

Fedélzeti adatfeldolgozó rendszerek 1.



Csurgai-Horváth László, BME-HVT
2023.

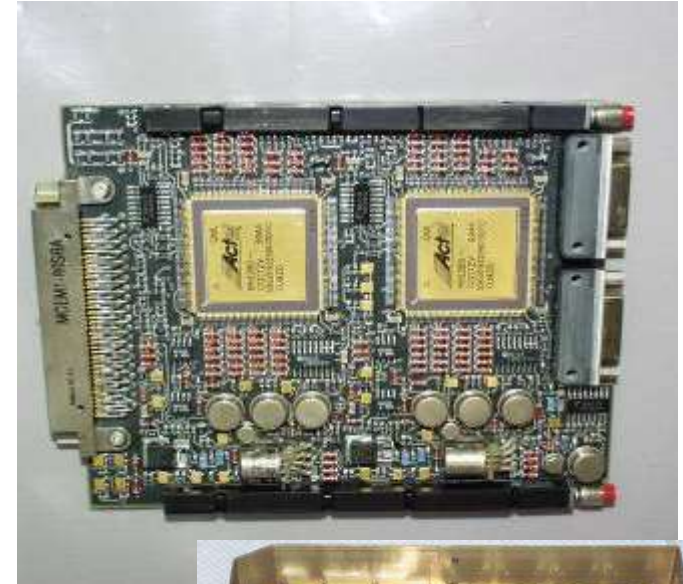


Az érintett tématerületek

Követelmények és alkatrészek

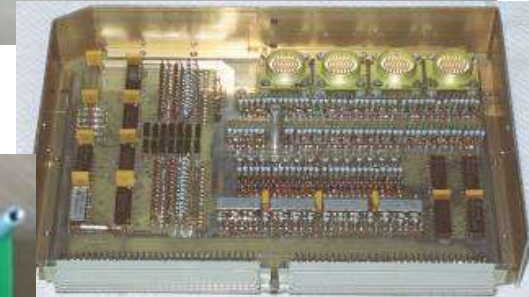
Külső hatások áttekintése

Digitális tervezési megfontolások

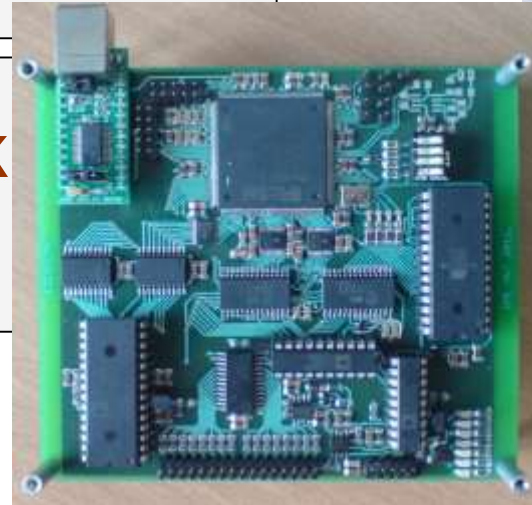


A fedélzeti számítógép

A fedélzeti adatgyűjtő



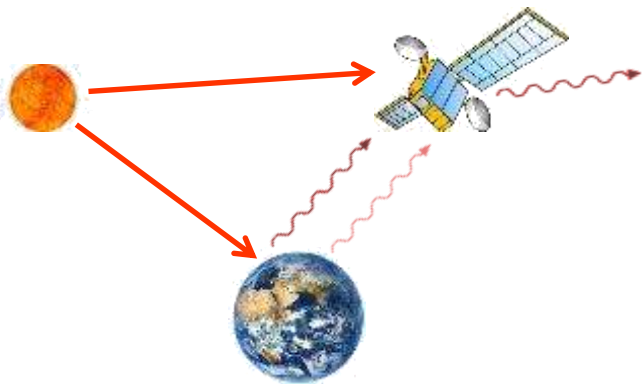
Programozható áramkörök alkalmazása



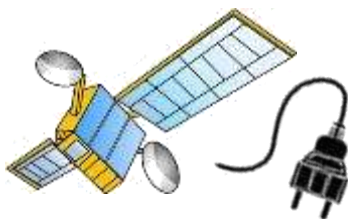
Digitális áramkörök üreszközökön

- Energiaellátó rendszer
- Navigációs és tájoló rendszer
- Telemetria rendszer, rádióadók és vevők
- Fedélzeti számítógép
- Központi mérés-adatgyűjtés
- Kísérletek
- ...

Az űrbeli környezet sajátosságai



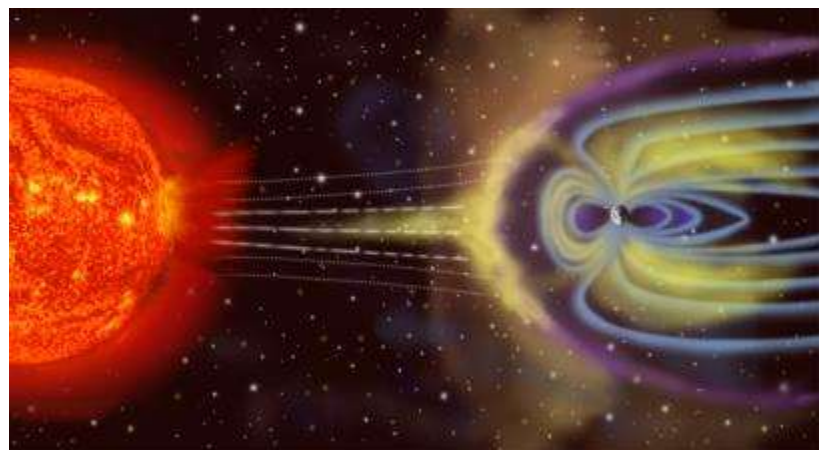
■ Hőmérséklet



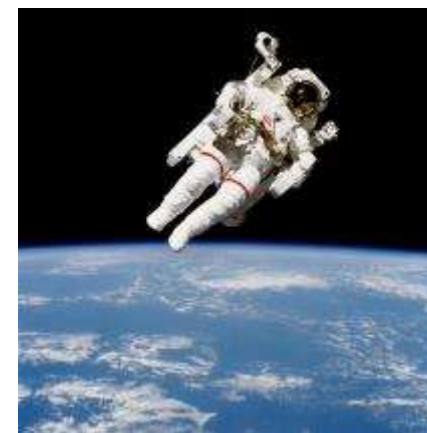
■ Energia



■ Vibráció



■ Sugárzás



■ Vákuum

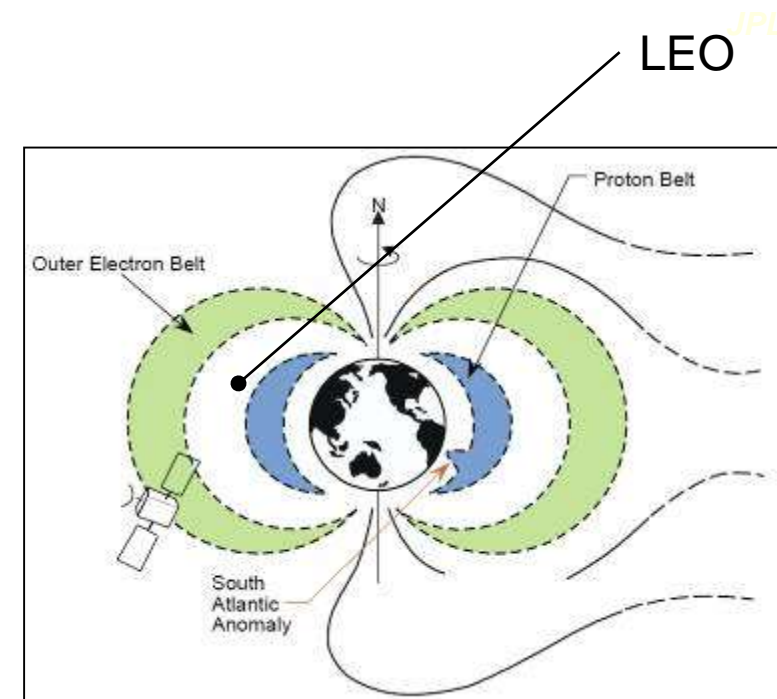
Adatok a világűrbeli környezetről

- A kozmikus háttérsugárzás hőmérséklete (világűr): 2.725 K
- Vákuum:
 - Szublimáció (anyagpárolgás, fémek összehegedése; lakkozás segíthet)
- Hőmérséklet a műhold belsejében
 - Függ a Nap távolságától és a felülettől
 - Általában az áramkörök üzemi hőmérséklettartományába esik
 - Vákuum esetén a hő elvezetése okozhatja a nagyobb gondot!
 - Külső alkatrészek esetén szélsőséges értékek léphetnek fel
- Mechanikai igénybevétel
 - 1 Hz-10 kHz spektrumú vibráció (start)
 - ~5-10 g igénybevétel (hordozórakéta függő)
- Külső mágneses tér
 - Jelentős indukált feszültségek keletkezhetnek
- Sugárzás
 - elektromágneses
 - részecske

Részecskesugárzás 1.

