



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS

BESZÉDES BERTALAN

Nagy megbízhatóságú elektronikus áramkörök architektúrális lehetőségei

Témavezető: Prof. Dr. Györök György

**BIZTONSÁGTUDOMÁNYI
DOKTORI ISKOLA**

Budapest, 2022.

Komplex vizsga bizottság:

Elnök:

Prof. Dr. Rajnai Zoltán

Tagok:

Prof. Dr. Berek Lajos

Dr. Habil. Berek Tamás

Nyilvános védés teljes bizottsága:

Elnök:

Prof. Dr. Nemcsik Ákos

Titkár:

Petőné Dr. Csuka Ildikó

Tagok:

Prof. Dr. Molnár András

Dr. Habil. Vásárhelyi József (külső)

Prof. Dr. Kovács Szilveszter (külső)

Bírálok:

Prof. Dr. Kopják József

Dr. Oniga István László (külső)

Nyilvános védés időpontja:

.....

NYILATKOZAT
A MUNKA ÖNÁLLÓSÁGÁRÓL, IRODALMI FORRÁSOK
MEGFELELŐ MÓDON TÖRTÉNT IDÉZÉSÉRŐL

Alulírott Beszédes Bertalan kijelentem, hogy a Nagy megbízhatóságú elektronikus áramkörök architektúráis lehetőségei című benyújtott doktori értekezést magam készítettem, és abban csak az irodalmi hivatkozások listáján megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, a forrás megadásával egyértelműen megjelöltem.

Budapest, 2022. 06. 01.


(aláírás)

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó.....	8
Bevezetés.....	9
A tudományos probléma megfogalmazás	9
Célkitűzések.....	10
A téma kutatásának hipotézisei.....	11
Kutatási módszerek.....	12
1 megbízhatóság növelő eljárások.....	14
1.1 A megbízhatóság növelésének lehetőségei.....	14
1.1.1 A hibatűrés dimenziói.....	14
1.1.2 A hiba fogalma.....	17
1.2 Konstruktív technikák.....	20
1.3 A redundancia növelésének lehetőségei	22
1.3.1 Passzív redundancia.....	24
1.3.2 Aktív redundancia	31
1.3.3 Hibrid redundancia.....	38
2 Alacsony redundanciájú architektúrák.....	44
2.1 Kis redundanciájú megbízhatóságot növelő eljárások	44
2.1.1 Külső feszültségforrásból táplált moduláris tápegység felépítése	44
2.1.2 Fotovoltaikus feszültségforrásból táplált moduláris tápegység felépítése	46
2.2 Egyszeres redundanciájú tápegység architektúrák.....	47
2.3 Redundáns, moduláris felépítésű tápegység architektúrák [BB-8].....	48
2.4 Kis redundanciájú, nagy megbízhatóságú áramköri modulok [BB-2], [BB-5], [BB-9] ...	54
2.4.1 A modulok mérése	55
2.4.2 Analog értékek mérése	55
2.4.3 Mérendő analog feszültségek multiplexálása	59

2.4.4	Megszakítást kérő alrendszer	60
2.4.5	Redundáns félvezető kapcsolóelemek.....	61
2.4.6	Félvezető kapcsolóelemek vizsgálata.....	63
2.4.7	Elektronikus műterhelés.....	65
2.5	Redundáns, moduláris tápegység hardveres megvalósítása.....	66
2.5.1	Akkumulátor.....	66
2.5.2	Akkumulátor töltő	67
2.5.3	DC/DC konverter.....	67
2.5.4	Kapcsoló mátrix modellje	68
2.6	Redundáns, moduláris berendezés szoftveres megvalósítása [BB-3], [BB-6]	69
2.6.1	Alacsony redundanciájú firmware	69
2.6.2	Vezérlési lehetőségek.....	72
2.6.3	Működési módok.....	74
2.6.4	Felhasználói optimalizáció	76
3	Megbízhatóságot növelő eljárások.....	78
3.1	Redundáns felépítésű vezérlőegység [BB-7]	78
3.1.1	CON-MON architektúra.....	78
3.1.2	Duplikált vezérlőegység alkalmazása	79
3.1.3	Külső redundáns biztonsági időzítő áramkör alkalmazása	82
3.1.4	A modell megvalósítása.....	83
3.1.5	Kommunikációs csatorna megbízhatóságának növelése	87
3.2	Redundáns felépítésű fotovoltaikus egység [BB-10], [BB-11].....	89
3.2.1	Szigetüzemű napelemes rendszerek	90
3.2.2	Fotovoltaikus cellák és napelem panelek alkalmazása.....	90
3.2.3	Napelemek elhelyezése.....	91
3.2.4	Teljesítményigény meghatározása	92

3.2.5	Redundáns napelem panel fizikai kiépítésének lehetősége.....	92
3.3	Nagy megbízhatóságú adatnaplózás a beágyazott rendszerek területén [BB-1].....	97
3.3.1	Beágyazott rendszerek adattárolói.....	98
3.3.2	Elektromágneses zavar detektálása	98
3.3.3	Független felügyeleti szerv megvalósítása	100
3.3.4	Galvanikusan leválasztott adattárolás.....	101
3.4	Alacsony redundanciájú kompenzáció [BB-4].....	104
3.4.1	Fény kibocsájtó diódák degradációja	105
3.4.2	Optocsatolók megbízhatósága	107
3.4.3	Áramköri prototípus megvalósítása.....	109
	Összegzett következtetések	114
	Új tudományos eredmények.....	114
	Ajánlások.....	116
	Köszönetnyilvánítás	117
	Irodalomjegyzék.....	118
	Felhasznált irodalom	118
	A Jelölt értekezésével kapcsolatos publikációi	128
	A Jelölt értekezéséhez nem kapcsolódó publikációi.....	129
	Ábrajegyzék.....	134
	Rövidítésjegyzék.....	137
	Alkalmazott szimbólumok	139

NYILATKOZAT
A MUNKA ÖNÁLLÓSÁGÁRÓL, IRODALMI FORRÁSOK
MEGFELELŐ MÓDON TÖRTÉNT IDÉZÉSÉRŐL

Alulírott Beszédes Bertalan kijelentem, hogy a *Nagy megbízhatóságú elektronikus áramkörök architektúráis lehetőségei* című benyújtott doktori értekezést magam készítettem, és abban csak az irodalmi hivatkozások listáján megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2021. június. 01.

.....
aláírás

ELŐSZÓ

A 21. század globalizált gazdasága számtalan olcsó termékkel árasztja el a világot. Számos az említett termékek közül folyamatosan csökkenő minőségű és élettartamú. Sokak számára értelmetlen ez a nagy mértékű fogyasztás, mivel a bolygónk erőforrásai végesek. Valahol mind érezzük, hogy ez messze nem helyes. A jelen társadalom termékei – többek között köszönhetően a gyors erkölcsi amortizációnak is – az idő előtt leselejtezett eszközök által alkotott szeméthalmok.

Miért van az, hogy az egykor drága státusszimbólumok meghibásodás okán a roncs-telepen végzik? Miért van az, hogy az új még fel nem használt alapanyagok a szemételepen végzik? Vajon mennyi alapanyag és energiaráfordításba került az előállításuk. A kérdésekre a válasz érkezhethet egy kérdés formájában is: Vajon meddig folytatható ez a pazarló gyakorlat? Ideje újragondolni a korszerű energiafelhasználással kapcsolatos általános megközelítést.

Megváltoztatni a jelenlegi gazdasági működést igen nehéz, de lehetőséget javasolni az erőforrások egy opcionális felhasználási módjára igen hasznos. Számos felhasználó szívesen áldozna fel az általuk használt eszköz teljesítményéből, ha ezért cserébe megnőne a használt berendezés élettartama vagy csökkenne az eszköz energiafogyasztása. Ezzel a lehetőséggel kevés berendezés rendelkezik – háztartási berendezések közül egy sem –, pedig piaci igény van rá, és biztosítása alacsony költségen megoldható.

BEVEZETÉS

A tudományos probléma megfogalmazás

Az általános értelemben vett, villamos műszaki berendezések esetében értelmezett megbízhatóságot növelő eljárások szignifikáns előrelépést jelentenek az energiahatékonyság javítása esetében is. Az emberiség globális primer energiaigénye – a népesség és a gazdaság növekedése okán – minden évben egyre növekszik.

A technológiai fejlődés következtében az energiafelhasználás hatékonysága növekszik, de ez az eredmény nem egyensúlyozza vagy csökkenti az energiafelhasználás növekvő mértékéből adódó többletet. Az energiahatékonyság javítása az emissziót is nagymértékben képes csökkenteni, jelenleg ez a fejlesztési irány eredményezi az élhető és a környezetet kevésbé terhelő energiafelhasználást.

Az energiahatékonysági intézkedésekkel kapcsolatban egyre szélesebb körű, a fenntartható energiaellátás megvalósításának, az üvegházhatást okozó gázkibocsátások csökkentésének, az ellátásbiztonság garantálásának és az importkiadások csökkentésének támogatása, valamint annak elismertsége, hogy az említett intézkedések egyben fokozzák a nemzetgazdaság versenyképességét is. Az energiahatékonyság növelése így stratégiai prioritás.

A hétköznapiak során használt műszaki eszközeink egyre szélesedő eszközkínálata és csökkenő használati ideje egyre több hulladéktermelést és erőforrásfelhasználást jelent. A felhasználók bővülő műszaki ismeretei és a műszaki berendezésekbe történő beavatkozási hajlandósága egyre növekszik. Az internet segítségével a javításhoz szükséges információk is széles körben, könnyen hozzáférhetőek.

Fontos, hogy csak a megfelelő műszaki előképzettséggel rendelkező felhasználók módosítsanak villamos berendezéseket, valamint fontos a megfelelő műszaki előképzettséggel rendelkező felhasználók számának növelése. Javasolt a középiskolai általános képzés hangsúlyos részévé tenni az alapvető műszaki ismeretek elsajátítását azzal a céllal, hogy a hétköznapi műszaki problémákat a végfelhasználók önállóan képesek legyenek megelőzni vagy elhárítani.

Moduláris felépítésű elektronikus berendezések némi többlet térfogat, hardver, szoftver és mérnökóra árán még kevesebb erőforrás felhasználása és hulladék termelése mellett javíthatóak meghibásodás esetén.

A világ teljes villamosenergia felhasználása 2018-ban meghaladta a 22TWh-t, ennek ~30%-át a háztartások, ~25%-át a kereskedelmi és közszolgáltatásokra, ~40%-át az ipari szereplők teszik ki [51]. A megújuló energiaforrások költségeinek csökkentése és a digitális technológiák fejlődése hatalmas lehetőségeket nyit meg, miközben új energiabiztonsági dilemmákat hoz létre.

A döntéshozóknak és a szabályozóknak gyorsan kell lépniük, hogy követni tudják a technológiai változásokat és az energiarendszerek rugalmas működésének növekvő igényét. Az olyan kérdések, mint az energiatárolás piactervezése, az elektromos járművek és a hálózat közötti interfész, valamint az adatvédelem mind új kockázatoknak tehetik ki a fogyasztókat. A feladatot tovább nehezíti a periodikus intervallumokon belüli nem egyenletes villamosenergia felhasználás is [50].

A végfelhasználó készülékek teljesítményfelvételét és dinamikáját – indokolt esetben – az áramszolgáltató is módosíthatná. [7], [47] A kommunikációs csatorna számára jó választás a vezeték nélküli technológia alkalmazása. [9], [8] A tervezett nagy arányú megújuló energiaforrások által termelt villamos energia tárolására szolgáló berendezések költségei csökkenthetőek ezzel a megoldással. A szükséges terméket terhelő extra költséget jelentő hardver és mérnökóra sokszorosa térülne meg, ami globális szinten jelentős erőforrások megjelenését eredményezné.

Célkitűzések

A moduláris eszközkonstrukció, a karbantarthatóság, a szervizelhetőség és a monitorozhatóság lehetőséget biztosít a magasabb megbízhatóság eléréséhez. Az említett tulajdonságok szorosan kapcsolódnak a digitalizációhoz, valamint a távoli eszközfelügyelet területéhez is. A végfelhasználók technológiai képességeinek fokozatos fejlődése is alátámasztja a moduláris, könnyen szervizelhető konstrukciók létjogosultságát. A technológiák alkalmazásával járulékos haszon, hogy az energiahatékonyság javításának ütemét a jelenleginél magasabb szintre lehet emelni.

Az önmagát monitorozni képes megoldás és a moduláris architektúra javítja a karbantarthatóságot, ami jelentős mértékben képes növelni a berendezés élettartamát, így csökkentve a globális emissziót. A tézisekben is megfogalmazott meggyőződésem, hogy a bemutatott rendszerarchitektúra műszaki területen alkalmazott berendezésekben sikerrel implementálható, kiemelten a magas megbízhatóságot igénylő alkalmazások tekintetében.

A téma kutatásának hipotézisei

Kutatásom eredményeként megmutattam, hogy a mikrokontroller által felügyelt elektronikus berendezések esetében a végfelhasználóknak új igénye jelent meg az eszköz működési módjának beállíthatósága kapcsán. A berendezésben már jelenlévő beágyazott rendszert minimális hardver és szoftver komponensekkel kiegészítve, az új funkciók költséghatékonyan bevezethetők. Az ipari és kommersz berendezések kapcsán még meg nem található teljesítmény-energiafogyasztás, teljesítmény-élettartam, rendelkezésre állás-üzemidő paraméterek súlyozására alkalmas új eljárást dolgoztam ki.

Egy elektronikus rendszer megbízhatóságának növelése céljából új megoldásokat dolgoztam ki a vezérlőként mikrokontrollert alkalmazó olyan rendszerekre vonatkozóan, melyeknél a megvalósítási módozatai függenek az alkalmazott technológiától és az integráltság fokától. Új eljárást dolgoztam ki két egymással együttműködő, redundáns mikrokontroller vezérlésmegosztására, hiba lokalizáló és hiba helyreállító képessége kapcsán. Olyan új rendszerkialakítási elvet dolgoztam ki, amely egy beágyazott rendszer feladatait és szükséges hardverelemeit kiegészítve képes az irányított rendszerbe beavatkozni, a minőségi paraméterek javításával. Olyan architektúrális megoldást fejlesztettem ki, amely felhasználható egy mikrovezérlő által irányított rendszer megbízhatóbb működéséhez.

Új tervezési elveket dolgoztam ki, amely hibrid elektronikai áramkörök megbízhatósági paramétereinek javítását támogatja mikrokontrolleres környezetben. Bemutattam olyan új tervezési eljárást, amely a beágyazott rendszerek területén, növeli egy szigetüzemű tápellátással rendelkező rendszer üzemidejét. Olyan új elvet dolgoztam ki, amelynek segítségével egy teljesítményfokozatot tartalmazó elektronikai rendszert alkotó modul élettartamát megnöveltem.

Új rendszertechnikai megközelítést dolgoztam ki, amelyben a felhasználónak lehetősége nyílik befolyásolni egy redundáns rendszer általános értelemben vett megbízhatósági paramétereit, az alkalmazás helyétől, módjától és a végrehajtandó feladattól függően. A vizsgált redundáns, moduláris rendszer állapotának lekérdezésekor a felhasználó saját szempontjai szerint súlyozhatja a működés szélső értékeit korlátozó paramétereket. A végfelhasználó az áramkör sajátosságai és az alkalmazás körülményei alapján befolyásolhatja annak működési módjait. Kitértem a nem

üzemszerű működés esetén követendő, felhasználó által megválasztható protokollok lehetőségeire.

Mikrokontrollerrel megvalósított optimalizált eljárásokat mutattam meg, melyek segítségével, a rendszerkomponensek minőségromlásából adódó kimeneti paraméterek megváltozása esetén is üzemszerű működés valósítható meg.

Kutatási módszerek

Kutatásom célkitűzése a polgári és ipari területeken alkalmazott műszaki berendezések költséghatékony megbízhatóságnövelő eljárásainak rendszerszintű felépítését. Egy elektronikus berendezés megbízhatóságának, termékbiztonságának és energiahatékonyságának növelése többlet hardver és szoftver/firmware tervezésével és beépítésével jár. Az újonnan megjelent felhasználói és piaci igényeket követve, egy a fenti kategóriába sorolható termék fejlesztésével és gyártásával kapcsolatos többleterőforrás ráfordítás optimalizálása a célom. A változatos alkalmazási területek és eszközkonstrukciók lefedésére, az adott termék modulokra bontása és azok irányítástechnikai felügyelete szükséges a kívánt többletfunkciókat támogató architektúra kialakításához.

A különböző termékek esetében különböző célmegoldások kidolgozása szükséges. A gyorsuló gazdasági környezet és a várható felhasználói igényeket szem előtt tartva a fejlesztésre fordított többletmunkaóra minimalizálása a szükséges. Egy könnyen áttekinthető és követhető reprezentációt dolgoztam ki. Az általános architektúra mellett, a disszertációmban egy hibrid példa áramkörön keresztül mutatom be a különböző szinteken megvalósított megbízhatóság és modularitás eléréséhez alkalmazott célarchitektúrákat.

A dolgozatomban bemutatott redundáns felépítésű, moduláris tápegység nagy mértékben növeli az alkalmazáskritikus eszközök tápellátásának megbízhatóságát. Az ezen fejlesztett és tesztelt algoritmusok lehetővé teszik a felhasználó számára, hogy egy berendezés teljesítmény-élettartam-energiafogyasztás egyensúlyát, az alkalmazási területhez és a hosszútávú célkitűzéseikhez illessze.

Disszertációm az alábbi fejezetekből épül fel: A 2. fejezetben megmutatom a polgári és ipari célokra alkalmazott elektronikus termékek megbízhatóságával és energiahatékonyságával kapcsolatos architektúrális lehetőségeit. A 3. fejezetben bemutatom egy elektronikus rendszer általános értelemben vett megbízhatóságának növelésére alkalmazható technikákat, illetve kitérek a

megbízhatóságnövelő eljárások megvalósítási lehetőségeire. Továbbá részletesen kitérek a szoftveres algoritmusok tesztelésére alkalmazott nagy megbízhatóságú, redundáns, moduláris rendszermodell architektúrális és gyakorlati felépítésére.

1 MEGBÍZHATÓSÁG NÖVELŐ ELJÁRÁSOK

A modern légi közlekedésben, banki tranzakciókhoz kapcsolódó, villamos energiát előállító erőművekben, ..., stb. hibátlanul működő irányítástechnikai elektronikus berendezések szükségesek.

Amennyiben a biztonságkritikus alkalmazási területen meghibásodás keletkezik, az katasztrófa bekövetkezését eredményezheti. Egy nem biztonságkritikus berendezés meghibásodása is eredményezhet jelentős gazdasági kárt. A vázolt okok miatt, az irányítást végző elektronikus berendezések megbízhatóságának növelése is szempont. [102]

A meghibásodásra érzékeny rendszerek számára többrétű hibatűrő megoldást kell alkalmazni úgy, hogy több különböző üzemképességet befolyásoló tényező bekövetkezte esetében is el tudják látni feladatukat. Az alkalmazott redundanciának a működőképesség megzavarása nélkül kell a bekövetkező meghibásodások kiküszöbölésére. A redundancia célja lehet a karbantartás és a diagnosztika könnyítése, az állásidő csökkentése. Az alkalmazott megbízhatóságot növelő megoldások az alkalmazási területtől függenek.

1.1 A megbízhatóság növelésének lehetőségei

Ez az alfejezet az elektronikus eszközökkel és rendszerekkel kapcsolatos megbízhatóságot növelő technikákhoz kapcsolódó alapvető fogalmak leírását tartalmazza.

