A formális módszerek szerepe

dr. Majzik István
dr. Bartha Tamás
dr. Pataricza András

BME Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

Mik azok a formális módszerek?

Formális módszerek

- Matematikai technikák,
  - elsősorban diszkrét matematika
  - és matematikai logika

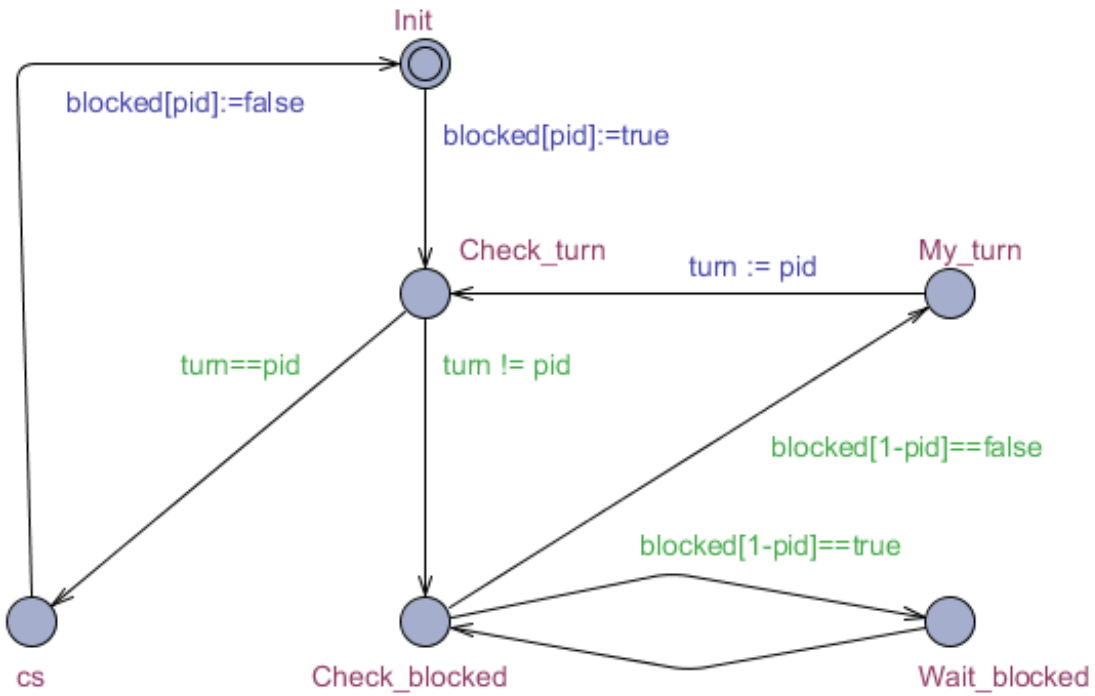
  használata arra, hogy elkészítsük és ellenőrizzük hardver és szoftver rendszerek
  - specifikációját,
  - terveit (modelljeit),
  - implementációját (viselkedését),
  - dokumentációját.

Első lépés: Formális nyelv

- A formalizálás célja: Matematikai precizitással megadni
  - Modelleket: terveket, tervezői döntéseket (modellezési nyelv)
  - Követelményeket: elvárt tulajdonságokat (követelmény leíró nyelv)
- Formális nyelvek felépítése
  - Formális szintaxis
    - Jelölésmód: milyen nyelvi elemek és kapcsolatok vannak?
  - Formális szemantika
    - A jelölésmód interpretációja: mit értek alatta?
- Mit szeretnénk leírni formális nyelvekkel?
  - Funkcionalitás (viselkedés, feltételek, elvárások, …)
  - Struktúra, interfészek
  - Extra-funkcionális aspektusok is: Teljesítmény, megbízhatóság, …
- A formális nyelv használatának előnyei
  - Egyértelműség, ellenőrizhetőség
  - Automatikus feldolgozhatóság

Egy egyszerű példa

- Automata formalizmus:
  - Állapotok és állapotátmenetek
  - Változók, konstansok
  - Változókon kiértékelhető feltételek az átmenetek végrehajtásához
  - Értékadás akciók az átmenetek végrehajtása során



Formális szintaxis (áttekintés)

- Matematikai eszközök:

$KS = (S, R, L)$ és AP, ahol

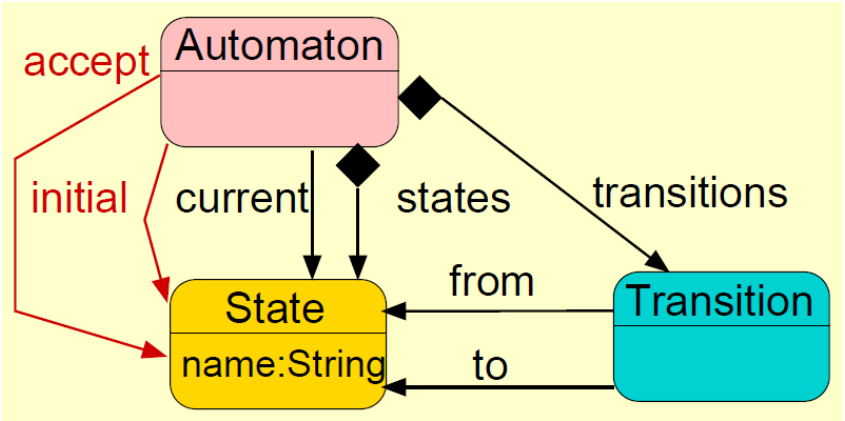
$AP = \{P, Q, R, \ldots\}$

$S = \{s_1, s_2, s_3, \ldots s_n\}$

$R \subseteq S \times S$

$L: S \rightarrow 2^{AP}$

- BNF: BL ::= true | false | $p \wedge q$ | $p \vee q$
- Metamodell:



- Absztrakt szintaxis (nyelvtani szabályok)
- Konkrét szintaxis (megjelenítés)

Formális szemantika (áttekintés)