■ Alaptípusok

- Galaktikus kozmikus sugárzás
 - protonok, α részecskék = He^{2+} , nehézionok
 - nagy energiájúak (100MeV-10GeV) → nem árnyékolható
- Napkitörések
 - töltött részecskék (proton, α)
 - közepes energiájúak → árnyékolható
- Földi specialitás: a Van-Allen öv
 - töltött részecskék (proton, elektron)
 - a Föld mágneses tere által koncentrált



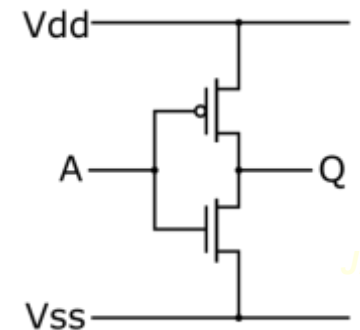
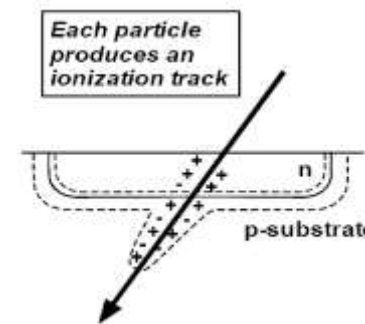
Részecskeugárzás 2.

Single Event Effects (SEE), egyetlen részecske okozza:

- SEL latch-up: soft / hard hiba (Linear Energy Transfer Rate: 10-100 MeV/mg/cm² esetén)
- SEU upset: soft hiba pl. memóriáknál

Total Ionizing Dose / TID Rácsszerkezeti változás

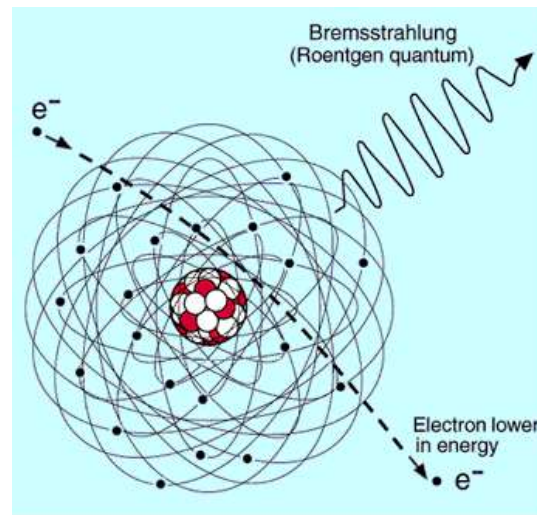
- LEO 300-1400km ~ 2krad/év
- MEO 1400-4000km ~ 100krad/év
- GEO 36000km ~ 10krad/év
- Mars ~ 5krad/year (proton)
- Óriásbolygók ~ 0,1-100Mrad/év (proton, elektron)



Részecskesugárzás 3.

■ Árnyékolás

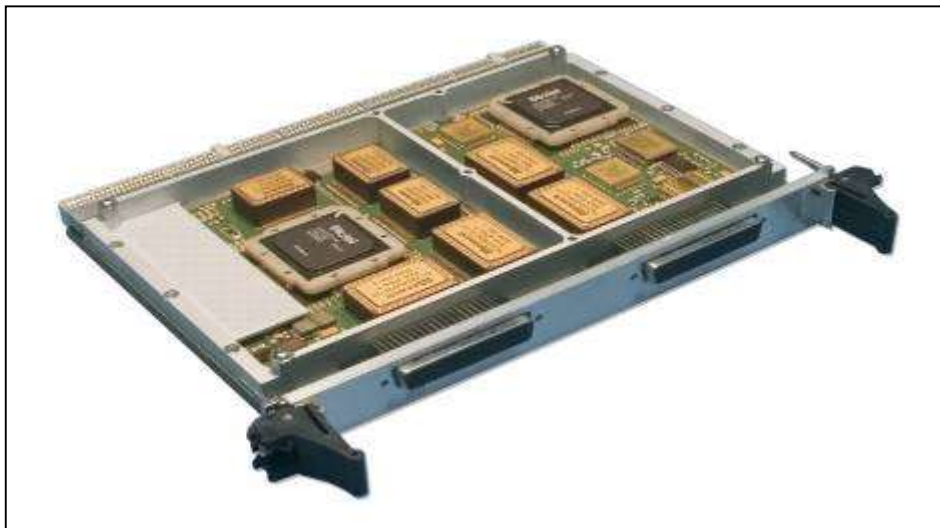
- proton/elektron $< 30\text{MeV}$: alumínium 1-3 mm, polietilén
- proton, röntgen, gamma: Ta
- nagy atomszámú anyagok használata (protonszám)
- másodlagos sugárzás alakulhat ki:



- aktív védelem: elektrosztatikus vagy elektromágneses árnyékolás
- Az elektronok árnyékolása megoldható, a nagyobb problémát a protonok elleni védelem okozza – ionizáló sugárzás (elektron-eltávolító)

Részecskesugárzás 4.

- Töltött részecskék hatása félvezetőkben
 - ionizáció, rácsszerkezet-változás, melegedés
- Diódák: visszáram és letörési feszültség növekedés
- Tranzisztorok: erősítés-csökkenés, karakterisztika változás
 - FET / MOS : ionizáló sugárzásra különösen érzékenyek
- Integrált áramkörök: az egyes építőelemeknek megfelelően
- 1 rad = 10^{-5} Joule/g befogadott energia (>550 rad halálos)
- Rosetta: >15 krad alkatrész tolerancia / 2mm Al árnyékolás mellett



Rad-Hard / Rad-Tolerant

	Radiation Tolerant	Radiation Hardened	Strategic Rad-Hard
Total Dose	< 300 Krad	300 Krad -1 Mrad	> 1 Mrad
Dose Rate Upset	< 10^7 rad/s	$10^7 - 10^{10}$ rad/s	> 10^{10} rad/s
Dose Rate Survivability	< 10^{10} rad/s	$10^{10} - 10^{12}$ rad/s	> 10^{12} rad/s
Single Event Upset	> 10^{-10} errors/bit-day*	$10^{-10} - 10^{-11}$ errors/bit-day*	< 10^{-11} errors/bit-day*
Single Event Latchup	immune	immune	immune
Neutron	< 10^{12} MeV-cm ² /mg	$10^{12} - 10^{14}$ MeV-cm ² /mg	> 10^{14} MeV-cm ² /mg

Elyelt dózis:
energia/tömeg

Pálya és dózis

Sugárzási hatások adott pályán:

<https://www.spenvis.oma.be/>

Pályaelem készletek:

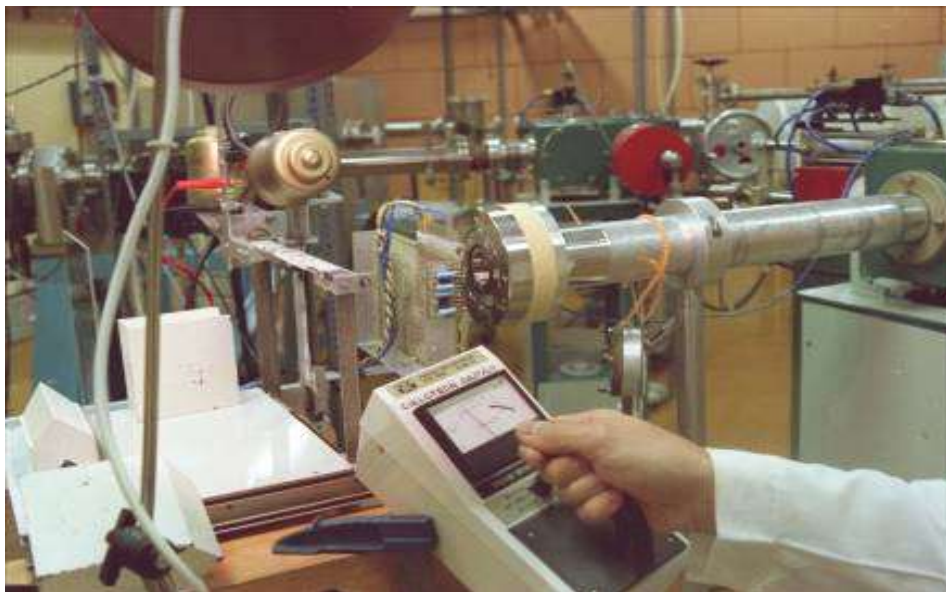
<https://celestrak.com/>

TLE formátum:

<https://www.celestrak.com/NORAD/documentation/tle-fmt.php>

Elektronikus alkatrészek sugárzásállóságának vizsgálata ciklotronban BME-ATOMKI, 1988

