Hibatűrés

Majzik István
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék
http://www.mit.bme.hu/

A redundancia tipikus alkalmazása

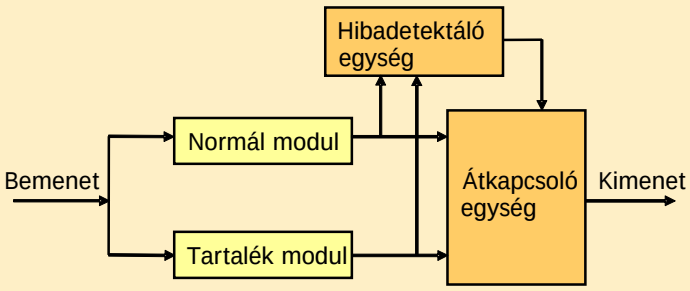
- Hardver tervezési hibák (< 1%):
  - Tipikusan nem számítanak rá (jól tesztelt komponensek)
  - Eltérő tervezésű hardver lenne szükséges
- Hardver állandósult működési hibák (~10%):
  - Hardver redundancia (pl. tartalék processzor)
- Hardver időleges működési hibák (~70-80%):
  - Szoftver redundancia (pl. állapotmentés és helyreállítás)
  - Idő redundancia (pl. utasítás újravégrehajtás)
  - Információ redundancia (pl. hibajavító kódolás)
- Szoftver tervezési hibák (~10-20%):
  - Szoftver redundancia (pl. eltérő tervezésű modulok)

Hibatűrés állandósult hardver hibák esetén

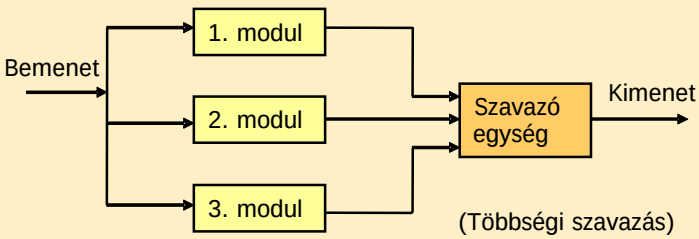
Hardver redundancia

Többszörözés:

- Kettőzés:
  - Hibadetektálás összehasonlítással
  - Hibatűrés: Diagnosztikai támogatás és átkapcsolás



- TMR: Triple-modular redundancy
  - Hiba maszkolása többségi szavazással
  - Szavazó kritikus elem (de egyszerű)

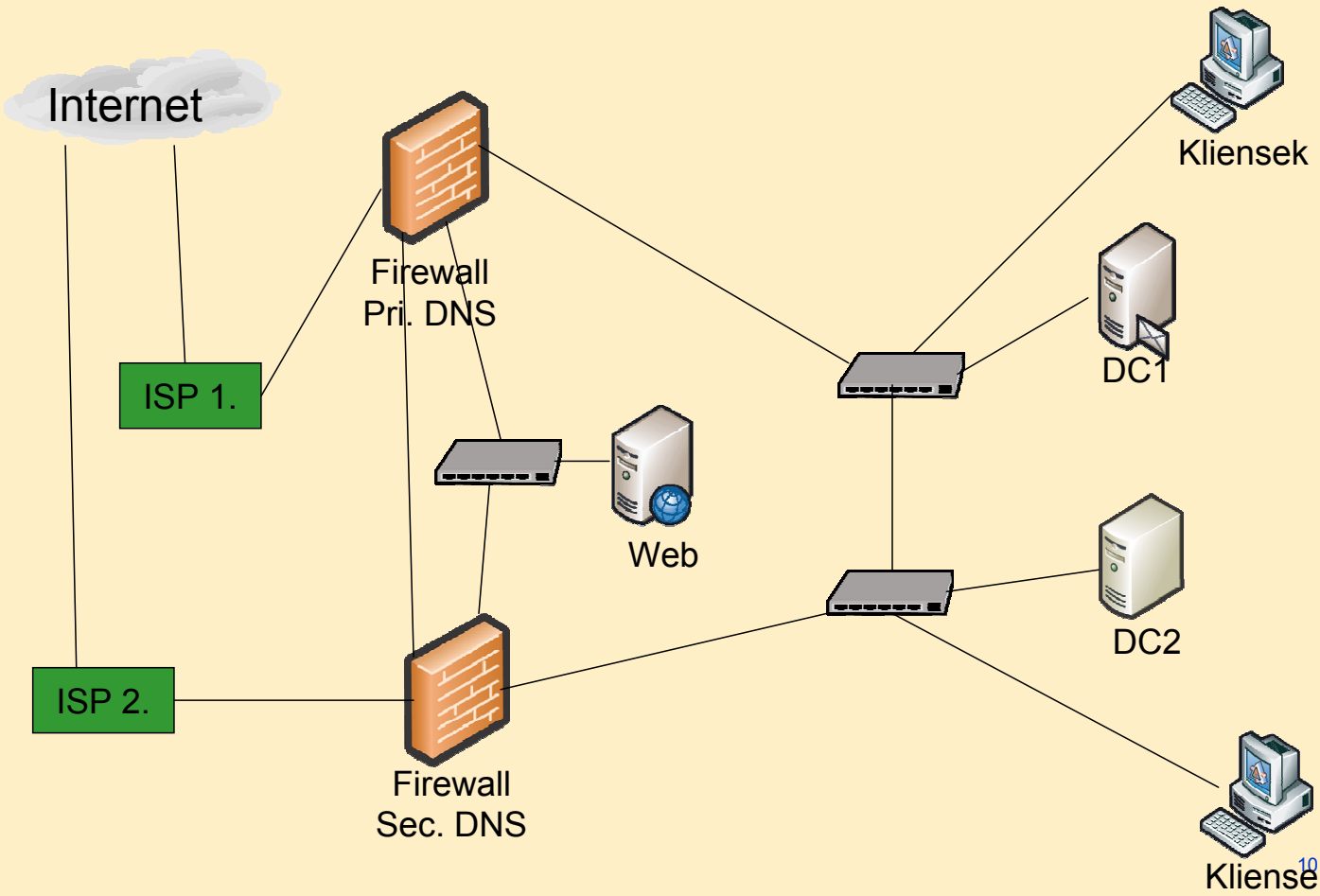


- NMR: N-modular redundancy
  - Hiba maszkolása többségi szavazással
  - Missziós idő túlélése nagyobb esélyű, utána javítás jöhet
  - Repülőgép fedélzeti eszközök: 4MR, 5MR