1.1.1 A hibatűrés dimenziói

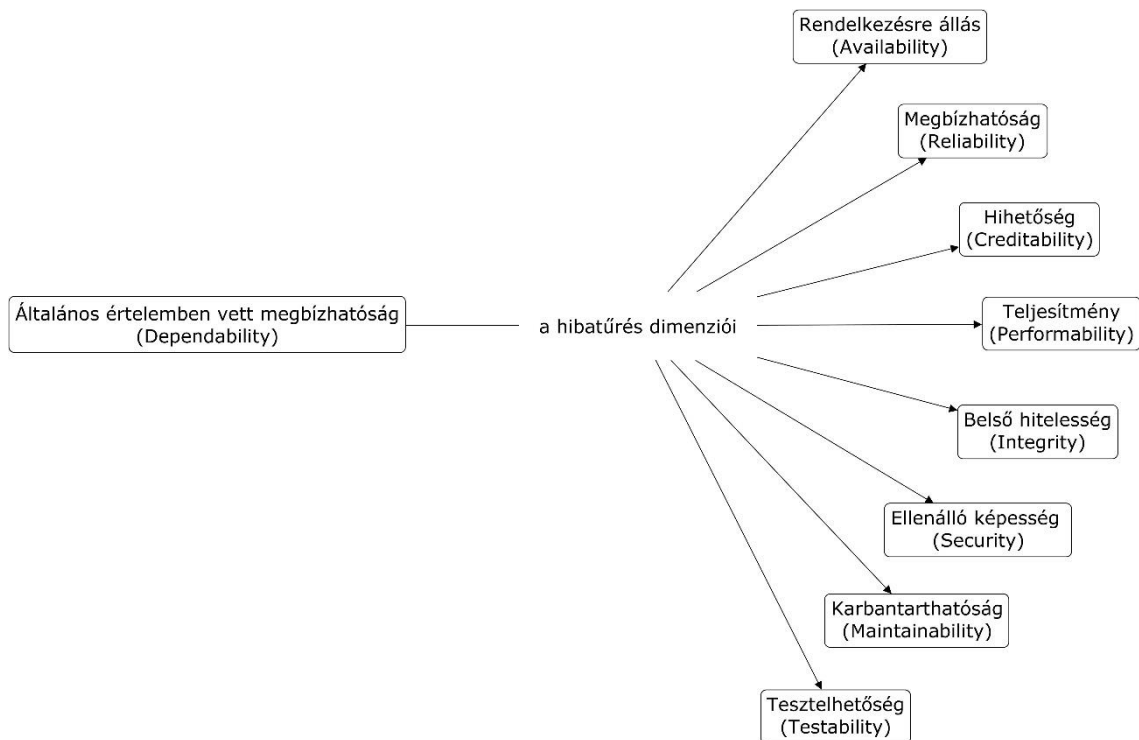
Az általános értelemben vett megbízhatóságot (1. ábra) célszerű több részterületre bontani, ezek a rendelkezésre állás, a megbízhatóság, a hihetőség, a teljesítmény, a belső hitelesség, az ellenálló képesség, a karbantarthatóság és a tesztelhetőség. [68]

A rendelkezésre állás (A_t) a rendszer üzemképes ideje ($MTBF^1$) és az $MTTR^2$ paramétert is magába foglaló teljes rendszeridő hányadosaként fogalmazható meg az (1) összefüggésében. A rendszer üzemszerű működésének valószínűségét, egy adott időtartományra vonatkoztatva, gyakran a teljes működési időre vonatkoztatva értelmezik. [54]

¹ MTBF - Mean Time Between Failure - meghibásodások közötti átlagos idő

² MTTR - Mean Time To Repair - átlagos javítási idő

$$A_t = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (1)$$



1. ábra: Általános értelemben vett megbízhatóság

A megbízhatóság a rendszer üzemszerű működésének feltételes valószínűségét mutatja meg, egy adott időpillanatra. Véges időtartam esetében vizsgálva, a leírás feltétele, hogy az időtartam kezdeti időpontjában a rendszer üzemképes. A megbízhatósági hajlandóság komplementer eseménye a meghibásodási hajlandóság, a két kifejezés összege 1 (2).

$$R_t + F_t = 1 \quad (2)$$

ahol, R_t a működőképességi hajlandóság és F_t a meghibásodási hajlandóság. [65]

Egy rendszer megbízhatóságát jellemző egyéb fő paraméter az első meghibásodásig eltelt idő (MTFF³), az első kritikus meghibásodásig eltelt idő (MTTF_D⁴) és a végzetes meghibásodásig eltelt idő (MTTF⁵).

A vizsgált időtartomány mértéke, és az arra értelmezett üzemszerű működés valószínűségének értéke az alkalmazási területtől erősen függ. Az űrtechnikai berendezés esetében, gyakran a vizsgált időtartomány megegyezik a teljes élettartammal, mivel gyakorlatilag nincs lehetőség a karbantartásra (a legtöbb berendezés esetében) [2]. Egy légiközlekedésben alkalmazott berendezés esetében, a karbantartásra lehetőség van a légiút előtt és után is, viszont a két időpont között nincs (vagy minimális mértékű), azaz ebben az esetben igen nagy megbízhatósággal kell a rendszernek rendelkeznie.

A megbízhatósággal nem egyenértékű a hibatűrés, ami már egy műszaki megoldás. Alkalmazásával az alacsonyabb megbízhatóságú elemekből építkezve egy nagyobb megbízhatóságú rendszert van lehetőség képezni. A megbízhatóság egy paraméter, amely alkatrészek és rendszerek hibatűrő képességét jellemzi. [28]

A hitelesség – mint paraméter – annak a valószínűsége, hogy egy rendszer helyesen működik, azaz pontosan a feladatát hajtja végre. A hibás működés nem megengedett, hibás működés esetében a rendszer felfüggeszti a működését, nem generál hibás kimenetet. [60]

A teljesítmény a rendszerre vonatkoztatott azon mérőszám [64], ami annak robusztusságát fejezi ki. A robusztus rendszer meghibásodása esetén annak teljesítménye csökken, de még folytatja működését redukált képességekkel. A rendszer vagy alrendszer hardver- vagy szoftverkomponensének meghibásodása esetén is képes ellátni fő feladatait, vagy képes ellátni feladatait kisebb pontossággal. Egy karbantartás során a rendszer eredeti teljesítménye visszaállítható.

A belső hitelesség annak a mérőszáma, hogy a hibamentes rendszer a rendszerfeladatait helyesen hajtja végre és hibás működés esetén arról jelzés keletkezik. [96] Ha egy számított érték egy előre definiált vagy az aktuális üzemi paraméterek alapján becsült értéktartományon kívül esik, akkor a kivételkezelés, és a számított érték módosítása következik be.

³ Mean Time to First Failure - első meghibásodásig átlagosan eltelt idő

⁴ Mean Time To Dangerous Failure - veszélyes meghibásodásig átlagosan eltelt idő

⁵ Mean Time To Failure - meghibásodásig átlagosan eltelt idő

Az ellenálló képesség alatt azt értjük, hogy a rendszer validálja a bemeneti értékeket, felismeri, illetve jelzi a hibás elemeket. [96] Erre jó megoldás a bejövő jelek átlagolása, szűrése, szavaztatása. Az EMC⁶ elleni védekezés egyes eszközei is tartozhatnak ebbe a kategóriába, az EM⁷ zajok szűrésével a rendszer ellenállóbbá válik. Az ellenálló képesség a külső behatásokra vonatkoztatott.

A karbantarthatóság mértéke ($M(t)$) a karbantartásra fordított átlagos idővel van összefüggésben – MTTR. Az időhatékony karbantartási folyamat csökkenti az állásidőt, illetve az egyszerűen elvégezhető karbantartást is magába foglalja a fogalom. [24] Redundáns alkatrészekkel vagy modulokkal (például: tápegység, háttértár, ..., stb.) felépített rendszer esetében is fontos szempont az alkatrészek vagy modulok egyszerű cseréje. A karbantartási gyakoriság az egységnyi idő alatt elvégezhető javítási munkát fejezi ki (3).

$$\mu(t) = \frac{dF(t)}{dt} (1 - F(t))^{-1} \quad (3)$$

A tesztelhetőség teszi lehetővé a rendszerek és részegységeik funkcionális tesztelését, a monitorozott értékek ellenőrzését, meghibásodások detektálását. A tulajdonsággal felvértezett rendszernek részét képezik olyan – a fő funkciók megvalósítását biztosító elemeken kívüli – hardver és szoftver modulok, amelyek segítségével a belső állapotok megfigyelhetőek, esetleg módosíthatóak. [30] Ha a rendszer csak monitorozza a belső állapotokat, a mérések alapján előre jelezhető a meghibásodás helye, esetleg annak valószínűsége egy adott időtartamon belül. A tesztelhetőség lehetősége nagymértékű csökkenést jelent a javítási és karbantartási idő tekintetében is.

1.1.2 A hiba fogalma

Egy rendszeren belül a hibaok (fault) okozza a hibát (error), ami meghibásodást (failure) eredményez. Jellemző hardveres hibaok, a rövidzárlat, a szakadás, vagy egyéb műszaki viszmajor. Jellemző szoftveres hibaok a nem valid bemeneti paraméter, konverziós hiba, téves visszatérési típus, ..., stb. Hibaok lehet, ha magas intenzitású elektromágneses sugárzás, radioaktív- vagy egyéb nagy energiájú részecskesugárzás éri a mikrokontrollert, ennek hatására tartalomváltozás következhet be egy memóriacellában, ami hibás működéshez vezethet. [23]

⁶ EMC - Electro Magnetic Interference - elektromágneses interferencia

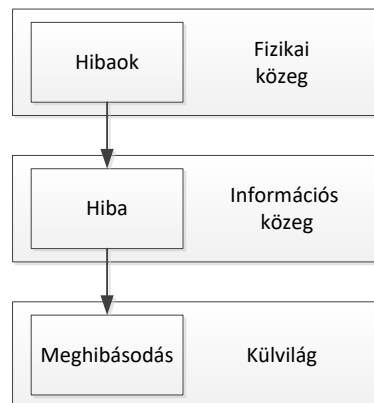
⁷ EM - Electro Magnetic - elektromágneses

A hiba a rendszeren belül jelenik meg, ez lesz a memóriacella tartalmának megváltozása. Amennyiben az érintett memóriaterületen egy look-up table (kereső tábla) foglal helyet, ami egy áramlásmérő érzékelő kimeneti értékének áramlási sebességre történő konvertálását segíti, a konverzió eredménye hibás lesz.

Az előállt hiba befolyásolja az azt felhasználó szabályozási körök működését, a szabályozási körök vezérlik az irányított rendszer beavatkozóit. A hibás mérési eredmény így kijut a külvilágba és ott meghibásodást okozhat.

A hibaok, jellege szerint a fizikai közegben jelenik meg, a hiba a rendszer belső állapotán – az információs közegben – változtat, a meghibásodás pedig a külvilágban érzékelhető. A 2. ábra foglalja össze a leírtakat. Az angolszász szakirodalom tree-universe ként hivatkozza a fent vázolt modellt. [61]

A hibaokok létrejötte több terület önálló eredményeként vagy a területek egymásra hatásának eredményeként jönnek létre. Hibaokok külső zavaró hatások, a rendszer építőelemeinek tökéletlensége, tervezési hibák következményeként állnak elő.



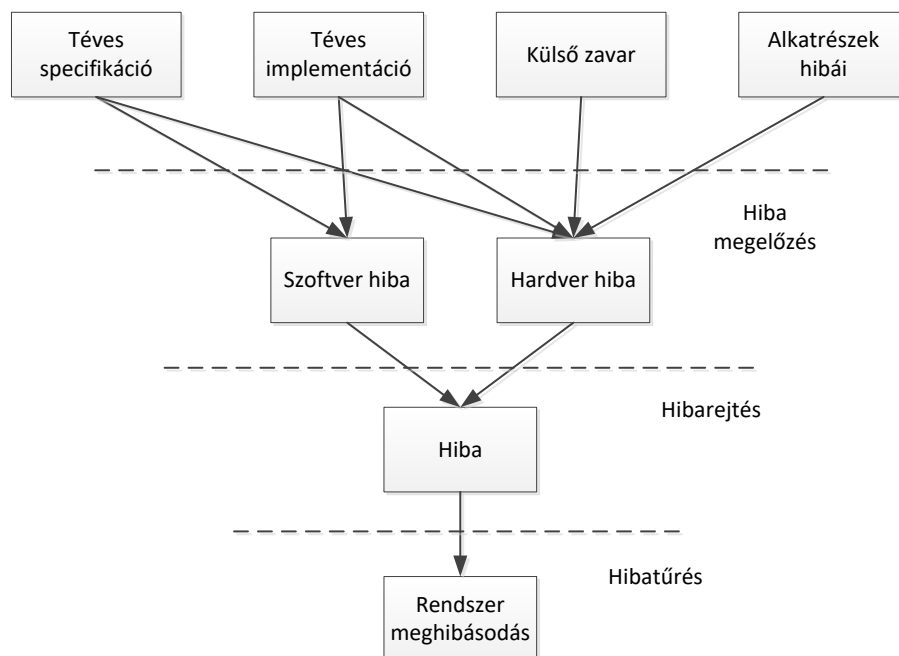
2. ábra: A hiba szintjei

A specifikáció rögzítésével kezdődik egy termék vagy rendszer tervezési folyamata. Amennyiben ez a művelet nem sikeres, az hibás terméket vagy rendszert eredményez. A hiba nem jelenik meg a tesztek során, hiszen a specifikációnak megfelelően működik a termék vagy a rendszer. Csak az alkalmazási környezetbe történő telepítés és üzembe helyezés után észlelhető a meghibásodás. Téves specifikációra példa a hardver vagy szoftver modulok között nem megfelelően definiált protokolláris, szint illesztési vagy időzítési probléma is.

A rögzített specifikáció megvalósításakor fordulhatnak elő implementációs tévedések. Kiváltó okok lehetnek a programozás során elkövetett hibák, a téves alkatrészválasztás, vagy a hibás konstrukciós döntések is.

A leggyakrabban előforduló hibaokok az alkatrészek gyártási- és szerelési technológiáinak hibáiból adódik. Az elektronikai alkatrészek, fizikai törvényszerűségek és gyártási előéletük okán paramétereikben statikusan vagy dinamikusan eltérnek. Az alkatrészek meghibásodási valószínűségére és öregedésének mértékére hatással vannak a tárolási körülmények, a beépítési módok, és az üzemi körülmények is. A leggyakrabban véletlen meghibásodás típusok a tokozáson belüli összeköttetések megszakadása. Az említett okok folytán az alkatrészek jósága idővel csökkenni fog, illetve az azonos típusú alkatrészek meghibásodása nem egy időben fog bekövetkezni. [97]

Az alkatrészekre és a hordozóra ható szélsőséges környezeti viszonyok (például, hő, fagy, nedvesség, pára, szennyeződés, sugárzás, gyorsulás, savas-, lúgos környezet, ..., stb.) okán bekövetkező villamos, korróziós vagy mechanikai sérülések pontos ideje kiszámíthatatlan, a bekövetkezésük viszont várható. A rendszer gondos tervezéssel felkészíthető a felsorolt zavaró hatások csillapítására.



3. ábra: A hiba terjedése

A rendszer tervezőinek feladata a hiba bekövetkezte után is működőképes rendszert alkotni. A bekövetkező hiba elfedéséhez ismerni kell az előforduló hibák típusait. A hibaok jellemzőket különböző csoportosítások szerint különböztethetjük meg.

A hiba forrása lehet a téves specifikáció, a téves implementáció, származhat külső zavarforrásból vagy az alkatrészek- illetve az alkalmazott technológia hibáiból (3. ábra). A hiba típusát tekintve lehet szoftveres vagy hardveres jellegű, utóbbin belül megkülönböztetünk analóg vagy digitális forrásút. A hiba előfordulása lehet tranzienst, permanens vagy sporadikus; a kiterjedése lehet lokális vagy rendszerszintű; értéke lehet determinált vagy sztohasztikus.

A hibák különböző megjelenési formái, a fentiek kombinációjaként, rendkívül változatosak lehetnek. A hibák kezelésére a rendszert – a fejlesztésre és gyártásra fordítható erőforrások figyelembevételével – fel kell készíteni, különösen a megbízhatóság-kritikus alkalmazások esetében. A ráfordított mérnökóra tekintetében, a célfeladatok az alkalmazási környezet alapján és a rendszer konstrukciója szerint szükséges vizsgálni. A hibák előfordulásának valószínűségét, azok bekövetkeztekor előidézett hatásokat, és az elfedésükre fordított erőforrásigény optimumát szükséges keresni. [66]

1.2 Konstruktív technikák

Egy rendszer megbízhatóságának növelése céljából a hibatűrés (fault tolerance) mellett, a hiba megelőzés (fault avoidance) és a hibarejtés (fault masking) is egy konstruktív technika. [71]

A felhasznált alkatrészek, az alkalmazott gyártási technológiák, a konstrukciós elvek helyes megválasztása mind segítik a hibaok kialakulásának megelőzését. A megbízhatóság növelő és a minőséget javító tervezési eljárások, a külső szakértő bevonása, az alkatrészek válogatása és túlméretezése, valamint az elektromágneses árnyékolás és szűrés, mint hibaok megelőző technikák, segítik az anomáliák kialakulásának késleltetését, elkerülését. [99]

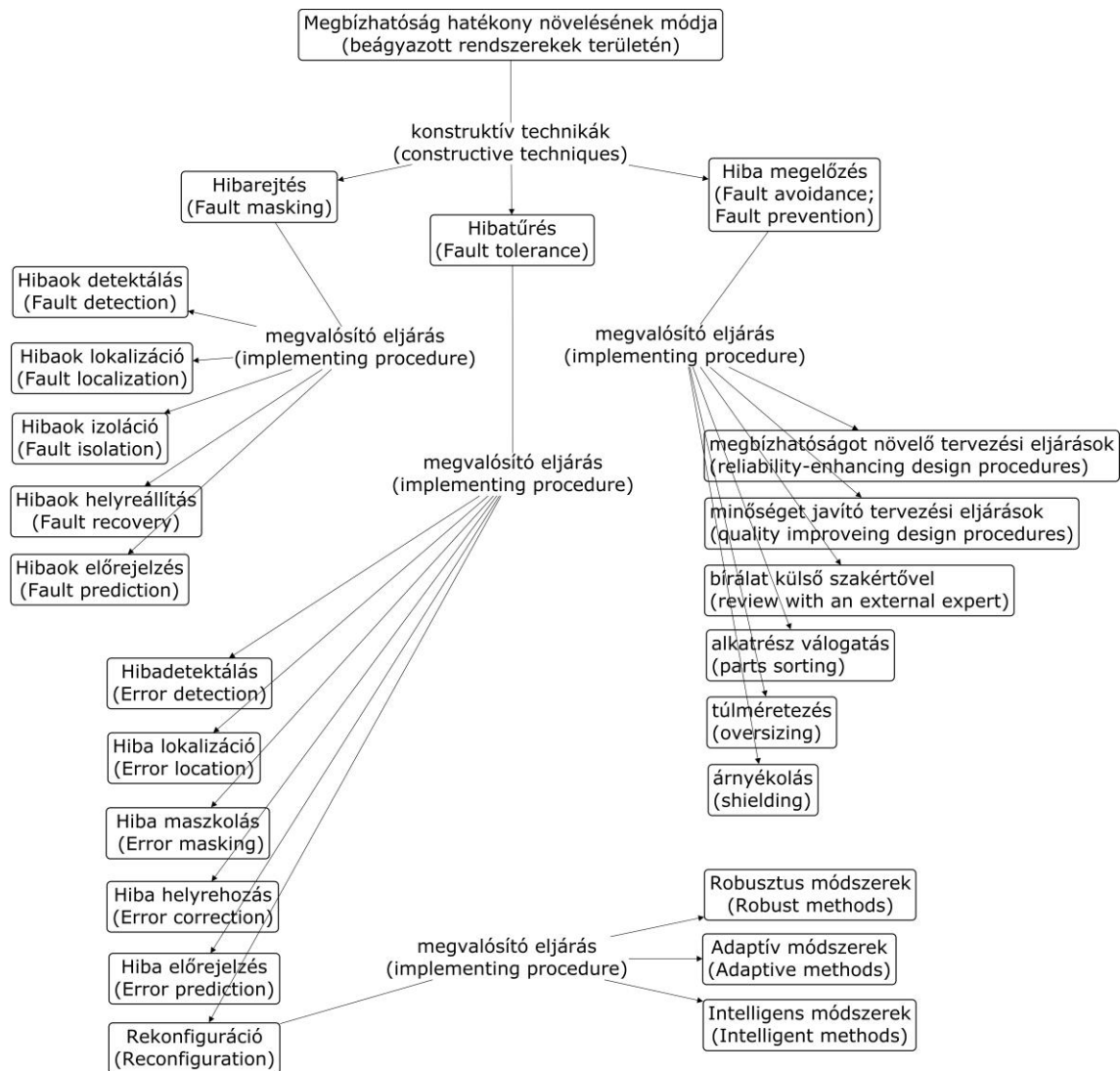
Amennyiben a hibaok fennáll, a hibarejtés technikája próbálja a hiba kialakulását meggátolni, a hibaokot a fizikai közegben tartani, megakadályozni az információs közegbe történő tovaterjedését. [46] Jellemző technika a validálás, az összehasonlítás, a többségi szavazás és az önellenőrzés is. Így megvalósítható a hibaok detektálás (fault detection), a hibaok lokalizáció (fault localization), a hibaok izoláció (fault isolation), hibaok helyreállítás (fault recovery) és a hibaok előrejelzés (fault prediction) funkció is. [31]

A hibaok detektálás a hibaok meglétének jelzésére, a hibaok lokalizáció annak forrásának meghatározására alkalmazható módszer. [88] A hibaok forrásának ismeretében a hibaok hibává fejlődése elkerülhető a hibaok figyelmen kívül hagyásával vagy a hibaok helyreállításával. [48] Az önellenőrző funkciók segítségével a mért paraméterek dinamikájából a hibaokok kialakulása bizonyos esetekben előre jelezhető. [79]

Amennyiben a hiba bekövetkezik, a hibatűrés technikája próbálja a hibát a rendszeren belül tartani, meggátolni, hogy hibás működésként jelentkezzen a külvilágban. [86] A hiba detektálása (error detection) a hiba észlelésében [4], a hiba lokalizáció (error localization) a hibás rendszerelem (mint hibaforrás) meghatározásában alkalmazható technika. [62] A hiba maszkolására (error masking), a hiba elfedésére, azaz a hibát okozó rendszerelem kiváltása útján kerülhet sor. [63] A hiba javítás (error correction) a hiba helyreállítására alkalmazható technika. [27] Az önellenőrző funkciók segítségével a mért paraméterek dinamikájából a hiba kialakulása bizonyos esetekben előre jelezhető (error prediction). [53]

A hibatűrést megvalósító – a meghibásodás elkerülését célzó – eljárás a rekonfiguráció (reconfiguration) is. Ebben az esetben is szükséges a hiba detektáló és hiba lokalizáló eljárások megléte. [33] Rekonfiguráció történhet a rendszer vagy a rendszermodul belső vezérlő paramétereinek megváltoztatásával, így az üzemi kimeneti paramétereket teljesen helyreállítva vagy a rendszer működőképességét még korlátozottan fenntartva. [14] A funkciót megvalósítani képesek a robusztus módszereket (robust methods) [15], az adaptív módszereket (adaptive methods) [67] és az intelligens módszereket (intelligent methods) [69] alkalmazó használó eljárások.

Egy beágyazott rendszeren – különösen egy nagy megbízhatóságú rendszer esetében – a fenti kategóriák átlapoltan találhatóak meg. [25] Hibrid módszerek megvalósítása esetében még nehezebb a fent vázolt halmazokba határozottan illeszkedni, de az elméleti áttekintés elengedhetetlen a hatékony rendszerarchitektúra tervezése érdekében.