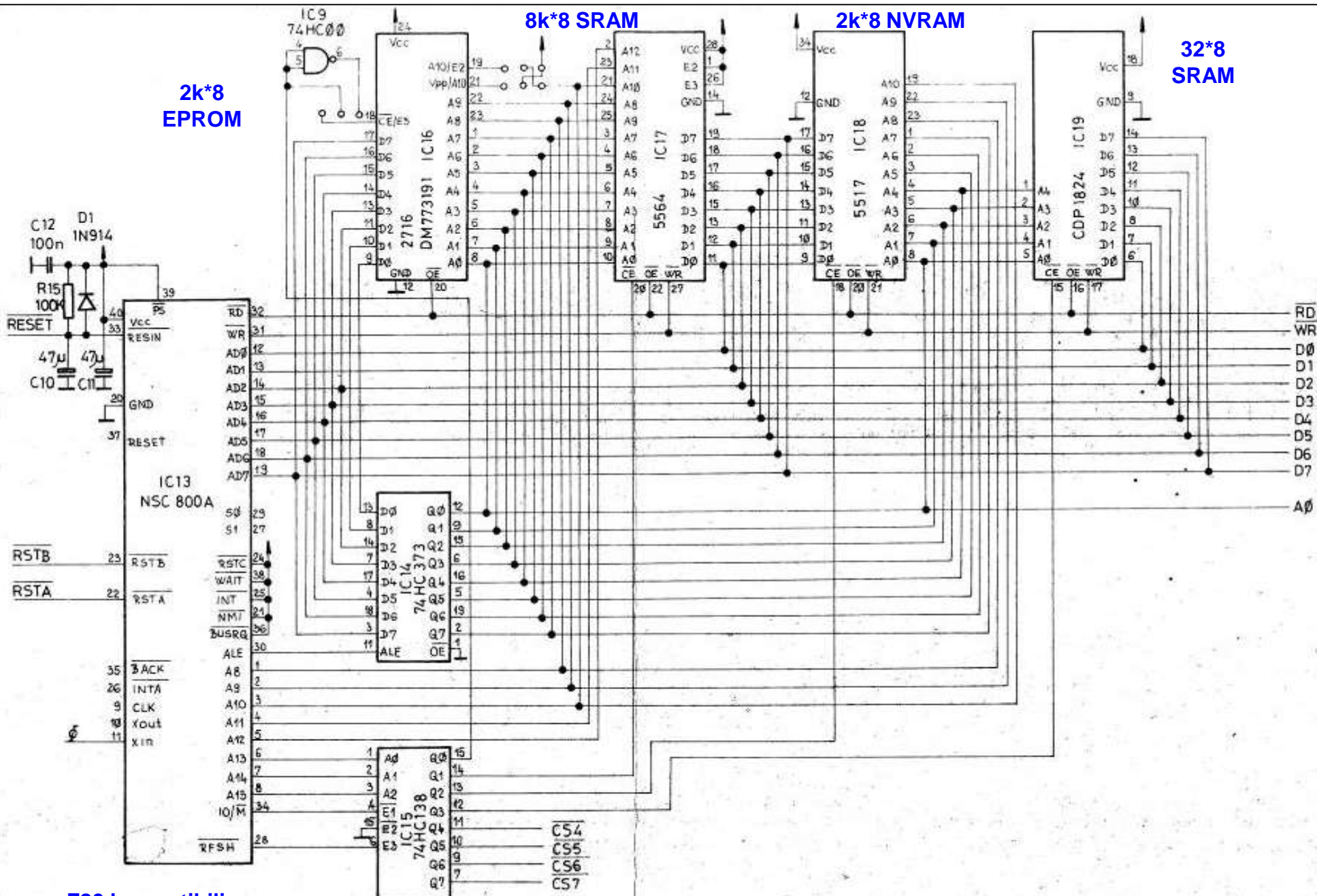
- Kísérleti panel többféle alkatrésszel
- Pozícionáló X-Y mechanika
- Mérés-adatgyűjtő program
- MGC-20E ciklotron, protonnyaláb
 - 5 MeV és 18 MeV energia, \varnothing 35 mm, 10^9 proton/cm²
- A tesztelt eszközök:
 - diszkrét alkatrészek, digitális áramkörök, ref. forrás és erősítő, memória, processzor, A/D konverter, UART



Néhány eredmény

- Diódák, tranzisztorok, optocsatoló: a besugárzás után regenerálódnak
- LSI CMOS integrált áramkörök: a töltött részecskék megváltoztatják a munkaponti feszültséget → a kimeneti komplementer tranzisztorpár egyszerre kinyit = rövidzár (latch-up)
 - Megoldás: áramkorlátozás soros ellenállással vagy aktív védelem
- VLSI integrált áramkörök:
 - 18 MeV → ~3 sec működés, 5 MeV → a tokozás véd





2k*8
EPROM

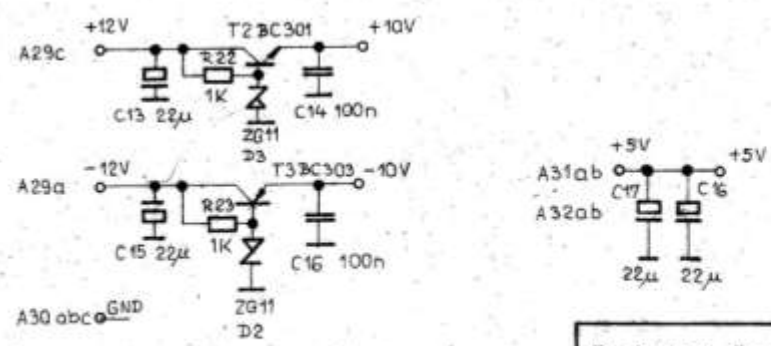
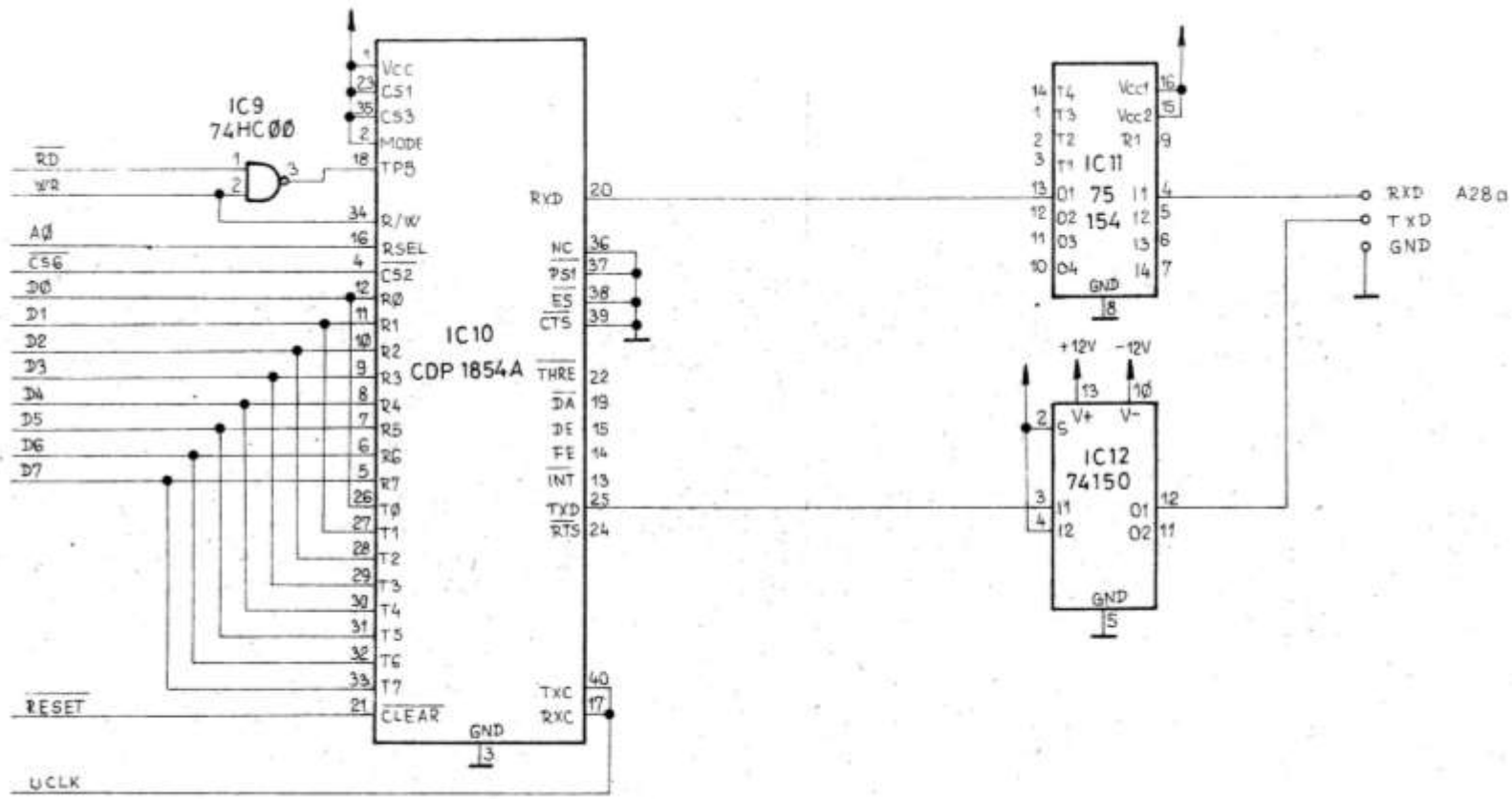
8k*8 SRAM