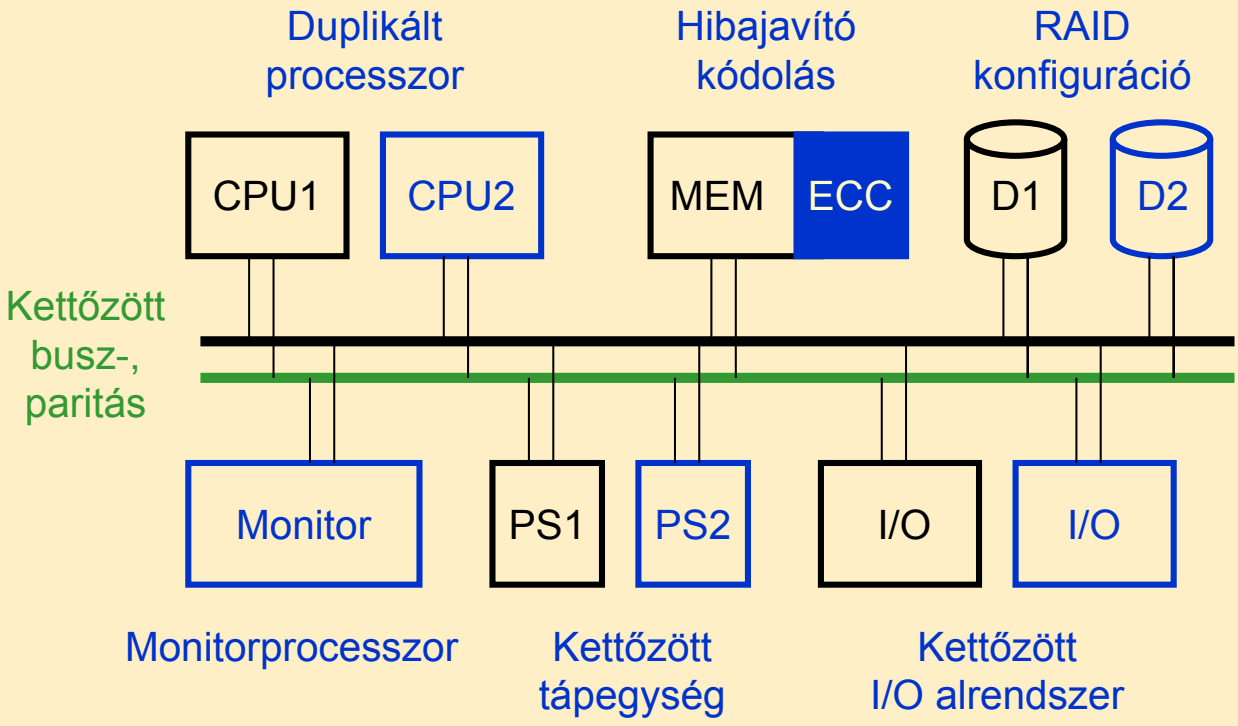
A redundancia szintje

- Komponens (szerver) szint: Lazán csatolt
  - Nagy rendelkezésreállású szerver fürtök (klaszterek)
    pl. Sun HA cluster, HA Linux
  - Szoftver támogatás: állapotszinkronizálás, tranzakciók
- Kártya szint:
  - Futásidőbeli átkonfigurálás “hot-swap”
    pl. compactPCI, HDD
  - Szoftver támogatás: konfigurációkezelés
- Alkatrész szint: Szorosan csatolt
  - Alkatrész szintű többszörözés
    pl. TMR, önellenőrző áramkörök

Példa: Komponens redundancia…

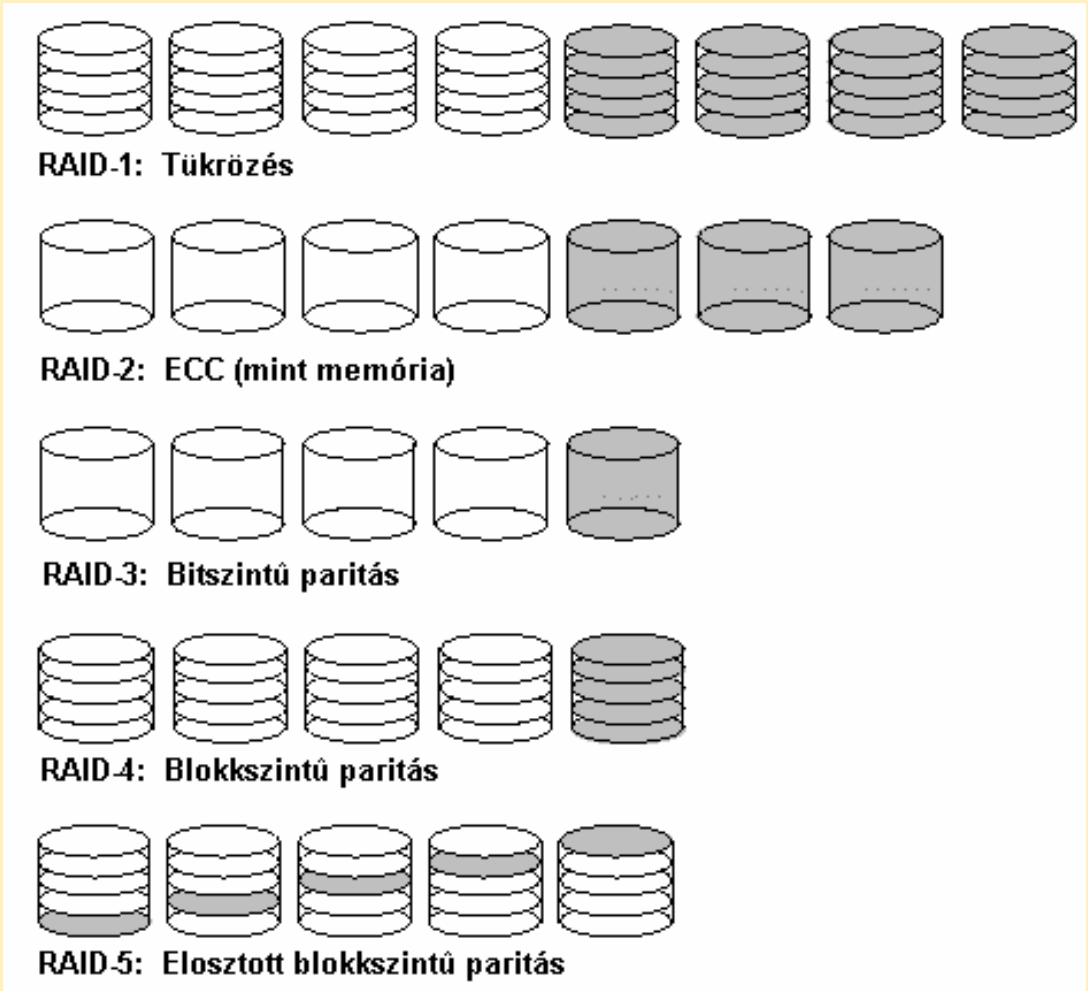


Példa: Kártya szintű redundancia…



Példa: RAID diszk egységek

(Redundant Array of Independent Disks)