4. ábra: Konstruktív technikák

1.3 A redundancia növelésének lehetőségei

A megbízhatóság növelésének módszerei közé tartozik a redundancia alkalmazása, a berendezés karbantartása és ellenőrzése. A beágyazott rendszerek területén, a megbízhatóságot növelő eljárások architektúrális lehetőségei alapján, elsősorban a redundancia növelésének lehetőségeit vizsgálom meg. A redundancia alkalmazásának létjogosultságát az elektronikai alkatrészek árának fokozatos csökkenése is indokoltá teszi.

Egy redundáns rendszer, kiegészítő hardverrel, információval, funkcióval rendelkezik. A fejezetben a redundancia formái összefoglalásra kerülnek. A fizikai redundancia, a moduláris, könnyen

szervizelhető konstrukciót támogató, a hibatűrés megvalósításának legegyszerűbb módja, így kiemelt jelentőséggel bír.

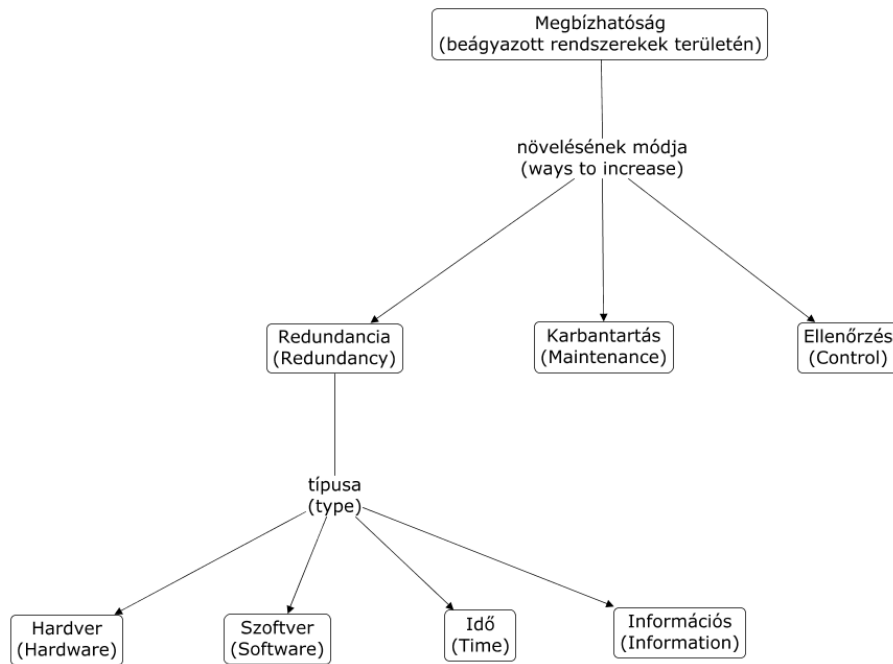
A hardver redundancia (hardware redundancy) a rendszer alapvető funkcióinak megvalósításához elengedhetetlen hardverelemeken kívül olyan hozzáadott hardver, amelynek segítségével hibarejtés és hibatűrés funkciói valósíthatók meg, például alkatrészek vagy rendszermodulok többszörözése. A hozzáadott alkatrészek növelik az eszköz méretét, bonyolultságát, energiafogyasztását, árát és a fejlesztési időre és költségekre is hatással vannak. [58]

A szoftver redundancia (software redundancy) az üzemszerű működéshez elengedhetetlen szoftver modulokon felüli kódrészlet, amely lehetővé teszi a rendszerben keletkező hibák detektálását és esetleges javítását. A szoftver redundancia növeli a fejlesztési időt, illetve a kiterjedtebb funkcionalitású kód túllépheti az alapmodell erőforrásigényét, így hatással lehet a vezérlőegység teljesítményére is, azaz a memória méretére, számítási kapacitására, kiegészítő perifériák és kommunikációs lehetőségek paramétereire, I/O lábak számára, ..., stb.

Az információs redundancia (information redundancy), a rendszer alapvető működésén felüli rendelkezésre álló információtartamot értjük, segítségével jellemzően hiba detektáló és hiba javító funkciók valósíthatók meg, például paritásbitek alkalmazása. [3] A kiegészítő információk megszerzéséhez azok mérése szükséges, ehhez extra hardver és szoftver erőforrások felhasználása is szükséges.

Az idő redundancia (time redundancy) a rendszer alapfunkcióinak megvalósításához szükséges működési időn felüli üzemidő ráfordítás, ami jellemzően hibatűrés funkciókat valósít meg, például számítási eredmények többszöri végrehajtása és validálása. A működési idő megnyújtása elsősorban a fogyasztás növelésében játszik szerepet. [77]

Redundancia alkalmazásával a rendszer megbízhatósága növelhető, de hatással van a fejlesztési és gyártási költségekre, a késztermék méretére, súlyára, energiaigényére és árára is. Az alkalmazott redundancia típusa a gyakorlatban csak részben különíthető el, a legtöbb esetben a redundancia növelő módszerek együttes alkalmazása a hatékony, de az egyes eljárások hangsúlyozottan fordulhatnak elő, így érdemes a redundanciát növelő lehetőségek különálló tárgyalása. [29]



5. ábra: A megbízhatóság növelésének módjai

1.3.1 Passzív redundancia

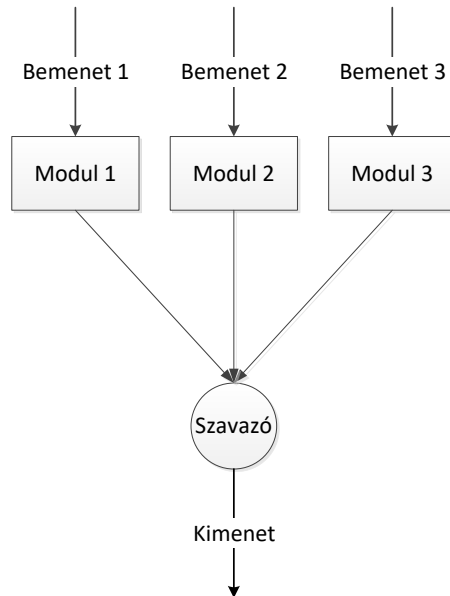
A passzív redundancia (passive redundancy), felhasználói beavatkozást nélkülözve képes a hibát elfedni, maszkolni. A kialakítás jellemző építőeleme a többségi szavazó (majority voter). A megbízhatóság növelése a duplikálalt, triplikált vagy többszörözött rendszermodulok kimeneteinek kiértékelésével érhető el. [15]

A DMR⁸ rendszerek esetében – csak hardver redundanciát feltételezve – a két modul kimenetét összehasonlítva, hibahatárt meghaladó eltérés esetében csak a hiba detektálható, annak maszkolása nem megoldható, mivel nem megállapítható, hogy melyik eredmény a helyes.

A TMR⁹ rendszerekben (6. ábra) a triplikált modulok kimeneteit összehasonlítva mindaddig jó eredmény kapható a többségi szavazó kimenetén, ameddig a három modulból kettő jól működik. Két modul meghibásodása esetén a működés megbízhatatlan lesz. Az eljárás mind hardver, mind szoftver rendszerelemek esetében is használható.

⁸ DMR - Double Module Redundancy - dupla moduláris redundancia

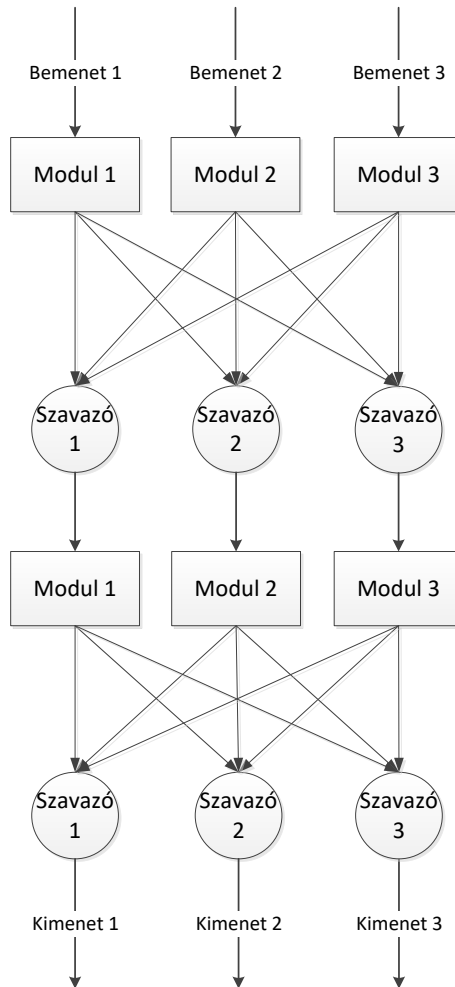
⁹ TMR - Triple Module Redundancy - tripla moduláris redundancia



6. ábra: TMR architektúra

A szavazó meghibásodása esetén az alrendszer helytelen kimeneti eredményt továbbít. A szavazó hardveres és szoftveres megvalósítása is egyszerűen kivitelezhető, így jóval nagyobb megbízhatóságú, mint a nála bonyolultabb felépítésű többszörözött rendszermodulok. Az összetettebb felépítésű szavazók megbízhatóságát növelő eljárásként a szavazóelemek többszörözésére is van lehetőség, majd egy egyszerűbb felépítésű szavazó – mint többségi döntő (majority final) – dönt a többszörözött szavazók kimeneteinek helyességéről.

A rendszeren belül a különböző rétegek, interfészek, protokollok, modulok közötti információterjedés határain kiépített többszörözött többségi szavazók nagy mértékben növelik a rendszer megbízhatóságát (7. ábra), illetve lehetőség nyílik a rendszerszintek szakaszolására, a hiba szakaszhatáron történő megállítására, annak egyszerű módszerekkel történő lokalizálására. A megoldás további előnye, hogy a rendszer több hiba kezelését is el tudja látni, amennyiben azok különálló rendszerszakaszokban fordulnak elő. A megoldás hátránya a költségek, a fogyasztás és a méretek oldalán mutatkozik meg.



7. ábra: Szekvenciális TMR architektúra

Amennyiben a redundáns rendszermodulok száma N , NMR^{10} rendszerekről beszélhetünk. Célszerű páratlan számú párhuzamosan üzemelő rendszermodult választani, a szavazategyenlőség elkerülése érdekében, például $5MR^{11}$, $7MR^{12}$. A TMR rendszerekkel összehasonlítva, az említett kiépítések előnye a magasabb szintű megbízhatóság, a hátránya a költségek, fogyasztás, méretek további növekedése. [108]

A többségi döntők dönthetnek a többszörözött többségi szavazók kimenetei alapján, amennyiben a következő fokozat nem többszörözhető (egy mechanikai mozgást végrehajtó aktuátor), így annak bemeneti jelének nagy megbízhatóságnak kell lennie.

¹⁰ NMR - N-Modular Redundancy - N moduláris redundancia

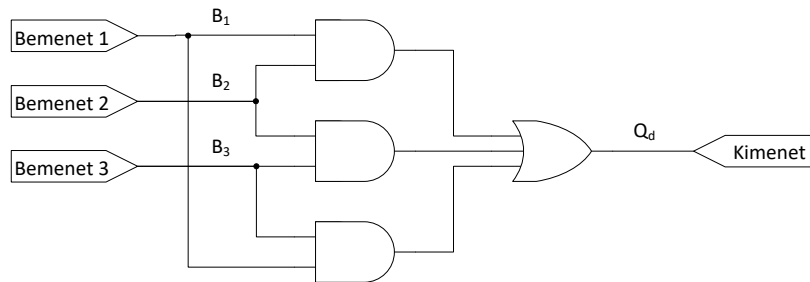
¹¹ 5MR - Quintuple Modular Redundancy - penta moduláris redundancia

¹² 7MR - Septuple Modular Redundancy - hepta moduláris redundancia

Egyszerű három bemenetű hardveres szavazó áramkör néhány logikai kapuból is felépíthető a 8. ábra alapján. A működést a (4) kifejezés írja le. Kizáró vagy funkció segítségével a hibás modul lokalizálására is lehetőség van. [106]

$$Q_d = (B_1 \wedge B_2) \vee (B_2 \wedge B_3) \vee (B_3 \wedge B_1) \quad (4)$$

ahol, Q_d a logikai kimenet értéke, B_n a logikai bemenetek értékeit jelöli.



8. ábra: Logikai kapukból felépített szavazó áramkör

A logikai kapuáramköröknél még egyszerűbb és magasabb megbízhatóságot biztosító alkatrészek a félvezető kapcsolóelemek (BJT¹³-k, MOSFET¹⁴-ek), melyekkel szintén megvalósítható a fent vázolt logikai hálózat. Alkalmazásuk magas környezeti terhelés, például intenzív háttérsugárzás esetén célszerű – a szakirodalomban RadHard (Radiation Hardened) eljárásnéven ismert. [69]

Logikai elemekből felépített szavazó áramkör az integritás növelése céljából megvalósítható FPGA¹⁵ segítségével is. [105] A cél IC belső konfigurációja egy nem felejtő memóriában tárolt (Flash, EEPROM¹⁶). Intenzív háttérsugárzás hatására a memóriacellák tartalma megváltozhat (SEU¹⁷), így a szavazó megbízhatósága csak akkor lesz nagyobb az általa összevetésre kerülő többszörözött modulok megbízhatóságánál, ha a szavazó áramkör összetettségét csökkentjük (9. ábra). A szavazó áramkört konfiguráló memóriaterület méretét csökkentve, a kozmikus sugárzás

¹³ BJT - Bipolar Junction Transistor - bipoláris tranzisztor

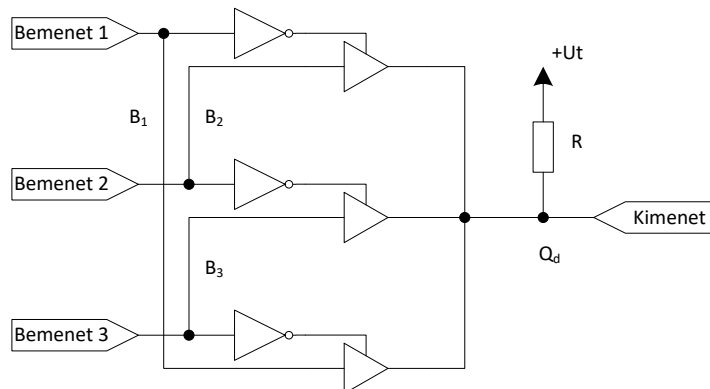
¹⁴ MOSFET - Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor - fém oxid félvezető térvezérlésű tranzisztor

¹⁵ FPGA - Field-Programmable Gate Array - felhasználás helyén programozható logikai kapumátrix

¹⁶ EEPROM - Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory - elektronikusan törölhető programozható csak olvasható memória

¹⁷ SEU - Single-Event Upset - sugárzás hatására bekövetkező logikai szint változás

által okozott káresemény valószínűsége is csökken [84], bár még ekkor is bekövetkezhet egyéb SEE¹⁸ esemény, például SEL¹⁹, SEGR²⁰ vagy SEB²¹.



9. ábra: Three-state-es bufferekből felépített szavazó áramkör

Az egy bites szavazó áramkörök kibővíthetőek nagyobb szóhosszúságra is, ebben az esetben az áramkör bonyolultsága, nagy mértékben növekszik (lásd, egy 32 bit szószélességű szavazó esetében) [16]. A hardveres megvalósítás mellett lehetőség van szoftveres implementációra is, így növelve a rugalmasságot, csökkentve a költségeket, a méretet és a fogyasztást is. A szoftveres megoldás hátránya a lassúbb végrehajtási idő és a soros utasításvégrehajtásból adódó korlátok.

A bites szavazókkal ellentétben a teljes szó hosszúságú szavazók az egész szó szélességét figyelembe veszik összehasonlításkor. A megoldás hátránya a bites szavazókhöz képest a jóval bonyolultabb felépítése, ezért az áramkörtípust FPGA környezetben érdemes megvalósítani.

A szó hosszúságú szavazóknak a mérési - és alkatrész hibákból, külső zajokból, kerekítési hibákból, ..., stb. adódó relatív kis mértékű eltéréseket is kezelnie kell. Alkalmazási területtől függően az alsó helyiértékeken történő vizsgálatot célszerű maszkolással eliminálni. Az elhagyás mértéke hibaszámítás segítségével meghatározható. [92] Optimumként alkalmazható a bites és szó hosszúságú szavazók hibrid megoldása is. [93]

¹⁸ SEE - Single-Event Effect - sugárzás hatására bekövetkező esemény

¹⁹ SEL - Single-Event Latch-Up - sugárzás hatására bekövetkező kapuáramkörön belüli rövidzárlat

²⁰ SEGR - Single-Event Gate Rupture - sugárzás hatására bekövetkező kapuáramkörön belüli szakadás

²¹ SEB - Single-Event Burnout - sugárzás hatására bekövetkező meghibásodás

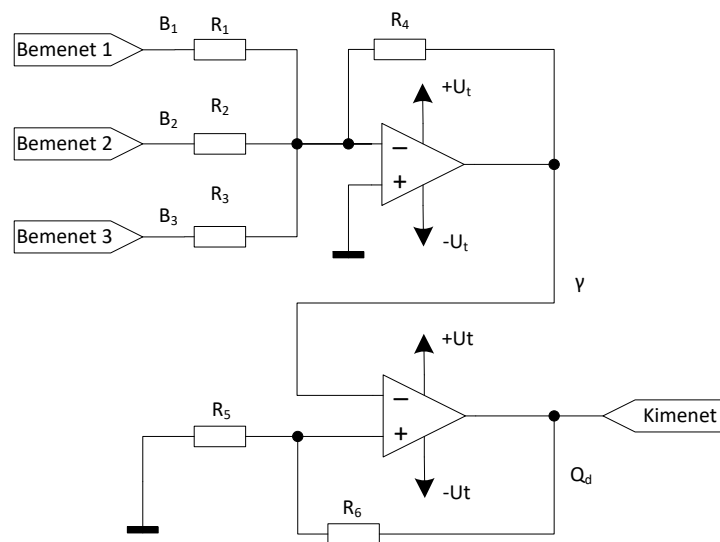
Többségi szavazó áramkör analóg elemekből is felépíthető. Erre egy ajánlást adtam a 10. ábra. A γ jelszinten előállnak a súlyozott logikai bemeneti értékek összegei, (5) szerint írható le.

$$\gamma = -R_4 \left(\frac{B_1}{R_1} + \frac{B_2}{R_2} + \frac{B_3}{R_3} \right) \quad (5)$$

Az áramkör egy invertáló hiszterézis komparátorral biztosítja a logikai feszültségtartományt a következő fokozat számára. A 10. ábra alapján az U_H hiszterézis feszültséget (6) írja le.

$$U_H = U_t \frac{R_5}{R_5 + R_6} \quad (6)$$

Az áramkörtípus jól alkalmazható analóg áramkörös környezetben, illetve olyan hibrid áramkörben, ahol az analóg és digitális részáramkörök jól elkülönülnek. A megoldás nagy integráltságú analóg áramkörök (FPAA²²) segítségével is felépíthető. [43]



10. ábra: Műveleti erősítővel felépített szavazó áramkör

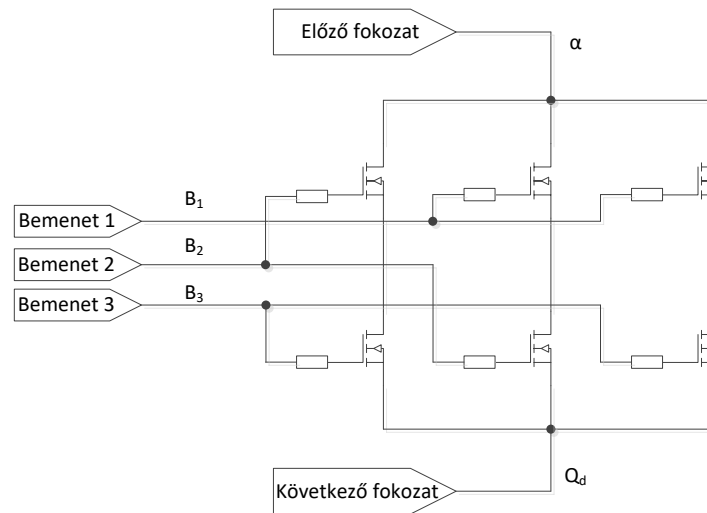
A szavazást van lehetőség megvalósítani teljesen aktuátor oldalon is. A technológiai szavazó a szavazó céláramkört elhagyva, a beavatkozóelemeket pedig többszörözve – így növelve a redundanciáját is –, illetve azokat (4) alapján kiépítve hozható létre és a (7) szerint írható le.

$$Q_d = f_{ts}\{\alpha, B_n\} \quad (7)$$

²² FPAA - Field-Programmable Analog Array - felhasználás helyén programozható analóg áramkörmátrix

ahol f_{ts} a technológiai szavazó működését írja le.

