

# Hatékony technikák modellellenőrzéshez: Korlátos modellellenőrzés

dr. Majzik István

BME Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

# Hol tartunk most?

- Alacsony szintű formalizmusok (KS, LTS, KTS)
- Magasabb szintű formalizmusok

Temporális logikák:  
PLTL, CTL, CTL\*

Rendszer modellje

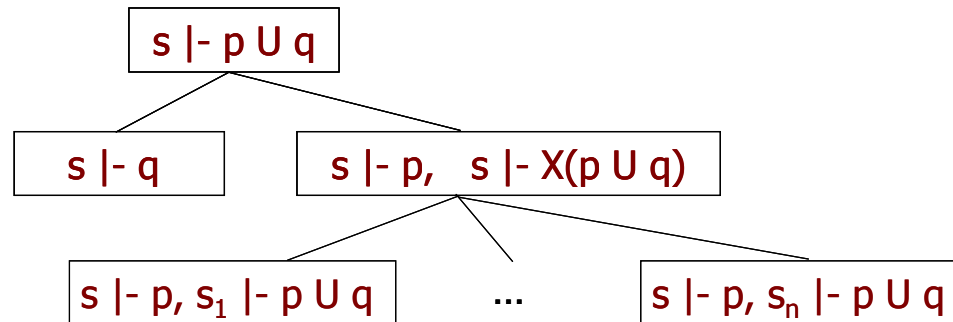
Követelmény megadása



# Ismétlés: A modellellenőrzés tanult technikái

- PLTL modellellenőrzés:

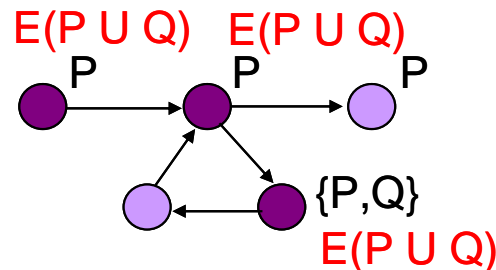
- **Tabló módszer:** Kifejezések felbontása a **modell mentén**



- Automata alapú megközelítés (kiegészítő anyag)

- CTL modellellenőrzés:

- **Szemantika alapú módszer:** Állapotok iteratív címkézése



# A tárgyalt technikák áttekintése

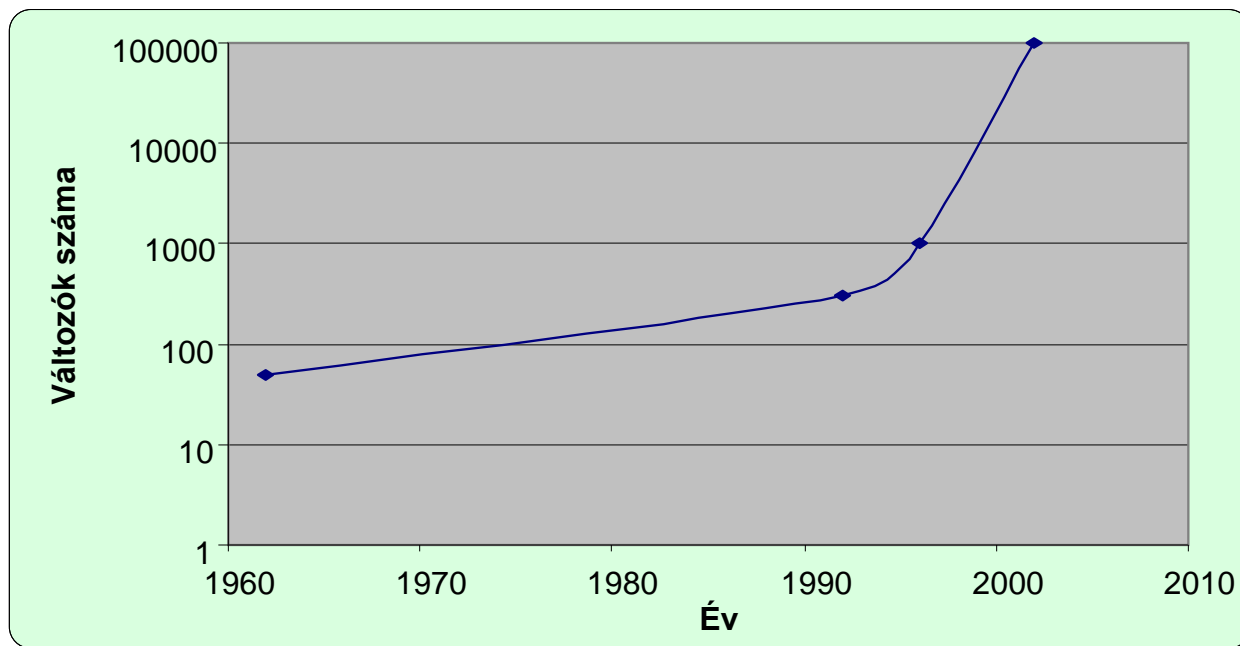
- CTL modellellenőrzés: Szimbolikus technika