A szintaxis alapján felírt modellek jelentése:

- Műveleti (operációs) szemantika: „Programozóknak”
  - Megadja, mi történik a végrehajtás (számítások) során
  - Egyszerű elemekre épít: pl. állapotok, akciók
- Axiomatikus szemantika: „Helyességbizonyításhoz”
  - Állítás nyelv + axiómakészlet + következtetési szabályok
  - Pl. automatikus tételbizonyító rendszerekhez
- Denotációs szemantika: „Fordítóprogramokhoz”
  - Szintaxis által meghatározott leképzés egy ismert doménre
    - Ismert matematikai domén, pl. számítási szekvencia, vezérlési gráf, állapothalmaz, … és ezeken definiált műveletek (összefűzés, unió, …)
  - A modellek vizsgálata a mögöttes matematikai domén vizsgálatára vezethető vissza

Továbblépés: Formális módszerek

Formális módszer:

- A formális modellről ismeretet adó matematikai eljárás
- Eszközökkel támogatható

- A formális modell végrehajtása
  - Szimuláció
- A formális modell ellenőrzése: Formális verifikáció
  - „Önmagában való” vizsgálat
    - Konzisztencia, ellentmondás-mentesség
    - Teljesség, zártság
  - „Megfelelés” vizsgálata
    - Modellek között
    - Modellek és elvárt tulajdonságok között (implementáció ↔ specifikáció)
- A formális modell alapján történő szintézis:
  - Szoftver (programkód, konfiguráció) generálása
  - Hardver tervek generálása

A formális módszerek használatának lépései

- Valós probléma formális vizsgálata:
  1. Fogalmi tér felépítése <- feltételezések
  2. Probléma formalizálása <- absztrakció
  3. Formális modell analízise <- automatikus lehet
  4. Eredmények értelmezése, felhasználása

- Alkalmazáshoz szükséges:
  - Feltételezések teljesülésének ellenőrzése
  - Modell validálása
  - Eszközök helyességének belátása

Mire szeretnénk használni a formális módszereket?

Milyen problémákkal nézünk szembe?

Miben segíthetnek a formális módszerek?

Egy tanulságos történet…

- Vasa svéd hadihajó, 1628:
  Elsüllyedt közvetlenül
  a vízrebocsátás után

- Problémák:
  - Változó követelmények
    (II. Gusztáv Adolf király)
  - Hiányzó pontos specifikáció
    (Henrik Hybertsson építő)
  - Ellenőrizetlen tervek
    (Johan Isbrandsson alvállalkozó)
  - Figyelmeztetések figyelmen kívül hagyása
    (Fleming admirális)

- Dokumentáció:
  - The Vasa: A Disaster Story with Software Analogies. By Linda Rising. The Software Practitioner, January-February 2001.
  - Why the Vasa Sank: 10 Problems and Some Antidotes for Software Projects. By Richard E. Fairley and Mary Jane Willshire. IEEE Software, March-April 2003.

Komplex rendszerek tervezése

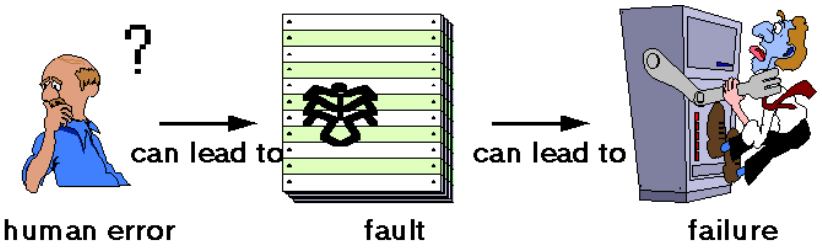
- Minimális tervezés
- Implicit folyamat
- Egyszerű eszközök

- Tervezés
- Definiált folyamat
- Hatékony eszközök

- Ellenőrzött tervek
- Meghatározott folyamat
- Automatikus eszközök

Szoftver minőségi krízis

- Tipikus kódméret:
  - 10 kLOC … 1000 kLOC
- Fejlesztési ráfordítás:
  - 0,1 - 0,5 mérnökév / kLOC (nagyméretű szoftver)
  - 5-10 mérnökév / kLOC (kritikus szoftver)
- Hiba eltávolítás (ellenőrzés, tesztelés, javítás):
  - 45 - 75% ráfordítás
- Hibasűrűség változása:
  - 10 - 200 hiba / kLOC jön létre a fejlesztés során



Ellenőrzés, debuggolás, javítás

  - 0,01 - 10 hiba / kLOC maradhat az üzembe helyezésig

IT alkalmazások fejlesztésének kihívásai

- Jó minőségű specifikáció és tervek készítése
  - Teljes
  - Ellentmondás-mentes, egyértelmű
  - Ellenőrizhető
- Tervek ellenőrzése
  - Tervezői döntések igazolása
    - Bizonyítottan helyes tervek a továbblépés alapjai
  - Hibák elkerülése vagy korai felderítése
    - Minőség ↔ költség ↔ fejlesztési idő optimalizálás
- Bizonyított helyességű eszközök használata
  - Forráskód, konfiguráció, teszt és monitor szintézis

Ezek alapjait a formális módszerek adhatják!

Egy egyszerű példa: Kölcsönös kizárás

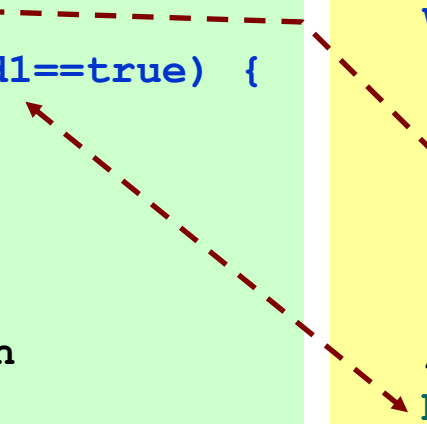
- 2 résztvevőre, 3 megosztott változóval (H. Hyman, 1966)
  - **blocked0**: Első résztvevő (P0) be akar lépni
  - **blocked1**: Második résztvevő (P1) be akar lépni
  - **turn**: Ki következik belépni (0 esetén P0, 1 esetén P1)

P0

```
while (true) {
   blocked0 = true;
   while (turn!=0) {
        while (blocked1==true) {
                skip;
        }
        turn=0;
   }
   // Critical section
   blocked0 = false;
   // Do other things
}
```

P1

```
while (true) {
   blocked1 = true;
   while (turn!=1) {
        while (blocked0==true) {
                skip;
        }
        turn=1;
   }
   // Critical section
   blocked1 = false;
   // Do other things
}
```



Helyes-e ez az algoritmus?