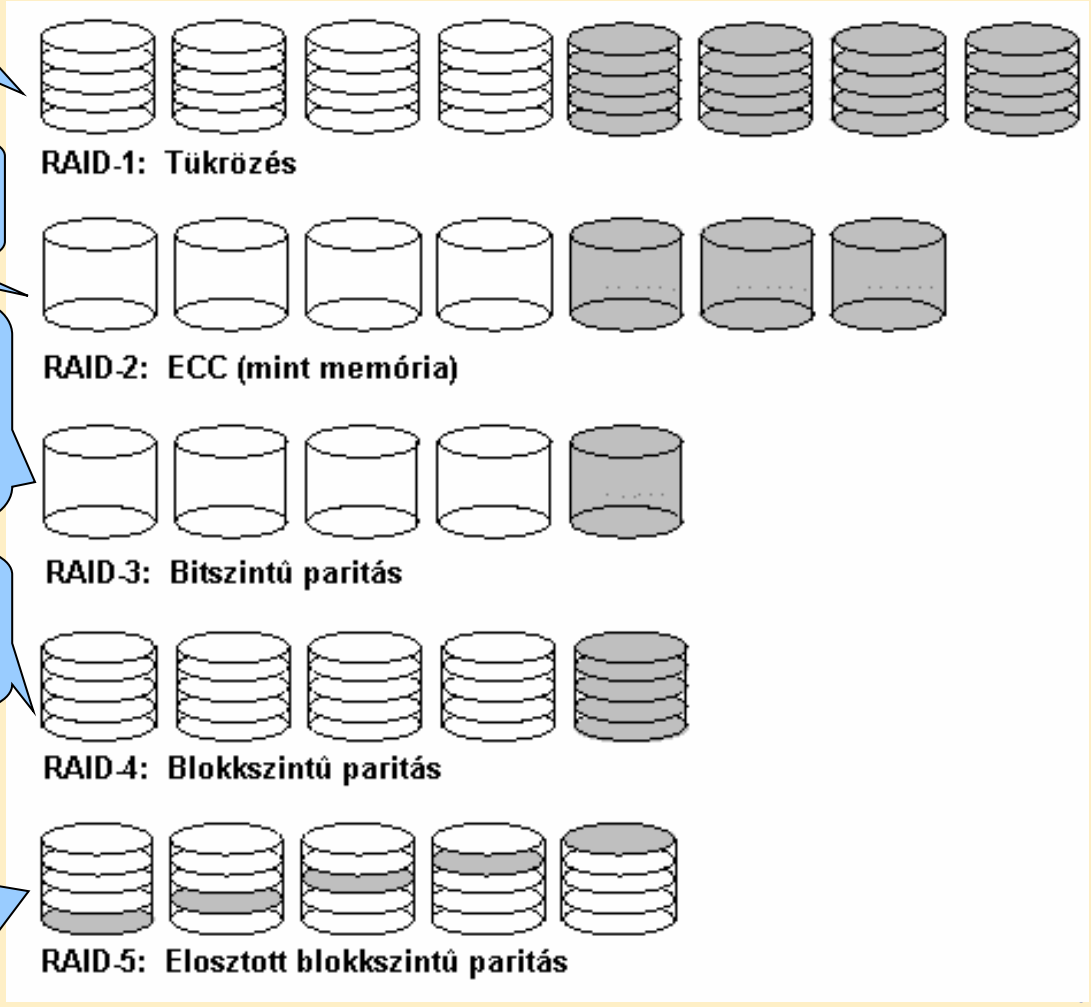
Duplikált diszkek

Hibajavító kódolás

Azonosítható a hibás diszk: Paritás elég a javításhoz

Konkurens hozzáférés a blokkokhoz

Paritásdiszk sem szűk keresztmetszet



Hibatűrés időleges hardver hibák esetén

Időleges hardver hibák kezelése

Megközelítés: Szoftver alapú

- Ismételt végrehajtás esetén a hiba nem jelentkezik
- Hibahatások kiküszöbölése a fontos

A hiba kezelhető hibamentes állapot beállításával (és ismételt végrehajtással)

Feladatok (fázisok):

1. Hibadetektálás
2. Hibahatás felmérése
3. Helyreállítás
4. Hibaok (meghibásodás) kezelése

1. Hibadetektálás

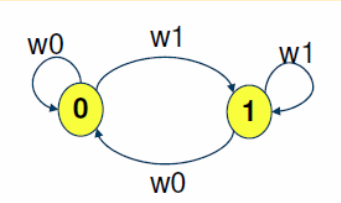
- Alkalmazásfüggetlen mechanizmus: processzor, MMU, operációs rendszer szintjén
  - Illegális utasítás
  - Védelmi szintek, jogosultságok (pl. memória hozzáférés)
- Alkalmazásfüggő, ad-hoc módszer:
  - Időzítések ellenőrzése
  - Hihetőségvizsgálat
  - Visszahelyettesítés (algoritmus)
  - Struktúra ellenőrzés
  - Diagnosztikai ellenőrzés
  - …

Példa: SAFEDMI

- Indításkor:
  - Részletes öntesztelés
    - Processzor („core” utasítások alapján) + watchdog timer
    - Memória: teszt algoritmusok
- Működés közben:
  - Periodikus tesztelés
    - Kisebb erőforrásigényű technikákkal
  - On-line ellenőrzések:
    - Kommunikáció, konfigurálás: Hibadetektáló kódolás, adatok elfogadhatósági ellenőrzése
    - Vezérlési funkciók: Vezérlési gráf ellenőrzése (jelzőszámok)
    - Intenzív adatfeldolgozás: Duplikált végrehajtás és összehasonlítás

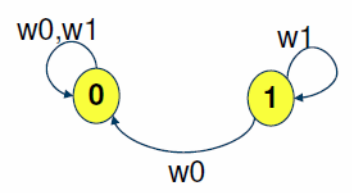
Példa: Memória tesztelése

Egy cella állapotai:

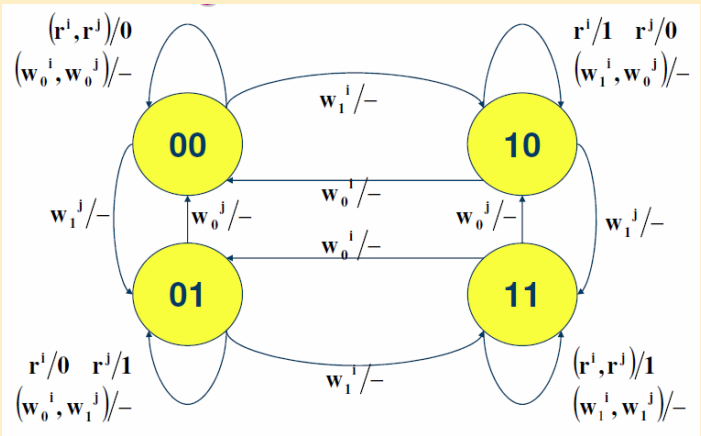


Leragadási hibák:

Tranzíciós hibák:



Összeragadás tesztjéhez:



„March” algoritmusok:

				1
			1	
		1		
	1			
1				

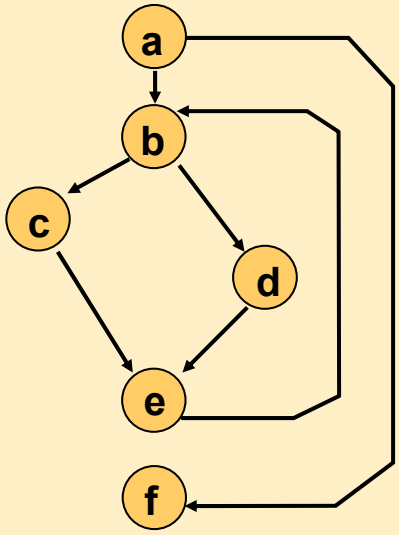
Példa: Szoftver önellenőrzés

- Végrehajtási útvonalak ellenőrzése
  - Referencia: Vezérlési gráf alapján

Forráskód:

```
a:  for (i=0; i<MAX; i++) {
b:      if (i==a) {
c:          n=n-i;
        } else {
d:          m=m-i;
        }
e:      printf("%d\n",n);
    }
f:  printf("Ready.")
```

Vezérlési gráf:



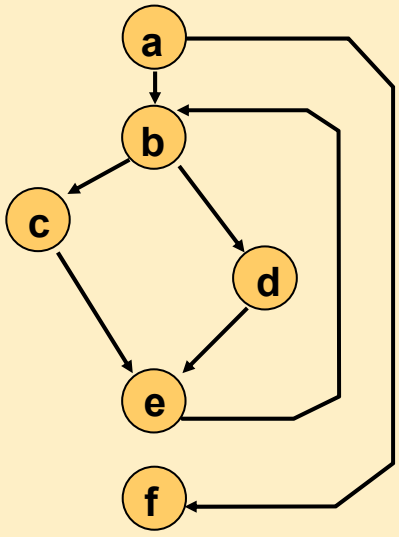
Példa: Szoftver önellenőrzés

- Végrehajtási útvonalak ellenőrzése
  - Referencia: Vezérlési gráf alapján
  - Aktuális futás: Jelzőszámok alapján ellenőrizhető

Forráskód:

```
a:  S(a); for (i=0; i<MAX; i++) {
b:      S(b); if (i==a) {
c:          S(c); n=n-i;
        } else {
d:          S(d); m=m-i;
        }
e:      S(e); printf("%d\n",n);
    }
f:  S(f); printf("Ready.")
```

Vezérlési gráf:



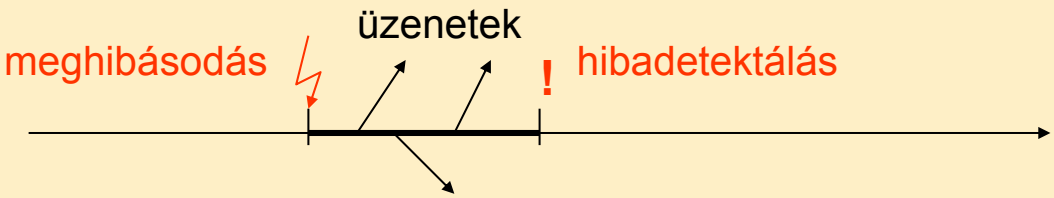
Járulékos feladatok

Keretrendszer hibadetektáláshoz (monitorozáshoz)

- Alkalmazásfüggő technikák beillesztése
- Detektálás ütemezése
- Hibajelzések kiadása
  - Ismételt hibajelzések kiszűrése
  - Függőségek kezelése (root cause analysis)
  - Naplózás
- Megszűnő hiba jelzése
- Hozzáférés hibajelzésekhez
  - Nézetek, szerepek
  - Nyugtázás

2. Hibahatások felmérése

- Hibadetektálás késleltetési ideje alatt a hiba terjed
  - Pl. elosztott rendszer komponensei között, processzek között



- Hibaterjedés behatárolása
  - Interface (kimeneti, bemeneti) ellenőrzés
  - Erőforrásokhoz való hozzáférés korlátozása
  - Atomi jellegű műveletek kialakítása
- Hibaterjedés felmérése: interakciók követése
  - Interakciók naplózása
  - Diagnosztikai ellenőrzések

3. Helyreállítás

Egyszerű technikák:

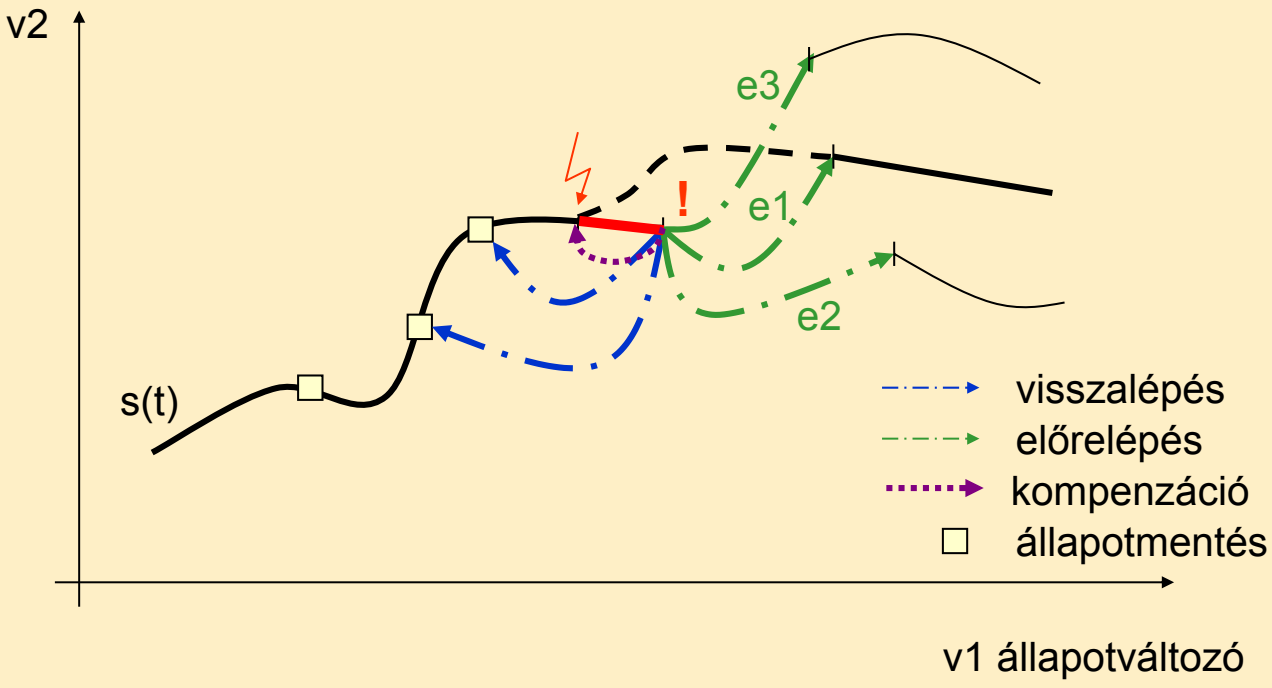
- Retry, restart, reboot; meleg reset, hideg reset; frame boundary