Szemantika alapú technika	Szimbolikus technika
Címkézett állapotalmazok	Karakterisztikus függvények (Boole logikai függvények): ROBDD reprezentáció
Műveletek állapotalmazokon	Hatékony műveletek ROBDD-ken

- Invariánsok modellellenőrzése: Korlátos modellellenőrzés
  - Logikai függvények igazságának keresése SAT megoldóval
  - Adott mélységig folytatható modellellenőrzés: Korlátos hosszúságú ellenpéldák keresése
    - Egy megtalált ellenpélda mindenképpen érvényes ellenpélda
    - Ha nincs ellenpélda, az nem végleges eredmény

# Felhasználható eredmény: SAT megoldók

- SAT megoldó:
  - Adott logikai függvényhez olyan változó-értékeket (változó-behelyettesítést) keres, amelyekkel a függvény értéke igaz
  - Példa:  $f(x_1, x_2, x_3) = x_1 \wedge x_2 \wedge \neg x_3$  függvény esetén  $(1, 1, 0)$  bitvektor
- NP-teljes probléma, de hatékony algoritmusok vannak
  - zChaff, MiniSAT, ...



# Célkitűzés

- A probléma alkalmas leképezése logikai függvényre
  - Modell és temporális logikai követelmény együttesen
    - Tipikusan invariáns követelmény ellenőrzésére:  
Minden állapotra előírt tulajdonság
- SAT megoldó használata modellellenőrzésre
  - Ha a követelmény teljesül, a SAT megoldó nem talál behelyettesítést a függvényhez
  - Ha a követelmény nem teljesül, a SAT megoldó által adott behelyettesítés lesz egy ellenpélda
    - Az ellenpélda használható a hibakereséshez
    - Invariáns tulajdonságok esetén jól használható módszer

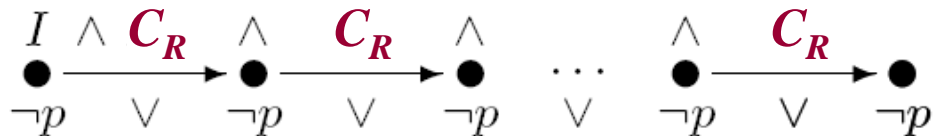
# A korlátos modellellenőrzés alapja

- Az állapotteret nem „egyben” kezeljük
- Az útvonalak hosszát korlátozva végezzük az ellenőrzést
  - Állapottér bejárás egyszerre csak adott útvonalhossz korlátig történik: részleges ellenőrzés
  - Az útvonalhossz iteratívan növelhető
  - Egyes esetekben van „átmérője” az állapottérnek: a leghosszabb útvonal, ami bejárható
- A korlát becsülhető:
  - Intuíció a probléma méretéről
  - Worst case végrehajtási idő alapján

# Informális bevezetés

- Hogyan képezzük az állapotteret?
  - Kiindulás a kezdőállapotból:  $I(s)$  karakterisztikus függvénnyel megadható
  - „Kibontás”: Lehetséges továbblépések az állapotátmeneti reláció mentén
    - Állapotátmeneti reláció (hová léphetünk tovább):  $C_R(s,s')$  karakterisztikus függvénnyel
    - Ha  $s$ -ben vagyunk,  $C_R(s,s')$  alkalmazása adja meg a lehetséges  $s'$  rákövetkezőket, majd  $s'$  esetén  $C_R(s',s'')$  alkalmazása adja meg a lehetséges  $s''$  rákövetkezőket ...
    - Egyszerűbb jelölés: Vesszők használata helyett felső index:  $C_R(s^0,s^1)$  majd  $C_R(s^1,s^2)$  ...
- Hogyan adjuk meg a követelményt?
  - Invariáns: Minden állapotra előírt kritérium: általánosan egy  $p(s)$  predikátum
- Az ellenpéldát kijelölő logikai függvény részei (konjunkcióval):
  - Kezdőállapotból indulunk:  $I(s)$
  - „Lépegetünk” (kihajtogatunk) az állapotátmeneti reláció mentén:  $C_R(s,s')$
  - Ellenpélda (valahol  $p(s)$  nem teljesül):  $\neg p(s)$  diszjunkció a bejárt állapotokra

Ezt a függvényt igazzá tevő behelyettesítés adja az ellenpéldát!