Klasszikus módszer: Cleanroom Software Engineering

- Eredete:
  - IBM javaslat (80-as évek),
  - US katonai fejlesztések (90-es évek)
- Célkitűzés:
  - Hibaelkerülés a hibaeltávolítás helyett
  - Formális modelleken alapuló ellenőrzés
- Alapelvek:
  - Formális modellek használata és ellenőrzése
  - Inkrementális megvalósítás minőségellenőrzéssel (komplexitás fokozatos növelése)
  - Statisztikai alapú tesztelés a formális modellek alapján
    - Reprezentatív trajektóriák kiválasztása
    - A modellezés kézi validációja

Biztonságkritikus szoftverek fejlesztése

- IEC 61508: Szabvány előírások a fejlesztésre
  - Functional safety in electrical / electronic / programmable electronic safety-related systems
  - Szakterület-specifikus szabványok alapja
- Követelmény-specifikáció készítésének előírásai:

Table A.1 – Software safety requirements specification (see 7.2)

	Technique/Measure*	Ref.	SIL1	SIL2	SIL3	SIL4
1	Computer-aided specification tools	B.2.4	R	R	HR	HR
2a	Semi-formal methods	Table B.7	R	R	HR	HR
2b	Formal methods including for example, CCS, CSP, HOL, LOTOS, OBJ, temporal logic, VDM and Z	C.2.4	---	R	R	HR

NOTE 1 The software safety requirements specification will always require a description of the problem in natural language and any necessary mathematical notation that reflects the application.

NOTE 2 – The table reflects additional requirements for specifying the software safety requirements clearly and precisely.

* Appropriate techniques/measures shall be selected according to the safety integrity level. Alternate or equivalent techniques/measures are indicated by a letter following the number. Only one of the alternate or equivalent techniques/measures has to be satisfied.

Biztonságkritikus szoftverek fejlesztése

- IEC 61508: Szoftver tervezés és fejlesztés előírásai

Table A.2 – Software design and development: software architecture design (see 7.4.3)

	Technique/Measure*	Ref	SIL1	SIL2	SIL3	SIL4
1	Fault detection and diagnosis	C.3.1	---	R	HR	HR
2	Error detecting and correcting codes	C.3.2	R	R	R	HR
3a	Failure assertion programming	C.3.3	R	R	R	HR
3b	Safety bag techniques	C.3.4	---	R	R	R
3c	Diverse programming	C.3.5	R	R	R	HR
3d	Recovery block	C.3.6	R	R	R	R
3e	Backward recovery	C.3.7	R	R	R	R
3f	Forward recovery	C.3.8	R	R	R	R
3g	Re-try fault recovery mechanisms	C.3.9	R	R	R	HR
3h	Memorising executed cases	C.3.10	---	R	R	HR
4	Graceful degradation	C.3.11	R	R	HR	HR
5	Artificial intelligence - fault correction	C.3.12	---	NR	NR	NR
6	Dynamic reconfiguration	C.3.13	---	NR	NR	NR
7a	Structured methods including for example, JSD, MASCOT, SADT and Yourdon.	C.2.1	HR	HR	HR	HR
7b	Semi-formal methods	Table B.7	R	R	HR	HR
7c	Formal methods including for example, CCS, CSP, HOL, LOTOS, OBJ, temporal logic, VDM and Z	C.2.4	---	R	R	HR
8	Computer-aided specification tools	B.2.4	R	R	HR	HR

NOTE – The measures in this table concerning fault tolerance (control of failures) should be considered with the requirements for architecture and control of failures for the hardware of the programmable electronics in IEC 61508-2.

* Appropriate techniques/measures shall be selected according to the safety integrity level. Alternate or equivalent techniques/measures are indicated by a letter following the number. Only one of the alternate or equivalent techniques/measures has to be satisfied.

A formális módszerek használata

- Tervezők (nem csak matematikusok) által is használható, amennyiben a specifikus tudást eszközökbe integrálják
  - Modellező eszközök
  - Ellenőrző eszközök
    - Modellellenőrzők, ekvivalencia ellenőrzők, automatikus tételbizonyítók
  - Szintézis eszközök
    - Kódgenerátor, konfiguráció generátor az ellenőrzött modellek alapján
    - Teszt generátor (validáláshoz)
- Csökken a rendszerben maradó koncepcionális és tervezői hibák száma, javul a minőség
  - Szolgáltatásbiztonság növelhető
  - De garanciát nem ad a használhatóságra, a felhasználói elvárások teljesítésére!
  - Validációt nem helyettesíti

Verifikáció és validáció összehasonlítása

Verifikáció (igazolás)	Validáció (érvényesítés)
„Jól építjük-e a rendszert?”	„Jó rendszert építettünk-e?”
Összhang ellenőrzése a fejlesztési fázisokban, illetve ezek között	A fejlesztés eredményének ellenőrzése
Fejlesztési lépések során használt tervek (modellek) és specifikációjuk közötti megfelelés ellenőrzése	A kész rendszer és a felhasználói elvárások közötti megfelelés ellenőrzése
Objektív folyamat; formalizálható, automatizálható	Szubjektív elvárások lehetnek; elfogadhatósági ellenőrzés
Felderíthető hibák: Tervezési, implementációs hibák	Felderíthető hibák: Követelmények hiányosságai is
Nincs rá szükség, ha automatikus a leképzés követelmény és implementáció között	Nincs rá szükség, ha a specifikáció tökéletes (elég egyszerű)

