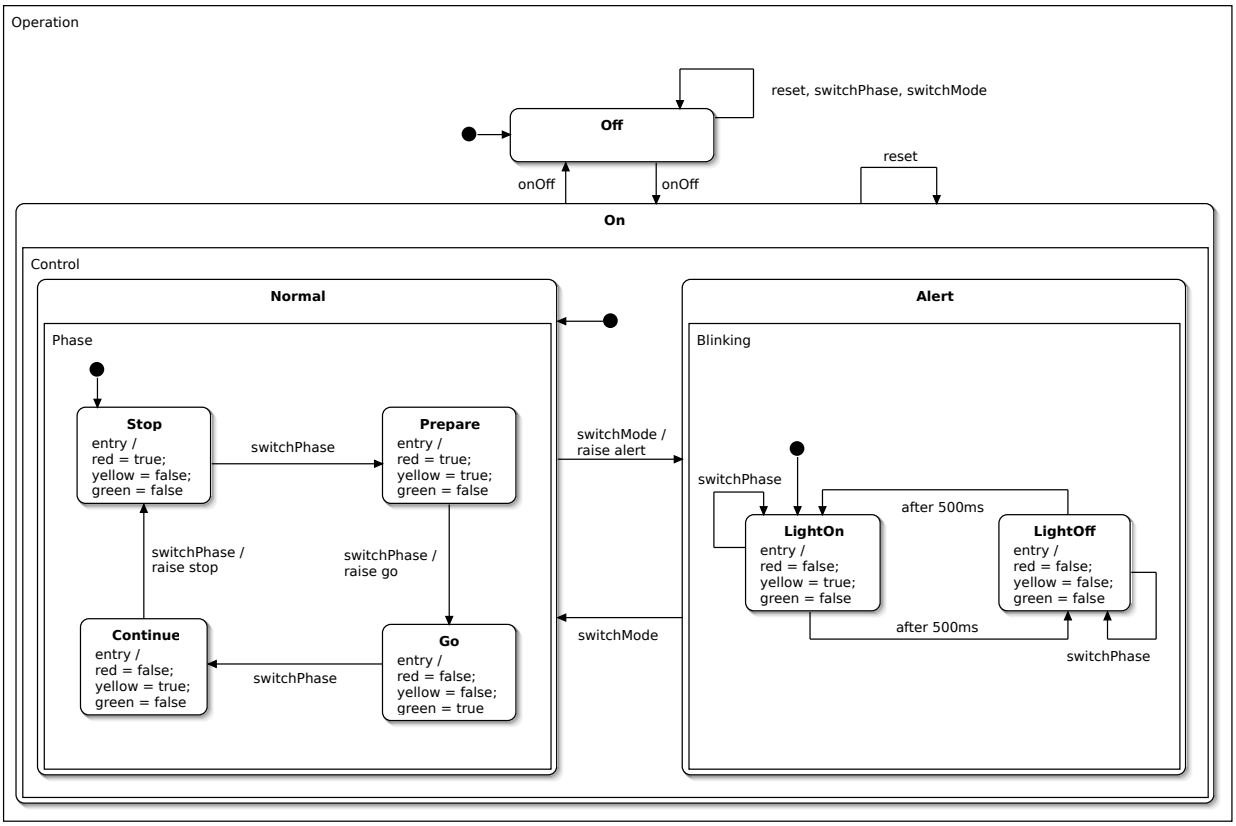
4.9. ábra. Fények állapotának modellezése változókkal

van, akkor $4^5 = 1024$ állapota lenne a szorzatautomatának. Ebből kifolyólag ez a megközelítés egymástól nagyban független viselkedések modellezésére nem szerencsés, hiszen kezelhetetlenül nagy méretű modellekhez vezet (ún. *állapottér-robbanás* jelensége).

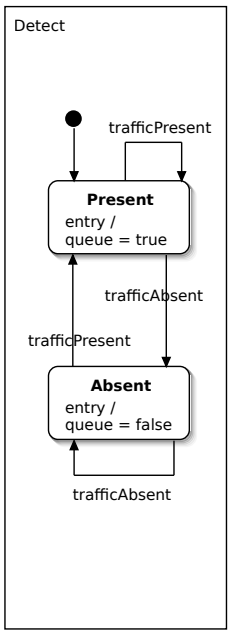
4.5.2. Ortogonális állapot

Ilyen esetekben alkalmazható eszköz az *ortogonális állapot*. Az ortogonális állapot egy olyan összetett állapot, mely több régióval rendelkezik. Az ortogonális állapot régiói *ortogonális régiók*, melyek – az egyrégiós összetett állapottal megegyező módon – akkor aktívak, ha a tartalmazó állapot aktív.

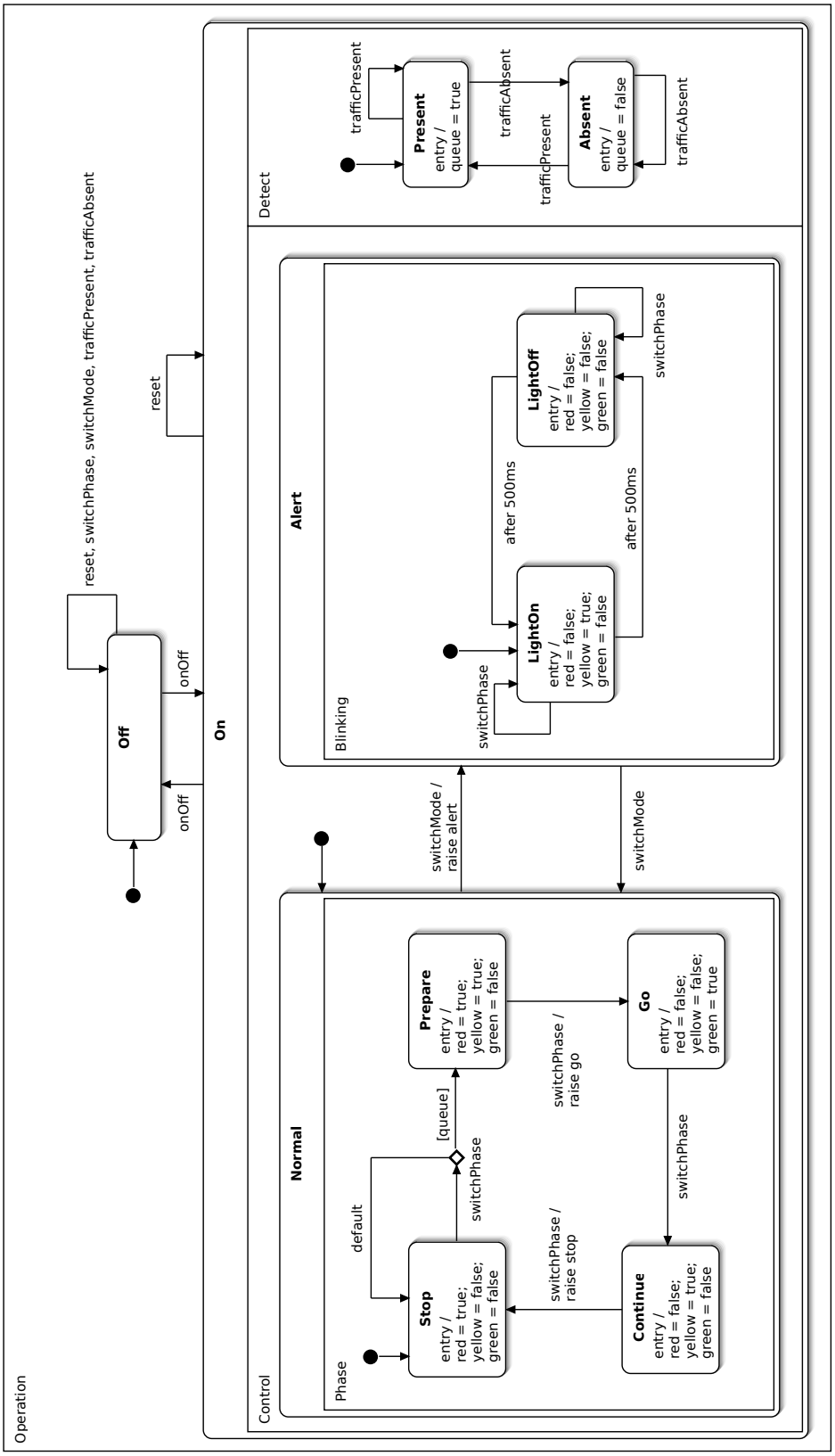
Az így elkészített állapotgépet a 4.12. ábra szemlélteti.



4.10. ábra. Villogó jelzés időzítéssel



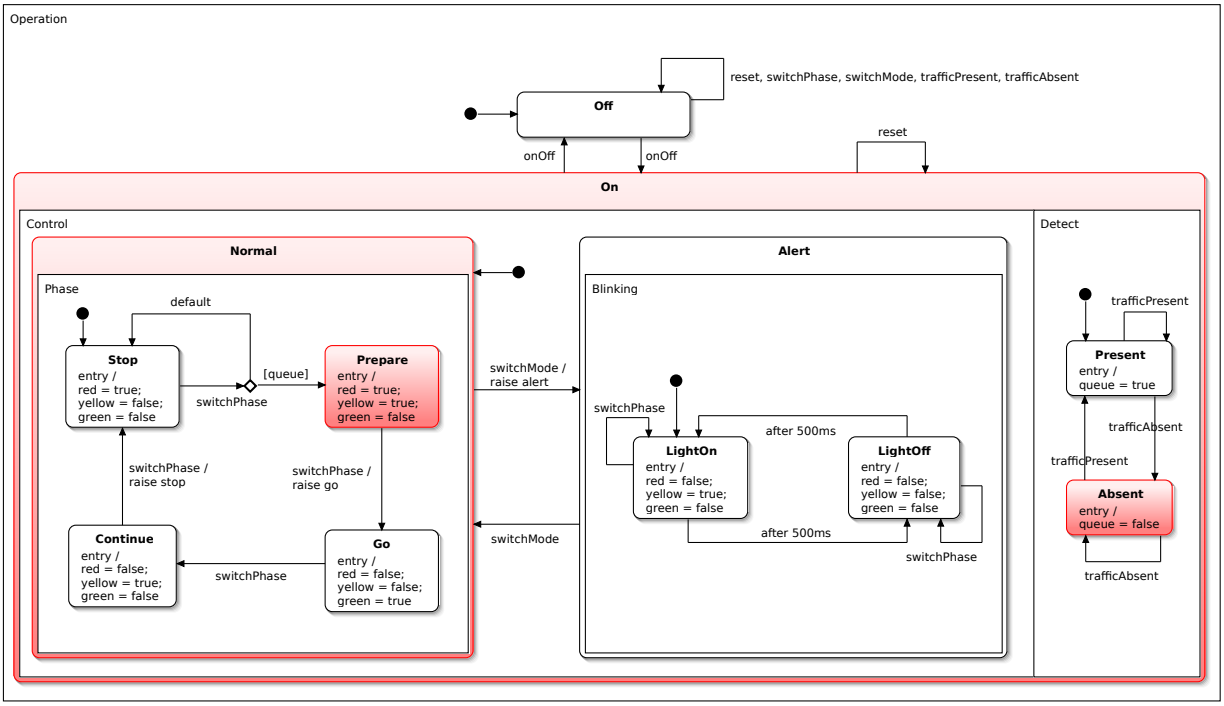
4.11. ábra. Járműérzékelő funkció állapotgépe



4.12. ábra. Járműérzékelős jelzőlámpa állapotgépe ortogonális állapottal

Szemantikailag az ortogonális régiók *aszinkron* módon működnek, a tranzíciók külön-külön tüzelnek, szemben a *szinkron* működéssel, amikor egy adott esemény bekövetkeztekor az ortogonális régiók tranzíciói egyszerre tüzelnek. Fontos, hogy az ortogonális régiók különböző eseményeket dolgozzanak fel, különben *versenyhelyzet* alakulhat ki. A működés összhangolása történhet például megosztott változókon keresztül; egyéb módszerek is léteznek (pl. belső események mentén történő szinkronizálás), amelyekkel itt nem foglalkozunk.

Példa. A fenti rendszert szimulálva, majd az (onOff, switchPhase, trafficAbsent) eseményeket sorrendben kiváltva a rendszer a 4.13. ábra látható állapotkonfigurációba kerül. Vegyük észre, hogy az aktív ortogonális állapot (On) mindkét ortogonális régiójában (Control, Detect) pontosan egy közvetlenül tartalmazott állapot aktív.



4.13. ábra. Ortogonális állapot aktuális állapotként

Ortogonális állapotok bevezetésével az állapotkonfiguráció fogalma is összetettebbé válik. Ilyen esetben ugyanis minden időpillanatban, amikor egy ortogonális állapot aktív, minden régiójának pontosan egy állapota aktív (az egy ortogonális állapothoz tartozó régiók között tehát nem érvényesül a kizárólagosság).

Példa. A rendszer állapotkonfigurációi:
- {Off}
- {On, Normal, Stop, Present}
- {On, Normal, Prepare, Present}
- {On, Normal, Go, Present}
- {On, Normal, Continue, Present}
- {On, Normal, Stop, Absent}
- {On, Normal, Prepare, Absent}
- {On, Normal, Go, Absent}
- {On, Normal, Continue, Absent}
- {On, Alert, LightOn, Present}
- {On, Alert, LightOff, Present}
- {On, Alert, LightOn, Absent}
- {On, Alert, LightOff, Absent}

Példa. A fentieknek megfelelően az állapotkonfigurációk halmaza tekinthető a változókat elabsztraháló állapottérnek. Ha azonban a változókon kívül a járműérzékelő működését is elabsztraháljuk, akkor arra jutunk, hogy a már ismerős

$$\{\mathsf{Off}, \mathsf{Stop}, \mathsf{Prepare}, \mathsf{Go}, \mathsf{Continue}, \mathsf{LightOn}, \mathsf{LightOff}\}$$

halmaz továbbra is egy érvényes állapottere a rendszernek. Természetesen az is egy érvényes absztrakció, ha a Control régió állapotait absztraháljuk el; ilyenkor az

$$\{\mathsf{Off}, \mathsf{Present}, \mathsf{Absent}\}$$

halmaz adódik állapottérnek.

Feladat. Gondoljuk végig, hogy a szorzatautomata, ill. szorzat-állapottér fogalmaknak mi köze van a matematikából ismert Descartes-szorzat művelethez!

Feladat. Miért nem a Stop állapot alállapotaiként vettük fel a járműérzékelő funkcionalitást?

4.6. A végső modell

Utolsó lépésként a különböző eseményeket és változókat *interfészekbe* (`interface`) rendezzük. Ennek a csoportosításnak az az elsődleges szerepe, hogy elkülönítsük egymástól az eltérő külső rendszerekhez kapcsolódó elemeket; így pl. a forgalomdetektor megvalósításakor kizárólag a `Detector` interfészt kell figyelembe venni, a többi interfész részleteivel nem kell megismerkedni, azok esetleges áttervezését nem kell nyomon követni. Speciális esetként megjelenik a kizárólag belső használatú queue változó, amely egyik külső interfésznek sem része, így külső rendszerekkel nem lesz közvetlen érintkezésben. (Yakinduban az ilyen változókat és eseményeket a speciális `internal` interfész tartalmazza.)

Az interfészdefiníciók Yakinduban a következőképpen alakulnak:

```
interface Controller:
  in event onOff
  in event reset
  in event switchPhase
  in event switchMode
```

```
interface Detector:
  in event trafficPresent
  in event trafficAbsent

interface Recorder:
  out event stop
  out event go
  out event alert

interface Light:
  var red : boolean
  var yellow : boolean
  var green : boolean

internal:
  var queue : boolean
```

Mivel a különböző interfészeknek lehetne azonos nevű eseménye ill. állapotváltozója, ezért Yakinduban mindig az interfész megadásával kell hivatkozni a változókra és eseményekre. A módosított modellt szemlélteti a 4.14. ábra.

4.7. Kooperáló állapotgépek szinkronizációja*

Definíció. Állapotgépek *szinkronizációján* (más néven randevú, esetenként handshake, vagy programnyelvek esetén barrier) azt értjük, hogy két kooperáló állapotgépben bizonyos állapotátmenetek csak egyszerre történhetnek meg. A szinkronizálandó tranzíciókat szinkronizációs címkével jelöljük meg. Jelölése az állapotátmeneten: *trigger* <*szinkronizáció*> [*őrfeltétel*] / *akció*.

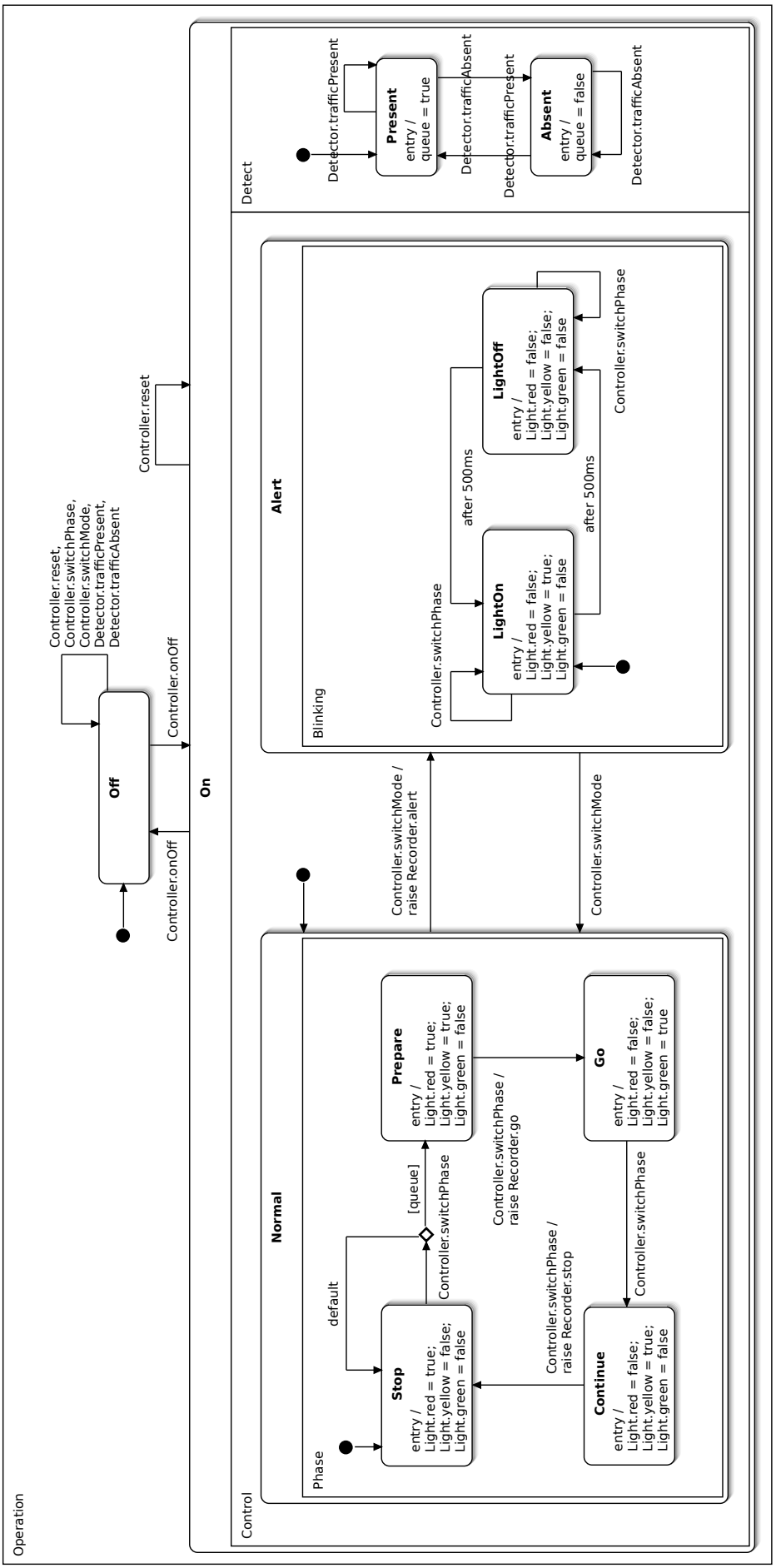
A szinkronizációval leírható, hogy a két állapotgépben megjelölt állapotátmenetek valójában a teljes rendszer egyetlen (összetett) állapotátmenetének vetületei, külön-külön nem, csak egyszerre végrehajthatók. A címke az összetett állapotátmenetre utal, így több helyen is előfordulhat ugyanaz a szinkronizációs címke, valamint többféle címke is használható.

Megjegyzés. A szinkronizáció két állapotgép között működik, vagyis szintaktikailag is csak akkor helyes, ha legalább két állapotgépet tekintünk. Ha a kooperáló állapotgépek közül csak egyet vizsgálunk, a szinkronizált átmenetek spontán átmenetté válnak. Mivel ilyenkor elveszítjük azt az információt, hogy az adott átmenet mikor hajtható végre, absztrakció történik. Ugyanakkor itt is megfigyelhető, hogy finomítással (ebben az esetben au állapotgép-hálózat többi tagjának ábrázolásával) feloldható a nemdeterminizmus, jelen esetben a spontán átmenet(ek) megszüntetésével.