2k*8 NVRAM

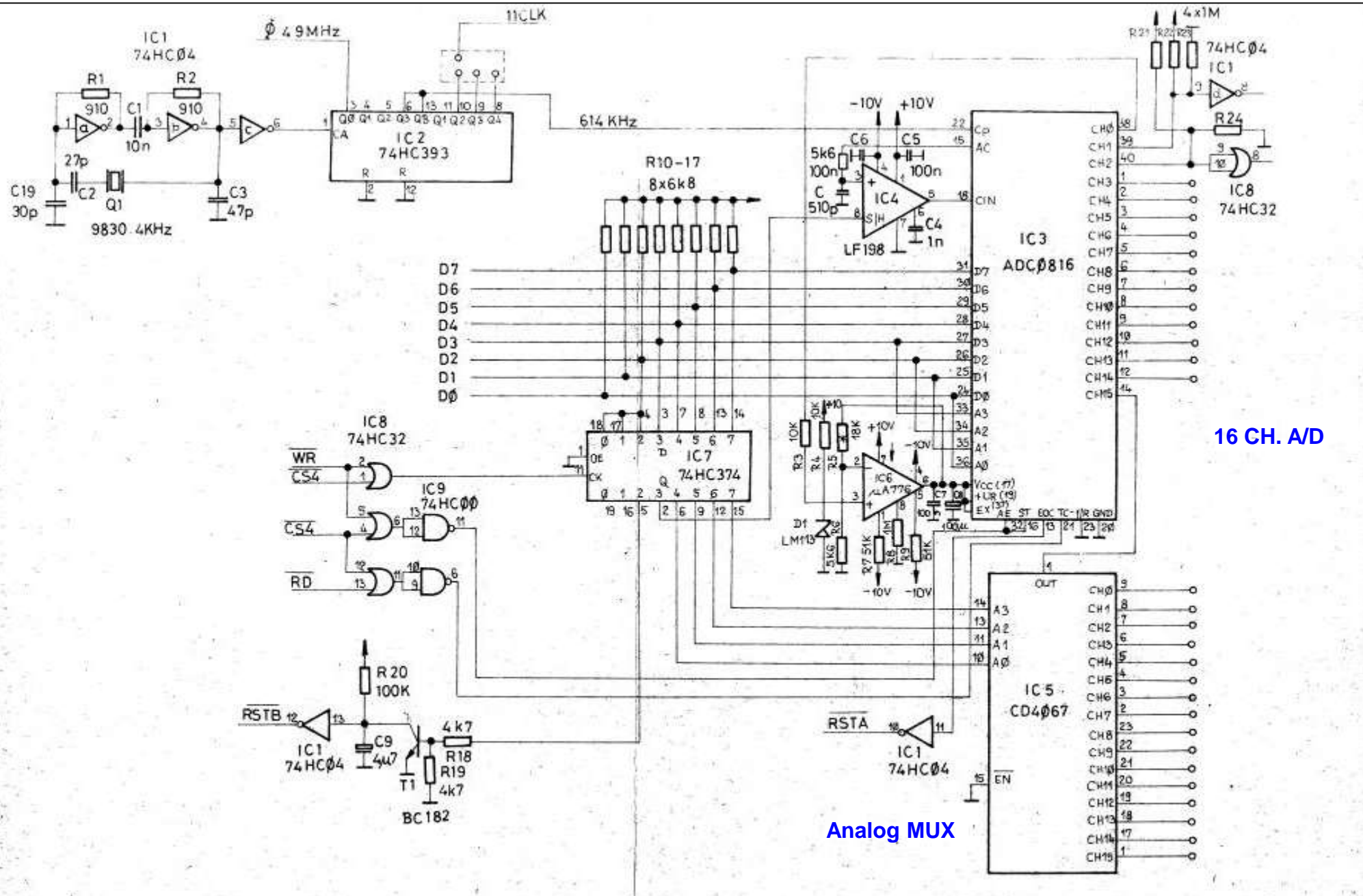
32*8
SRAM

Z80 kompatibelis
uP

Radiation Test Computer	BME-MHT Space Research Group	<i>Bodner</i>
Memory Unit	µP dept V1.0	1988.sept. 28.



Radiation Test Computer	BME-MHT Space Research Group	1988. szept 26
Serial I/O	µP dept. V1.0	Bodnar

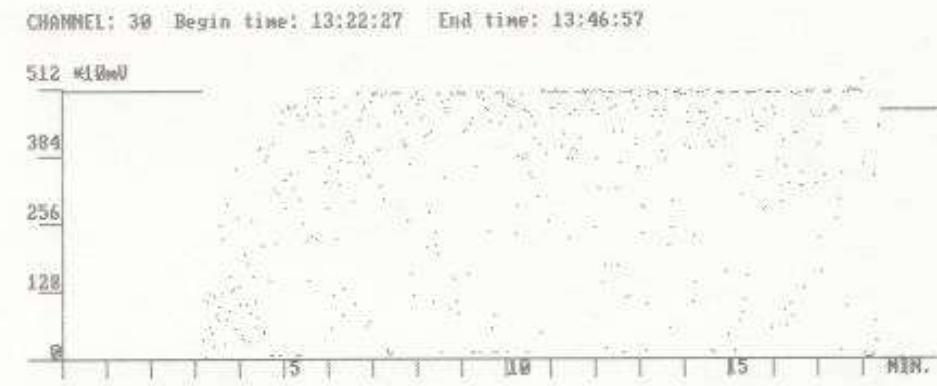


Radiation Test Computer	BME MHT Space Research Group	<i>Bme</i>
A/D & Control Unit	μ P dept V1.0	1988. sept. 28.

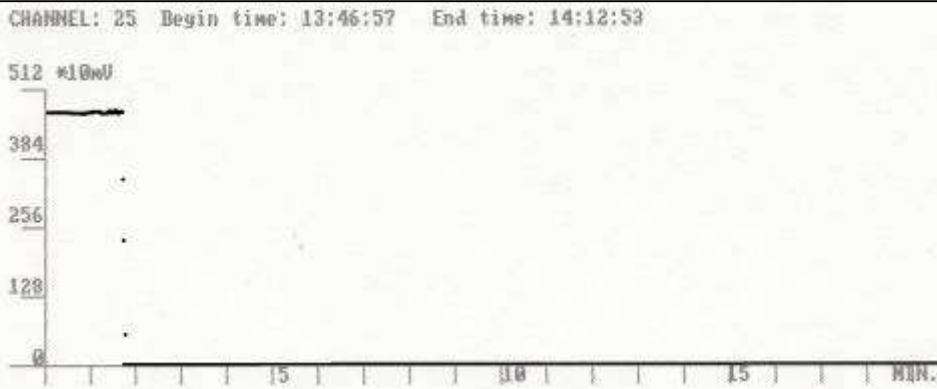
Néhány mérési eredmény



Kapuáramkör billenési szintjének változása



Zajosodás (optocsatoló)



Rövidzár CMOS kimeneten (Latch-up)

Alkatrészválasztás – előzetes megfontolások

■ Mechanika

- rezgésmentesítés
- IC foglalat nem használható
- vákuumbiztos csatlakozók/alkatrészek

■ Bipoláris áramkörök (TTL)

- nagyobb fogyasztás ↔ nagyobb sugárzásállóság

■ CMOS

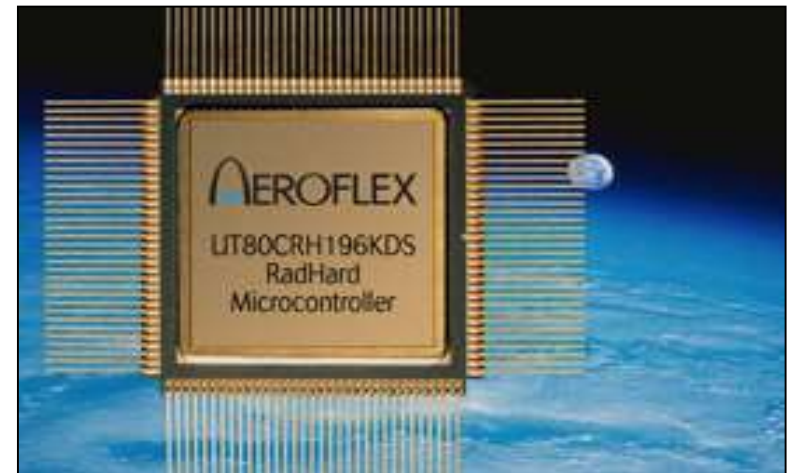
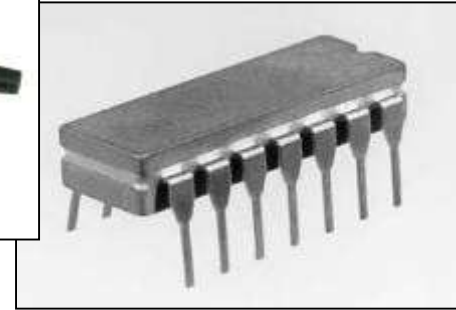
- Kis fogyasztás ↔ latchup veszély – elektronikus védelem szükséges

■ Nagy integráltság ↔ kisebb sugárzásállóság

■ HiRel alkatrészek, 54 sorozat (-55...+125 C°, kerámia tokozás)