A gyakorlati megvalósítás történhet félvezető kapcsolóelemekkel (11. ábra) vagy – azonos felépítéssel – mágnesszelepekkel vagy villamos gépek tekercseléseinek többszörözésével is. Az említett fluxus összegző egy aktuátortesten belüli redundáns kiépítés, előnye a helytakarékos és egyszerű kivitel, a megnövelt megbízhatóság és robusztusság. [56] MEMS²³ technológia alkalmazásával nanométeres mérettartományban is megvalósítható technológiai szavazó. [70]



11. ábra: Technológiai szavazó megvalósítása MOSFET-ekkel

Redundáns érzékelők egymástól eltérő kimeneti jeleinek szavaztatása is történhet teljesen szoftveres oldalról. Az érzékelők kimeneti jelei lehetnek a mérésihibatartományon belül is, ebben az esetben is segítheti az érték kiválasztást egy kerekítő művelet vagy egy középérték szavazó. [81] Többszörözött szavazók esetében célszerű a kerekítési hibákat kiküszöbölni, mivel azok a további redundáns fokozatok számításai során megnövekedhetnek és egymáshoz képest értelmezett hibahatáron túli eltérést okozhatnak. [13]

Amennyiben az érzékelő kimenetek közötti maximális eltérést kettő hatványai szerint választjuk meg, a szoftveres összehasonlító eljárást nagyban leegyszerűsíthetjük, mivel jobbra léptetés bitműveletekkel vagy maszkolással az LSB²⁴ bitek könnyen elhagyhatóak. A megoldás hardveres középérték szavazó esetében is jól használható. [36]

²³ MEMS - Micro ElectroMechanical Systems - mikro elektromechanikus rendszerek

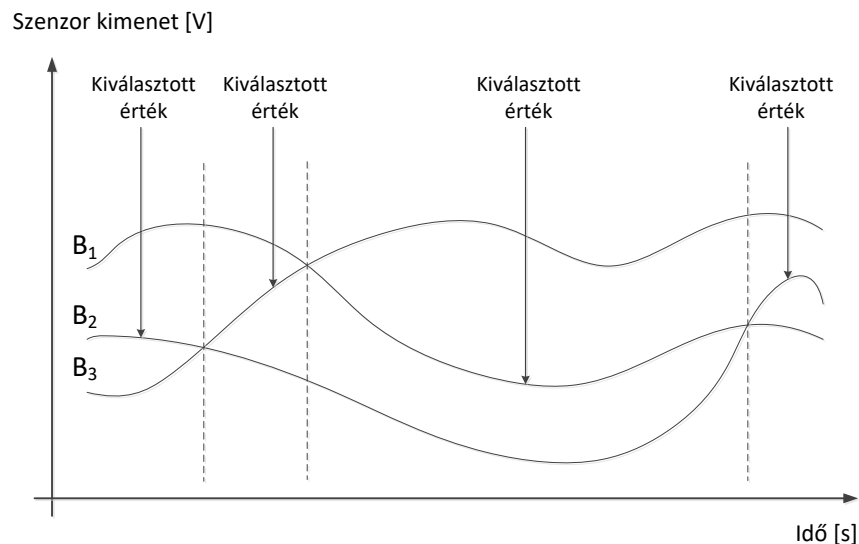
²⁴ LSB - Least Significant Bit - legkisebb helyiértékű bit

Amennyiben előfordul a redundáns érzékelők kimeneti jelei közötti relatív nagy eltérés, a középérték szavazó alkalmazása kielégítő eredményt adhat. [72] A 12. ábra alapján a B_n bemeneti jelek közül mindig az értékben közepen elhelyezkedő jel értékét adja meg kimenetként. Az eljárás 3 bemenő jelre alkalmazva mindaddig helyes eredményt ad amíg két helyes bemenő jel érkezik a szavazó bemenetére. A megoldást (8) írja le:

$$Q_a = \{B_1, B_2, B_3\} \setminus \{\min(B_1, B_2, B_3), \max(B_1, B_2, B_3)\} \quad (8)$$

ahol, Q_a az analóg kimeneti érték, f_{ks} pedig a középérték szavazó működését fejezi ki.

A megoldás kiterjeszhető nagyobb számú redundáns érzékelő kimenet kezelésére is, célszerű a páratlan számú bemenőjel alkalmazása. [40]



12. ábra: Középérték szavazó működési elve

A kimenetiérték számítása esetében, a kimenőjel előző időpillanataiban felvett értéke alapján is validálható a bemenő jel, illetve a bemenőjelek változási sebességei is maximálhatják a kimeneti jel változási sebességét. A bemeneti jelek egymáshoz képesti távolságuk alapján is súlyozhatóak aszerint, hogy a kimenet számítását végző algoritmus milyen mértékben vegye figyelembe őket. [89] [91]

1.3.2 Aktív redundancia

Az aktív redundancia (active redundancy) a hiba detektálását, lokalizációját célzó eljárásokat valósít meg, majd ezek elhárítására a rekonfiguráció lehetőségeit alkalmazza. A keletkezett hiba

helyének meghatározásával a rendszer úgy módosítható, hogy a hiba hatása – a lehető legnagyobb mértékben – kiküszöbölésre kerüljön. [67]

A rendszermodulok duplikációját alkalmazva, a redundáns hardver vagy szoftver modulok kimeneti eredményeinek összehasonlítása segíti a hiba detektálását és a hibajel (H) előállítását (9). Az összehasonlítás során a hibahatáron kívüli értékkülönbség indikálja a hiba jelenlétét, de lokalizálása a rendszer további kiegészítésével oldható meg. A rendszer vagy az adott rendszermodul hihetősége növelhető a vázolt eljárással.

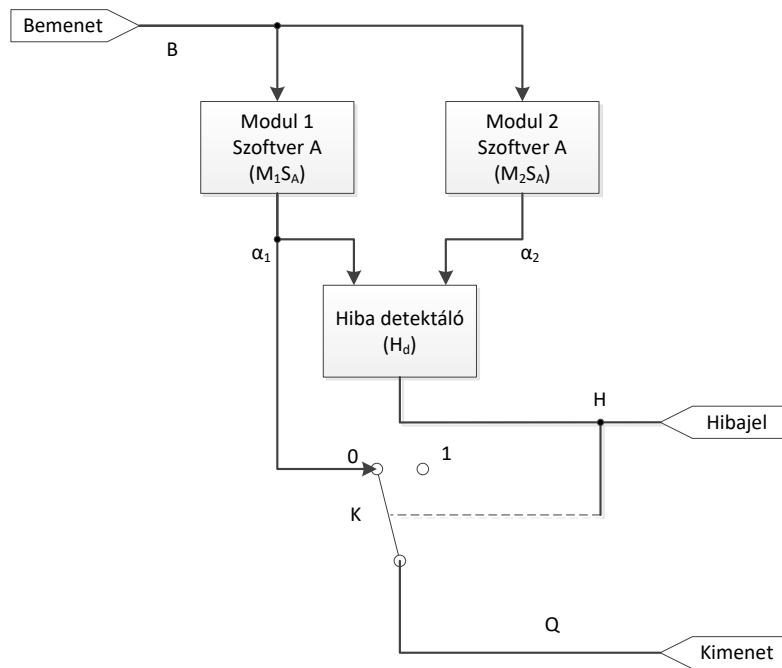
$$H = \begin{cases} 0, & M_1S_A(B) = M_2S_A(B) \\ 1, & M_1S_A(B) \neq M_2S_A(B) \end{cases} \quad (9)$$

ahol, M_1S_A és M_2S_A a 13. ábrához tartozó duplikált rendszermodulok átviteli függvényei.

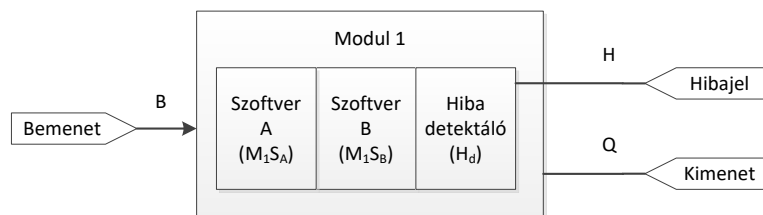
Hardver redundancia esetében jellemző a párhuzamos modulkiépítés és funkció végrehajtás (13. ábra). Idő redundanciára esetében egy modul esetében kivitelezett szoftveres funkció, időben eltolt vagy párhuzamos – lehetőleg diverz – végrehajtási módja valósul meg (14. ábra). A hibajel a 14. ábra alapján (11) szerint írható fel. A két megoldás hibrid (15. ábra) valamint együttes alkalmazására is van lehetőség, (9) és (11) alapján, a hibajel ebben az esetben (11) szerint írható fel. A hiba detektáló modul végzi az eredmények összehasonlítását és jelzi a rendszer számára annak eredményét, valamint rendszerarchitektúrától függően vezérelheti a jelterjedést befolyásoló kapcsolatokat is.

$$H = \begin{cases} 0, & M_1S_A(B) = M_2S_A(B) \\ 1, & M_1S_A(B) \neq M_2S_A(B) \end{cases} \quad (10)$$

ahol, M_1S_A és M_2S_A a 14. ábrához tartozó duplikált rendszermodulok átviteli függvényei.



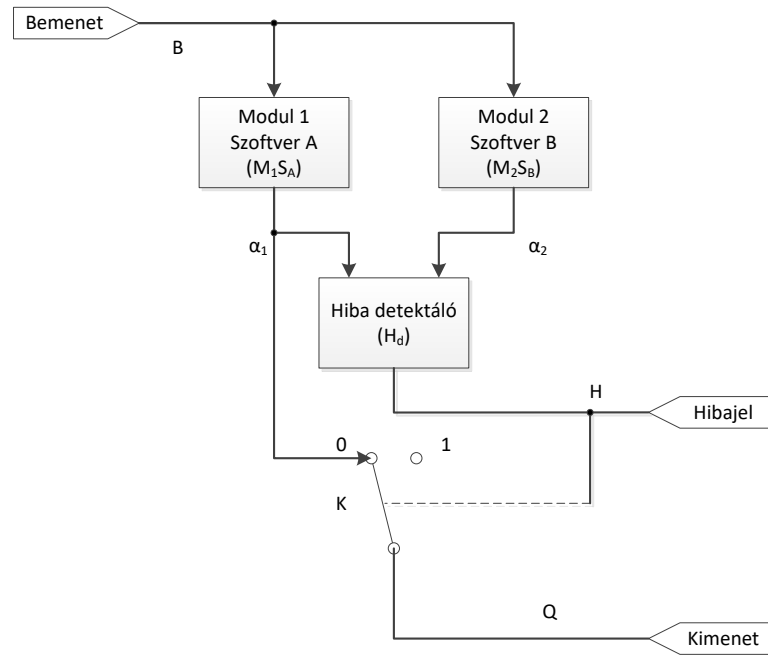
13. ábra: Hardver redundancia megvalósítása



14. ábra: Idő redundancia megvalósítása

$$H = \begin{cases} 0, & M_1S_A(B) = M_1S_B(B) \\ 1, & M_1S_A(B) \neq M_1S_B(B) \end{cases} \quad (11)$$

ahol, M_1S_A és M_1S_B a 15. ábrához tartozó duplikált rendszermodulok átviteli függvényei.



15. ábra: Hibrid idő és hardver redundancia megvalósítása

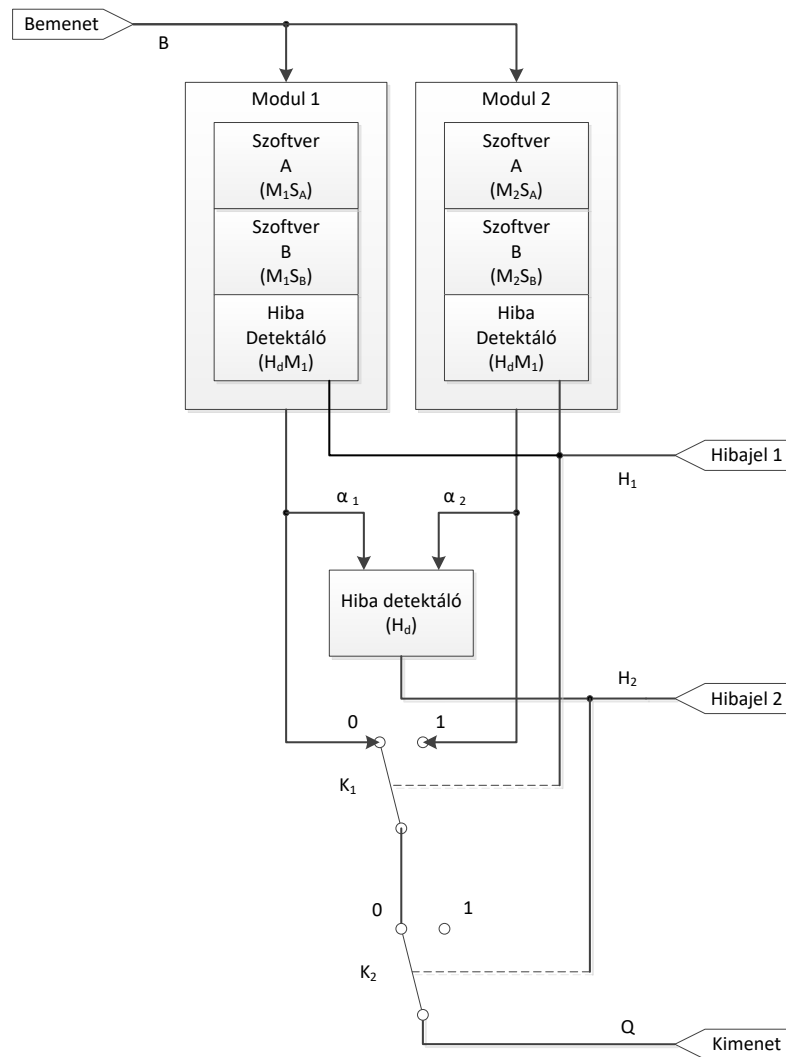
Az azonos hardveren futtatott redundáns funkciójú szoftver modulok esetében, a jelentkező véletlen hardveres hiba, a diverz, különböző memóriaterületeket és erőforrásokat felhasználó szoftveres modulok kimenetén felfedhető. Redundáns hardveren futó azonos szoftver esetében, a jelentkező véletlen hardveres hiba, a modulok kimeneteinek komparálásával felfedhető. A redundáns hardveren futó diverz szoftver esetében, a jelentkező véletlen hardveres vagy szoftveres hiba, a modulok kimeneteinek komparálásával érzékelhető. Az idő és hardver redundancia együttes alkalmazásával a szoftveres és hardveres hibák felfedhetőek és egymástól megkülönböztethetőek (16. ábra) – H_1 hibajel (11) felhasználásával (12) alapján fejti ki.

$$H_1 = [M_1S_A(B) \neq M_1S_B(B)] \vee [M_2S_A(B) \neq M_2S_B(B)] \quad (12)$$

A kimenet hibamentes esetben (13), (12) felhasználásával:

$$Q = \overline{H_1} \wedge (\alpha_1 = \alpha_2) \quad (13)$$

ahol, $\overline{H_1}$ a (12) kifejezés negáltja, α_1 és α_2 a duplikált rendszermodulok kimeneti jelei.



16. ábra: Idő és hardver redundancia együttes alkalmazása

A hiba detektálónak nagyobb megbízhatóságúnak kell lennie, mint az általa vizsgált rendszermoduloknak – mint a TMR architektúra szavazója esetében is. Gyakorlati példa, a komparátorként alkalmazható, kizáró vagy (XOR) kapukból felépített bites szavazó. Egyszerűsége mellett itt is szükséges megemlíteni, hogy a bemenetek közötti hibahatáron belüli eltéréseket kezelni, illetve az érvényes bemenetek eltérő időben történő megjelenését szinkronizálni kell a helyes hibajel előállítására érdekében. A szavazók szoftveres megvalósítása is az ismertetett elvek alapján történik.

Tartalékos rendszerek esetében a hiba detektálásán és lokalizálásán kívül annak helyreállítására is lehetőség van. Az említett architektúra jellemzően a meghibásodott modulok cseréjével látja el a hiba helyreállításának műveletét, a folyamat feltétele a hiba helyének lokalizálása.

A redundáns rendszermodulok cseréje kapcsolók segítségével történhet, melyek képesek az áramutakat és a jelvezetékeket a környezetükhöz csatolni vagy a környezetüktől elválasztani. A gyakorlatban jellemzően félvezető kapcsolóelemeket (MOSFET-eket) alkalmaznak kapcsolóként, de a galvanikus leválasztás igényét kielégítve lehetőség van relék vagy optocsatolók alkalmazására is. [78] A 2.4 fejezetben ismertetem az általam kidolgozott megvalósítást.

Több hiba nélküli, redundáns rendszermodul megléte esetében egy előre definiált (vagy dinamikusan paraméterezhető) algoritmus alapján dől el az aktuálisan üzemben lévő egy (vagy több) rendszermodul kiválasztása. A meghibásodott (vagy csökkent teljesítményű) rendszermodulokat az azokat felügyelő alrendszer az üzemből kiveszi és a hibátlan modulokat helyezi helyettük üzembe. Az átkapcsolás során fennáll az esélye bizonyos rendszerfunkciók időszakos kiesésének, ennek minimalizálására a rendszer tervezésekor törekedni kell.

Amennyiben a redundáns modul melegtartalékként üzemel a nagy megbízhatóságú architektúrában, úgy az esetleges átkapcsolás gyorsabban megtörténhet, de a rendszer fogyasztása nagyobb, illetve a redundáns modul meghibásodási valószínűsége magasabb lehet. Hidegtartalék esetében az átkapcsolás lassabban megy végbe, mint melegtartalék esetében, de a rendszer fogyasztása is alacsonyabb, valamint a redundáns modul megbízhatósága is kisebb mértékben időinvariáns, mint a melegtartalékként üzemelő redundáns rendszermodulé. Általános esetre lásd a (14) kifejezést.

$$\lim_{t \rightarrow t_1} R_{th}(t) > \lim_{t \rightarrow t_1} R_{tm}(t) \quad (14)$$

ahol, R_{th} a hidegtartalék működőképességi hajlandósága és R_{tm} a melegtartalék működőképességi hajlandósága.

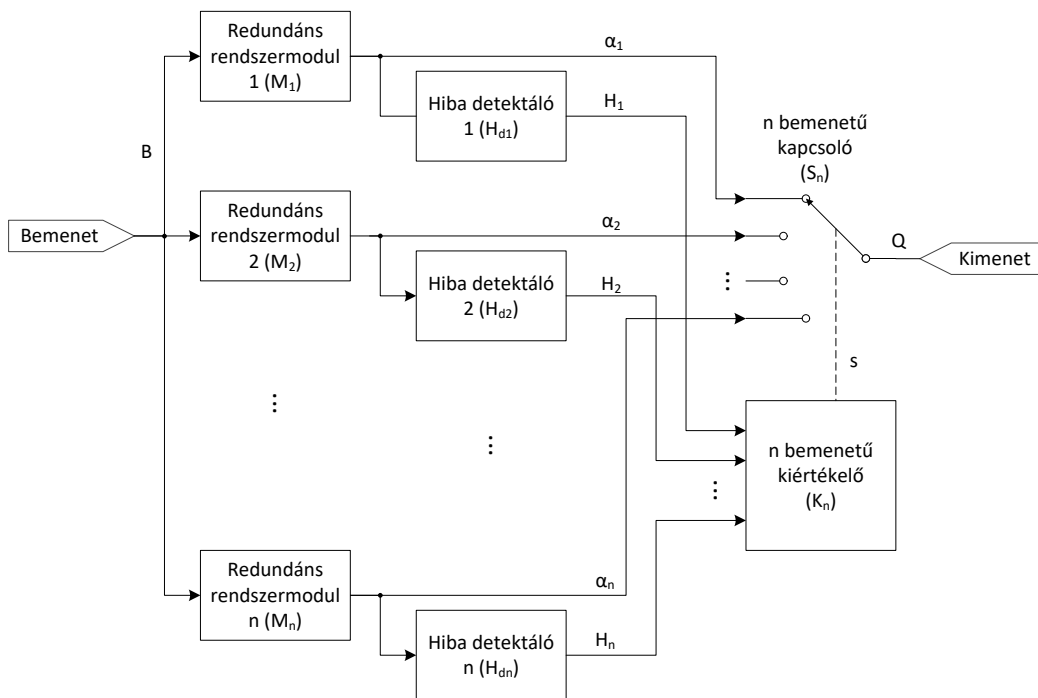
A nem kritikus infrastruktúrák részeként üzemelő egységek időszakos funkciókiesése jellemzően elfogadható, a fogyasztás csökkenése és a nagyobb hosszútávú megbízhatóság érdekében. Vegyi üzemek vagy erőművek berendezéseit felügyelő rendszerek esetében az üzemszerű működés időszakos kiesés nem megengedhető.

Az általános értelemben vett tartalékos rendszerarchitektúra (17. ábra) redundáns modulok számával összemérhető hibaszámot tud korigálni. Egy 5MR rendszer esetében két modul meghibásodását tudja a rendszer tolerálni. Az említett példában a redundáns modulok száma $n=5$,

a meghibásodások maximális száma $k=2$. A rendszer százalékban kifejezett redundanciája (R) 40%.

A fentiek alapján az NMR rendszerek esetében a százalékban kifejezett redundancia maximális értéke 50%. A tartalékos rendszerek esetében (15) írható fel, a 17. ábra szerinti rendszer kimenete (16) szerint áll elő.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} R_t > 100\% \quad (15)$$



17. ábra: Tartalékos rendszer általános architektúrája

$$Q = S_n \{s[K_n(\bar{H})], \bar{\alpha}\} \quad (16)$$

ahol, S_n a több bemenetű kapcsolóelem, s a kapcsolóelemet vezérlő jel, K_n a kimenetet vezérlő kiértékelő elem, $\bar{\alpha}$ a redundáns modulok kimeneti jeleit tartalmazó vektor, \bar{H} a hibajel vektor.