Példa. A kooperáló állapotgépek közötti szinkronizáció (és egyéb interakciók) illusztrációjáért lásd a Folyamatmodellezés gyakorlati feladatsor 4/*e)* feladatának megoldását.

Felhasznált irodalom

- Az állapottérkép modellezési módszer kidolgozása [12, 13]
- Az állapottérkép modell UML-ben [11]
- Állapottérkép modellek értelmezése (modellszemantika) [20, 5, 14]
- Állapottérkép alapú forráskód generálás [27]
- Pintér Gergely, *Model Based Program Synthesis and Runtime Error Detection for Dependable Embedded Systems* [23]
- UML állapottérképek használata biztonságkritikus rendszerekben [17, 21]
- Pap Zsigmond, *Biztonságossági kritériumok ellenőrzése UML környezetben* [22]



4.14. ábra. A jelzőlámpa modellje interfészekkel

5. fejezet

Folyamatmodellezés

Az informatikában és azon kívül is számos esetben találkozunk olyan viselkedéssel, amikor megadott tevékenységek megadott sorrendben zajlanak. Például egy autómegosztó szolgáltatásban egy fuvar rendeléséhez, banki ügyintézés esetén a hitelbírálathoz, egyetemi környezetben egy tárgy felvételéhez egy jól meghatározott folyamat tartozik. Amennyiben ezeket digitálisan szeretnénk végezni, fontos, hogy a folyamatokat precízen definiáljuk.

A folyamatmodelleket széleskörűen használják, többek között az informatikában rendszerek működtetésére, protokollok specifikációjára, adatelemzési folyamatok specifikálására. Látni fogjuk, hogy a szoftverek programkódjának elemzése is folyamatmodellre vezet.

5.1. Folyamatok

A *viselkedési modellek* a rendszer viselkedését többféle aspektusból jellemezhetik:

- Az *állapot alapú modellek* esetén a rendszereket az *állapotukkal* jellemezzük. Az állapotgép alapú viselkedésmodell arra válaszol, hogy „miként változhat" a rendszer. Másként fogalmazva: a modell elsődlegesen arra összpontosít, hogy milyen állapotokban lelhető fel a rendszer (és nevekkel látja el az állapotokat), ill. milyen hatásokra mely állapotból mely állapotokba léphet át. Az másodlagosnak tekinthető, hogy ez a változás részletesebben megvizsgálva hogyan zajlik le, ezért a modell azt az egyszerűsítést alkalmazza, hogy az állapotátmenetek pillanatszerű események. Ilyen állapot alapú modellekkel bővebben a 4. fejezetben foglalkoztunk.
- Ezzel szemben a *folyamatmodellek* fókusza az, hogy „mit csinál" egy rendszer. A tevékenységeknek időbeli kiterjedést tulajdonítunk (ahelyett, hogy pillanatszerűvé egyszerűsítenénk őket), és azt vizsgáljuk, hogy mely tevékenységek végezhetőek el más tevékenységek előtt vagy után, esetleg velük átlapolódva. Ugyan a rendszer állapotainak jellemzése (adott időpontban mely tevékenységek vannak folyamatban, fejeződtek már be stb.) implicit módon kikövetkeztethető a folyamatmodellből, de ez mintegy másodlagos; a modell a folyamatot alkotó tevékenységeknek ad nevet, és ezek viszonyának megadását várjuk el a modellezőtől.

A folyamatmodellezés célja tehát, hogy a rendszer folyamatát leírja.

Definíció. A *folyamat* tevékenységek összessége, melyek adott rendben történő végrehajtása valamilyen célra vezet.

5.2. A folyamatmodellek építőkövei

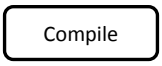
Az alábbiakban bemutatjuk a folyamatmodellek építőköveinek nevét, grafikus jelölését és szemantikáját.

5.2.1. Elemi tevékenység

Mielőtt valódi folyamatmodelleket vizsgálnánk, először meg kell ismerkednünk azzal az esettel, amikor valamilyen viselkedés részleteit *nem* modellezzük folyamatként.

Példa. Szoftverünk C nyelvű forráskódjából futtatható programot szeretnénk előállítani; ennek egyik lépéseként egy konkrét forrásállományt le kell fordítanunk (*compile*) a fordítóprogram segítségével. Mivel a fordítóprogramot nem mi készítjük, ezért nem szükséges részleteiben vizsgálnunk, hogy milyen lépésekből áll a futása. Így tehát azt mondhatjuk, hogy a fordítóprogram futása egy *elemi tevékenység*; valamikor el fog kezdődni, utána némi idővel be fog fejeződni, és nem részletezzük, hogy közben mi történik. Ebben a jegyzetben az 5.1. ábrán láthatóhoz hasonló rajzjelekkel fogjuk a hasonló elemi tevékenységeket jelölni.

Definíció. Az *elemi tevékenység* olyan időbeli kiterjedéssel rendelkező tevékenység, amelynek a megkezdésén és befejezésén túl további részleteit nem modellezzük.



5.1. ábra. Elemi tevékenység grafikus szintaxisa

Példa. Mit is értünk azalatt, hogy a fordítóprogram futtatása időbeli kiterjedéssel bír? Ahogy az 5.2. ábrán látható idődiagram is illusztrálja, kezdetben a tevékenység nem fut. Valamikor a működés során eljön a tevékenység kezdete - ezt egy pillanatszerű eseményként modellezzük; utána úgy tekinthető, hogy a fordítás tevékenység *folyamatban van*. Később eljön az az idő, amikor a fordítás befejeződik; ez egy újabb pillanatszerű esemény, amely után az elemi tevékenység már nincs folyamatban, befejezettnek tekinthető.

5.2. ábra. Elemi tevékenység időbeli lefutása idődiagramon

Ahogy a fenti példa is illusztrálja, minden elemi tevékenység önmagában egy háromelemű állapotteret határoz meg: {még nem kezdődött el, folyamatban van, már befejeződött}; később az összetett folyamatmodellek állapotteréről is lesz szó. Látható, hogy az elemi tevékenység is leírható a korábban tanult állapotmodellezési eszköztárral; ebben az esetben viszont más a modell fókusza, más elemeket tartunk elnevezésre és vizsgálatra érdemesnek.

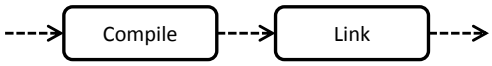
Megjegyzés. Bizonyos források *atomi* tevékenység vagy lépés néven hivatkoznak ugyanerre az *elemi tevékenység* fogalomra, de ebben a jegyzetben ezt kerüljük. Ellenkező esetben összekeverhető lenne egy hasonló nevű másik fogalommal: az *atomi művelet* (*atomic operation*) kifejezetten a pillanatszerűnek tekinthető, időbeli kiterjedés nélkül modellezett tevékenységekre utal. Az atomokhoz hasonlóan az atomi művelet nem osztható: vagy el se kezdődött, vagy már befejeződött, de nem találhatjuk magunkat olyan időpillanatban, amikor részben már lezajlott, de még folyamatban van. Ezzel szemben az elemi tevékenység időbeli kiterjedéssel bír, és a modell megenged olyan időpontot, amikor épp folyamatban van; még ha nem is részletezi, a tevékenység mely elemei milyen készültségi fokon vannak. A tevékenységek kezdetét és befejezését viszont már atominak, pillanatszerűnek tekintjük.

5.2.2. Szekvencia

Ha a modelljeink csak egymástól izolált elemi tevékenységeket tartalmaznának, nem sok hasznos tudást fejeznének ki. A folyamatmodellek igazi erőssége, hogy a tevékenységekből *folyamatot* építenek

fel, amely azt fejezi ki, hogy az egyes tevékenységek egymáshoz viszonyítva mikor hajthatóak végre. A legegyszerűbb ilyen konstrukció a *szekvencia*, ahol a tevékenységeket úgynevezett *vezérlési élek (vezérlésifolyam-élek)* kötik össze.

Példa. Az ipari gyakorlatban egy C program forráskódja tipikusan nem csak egyetlen fájlból áll. Miután egy C forrásfájlt tárgykóddá fordítunk, utána össze kell *linkelni* más tárgykódokkal (korábban lefordított forrásállományok, függvénykönyvtárak), hogy végül megkapjuk a futtatható állományt. Így tehát a következő folyamatot kell elvégezni: először a fordítás elemi tevékenységet kell végrehajtani, majd annak befejezte után kezdhető meg a linkelés. Az 5.3. ábrán ennek a *szekvenciának* a jelölését látjuk; a szaggatott nyíl rákövetkezést jelöl, tehát hogy a *Compile* tevékenység vége után kezdhető meg a *Link*.



5.3. ábra. Szekvencia grafikus szintaxisa

Definíció. A *szekvencia* tevékenységek szigorú végrehajtási sorrendjét definiálja.

Megjegyzés. Ahogy az ábrán is látható, a vezérlési éleket jelen jegyzetben egységesen szaggatott nyíllal jelöljük, de más forrásokban, különböző modellezési nyelvek szabványaiban gyakran jelölik folytonos nyíllal.

A következőkben több külön módszerrel értelmezzük a *szekvencia* szemantikáját. Bár ez a vizsgálat feleslegesen alaposnak és szájbarágósnak tűnhet („ágyúval verébre"), de a később előkerülő összetettebb folyamatmodell-konstrukciók megértését nagymértékben segíti.

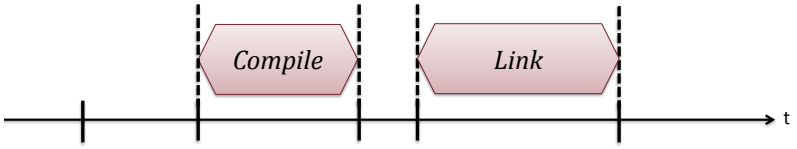
Példa. Hogyan szimulálhatjuk a szekvenciánk működését? Ha az 5.3. ábrán látható folyamatdiagramot kinyomtatjuk, és a papírra helyezünk egy régi egyforintost (vagy csavaranyát, vagy bármely egyéb jelölőt, amelyet a továbbiakban a *token* névvel illetjük), akkor az ábra alapján könnyen követhetjük a folyamat működését.

- Helyezzük kezdetben a tokent az ábra bal szélén belépő szaggatott nyílra! Mivel a token nem tevékenységen áll, ezért ezt úgy értelmezzük, hogy nem fut jelenleg egyik feltüntetett elemi tevékenység se.
- Csúsztassuk ujjunkkal kissé arrébb a tokent. Kövessük nyilat, tehát kerüljön a token a *Compile* tevékenységre! Amíg a tevékenység rajzjelén áll a token, úgy tekintjük, hogy a tevékenység folyamatban van.
- Amikor a nyilak irányában ismét továbbmozgatjuk, a token a két tevékenység közötti szaggatott nyílszakaszra kerül. Ekkor az első tevékenység már nem fut, tehát befejeződött; ugyanakkor a második tevékenység még nem kezdődött el.
- Harmadszor is mozgatva a tokent, elkezdhetjük a *Link* tevékenységet.
- Végül, az ábra jobb szélén látható nyílra helyezve a tokent, kifejezzük a második tevékenység befejeződését is.

Ha belegondolunk, a tokennel valójában a következő állapotteret jártuk be: { még nem kezdődött el egyik tevékenység sem, *Compile* folyamatban van, *Compile* befejeződött és *Link* még nem kezdődött el, *Link* folyamatban van, befejeződött mindkét tevékenység }. A folyamatmodell határozza meg ezt az öt állapotot, valamint hogy milyen állapotátmenetek megengedettek köztük (jelen esetben csak a felsorolás sorrendjében lehet állapotot váltani). A folyamat tehát ezt az állapotmodellt indukálja.

Ha a folyamatot (például a fenti példához hasonlóan token mozgatásával) szimuláljuk, egy konkrét lefutását kapjuk. A folyamat konkrét lefutásait a folyamatmodell *folyamatpéldányainak* nevezzük. Ez nyilván akkor lesz izgalmas fogalom, ha egy folyamatot nem csak egyszer hajtunk végre, hanem többször, Ha belegondolunk, a tokennel valójában a végrehajtás pillanatnyi állapotát jelöltük ki, és a következő állapotteret jártuk be vele: { még nem kezdődött el egyik tevékenység sem, *Compile* folyamatban van, *Compile* befejeződött és *Link* még nem kezdődött el, *Link* folyamatban van, befejeződött

mindkét tevékenység }. A folyamatmodell határozza meg ezt az öt állapotot, valamint hogy milyen állapotátmenetek megengedettek köztük (jelen esetben csak a felsorolás sorrendjében lehet állapotot váltani). A folyamatmodell tehát ezt az állapotmodellt indukálja, a folyamat szimulációját pedig visszavezettük a fent konstruált állapotmodell szimulációra. A szimuláció eredményeképpen az 5.4. ábrán látható idődiagramhoz hasonló eredményt kapunk.



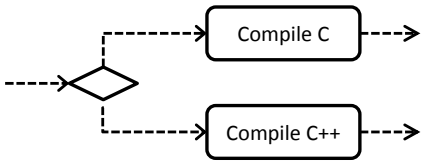
5.4. ábra. Szekvencia időbeli lefutása

5.2.3. Elágazás, őrfeltétel

Azt is ki lehet fejezni megfelelő folyamatmodellel, ha nem minden lefutás ugyanazokat a tevékenységeket hajtja végre. Ilyen elágazások modellezésére szolgál a *döntési csomópont*, amely az első általunk megismert *vezérlési elem (vezérlési csomópont / vezérlésifolyam-csomópont)* a folyamatmodellben.

Definíció. A *vezérlési elem (vezérlési csomópont / vezérlésifolyam-csomópont)* olyan csomópont a folyamatban, mely a folyamatmodell tevékenységei közül választ ki egyet vagy többet végrehajtásra.

Példa. Bizonyos fájlokra a C fordítót, másokra a C++ fordítót kell meghívni. Ezt az 5.5. ábrán látható folyamatmodell fejezi ki, ahol a rombusz jelképezi a *döntési csomópontot (elágazást)*. Ennek a folyamatmodellnek az is érvényes lefutása, ha az egyik fordítót hívjuk meg, és az is, ha a másikat.
A folyamat szimulációja során először a bal oldalról belépő vezérlési élre helyezzük a tokent; ezek után szabadon választhatunk, hogy a döntési csomópontból kilépő élek közül melyikre rakjuk át. A folytatás már a jól ismert módon történik: a tokent először a választott elemi tevékenységre, majd a továbblépő vezérlési élre helyezzük.



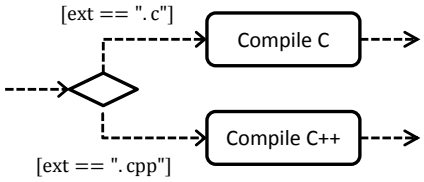
5.5. ábra. Elágazás grafikus szintaxisa

Természetesen 2 helyett 3, 4 stb. *ágú* döntési csomópont is elképzelhető.

Az elágazási pontnál bármelyik *ágat* is választjuk, a folyamatmodell egy érvényes lefutását kapjuk. Másképpen szólva: a modell nem fejezi ki azt az információt, hogy mi alapján dönthető el, melyik esetben melyik lehetőség fog megtörténni. A korábban tanult szóhasználattal élve *nemdeterminizmust* mutat a modell. Gyakran hasznos így modellezni, pl. ha emberi döntéstől függ a választás; vagy bármilyen egyéb esetben, ha vagy nincs rálátásunk a döntést meghatározó tényezőkre, vagy a modellezés jelenlegi absztrakciós szintjén a szükséges részleteket el akarjuk hanyagolni.

Gyakran esetekben azonban a rendszermodellünkben elérhető olyan információ, amely meghatározza, hogy a folyamat végrehajtása melyik ágon történhet, determinisztikussá téve a választást. Más modelleknél erről nincs szó, de a rendelkezésre álló információ alapján legalább időnként csökkenthető a választási lehetőségek száma. Mindkét esetben a szoros értelemben vett folyamatmodellen kívüli tudás alapján kizárjuk a döntés után előálló ágak némelyikét; erre pedig (az állapotgépekhez hasonló módon) az ún. *őrfeltétel* szolgál.

Példa. Elérhető az `ext` karakterlánc, amely a fordítandó forrásfájl kiterjesztését adja meg. Ez alapján minden esetben eldönthető, hogy melyik nyelv fordítóprogramját kell végrehajtani. Az 5.6. ábrán látható folyamatmodell őrfeltételekkel fejezi ki.



5.6. ábra. Elágazás grafikus szintaxisa őrfeltételekkel

A korábban bevezetett fogalmaknak megfelelően akkor determinisztikus a folyamatmodell, ha minden egyes elágazás minden végrehajtásánál kizárják egymást az őrfeltételek; és akkor teljesen specifikált, ha minden egyes elágazás minden végrehajtásánál az őrfeltételek legalább egyike mindig teljesül. Ha nincsenek őrfeltételek megadva, az úgy tekintendő, mintha az állandó „[igaz]” őrfeltételt alkalmaztuk volna.

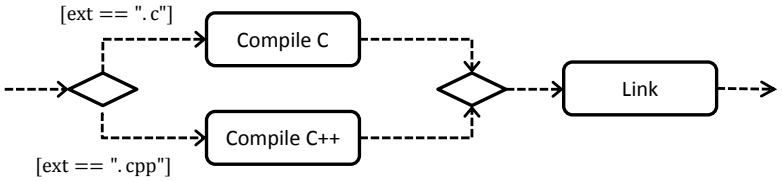
Összefoglalásként tehát ezt a definíciót alkothatjuk:

Definíció. A *döntési csomópont* olyan csomópont a folyamatban, amely a belé érkező egyetlen vezérlési él hatására a belőle kiinduló *ágak* (vezérlési élek) közül pontosan egyet választ ki végrehajtásra, az esetleges *őrfeltételekkel* összhangban.

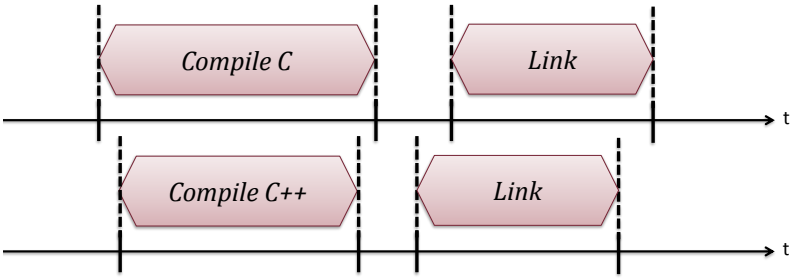
5.2.4. Merge (besorolódás)

Gyakran egy elágazás különböző *ágai* egy adott ponton túl egyformán folytatódnak. Ennek kifejezésére szolgál egy újabb vezérlési elem, a *merge (besorolódási) csomópont*. Sajnos nem terjedt el rá frappáns magyar név, így leggyakrabban az angol merge szót használjuk.

Példa. Akár C, akár C++ nyelvű forrásfájt fordítottunk le, utána mindenképp a linkelés következik. Az 5.7. ábrán feltüntetett merge csomópont (rajzjele egyezik a döntési csomópontéval) éppen ezt fejezi ki. A modell szimulációjakor, miután az egyik fordítási tevékenységet végrehajtottuk, a token a merge csomópontba mutató nyilak egyikén áll; ezután egyszerűen átmozgathatjuk a merge csomópont túloldalára, hogy utána már a *Link* tevékenység végrehajtása következhessen. Akármelyik ágról is érkezik a token, a merge csomópont után ugyanazon kimenő vezérlési élre kerül; ez ahhoz hasonlatos, mint amikor a közúti forgalomban egy közlekedési sáv megszűnésekor két járműoszlopból is ugyanabba a sávba sorolódnak be a járművek. Az 5.8. ábra idődiagramon mutat be két eltérő lefutást.



5.7. ábra. Elágazás és merge (besorolódás) grafikus szintaxisa

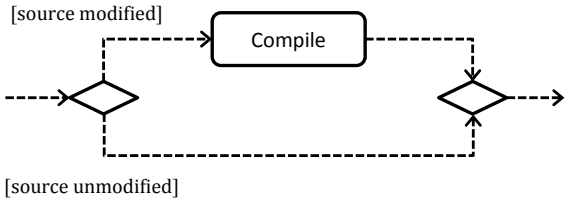


5.8. ábra. Elágazás és merge (besorolódás) kétféle lefutása időDiagramon

Definíció. A *merge (besorolódási) csomópont* olyan csomópont a folyamatban, amely a belé érkező *ágak* közül akármelyik végrehajtásakor kiválasztja a belőle kiinduló egyetlen vezérlési élet további végrehajtásra.