■ EPROM nem használható, EEPROM/Flash memória korlátozottan

■ Használhatunk Rad-hard vagy Rad-tolerant alkatrészeket



ESA Space Standards: <https://escies.org/>



Page 1 of 40

EUROPEAN PREFERRED PARTS LIST

ISSUE 30 Revision A

January 2016



Document Custodian: European Space Agency – see <https://escies.org>

European Preferred Parts List

European Space Components Information Exchange System, www.escies.org

- Az európai űripar számára ajánlott alkatrészlista:
 - kondenzátor
 - csatlakozók, kapcsolók
 - piezo-eszközök
 - diódák
 - szűrők
 - induktivitások
 - mikroelektronikai áramkörök, hibrid áramkörök
 - relék
 - ellenállások/termisztorok
 - tranzisztorok
 - vezetékek/kábelek
 - termosztát, RF passzív áramkörök

Az EPPL alkatrészválasztéka

- 80C32 mikrokontroller (ROM nélküli, 8051-es mag, kifutott típus)
- SPARC mikroprocesszorok (RISC, skálázható regiszterszám, több típus)
- SRAM, SDRAM
- EEPROM
- FLASH
- FPGA (programozható logika), ASIC (alkalmazás-specifikus)
- Logikai áramkörök: 4000-es és 54-es sorozat

Gyártók: ATMEL, INTERSIL, TI, ACTEL, Analog Devices, Honeywell, Aeroflex

Alkatrészekre vonatkozó adatok

- Latch-up védett?
- **Processzor: ~60 krad**
 - Atmel 80C32: 30 krad, Latch-up mentes 80 MeV/mg/cm²-ig (kifutott)
 - Microchip 16/18 sorozatú mikrokontrollerek (kis költségvetésű missziókban)
- **RT/RH FPGA: 10-300 krad TID (Total Ionizing Dose)**
- **54-es sorozat:**
 - -55 – 125 C°
 - ~100 krad
- **A/D: ~100 krad**
 - AD7892: ~22 krad
- **Memóriák: CMOS PROM, EEPROM, SRAM ~100 krad (speciális, RH eszközök), bipoláris PROM >200 krad**

Technológia	Hibaszint [Krad]
Lineáris IC	2 - 50
Mixed-signal IC	2 - 30
Flash Memória	5 - 15
DRAM	15 - 50
Mikroprocesszor	15 – 70

(forrás: JPL/NASA)

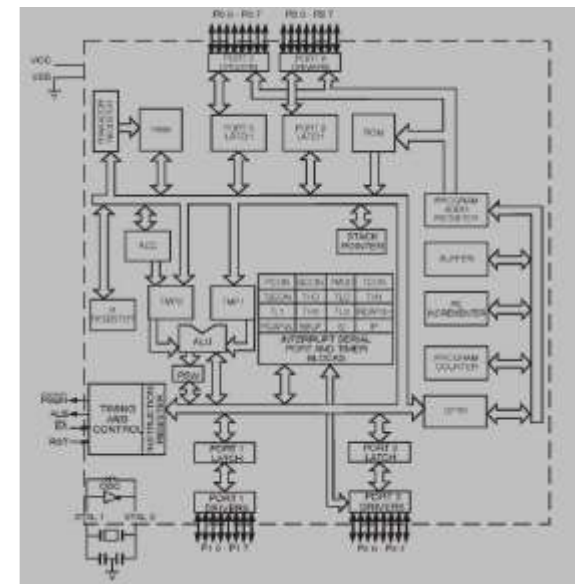
CPU választás 1.



80C32 based microcontrollers (ATMEL) →

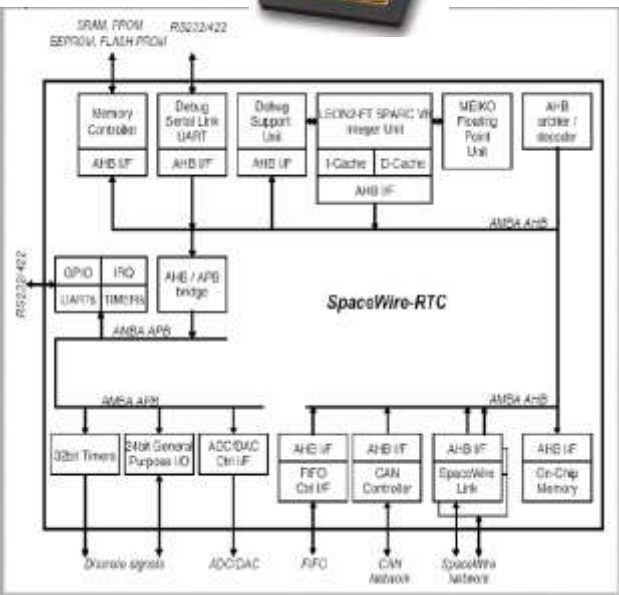
radiation tolerant ROMless microcontroller
 0.8µm CMOS technology, 30 Krad
 Latch-up free below 80 MeV/mg/cm² LET
 44 pin package

ATMEL announced end of life in 2010/11



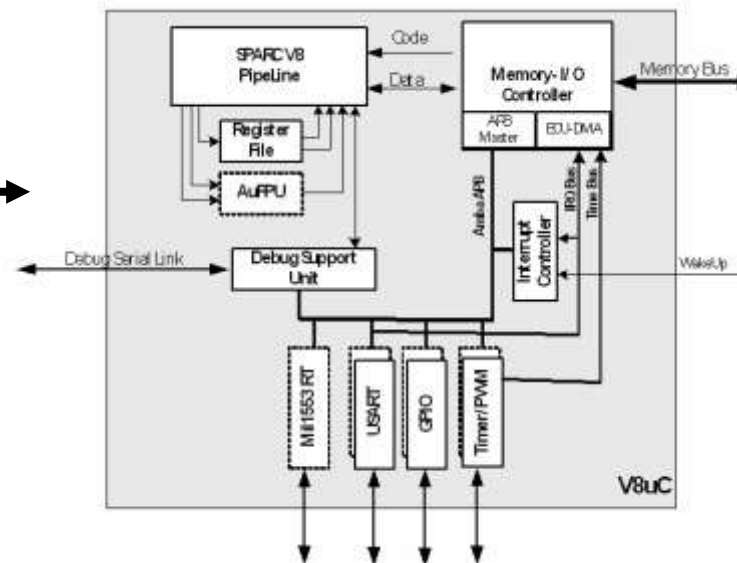
← AT7913E SpaceWire RT Controller (ATMEL)

LEON2-FT System-On-Chip, 85 Mips
 cache & internal RAM
 CAN, SPW, FIFO, ADC/DAC interfaces
 MCGA package, 349 pins



→ V8uC Microcontroller IP-core based on LEON2FT (SITAEI)

cacheless LEON2-FT IP core downsized
 configurable FPU
 memory controller with DMA engine, event controller on-chip RAM

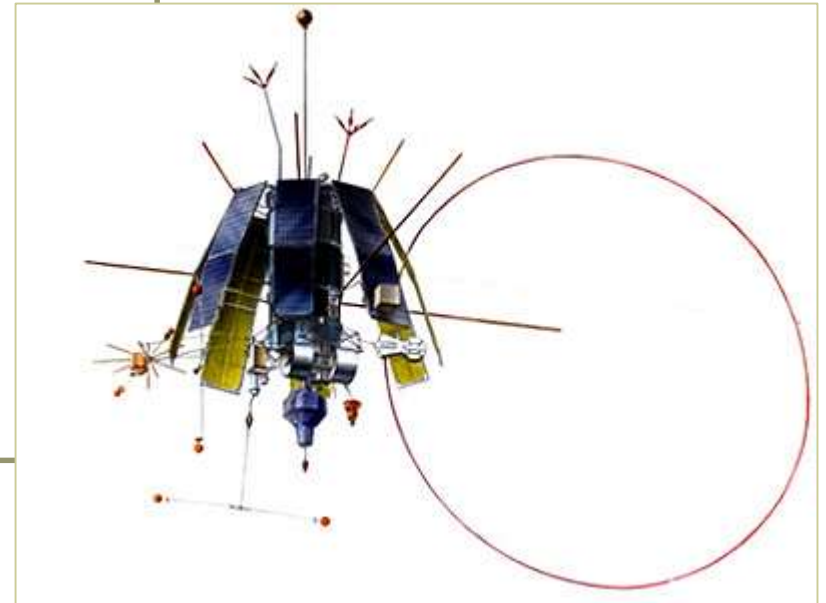
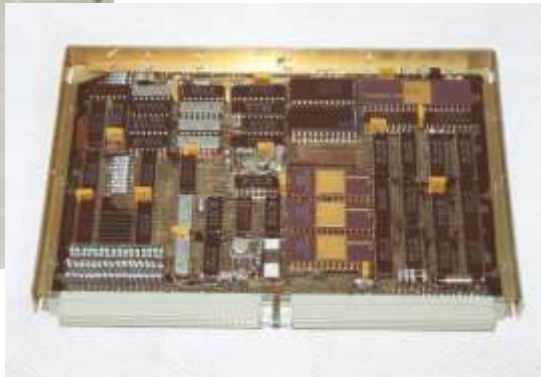


LEON: 32-bit CPU mikroprocesszor mag, SPARC-V8 architektúra
 RISC architektúra és utasításkészlet (VHDL)
 European Space Research and Technology Centre (ESTEC)

CPU választás 2.