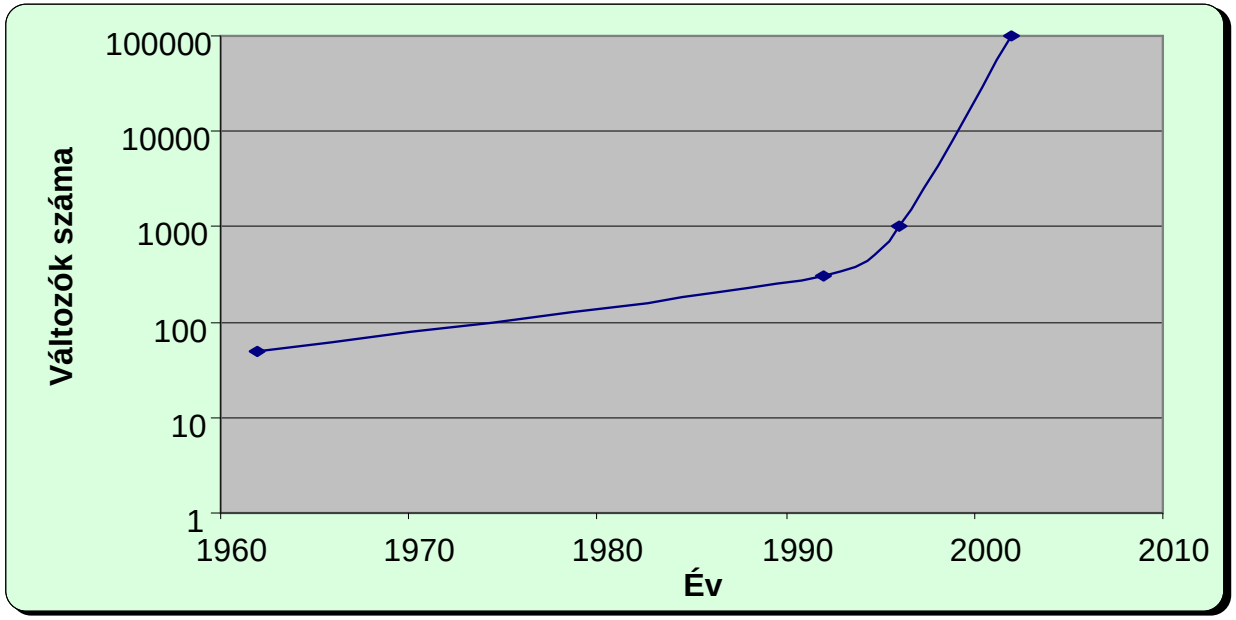
Formális módszerek értékelése

Amik a formális vizsgálatot nehézzé teszik…

- Valósághű modellezés
  - Ismeretek hiánya, feltételezések (pl. a környezetről)
  - De: Formális módszerek használatától független ez a probléma
- Speciális ismereteket igényel a felhasználótól
  - Alacsony szintű matematikai modellek, jelölésrendszer
  - De: Mérnöki modellezési nyelvek eltakarhatják
- Bonyolultak az ellenőrzés és szintézis módszerei
  - Algoritmusok, technikák korlátait ismerni kell
  - Kézi beavatkozásra lehet szükség (pl. tételbizonyító rendszerek)
  - De: Terjednek a „gombnyomásra működő” eszközök
- Csak „kisméretű” problémákra alkalmazható
  - Modell, állapottér kezelhető-e a meglévő erőforrásokkal
  - De: Eszközök hatékonysága folyamatosan nő

A formális verifikáció fejlődése

- A SAT eszközök (kielégíthetőség) lehetőségei:



- Modellellenőrző eszközök képességei:
  - $10^{20} \approx 2^{66}$ méretű állapottér (ROBDD-vel, 1990)
  - $10^{100} \approx 2^{328}$ méretű állapottér speciális esetben
  - 10^{62900} méretű állapottérre is volt példa (MIT TDK)

Jelen helyzet

- Megkötések
  - Diszkrét állapotú
  - Diszkrét idejű
  - Diszkrét eseményterű

  } rendszerek (DES)
- Kihívások, kutatási területek
  - Matematikai algoritmusok hatékonysága és szintje
  - Modell osztályok korlátai (pl. időzítés)
  - Modell készítés nehézsége (pl. absztrakció)
  - Nyelvek kifejezőképessége (pl. VHDL)
  - Nyelvek nem pontos definíciója (pl. UML)

Sikeres megközelítés

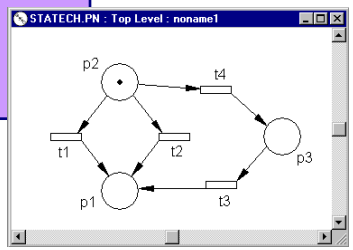
Inf. rendszer tervezése

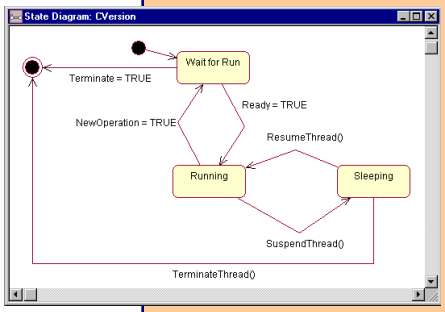
Formális ellenőrzés

Mérnöki modell (pl. UML)