Természetesen a többágú döntési csomópont mintájára többágú merge is elképzelhető. További különleges eset, ha a döntési és merge csomópontok között valamelyik ágon csak egy üres vezérlési él vezet, semmilyen tevékenység nem hajtódik végre; ilyet akkor használunk, ha egy tevékenység végrehajtása opcionális, vagy egy döntés valamilyen kimenetele esetén nincs teendő.

Példa. Valójában csak olyankor kell lefordítani egy forrásállományt, ha a fordítóprogram utolsó végrehajtása óta módosult; egyéb esetben a régi tárgykódot meghagyva a fordítási lépés kihagyható. Ilyen elven épített folyamatot mutat be az 5.9. ábra.

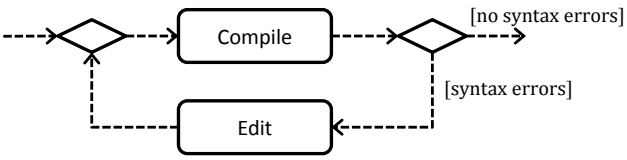


5.9. ábra. Elágazás üres ággal

5.2.5. Ciklus

Ha már megismertük a döntés és merge vezérlési elemeket, akkor építhetünk velük *ciklus*t, amely a folyamat egy részletét többször is képes ismételni.

Példa. Az 5.10. ábra olyan folyamatot mutat be, ahol a fordítás után megvizsgáljuk, találtunk-e fordítási hibát; amennyiben van hiba, akkor azt megpróbáljuk kijavítani, és újrafordítjuk az állományt. Előfordul, hogy továbbra is vannak hibák, ekkor ismét a kód szerkesztése és újrafordítás következik. Ezek a tevékenységek mindaddig ismétlődnek, amíg végül el nem tűnnek a hibák.



5.10. ábra. Ciklus grafikus szintaxisa

Definíció. A *ciklus* olyan folyamatmodell (részlet), amelyben egy elágazás valamelyik ágán az elágazást *megelőző* merge csomópontba jutunk vissza.

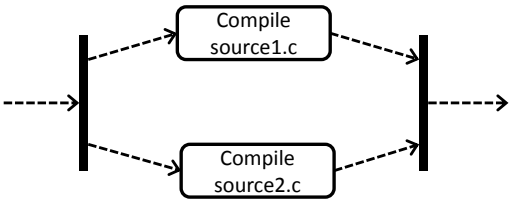
Nem nehéz végiggondolni, hogy ciklikus folyamatok futásakor ezek a vezérlési csomópontok többször is érinthetőek. Próbáljuk ezt a fenti példán a tokenes kézi szimuláció módszerével kipróbálni!

5.2.6. Konkurens viselkedés

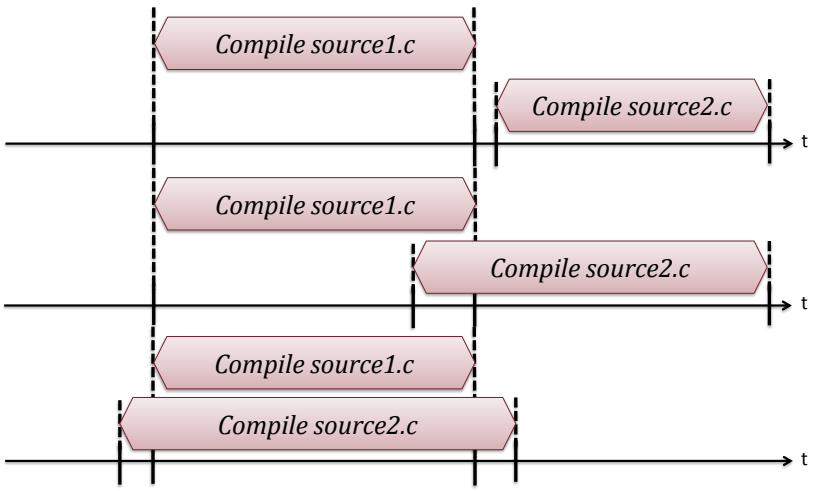
Előfordulhat olyan folyamat, amelyben nincs előírva két tevékenység (vagy részfolyamat) egymáshoz képesti sorrendje, csak hogy mindkettőnek meg kell történnie. A szóban forgó két tevékenység közül történhet az egyik a másik előtt, vagy fordítva; sőt, futhatnak (részben) egyszerre is. Ilyen viselkedést fejez ki a *fork csomópont* és a *join (találkozási / szinkronizáló) csomópont* párosa (itt ismét nincsenek általánosan elfogadott magyar fordítások).

Definíció. Két bekövetkező tevékenység vagy esemény *konkurens*, ha a bekövetkezési sorrendjükre nézve nincs megkötés.

Példa. Az 5.11. ábra olyan folyamatot mutat be, ahol két forrásfájlt is lefordítunk, azonban a sorrendjük nincs meghatározva. Fordítható az 1-es számú állomány a 2-es előtt, vagy fordított sorrendben. Ha többmagos processzorunk van, érdemes lehet a két fájl fordításával egyszerre is megpróbálkozni.
Ezt a folyamatmodellt a következőképpen szimulálhatjuk: először természetesen a bal szélről belépő vezérlési élen van a token. A következő lépésben a fork csomópont hatására *megkettőzzük* a tokent: az egyik token a felső, a másik az alsó kimenő vezérlési élre kerül. A továbbiakban szabadon választhatóan akármelyik token léptethető. Például elkezdheti először a felső token a tevékenységet, majd befejezheti, mielőtt az alsó elkezdené és befejezni a saját tevékenységét. Egy másik lehetőség, hogy a felső token elkezdi a felső tevékenységet, majd az alsó token az alsó tevékenységet, így átlapolva a két tevékenység végrehajtását; ezek után akármilyen sorrendben befejezhetik a saját tevékenységeiket. Számos lehetőség van; ám végül így vagy úgy, de eljutunk abba a helyzetbe, amikor mindkét token a join csomópont egy-egy bemenő vezérlési élén van. Ekkor egyetlen lépésként a két tokent újra *összeolvasztjuk*, és egyetlen tokent helyezünk a join kimenő élére. Néhány lehetséges lefutás látható az 5.12. ábrán.



5.11. ábra. Fork és join grafikus szintaxisa



5.12. ábra. Fork és join néhány lehetséges lefutása idődiagramon

Nagyon fontos megérteni, hogy a két *párhuzamos folyam* megvárja egymást (szinkronizál) a join csomópontnál; egyik se haladhat tovább, amíg a join csomópont összes bemenő vezérlési élére nem érkezik token.

Természetesen a többágú döntési és merge csomópont mintájára többágú fork ill. join is használható. Ilyenkor a fork hatására megkettőzés helyett többszöröződik a token, ill. több token várja össze egymást a join csomópontnál.

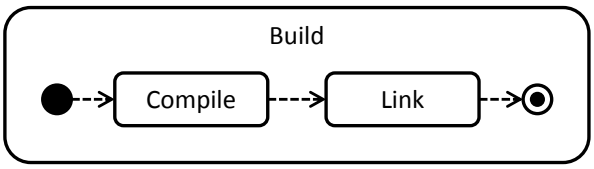
Definíció. A *fork csomópont* olyan csomópont a folyamatban, amely a belé érkező egyetlen vezérlési él hatására a belőle kiinduló összes *párhuzamnos folyamot* (vezérlési élet) kiválasztja végrehajtásra.

Definíció. A *join (találkozási / szinkronizáló) csomópont* olyan csomópont a folyamatban, amely a belé érkező összes *párhuzamos folyam* végrehajtása után kiválasztja a belőle kiinduló egyetlen vezérlési élet további végrehajtásra.

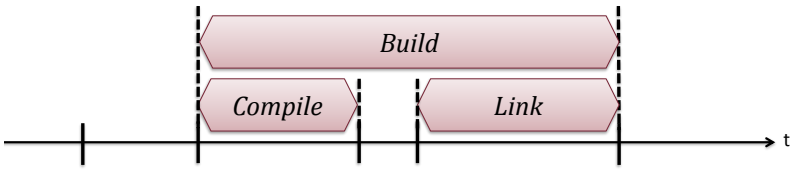
5.2.7. Teljes folyamatok

Eddig csak a folyamatok építőelemeivel foglalkoztunk; most megnézzük, hogy lehet a segítségükkel egy egész folyamatot leírni az elejétől a végéig. Ehhez csupán két új vezérlési csomópontra lesz szükségünk; ezek az új elemek a folyamat kezdetét jelentő, egyszerű körrel/koronggal jelölt *start (flow begin) csomópont*, valamint a folyamat befejeztét jelentő és a dupla falú körrel jelölt *cél (flow end) csomópont*.

Példa. Vegyük az az 5.13. ábrán látható, *Build* névvel illetett egyszerű folyamatot! Jól látható, hogy a teljes folyamat két elemi tevékenység szekvenciájából áll. A folyamat szimulációját úgy kezdjük meg, hogy a kezdőcsomópontban létrehozunk és az onnan kilépő vezérlési élre mozgatunk egy tokent; ez jelképezi a *Build* folyamat elindulását. Ezek után a szekvencia a már megismert módon szimulálható, amíg végül a *Link* tevékenységből kilépő vezérlési élre nem kerül a token. Ekkor a folyamat befejeződhet, amelyet úgy jelzünk, ha a célcsomópontba vezető élről a célcsomópontba mozgatjuk és egyúttal felszedjük a tokent. A lefutás idődiagramját az 5.14. ábra mutatja; jól látható, hogy az egyes tevékenységek végrehajtása teljes egészében a folyamat futása alatt zajlik.



5.13. ábra. Flow begin és flow end grafikus szintaxisa



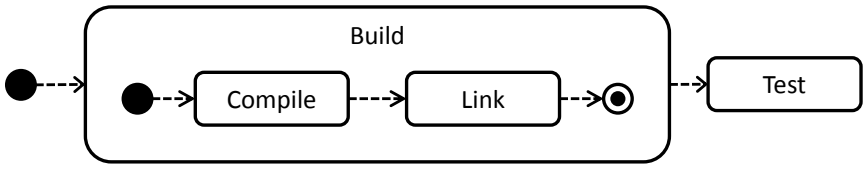
5.14. ábra. Teljes folyamat idődiagramja

Definíció. Minden folyamat egy *start (flow begin) csomópont* vezérlési elemmel indul, és egy *cél (flow end) csomópont* elemmel fejeződik be. Az *start (flow begin) csomópont* a folyamat elindulását jelentő elem, melynek pontosan egy kimenete van. A *cél (flow end) csomópont* a folyamat befejezését jelentő elem, melynek pontosan egy bemenete van.

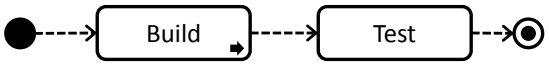
5.2.8. Hierarchikus folyamatmodellek

Egészen idáig elemi tevékenységeket használtunk a folyamatainkban. Azonban lehetőségünk van összetett tevékenységek modellezésére is, ahol a tevékenység belső lépéseit egy külön folyamatmodell írja le. Egyfelől a hierarchikus modellezés elvét követve egy alfolyamat beágyazható tevékenységként egy főfolyamatba; másrészt elkülönítetten definiált folyamatokra is hivatkozhat egy tevékenység.

Példa.
Az 5.15. ábra az alfolyamattá részletezett tevékenység használatát mutatja be, míg az 5.16. ábra az előzővel azonos jelentésű folyamatot épít fel úgy, hogy a folyamat első tevékenysége hivatkozza (hívja) az 5.13. ábrán látható, korábban definiált folyamatot.



5.15. ábra. Hierarchia grafikus szintaxisa



5.16. ábra. Hívás grafikus szintaxisa

5.2.9. Folyamatpéldányok

Példa. Vegyük példának az 5.13. ábrán látható folyamatmodellt, és szimuláljuk. Ahogy az 5.14. ábra idődiagramja is mutatja, a szimuláció alatt sorban a következő események következtek be:

1. A *Build* folyamat elkezdődik.
2. A *Compile* tevékenység elkezdődik.
3. A *Compile* tevékenység befejeződik.
4. A *Link* tevékenység elkezdődik.
5. A *Link* tevékenység befejeződik.
6. A *Build* folyamat befejeződik.

Ha egy folyamatmodellt szimulálunk (például a korábban bemutatott manuális módszerrel, token mozgatásával), akkor a folyamat egy konkrét lefutását kapjuk. A folyamat konkrét lefutásait a folyamatmodell *folyamatpéldányainak* nevezzük. A folyamatpéldány olyan események sorozata, amelyek a folyamatot alkotó elemi tevékenységek kezdetét és befejezését jelzik, illetve az egész folyamat kezdetét és befejezését. A folyamatmodell szemantikája voltaképp az, hogy ezen eseményeket azonosítja, és lehetséges sorrendjükre tesz megkötéseket.

Definíció. Egy folyamatmodellhez tartozó *folyamatpéldány* olyan diszkrét eseménysor, amelyet a következő jellegű események alkotják, a folyamatmodell által megszabott időrendben:

- a folyamat kezdete,
- a folyamatot alkotó egyik tevékenység kezdete,
- a folyamatot alkotó egyik tevékenység vége,
- a folyamat vége.

Megjegyzés. Egy folyamatnak több folyamatpéldánya lehet; sőt, több olyan példánya is, amely ugyanolyan eseményeket tartalmaz ugyanolyan sorrendben.

A folyamatmodellek és folyamatpéldányok közti viszony nyilván akkor lesz izgalmas, ha egy folyamatot nem csak egyszer hajtunk végre, hanem többször, egymás után vagy akár részben átlapolódva. Az

egyszerre végrehajtott folyamatpéldányokat úgy lehet szimulálni, hogy minden folyamatpéldányhoz egy-egy tokent rendelünk, amelyik a példány pillanatnyi állapotát jellemzi; ezután az összes tokent felrakjuk a folyamat diagramjára, és külön-külön léptetgetjük őket.

Megjegyzés. A több folyamatpéldány reprezentálására szolgáló tokensokaság nem keverendő össze azzal az esettel, amikor egy *fork csomópont* hatására többszörözzük egyetlen folyamatpéldány tokenjét. A megkülönböztetést az indokolja, hogy a join csomópontnál természetesen továbbra is csak egyazon folyamatpéldányhoz tartozó szétvált tokenek egyesülnek. Így biztosítható, hogy minden egyes folyamatpéldány önmagában értelmes, a folyamatmodellel konform eseménysor. Szimuláció közben célszerű úgy felfogni, hogy minden folyamatpéldánynak különböző színű tokenje van, és a fork, ill. join csomópontok csak egyszínű tokeneket vágnak szét, ill. egyesítenek.

A 6. fejezetben kifejezetten azzal az esettel foglalkozunk majd, amikor ugyanaz a folyamat egyszerre nagyon sok példányban fut. Ilyen esetben a szimuláció során nem is érdemes a tokenekkel egyenként vesződni; csak azt tartjuk számon, hogy hány token tartózkodik éppen a diagram egy adott pontján.

5.3. Folyamatmodellek felhasználása

5.3.1. Programok vezérlési folyama

Alapismeretek

Bizonyára észrevetettük, hogy a legtöbb programozási nyelven (pl. C, C++ stb.) készült eljárások, függvények, metódusok, szkriptek sokban hasonlítanak a folyamatmodellekhez: egymás után elvégzendő lépések szekvenciáját határozzák meg, bizonyos esetekben elágazásokkal, más kódrészletek hívásával. Sőt, egyes programozási nyelvek nyelvi elemként tartalmaznak fork, ill. join jellegű primitíveket is.

Definíció. Egy program által meghatározott folyamatmodellt, amely az elvégzendő lépéseket, ill. a végrehajtásukra előírt sorrendet írja le, a program *vezérlési folyamának* (*control flow*) nevezzük.

Definíció. Azon programokat, amelyek vezérlési folyamot határoznak meg, *imperatív* programnak nevezzük.

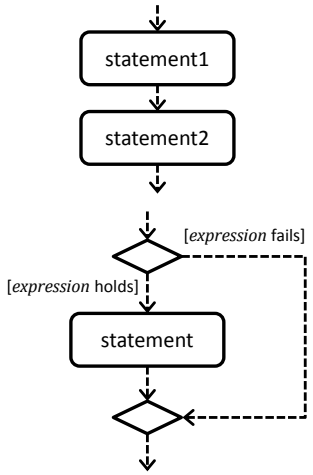
Megjegyzés. Bár a kezdő programozók általában az imperatív programokkal kezdik tanulmányaikat, léteznek ettől eltérő programozási paradigmák is, ahol a program a végrehajtási lépéssort nem határozza meg követlenül. Egyetemünkön a *Deklaratív programozás* című tárgy foglalkozik a funkcionális, ill. a logikai programozás világába való bevezetéssel.

Persze ne higgyük azt, hogy a program csak a vezérlési folyamból áll; számos egyéb részletet is meg kell határoznia (pl. adatszerkezetek, adatáramlás), amelyeket a vezérlési folyam kiemelésekor elabsztrahálunk.

Leképzés

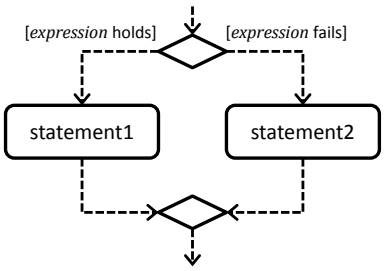
Az alábbiakban egy C-szerű programozási nyelvet alapul véve, számos vezérlési struktúrára megmutatjuk, hogy milyen vezérlési folyamot határoz meg.

```
<statement1>
<statement2>
```



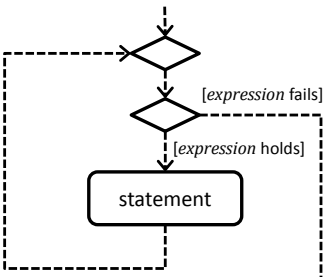

```
if (<expression>)
  <statement>
```

```
if (<expression>)
  <statement1>
else
  <statement2>
```

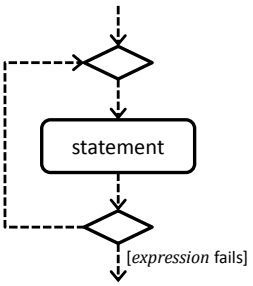


Összetett példa ábrázolása

```
while (<expression>)
  <statement>
```

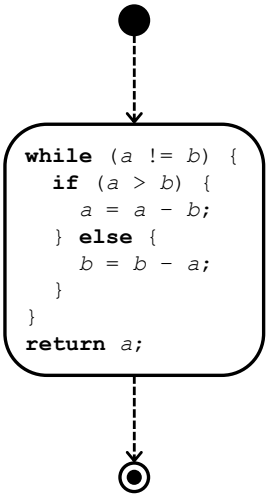



```
do
  <statement>
while (<expression>)
```

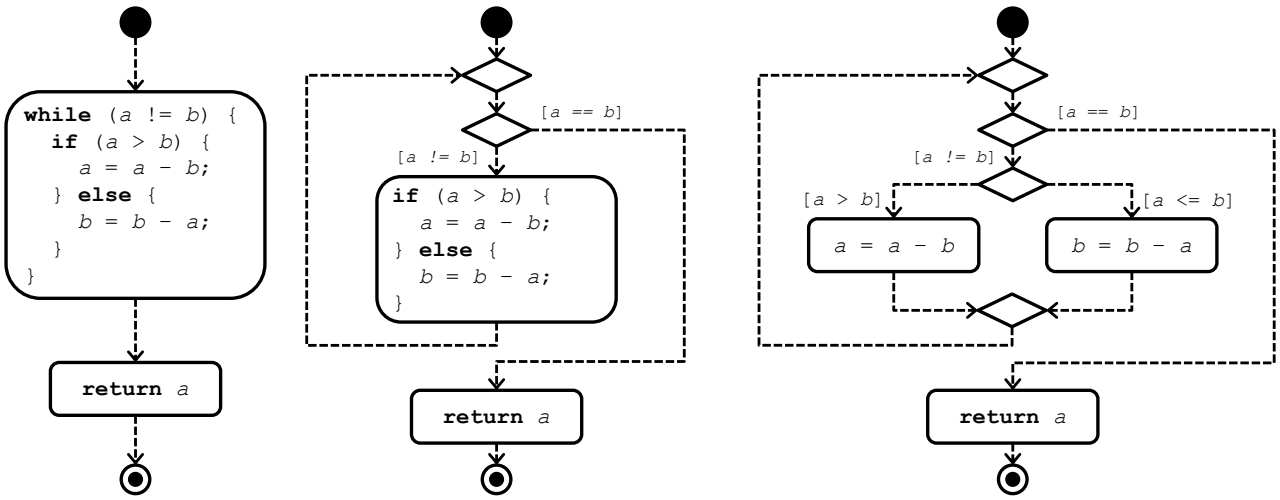


Nézzünk meg egy összetettebb példát!

```
while (a != b) {
  if (a > b) {
    a = a - b;
  } else {
    b = b - a;
  }
}
return a;
```



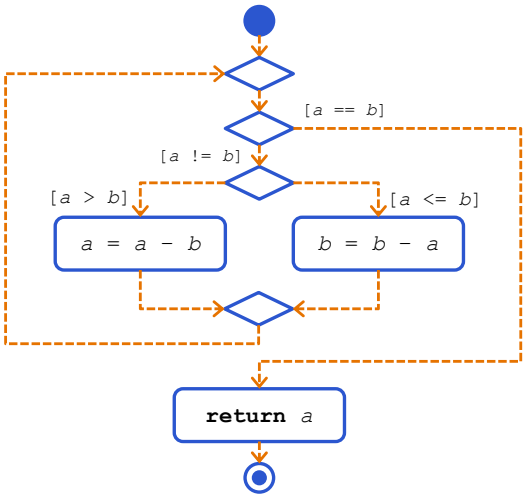
Lépésenként átalakítva:



Vezérlési folyam ciklomatikus komplexitása

A vezérlési folyamok ismeretének egyik létjogosultsága, hogy segítségükkel a programok könnyebben elemezhetőek. Bár a programok elemzése túlmutat jelen tárgy keretein, maradjon itt illusztrációnak egy egyszerű elemzési mód, amely arra próbál választ adni, hogy egy programkód mennyire szövevényes, nehezen átlátható.