ODCS: Onboard data Collection System (Intercosmos)

- NSC800 mikroprocesszor (8bit, 4MHz)***
- TC5564 CMOS SRAM 8kbyte***
- DM77S191 bipoláris PROM 8kbyte***
- watchdog***
- redundás órajel***



Intercosmos 24

CPU választás 3.

MYRIADE

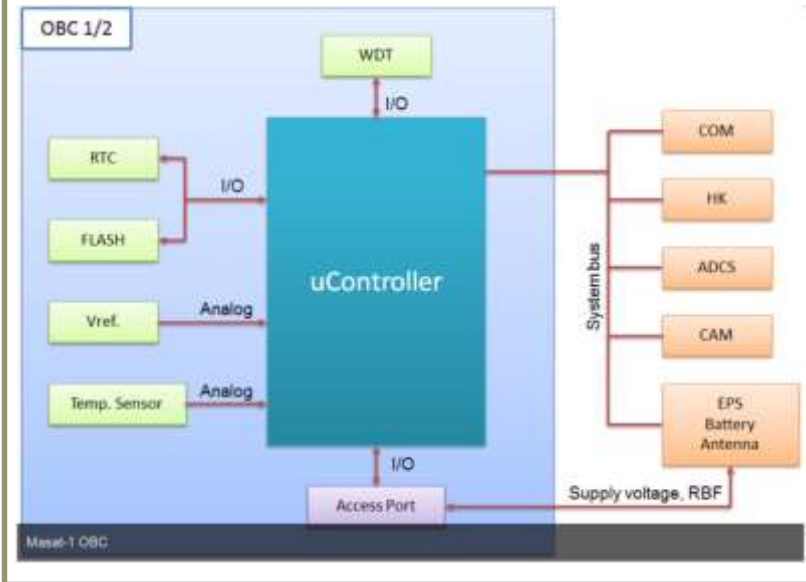
- ❑ CNES Small Satellites Programme
- ❑ 2004-10 , 8 kisműhold
- ❑ Microchip PIC mikrokontrollerek
- ❑ latch-up védelem , de-latch és watchdog



(CNES)

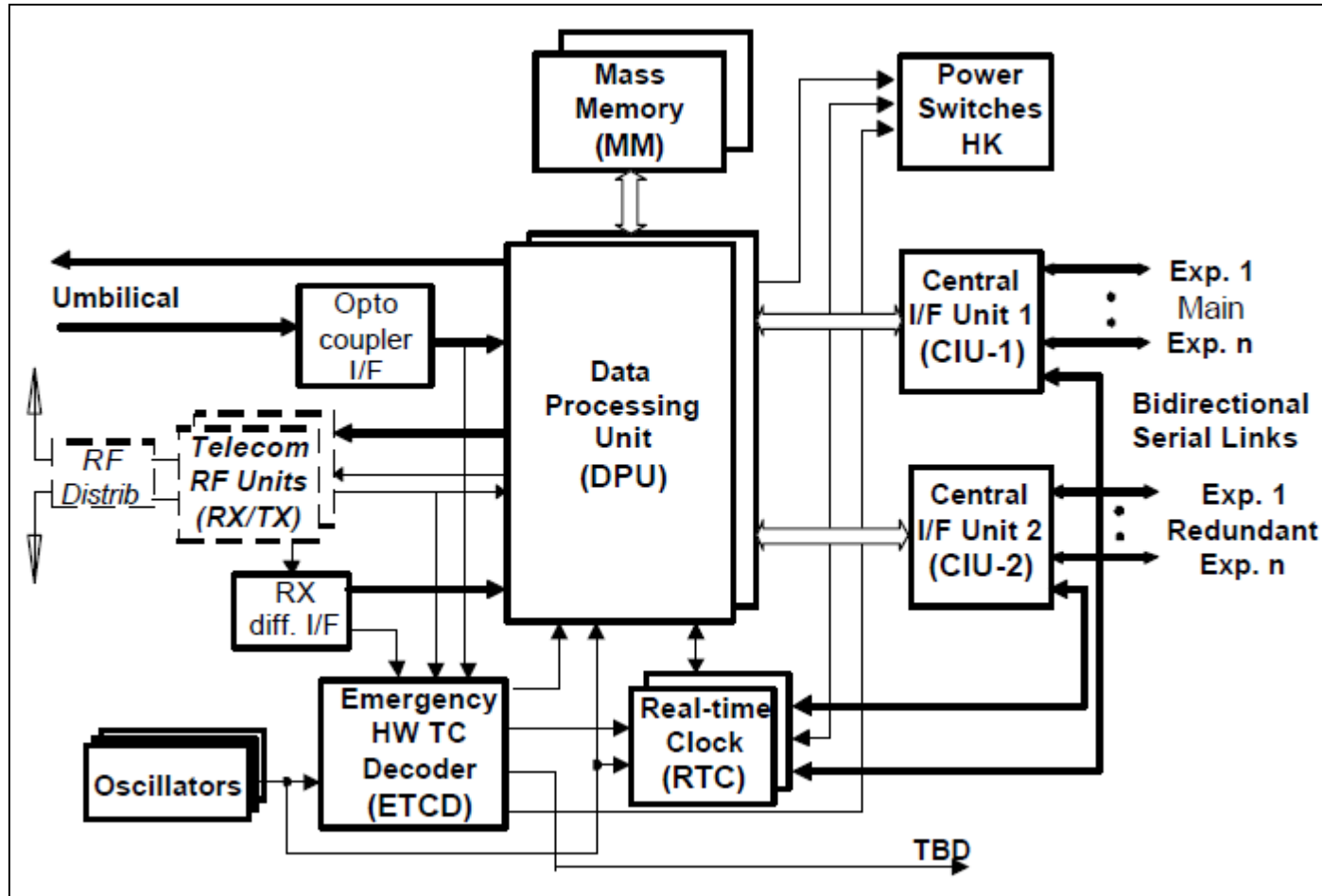
MASAT-1 OBC

- ❑ hidegtartalékolt
- ❑ Microchip



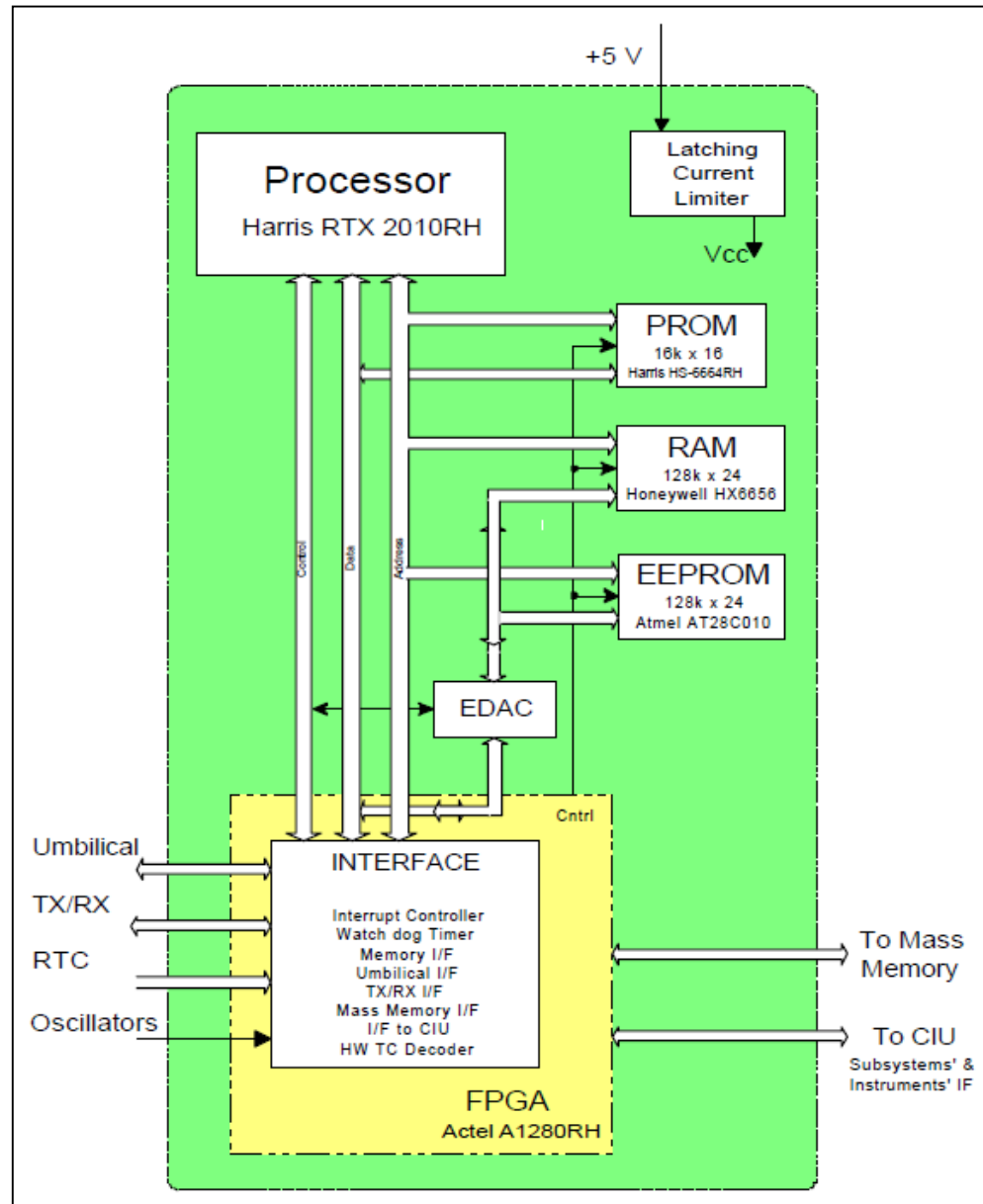
CPU választás 4.