# Jelölések

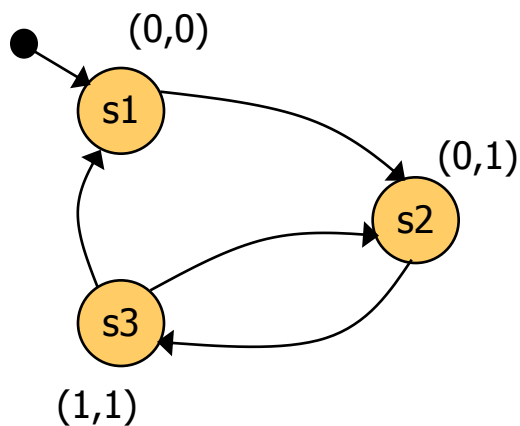
- $M=(S,R,L)$  Kripke-struktúra
- Logikai függvények:
  - $I(s)$ : kezdőállapotok  $n$  változós karakterisztikus függvénye
    - Háttér: Állapotok „kódolása”  $n$  hosszú bitvektorokkal
  - $C_R(s,s')$ : állapotátmenetek  $2n$  változós karakterisztikus függvénye
    - Minden átmenet karakterisztikus függvénye  $\vee$  operátorral összefogva
  - $\text{path}()$ :  $k$  hosszú útvonalak  $(k+1)n$  változós karakt. függvénye

$$\text{path}(s^0, s^1, \dots, s^k) = \bigwedge_{0 \leq i < k} C_R(s^i, s^{i+1})$$

Vesszős változók helyett felső index

- $p(s)$ : címkézett állapotok halmazának karakterisztikus függvénye
  - Atomi kijelentésekre pl.  $P(s)$ ,  $Q(s)$ : Az  $L$  címkézés határozza meg
  - Általánosan: Állapotváltozók alapján konstruálható

# Példa: A modell leképzése logikai függvénybe

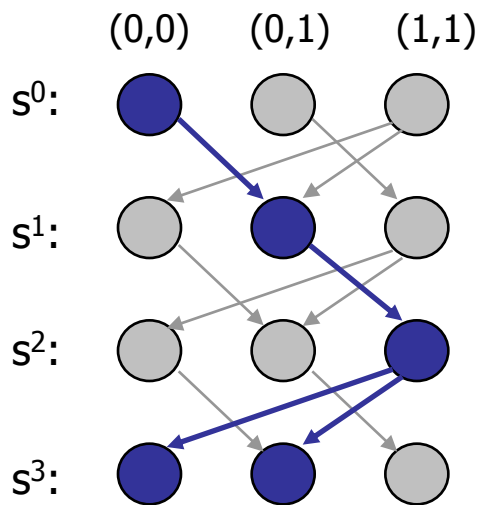


Kezdőállapot predikátum:

$$I(x,y) = (\neg x \wedge \neg y)$$

Állapotátmeneti reláció:

$$\begin{aligned}
 C_R(x,y,x',y') = & (\neg x \wedge \neg y \wedge \neg x' \wedge y') \vee \\
 & \vee (\neg x \wedge y \wedge x' \wedge y') \vee \\
 & \vee (x \wedge y \wedge \neg x' \wedge y') \vee \\
 & \vee (x \wedge y \wedge \neg x' \wedge \neg y')
 \end{aligned}$$



3 lépéses kibontás a kezdőállapotból:

$$\begin{aligned}
 I(x^0,y^0) \wedge \text{path}(s^0,s^1,s^2,s^3) = & \\
 = & I(x^0,y^0) \wedge \\
 & C_R(x^0,y^0, x^1,y^1) \wedge \\
 & C_R(x^1,y^1, x^2,y^2) \wedge \\
 & C_R(x^2,y^2, x^3,y^3)
 \end{aligned}$$

# A probléma formalizálása

- Bizonyítandó  $p(s)$  invariáns: Minden útvonal, ami a kezdőállapotból indul, olyan állapotokba jut, ahol  $p(s)$  igaz

$$\forall i: \forall s^0, s^1, \dots, s^i : (I(s^0) \wedge \text{path}(s^0, s^1, \dots, s^i) \Rightarrow p(s^i))$$

- Ha  $p(s)$  nem igaz valahol, akkor lesz olyan  $i$ , amire a következő függvény igaz értéket vesz fel:

$$I(s^0) \wedge \text{path}(s^0, s^1, \dots, s^i) \wedge \neg p(s^i)$$

A fv. igaz értékéhez tartozó behelyettesítést adja a SAT megoldó!