Definíció. A vezérlési folyamhoz tartozó *ciklomatikus komplexitás*: $M = E - N + 2$, ahol E a vezérlési élek, N a vezérlési csomópontok és tevékenységek száma.



5.17. ábra. A ciklomatikus komplexitás fogalmai. E: élek (narancssárga), N csomópontok (kék)

Megjegyzés. A ciklomatikus komplexitással bővebben a *Szoftvertechnológia* tárgy foglalkozik. A kiszámítására használt formula pedig ismerős lehet a *Bevezetés a számításelméletbe 2.* tárgyból (v.ö. összefüggő, síkbarajzolható gráfokra vonatkozó Euler-formula).

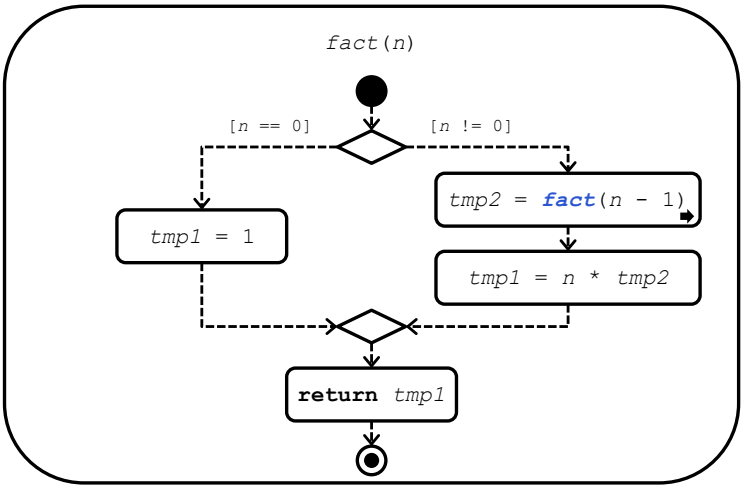
Példa: $n!$ meghatározása

Vizsgáljuk meg az alábbi programkódot, ami egy szám faktoriálisát határozza meg!

```
int fact(int n) {
  return (n == 0) ? 1 : n * fact(n - 1);
}
```

A `?:` operátor tömör kódot eredményez, de esetünkben fontosabb szempont, hogy a kódban bejárható útvonalakat lássuk. Mentsük el továbbá a visszatérési értéket egy átmeneti változóba. Így az alábbi kódot kapjuk:

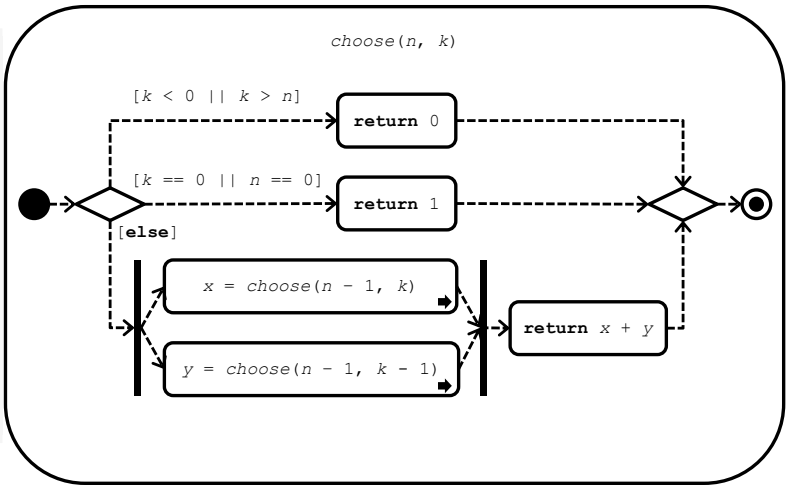
```
int fact(int n) {
  int tmp1;
  if (n == 0) {
    tmp1 = 1;
  } else {
    int tmp2 = fact(n - 1);
    tmp1 = n * tmp2;
  }
  return tmp1;
}
```



Példa: $\binom{n}{k}$ meghatározása

Az alábbi rekurzív függvény meghatározza $\binom{n}{k}$ értékét. A számításhoz felhasználjuk, hogy $\binom{0}{0} = 1$ és $\binom{n}{k} = \binom{n-1}{k} + \binom{n-1}{k-1}$.

```
int choose(int n, int k) {
  if (k < 0 || k > n) {
    return 0;
  } else if (k == 0 && n == 0) {
    return 1;
  } else {
    int x = spawn choose(n - 1, k);
    int y = spawn choose(n - 1, k - 1);
    sync;
    return x + y;
  }
}
```



5.3.2. Jólstrukturált folyamatok

Eddig semmilyen megszorítást nem tettünk arra, hogy a vezérlési élek mely csomópontokat melyekkel köthetik össze; így pedig sok értelmetlen vagy helytelenül működő folyamatmodell építhető. Ráadásul az egyébként értelmes folyamatmodellek is gyakran átláthatatlanok, nehezen érthetőek lehetnek. Az átláthatóság egyik fő akadálya, ha egy bonyolult részfolyamatba több ponton is be lehet lépni, és több ponton is ki lehet lépni belőle.

Ezért szokás a folyamatmodelleknek az alábbiakban definiált „biztonságos” részhalmazát elkülöníteni, amely megengedett blokkokból építkezik csak.

Definíció. A következő (egy belépési és egy kilépési pontú) részfolyamatokat tekintjük *jólstrukturált* blokknak (más néven jólstrukturált részfolyamatnak):

- egyetlen elemi tevékenység önmagában;
- egyetlen folyamathivatkozás/hívás (máshol definiált folyamatmodell újrafelhasználása);
- üres vezérlési élszakasz;
- „soros kapcsolás”: a P_1, P_2, ..., P_n jólstrukturált blokkok szekvenciája (egyszerű vezérlési éllel egymás után kötve őket);
- „*fork-join* kapcsolás”: a P_1, P_2, ..., P_n jólstrukturált blokkok egy n ágú *fork* és egy n ágú *join* közé zárva;
- „*decision-merge* kapcsolás”: a P_1, P_2, ..., P_n jólstrukturált blokkok egy n ágú *decision* és egy n ágú *merge* közé zárva;
- „Ciklus”: egy kétágú *merge* csomóponttal kezdődik, amely után egy jólstrukturált P_1 blokk következik, majd egy kétágú *decision*, melynek egyik ága a részfolyamat vége, a másik a P_2 jólstrukturált blokkokon keresztül az előbbi *merge*-be tér vissza.

Egy teljes folyamatmodell jólstrukturált, ha egyetlen belépési pontja (*Flow begin*) és kilépési pontja (*Flow end*) egy jólstrukturált blokkot zár közre.

Amint az a definícióból látszik, egy teljes folyamat lehet úgy jólstrukturált, hogy pl. egy egyszerű elemi tevékenység, egy fork-join blokk és egy ciklus szekvenciájából áll, de csak ha a fork-join blokk és a ciklus maga is kisebb jólstrukturált blokkokból van felépítve.

A jólstrukturáltság célja, hogy áttekinthetőbbé tegye a folyamatot, és hogy bizonyos hibalehetőségeket (pl. holtpont) eleve kizárjon. A folyamatmodellekre jellemző hibamintákról később lesz szó; ezek egy része jólstrukturált modellnél elő sem fordulhat. Ha a folyamat nem jólstrukturált, akkor külön ellenőrzési eljárásokkal kell kizárni a hibalehetőségeket. Mindemellett megjegyzendő, hogy nem csak a jólstrukturált folyamatmodellek lehetnek értelmesek vagy hasznosak.

Léteznek olyan folyamatmodellezési nyelvek is, amelyek nem engedik tetszőleges gráfként megalkotni a vezérlési folyamot, hanem kizárólag jólstrukturált blokkokat lehet létrehozni és más jólstrukturált blokkokból felépíteni. Ilyen nyelv pl. a BPEL (alap jelkészlete), vagy a programozásoktatásból ismerős Nassi-Shneiderman-féle *struktogram*. Ezeken a nyelveken a megkötések miatt bizonyos folyamatokat csak körülményesebben lehet megfogalmazni; cserébe az adott nyelven készített összes folyamatról külön ellenőrzés nélkül tudható, hogy rendelkezik a jólstrukturáltság fent tárgyalt összes előnyével.

A tanultak szerint az imperatív programnyelvek vezérlésifolyam-gráfja is folyamatmodell; mit jelent a programokra nézve a jólstrukturáltság? A program vezérlési folyamja akkor lesz jólstrukturált, ha egy belépési és egy kilépési pontja van, és egyszerű utasításokból szekvenciális egymás után fűzéssel áll össze, ill. elágazásokat vagy ciklusokat tartalmaz (ill. megfelelő programozási nyelv/platform esetén akár párhuzamosan végrehajtott blokkokat). A `goto`, `break`, idő előtti `return` és hasonló jellegű ugrások azonban túlmutatnak a jólstrukturáltságon, más szóval kivezetnek a jólstrukturált modellek közül. Ennek megfelelően könnyen átláthatatlanná tehetik a forráskódot, így mértékletes alkalmazásukat szokták javasolni, lehetőség szerint kerülendőek. Megjegyzendő, hogy ritkán, de olyan eset is van, ahol épp pl. a `return` használata tesz egy mély vezérlési strukturát egyszerűbbé.

5.4. Kitekintés*

5.4.1. Technológiák

Adatelemzés

Az Airbnb cég Airflow eszköze[1] adatelemzési folyamatok definiálására és végrehajtására alkalmas.

[1] `https://github.com/airbnb/airflow`

Több olyan rendszer is létezik, amelyek tudományos folyamatok futtatását teszik lehetővé (*scientific workflow engine*), beleértve az adatok összegyűjtését, elemzését és vizualizálását. Ilyen rendszerek például a Kepler[2] és a Taverna[3].

Üzleti folyamatmodellek

Az üzleti folyamatok modellezésére használt szoftverek manapság tipikusan a BPMN 2.0 szabványt valósítják meg.[4] Ilyen eszközök pédául a jBPM[5], a Bonita BPM[6], Camunda[7] és az Eclipse Stardust[8].

[2] https://kepler-project.org/
[3] http://taverna.incubator.apache.org/
[4] https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_BPMN_2.0_engines
[5] http://www.jbpm.org/
[6] http://www.bonitasoft.com/
[7] https://camunda.org/
[8] https://www.eclipse.org/stardust/

6. fejezet

Teljesítménymodellezés

6.1. Alapfogalmak

Teljesítménymodellezéskor egy *rendszert* vizsgálunk, amely *felhasználói kérések* kiszolgálásához illetve feldolgozásához különböző (véges) *erőforrásokat* használ. Vizsgálatunk fókusza elsősorban az egyes tranzakciók feldolgozási ideje (*válaszidő*), az egységnyi idő alatt feldolgozott tranzakciók száma (*átbocsátás*), illetve az erőforrások *kihasználtsága*, mindez a rendszer *egyensúlyi állapotában*, tehát *átlagos* értékeket mérve.

Egy rendszert sokszor alrendszerek együtteseként modellezünk (ilyen alrendszernek tekinthetők az erőforrások is), ilyenkor az egyes fogalmak több szinten is megjelenhetnek. A továbbiakban a teljes rendszer felé érkező felhasználói kéréseket *tranzakcióknak* fogjuk hívni (darabszámának mértékegysége tr), az ezek feldolgozása során a rendszer által az alrendszereknek továbbított feladatrészeket pedig *kérés*kéréseknek (darabszámának mértékegysége k). Fontos megjegyezni, hogy valójában ugyanarról a fogalomról van szó, de *más rendszerekre nézve*.[1]

Általában is fontos, hogy mindig pontosan definiáljuk az éppen vizsgált rendszert. A továbbiakban bemutatásra kerülő képletek szempontjából is fontos a *rendszer határa*. Egy rendszeren belül lehet várakozási sor, illetve feldolgozó egység, utóbbi állhat több alrendszerből is.[2] Ha egy rendszerben nincs átlapolódás, akkor minden pillanatban (tehát átlagosan is) legfeljebb egy tranzakció lehet a rendszerben. Ha van várakozási sor, vagy több feldolgozó egység is van, akkor definíció szerint van átlapolódás is.

6.2. Rendszerszintű tulajdonságok és a Little-törvény

Definíció. Fogalmak (lásd 6.1. ábra):

- *Érkezési ráta* (jele: λ): A vizsgált rendszer határához egységnyi idő alatt *érkező* felhasználói kérések átlagos száma.[a] Mértékegysége: db/s.
- *Átbocsátás* (jele: X, mint „throughput"): A vizsgált rendszert egységnyi idő alatt *elhagyó* feldolgozott felhasználói kérések átlagos száma. Mértékegysége: db/s.
- *Válaszidő* (jele: R, mint „**r**ound-trip time"): A felhasználói kérések által a rendszer határain belül töltött átlagos idő. Mértékegysége: s.
- *Rendszerben lévő kérések átlagos száma* (jele: N): Nevezhetnénk az átlapolódás mértékének is. Mértékegység: db.

[a] A felhasználói kérés itt lehet tranzakció vagy kérés is, attól függ, honnan nézzük. Ennek megfelelően a darab, mint mértékegység is specializálandó az adott esetnek megfelelően.

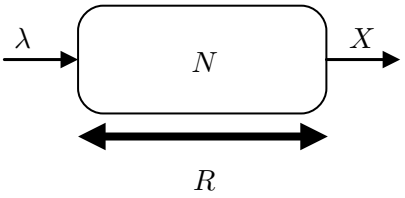
[1] Ezért sem tesz különbséget a fogalmak között a tárgyhoz kiadott diasor.

[2] A rendszer részének tekinthetjük még a hálózati kapcsolatot, és bármi mást, ami késleltetést okozhat, de ettől ebben a segédletben most eltekintünk.

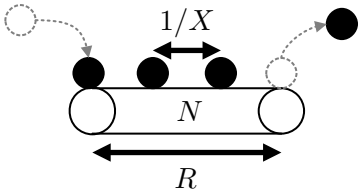
Azt mondjuk, hogy egy rendszer *egyensúlyi állapotban* van, ha $\lambda = X$, vagyis egységnyi idő alatt ugyanannyi új felhasználói kérés érkezik a rendszerbe, mint amennyit ezalatt az idő alatt feldolgozott. Egyensúlyi állapotban igaz a *Little-törvény*:

$$N = X \cdot R$$

Szavakkal, a rendszerben tartózkodó kérések átlagos száma megegyezik az átbocsátás és az átlagos rendszerben töltött idő szorzatával. A rendszert például egy futószalagként (6.2. ábra) elképzelve ez azt jelenti, hogy ha a szalagon R ideig tart végighaladni, de $1/X = 1/\lambda$ időnként ráteszünk egy-egy újabb elemet, akkor R idő múlva az első elem levételének pillanatában $R/(1/X) = R \cdot X$ elem lesz a szalagon, vagyis a rendszer határain belül.



6.1. ábra. Rendszerszintű tulajdonságok.



6.2. ábra. A Little-törvény szemléltetése.

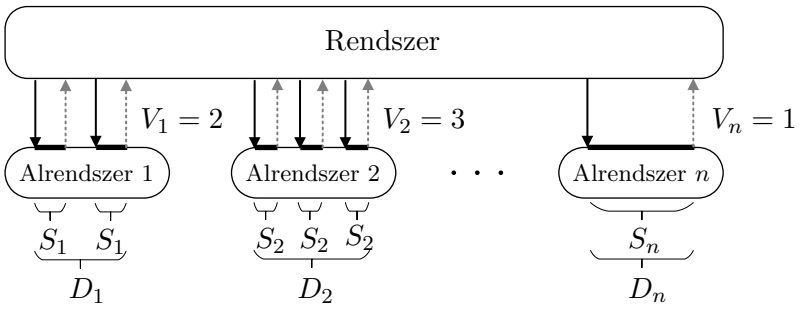
6.3. Erőforrások tulajdonságai

A rendszer tulajdonságai elsősorban a belső szerkezetétől, az alrendszerektől és főképp az erőforrásoktól függ. A rendszerszintű teljesítményjellemzőket ezek tulajdonságaiból kell levezetni. A továbbiakban nullás index jelöli a rendszerszintű tulajdonságokat, míg az i. alrendszer (erőforrás) tulajdonságait i-vel indexeljük.

6.3.1. Rendszerek és alrendszereik kapcsolata

Az egyes alrendszerek és erőforrások teljesítményjellemzőit a következő mértéket felhasználva tudjuk átváltani a rendszer jellemzőire, illetve fordítva:

Definíció. *Látogatások átlagos száma* (jele: V_i, mint "visits"): Megadja, hogy egy tranzakció átlagosan hány kérést generál az i. alrendszer (erőforrás) felé. Mértékegysége: k/tr (kérés/tranzakció).



6.3. ábra. Rendszer és alrendszereinek kapcsolata.

6.3.2. Felhasználói kérések szolgáltatásigénye

Egy tranzakció „terhelését" a rendszerre nézve a *szolgáltatásigény* fogalmával ragadjuk meg. A szolgáltatásigény az az átlagos időtartam, amíg a tranzakció feldolgozása közben a rendszer egy adott

erőforrást használ (az egyes kérések során összesen), tehát minden erőforráshoz külön érték tartozik. Az alábbiakban feltételezzük, hogy az alrendszerek erőforrások.[3]

Definíció. *Szolgáltatásigény* (jele: D_i, mint „service **d**emand"): Megadja, hogy egy *tranzakció* átlagosan mennyi ideig használja az adott erőforrást (alrendszert). Mértékegysége: $\frac{\text{s}}{\text{tr}}$.

Definíció. *Erőforrásigény* (jele: S_i, mint „re**s**ource demand"): Megadja, hogy egy *kérés* átlagosan mennyi ideig használja az adott erőforrást (alrendszert). Mértékegysége: $\frac{\text{s}}{\text{k}}$.

Látható, hogy a két fogalom gyakorlatilag ugyanazt takarja, de az egyik a rendszer szintjén, a másik pedig az erőforrás (alrendszer) szintjén.[4] A két mennyiség közötti kapcsolatot a látogatások átlagos számának (V_i) segítségével a következő képlet adja meg:

$$D_i = V_i \cdot S_i$$

Látható, hogy itt sem történik semmi meglepő – ha egy kérés átlagosan S_i ideig foglalja az erőforrást, egy tranzakció pedig átlagosan V_i kérést generál, akkor a tranzakció átlagosan D_i ideig fogja használni az erőforrást, tehát az erőforrásra vonatkozó szolgáltatásigénye D_i. Ez az összefüggés látható a 6.3. ábrán is.

6.3.3. Erőforrások kihasználtásga

Véges készletű erőforrások esetén a teljesítmény szempontjából fontos tulajdonság az erőforrások átlagos *kihasználtsága* (jele: U, mint **u**tilization), ugyanis ez mutatja meg, hogy a globális teljesítménykorlátoktól nagyjából milyen távol működik a rendszer.

Vegyük észre, hogy az erőforrás, mint alrendszer önmagában is egy rendszert alkot, ezért a **??**. szakaszban leírtak itt is alkalmazhatók. A felhasználói kérés ekkor a tranzakció által generált kérés, a kérés által a rendszerben töltött átlagos idő (R) pedig az erőforrásigénynek (S_i) felel meg. Az erőforrás, mint alrendszer átbocsátását az ún. *Forced Flow törvény* segítségével számíthatjuk ki a teljes rendszer átbocsátásából:[5]

$$X_i = V_i \cdot X_0$$

Ezzel felírva a Little-törvényt, az alábbi képletet kapjuk:

$$N_i = S_i \cdot X_i$$

Az N érték tehát szokás szerint megadja, hogy átlagosan hány kérés tartózkodik a rendszerben, ezesetben az erőforráson belül. Az egyes erőforrásokból több példány is rendelkezésre állhat, ezeken belül feltételezzük, hogy nincs átlapolódás. Az erőforrás tehát egyszerre legfeljebb n_i kérést képes kiszolgálni, ahol n_i az i. erőforrásból elérhető példányok száma. Ha az i. erőforrásban, mint rendszerben átlagosan N_i kérés tartózkodik, és ez kevesebb, mint a maximális n_i, akkor a rendszer nem használja ki az erőforrást. Gyakorlatilag ezzel definiáltuk is a kihasználtság fogalmát, amire a *kihasználtság törvénye* ad képletet:

$$U_i = \frac{N_i}{n_i} = \frac{S_i \cdot X_i}{n_i}$$

[3] Ez bizonyos szempontból csak formaság, annyi a jelentősége, hogy erőforrás szint alatt nem foglalkozunk a további alrendszerekkel, itt húzzuk meg vizsgálódásaink határát.