Tartalékos rendszerek esetében az átkapcsolást vezérlő eljárás a hiba detektáló és lokalizáló funkción alapul. Az átkapcsolás a rendszerdiagnosztikai eredmények és az esetlegesen bekövetkezett meghibásodások alapján történhet meg, az átkapcsolást történhet automatikusan vagy operátor által is. [1]

A rendszerek vagy azok különböző szintjeinek és moduljainak diagnosztizálására szolgáló megoldások feladata jelezni a nem üzemzerű működést. A meghibásodott rendszeren futó öndiagnosztikai algoritmus feladata felfedni önmaga működésképtelenségét. A rendszerdiagnosztikai megoldások interpretációja erősen alkalmazásfüggőek, ezért univerzálisan alkalmazható hardver- vagy szoftverarchitektúrát adni igen nehéz. Hatékonyan alkalmazható hibadetektálásra egy modul ki- és bemeneti értékeinek értéktartománybeli vizsgálata is. [90]

Egy mért vagy számított érték amennyiben az előre definiált hihetőségi tartományon kívül esik, úgy az előfordulása esetén kivételkezelést vonhat maga után. Az ellenőrzés belső változók értékvétele vagy paraméterátadás után is történhet. Az érvényes értéktartomány határai a működés során dinamikusan változhatnak. Sok esetben hasznos információval bír a vizsgált jel változási sebessége vagy spektruma is. [11]

A watchdog timer (WDT²⁵) a vezérlő IC-nél egyszerű felépítésű, így annál nagyobb megbízhatóságú rendszerelem, a gyakran megtalálható a mikrokontrolleren (mikroprocesszoron) belüli perifériaként vagy megvalósítható külső hardverként is – támogatva a vezérlőegység működőképességét. A rendszerelem egy időzítőt tartalmaz, ami meghatározott órajelfrekvencia alapján számlál. A számláló a nulla értéket felvéve megszakítást vagy reszetet generál, így újraindítva a rendszert hardveres vagy szoftveres hiba bekövetkezése esetén. [14]

A számlálónak a berendezésen futó firmware-ben (vagy szoftverben) meghatározott időnként újra értéket kell adni, hogy csak időtúllépés esetén diagnosztizáljon hibát. A beállított kezdőérték (mint periódusidő) függ az alkalmazási környezettől, valamint az éppen végrehajtandó feladattól is. Egy busz kommunikációját figyelő control-flow watchdog, a busz jellegzetességeit figyelembe véve dönt a kommunikáció hibamentességéről. Gyakorlati alkalmazása jellemzően egyéb hibakezelési eljárásokkal kombinálva történik. [15]

1.3.3 Hibrid redundancia

A hibrid redundancia (hybrid redundancy) a passzív-, illetve az aktív redundancia elemeiből építkezve képes megvalósítani a hibatűrés funkcióit. A megoldás egyesíti a tartalékos rendszerek sajátosságát – a magas százalékos redundancia értékét – és az NMR rendszerekre jellemző megszakítás nélküli működés előnyeit, valamint kiküszöböli a tartalékos rendszereknél előforduló

²⁵ WDT - Watch Dog Timer - biztonsági időzítő áramkör

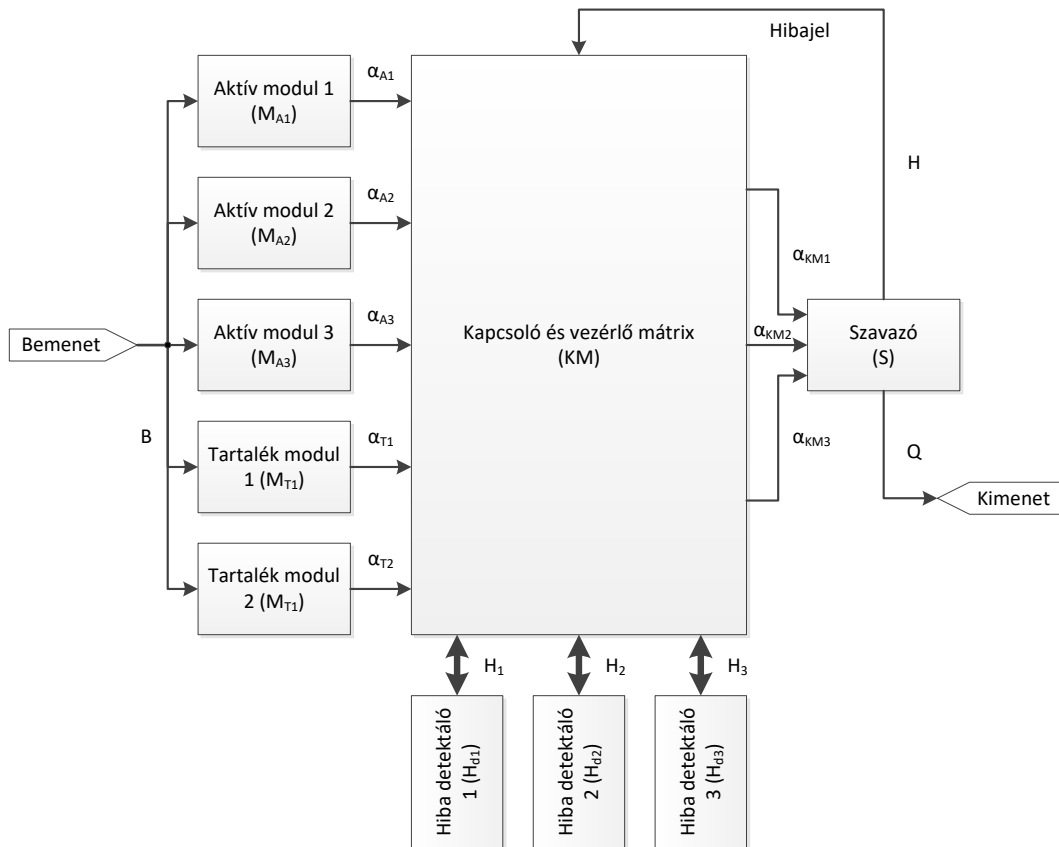
hosszú átállási időt, illetve növeli az NMR rendszerekre jellemző alacsony százalékos redundancia értéket. [69]

A tartalékolt NMR rendszer működés során, hibát követő rekonfiguráció esetén, aktív redundáns modul cseréjekor, azaz tartalékos rendszermodul üzembe állításakor, a műveletre továbbra is rendszeridőt kell fordítani. [15]

A 18. ábra szerinti összesen öt darab redundáns rendszermodullal ($n=5$) felépített TMR rendszer megvalósítása esetében a három aktív modul eredményeit veti össze a szavazó. Az egyik szavaztatott rendszermodul meghibásodása esetében annak funkcióját az egyik tartalék modul veszi át. A rendszer az említett kiépítésben három hiba tolerálására képes ($k=3$), a rendszer százalékban kifejezett redundanciája k/n [%] alapján 60%. A rendszer kimenete (17) szerint írható fel.

$$Q = S\{\overline{\alpha_{KM}}[KM(\overline{\alpha_A}, \overline{\alpha_T}, \overline{H}, H)]\} \quad (17)$$

ahol, S a szavazó működését, KM a kapcsolómátrix működését, H_{dn} a hibadetektáló modulok működését, M_{An} és M_{Tn} az aktív és a tartalék modulok működését írja le, H a hibajelet, \overline{H} a hiba detektálók kimeneteit, $\overline{\alpha_{MK}}$ a szavazó bemeneteit, $\overline{\alpha_A}$ és $\overline{\alpha_T}$ az aktív és a tartalék modulok kimeneteit reprezentálja.



18. ábra: Tartalékolt TMR architektúra

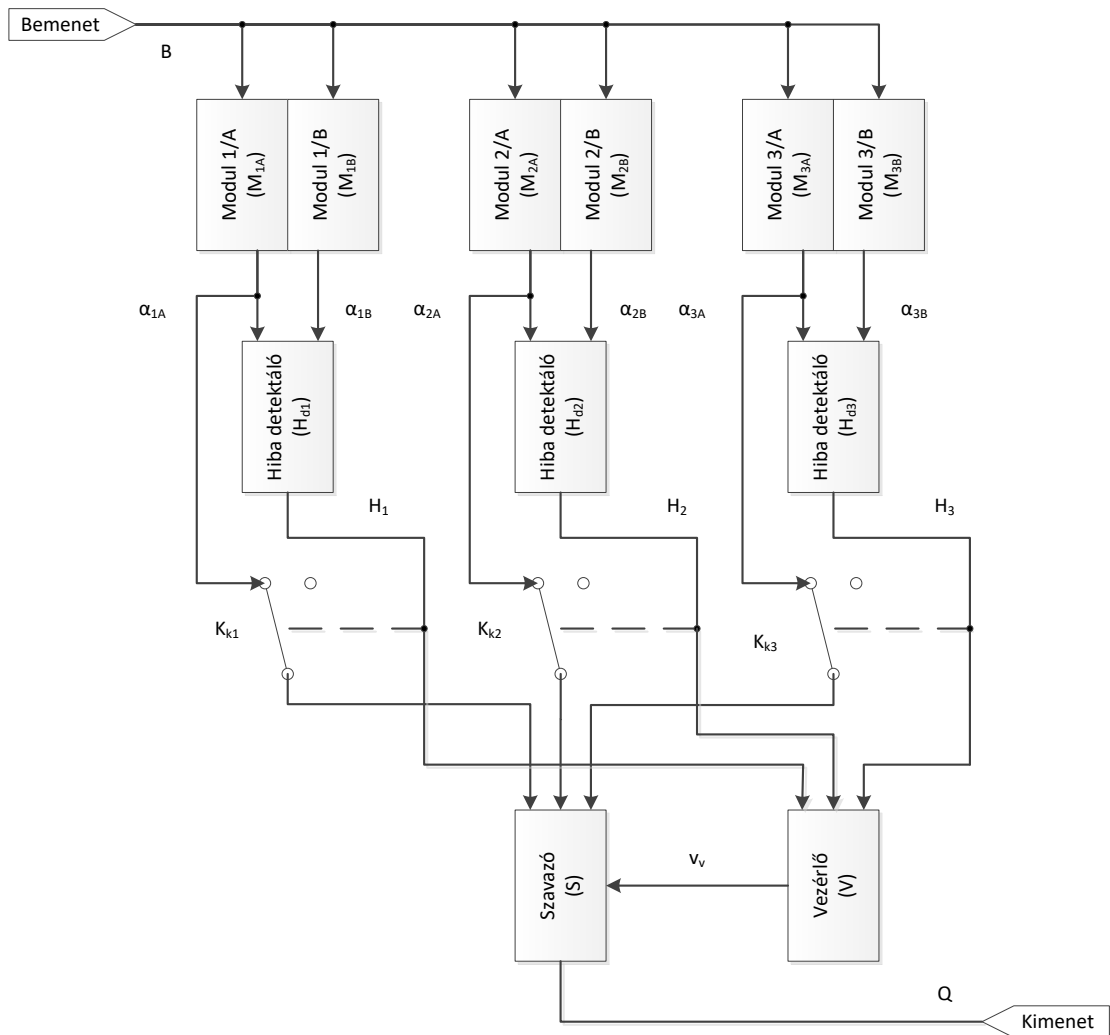
A triplex-duplex architektúra (19. ábra) a TMR rendszer vázát követi. A TMR architektúrában megismert egyedi redundáns modulokat duplex modulok váltják, így áganként megvalósítható a hiba detektálás. Egy duplex pár kimeneteinek hibahatáron kívüli eltérése esetében az ág lekapcsolódik a szavazó bemenetéről (fail-silent elv), nem húzza a hibás érték irányába a szavazott vagy kalkulált rendszerkimenetet. A rendszer a továbbiakban duplex-duplex módban üzemel tovább. A második hiba bekövetkezése után már csak egy ág marad, így a rendszer duplex módon üzemelhet tovább. Tartalékos redundáns modulok rendelkezésre állása és hibátlan működési képessége esetében visszaállítható az eredeti funkcionalitás. [107]

A rendszer kimenete a bemutatott kiépítésben (18) szerint írható fel.

$$Q = S\langle v_v\{V[\bar{H}(\bar{\alpha})]\}, \{K_{kn}[\bar{H}(\bar{\alpha})]\}\rangle \quad (18)$$

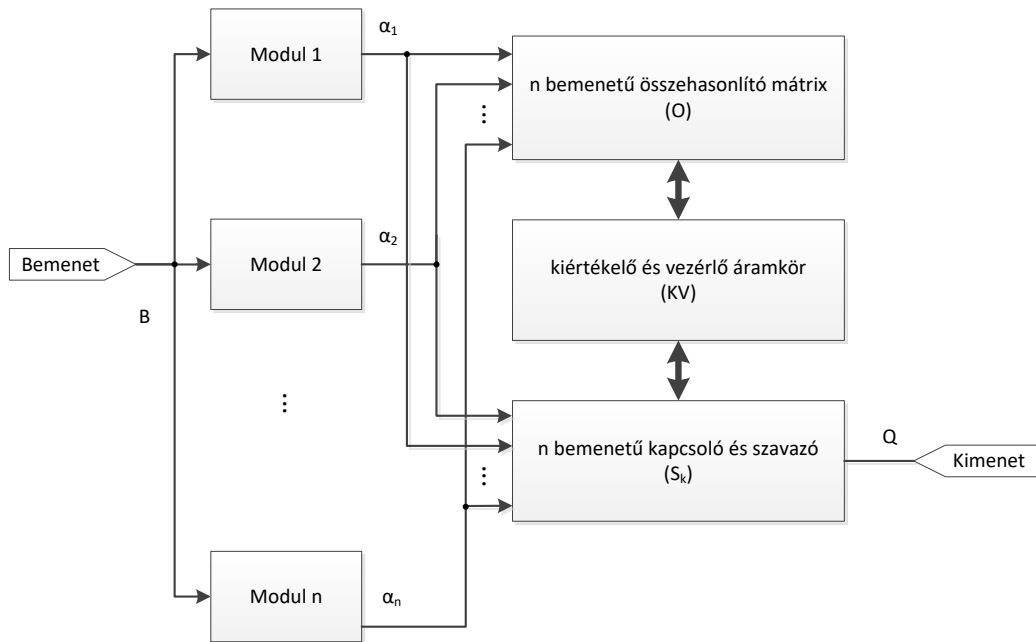
ahol, v_v a vezérlő kimeneti jele, $\bar{\alpha}$ a modulok kimeneteinek vektora (19), K_{kn} a kapcsolóelemek állapota.

$$\bar{\alpha} = [\alpha_{1A}, \alpha_{1B}, \alpha_{2A}, \alpha_{2B}, \alpha_{3A}, \alpha_{3B},] \quad (19)$$



19. ábra: Triplex-duplex redundáns architektúra

A sift-out moduláris redundancia (20. ábra) az NMR rendszerek felépítését követi, de a fail-silent elv megvalósulása érdekében, minden modul minden modullal összehasonlításra kerül. Az így kapott eredmények alapján kiszűrhető a hibás modul, majd lekapcsolható a rendszerről. A redundáns rendszer szavazó áramkörének bemeneteinek száma dinamikusan igazodik az aktív modulok számához, a kimeneti érték lehet választott vagy kalkulált is. A rendszer az előző architektúrákat követve tartalmazhat tartalékos modulokat is.



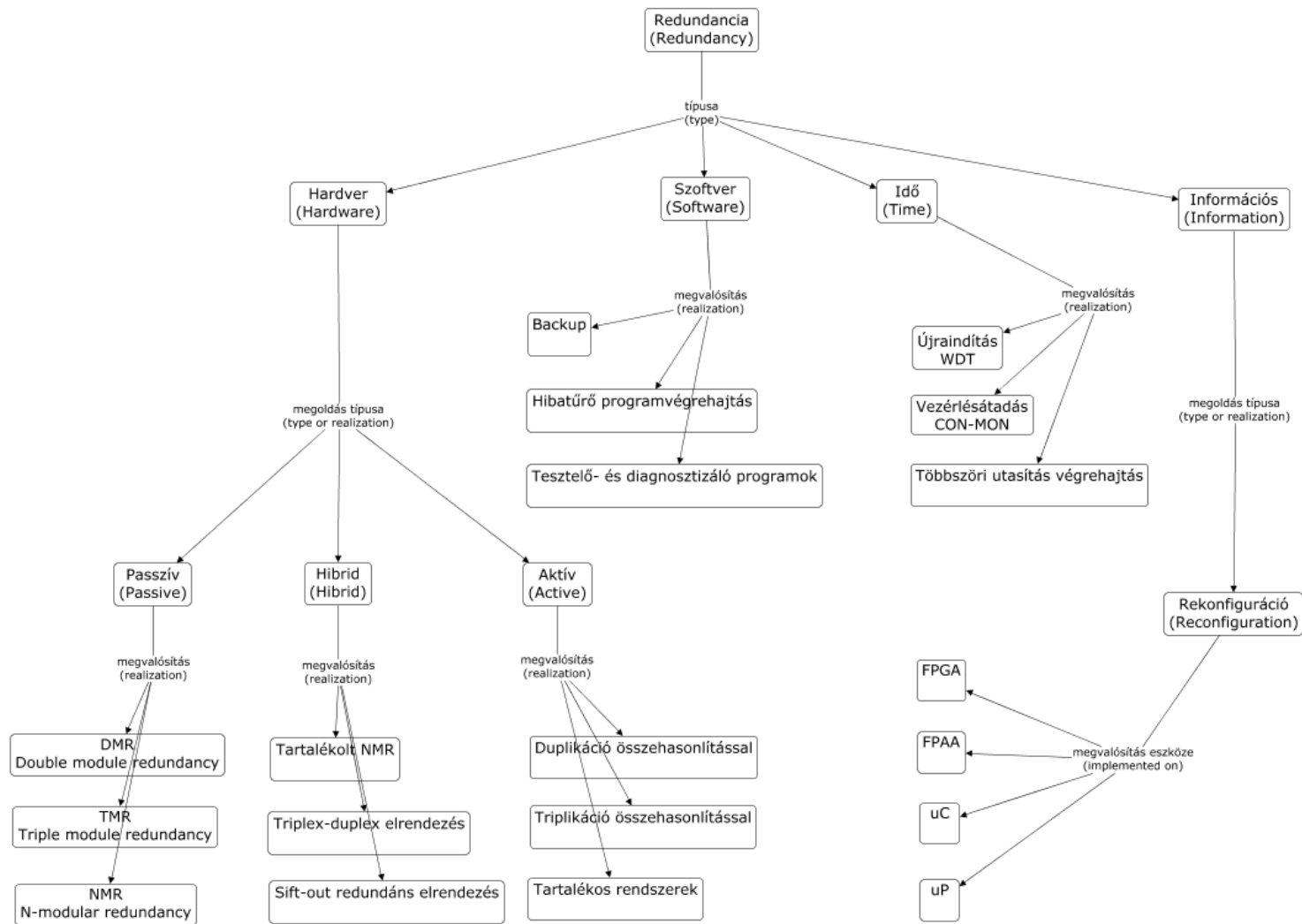
20. ábra: Sift-out redundáns architektúra

A 20. ábra bemutatott rendszer kimenete (20) szerint írható fel.

$$Q = S_k \{ \bar{\alpha}, KV[O(\bar{\alpha})] \} \quad (20)$$

ahol, S_k az n bemenetű kapcsoló és szavazó modul működését, KV a kiértékelő és vezérlő modul működését, a O az n bemenetű összehasonlító mátrix működését írja le.

A bemutatott megbízhatóságot növelő eljárásokat összefoglalja a 21. ábra. További nagy számú redundáns modulokkal felépített architektúrák bemutatására és tárgyalására a terjedelmi korlátok okán nincs lehetőség. Jelen dolgozatban a relatív alacsony költségvetésű rendszerek megbízhatóságának növelése a cél. Az eddig bemutatott műszaki megoldások elegendőek a redundáns felépítés és a hibakezelés elveinek feldolgozásához, továbbviteléhez.



21. ábra: Megbízhatóságot növelő eljárások

2 ALACSONY REDUNDANCIÁJÚ ARCHITEKTÚRÁK

Az olyan tervezési elvek, mint a moduláris eszköztervezés, a karbantarthatóság és a nyomon követhetőség a megbízhatóság növelését szolgálják. [97] A digitalizálás és a távfelügyeleti rendszerek szorosan kapcsolódnak ezekhez a funkciókhoz. [85] Az említett technológiák alkalmazása további előrelépést jelent az energiahatékonyság javulásának ütemében is.

Az említett rendszerek robusztus jellegét tekintve sikeres eredményeket értek el a hibadiagnosztika és a hibatűró technikák területén [110], [111], [103]. A nemzetközi publikációkat, a hibadiagnosztikai módszerek alapján, alapvetően a következő kategóriák szerint határozhatjuk meg:

- A modellalapú összehasonlítás a rendszermodell kimeneteit és a valós rendszer kimeneteit veti össze [55], [83], [67],
- a mért jel alapján születik diagnosztikai döntés [44], [75], [69], [5],
- tudás alapú összehasonlítás esetében nagy mennyiségű minta adatra van szükség [104], [87], [80],
- az előző módszerek kombinációjaként, azok előnyeit kiemelve beszélhetünk hibrid és aktív működésről, [6], [12], [57].

Az alapvető meghibásodási lehetőségeket tárgyaló [35], [97], vonatkozó szakirodalomban számos gyakorlati megoldás található [109], [94].

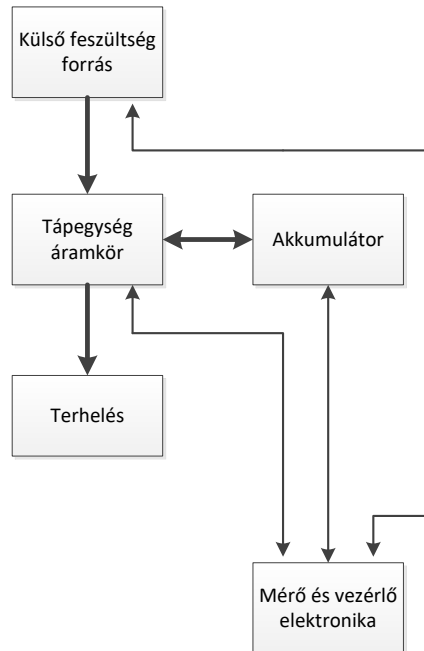
2.1 Kis redundanciájú megbízhatóságot növelő eljárások

Az alfejezet az általam fejlesztett nagy megbízhatóságú, moduláris tápellátási rendszer elektronikus eszközkészletét mutatja be és szoftveres megoldásait ismerteti. A megépített prototípus a megbízhatóságot növelő technikákat alkalmazza.