- Azaz az  $(s^0, s^1, \dots, s^i)$  útvonalat meghatározó  $(i+1)n$  változó értéket
- Első ötlet:  $i=0,1,2,\dots$ -ra rendre megvizsgálni, hogy  $i$  hosszú útvonalon igaz lehet-e a következő függvény (ha igaz, akkor van ellenpélda):

$$I(s^0) \wedge \text{path}(s^0, s^1, \dots, s^i) \wedge \neg p(s^i)$$

# Az algoritmus elemei

- Iteráció:  $i=0,1,2,\dots$  az útvonalak hosszára
- Ciklusmentes utakat vizsgálunk:  $lfp\text{ath}$

Kifejtendő az állapotváltozókkal

$$lfp\text{ath}(s^0, s^1, \dots, s^k) = \text{path}(s^0, s^1, \dots, s^k) \wedge \bigwedge_{0 \leq i < j \leq k} s^i \neq s^j$$

- Megállási feltétel az iteráció során:
  - Nincs  $i$  hosszú ciklusmentes út kezdőállapotból, azaz nem lehet igaz

$$I(s^0) \wedge lfp\text{ath}(s^0, s^1, \dots, s^i)$$

- „Rossz” állapothoz (ahol  $p(s)$  nem igaz) nem is vezethet  $i$  hosszú ciklusmentes út (kezdőállapottól függetlenül), azaz nem lehet igaz

$$lfp\text{ath}(s^0, s^1, \dots, s^i) \wedge \neg p(s^i)$$

- Ha megáll az iteráció, akkor  $p(s)$  mindenütt igaz

# Az algoritmus

$i = 0$

while True do

if not SAT( $I(s^0) \wedge \text{lfpath}(s^0, s^1, \dots, s^i)$ )

or not SAT( $(\text{lfpath}(s^0, s^1, \dots, s^i) \wedge \neg p(s^i))$ )

then return True

if SAT( $I(s^0) \wedge \text{path}(s^0, s^1, \dots, s^i) \wedge \neg p(s^i)$ )

then return  $(s^0, s^1, \dots, s^i)$

$i = i + 1$

end

Nincs már  $i$  hosszú ciklusmentes út kezdőállapotból

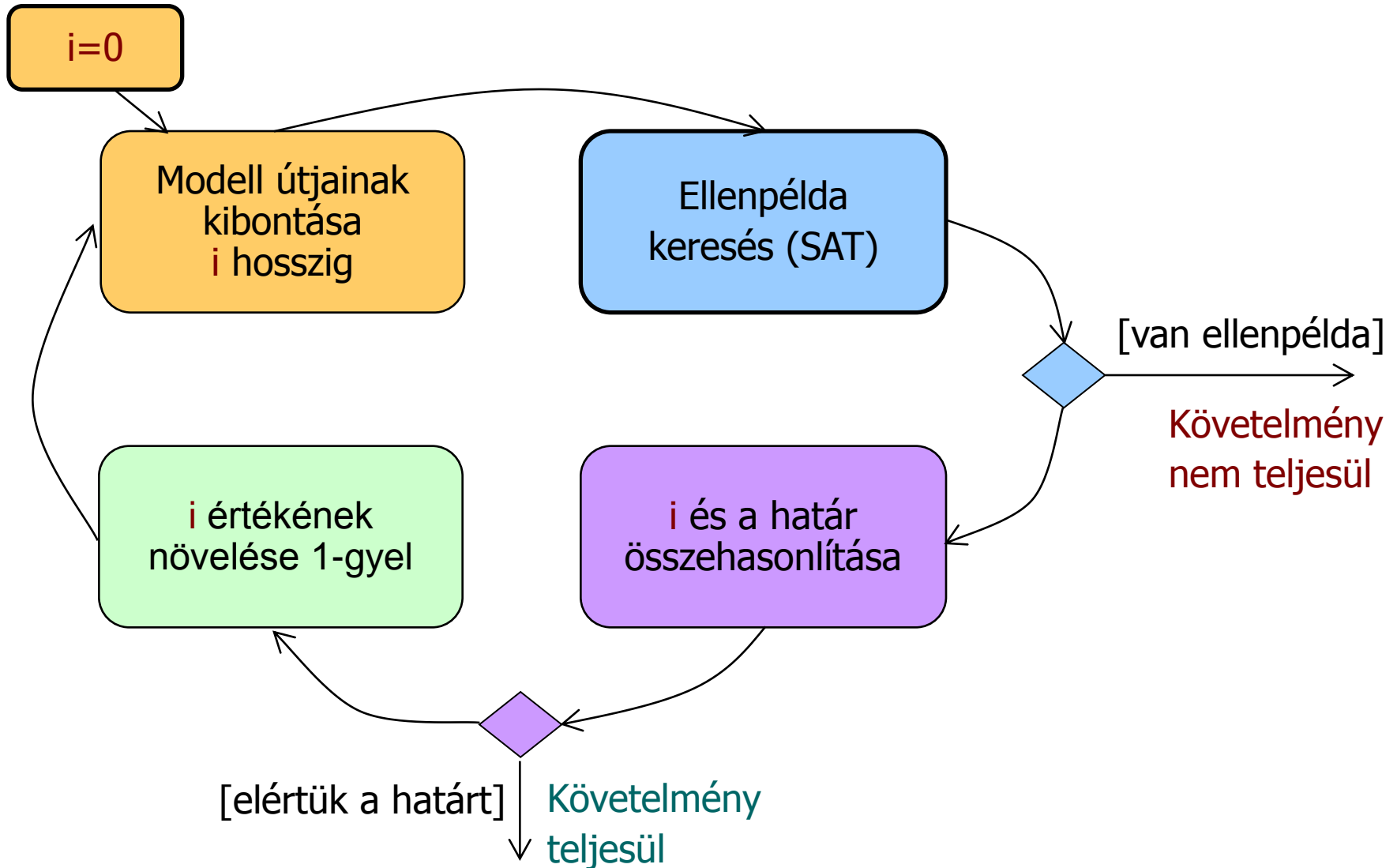
Nincs  $i$  hosszú ciklusmentes út „rossz” állapotra