[4] Az elnevezés is csak azért különbözik, hogy külön tudjunk hivatkozni a két értékre, az "Erőforrásigény" név pedig kihasználja, hogy most csak az erőforrásokat tekintjük alrendszernek.

[5] Figyelem! A mértékegység az alrendszerek átbocsátása esetén k/s, a teljes rendszer esetén pedig tr/s!

Az is látható, hogy két darabszámot osztunk el egymással, tehát az eredmény dimenzió nélküli, százalékban kifejezhető arányszám. Az $n = 1$ speciális esetben N értéke közvetlenül megadja a kihasználtság értékét:

$$U_i = S_i \cdot X_i$$

Ilyenkor a kihasználtság úgy is értelmezhető, mint az egységnyi időnek azon hányada, amelyben átlagosan az erőforrás munkát végez. Ez az értelmezés bizonyos szempontból analóg a fizikából ismert hatásfok fogalmával, az erőforrás a vizsgált 1s időben X_i alkalommal S_i ideig hasznos munkát végzett, ez összesen $S_i \cdot X_i$ idő hasznos munkát jelent, ami tehát $\frac{S_i \cdot X_i}{1} = U$ hatásfokot, itt *kihasználtságot* jelent. Több erőforrás példány esetén is hasonló a helyzet, de ilyenkor az egységnyi időt mindegyik példányhoz fel kell számolni.

6.3.4. Az átbocsátóképesség és a szűk keresztmetszet

Az imént láttuk, hogy az erőforráskészlet felső határt szab az elvégezhető munka mennyiségének, ezáltal az egységnyi idő alatt kiszolgálható kéréseknek, vagyis az átbocsátásnak. Ezt a felső határt hívjuk *átbocsátóképességnek*.

Meghatározásához az egyes erőforrásokból kell kiindulnunk. Feltételezzük, hogy az erőforrásokat maximálisan kihasználjuk, vagyis $U_i^{max} = 1$. A kihasználtság képletéből az átlagos erőforrásigény (S_i) ismeretében kiszámolhatjuk az adott erőforrás átbocsátóképességét:

$$X_i^{max} = n_i \cdot \frac{U_i^{max}}{S_i} = n_i \cdot \frac{1}{S_i}$$

Az $n_i = 1$ esetben ismét egyszerűbben:

$$X_i^{max} = \frac{U_i^{max}}{S_i} = \frac{1}{S_i}$$

Következő lépésként ki kellene számolnunk a teljes rendszer átbocsátását, de míg a teljes rendszerből az erőforrásra következtetni a többi erőforrástól függetlenül is tudtunk a **??** szakaszban, visszafelé ez most nem lesz igaz. Az egyes erőforrásokat a teljes rendszer ugyanis különböző mértékben használja, így csak az egyikük (esetleg néhányuk, nagyon ritkán mindegyik) korlátozza ténylegesen a rendszer tényleges átbocsátóképességét. Ezt az erőforrást nevezzük *szűk keresztmetszetnek*.

Ki kell tehát számolnunk az egyes erőforrások átbocsátásából a rendszer átbocsátásának elméleti maximumát, majd az így kapott értékek legkisebbikét kell kiválasztanunk, ez lesz a rendszer átbocsátóképessége, az értékhez tartozó erőforrás(ok) pedig a rendszer szűk keresztmetszete(i):

$$X_0^{max} = \min_i \left(\frac{X_i^{max}}{V_i} \right)$$

Az átbocsátóképességgel felírva a Little-törvényt megkaphatjuk N_{max}-ot, vagyis az átlapolódás maximális mértékét a rendszerben. Abban a speciális esetben, amikor tudjuk, hogy a rendszer (erőforrás) mindig rendelkezésre áll, és nincs benne átlapolódás, vagyis $N_{max} = 1$ tr, az átbocsátóképesség (de nem az átbocsátás!) és a rendszer átlagos válaszideje között fordított arányosság áll fenn:[6]

$$X_0^{max} = \frac{1 \text{ tr}}{R}$$

[6] Lényegében ugyanez az összefüggés jelenik meg az erőforrás átbocsátóképességének meghatározásakor $R = S_i \cdot 1k$ választással.

6.3.5. A szolgáltatásigény törvénye

Az eddigiekből levezethető még egy összefüggés, ami sokszor jól használható. A *szolgáltatásigény törvénye* egy adott erőforrásra vonatkozó szolgáltatásigény meghatározását teszi lehetővé az erőforrás kihasználtsága és a rendszer átbocsátóképessége segítségével, egyetlen erőforráspéldány ($n_i = 1$) esetén:

$$D_i = \frac{U_i}{X_0}$$

A levezetés a forced flow törvény és a kihasználtság törvényének $n_i = 1$ feltétel melletti egyszerűbb alakja szerint:

$$\underbrace{D_i = V_i \cdot S_i}_{\text{Szolgáltatásigény def.}} = \underbrace{\frac{X_i}{X_0}}_{\text{Forced flow tv.}} \cdot \underbrace{\frac{U_i}{X_i}}_{\text{Kihasználtság tv.}} = \frac{U_i}{X_0}$$

A szolgáltatásigény törvénye lényegében a kihasználtság törvényének olyan átalakítása, hogy az erőforrás-szintű tulajdonságok helyett rendszerszintű tulajdonságokkal számoljon. Az alábbi levezetés ezt az elvet mutatja be, itt lényegében a V_i váltószám segítségével mindkét oldalon áttérünk az erőforrás szintjéről a rendszer szintjére:

$$U_i = \frac{S_i \cdot X_i}{n_i}$$

$$S_i = n_i \cdot \frac{U_i}{X_i}$$

$$\underbrace{V_i \cdot S_i}_{\mathrm{D_i}} = n_i \cdot \underbrace{V_i \cdot \frac{1}{X_i}}_{\frac{1}{X_0}} \cdot U_i$$

$$D_i = n_i \cdot \frac{U_i}{X_0}$$

Itt is jól látható, hogy a törvény eredeti formája az $n_i = 1$ esetre érvényes, minden más esetben megjelenik egy n_i-s szorzó is. A kihasználtság törvényénél látott szemléltető magyarázat ismét alkalmazható: Ha egy tranzakció D_i ideig használja az adott erőforrást, és egy egységnyi idő alatt X_0 ilyen tranzakció történik, akkor az erőforrás az egységnyi idő $\frac{D_i \cdot X_0}{1}$ részéig volt foglalt.

6.4. Átlagos mértékek számítása mérési eredményekből

A fenti értékeket jellemzően mérések vagy szimulációk eredményeképp kapjuk. Ilyen mérések során a rendszert állandósult egyensúlyi állapotban vizsgáljuk, amikor tehát $\lambda = X_0$. Ilyenkor az alábbi fogalmak jelennek meg, ezek segítségével tudjuk kiszámolni a rendszer és az erőforrások tulajdonságait:

Definíció.

- *Mérési idő* (jele: T, mint „**t**ime"). Mértékegysége: s.
- *Tranzakciók száma* (jele: C_0, mint „**c**ount"): A mérési idő alatt elvégzett tranzakciók száma. C_i-vel jelölhetjük az egyes alrendszerekre vonatkozó értékeket, ha ez szükséges. Mértékegysége: tr (vagy alrendszerek esetén k).
- *Foglaltsági idő* (jele: B_i, mint „**b**usy time"): Az egyes erőforrások foglaltási ideje a mért időtartamon belül. Mértékegysége: s.

Ezekből a fogalmakból könnyedén kiszámítható például egy egypéldányos, átlapolódás nélküli erőforrás ($n_i = 1$) átlagos kihasználtsága a mérés ideje alatt, csupán a foglaltásgi idő és a mért idő arányát kell kiszámítanunk:

$$U_i = \frac{B_i}{T}$$

A mérés ideje alatt az átlagos átbocsátás (és a rendszer egyensúlya miatt az érkezési ráta is) megkapható a mérési időből és az elvégzett tranzakciók számából:[7]

$$X_0 = \frac{C_0}{T}$$

A tranzakciók átlagos szolgáltatásigénye is megkapható az egyes erőforrásokhoz, ha a foglaltásági időket leosztjuk a tranzakciók számával:

$$D_i = \frac{B_i}{C_0}$$

Érdekességképp megjegyezzük, hogy a szolgáltatásigény törvénye ($n_i = 1$ esetre) akár ebből a három összefüggésből is levezethető:

$$U_i = \frac{B_i}{T} = \frac{B_i}{\frac{C_0}{X_0}} = \frac{B_i}{C_0} \cdot X_0 = D_i \cdot X_0$$

[7] Értelemszerűen az egyes alrendszerek vizsgálata esetén az i index használandó a 0 helyett.

7. fejezet

Modellek ellenőrzése

A korábbiakban láthattuk, hogy modelleket számos célból készíthetünk. Függetlenül attól, hogy a modellek felhasználási célja a dokumentáció, a kommunikáció segítése, az analízis vagy a megvalósítás származtatása, a modellek minősége fontos kérdés. Egy hibás modell könnyen vezethet hibás megvalósításhoz, amely pedig a felhasználási területtől függően katasztrofális következményekkel is járhat.

7.1. Követelmények modellekkel szemben

Fontos megjegyezni, hogy a modellek „helyessége” önmagában nem egy értelmes, vizsgálható kérdés. Ennek vizsgálatához fontos tudni, hogy mi a modell célja, kontextusa, mik a követelmények vele szemben.

Példa. Gondoljunk a BKK alábbi egyszerűsített, sematikus metróhálózati térképére!

7.1. ábra. Budapest metróhálózati térképe [18]

Ez tekinthető a metróhálózat egy (gráfalapú) modelljének. Ha a követelményünk a metróhálózat sematikus reprezentálása, ami alatt például az állomások megfelelő sorrendjét, illetve a helyes átszállási kapcsolatokat értjük, akkor ez a térkép (gráf) helyes. Hibás akkor lenne, ha például a Nyugati pályaudvar az M4-es metró egyik állomásaként lenne feltüntetve. Ha viszont a követelmény az, hogy a térképről leolvashatók legyenek a metróállomások közti távolságok, ez a térkép hibás, hiszen a térkép alapján az Újbuda-központ és Móricz Zsigmond körtér állomások és a Móricz Zsigmond körtér és Szent Gellért tér állomások közti távolság azonos, míg a valóságban az egyik távolság a másiknak közel a duplája.

Látható, hogy önmagában nincs értelme egy modell helyességéről beszélni, csak arról beszélhetünk, hogy bizonyos meghatározott követelményeknek megfelel-e vagy sem. Ebben a fejezetben áttekintjük, milyen követelményeket támaszthatunk a modellekkel szemben, hogyan csoportosíthatjuk és hogyan ellenőrizhetjük ezen követelményeket.

Követelmények funkcionalitás szerint. Az egyik leggyakoribb felosztás a követelményeket aszerint különbözteti meg, hogy a rendszer elsődleges funkcióját írják le vagy sem.

Definíció. *Funkcionális követelményeknek* nevezzük azokat a követelményeket, amelyek egy rendszer(összetevő) által ellátandó funkciót definiálnak [16].

Definíció. *Nemfunkcionális követelményeknek* (vagy extrafunkcionális követelményeknek) nevezzük az ezeken kívül eső követelményeket, amelyek a rendszer minőségére vonatkoznak, például megbízhatóságra, teljesítményre vonatkozó kritériumok [16].

Megjegyzés. Tehát a *funkcionális követelmények* meghatározzák, *mit* fog a rendszer csinálni. A *nemfunkcionális követelmények* arról szólnak, *hogyan* kell a rendszernek ezeket a funkciókat ellátnia.

Biztonsági és élőségi követelmények. A követelmények egy másik klasszikus kategorizálása alapján biztonsági és élőségi követelményeket különböztetünk meg [19].

Definíció. A *biztonsági követelmények* a megengedett viselkedést definiálják: megadják, hogy milyen viselkedés engedélyezett és mely viselkedések tiltottak. Ezek univerzális követelmények, melyeknek a rendszerre minden időpillanatban teljesülniük kell.

Definíció. Az *élőségi követelmények* az elvárt viselkedést definiálják. Ezek egzisztenciális követelmények, amelyek szerint a rendszer megfelelő körülmények közt előbb-utóbb teljesíteni képes bizonyos elvárásokat.

Bizonyos követelmények biztonsági és élőségi követelmények keverékei, így – különösen komplex esetekben – nem feltétlen lehetséges valamelyik kategóriába sorolni a követelményt.

Megjegyzés. Biztonsági követelmény például az, hogy egy jelzőlámpán egyszerre sosem világíthat a piros és a zöld fény. Élőségi követelmény, hogy a lámpa (előbb-utóbb) képes legyen zöldre váltani.

Gyakori általános követelmények. Itt kitérünk néhány olyan gyakori általános követelményre, amelyek általában a modell által leírt folyamattól, vagy a megvalósított rendszer érdemi funkcionalitásától lényegében függetlenek. Az egyik ilyen általános követelmény a holtpontmentesség.

Definíció. *Holtpontnak* (deadlocknak) nevezzük azt az állapotot egy rendszerben, amelyben a végrehajtás megáll, a rendszer többé nem képes állapotot váltani, és nem mutat semmilyen viselkedést.

A holtpont egy gyakran előforduló oka, ha a rendszerben két vagy több folyamat egymásra várakozik. Ez egy olyan állapot, amelyből külső (nem modellezett) beavatkozás nélkül nem lehet kilépni. Emiatt párhuzamos rendszereknél egy gyakori követelmény a *holtpontmentesség*, a holtpontok lehetőségének hiánya. Sajnos ez egy olyan probléma, amely kifinomult eszközök nélkül igen nehezen vizsgálható, gyakran a holtpont létrejöttéhez a körülmények ritka, különleges együttállása szükséges.

Megjegyzés. Természetesen előfordulhat olyan eset is, hogy a holtpont nem tiltott, hanem megfelelő körülmények közt egyenesen elvárt. Emlékezzünk arra, hogy egy folyamatpéldány a dolga végeztével semmilyen további viselkedést nem mutat. Ilyenkor inkább az lehet követelmény, hogy a folyamat csak úgy kerülhessen holtpontba, ha már befejeződött.

Hasonló fogalom a livelock. *Livelock* esetén az érdemi végrehajtás ugyanúgy megáll, mint holtpont esetén. Ennek viszont nem az az oka, hogy a rendszer nem képes állapotot váltani, hanem az, hogy a livelockban résztvevő komponensek egy végtelen ciklusba ragadnak, amelyben nem végeznek hasznos tevékenységet.

Példa. A klasszikus példa livelockra a való életből az, amikor két ember szembetalálkozik, és mindketten udvariasan kitérnének egymás elől, de azt mindig megegyező irányba teszik. Ilyenkor az emberek tudnak mozogni („képesek állapotot váltani”), de nem haladnak előre („nem végeznek hasznos tevékenységet”). Holtpontról akkor beszélnénk, ha kölcsönösen nem tudnának megmozdulni a másik személy miatt. Tehát a holtpont esetén a problémát az „örök várakozás”, livelock esetén pedig egy végtelen ciklus okozza.

Állapotgépek esetén gyakori általános követelmények például a *determinizmus* és a *teljesen specifikált* működés. Ezekről bővebben a 4. szakaszban szólunk. A determinizmus és teljesen specifikált működés hasonlóan értelmezhető más viselkedésmodellezési formalizmusok, pl. folyamatmodellek esetén is. Ha a folyamatmodell minden döntési pontjára („decision” csomópont) olyan őrfeltételeket írunk, hogy mindig legfeljebb ág legyen engedélyezett, akkor determinisztikus a folyamat; teljesen specifikáltnak pedig akkor nevezzük, ha mindig legalább egy ág engedélyezett.

Vizsgálatok fajtái. Ha rendelkezésre állnak a követelmények, már lehetséges a modellek helyességének vizsgálata. Azonban a „helyességvizsgálat” nem egy precíz fogalom.

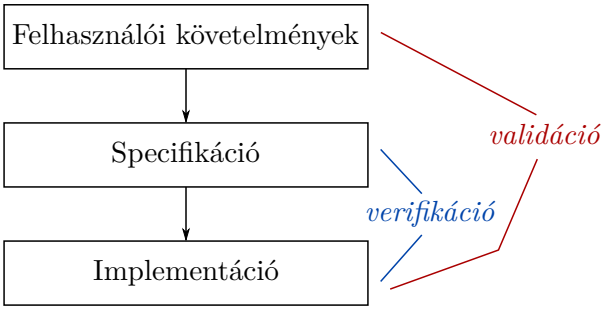
Példa. Képzeljük el, hogy egy kereszteződést szerelünk fel jelzőlámpákkal. A leszállított rendszert ellenőriztük, megfelel a specifikációnak: a fények megfelelő sorrendben, megfelelő időzítéssel követik egymást és mindig csak az engedélyezett irányok kapnak egyidejűleg szabad jelzést. Az átadáskor a megrendelő megkérdezi: „– És hol lehet átkapcsolni villogó sárgára?” Mivel ez nem volt a specifikáció része, ilyen funkció nem is került a jelzőlámpák vezérlésébe. Mi meg vagyunk győződve arról, hogy a rendszer helyes, mivel teljesíti a specifikáció minden elemét. Ugyanakkor a megrendelő biztos abban, hogy a rendszer hibás, hiszen nem megfelelő a számára.

Annak érdekében, hogy a helyességvizsgálatról pontosabban beszéljünk, két új fogalmat vezetünk be.

Definíció. *Verifikációnak* nevezzük, amikor azt vizsgáljuk, hogy az implementáció (az elkészített modell vagy rendszer) megfelel-e a specifikációnak. Ekkor a kérdés az, hogy helyesen fejlesztjük-e a rendszert, megfelel-e az az előírt kívánalmaknak.

Definíció. *Validációnak* nevezzük azt a folyamatot, amelyben a rendszert a felhasználói elvárásokhoz hasonlítjuk, azaz azt vizsgáljuk, hogy a megfelelő rendszert fejlesztjük-e.

Mint ahogyan azt a korábbi példán láthattuk, a sikeres verifikáció nem feltétlen jár együtt sikeres validációval. A verifikáció és a validáció közti különbséget illusztrálja a 7.2. ábra.



7.2. ábra. A verifikáció és a validáció közti különbség illusztrációja

A modellek vagy rendszerek ellenőrzésére többféle módszer is rendelkezésre áll, ezeket mutatjuk be a fejezet hátralévő részében. Először a fontosabb statikus ellenőrzési technikákat ismertetjük (7.2. szakasz), amelyekhez a rendszert nem szükséges futtatni. Utána a tesztelést mutatjuk be (7.3. szakasz), amely egy dinamikus, a rendszert futás közben, de még fejlesztési időben megfigyelő módszer. Ha a rendszert normál üzemű futás közben is meg szeretnénk figyelni, futásidejű verifikációról beszélünk, amelyről a 7.4. szakaszban szólunk. A fejezetet a formális ellenőrzési módszerekre történő kitekintéssel zárjuk (7.5. szakasz).

7.2. Statikus ellenőrzés

Definíció. *Statikus ellenőrzés* során a vizsgált rendszert vagy modellt annak végrehajtása, szimulációja nélkül elemezzük.

Bizonyos hibák „ránézésre látszanak”, könnyen felismerhetők, ezekre célszerű statikus ellenőrzési módszereket alkalmazni. Ilyenkor a statikus vizsgálat alapvető előnye, hogy gyorsan és könnyen szolgáltat eredményt. Ráadásul a statikus ellenőrzési módszerek gyakran a hiba helyét is pontosan behatárolják, míg például dinamikus módszereknél gyakran a hiba felismerése és annak okának megtalálása két külön feladat. Statikus ellenőrzési technikákat akkor is használunk, amikor szintaktikai hibákat keresünk, ilyenkor a rendszer tipikusan nem is futtatható.

Az alábbiakban részletesen foglalkozunk a statikus ellenőrzés technikáival és használatával. Először a szintaktikai hibák vizsgálatát tekintjük át (7.2.1. szakasz), majd a szemantikai hibák vizsgálatára koncentrálunk (7.2.2. szakasz).