Összetett technikák:

- Előrelépő helyreállítás:
  - Hibamentes állapot beállítása: szelektív korrekció
  - A detektált hiba és a hibahatás függvénye
  - Előre figyelembe vett hibák esetén
- Visszalépő helyreállítás:
  - Előző hibamentes állapot beállítása
  - Hibától függetlenül megvalósítható
  - Állapotmentés és visszaállítás minden komponensre
- Kompenzáció:
  - Többlet információ alapján a hibahatás kompenzálható

A helyreállítási lehetőségek áttekintése

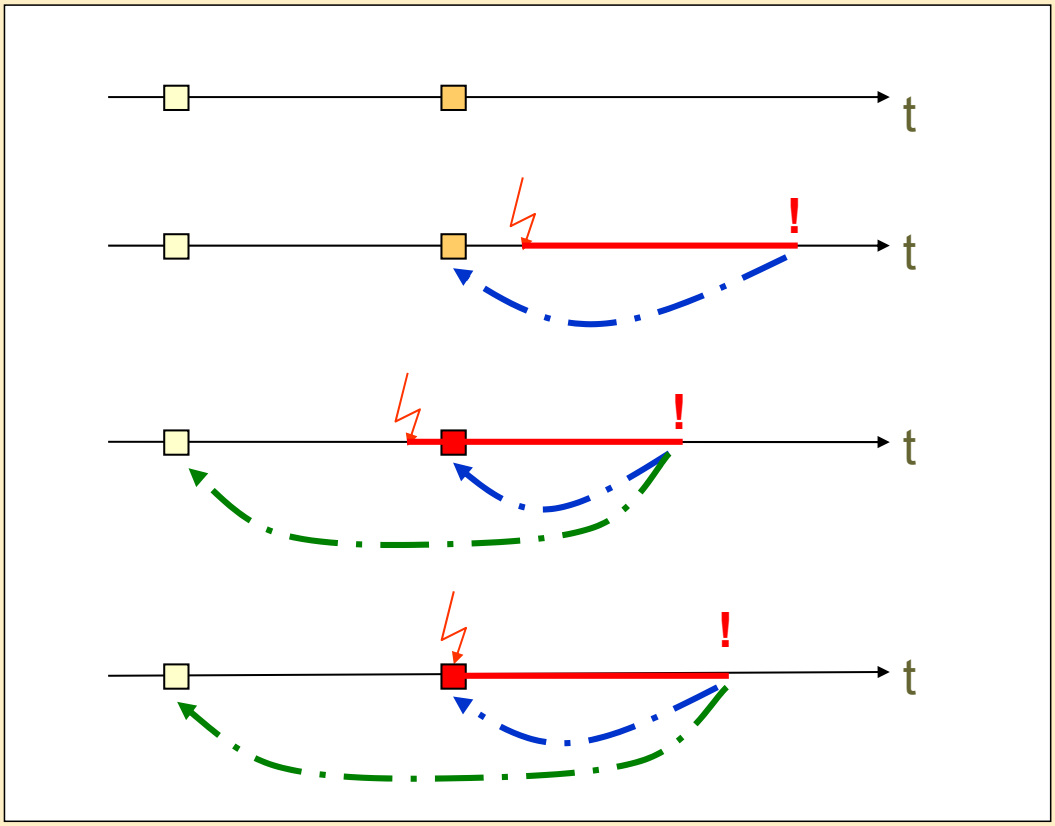
- Ábrázolás a rendszer állapotterében:



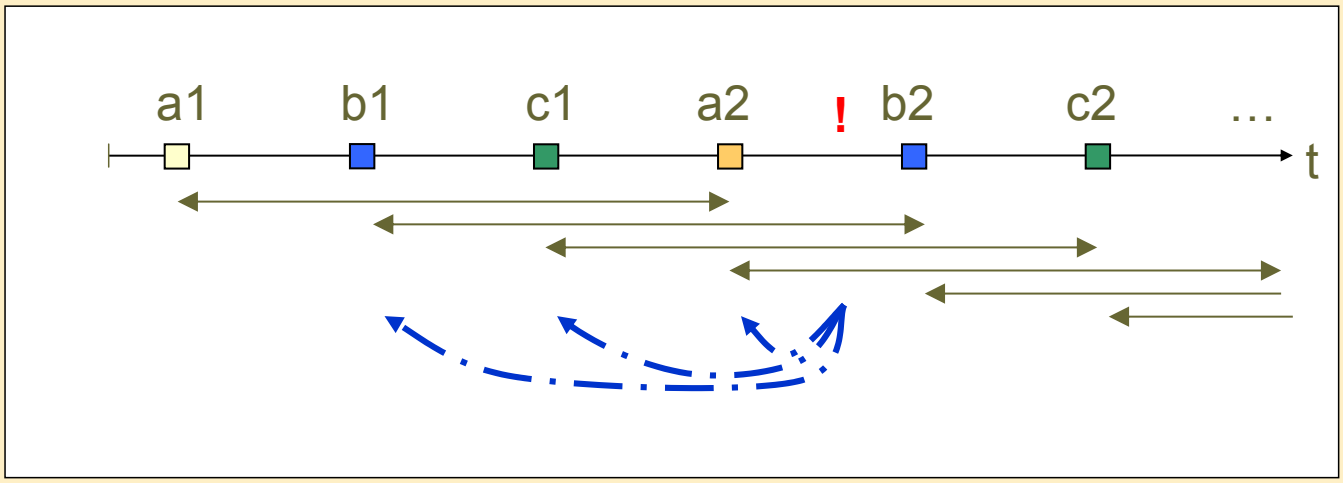
Visszalépő helyreállítás

- Állapotmentés alapján
  - Checkpoint: állapotmentés (időpontja)
  - Műveletek:
    - Állapotmentés: időközönként, üzenetek után
    - Visszaállítás: mentésből az operatív memóriába
    - Eldobás: adott számú checkpoint megtartása
  - Feltételezett hiba: időleges hardver hiba
  - Pl: “autosave”
- Műveletek visszavonása alapján
  - Műveletek naplózása szükséges
  - Feltételezett hiba: a téves vagy szándékolatlan művelet
  - Pl. többszintű “undo”
- Kombinált módszer