Automatikus modellgenerálás

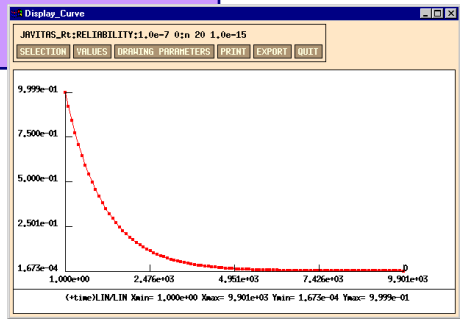
Formális modell





Eredmények visszavezetése

Analízis



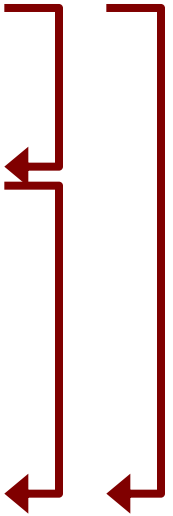
Megvalósítás

Implementáció

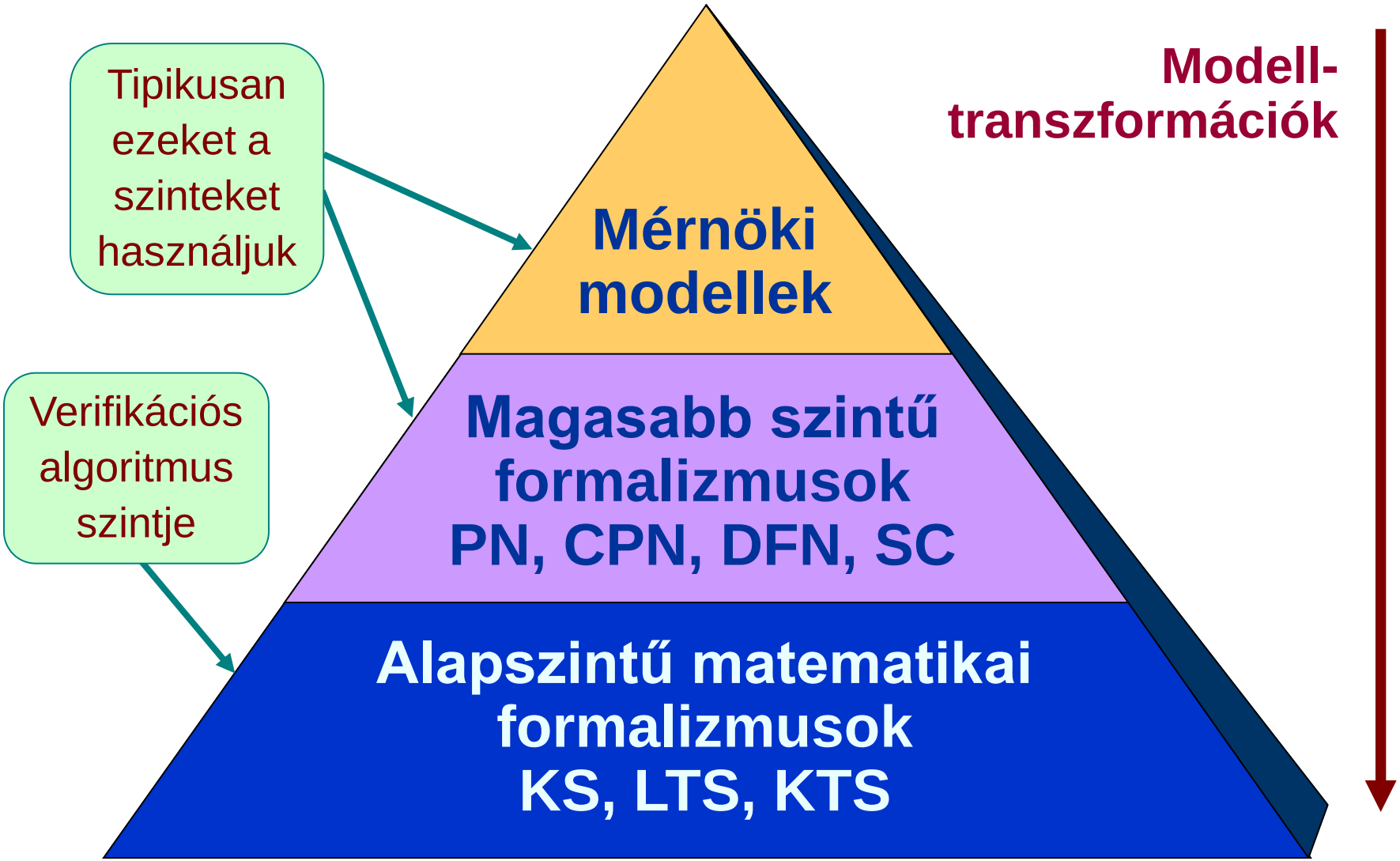
```
int main() {
  while (i<z){
  a=x+x*b[i++];
  }
 }
```

Modellek a formális ellenőrzéshez

- Rendszermodellek
  - Mérnöki modellek:
    - Pl. UML diagramok (fél-)formális szemantikával
  - Magasabb szintű modellek:
    - Vezérlés orientált: Automata, Petri-háló, …
    - Adatfeldolgozás orientált: Adatfolyam háló, …
    - Kommunikáció orientált: Processz algebra, …
  - Alapszintű matematikai modellek:
    - KS, LTS, KTS, automaták, Büchi automaták
- Tulajdonság leírások
  - Magasabb szintű:
    - Idődiagram, üzenet szekvencia diagram (MSC)
  - Alapszintű:
    - Elsőrendű logika, temporális logika, referencia automata