7.2.1. Szintaktikai hibák vizsgálata

Szintaktikai hibáknak nevezzük azokat a hibákat, amelyek következtében egy modell nem felel meg a metamodelljének, vagy egy program nem felel meg a használt programozási nyelv formai megkötéseinek. Ilyen lehet például egy állapotokhoz nem kötött állapotátmenet egy állapotgépben vagy egy hiányzó zárójel egy programban.

Grafikus modellek esetén tipikus, hogy a szerkesztő megakadályozza a szintaktikai hibák elkövetését és betartatja a strukturális helyességet, de szöveges leírások esetén ezek elkerülhetetlenek a fejlesztés folyamán. A modern fejlesztőeszközök általában már a beírás során jelzik a szintaktikai hibákat a fejlesztő számára, így azok azonnal javíthatók. Ilyenkor az eszköz beépített szintaktikai statikus ellenőrzőjét láthatjuk működni. Más esetekben (például egyszerű szöveges szerkesztő használata esetén) az esetleges szintaktikai hibákra csak fordítás vagy végrehajtás során derül fény.

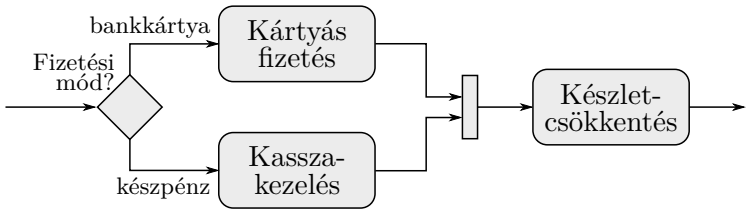
Általánosan igaz a szintaktikai hibákra, hogy ezek nagy biztonsággal kimutathatók (legkésőbb futtatás vagy végrehajtás során) és ritka, hogy egy statikus ellenőrző helyes kódot vagy modellt szintaktikailag hibásnak értékelne[1].

7.2.2. Szemantikai hibák vizsgálata

Szemantikai hibákról akkor beszélünk, ha a fejlesztés alatt álló rendszer szintaktikailag helyes, ugyanakkor valószínűsíthetően nem értelmes vagy nem az elvárt módon fog viselkedni. Ha egy C programban leírjuk, hogy `x = y / 0;`, akkor az szintaktikailag helyes (feltéve, hogy az `x` és `y` változók definiáltak és megfelelő kontextusban szerepel a fenti értékadás), ugyanakkor triviálisan nullával való osztáshoz vezet, amely a legritkábban kívánatos egy programban.

Gyakran a szemantikai problémák nem olyan egyértelműek, mint a fenti nullával osztás. Például az `if (x = 1) ...` C kódban gyanús az értékadás, feltehetően a fejlesztő szándéka az `x` változó értékétől függő feltételes elágazás implementálása volt, ugyanakkor ezt biztosan nem tudhatjuk. Az ilyen gyanús kódrészleteket angolul *code smell*nek hívjuk, és a statikus ellenőrző eszközök tipikusan ezekre is felhívják a figyelmet.

Hasonló probléma folyamatmodellek esetén az alábbi ábrán látható (7.3. ábra):



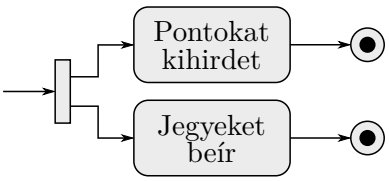
7.3. ábra. Folyamatmodell decision és join elemmel

A fenti folyamatmodell szintaktikailag helyes, azonban ha közelebbről megvizsgáljuk látszik, hogy valószínűleg szemantikailag helytelen. A decision elem miatt vagy a Kártyás fizetés, vagy a Kasszakezelés tevékenység lesz aktív. Mivel a join mindkét bemeneten tokent fog várni, sosem léphet tovább (tehát holtpontra jut), és így a Készletcsökkentés tevékenység sosem fut le.

Hasonló a helyzet az alábbi folyamatmodellnél (7.4. ábra).

A fenti folyamatmodell szintén helyes szintaktikailag, viszont amint a Pontokat kihirdet vagy a Jegyeket beír tevékenység befejeződik, a terminális csomópont leállítja a *teljes* folyamatot, így a másik tevékenység nem fog tudni lefutni.

[1] Általánosságban hamis pozitívnak (false positive) találatnak nevezzük azt, ha egy ellenőrző eszköz olyan dolgot jelez hibásnak, amely a valóságban helyes. Ennek fordítottját, azaz amikor az ellenőrző eszköz helyesnek tart valamit, ami valójában hibás, hamis negatív (false negative) találatnak hívjuk.(*)



7.4. ábra. Folyamatmodell két terminális csomóponttal

Védekezés szemantikai hibák ellen. Két egyszerűbb módszert ismertetünk itt a fenti hibák kivédése érdekében. Az egyik módszerrel a hibák felismerhetők, a másik módszerrel pedig megelőzhetők.

- Ha azonosítottuk a fenti szituációk közül a leggyakrabban előfordulókat, *hibamintákat* fogalmazhatunk meg rájuk. Ez után a statikus ellenőrző eszköz ezeket a hibamintákat keresi a modellben vagy a forráskódban. Például ha egy decision elem egy join elemmel áll párban egy folyamatmodell vagy a kódban egy `if (<változó> = <érték>)` minta található, erre felhívhatja a felhasználó figyelmét, aki ezután javíthatja a modellt vagy figyelmen kívül hagyhatja a jelzést.
- Lehetőségünk van ezeket a hibákat megelőzni, ha a modellezési vagy programozási nyelv szintaktikájánál önként erősebb megkötéseket alkalmazunk. Ilyen megkötések a kódolási szabályok[2] (például a mutatók használatának tiltása C-ben) vagy a jólstrukturált folyamatmodellek. *Jólstrukturált folyamatmodellek* esetén kikötjük, hogy a folyamatmodell kizárólag adott mintákból állítható elő: üres folyamat, elemi tevékenység, szekvencia, ciklus, döntés, párhuzamosság. Ezzel a szintaxist úgy kötjük meg, hogy a tipikus szemantikai hibák ne állhassanak elő. A jólstrukturált folyamatmodellekről bővebben az 5.3.2. szakaszban szólunk.

Az, hogy mit tartunk szemantikai hibának függ a használt modellezési vagy programozási nyelvtől, de függhet az alkalmazási területtől vagy a konkrét felhasználástól is. Bizonyos alkalmazási területeken további *tervezési szabályokat* definiálunk, amelyek tovább korlátozhatják a modellezés vagy programozás szabadságát. Például biztonságkritikus programok esetén gyakran tiltott a dinamikus memóriafoglalás. Ilyen esetekben kiegészíthetjük a hibaminták készletét a `malloc` és hasonló konstrukciókkal.

Szimbolikus végrehajtás. Bizonyos esetekben a szemantikai hibák kiszűrése bonyolultabb feladat. Gondoljunk például az `x = y / z;` kódrészletre. Előfordulhat itt nullával osztás? A válasz nem egyértelmű, függ `z` értékétől.

[2] Az egyik leghíresebb kódolási szabálygyűjtemény a C nyelvhez a *MISRA C*. Eredetileg közúti járművek beágyazott rendszereihez fejlesztették, de valójában bármilyen beágyazott rendszer esetén használható. Ilyen felhasználási területen a hibák komoly következményekkel járhatnak, ráadásul javításuk igen nehéz. Ezért olyan megkötéseket alkalmaznak a szoftverek fejlesztésekor, amelyek a kódot átláthatóbbá, egyértelműbbé teszik, amely írása közben nehezebb hibát vétení. Például a száznál több MISRA C szabály egyike megtiltja az `if (x == 0 && ishigh)` kódrészlet használatát, helyette az `if ((x == 0) && ishigh)` formátum használandó. Bár ez a két kódrészlet nyilvánvalóan ekvivalens, ha a logikai műveletek operandusai csak atomi kifejezések (pl. `ishigh`) vagy zárójelezett részkifejezések lehetnek, kisebb egy hibás precedencia feltételezésének valószínűsége [35].(*)

Példa. Tekintsük például az alábbi C kódot:

```
int foo(int z) {
    int y;

    y = z + 10;
    if (y != 10) {
        x = y / z;
    } else {
        x = 2;
    }
    return x;
}
```

Lehet `z` értéke 0? Természetesen, hiszen `z` egy bementi változó. Vizsgáljuk a `z`-vel osztás előtt annak az értékét? Nem, csak `y` változót vizsgáljuk. Lehetséges a nullával osztás a kódban? Nem. Amikor `z` értéke nulla lenne, akkor `y` értéke 10 lesz, és így az osztást tartalmazó utasítás nem fut le.

Amikor végrehajtunk egy programot, mindig a változók bizonyos konkrét értékei mellett tesszük ezt (pl. `foo(5)`). *Szimbolikus végrehajtás* esetén konkrét értékek helyett szimbolikus értékekkel „imitáljuk” a végrehajtást, azaz a változókat matematikai változóként fogjuk fel. Emellett a belső elágazások által támasztott feltételeket is összegyűjtjük, majd ezen információk alapján következtetünk az egyes változók értékeire a program adott pontjain, vagy egyes programrészek elérhetőségére.

Példa. Ha `z`-t egy z matematikai változónak tekintjük, akkor tudjuk, hogy a feltételes elágazás *igaz* ágában az `y = z + 10;` utasítás miatt $y = z + 10$ igaz, valamint az elágazási feltételben szereplő `y != 10` miatt $y \neq 10$ igaz. A kettőből együttesen $z + 10 \neq 10$, azaz $z \neq 0$. Így bizonyíthatjuk, hogy sosem osztunk nullával a fenti példakódban.

Példa. Milyen esetekben ad a fenti példakód 2-t eredményül? Erre szintén választ kaphatunk szimbolikus végrehajtás segítségével, míg konkrét végrehajtással minden egyes lehetséges `z`-re le kellene futtatnunk a függvényt. Ha az elágazás feltétele teljesült, tudjuk, hogy a program végére $x = \frac{z+10}{z} \wedge z \neq 0$, azaz `x` akkor lesz 2, ha `z` értéke 10. Ha az elágazás feltétele nem teljesült, akkor tudjuk, hogy a program végére $x = 2 \wedge z = 0$, azaz ha `z` értéke 0, a kimenet 2 lesz. Tehát `z=0` és `z=10` esetén kaphatunk eredményként 2-t.

7.3. Tesztelés

Definíció. *Tesztelés* alatt olyan tevékenységet értünk, amely során a rendszert (vagy egy futtatható modelljét) bizonyos meghatározott körülmények közt futtatjuk (vagy szimuláljuk), majd az eredményeket összehasonlítjuk az elvárásainkkal[a] [16]. A tesztelés célja a vizsgált rendszer minőségének felmérése és/vagy javítása azáltal, hogy hibákat azonosítunk.

[a]Ennél a nagyon általános és gyakran használt fogalomnál kivételesen érdemes az eredeti, angol nyelvű, az IEEE által adott definíciót is elolvasni: „[Testing is an] activity in which a system or component is executed under specified conditions, the results are observed or recorded, and an evaluation is made of some aspect of the system or component”. [16]

Láthatjuk az első szembetűnő különbséget a tesztelés és a statikus ellenőrzés közt: utóbbi esetben a vizsgált rendszert nem futtatjuk, nem hajtjuk végre. Ugyanakkor attól, hogy a rendszert annak vizsgálata céljából végrehajtjuk, még nem beszélünk tesztelésről. Ahogyan a definíció is mutatja, meghatározott körülmények közt futtatjuk a rendszert, azaz nem „próbálgatásról” van szó, hanem a fejlesztés egy alaposan megtervezett részfolyamatáról.

Azt is érdemes megjegyezni, hogy a tesztelés és a „debugolás” is két külön fogalom. Tesztelés esetén hibajelenségek meglétét vagy hiányát vizsgáljuk. *Debugolás* esetén ismert egy bizonyos hibajelenség

(pl. egy teszt kimutatta vagy egy felhasználó jelezte), a célunk pedig ennek a helyének, a kiváltó okának megkeresése, lokalizálása.

Megjegyzés. Érdemes megjegyezni, hogy a tesztelésre számos különböző definíció létezik. Az International Software Testing Qualifications Board (ISTQB) szervezet által adott definíció például beleérti a tesztelésbe az olyan statikus technikákat is, mint például a követelmények vagy a forráskód átolvasása, és a forráskód statikus ellenőrzése [15]. Jelen tárgy keretei közt mi a fenti definíciót használjuk és a tesztelést dinamikus technikának tekintjük.

7.3.1. A tesztelés alapfogalmai

Már a definíció alapján is látszik, hogy a teszteléshez nem elég önmagában a rendszer. Tesztek végrehajtásához legalább a következő három komponensre szükséges: a tesztelendő rendszer, a tesztbemenetek és a tesztorákulum.

Definíció. *Tesztelendő rendszer* (*system under test*, SUT): az a rendszer amelyet a teszt során futtatni fogunk vizsgálat céljából.

Definíció. *Tesztbemenetek*: a tesztelendő rendszer számára biztosítandó bemeneti adatok.

Definíció. *Tesztorákulum*: olyan algoritmus és/vagy adat, amely alapján a végrehajtott tesztről eldönthető annak eredménye.

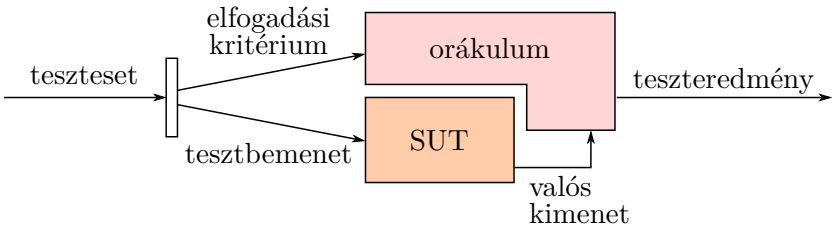
Definíció. *Tesztesetnek* hívjuk összefoglaló néven azon adatok összességét, amelyek egy adott teszt futtatásához és annak értékeléséhez szükségesek. Tehát a teszteset „bemeneti értékek, végrehajtási előfeltételek, elvárt eredmények (elfogadási kritérium) és végrehajtási utófeltételek halmaza, amelyeket egy konkrét célért vagy a tesztért fejlesztettek” [29, 16].

Definíció. *Tesztkészletnek* hívjuk a tesztesetek egy adott halmazát.

Definíció. *Tesztfuttatás*: egy vagy több teszteset végrehajtása [16].

A tesztfuttatás után [16] – az orákulum segítségével – megtudjuk a teszt eredményét, amely lehet *sikeres* (pass), *sikertelen* (fail) vagy *hibás* (error). Utóbbi esetben a tesztről nem tudjuk eldönteni, hogy sikeres-e vagy sem. Ilyen lehet például, ha a tesztrendszerben történt hiba, emiatt a SUT helyességéről nem tudunk nyilatkozni. Általában a teszt eredménye a kapott és a tesztesetben megfogalmazott elvárt kimenetek összehasonlításával kapható meg, de származhat egy referenciaimplementációval összehasonlításból, vagy ellenőrizhetünk implicit elvárásokat, például azt, hogy a kód nem dob kivételt.

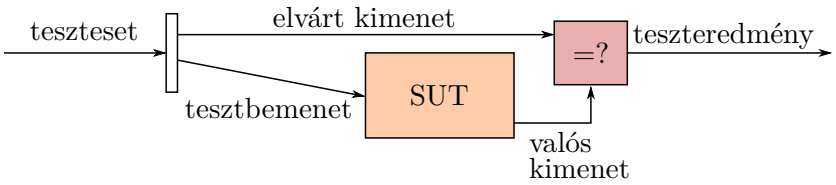
A tesztelés általános elrendezése látható a 7.5. ábrán.



7.5. ábra. A tesztelés általános sémája

Legegyszerűbb esetben a teszteset közvetlenül tartalmazza az adott tesztbemenetekre elvárt kimeneteket (referenciakimeneteket), ahogyan az a 7.6. ábrán látható. Így az orákulum feladata mindössze a SUT kimenetének összevetése a tesztesetben leírt elvárt kimenetekkel.

A 7.6. ábrán vázolt elrendezésről van szó például akkor, ha állapotgépeket tesztelünk, és a teszteset tartalmazza a bemeneti eseménysort (tesztbemenetként) és az elvárt akciókat, eseményeket (elvárt kimenetként).



7.6. ábra. A tesztelés menete ismert referenciakimenet esetén

Nincs feltétlen lehetőség azonban referenciakimenet megadására olyan teszteseteknél, amelyek deklaratív követelményeket ellenőriznek, vagy többféle kimenetet is megengednek. Ilyenkor speciális orákulum szükséges. Például egy prímtesztelő eljárással szembeni követelmény lehet, hogy amennyiben a bemeneten kapott szám összetett, akkor bizonyítékul a kimeneten be kell mutatni a bemenetként kapott szám egyik valódi osztóját. Ilyenkor a tesztorákulumnak többféle kimenetet is el kell fogadnia. Ehhez például megvizsgálhatja a bemenet oszthatóságát a SUT által adott kimenettel.

Példa. Tekintsük például az alábbi szignatúrájú függvényt:
`void find_nontrivial_divisor(int n, bool& is_prime, int& divisor)`.
A függvény a megadott `n` egész számra visszadja, hogy prím-e (`is_prime`). Amennyiben a szám nem prím, ennek igazolására megadja egy valódi (1-től és `n`-től eltérő) osztóját (`divisor`).
Egy összetett számnak számos valódi osztója lehet, emiatt a függvény megvalósításának tesztelésénél nem adhatunk meg konkrét elvárt értékeket. Ehelyett azt vizsgálhatjuk, hogy a visszaadott szám (`divisor`) tényleg osztója-e `n`-nek és tényleg 1-től és `n`-től eltérő. Így például az alábbi teszteseteket tervezhetjük meg a `find_nontrivial_divisor` függvény vizsgálatára:

Teszteset	Bemenet (`n`)	Elfogadási kritérium
1	997	`is_prime==true`
2	998	`is_prime==false && divisor>1 && divisor<998 && 998%divisor==0`
3	999	`is_prime==false && divisor>1 && divisor<999 && 999%divisor==0`
4	1	*kivétel dobása*

Ezen a példán az is megfigyelhető, hogy a teszteseteket általában nem véletlenszerűen, hanem gondos tervezés alapján határozzuk meg. Például fontos, hogy a különleges, `n==1` esetet is megvizsgáljuk. A teszttervezéssel bővebben a *Szoftver- és rendszerellenőrzés* (BMEVIMIMA01) MSc tárgyban[a] foglalkozunk.

[a] `https://inf.mit.bme.hu/edu/courses/szore`

7.3.2. A tesztek kategorizálása*

Tesztelést a szoftverfejlesztési életciklus számos fázisában használhatunk. Attól függően, hogy a rendszer mekkora részét vizsgáljuk, különböző tesztelési módszereket különböztethetünk meg.

- *Modulteszt*nek (másként *komponensteszt* vagy *egységteszt*) nevezzük azt a tesztet, amely csak egyes izolált komponenseket tesztelnek [29].
- *Integrációs tesztnek* nevezzük azt a tesztet, „amelynek célja az integrált egységek közötti interfészekben, illetve kölcsönhatásokban lévő hibák megtalálása” [29].
- *Rendszertesztnek* hívjuk azt a tesztet, amelyben a teljes, integrált rendszert vizsgáljuk annak érdekében, hogy ellenőrizzük a követelményeknek való megfelelőséget [29].

Ezek a különféle tesztelési módszerek általában egymást követik a fejlesztési ciklusban: először az egyes modulok tesztelése történik meg, később a modulok integrációja után az integrációs tesztek, majd végül a rendszerteszt kerül elvégzésre.

Amennyiben módosítást végzünk a rendszerünkön, a korábbi tesztek eredményeit már nem fogadhatjuk el, hiszen a rendszer megváltozott. Ha ismerjük, hogy az egyes tesztesetek a rendszer mely részeit vizsgálják, elegendő azokat újrafuttatnunk, amelyek a megváltoztatott részt (is) vizsgálják. Az ilyen, változtatások utáni (szelektív) újratesztelést hívjuk *regressziós tesztnek*. Fontos megjegyezni, hogy ez a korábbiakhoz képest egy ortogonális kategória, és egységeket vagy teljes rendszert is vizsgálhatunk regressziós teszttel.