Visszalépő helyreállítás forgatókönyvei



Checkpoint tartományok

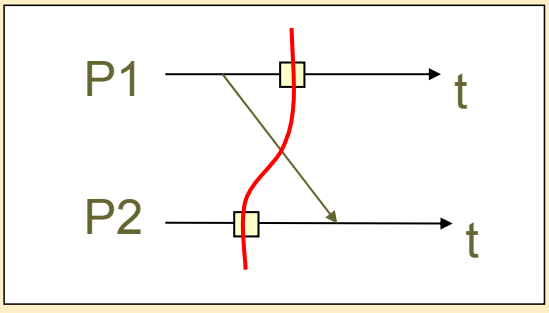


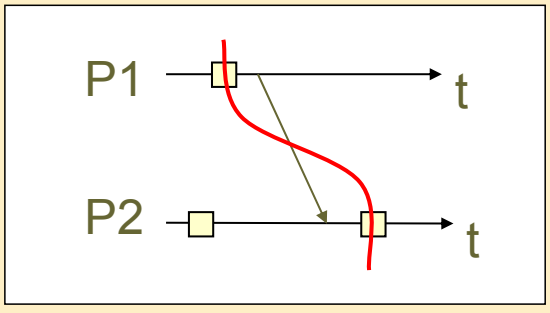
Optimalizálás szempontjai:

- Korlátos tár az állapotmentéshez
- Állapotmentés gyakorisága (elvesztett számítások)
- Hibadetektálás lappangási ideje

Helyreállítás elosztott rendszerekben

Üzenetek „metszik” a helyreállított állapotok által kijelölt vágatot:





Függő üzenet:

- Előtte elküldött
- Utána feldolgozott

Inkonzisztens üzenet:

- Utána elküldött
- Előtte feldolgozott

Visszalépés megvalósítása

- Előfeltételek:
  - Determinisztikus működés
  - Környezettel való együttműködés kezelése
    - Naplózás, késleltetés, ellensúlyozás
- Hatékony megvalósítás:
  - Másolatok használata (shadow update, recovery cache)
  - Konkurens állapotmentés
  - Többszintű állapotmentés („soft” és „hard” checkpoint)
- Stabil tár koncepciója (mentett állapot tárolása)
  - Perzisztens
  - Atomi hozzáférésű
  - Autonóm működésű
  - Hibajavítást tartalmaz
  - Információrejtést alkalmaz

4. Meghibásodás (hibaok) kezelése

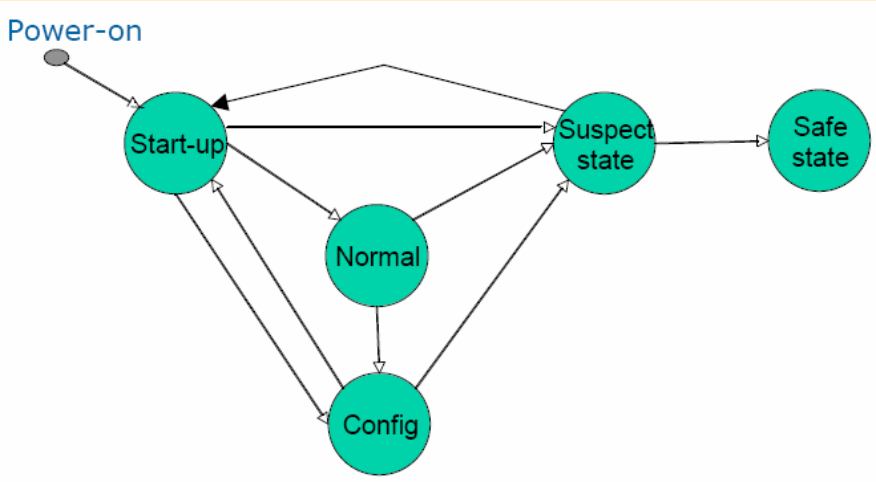
- Időleges hibák:
  - Előre- vagy visszalépő helyreállítás elég
- Állandósult hibák:

  Helyreállítás nem lesz sikeres (újra hibadetektálás)
  - Ez mechanizmus lehet az állandósult hiba felismerésére

  Hiba lokalizálás (diagnosztika) után beavatkozás kell:
  - Újrakonfigurálás:
    Hibás komponens feladatainak átvétele
  - Javítás, csere
  - Graceful degradation:
    Csökkentett funkcionalitású működés,
    de a kritikus funkciókat megtartva

Példa: SAFEDMI hibakezelés

- Működési módok:
  - Startup, Normal, Configuration
- Hibadetektálás esetén: Tranziens hiba feltételezése
  - Visszalépés Startup állapotba és részletes önteszt
- Állandósult hiba lehetőségének kezelése:
  - Visszalépés Suspect állapoton keresztül:
    Hibaszámlálás (adott idő alatt korlátozott számú visszalépés megengedett)
  - A hibaszám túllépése esetén Safe állapotba lépés (leállítás)



Hibatűrés szoftver tervezési hibák esetén

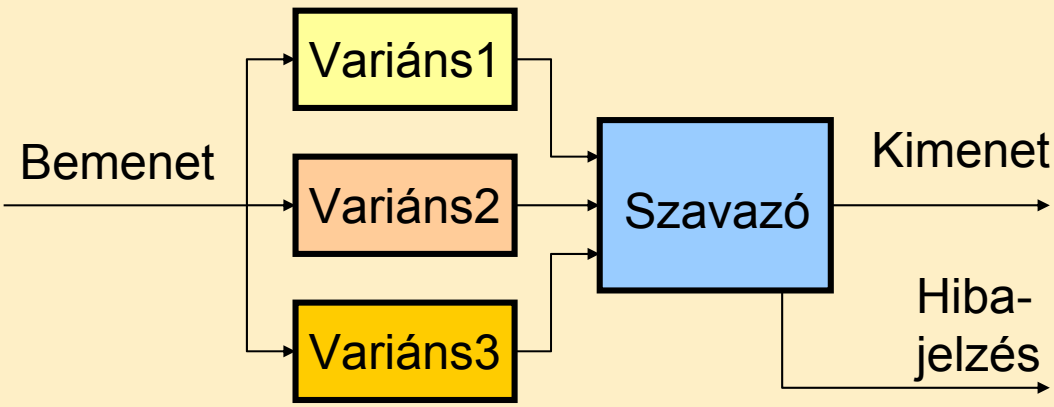
Szoftver tervezési hibák

- Ismételt végrehajtás nem segít (állandósult hiba)
- Redundáns modulok: Eltérő tervezés szükséges
- Variánsok: azonos specifikáció, de
  - eltérő algoritmus és/vagy adatstruktúrák (diverzitás)
  - más fejlesztési környezet, programnyelv
  - elszigetelt fejlesztés