Visszautalás: A tárgy felépítése



Sikertörténetek

Klasszikus alkalmazások

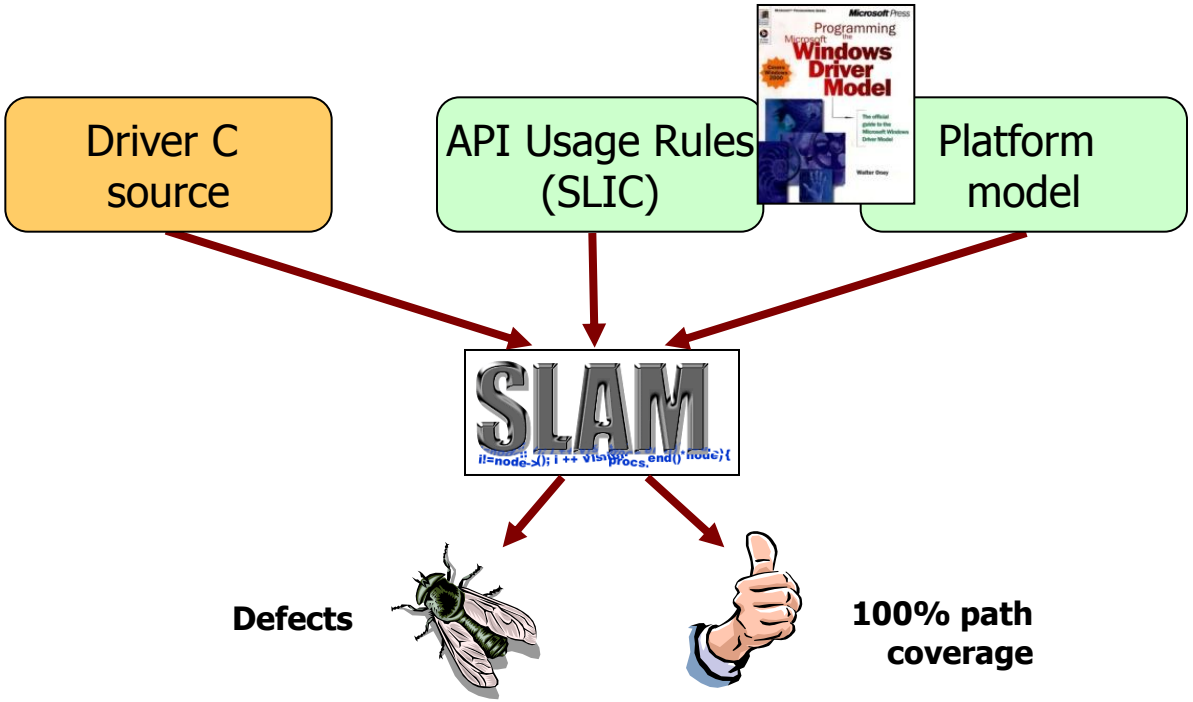
- USA TCAS-II forgalomirányító rendszer
  - RSML nyelven specifikált; teljesség és ellentmondás-mentesség ellenőrzése
- Philips Audio Protocol
  - 1994: manuális verifikáció, majd 1996: automatikus ellenőrzés (HyTech)
- Lockheed C130J repülési szoftvere
  - Programfejlesztés helyességbizonyítással (CORE spec. nyelv + Ada)
  - Költség nem nőtt a tesztelés egyszerűsödése miatt
- IEEE Futurebus+ szabvány
  - Carnegie Mellon SMV: cache koherencia protokoll hibájának kiderítése
- Hardver projektek: ACL2 automatikus tételbizonyító
  - Motorola DSP Complex Arithmetic Processor mag (250 regiszter): DSP algoritmusok ellenőrzése
  - AMD 5K86 processzor: Lebegőpontos osztás algoritmusának ellenőrzése
- Intel Core i7 processzor
  - *„For the recent Intel CoreTM i7 design we used formal verification as the primary validation vehicle for the core execution cluster"*
  - Szimbolikus szimuláció az adatutak teljes vizsgálatára (2700 mikroutasítás, 20 mérnökévnyi munka) – Binary Decision Diagram alkalmazása
- Modell alapú szoftverfejlesztéshez kapcsolódó eszközök
  - IBM, Esterel, Prover, Mentor, Verum, Telelogic, …

Forráskódhoz illeszkedő formális verifikáció

- Java
  - Bandera, PathFinder: modell absztrakció
  - Java VM formalizálása: Abstract State Machine
- Ada
  - SPARK Ada verification condition generator tételbizonyítóhoz
- C
  - BLAST: Szoftver modellellenőrző C programokhoz (absztrakció)
  - CBMC: C alapú korlátos modellellenőrző
- C#, Visual Basic .Net
  - Zing (MS Visual Studio-hoz): Konkurens szoftver modellellenőrzése
- Spec# (C# superset)
  - MS Research Boogie 2: Specifikációs nyelvi kiterjesztések
  - Helyességi kritériumok ellenőrzése: program absztrakcióval és tételbizonyítóval (Z3)
- Microsoft Windows Driver Kit (WDK)
  - Static Driver Verifier Research Platform, SLAM 2 eszköz
  - Windows API használati feltételeinek statikus ellenőrzése