7.3.3. A tesztelés metrikái

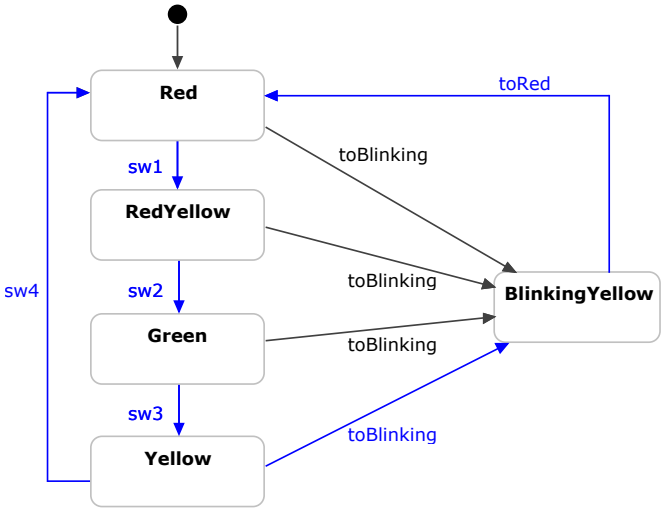
Ahogyan a fejezet elején írtuk, a tesztelés általános célja a vizsgált rendszer minőségének javítása hibák megtalálásán és javításán keresztül. Nyilvánvaló, hogy ez a végtelenségig nem folytatható, egy idő után az összes hibát megtaláljuk és kijavítjuk. Ennél az utópisztikus nézetnél kissé pragmatikusabban azt is mondhatjuk, hogy egy idő után a tesztelés folytatása nem célszerű (nem gazdaságos), mert a vizsgált rendszer minősége már „elég jó”. De honnan tudhatjuk, hogy elértük ezt a szintet?

Az egyik gyakran használt módszer a tesztkészlet fedésének mérése. A tesztfedettség alapötlete az, hogy a tesztkészlet egyik tesztesete sem látogat meg egy adott állapotot egy állapotgépben, akkor az az állapot biztosan nem lesz vizsgálva, így annak minőségéről következtetést nem vonhatunk le. Ugyanez elmondható például egy metódus hívásával kapcsolatban is.

Ha viszont a tesztkészletünk meglátogat minden állapotot vagy meghív minden metódust, elmondhatjuk, hogy mindent megvizsgáltunk? Sajnos korántsem. Például abból, hogy minden állapotot bejár egy tesztkészlet nem következik, hogy minden állapotátmenetet is érint. Attól, hogy egy tesztkészlet minden metódust meghív, nem feltétlenül érint minden utasítást. Látható, hogy számos fedettségi metrikát lehet bevezetni. Mi itt mindössze az alábbi három alapvető fedettségi metrikára szorítkozunk.

- Egy állapotgépben az *állapotfedettség* (vagy állapotlefedettség) egy adott tesztkészlet által érintett (bejárt) állapotok és az összes állapotok arányát adja meg.
- Egy állapotgépben az *átmenetfedettség* (vagy átmenetlefedettség) egy adott tesztkészlet által érintett (bejárt) állapotátmenetek és az összes átmenetek arányát adja meg.
- Egy vezérlési folyamban (programban) az *utasításfedettség* (vagy utasításlefedettség) egy adott tesztkészlet által érintett (bejárt) utasítások és az összes utasítások arányát adja meg.

Példa. Tekintsük az alábbi egyszerű állapotgépet, amely egy közlekedési lámpát modellez.



Vegyük az alábbi, két tesztesetből álló tesztkészletet (az elfogadási kritérium nem lényeges a fedettség szempontjából, így azt elhagytuk):

Teszteset	Bemenet (`n`)
1	`sw1`, `sw2`, `sw3`, `sw4`
2	`sw1`, `sw2`, `sw3`, `toBlinking`, `toRed`

Ez a két teszt az összes állapotot be fogja járni. Így az állapotgépben az *állapotfedettség* $\frac{5}{5} = 1 = 100\%$.
Ugyanakkor ez a tesztkészlet mégsem érzékeny minden hibára. Nem tudnánk kimutatni például, ha az implementációban kifelejtenénk a RedYellow-ból BlinkingYellow-ba vezető tranzíciót. Ez azért van, mert bár az állapotfedettség teljes, az átmenetfedettség nem. Összesen 9 tranzíció található az állapotgépben, ebből 6-ot fed le a két teszteset együtt (kékkel jelölt átmenetek), így az *átmenetfedettség* $\frac{6}{9} = 0{,}666 = 66{,}6\%$.
Fontos megjegyezni, hogy ha elérnénk néhány új teszteset definiálásával a teljes átmenetfedettséget, az sem feltétlen lenne képes kimutatni minden lehetséges hibát. Ha például az implementációban – hibásan – szerepelne egy Green állapotból Red állapotba vezető átmenet, azt nem feltétlen tudnánk kimutatni egy (a specifikáción) teljes fedettséget elérő tesztkészlettel sem.

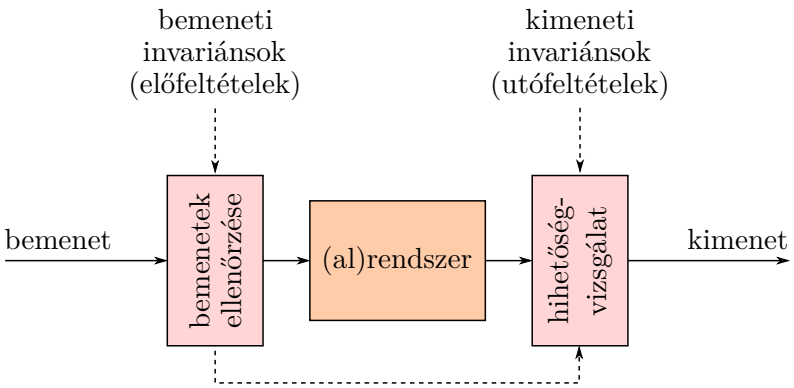
A fenti áttekintésből az is látszik, hogy egy magas fedettségi arány csak szükséges, de nem elégséges feltétele a jó minőségű rendszer fejlesztésének. Gyakran ez a szám félrevezető is lehet, illetve rossz irányba viheti a teszttervezést.

7.4. Tesztelés futásidőben (futásidejű verifikáció)

Ebben a fejezetben a futásidejű „öntesztelés” vagy monitorozás alapötletét mutatjuk be. Bizonyos esetekben kiemelkedően magas minőségi elvárásaink vannak a rendszerünkkel szemben (pl. biztonságkritikus alkalmazási területek). Más esetekben olyan külső komponenseket használunk, amelyek minőségéről nem tudunk alaposan meggyőződni (pl. egy lefordított, más által fejlesztett alkalmazást csak korlátozottan tudunk tesztelni). Ilyenkor az elvárásaink egy részét elhelyezzük magában a megvalósított rendszerben és folyamatosan vizsgáljuk. Azokat a követelményeket, amelyek teljesülését folyamatosan, minden állapotban elvárjuk, *invariánsoknak* nevezzük.

A monitorozás általános elrendezését szemlélteti a 7.7. ábra.

A monitorozás két fő lépésből áll:



7.7. ábra. A monitorozás általános elrendezése

– *bemenetek ellenőrzéséből*, amely során a bemeneti adatok megfelelőségét vizsgáljuk a definiált bemeneti invariánsok (előfeltételek) alapján, és/vagy
– *hihetőségvizsgálatból*, amely során a kimeneti adatok megfelelőségét vizsgáljuk a bemeneti adatok és a definiált kimeneti invariánsok (utófeltételek) alapján.

Egyes esetekben az invariánsok igen egyszerűek (például egy valós számok négyzetre emelést megvalósító függvény végén vizsgálhatjuk, hogy a kapott eredmény negatív-e; a negatív eredményt hibásnak minősítjük). Ilyenkor tipikusan az implementáció is három részre tagolódik, követve a 7.7. ábrán látható elrendezést:

– Először az *előfeltételt* vizsgáljuk. Ha ez nem teljesül, kivételről beszélünk. Ez egy normálistól eltérő, váratlan helyzet, aminek a kezelését máshol valósítjuk meg (ilyen körülmények közt az implementációnk helyességét nem követeljük meg). Ha az előfeltétel nem teljesül, annak oka a rendszer hibás használata (nem megfelelő bemeneti adatokat kapott).
– Amennyiben az előfeltétel teljesült, megtörténik az érdemi logika *végrehajtása*.
– A végrehajtás után az utófeltétel vizsgálatára kerül sor. Amennyiben az utófeltétel nem teljesül, olyan hibás állapotba került a rendszer, amely kezelésére nincs felkészítve. Ennek oka lehet a hibás implementáció vagy futásidejű hiba.

Példa. Az alábbi példakód egy másodfokú egyenlet gyökeit számolja ki:

```
void Roots(float a, b, c, float &x1, &x2) {
    float d = sqrt(b*b-4*a*c);

    x1 = (-b+d)/(2*a);
    x2 = (-b-d)/(2*a);
}
```

Tudhatjuk, hogy ez a kód nem működik helyesen minden esetben. Feltételezzük, hogy a diszkrimináns ($D = b^2 - 4 \cdot a \cdot c$) nemnegatív, különben a gyökvonást negatív számon végezzük el. Tudjuk azt is, hogy a kiszámított x_1 és x_2 értékeknek zérushelyeknek kell lennie, azaz elvárt, hogy $ax_1^2 + bx_1 + c = 0$ és $ax_2^2 + bx_2 + c = 0$. Ezekkel az elő- és utófeltételekkel kiegészíthetjük az implementációt is az alábbiak szerint:

```
void RootsMonitor(float a, b, c, float &x1, &x2) {
    // előfeltétel
    float D = b*b-4*a*c;
    if (D < 0)
        throw "Invalid input!";

    // végrehajtás
    Roots(a, b, c, x1, x2);

    // utófeltétel
    assert(a*x1*x1+b*x1+c == 0 && a*x2*x2+b*x2+c == 0);
}
```

Monitorozást nem csak ilyen egyszerű esetekben lehet használni, összetett monitorok is elképzelhetők. Például állapotgépek esetén készíthetünk egy monitor régiót, ami a rendszer megvalósításával párhuzamosan fut és detektálja a hibás vagy tiltott állapotokat, akciókat.

Megjegyzés. Az elő- és utófeltételek adják az ún. *design by contract* elv alapötletét. Ennek célja a rendszer minőségének javítása (a hibák elkerülése) azáltal, hogy a rendszer minden komponensére elő- és utófeltételeket határozunk meg. Egy adott x komponenst felhasználó y komponensnek garantálnia kell, hogy x előfeltételei teljesülnek a felhasználáskor, cserébe feltételezheti, hogy a válasz teljesíteni fogja x utófeltételeit. A másik oldalról x feltételezi, hogy az előfeltételei teljesülni fognak, és az ő felelőssége az utófeltételek teljesítése. Egy komponensre az elő- és utófeltételek összességét *szerződésnek* hívjuk, amely lényegében az adott komponens egy specifikációja. A legtöbb programozási nyelv beépítve vagy kiegészítéseken keresztül támogatást nyújt a szerződések precíz leírásához és esetleg azok automatikus ellenőrzéséhez is.

7.5. Formális verifikáció*

Formális verifikáció alatt olyan módszereket értünk, amelyek segítségével adott modellek vagy programok helyességét matematikailag precíz eszközökkel vizsgálhatjuk. Három fontosabb formális verifikációs módszert (családot) említünk meg:

- Modellellenőrzés;
- Automatikus helyességbizonyítás, amely során axiómarendszerek alapján tételbizonyítás segítségével próbáljuk a helyességet belátni;
- Konformanciavizsgálat, amely során adott modellek közt bizonyos konformanciarelációk teljesülését vizsgáljuk, így beláthatjuk, hogy különböző modellek viselkedése megegyező vagy eltérő az adott relációk szerint.

Jelen jegyzetben kitekintésként a modellellenőrzést mutatjuk be röviden. Bővebben a formális verifikációról a *Formális módszerek* (BMEVIMIM100) MSc tárgy[3] keretei közt szólunk.

[3] https://inf.mit.bme.hu/edu/courses/form

Modellellenőrzés. A *modellellenőrzés* egy olyan módszer, amelynek során egy adott modellen vagy implementáción egy követelmény teljesülését vizsgáljuk. A modellellenőrzés egyik előnye, hogy amennyiben a követelmény nem teljesül, lehetséges egy ellenpéldát adni. Az *ellenpélda* egy olyan futási szekvencia, amely megmutatja, hogyan lehetséges a vizsgált követelményt megsérteni. Ez nagyban segíthet a hibás működés okának meghatározásában.

A modellellenőrzés – a teszteléssel szemben – egy *teljes* módszer, azaz az adott modell vizsgálata kimerítő. Ennek következtében lehetőség van a helyes működés bizonyítására is, míg ez teszteléssel nem lehetséges. Ugyanakkor a modellellenőrzés igen nagy számítási igényű, ezért használhatósága korlátozott.

7.6. Gyakorlati jelentőség

Mint azt már a fejezet elején említettük, az informatikának, mint mérnöki diszciplínának kulcsfontosságú része az elkészített munka ellenőrzése, legyen az specifikáció vagy implementáció. Minél nagyobb az elkészített rendszer kritikussága, annál nagyobb a fejlesztés folyamán az ellenőrzése szerepe.

Manapság már szinte elképzelhetetlen egy modern fejlesztőkörnyezet beépített statikus ellenőrzés nélkül. Elérhetők további, igen kifinomult eszközök, amelyek statikus ellenőrzés segítségével felhívhatják a figyelmet hibákra vagy veszélyes konstrukciókra.

Az általunk írt implementáció nem tekinthető befejezettnek, amíg nem terveztünk és implementáltunk hozzá egy megfelelő tesztkészletet. Természetesen nem csak a megfelelően releváns tesztkészlet megvalósítása az elvárás: az implementációnkon a teszteknek sikeresnek kell lenniük ahhoz, hogy a fejlesztés következő fázisára továbbléphessünk, legyen az akár az integráció, akár a megrendelőnek történő átadás.

Különösen kritikus esetekben, például egy repülő vagy egy atomerőmű vezérlőrendszerénél, netán orvosi eszközök beágyazott szoftvereinél a tesztelés ismertetett hibái túlzott kockázatot hordozhatnak, ezért gyakran kiegészül a tervek és a megvalósítás vizsgálata formális módszerek használatával.

7.6.1. Kapcsolódó eszközök

Ebben a szakaszban néhány olyan (többnyire jól ismert és ingyenes) eszközt sorolunk fel, amely a gyakorlatban megvalósítja a bemutatott módszerek némelyikét.

Egyszerűbb statikus analízis eszközöket beépítve találhatunk a fejlettebb fejlesztőeszközökben (pl. Eclipse[4]) és modellező eszközökben (pl. Yakindu). Ezeken kívül számos, mélyebb analízist lehetővé tevő eszköz létezik. C esetén gyakran használatos a Lint stb. nyelv esetén a Cppcheck[5] és cpplint[6] eszközök. Java nyelvű programok statikus ellenőrzésére használható például a FindBugs[7] vagy a PMD[8] eszköz. A Coverity cég C, C++ és Java nyelvű programok statikus ellenőrzésére kínál megoldást, amelyek közül például a Coverity Scan[9] nyílt forráskódú programokra ingyenesen használható.

C és C++ nyelvű programokhoz használható tesztfuttató keretrendszer például a Google Test[10]. Java programok modultesztelését segítheti például a JUnit[11] keretrendszer.

C és C++ nyelvű szoftverek modellellenőrzésre jól használható például a CBMC[12] eszköz. „Állapotgép-jellegű” modellek esetén jó választás lehet az UPPAAL[13] vagy a nuXmv[14] eszközök használata.

[4] `http://eclipse.org`
[5] `http://cppcheck.sourceforge.net/`
[6] `https://github.com/google/styleguide/tree/gh-pages/cpplint`
[7] `http://findbugs.sourceforge.net/`
[8] `http://pmd.github.io/`
[9] `http://www.coverity.com/products/coverity-scan/`
[10] `https://github.com/google/googletest`
[11] `http://junit.org/`
[12] `http://www.cprover.org/cbmc/`
[13] `http://www.uppaal.org/`
[14] `https://nuxmv.fbk.eu/`

8. fejezet

Vizuális adatelemzés

Jegyzetként kérjük használják az „Intelligens adatelemzés” c. könyv 5. fejezetét (*Vizuális analízis*). Elérhető a `http://docs.inf.mit.bme.hu/remo-jegyzet/vizualis-adatelemzes-konyvfejezet.pdf` címen, ill. ingyenesen megvásárolható a `http://www.interkonyv.hu/konyvek/antal_peter_intelligens_adatelemzes` címen.

8.1. Kiegészítő anyagok*

8.1.1. Valószínűségszámítási alapfogalmak

Definíció.

- *Valószínűségi változó* (*random variable*): X
- *Várható érték, átlag* (*expected value, average, mean*):

$$\mu = \mathbb{E}X = \sum_{i=1}^{n} p_i x_i$$

- *Szórásnégyzet* (*variance*):

$$\sigma^2 = \mathbb{E}\left(X - \mu\right)^2 = \sum_{i=1}^{n} p_i (x_i - \mu)^2$$

- *Szórás* (*standard deviation*):

$$\sigma = \sqrt{\mathbb{E}\left(X - \mu\right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} p_i (x_i - \mu)^2}$$

8.1.2. Statisztikai alapfogalmak

Definíció.

- *Minta* (*sample*): *megfigyelések* (*observation*) halmaza, t darab, $x_1, \ldots, x_t$
- *Tapasztalati átlag* (*sample mean*):

$$m = \bar{x} = \frac{x_1 + \cdots + x_t}{t}$$

- *Korrigált tapasztalati szórás* (*unbiased sample standard deviation*):

$$s = \sqrt{\frac{(x_1 - m)^2 + \cdots + (x_t - m)^2}{t-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{t}(x_i - m)^2}{t-1}}$$

Figyeljük meg, hogy a korrigált tapasztalati értékeknél t helyett $(t-1)$-gyel osztunk. Ennek oka, hogy t-vel osztva a kapott érték általában alábecsli a teljes populáció szórását. Belátható, hogy $(t-1)$-gyel osztva a valódi szórást jobban közelítő értéket kapunk. Ezt nevezzük Bessel-féle korrekciónak (`https://en.wikipedia.org/wiki/Bessel's_correction`).

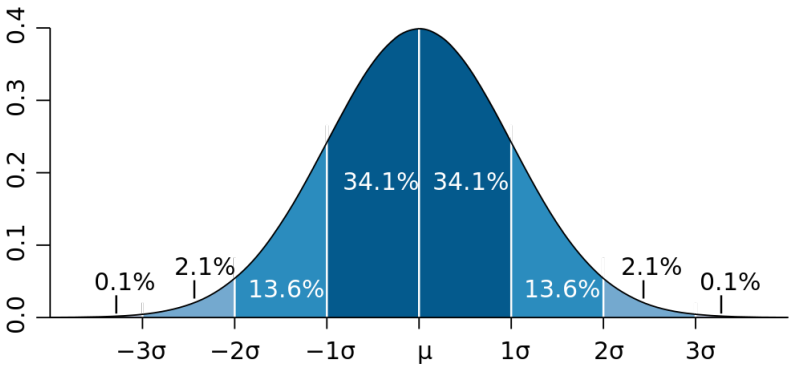
8.1.3. Kísérlettervezés

A *centrális határeloszlás-tételből* (*central limit theorem*) következik, hogy tetszőleges eloszlású jellemző (véges m várható értékkel és s szórással) tapasztalati átlaga $t \to \infty$ esetén normális eloszlású, $\mu = m$ várható értékkel és $\sigma = \frac{s}{\sqrt{t}}$ szórással.

Ökölszabály: ismert szórásnál $t > 30$, ismeretlen szórásnál $t > 100$ után kezd elfogadható lenni a közelítés.

A normális eloszlású változó

- az esetek 68%-ában legfeljebb 1σ messze kerül μ-től,
- az esetek 95%-ában legfeljebb 2σ messze kerül μ-től,
- az esetek 99,7%-ában legfeljebb 3σ messze kerül μ-től.



8.1. ábra. Konfidenciaintervallumok

9. fejezet

Benchmarking

Melyik a legjobb ár-érték arányú processzort egy PC-be? Melyik a leggyorsabb relációs adatbáziskezelő? Melyik kollekciókat kezelő függvénykönyvtár használja a legkevesebb memóriát? Gyakran szükséges, hogy ezekhez hasonló kérdésekre megbízható választ adjunk. A kérdések megválaszolásában általában komoly segítséget nyújt valamilyen metrika vizsgálata. Például számítsuk ki a másodpercenként elvégzett lebegőpontos utasítások számának és az árnak a hányadosát, mérjünk le adott mennyiségű lekérdezéshez szükséges időt egy előre definiált adathalmazon, vagy hozzunk létre egy megadott kollekciót különböző függvénykönyvtárakkal és vizsgáljuk meg a memóriafogyasztásukat. Megfelelő mérések elvégzésével jó képet kaphatunk egy rendszer adott jellemzőiről.

Megjegyzés. Benchmarkokat abban az esetben érdemes alkalmazni, ha egy rendszer objektív jellemzőire vagyunk kíváncsiak. Szubjektív jellemzők esetén (pl. mennyire használható egy programozási nyelv, mennyire alkalmas egy adatmodell bizonyos feladatokra) a kérdés megválaszolása jóval összetettebb lehet. Ezekben az esetekben általában *felhasználói tanulmányok* () végzése célravezető. Utóbbiak elvégzése azonban rendkívül idő- és költségigényes, ezért kevés tudományos eredmény áll rendelkezésre ezekben a kérdésekben.