Van  $i$  hosszú út kezdőállapotból „rossz” állapotba

Iteráció

- Ha az eredmény True: Az invariáns igaz.
- Ha az eredmény egy  $(s^0, s^1, \dots, s^i)$  útvonalat meghatározó  $(i+1)n$  bitérték: ez lesz az ellenpélda olyan állapot eléréséhez, ahol  $p(s)$  nem igaz

# Korlátos modellellenőrzés iterációival



# Az algoritmus finomítása

- Az iterálást nem 0-ról kezdjük
  - Adott  $k$  hosszú útvonallal kezdjük, és erre először az ellenpéldát próbáljuk meg generálni:
    - Ha van ilyen ellenpélda, akkor azt gyorsan megtaláljuk (iteráció nélkül)!
  - Ezután vizsgáljuk, hogy  $k+1$ -re terminál-e az iteráció, majd növeljük az útvonal hosszát
- Nem garantált, hogy az eredményül kapott ellenpélda (útvonal) minimális hosszúságú
  - Nem 0-ról kezdtük az iterációt; ha  $k$  nagy, akkor „túllövünk a célon”
  - Itt  $k$  értékére heurisztika kell, ha rövid útvonalra törekszünk
- További megkötések a SAT megoldó bemenetére:
  - Az előre haladó útvonalakon ne legyenek kezdőállapotok (ez nem ciklust jelent, hiszen akár több kezdőállapot is lehet)
  - A visszafelé haladó útvonalakon ne legyenek olyan köztes állapotok, ahol  $p(s)$  nem igaz

# A finomított algoritmus

$i = k$

Kezdő érték

Van  $i$  hosszú útvonal kezdőállapotból „rossz” állapoton át

while True do

if  $\text{SAT}(I(s^0) \wedge \text{path}(s^0, s^1, \dots, s^i) \wedge \neg \bigwedge_{j=0}^i (p(s^j)))$

Nincs  $i+1$  hosszú ciklusmentes út, (amiben nincs másik kezdőállapot)

then return  $(s^0, s^1, \dots, s^i)$

if not  $\text{SAT}(I(s^0) \wedge \bigwedge_{j=1}^{i+1} (\neg I(s^j)) \wedge \text{lfp}\text{ath}(s^0, s^1, \dots, s^{i+1}))$

or not  $\text{SAT}((\text{lfp}\text{ath}(s^0, s^1, \dots, s^{i+1}) \wedge \bigwedge_{j=0}^i p(s^j) \wedge \neg p(s^{i+1}))$

then return True

$i = i + 1$

end

Nincs  $i+1$  hosszú ciklusmentes út „rossz” állapotra (közben „jó” állapotokat érintve)