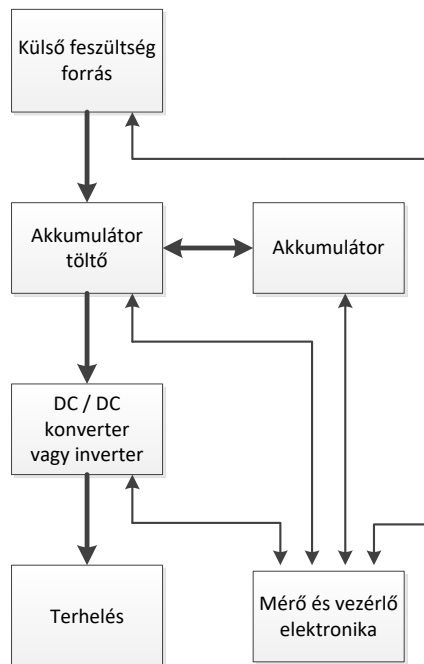
2.1.1 Külső feszültségforrásból táplált moduláris tápegység felépítése

Az alábbi 22. ábra egy mikrokontroller által vezérelt, akkumulátorral kiegészített moduláris tápegység blokkvázlatát mutatja be. A külső energiaforrás lehet a villamos hálózat vagy lehet megújuló villamos energia is. Az akkumulátor töltő feladata gondoskodni az energiatároló egység szakszerű töltéséről és kisütéséről. A DC-DC konverter feladata az akkumulátor vagy a külső villamos energiaforrás feszültség szint, illetve teljesítmény illesztése a tápegységre kapcsolt fogyasztó igényeihez.

Amennyiben a külső villamos energiaforrás váltakozó feszültségű, illetve a tápegységre kapcsolt terhelés váltakozó feszültséget igényel, úgy az akkumulátor töltőnek ehhez igazodnia kell, valamint a DC-DC konverter helyett, DC-AC konverter alkalmazása szükséges. A tápegység áramkörének modularitását növelő architektúra látható a 23. ábra.



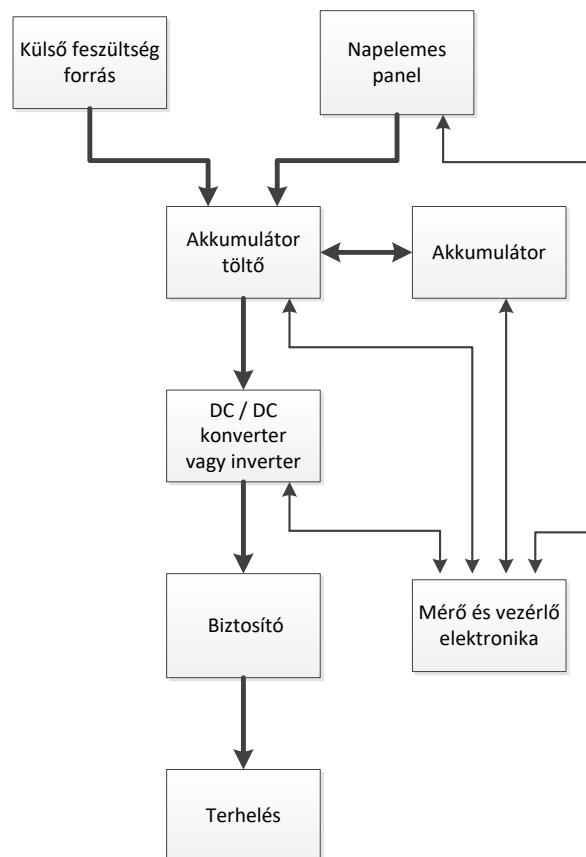
22. ábra: Külső feszültségforrásról táplált tápegység blokkvázlata



23. ábra: Külső feszültségforrásról táplált moduláris tápegység blokkvázlata

2.1.2 Fotovoltaikus feszültségforrásból táplált moduláris tápegység felépítése

A napenergia elektromos árammá történő átalakítása lehetővé teszi, hogy a közcélú villamos hálózattól függetlenül is legyen lehetőség villamos energia előállítására. A technológia alkalmazása nagyban elősegíti az olyan objektumok villamos energiával történő ellátását, melyek elhelyezkedésükből adódóan nem csatlakozhatnak a villamos hálózatra. A felhasználás jellemző területei a természetvédelmi területek, vadgazdálkodási területek, nagy kiterjedésű mezőgazdasági területek, nagy területű állattartó vagy állattenyésztő területek, ipari csővezetékek nyomvonalai, infrastruktúrától távol elhelyezkedő vízügyi erőforrások, katonai alkalmazások, ..., stb. Az ilyen jellegű területek és vagyon tárgyainak védelme, valamint azok működőképességének detektálása különösen fontos, - kiemelt jelentőségűek a kritikus infrastruktúrákhoz sorolt szektorok.



24. ábra: Külső vagy fotovoltaikus feszültségforrásról táplált moduláris tápegység blokkvázlata

A 24. ábra szerinti architektúra alkalmazható egy szigetüzemű tápellátás esetén is (egy telepített vagy hordozható mérőműszer esetében), ahol alapértelmezett energiaforrás a napelemes panel, a külső feszültségforrásra töltéskor vagy szervizelés alkalmával csatlakozhat. A biztosító modul tartalmazza terhelés és a tápegység kimenete közé épített hibavédelmi (túláramvédelmi,

életvédelmi) eszközöket. A berendezés kiegészíthető további modulokkal például, kommunikációs csatornával, felhasználói felülettel, öntesztelést segítő modulokkal, ..., stb.

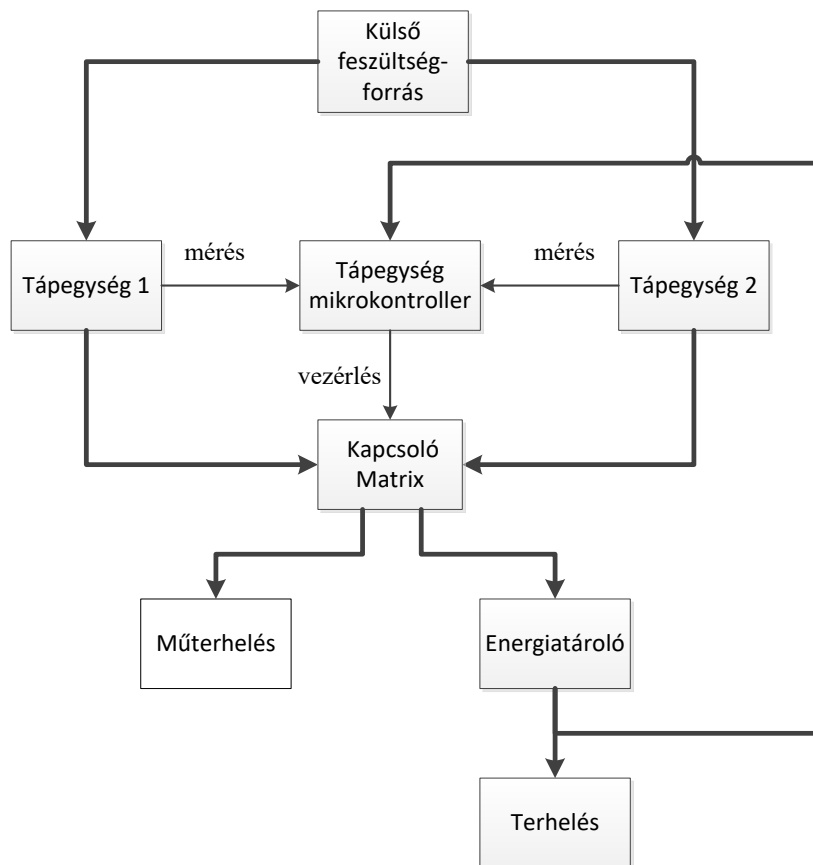
2.2 Egyszeres redundanciájú tápegység architektúrák

Az egyszeres redundanciával rendelkező tápellátás esetében, ha az egyik tápegység meghibásodik, a tartalék tápegység veszi át a tápellátás feladatát. Egyszerre csak az egyik tápegység dolgozik, és az táplálja be az igényelt villamos energia 100%-át a meghajtott rendszer számára. A tartalék tápegység ebben az esetben üzemen kívül van vagy tesztelési folyamat alatt áll. Ezzel a felépítéssel biztosítható a tápellátás hibatűrő jellege. Ezt az üzemmódot hot-stand-by üzemmódnak is nevezik.

Az említettől eltérő megoldás a load-sharing üzemmód, amikor a tápegységek megosztják a terhelőáramot. Ha kettőnél több tápegység van a rendszerben és az egyik meghibásodás, csere vagy tesztelés céljából üzemen kívül kerül, akkor a megmaradó tápegységek osztják meg egymás között a teljes terhelőáramot.

Ha négy redundáns tápegység van a tápellátó rendszerben, és egyikük – az említett okok folytán – üzemen kívül kerül, a továbbra is üzemben lévő tápegységek megosztják a terhelőáramot, tehát a terhelőáram ~25% -a helyett, ~33% -ot kell biztosítaniuk. Minden tápegységnek képesnek kell lennie a teljes terhelőáram biztosítására, ha egyedül maradna üzemben a tápellátó rendszerben.

A 25. ábra alapján, kiemelésre jelen alfejezetben az energiatároló modul érdemes, ami a gyakorlati megvalósításban egy kondenzátor, ez táplálja a tápegységet vezérlő mikrovezérlőt, a csatlakoztatott terhelést és más opcionális modulokat, ha az energiaellátás átmenetileg megszakad a tápegységet alkotó redundáns modulok vezérelt átkapcsolása okán.



25. ábra: Redundáns felépítésű tápegység blokkvázlata

2.3 Redundáns, moduláris felépítésű tápegység architektúrák [BB-8]

Az architektúra és a fejlesztett algoritmusok tesztelése céljából, egyszeres redundanciával megvalósított moduláris tápellátási rendszert építettem meg, aminek továbbfejlesztése szigetüzemű működésre is képes.

A fejlesztés során adatgyűjtésre alkalmas célműszerekkel dolgoztam, a tápegységet vezérlő mikrokontroller feszültségek mérésére alkalmas lábainak számának kiterjesztését, analóg multiplexerekkel valósítottam meg.

A moduláris felépítésű rendszerek lehetőséget biztosítanak a rendszert felépítő modulok minőségi vizsgálatára. A rendszert felépítő modulok ki és bemeneteinek monitorozási feladatát és az öntesztelés funkcióját egy mikrokontroller vezérelt hibrid elektronikus áramkör végzi. A mérések alapján a redundáns modulok cseréjével meghosszabbítható a rendszer rendelkezésre álló képessége. A mikrokontroller által lokálisan megállapított rendszerinformációkat – a modulokat

kiértékelő eljárás eredményeit – egy vezeték nélküli kommunikációs csatornán, egy távfelügyeleti rendszer felé továbbítja.

Kiépítéstől függően lehetőség van a táplált rendszer vezeték nélküli kommunikációs csatornáját használni. Ebben az esetben szükséges a tápegység és a terhelést vezérlő mikrokontroller közötti kommunikáció biztosítása.

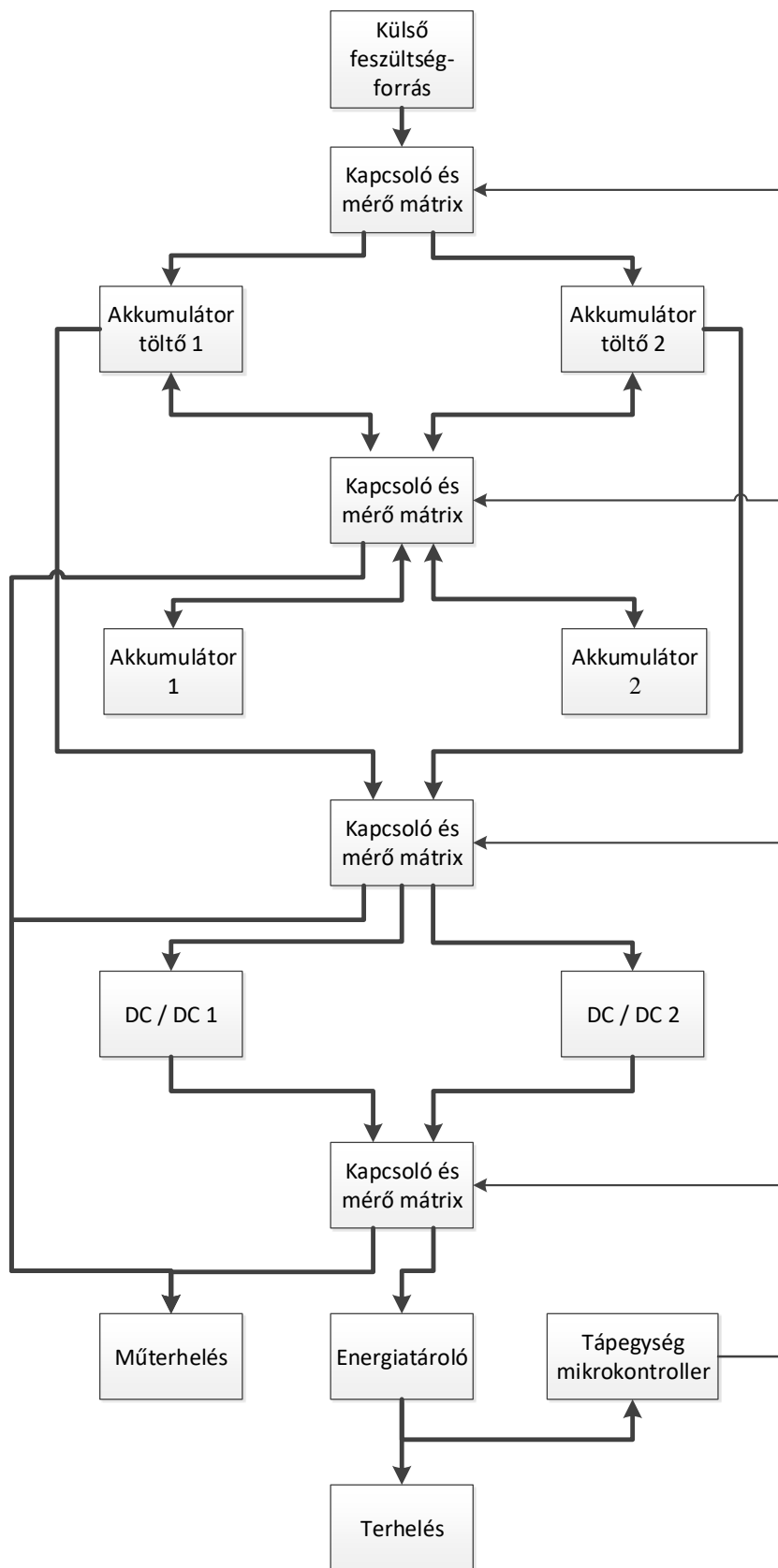
A tápegységekben rendszerint található egy mikrokontroller, ami vezérli annak működését, valamint ellátja a mérési, naplózási és kommunikáció funkciókat is. Moduláris tápegységek esetében a tápegység irányítását ellátó mikrokontroller és a szorosan köré épülő alkatrészek szerepelhetnek különálló modulként vagy részei lehetnek a fogadó alaplapnak.

Redundáns tápegységek vagy redundáns moduláris tápegységek esetében a tápegység irányítását ellátó mikrokontroller feladatai kibővülnek a tápegységek, vagy tápegység modulok felügyeletével, tesztelésével, kiértékelésével, valamint a kapcsoló mátrixok vezérlésével.

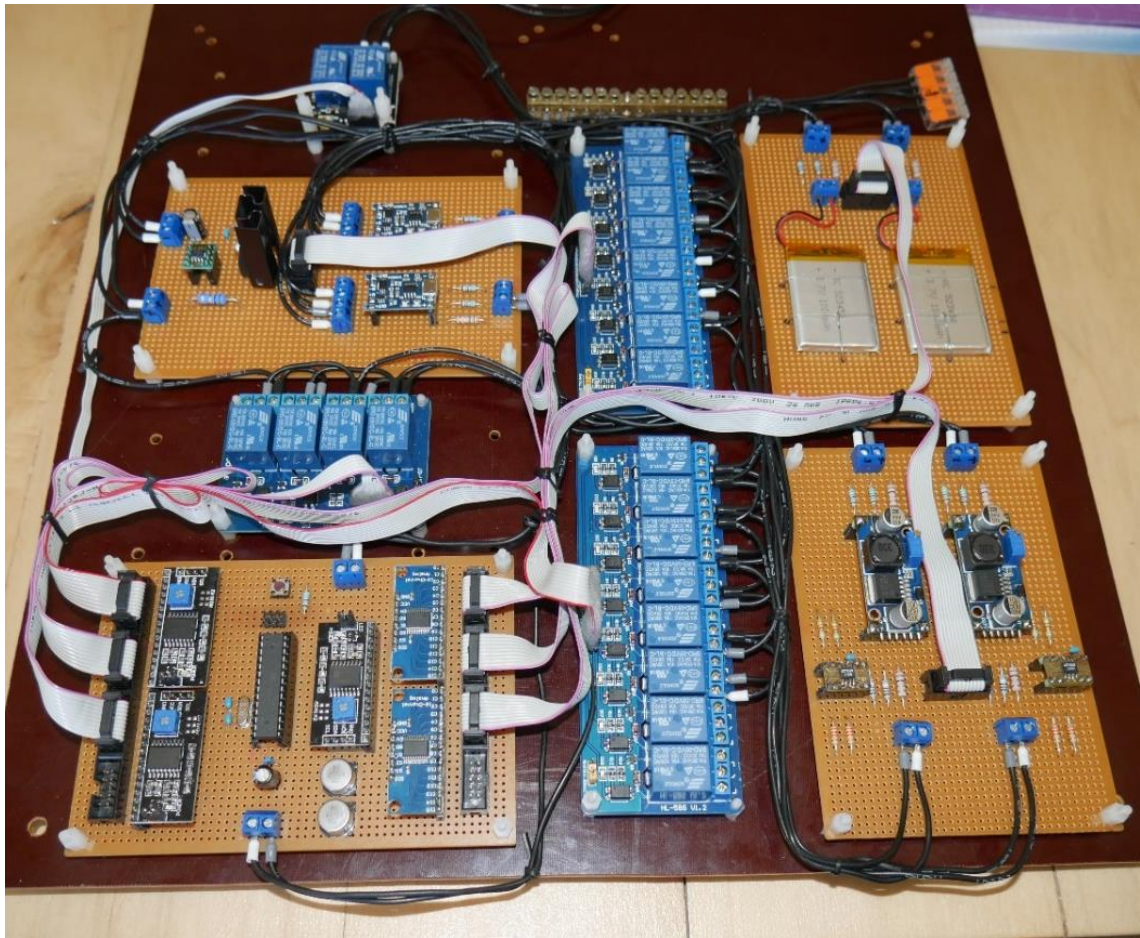
Az elektronikusan változtatható értékű műterhelés a különböző tápegységet alkotó részáramkörök tesztelésére szolgál. Alkalmazásával a tápegységet alkotó modulok azonos és konstans ellenállással, árammal és teljesítménnyel terhelhetőek és mérhetőek periodikusan. Egy kapcsoló mátrix csatolja a tápegység moduljaira az elektronikusan paraméterezhető műterhelést.

A kizárólag külső feszültségforrásból táplálkozó, de szigetüzemű működésre képes, redundáns, moduláris felépítésű berendezés (hordozható mérőműszer) blokkvázlatát mutatja a 26. ábra. Az eszköz modellje a 27. ábrán látható, a fejlesztett és alkalmazott algoritmusok tesztelésében játszott szerepet a modell. A 28. ábra, a modulok közötti kapcsolódási lehetőségeket mutatja be, a megvalósítás a kapcsolómátrix alkalmazásával történik.

A fotovoltaikus vagy külső feszültségforrásból táplálkozó, és szigetüzemű működésre képes, redundáns, moduláris felépítésű berendezés (például telepített mérőműszer) blokkvázlatát mutatja a 30. ábra. Az eszköz modellje a 29. ábra látható, a fejlesztett és alkalmazott algoritmusok tesztelésében játszott szerepet a modell. A 31. ábra, a modulok közötti kapcsolódási lehetőségeket mutatja be, a megvalósítás a kapcsolómátrix alkalmazásával történik.