Fontos megemlíteni, hogy az informatika a klasszikus mérnöki tudományokkal – pl. építészet, gépészet, vegyészet – szemben még fiatal területnek számít. Ennek egyik fő jele, hogy gyakran szubjektív kérdésekről (melyik a legjobb programozási nyelv, melyik a legjobb operációs rendszer vagy melyik a legjobb adatmodell) is véget nem érő „vallási viták” zajlanak.[1] Ezeket érdemes messziről elkerülni.

Az elmúlt évtizedek intenzív kutatómunkája ellenére az informatikai projektekben továbbra is kiemelkedően magas a sikertelen, elvetett (cancelled) vagy költségtervet túllépő (over budget) projektek száma [7]. Az informatikai projektek menedzsment háttere iránt érdeklődőknek javasoljuk a mára „klasszikusnak” számító műveket, mint a *Peopleware* [4] és a *The Mythical Man-Month* [2].

9.1. Alapfogalmak

A benchmarkolás elsődleges célja egy rendszer teljesítményének mérése. A kapott eredmények felhasználása többféle lehet: hasonló célú rendszerek teljesítményének összehasonlítása, egy rendszer teljesítményének felmérése, annak optimalizálása stb.

Definíció. A *benchmarkolás*
- egy *program* (programok, vagy más műveletek) *futtatása*,
- *szabványos tesztekkel* vagy bemenetekkel,
- egy objektum *relatív teljesítményének* felmérése érdekében.

Megjegyzés. A definíció eredetije az angol Wikipédia definíciója szerint [33] (kiemelések a jegyzet szerzőitől):

> In *computing*, a benchmark is the *act of running* a computer program, a set of programs, or other operations, in order to *assess the relative performance* of an object, normally by running a number of *standard tests* and trials against it.

[1] Érdekes olvasmány a témában Luis Solano „Why Does Programming Suck?” c. cikke: `https://medium.com/@luisobo/why-does-programming-suck-6b253ebfc607`

A benchmarkokkal szemben többféle elvárást támasztunk. Nyilvánvalóan nem sokat ér egy olyan benchmark, amit csak egyszer tudunk lefuttatni vagy nem tudunk később (valamilyen pontossággal) reprodukálni.

Definíció. *Ismételhetőség* (*repeatability*): a benchmarkot lehessen egymás után többször futtatni, hogy a mérési eredmények szórása csökkenthető legyen.

Definíció. *Reprodukálhatóság* (*reproducibility*): a benchmark legyen hasonló környezetben, hasonló eszközökkel megismételhető.

Definíció. *Érthetőség* (*comprehensibility*): átlag felhasználó számára értelmezhető legyen az eredmény.

Definíció. *Relevancia* (*relevance*): a benchmarkban megvalósított terhelési profil hasonlít arra a valós terhelésre, amely alatt a rendszer teljesítményéről információt szeretnénk kapni.

A relevancia biztosításához fontos, hogy:

- tényleg azt az alkalmazást mérjük, amit kell,
- terhelésgenerálás jellege közelítse a *valódi* terhelést, valamint
- minimalizáljuk a zavaró tényezőket, pl. megfelelően ürítjük a *gyorsítótárak* (pl. diszk cache, CPU cache) tartalmát és az operációs rendszeren futó többi felhasználói folyamatot leállítjuk.

Megjegyzés. Érdeklődőknek javasolt olvasmány a *Benchmarking Handbook* [10] 1. fejezete.

9.2. Példa benchmarkok*

Többféle területen is specifikál benchmarkokat a SPEC (*Standard Performance Evaluation Corporation*)[2].

9.2.1. Hardver benchmarkok

A PassMark[3] különböző benchmarkokat definiált, pl. processzorok teljesítménymméréshez a PassMark CPU benchmarkot[4].

Böngészőmotorok teljesítménymméréshez: Octane[5], Kraken[6].

Okostelefonok teljesítménymméréséhez: Antutu[7].

9.2.2. Szoftver benchmarkok

Relációs adatbázis-kezelő rendszerek teljesítményének méréséhez a TPC (*Transaction Processing Performance Council*) szervezet definiált különféle benchmarkokat. Például a TPC-C[8] célja tranzakciós rendszerek (OLTP (*Online Transaction Processing*)) teljesítménymérése.

Megjegyzés. Az OLTP rendszerekkel szemben az OLAP (*Online Analytical Processing*) rendszerekben (általában) nagyobb mennyiségű adaton összetettebb, analitikus jellegű lekérdezéseket futtatnak. OLAP rendszerek teljesítménymérésére tervezték a TPC-DS benchmarkot.

[2] `https://www.spec.org/benchmarks.html`
[3] `https://www.passmark.com/`
[4] `https://www.cpubenchmark.net/`
[5] `https://developers.google.com/octane/`
[6] `http://krakenbenchmark.mozilla.org/`
[7] `http://www.antutu.com/en/index.shtml`
[8] `http://www.tpc.org/tpcc/`

9.2.3. Gráftranszformáció benchmarkok

A kutatócsoportunkban készült el az egyik első gráftranszformációk teljesítményét vizsgáló benchmark [31]. A területen azóta is aktív kutatási munkát végzünk [28].

10. fejezet

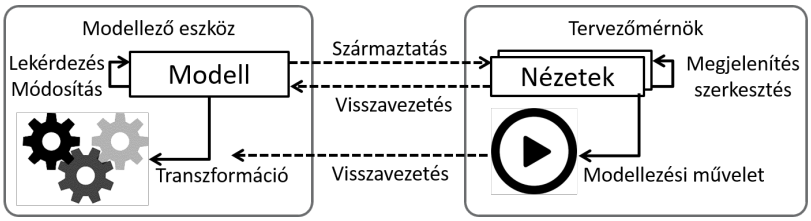
Modellező eszközök és kódgenerálási módszerek

A fejezet célja, hogy megismertessük a korszerű modellező eszközökkel és kódgenerálási technikákkal kapcsolatos fogalmakat, alapvető felépítésésüket és működési elvüket. A fejezet gyakorlatias megközelítésben tárgyalja a témát, minded pontban bemutatjuk, hogyan és munkával készíthetünk saját, vagy egészíthetünk ki meglévő modellező eszközt.

10.1. Modellező eszközök felépítése

A modellező eszközök célja, hogy különböző modellezési nyelvekhez szerkesztőfelületet nyújtson, és a modellekre épülő automatizált műveletekkel támogassa a fejlesztési folyamatot.

A *modelező eszköz* és a felhasználó *tervező mérnök* közötti interakciókat az a 10.1. ábra szemlélteti. A modellező eszköz alapvető feladata, hogy karbantartson egy *modellt*, és *lekérdezés (olvasási, vagy keresési)* és *módosítási (beszúrás, törlés)* műveletekkel láthatóvá és szerkeszthetővé tegye azt a *tervezőmérnöknek*. Ezért a tervezőeszköz különböző *nézeteket származtat* a modellekből, amit a mérnök *megjeleníthet* és meghatározott *szerkesztési műveletekkel* változtathat. A modellező eszköz feladata, hogy ezeket a módosításokat visszavezesse a modellbe. Egy modellhez több nézet is tartozhat, ami különböző részleteit emeli ki a modellnek.



10.1. ábra. Modellező eszközökök alapvető felépítése

Az elészült vagy akár félkész modelleken a tervezőmérnök különböző *automatizált műveleteket* kezdeményezhet (tervezési szabályok ellenőrzése, kódgenerálás, modell refactorálása) ami hatására *automatikus transzformációk* hajtódnak végre a modellen. A transzformáció eredménye lehet jelentés (például hibajelentés a tervezési szabályok alapján), újonnan létrehozott dokumentum (például forráskód), vagy egy módosított modell. A modellezési műveleteket egy fejlett keretrendszernszer magától is elindíthatja fejlesztés közben (például minden mentéskor lefut a tervezési szabályok ellenőrzése), de érdemes ezeket külön meghívhatónak is meghagyni.

Példa. Vegyünk egy a Yakindu tervezőeszközből: a tervezőeszközben megnyithatjuk a `.sct` kiterjesztésű fájlokat, melyeket beolvasva elkészíti a program a modell belső adatreprezentációját. Ezután az eszköz készít és megjelenít egy olyan nézetet, amelyben az állapotokat négyzetekkel, az állapotátmeneteket nyilakkal, a triggereket, őrfeltételeket és akciókat pedig szövegesen ábrázolja. A grafikus nézethez szerkesztőfelületet is tartozik, amin keresztül a tervezőmérnök módosíthatja a modellt. A Yakindu tervezőeszköz fontos tulajdonsága, hogy szigorúan ellenőrzi a modelleket és szabályozza modellmódosítások körét. Emiatt a fejlesztés során tipikusan helyes modelleket finomíthatunk egy újfent helyes modellé (ellentétben a forráskóddal, ahol nem ritka hogy órák után fordul újra a program).
Egy yakindu modellből (egy `.sgen` kiterjesztésű generátor modell segítségével) kódot is generálhatunk, azaz a modellezésért cserébe komoly fejlesztési feladatokat automatikusan elvégezhetünk. Yakindu esetén egy 10 állapotból álló rendszer is 3000 sor java kódot eredményezhet.

10.2. Modellek ellenőrzése és ábrázolása

Ahogy korábban említettük, a helyes modelleket szigorú tervezési szabályok határozzák meg: egy megszabott elemkészlet használva tehetjük össze a modelleket, miközben több szabály be kell tartaniuk: egy fejlett modellezési környezetben a véletlenszerűen összetett diagramok és szövegek szinte mindig hibássak lesznek. Ezeket a szabályokat *szintaxisnak* nevezzük.

Definíció. *Szintaxisnak* nevezzük a modellekkel szemben támasztott szabályokat. Ha egy modell teljesíti ezeket a szabályokat, akkor azt mondjuk rá hogy szintaktikailag helyes. Amikor modellekről beszélünk, általában szintaktikailag helyes modellekre gondolunk.

A modellek elemzése és szerkesztése során külön kezeljük a modellek megjelenítésével és nézeteivel kapcsolatos részleteket a mögöttes logikai felépítéstől. A konkrét ábrázolási módot érintő szabályokat (például állapotgép diagramokban az állapotokat négyzettel ábrázoljuk, a `var` kulcsszóval vezetünk be változókat, a szorzásnak magasabb a precedenciája mint az összeadásnak…) *konkrét szintaxisnak* fogjuk nevezni, míg a lényegi mögöttes logikai szerkezetet vizsgáló szabályokat (tranzíciók csak állapotok között mehetnek, tranzíciókon keresztül minden állapotnak elérhetőnek kell lennie) *absztrakt szintaxisnak* mondjuk.

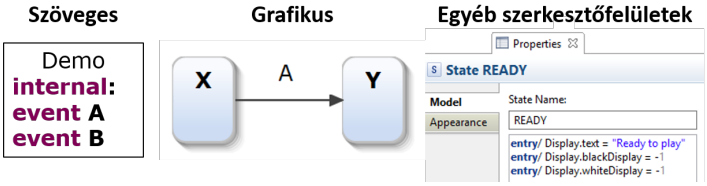
Definíció. *Konkrét szintaxisnak* nevezzük a modell ábrázolásával kapcsolatos szabályokat (színek, alakzatok, kulcsszavak, precedencia, kommentelési szabály). Megkülönböztetünk szöveges és és grafikus szintaxist.

Amennyiben egy modell megfelel a konkrét szintaxisnak, a tervezőeszköz felépíti annak logikai struktúráját. A folyamat hasonlít arra, mint ha strukturálisan modelleznénk magukat a modelleket, elhagyván azokból a konkrét megjelenítésből fakadó részleteket (például a koordinátája a modellelemeknek). Ennek a folyamatnak a kimenetele egy olyan struktúramodell lesz, amiben a lényegi elemek szerepelnek.

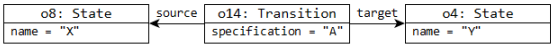
Definíció. *Absztrakt szintaxisnak* nevezzük a modellek logikai felépítésére vonatkozó szabályokat, melyek függetlenek minden megjelenítéssel kapcsolatos részlettől. Ezen kívül absztrakt szintaxis modellnek nevezzük magát a logikai vagy számítógépes reprezentációt is.

A definíciók szerint absztrakt szintaxis alatt egyaránt értjük a szabályokat és modelleket is. Ez azért van, mert a konkrét és absztrakt szintaxis ellenőrzésével együtt szokott előállni a mögöttes modell is.

Példa. Yakinduban



10.2. ábra. Állapotgép konkrét szintaxisok Yakindu tervezőeszközben



10.3. ábra. Kétállapotú állapotgép absztrakt szintaxisa

Irodalomjegyzék

[1] Barabási Albert-László: *Behálózva – A hálózatok új tudománya*. 2013, Helikon Kiadó.

[2] F.P. Brooks: *The Mythical Man-Month, Anniversary Edition: Essays On Software Engineering*. 1995, Pearson Education. ISBN 9780132119160.
URL `https://books.google.hu/books?id=Yq35BY5Fk3gC`.

[3] Co.Design: Infographic: How many lines of code is your favorite app? `http://www.fastcodesign.com/3021256/infographic-of-the-day/`, 2016.

[4] T. DeMarco – T. Lister: *Peopleware: Productive Projects and Teams*. 2013, Pearson Education. ISBN 9780133440737. URL `https://books.google.hu/books?id=TVQUAAAAQBAJ`.

[5] Jori Dubrovin – Tommi A. Junttila: Symbolic model checking of hierarchical UML state machines. In Jonathan Billington – Zhenhua Duan – Maciej Koutny (szerk.): *8th International Conference on Application of Concurrency to System Design (ACSD 2008), Xi'an, China, June 23-27, 2008* (konferenciaanyag). 2008, IEEE, 108–117. p. ISBN 978-1-4244-1838-1.
URL `http://dx.doi.org/10.1109/ACSD.2008.4574602`.

[6] Kirill Fakhroutdinov: The Unified Modeling Language, 2016.
URL `http://www.uml-diagrams.org/`.

[7] Bent Flyvbjerg – Alexander Budzier: Why your IT project may be riskier than you think. `https://hbr.org/2011/09/why-your-it-project-may-be-riskier-than-you-think/ar`, 2011. October.

[8] M. Fowler – K. Beck – J. Brant – W. Opdyke – D. Roberts: *Refactoring: Improving the Design of Existing Code*. Addison-Wesley Object Technology Series sorozat. 2012, Pearson Education. ISBN 9780133065268. URL `http://books.google.hu/books?id=HmrDHwgkbPsC`.

[9] M. Fowler – K. Scott: *UML distilled: applying the standard object modeling language*. The Addison-Wesley object technology series sorozat. 1997, Addison Wesley Longman. ISBN 9780201325638.
URL `https://books.google.hu/books?id=JdEZAQAAIAAJ`.

[10] Jim Gray (szerk.): *The Benchmark Handbook for Database and Transaction Systems (2nd Edition)*. 1993, Morgan Kaufmann. ISBN 1-55860-292-5.

[11] Object Management Group: Information technology – Object Management Group Unified Modeling Language (OMG UML) – part 2: Superstructure. ISO/IEC 19505-2:2012. Jelentés, 2012, Object Management Group. URL `http://www.omg.org/spec/UML/ISO/19505-2/PDF/`.

[12] David Harel: Statecharts: A visual formalism for complex systems. *Sci. Comput. Program.*, 8. évf. (1987) 3. sz., 231–274. p. URL `http://dx.doi.org/10.1016/0167-6423(87)90035-9`.

[13] David Harel: Statecharts in the making: a personal account. In Barbara G. Ryder – Brent Hailpern (szerk.): *Proceedings of the Third ACM SIGPLAN History of Programming Languages Conference (HOPL-III), San Diego, California, USA, 9-10 June 2007* (konferenciaanyag). 2007, ACM, 1–43. p. URL `http://doi.acm.org/10.1145/1238844.1238849`.

[14] David Harel – Amir Pnueli – Jeanette P. Schmidt – Rivi Sherman: On the formal semantics of statecharts (extended abstract). In *Proceedings of the Symposium on Logic in Computer Science (LICS '87), Ithaca, New York, USA, June 22-25, 1987* (konferenciaanyag). 1987, IEEE Computer Society, 54–64. p.

[15] International Software Testing Qualifications Board: Certified tester – Foundation level syllabus. Jegyzet, 2011.
URL http://www.istqb.org/downloads/send/2-foundation-level-documents/3-foundation-level-syllabus-2011.html4.

[16] ISO/IEC/IEEE 24765: Systems and software engineering – Vocabulary. Szabvány, 2010.

[17] John C Knight – Colleen L DeJong – Matthew S Gibble – Luis G Nakano: Why are formal methods not used more widely? In *Fourth NASA formal methods workshop* (konferenciaanyag). 1997, Citeseer.

[18] Budapesti Közlekedési Központ: Budapest metró- és HÉV-hálózata, 2016.
URL http://www.bkk.hu/apps/docs/terkep/metro.pdf.

[19] Leslie Lamport: Proving the correctness of multiprocess programs. *IEEE Transactions on Software Engineering*, SE-3. évf. (1977) 2. sz., 125–143. p.

[20] Diego Latella – István Majzik – Mieke Massink: Towards a formal operational semantics of UML statechart diagrams. In Paolo Ciancarini – Alessandro Fantechi – Roberto Gorrieri (szerk.): *Formal Methods for Open Object-Based Distributed Systems, IFIF TC6/WG6.1 Third International Conference on Formal Methods for Open Object-Based Distributed Systems (FMOODS), February 15-18, 1999, Florence, Italy*, IFIP Conference Proceedings konferenciasorozat, 139. köt. 1999, Kluwer. ISBN 0-7923-8429-6.

[21] C. R. Nobe – William E. Warner: Lessons learned from a trial application of requirements modeling using statecharts. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Requirements Engineering, ICRE '96, Colorado Springs, Colorado, USA, April 15-18, 1996* (konferenciaanyag). 1996, IEEE Computer Society, 86–93. p. ISBN 0-8186-7252-8.
URL http://dx.doi.org/10.1109/ICRE.1996.491433.

[22] Zsigmond Pap: *Biztonságossági kritériumok ellenőrzése UML környezetben.* PhD értekezés (Budapest University of Technology and Economics). 2006.
URL https://repozitorium.omikk.bme.hu/handle/10890/595.

[23] Gergely Pintér: *Model based program synthesis and runtime error detection for dependable embedded systems.* PhD értekezés (Budapest University of Technology and Economics). 2007. URL https://repozitorium.omikk.bme.hu/handle/10890/636.

[24] Marko Rodriguez: Titan: The Rise of Big Graph Data. http://www.slideshare.net/slidarko/titan-the-rise-of-big-graph-data, 2012. június.

[25] Marko Rodriguez: On Graph Computing. http://markorodriguez.com/2013/01/09/on-graph-computing/, 2013. január.

[26] Marko A. Rodriguez – Peter Neubauer: Constructions from dots and lines. *CoRR*, abs/1006.2361. évf. (2010). URL http://arxiv.org/abs/1006.2361.

[27] Miro Samek: Practical UML statecharts in C/C++. *Event-Driven Programming for Embedded Systems. Second Edition. Newnes*, 2008.

[28] Gábor Szárnyas – Oszkár Semeráth – István Ráth – Dániel Varró: The TTC 2015 Train Benchmark case for incremental model validation. In Louis M. Rose – Tassilo Horn – Filip Krikava (szerk.): *Proceedings of the 8th Transformation Tool Contest, a part of the Software Technologies: Applications and Foundations (STAF 2015) federation of conferences, L'Aquila, Italy, July 24, 2015.*, CEUR Workshop Proceedings konferenciasorozat, 1524. köt. 2015, CEUR-WS.org, 129–141. p.
URL http://ceur-ws.org/Vol-1524/paper2.pdf.

[29] Szoftvertesztelés egységesített kifejezéseinek gyűjteménye. Szószedet, 2014, Magyar Szoftvertesztelői Tanács Egyesület. URL http://www.hstqb.com/images/d/d8/HTB-Glossary-3_2.pdf.

[30] Fleiner Tamás: A számítástudomány alapjai. Jegyzet, 2014, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.

[31] Gergely Varró – Andy Schürr – Dániel Varró: Benchmarking for graph transformation. In *Proc. IEEE Symposium on Visual Languages and Human-Centric Computing (VL/HCC 05)* (konferenciaanyag). Dallas, Texas, USA, 2005. September, IEEE Press, 79–88. p.

[32] Wikibooks: Introduction to software engineering — wikibooks, the free textbook project, 2015. URL `https://en.wikibooks.org/w/index.php?title=Introduction_to_Software_Engineering`. [Online; accessed 16-February-2016].

[33] Wikipedia: Benchmark (computing). `https://en.wikipedia.org/wiki/Benchmark_(computing)`, 2016. április.

[34] Wikipédia: Reláció. `http://hu.wikipedia.org/wiki/Rel%C3%A1ci%C3%B3`, 2015. március.

[35] William Wong: MISRA C: Safer is better. *Electronic Design*, 2003.
URL `http://electronicdesign.com/embedded/misra-c-safer-better`.

Tárgymutató