ROSETTA LANDER (ROLAND): CDMS



CPU választás 5.

ROSETTA LANDER (ROLAND): DPU



CPU választás 6.

Microchip Atmel AT697F

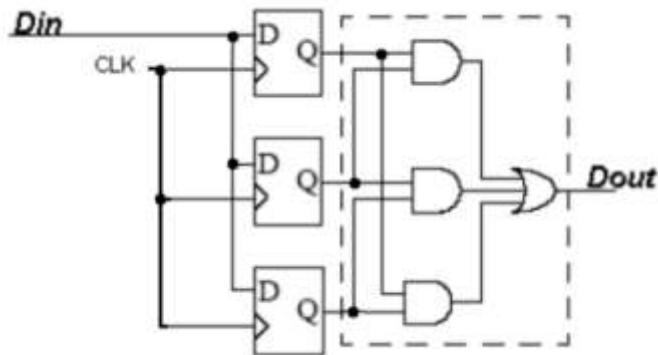
- 32-bit RISC
- SPARC V8 architecture
- LEON2 fault tolerant model
- 1MIPS per MHz (up to 86MIPS)
- Full Triple Modular Redundancy (TMR)
- EDAC Protection
- Parity Protection
- 1 W at 100 MHz
- Up to a total dose of 300 krad
- SEU error rate better than 10^{-5} error/device/day
- No Single Event Latchup if LET < 70 MeV.cm² /mg



Memória választás

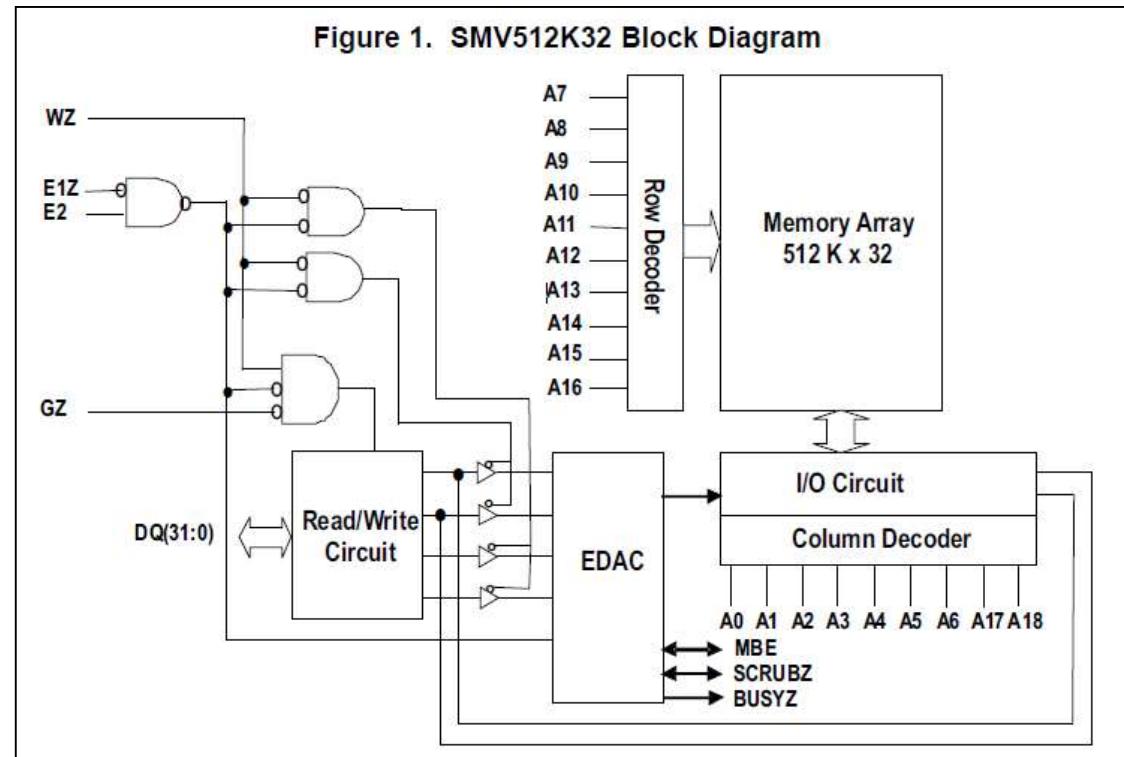
- PROM
- DRAM
- SRAM
- Flash/EEPROM
- SUROM** (*startup-read only memory*)

TMR:



Cassini

Figure 1. SMV512K32 Block Diagram

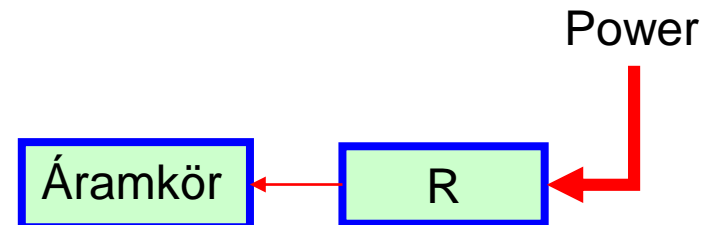
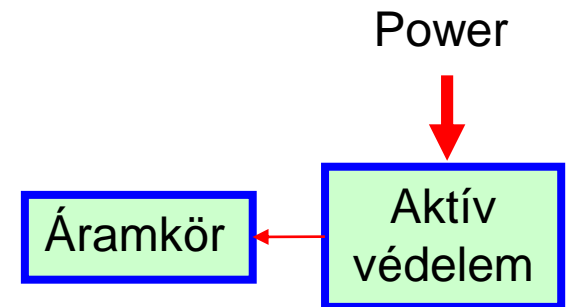


512*32 RADIATION-HARDENED SRAM
(www.ti.com)

- TID ≥ 300 kRAD
- SER $< 5e-17$ upsets/bit-day
- Latch up immune to LET 110 MeV
- Built-in error detection and correction (EDAC)
- Built-in scrub engine for autonomous correction

Védekezés a sugárzás hatásai ellen

- radhard alkatrészek alkalmazása
- bipoláris félvezetők felhasználása
- árnyékolás (alumínium)
- elektronikus latch-up védelem
- védelem soros ellenállással