  az azonos hibák bekövetkezésének csökkentésére
- Variánsok végrehajtásának technikái:
  - N-verziós programozás (NVP: N-version programming)
  - Javító blokkok (RB: Recovery block)
  - N-önellenőrző programozás (NSCP: N-self-checking programming)
  - Önkonfiguráló optimista programozás (SCOP: Self-configuring optimistic programming)

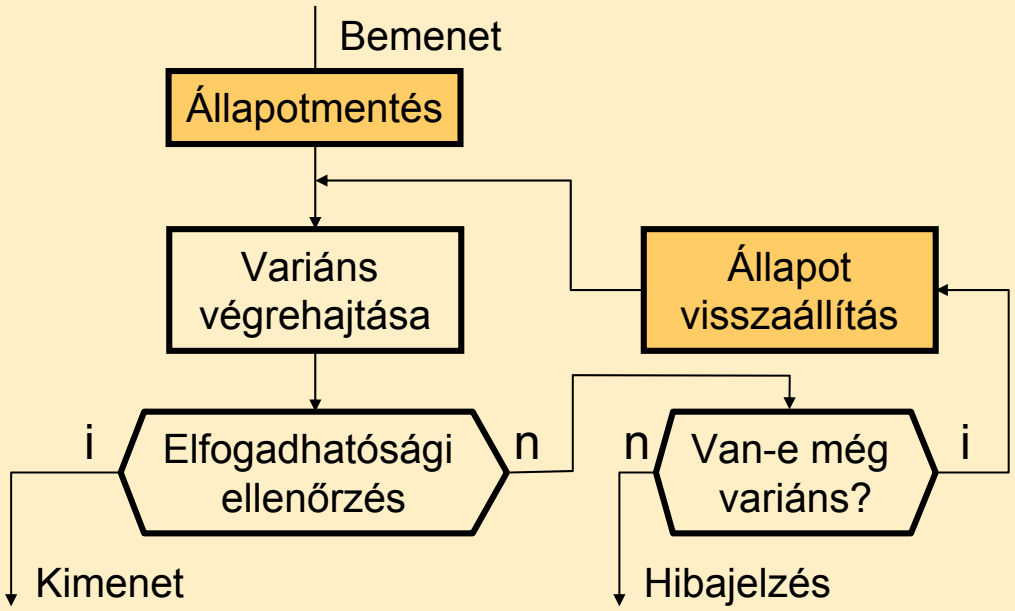
1. N-verziós programozás (NVP)

- Aktív statikus redundancia:
  Minden variáns végrehatása (párhuzamosan)
  - ugyanazon bemenetek
  - többségi szavazás
    - elfogadható értéktartományt kell megadni a kimenetekre
    - szavazó egyszeres hibapont (SPOF), de egyszerű
- Kritikus komponens: Szavazó és a futtató környezet



2. Javító blokkok (RB)

- Passzív redundancia: Csak hiba esetén aktiválódik
  - variánsok kimenetének elfogadhatósági ellenőrzése
  - hiba esetén tartalék variáns (soros) végrehajtása

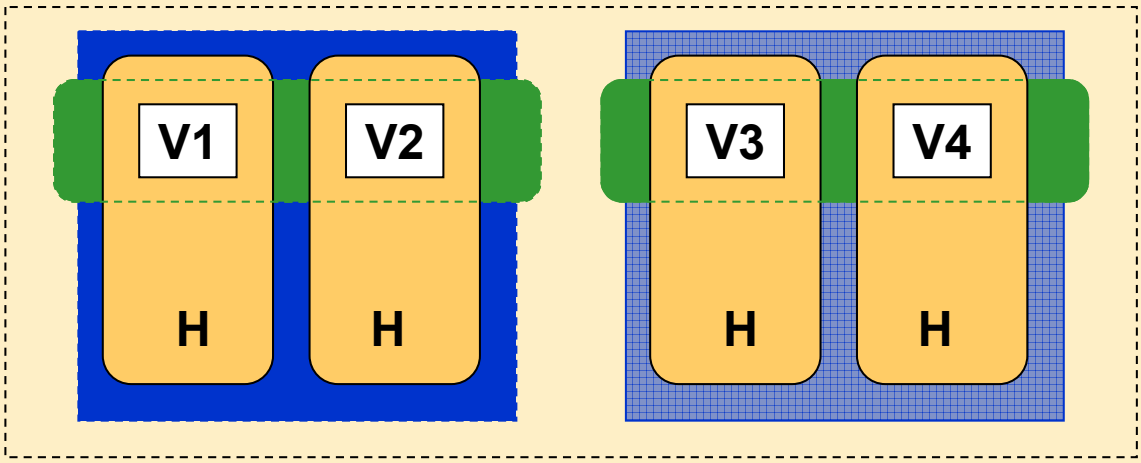


Összehasonlítás

Tulajdonság/típus	**N-verziós prg.**	**Javító blokkok**
Ellenőrzés	Szavazás, relatív	Elfogadhatóság abszolút
Végrehajtás	Párhuzamos	Soros
Időigény	Leglassabb variáns (vagy time-out)	Hibák számától függő
Redundancia	Mindig	Csak hiba esetén
Tolerált hibák	[N/2-1]	N-1
Hibakezelés	Maszkolás	Helyreállítás

3. N-önellenőrző programozás (NSCP)

- Aktív dinamikus redundancia:
  N számú önellenőrző komponens
- Hibadetektálás esetén átkapcsolás az elsődlegesről a (következő) önellenőrző tartalékra
- Jellegzetes példa: Airbus A-320 fedélzeti számítógép
  - Páronként önellenőrző végrehajtás (szoftver variánsok)
  - Elsődleges pár működik, átkapcsolás hiba esetén
  - Állandósult hardver hiba: Ismételten hibázó pár lekapcsol



4. Önkonfiguráló optimista programozás (SCOP)