# Összefoglalás: A BMC használata

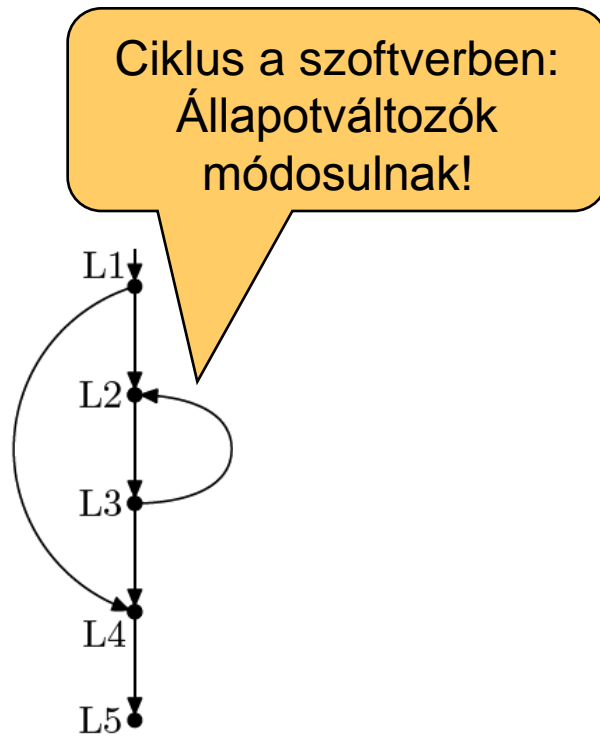
- Invariánsok vizsgálatára hatékony
- Helyes módszer ciklusmentes utakat használva
  - Ha van ellenpélda az adott kihajtogatási korlátig, azt megtalálja
  - Ha ellenpéldát talál, akkor az valódi ellenpélda
- Állapottér kezelés
  - SAT megoldó: szimbolikus technika, logikai függvényeken
  - Adott kihajtogatásig részleges eredmény kapható
- Legrövidebb ellenpélda keresése
  - Tesztgeneráláshoz használható
- Automatikus módszer
  - A korlát kijelölése lehet heurisztikus (az állapottér „átmérője”)
- Eszközök:
  - Pl. Symbolic Analysis Laboratory (SAL): sal-bmc, sal-atg

# Az Intel eredményei (hardver verifikáció)

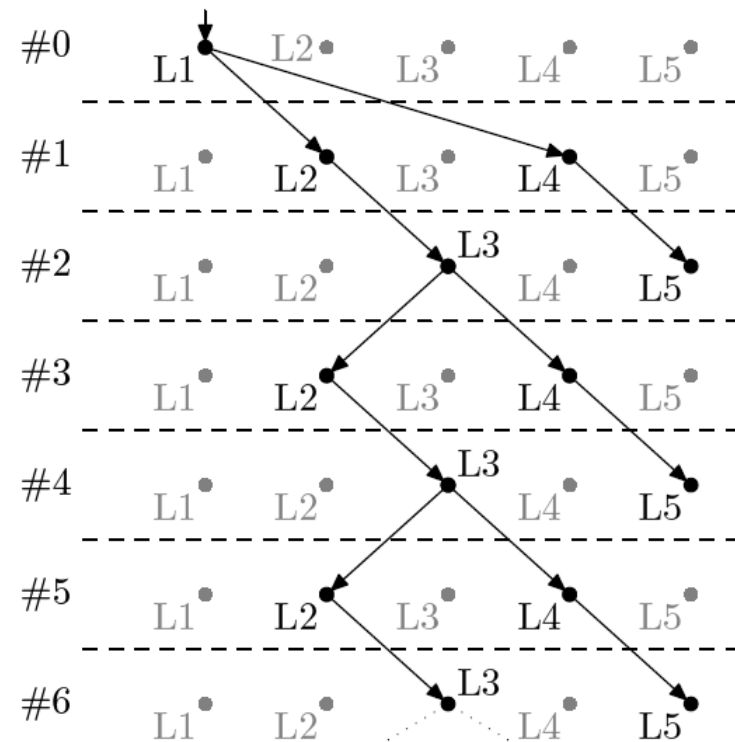
Model	$k$	Forecast (BDD)	Thunder (SAT)
Circuit 1	5	114	2.4
Circuit 2	7	2	0.8
Circuit 3	7	106	2
Circuit 4	11	6189	1.9
Circuit 5	11	4196	10
Circuit 6	10	2354	5.5
Circuit 7	20	2795	236
Circuit 8	28	—	45.6
Circuit 9	28	—	39.9
Circuit 10	8	2487	5
Circuit 11	8	2940	5
Circuit 12	10	5524	378
Circuit 13	37	—	195.1
Circuit 14	41	—	—
Circuit 15	12	—	1070

# Alkalmazás szoftverek esetén: A ciklusok problémája

A ciklusok bejárása új állapotokat eredményez!