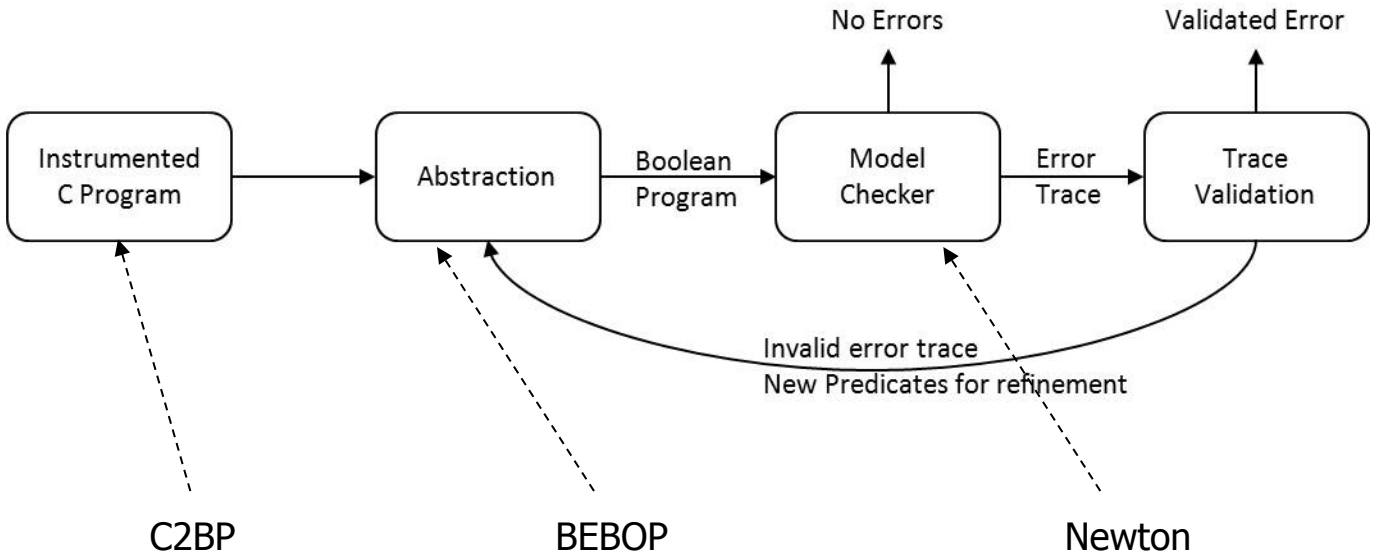
Példa: SLAM

- Motiváció: Hibás meghajtók megzavarhatják az OS működését
  - Pl.: hibás zárolások erőforrásokon (nincs zárolva, nincs felszabadítva, …)
- Megoldás:
  - Szabályokkal leírható a helyes használat (pl. zárhasználat „állapotgépe”)
  - Ennek teljesülését ellenőrzi a SLAM a forráskódon
  - Forráskód absztrakciót használ: Boole-program állapotainak vizsgálata
  - Megtalált hibás (szabályokhoz nem illeszkedő) utakat vissza kell ellenőrizni