Digitális tervezés – megbízhatósági kulcskérdések

Reset

Watch-dog

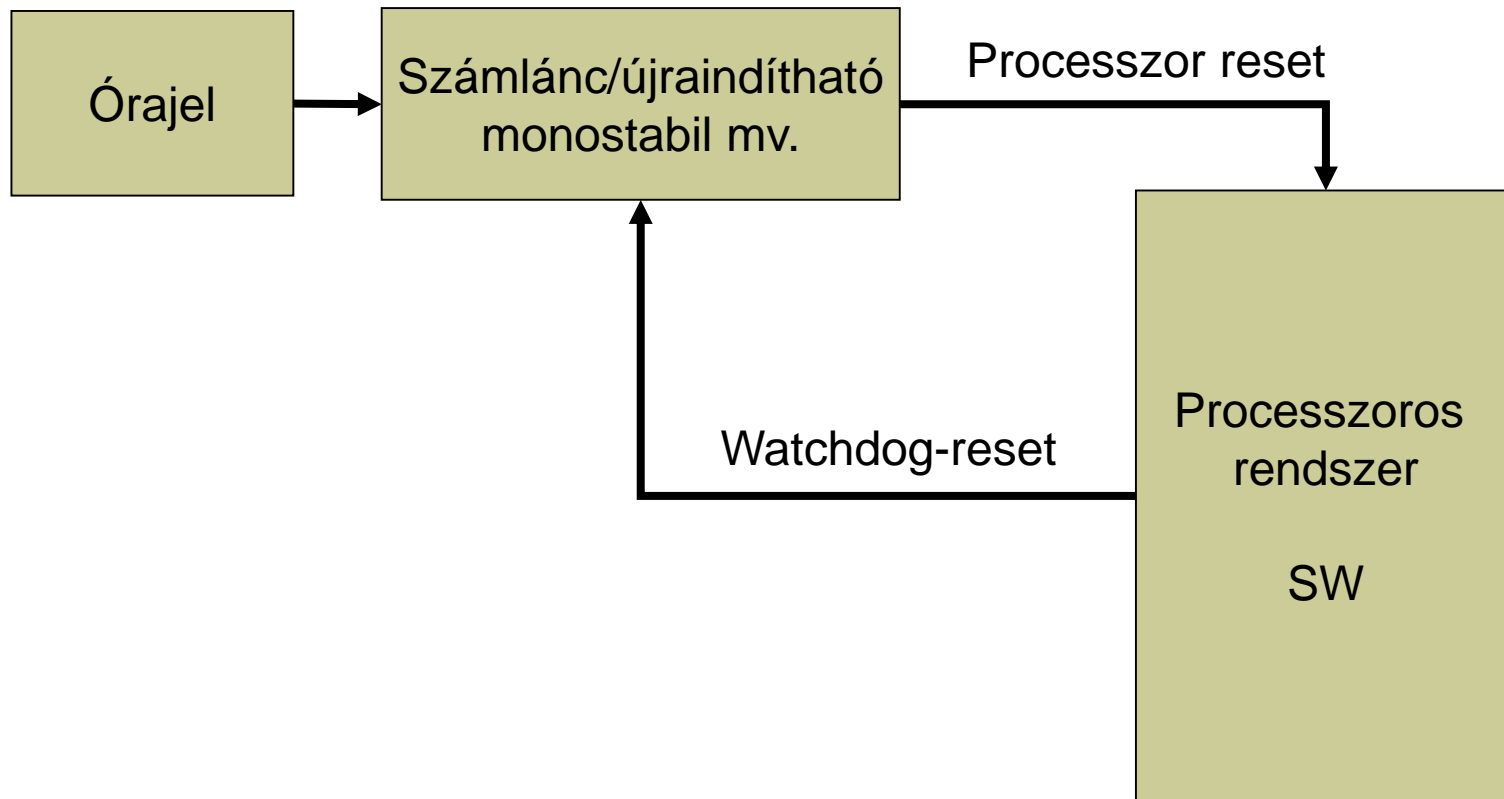
Órajel

Layout

Hazárd-mentes tervezés

Digitális tervezés – megbízhatósági kulcskérdések 2.

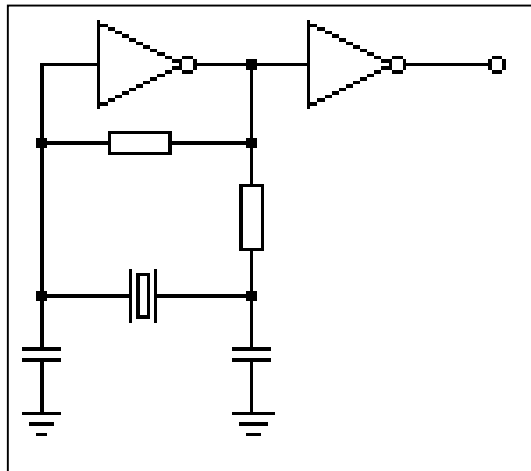
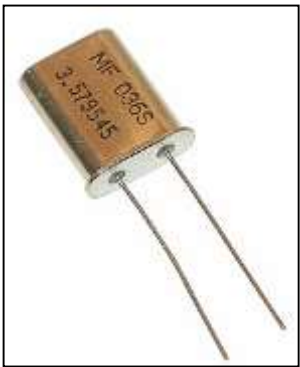
Watch-dog: hibás program-állapot feloldása
paraméter: reakcióidő



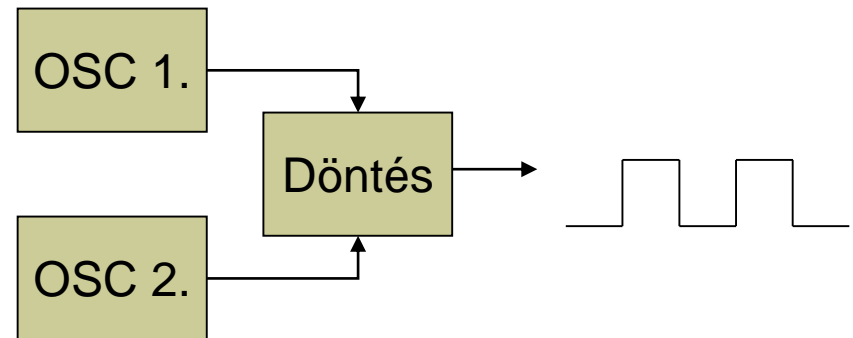
Digitális tervezés – megbízhatósági kulcskérdések 3.

Órajel előállítása: kvarc-oszcillátorok
soros vagy párhuzamos rezonanciafrekvencián való működés

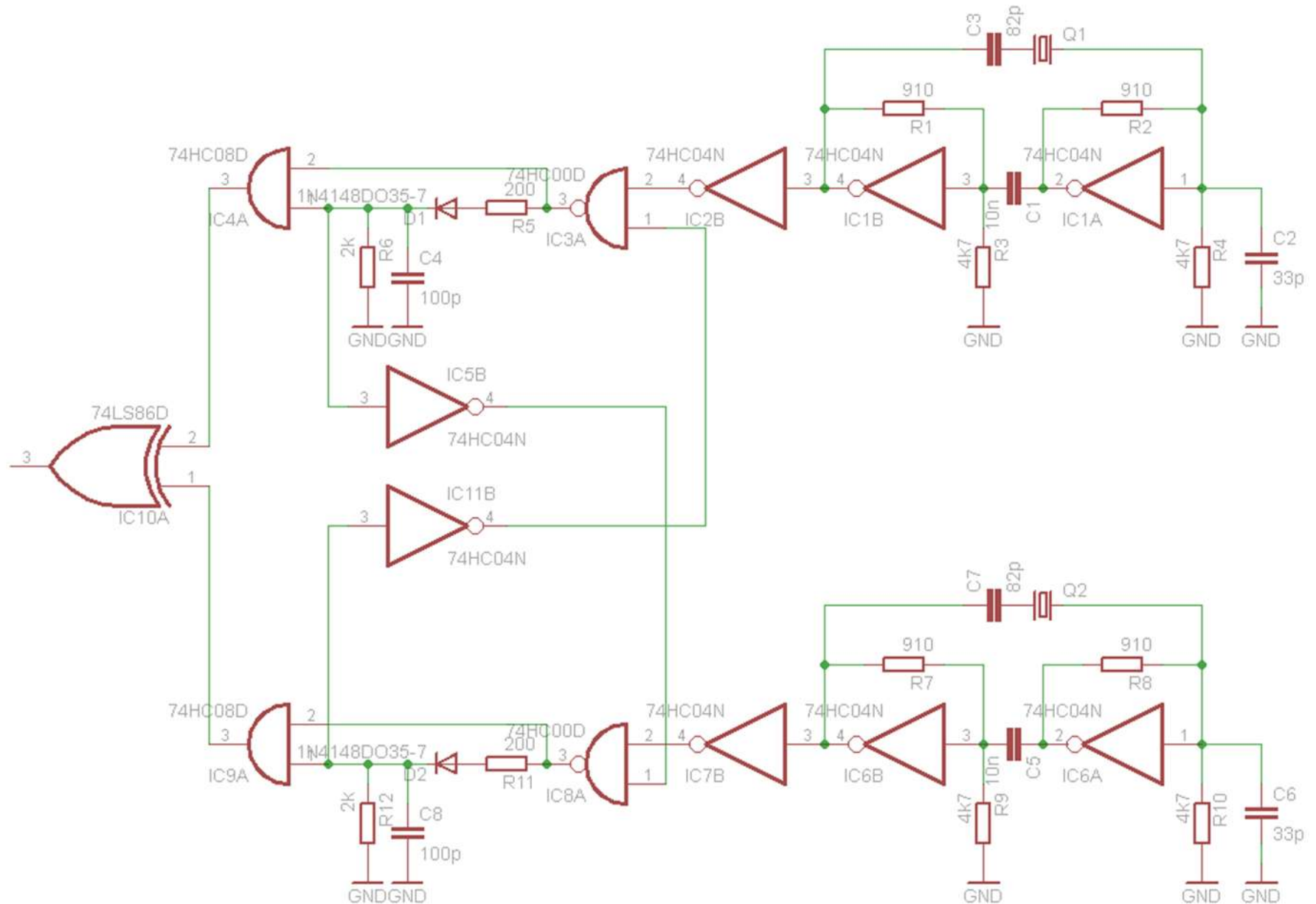
- + nagy pontosság
- + kis hőmérsékletfüggés (termosztáttal javítható)
- mechanikus hatásokra érzékeny



Fedélzeti elektronikában az órajel előállítása mindig tartalékolt !



Tartalékolt órajel-generátor



Digitális tervezés – megbízhatósági kulcskérdések 4.

• Nyomtatott áramkör (NYÁK) tervezési megfontolások

- 0/1 jelek továbbítása történik: nagy áramcsúcsok lépnek fel a gyors váltások miatt

szűrőkondenzátorok

széles tápfeszültség hozzávezetések (belső réteg használata)

- a digitális és az analóg áramköri részeket el kell különíteni

- a NYÁK alsó és felső rétege használható a nem kívánt elektromágneses sugárzás árnyékolására (EMC)

- minél rövidebb vezetékek használata

- nagy működési frekvencián hullámvezetőként működhet a NYÁK (buszok lezárása!)

- a nem használt kapubemeneteket földre vagy felhúzó-ellenálláson keresztül tápfeszültségre kell kötni