Adaptív redundancia: Csak a szükséges számú variáns

- Paraméterek:
  - Hány variáns egyetértése (azonos kimenet) szükséges: a
  - Hány variáns van: n
  - Mennyi idő áll rendelkezésre: t
- Iteratív végrehajtás
  1. Kezdetben a minimális számú (várhatóan egyetértő) variáns végrehajtása: a számú variáns
  2. Kimenetek ellenőrzése komparálással: k egyezik
     - Ha k=a, akkor kilépés: OK
     - Ha k<a, akkor (optimista módon) a-k újabb variáns végrehajtása az egyetértés eléréséhez, és folytatás a 2. lépéssel
     - Kilépés hibajelzéssel:
       Ha nincs több végrehajtható variáns, vagy letelt a t idő

Adat diverzitás

- Alapötlet:
  - Azonos feldolgozási algoritmus, de eltérő adatszerkezetű variánsok (implementáció ezért némileg eltérő)
    - Pl. vektor vagy láncolt lista
    - Pl. más adatbázis kezelő, más lekérdezési mód
  - Másolatok (replikák): Azonos szoftver komponensek, de eltérő állapotok lehetnek
    - Pl. numerikus eltérések, más adatbázis példányok
- Végrehajtási módok:
  - Újrapróbáló blokk (retry block):
    - Javító blokkok analógiája: Passzív redundancia szerinti végrehajtás
  - N másolat (N-copy programming):
    - NVP analógiája: Aktív redundancia szerinti (párhuzamos) végrehajtás

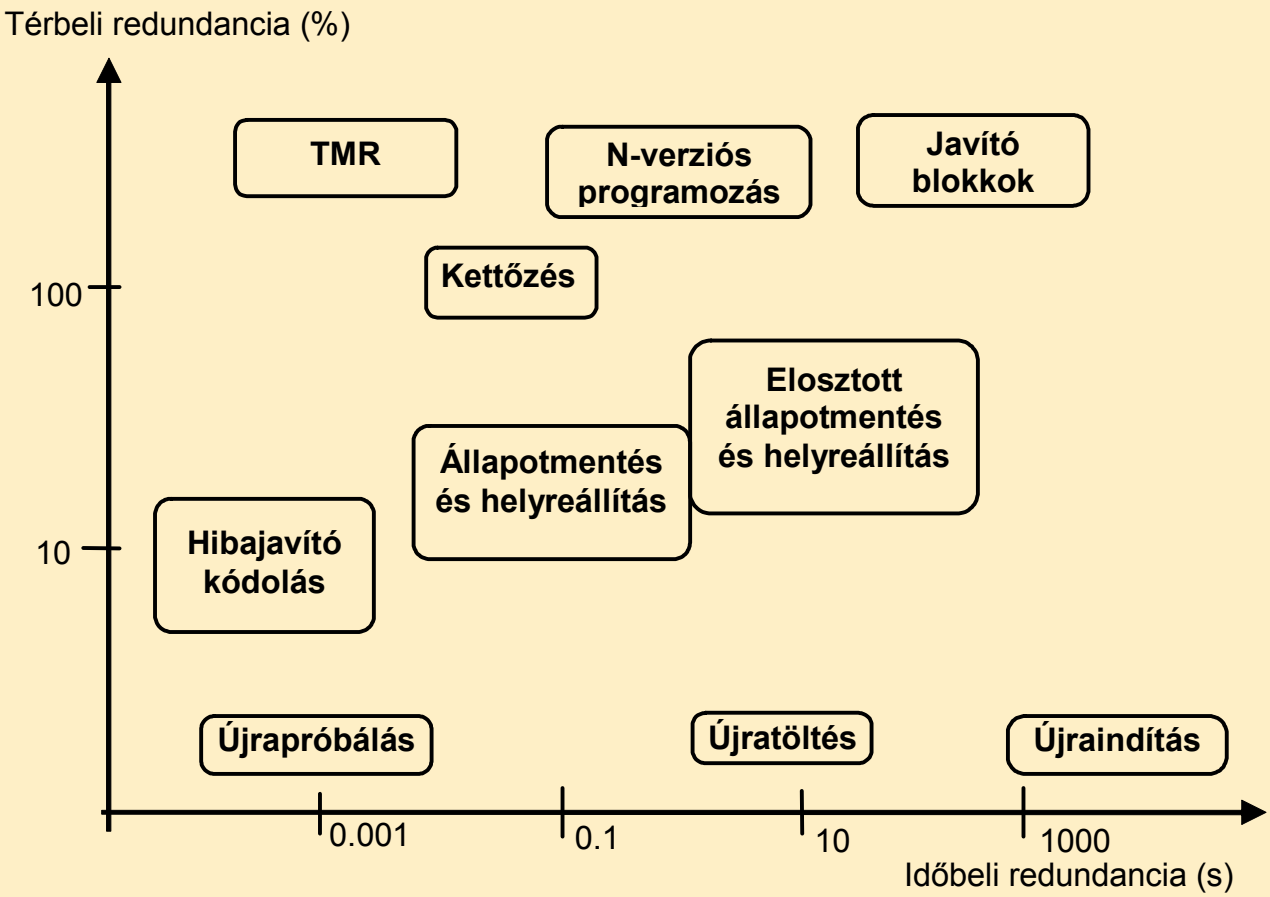
Hibrid technikák (ld. gyakorlat)

Típus / hardver hibák / szoftver hibák tolerált száma

- RB/1/1
  - Elfogadhatósági teszt után komparálás
  - Diagnosztikai ellenőrzés után a hibás lekapcsol
- RB/2/1
  - Elfogadhatósági teszt után szavazás
  - Ismételten eltérő lekapcsol (RB/1/1 lesz)
- NVP/1/1
  - Variánsok közötti szavazás
  - Ismételten eltérő lekapcsol (komparálás marad)
- NVP/2/1
  - 4 variáns esetén szavazás
  - Ismételten eltérő lekapcsol, újrakonfigurálás után NVP/1/1 lesz
- NSCP/1/1
  - Önellenőrzés
  - Ismételten eltérő pár lekapcsol

Összefoglalás

Hibatűrési technikák összehasonlítása



Szabvány szerinti módszerek

- IEC 61508: Functional safety in electrical / electronic / programmable electronic safety-related systems
- Szoftver architektúra tervezés

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.

Összefoglalás: Hibatűrés technikái

1. Állandósult hardver hibák
   - Hardver redundancia: többszörözés
3. Időleges hardver hibák
   - Szoftver redundancia
     1. Hibadetektálás
     2. Hibahatás felmérés
     3. Helyreállítás: visszalépő vagy előrelépő
     4. Hibaok kezelése
   - Információ redundancia: Pl. hibajavító kódolás
   - Idő redundancia: Pl. utasítás ismétlés
2. Szoftver tervezési hibák
   - Eltérő tervezésű variánsok: Pl. NVP, RB, NSCP, SCOP