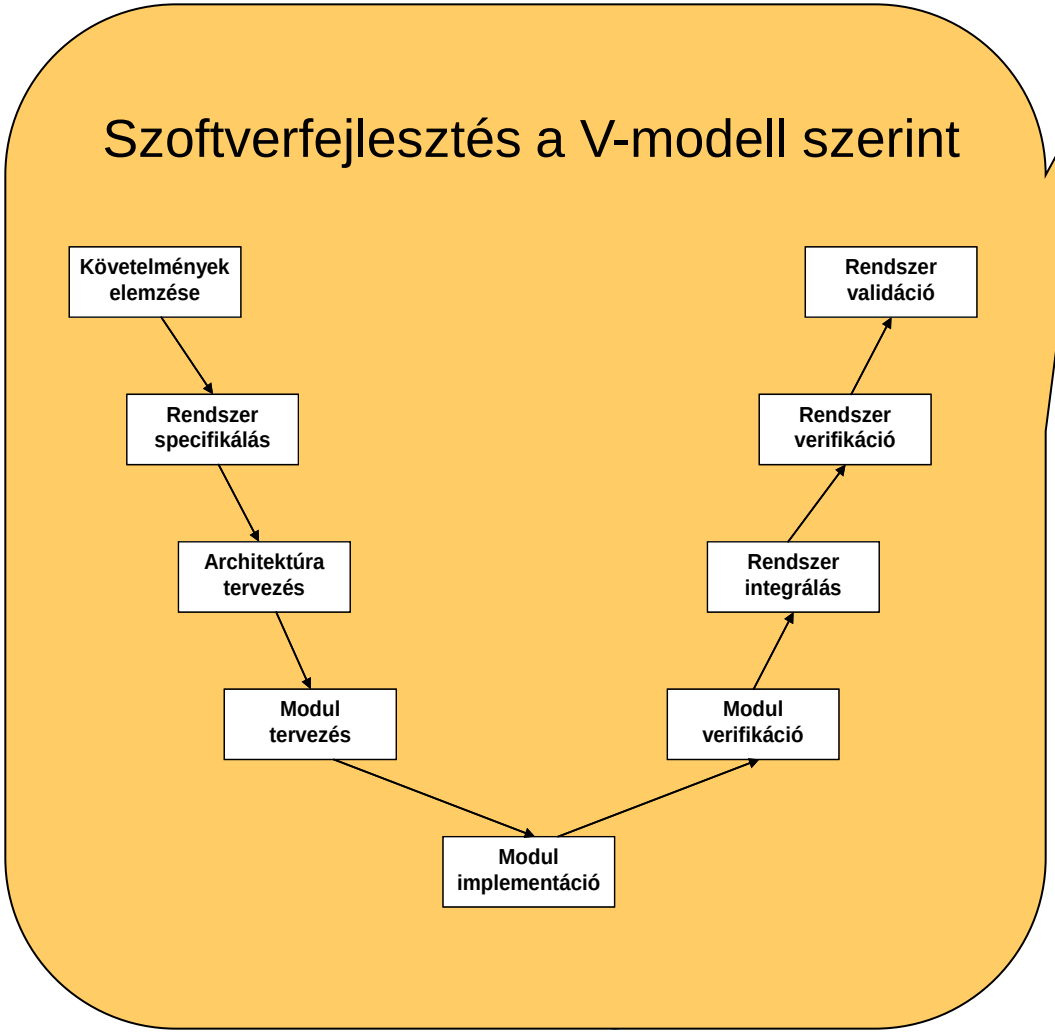


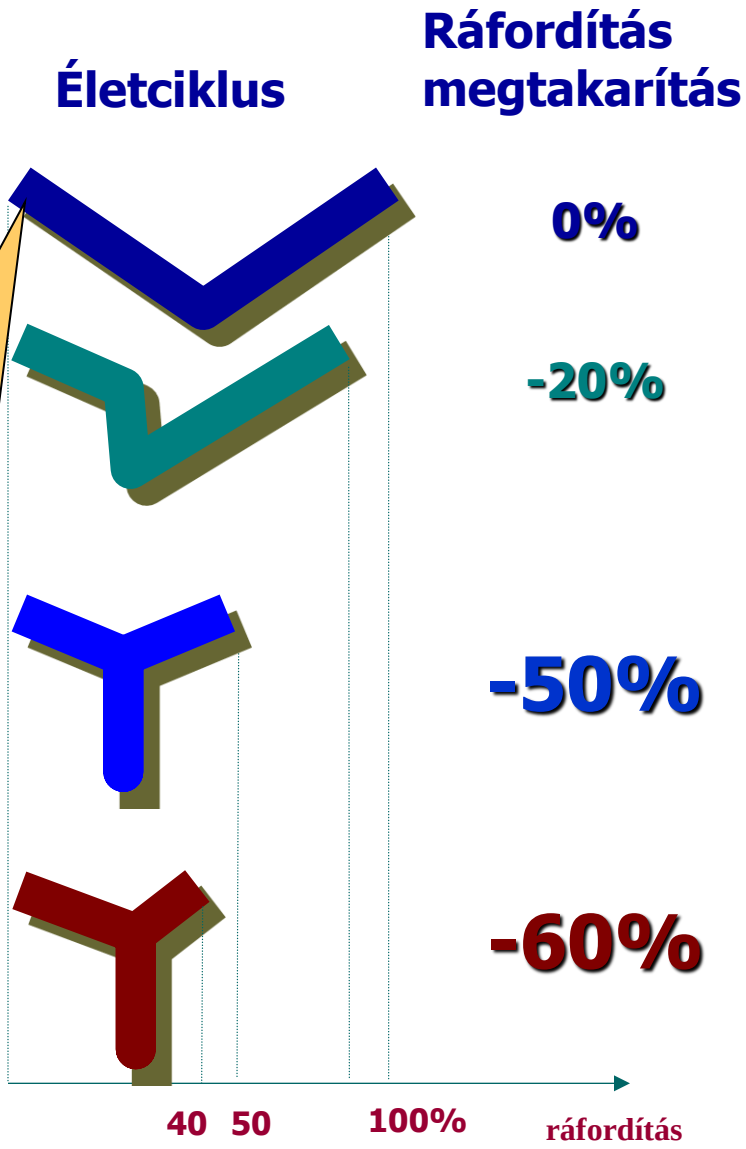
Példa: SLAM

- Motiváció: Hibás meghajtók megzavarhatják az OS működését
  - Pl.: hibás zárolások erőforrásokon (nincs zárolva, nincs felszabadítva, …)
- Megoldás:
  - Szabályokkal leírható a helyes használat (pl. zárhasználat „állapotgépe”)
  - Ennek teljesülését ellenőrzi a SLAM a forráskódon
  - Forráskód absztrakciót használ: Boole-program állapotainak vizsgálata
  - Megtalált hibás (szabályokhoz nem illeszkedő) utakat vissza kell ellenőrizni



V-től az Y fejlesztési modellig





V-től az Y fejlesztési modellig

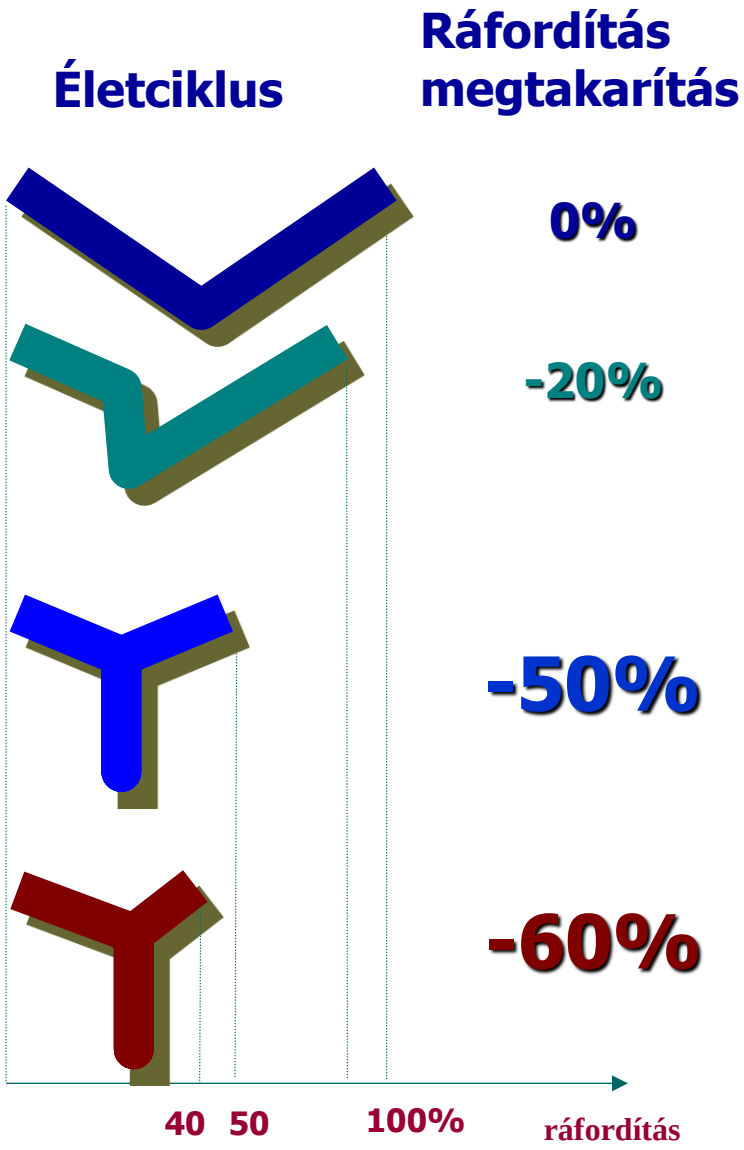
Kézi kódolás

"Közönséges" automatikus kódgenerátor használata

Minősített automatikus kódgenerátor használata

Formális verifikációval kiegészített tervezés

* Adatok: Esterel Technologies



Összefoglalás

- Mik a formális módszerek?
  - Formalizmus, formális nyelv
  - Formális módszerek és eszközök: Szimuláció, formális verifikáció, szintézis
- Mire használhatók?
  - Motiváció: Szoftver minőségi kihívások
  - A formális módszerek lehetőségei
- Mit várhatunk?
  - Korlátok
  - Sikertörténetek