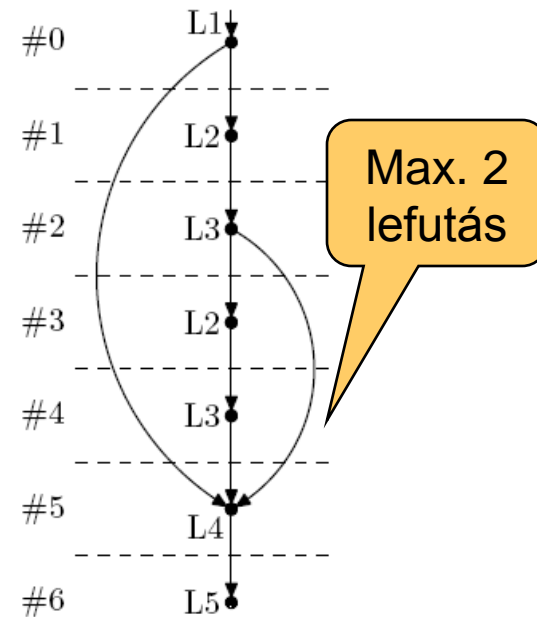
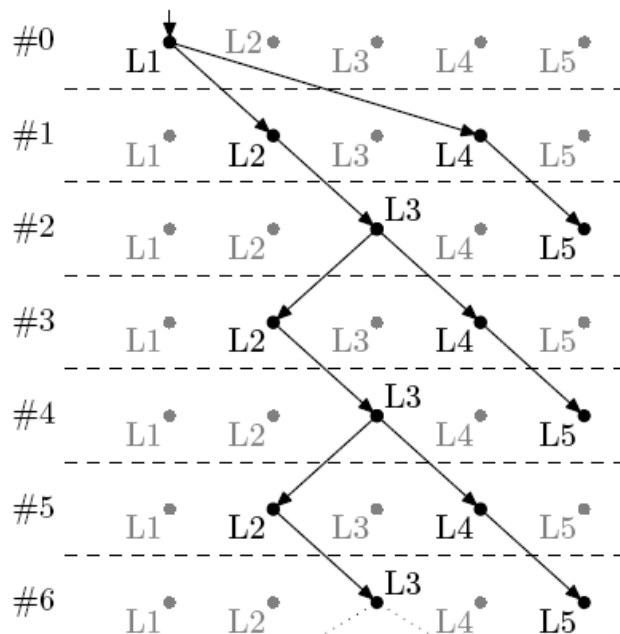
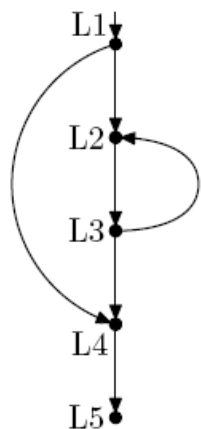
Vezérlési gráf (CFG) példa



Teljes kihajtogatás

# Korlátozott ciklusbejárás

- Modell kihajtogatás lehetőségei:
  - Alapeset: Teljes kihajtogatás (path enumeration)
    - Mindig szisztematikusan előre minden lehetséges ágon
  - Korlátozott ciklusbejárás (loop unrolling)
    - Ciklusokra egyenként **lefutási korlátot** adni és úgy kibontani



# Szoftver modellellenőrzés

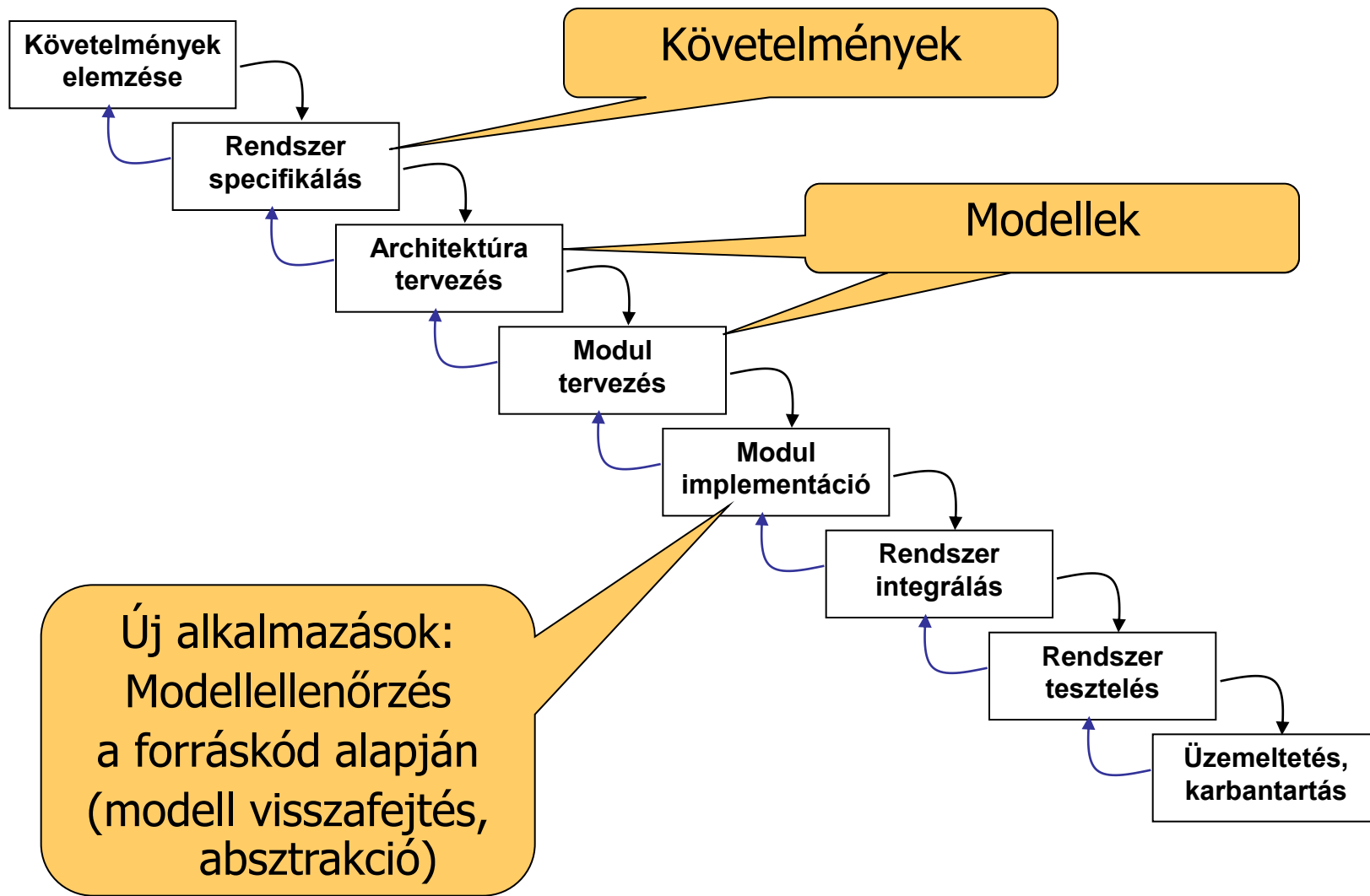
- F-SOFT (NEC):
  - Hagyományos teljes széthajtogatás
  - Unix rendszerprogramokra alkalmazták (pl. pppd)
- CBMC (CMU, Oxford University):
  - C, SystemC támogatása
  - Korlátozott ciklusbejárás (loop unrolling)
  - Egyes Linux, Windows, MacOS rendszerkönyvtárak támogatása
  - Integer aritmetikai műveletek leképezése:
    - Bitvektor szintű megvalósítás („bit-flattening”, „bit-blasting”)
  - CBMC SMT megoldóval:
    - Satisfiability Modulo Theories: Kiterjesztés különböző domének kezelésére (pl. integer aritmetika)
- SATURN:
  - Korlátozott ciklusbejárás: Max. 2 lefutás
  - Teljes Linux kernel ellenőrizhető: Null pointer hivatkozásokra

# Összefoglalás: Hatékony technikák modellellenőrzéshez

- **Szimbolikus modellellenőrzés**
  - ROBDD alakban kezelt karakterisztikus függvények
  - „Jól strukturált” problémák esetén hatékony
    - Pl. azonos viselkedésű résztvevők protokollokban
  - Változók sorrendezésétől is függ a méret
- **Korlátos modellellenőrzés invariánsokra**
  - Logikai függvények igazságának keresése (**SAT** eszköz)
  - Korlátos hosszúságú ellenpéldák keresése
    - Ha ad ellenpéldát, az mindenképpen érvényes
    - Ha nincs ellenpélda, az még nem végleges eredmény (lehet, hogy hosszabb az ellenpélda)
  - Tesztgenerálásra jól alkalmazható

# A modellellenőrzés jellemzői

# Modellellenőrzés a tervezési folyamatban





# A modellellenőrzés kedvező tulajdonságai

- Lehetséges nagy modelleméretet is kezelni
  - Akár  $10^{20}$ , de példa van  $10^{100}$ -nál nagyobb méretre is
  - Ez a rendszermodell mérete (pl. automaták hálózata)
  - Hatékony technikák: Szimbolikus, SAT alapú (korlátos)
- Általános módszer
  - Szoftver, hardver, protokollok, ...
- Teljesen automatikus eszköz, nem szükséges tervezői intuíció, erős matematikai háttérismeret
  - Tételbizonyítás ennél bonyolultabb!
- Ellenpéldát generál, ami segít a hibák javításában

2007. évi Turing Award a modellellenőrzés kifejlesztőinek:  
E. M. Clarke, E. A. Emerson, J. Sifakis (1981)

# A modellellenőrzés hiányosságai

- Skálázhatóság
  - Explicit állapottér bejárást alkalmaz
  - Hatékony technikák vannak ugyan erre, de nem garantált a jó skálázhatóság
- Elsősorban vezérlés-orientált alkalmazásokra
  - Komplex adatstruktúrák hatalmas állapotteret jelentenek
- Nehéz az eredményeket általánosítani
  - Ha egy protokoll helyes 2 résztvevő esetén, akkor helyes-e N résztvevő esetén?
- A követelmények formalizálása nem egyszerű
  - Temporális logika „nyelvjárások” alakultak ki különböző alkalmazási területeken
  - Példa: PSL (Property Specification Language, IEEE szabvány)