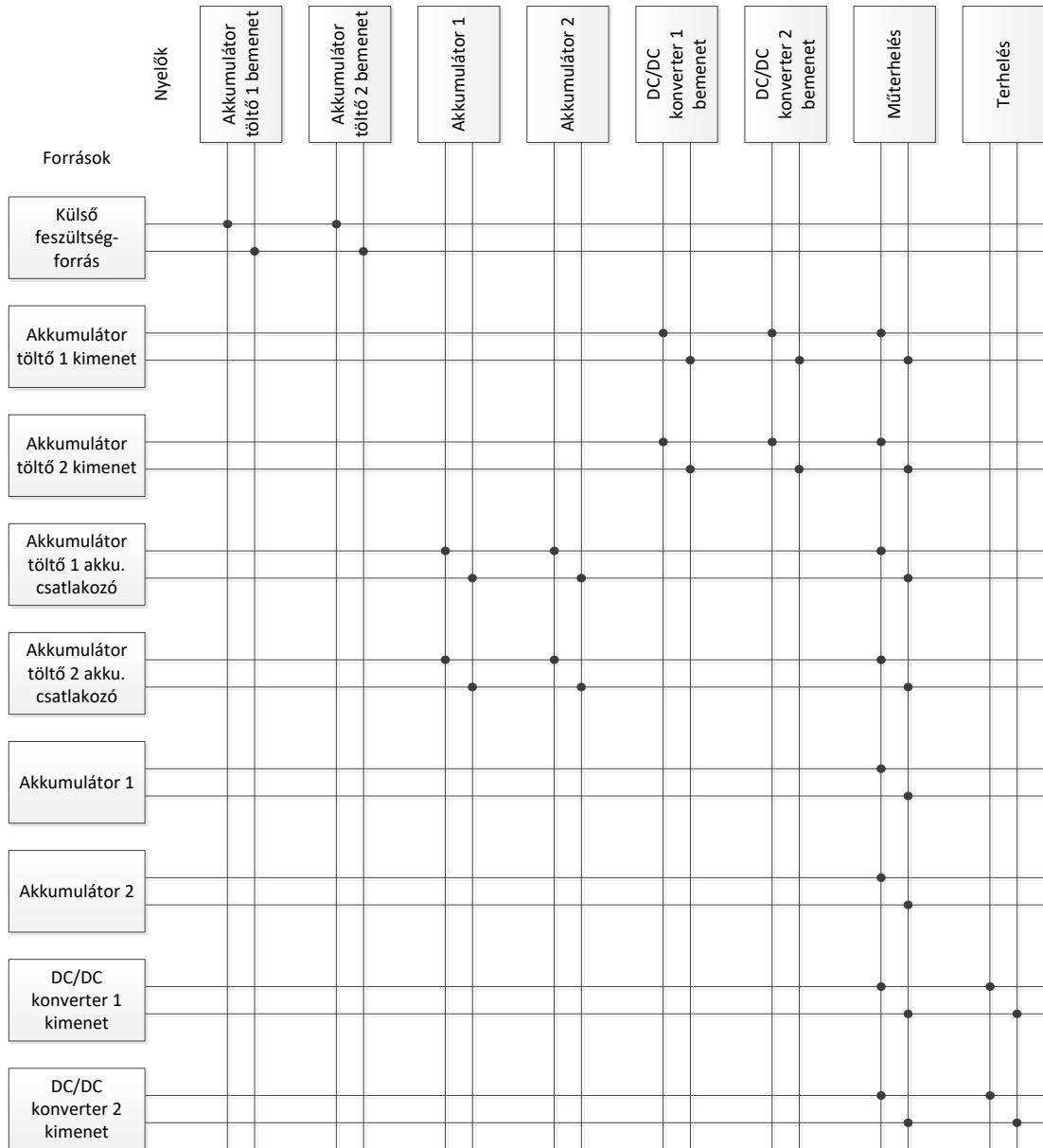
26. ábra: Külső feszültségforrásból táplált, redundáns, moduláris felépítésű tápegység blokkvázlata



27. ábra: Külső feszültségforrásból táplált, redundáns, moduláris felépítésű tápegység modellje

A tápegység irányítását ellátó mikrokontroller vezéri a tápmodulokat összekötő kapcsoló mátrixokat is. A kapcsoló mátrixok feladata a tápmodulok közötti energiaáramlás biztosítása rekonfigurálható módon. A kapcsoló mátrixok segítségével megvalósítható a redundáns tápmodulok energiaáramba történő becsatlakoztatása és az abból történő kizárása, így akár a redundáns tápmodulok felcserélése is.

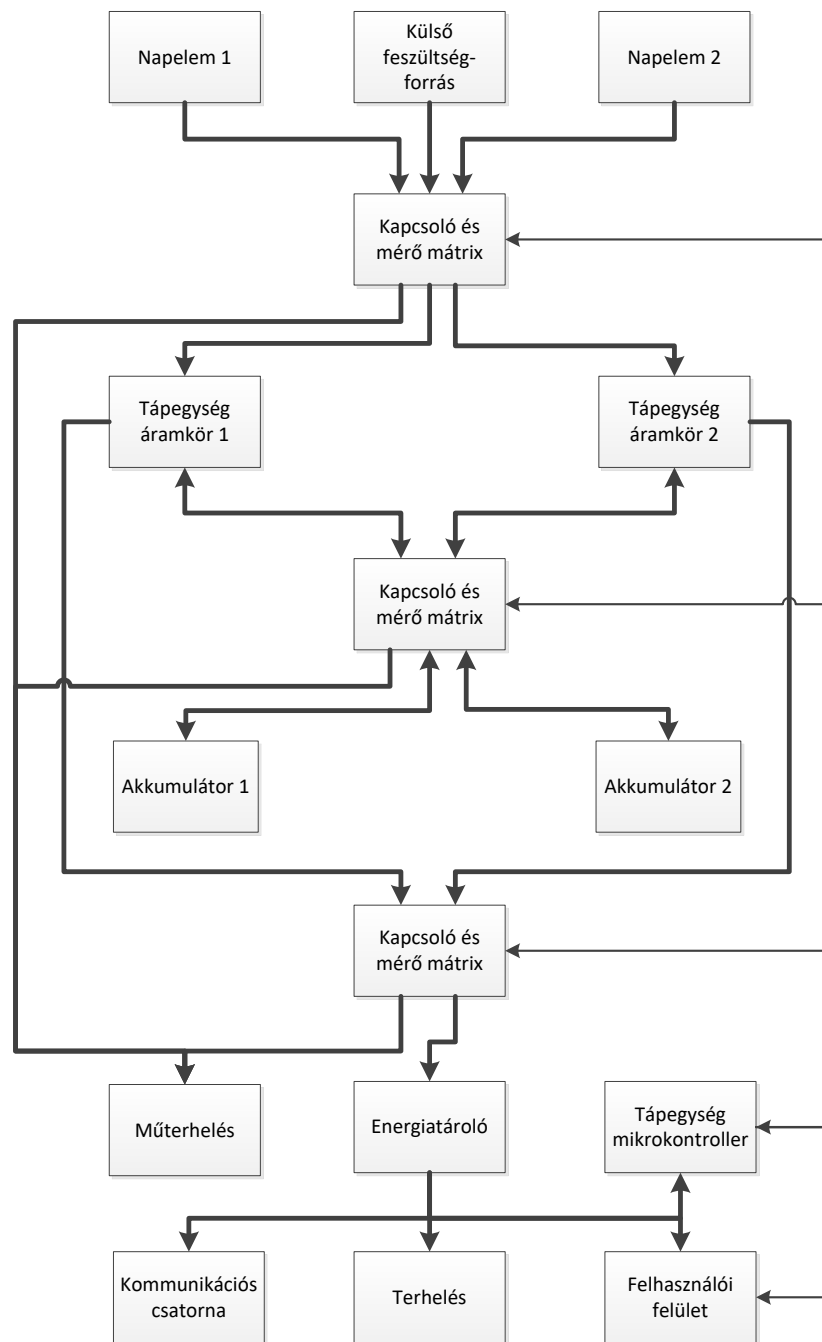
A tápmodulok cseréjekor – a redundáns részáramkörök átkapcsolásakor – az első ütemben az éppen aktív egység leválasztása szükséges, ezt követően kapcsolható be a redundáns elem. Az eljárás egy kis időtartalmú tápvonal szakadást eredményez, de megfelelő időzítéssel és energiatárolók (puffer kondenzátorok) közbeiktatásával a tápellátás folyamatosan fenntartható, a tranzienszegény átkapcsolás megvalósítható.



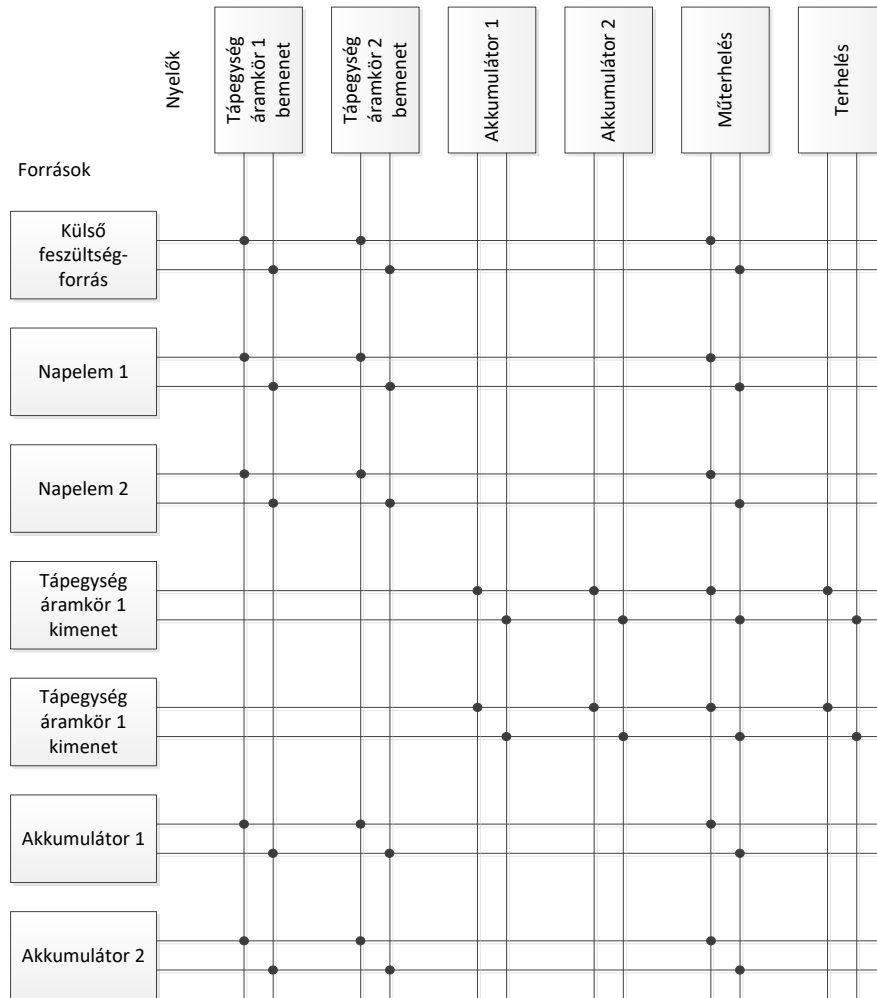
28. ábra: Külső feszültségforrásból táplált, moduláris tápegység kapcsoló mátrix struktúrája



29. ábra: Redundáns felépítésű, fotovoltaikus feszültségforrás modellje



30. ábra: Fotovoltaikus és külső feszültségforrásból táplált, redundáns, egyszerűsített felépítésű, moduláris tápegység blokkvázlata



31. ábra: Külső feszültségforrásból táplált, egyszerűsített felépítésű, moduláris tápegység kapcsoló mátrixának struktúrája

2.4 Kis redundanciájú, nagy megbízhatóságú áramköri modulok [BB-2], [BB-5], Hiba! A hivatkozási forrás nem található.

A redundáns hibatűrő rendszerekben néhány alapvető szempontot kielégítő funkciót be kell építeni a rendszerbe, hogy az működőképes lehessen. Hot-stand-by mód vagy load-sharing mód esetében, a beágyazott monitorozó rendszernek képesnek kell lennie egy felügyelő és/vagy irányító rendszer értesítésére a tápegységek és modulok tényleges állapotáról vagy meghibásodásról.

A beágyazott monitorozó rendszernek képesnek kell lennie a diagnosztizálni a tápegységeket és modulokat. A hibadetektálás különböző aspektusai alapján ez történhet üzemi terhelés alatt, vagy műterhelés segítségével. Mind az üzem közbeni állapot mérését, mind a műterhelésre kapcsolt

tápmódulok mérését el kell végezni az aktív és a tartalék modulokkal egyaránt. Ez a tápmódulok felcserélésével vagy időszakos aktív üzemen kívül helyezésével (tesztüzembe helyezésével) megoldható. [76]

A redundáns hibatűrő tápellátó rendszerekben biztosítani kell a folyamatos tápellátást, a hibás modulok cseréje esetén is. A hot-plug-in funkció biztosítja a megtáplált rendszer zavartalan működését.

2.4.1 A modulok mérése

A moduláris tápegység részáramköreinek mérésekor figyelemmel kell követni az egységek hatásfokát, hőmérsékletét, be- és kimeneti feszültség és áram értékeit, valamint jelalakjait. A mért értékeket a mikrokontroller feldolgozza és tárolja.

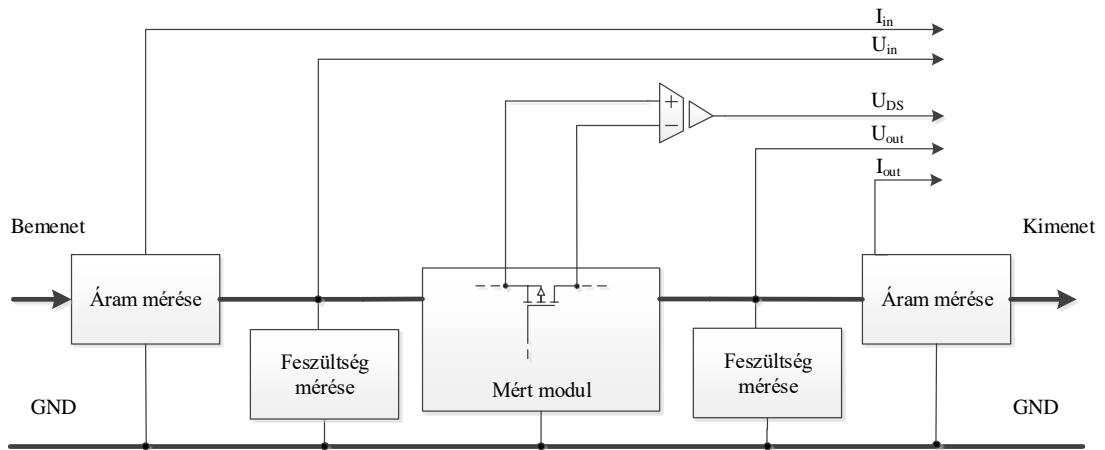
A feszültség mérése, amennyiben az magasabb, mint a mikrokontroller analóg digitál átalakítójának referencia feszültsége, a mérni kívánt ponton egy nagy pontosságú és stabilitású elemekből felépített feszültségosztó segítségével valósul meg. Lehetőség kínálkozik még optocsatoló alkalmazására is, de annak beépített – jellemzően infravörös tartományban dolgozó – félvezető LED fényerejének degradációja az idő előrehaladtával meghamisíthatja a mérést.

Az áram mérése a kisebb költségű sönt ellenállásokon eső differencia feszültség mérésével vagy számításával oldható meg. A mérővezetékek számának csökkentése céljából vagy nagyobb áramértékek mérése esetén lehetőség kínálkozik a Hall elemes árammérő érzékelők alkalmazására is, hátrányuk a magasabb költség.

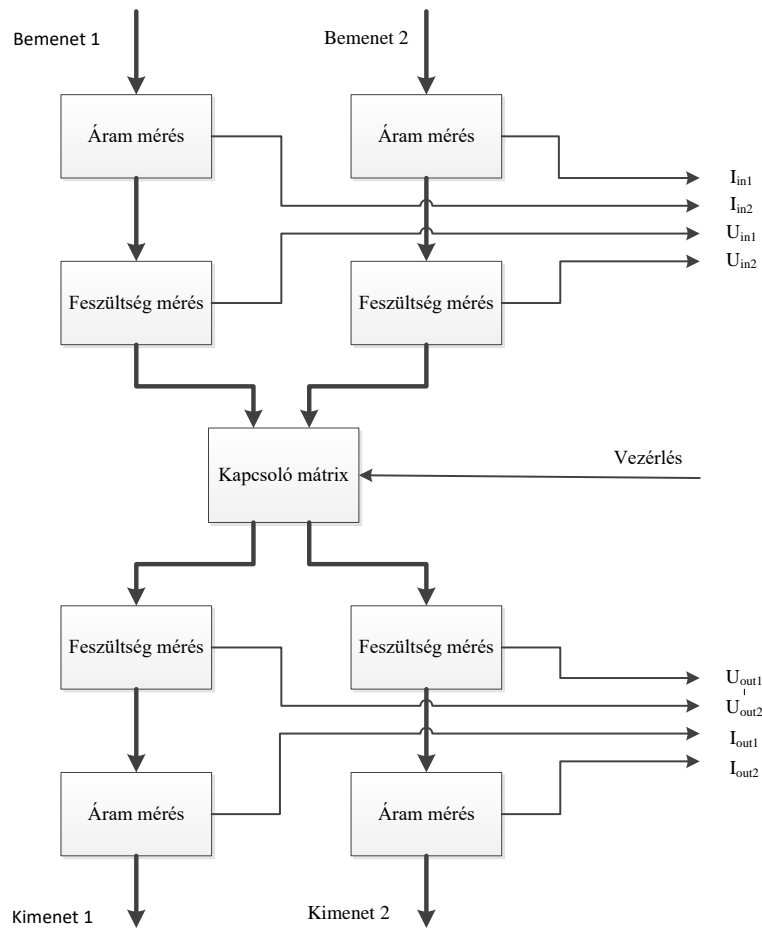
A további élettartam előrejelzés érdekében a 32. ábra látható félvezető drain-source feszültségkülönbségének mérése is megtörténi, amikor a MOSFET vezető állapotban van. A MOSFET zárt állapotában a drain-source feszültség könnyen nagyobb lehet, mint amit a feszültség mérésére alkalmazott műveleti erősítő bemenete elviselni képes, ezért a mérést galvanikusan leválasztott műveleti erősítővel kell kiépíteni.

2.4.2 Analóg értékek mérése

A tápmódulok mérése és kiértékelése a tápmódulok közé beépített mérést támogató hardverelemek segítségével valósítható meg. Alkalmazásukkal észlelhetők a túláram, túlfeszültség, feszültségcsökkenés, feszültség ingadozás, instabilitás, feszültség veszteség és egyéb anomáliák is. A tápegységet felépítő modulok a kapcsoló mátrixokon keresztül csatlakoznak egymáshoz, így villamos paraméterek mérését lehetővé tevő részáramköröket is célszerű a kapcsoló mátrixok köré elhelyezni (33. ábra).



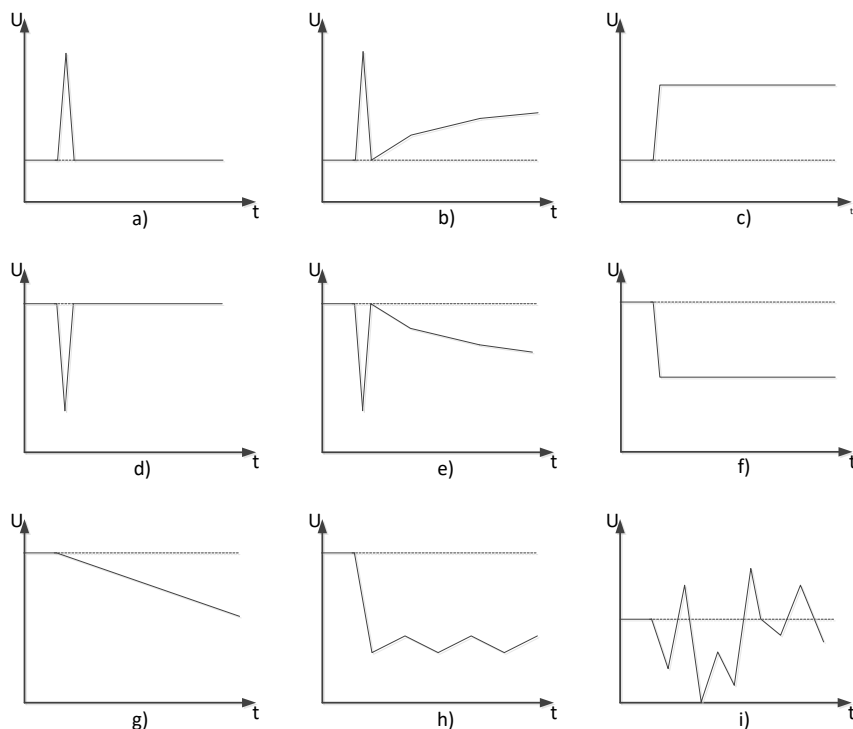
32. ábra: Redundáns tápmodul mérési koncepciója



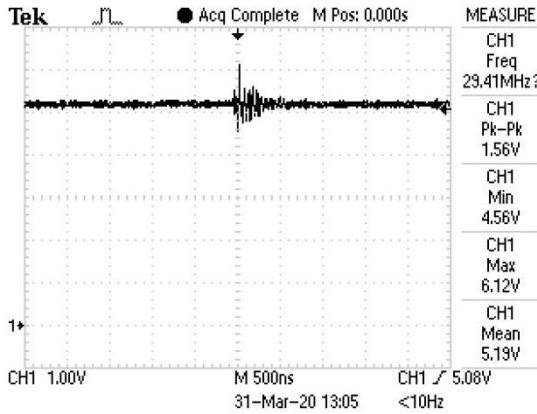
33. ábra: Tápvonalban elhelyezett mérőpontok

A kiépítés további lehetőségeket kínál a kimeneti tápfeszültség ellenőrzésére, az alább felsorolt gyakori eltérések észlelésére:

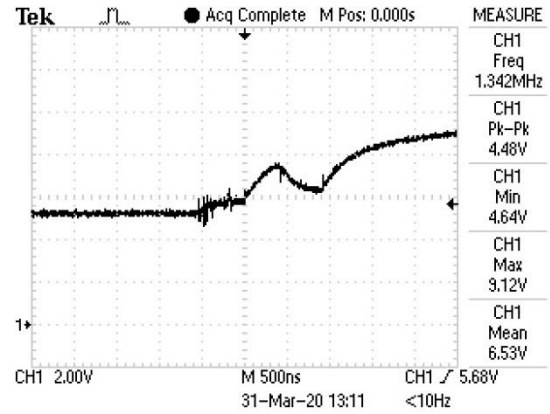
- egy feszültségtüske után a kimeneti feszültség visszatér normál állapotba (34. ábra) és 35. ábra),
- egy feszültségtüske után a kimeneti feszültség továbbra is a normál értéknél magasabb szinten marad (34. ábra) és 36. ábra),
- a kimeneti feszültség egy feszültségugrás után stabilan egy a normál szintnél magasabb értéken marad (34. ábra) és 37. ábra),
- egy negatív feszültségtüske után a kimeneti feszültség visszatér normál állapotba (34. ábra) és 38. ábra),
- egy negatív feszültségtüske után a kimeneti feszültség továbbra is a normál értéknél alacsonyabb szinten marad (34. ábra),
- a kimeneti feszültség egy feszültségesés után stabilan egy a normál szintnél alacsony értéken marad (34. ábra) és 39. ábra),
- a kimeneti feszültség fokozatosan csökken (34. ábra),
- a kimeneti feszültség a normál szint alatt ingadozik (34. ábra),
- a kimeneti feszültség instabillá válik (34. ábra), 40. ábra, 41. ábra és 42. ábra)



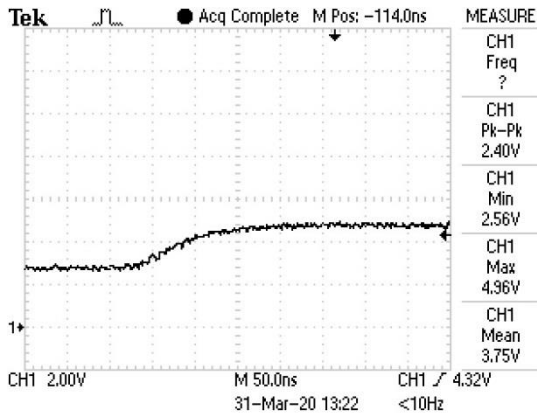
34. ábra: Tápegység kimeneti feszültségének hibáinak jelleggörbéi



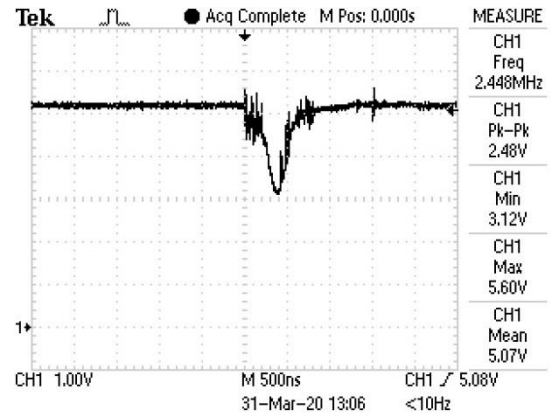
35. ábra: Feszültségtüske után a kimeneti feszültség visszatér normál állapotba



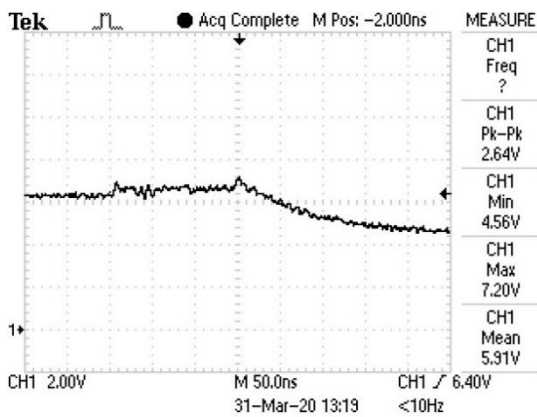
36. ábra: Feszültségtüske után a kimeneti feszültség továbbra is a normál értéknél magasabb szinten marad



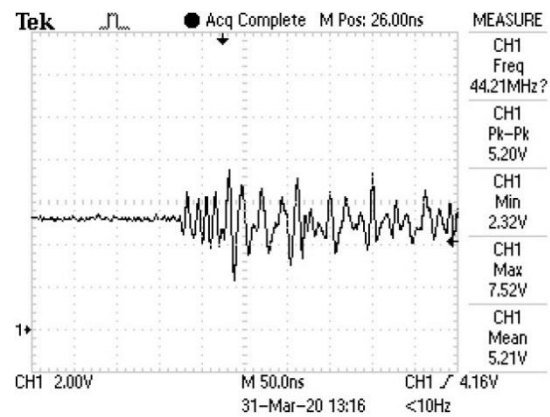
37. ábra: A kimeneti feszültség egy feszültségugrás után stabilan egy a normál szintnél magasabb értéken marad



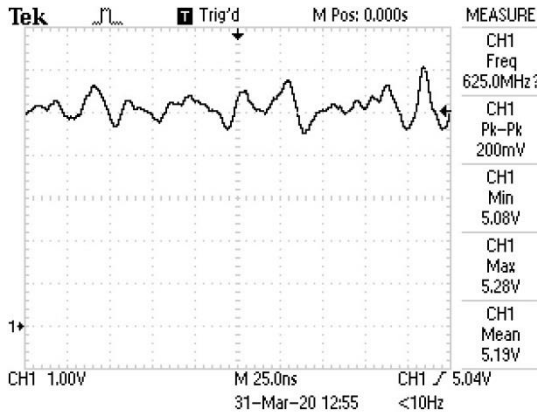
38. ábra: Negatív feszültségtüske után a kimeneti feszültség visszatér normál állapotba



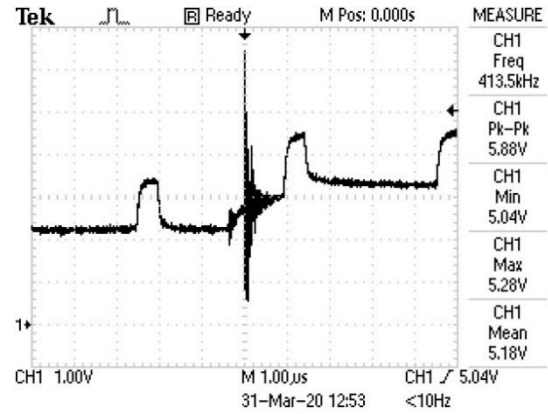
39. ábra: A kimeneti feszültség egy feszültségcsökés után stabilan egy a normál szintnél alacsony értéken marad



40. ábra: Instabil kimeneti feszültség 1



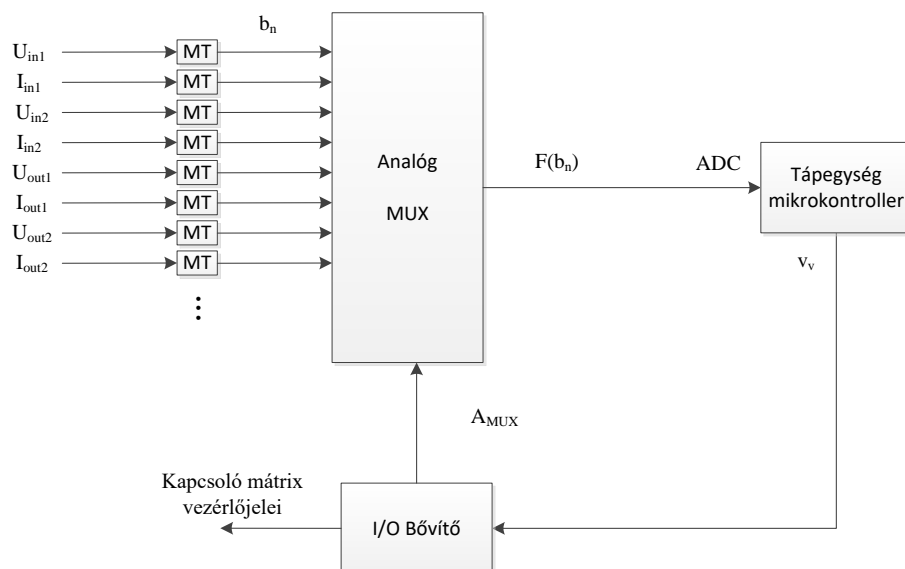
41. ábra: Instabil kimeneti feszültség 2



42. ábra: Instabil kimeneti feszültség 3

2.4.3 Mérendő analóg feszültségek multiplexálása

A tápegységet monitorozó és a kapcsoló mátrixokat vezérlő mikrokontrollernek korlátozott számú lábkivezetése van, ezek bővítése a nagy számú mérő és vezérlőjel okán szükséges. A vezérlőkimenetek számának kiterjesztése könnyen kivitelezhető egy soros kommunikációra képes I/O extender cél IC-vel. A mérendő analóg jelek egy analóg multiplexeren kerülnek becsatolásra a mikrokontroller analóg-digitál átalakítójához kapcsolható lábkivezetésére (43. ábra).



43. ábra: A tápegység mérésének és vezérlésének megoldása

A nagyobb lábszámú és nagyobb teljesítményű mikrokontroller választásakor elhagyható a külső hardver alkalmazása, elegendő szoftveresen (a bemeneti lában ADC²⁶ perifériához történő multiplexálásával) megvalósítani a bemutatott megoldást. Amennyiben a mikrokontroller több belső ADC perifériával rendelkezik, célszerű az adott ADC modulokkal mindig azonos analóg jeleket mérni – az esetleges mérő perifériák különbségéből adódó mérési hibák elkerülése végett. A rövid idejű analóg jelek mérését az MT jelzésű egység, a mintavevő és tartó áramkörök segíti.

2.4.4 Megszakítást kérő alrendszer

A tápegységet vezérlő mikrokontroller az üzemideje jelentős részében alvó üzemi állapotban van. Alvó állapotban vagy utasítás végrehajtáskor könnyen előfordulhat, hogy nem észlel a tápegységben előforduló nem üzemyszerű feszültség ingadozásokat. A külső hibrid áramkörként felépített megszakítást kérő rendszer felépítéséből adódóan állandó jelleggel képes figyelni a kimeneti feszültség állapotát és a megengedett határértékből kitérő feszültség-ingadozás esetén megszakítást kérni a mikrokontrollertől.

A megszakításkérés feltétele (21) a referencia tartományból kitérő bemenetek vagy kapcsolata.

$$INT = \bigvee_{n=1}^m r_{min_n} < b_n < r_{max_n} \quad (21)$$

ahol, b_n a vizsgált áramköri feszültség, r_{min_n} és r_{max_n} a vizsgált áramköri feszültség minimális és maximális határértéke, m a mérőpontok száma.

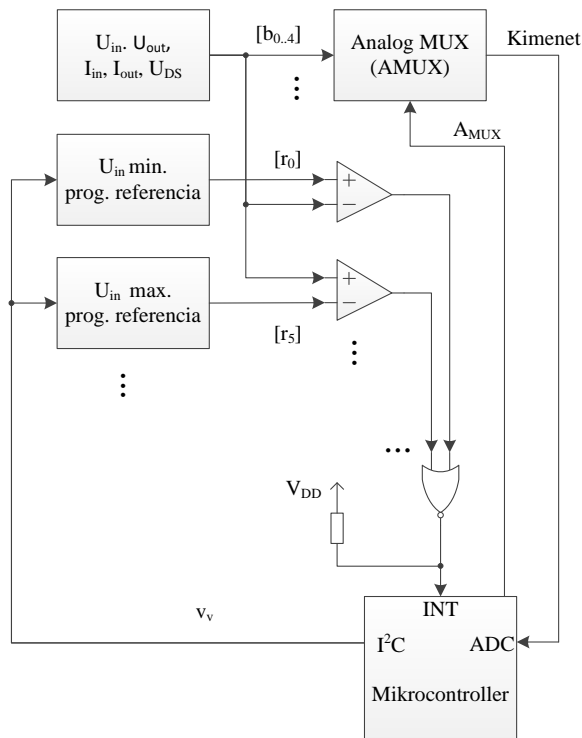
Megszakításkérés feltételének érvényre jutásakor, további vizsgálat céljából (22) alapján választható ki jelvezeték.

$$F(b_n) = \sum AMUX(A_{MUX}, b_n) \quad (22)$$

ahol, $AMUX$ az analóg multiplexer működését írja le, A_{MUX} pedig az analóg multiplexert vezérlő jel.

Az 44. ábra látható magyarázó működési vázlattól eltérően, a tápegységet vezérlő mikrokontroller belső perifériájaként beépített komparátor alkalmazása a célszerű, ez esetben szoftveresen regisztertartalomként beállítható a referencia feszültség értéke. A belső komparátor perifériának is van lehetősége megszakítást kérni a mikrokontrollertől, ami tartalmazza azt.

²⁶ ADC - Analog to Digital Converter - analóg-digitális konverter



44. ábra: Megszakítást kérő alrendszer

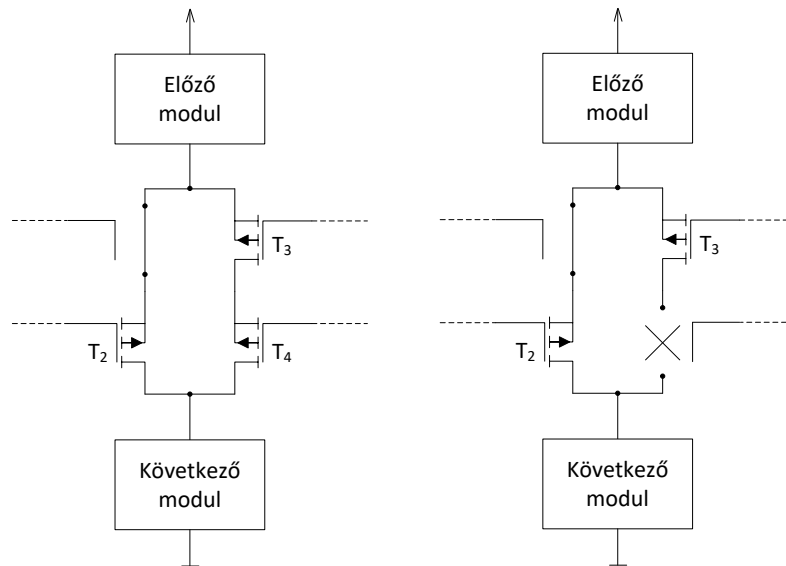
2.4.5 Redundáns félvezető kapcsolóelemek

A félvezető kapcsolóelem meghibásodásakor rövidzárata vagy szakadása következhet be. A gyakorlatban – vezérléstől függetlenül – a MOSFET-et nem lehet nyitni vagy lezárni. Mindkét esemény a rendszer hibás működését eredményezi.

A kapcsolómátrix hibatűrésének növelése érdekében redundáns kapcsolóelemek alkalmazandóak. MOSFET-ek soros kapcsolása esetében, ha az egyik rövidre záródik, akkor a kapcsolóegység továbbra is vezérelhető marad. Amennyiben szakadással hibásodik meg, a vonalat többé nem lehet bekapcsolni.

MOSFET-ek párhuzamos kapcsolása esetében, ha az egyik szakadással hibásodik meg, akkor a kapcsolóegység továbbra is vezérelhető marad. Amennyiben rövidre záródik, a vonalat többé nem lehet kikapcsolni.

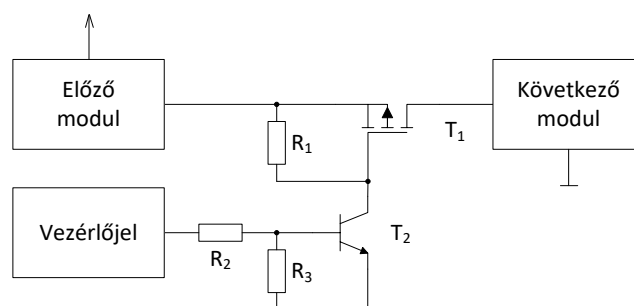
Ha két sorosan kapcsolt ág párhuzamos kiépítése valósul meg (45. ábra), a kapcsolóelem mind rövidzárlat, mind szakadás típusú meghibásodás egyszeri javítására alkalmassá válik. A kiépítésben az egyenletes csatornaáram kialakítását biztosítani kell.



45. ábra: Redundáns MOSFET-ekkel felépített hibatűrő kapcsolóelem

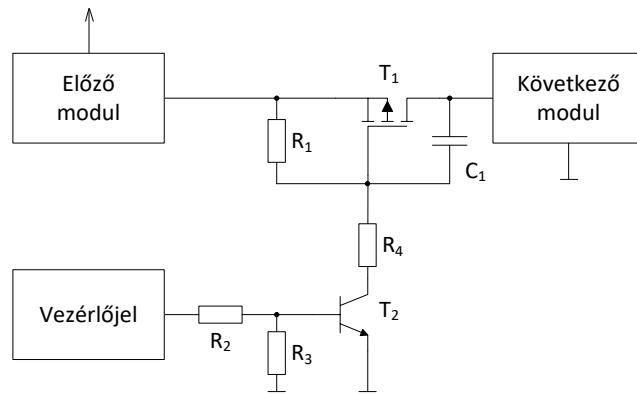
A gate-eket nem ajánlott közvetlenül egymáshoz csatlakoztatni, mert a kapacitív bemenetei és a szórt induktivitások nem kívánt nagyfrekvenciás rezgéseket okozhatnak. A célszerű a gate-el sorosan egy kis értékű csillapító ellenálláson keresztül csatlakozni a közös vezérlő pontra. Lehetőség kínálkozik galvanikus -, vagy induktív csatolású FET meghajtó alkalmazására is.

Az 46. ábra szerinti kiépítés alapján, T_2 bipoláris tranzisztorral felépített MOSFET meghajtó vezérlésével nyitható a T_1 tranzisztor. R_2 ellenállás korlátozza az npn tranzisztor bázisáramát, R_3 ellenállás biztosítja T_2 lezárását, R_1 ellenállás pedig a T_1 tranzisztor gate kapacitását sűti ki és zárja le a félvezető kapcsolóelemet, amennyiben az nem kap vezérlést.

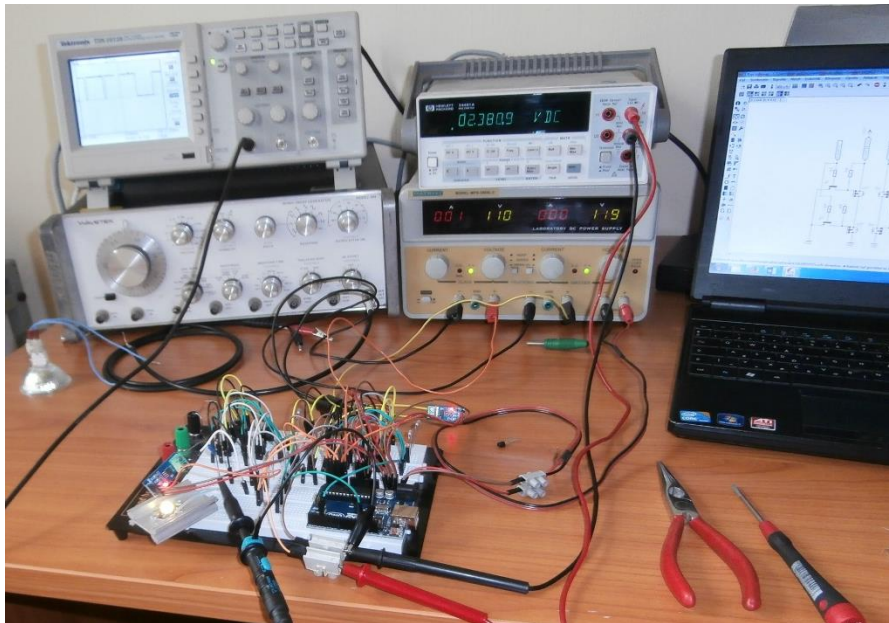


46. ábra: MOSFET meghajtó áramkör

A MOSFET-ek bekapcsolási tranzienseinek csökkentése céljából javasolt a 47. ábra szerinti R_4 és C_1 elem beépítése. R_4 korlátozza a gate áramot, az U_{DS} görbe így lineárisabbá válik, valamint a MOSFET maximális jelváltási sebessége (dU_{DS}/dt) beállítható lesz. A gyakorlatban, C_1 -nek sokkal nagyobbak kell lennie, mint a MOSFET gate-drain kapacitásának (C_{GD}).



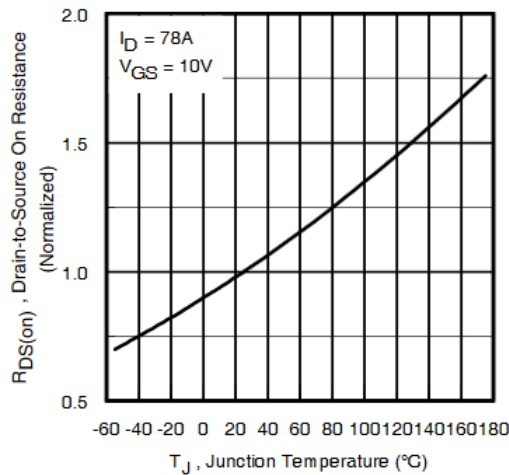
47. ábra: Bekapcsolási tranzienseket csillapító MOSFET meghajtó áramkör



48. ábra: A fejlesztési környezet

2.4.6 Félvezető kapcsolóelemek vizsgálata

A tápegységek hibáinak leggyakoribb forrása az áramkör részét képező kapcsoló vagy szabályozó elemtől származik – általában egy MOSFET-től. Ez lehet egy önálló alkatrész vagy egy integrált áramkör része. A teljesítmény MOSFET-ek esetében a kapcsolás nagyon gyors lehet, így elérve az alacsony kapcsolási veszteséget, de nem teljesen elhagyva azt. Az elemen hővé alakuló teljesítményvesztés jellemzően a nyitott drain-source csatorna ellenállásából ($R_{DS(on)}$) és az elemen átfolyó áramból kalkulálható. A technológia velejárója az $R_{DS(on)}$ erős pozitív hőmérsékleti együtthatója (49. ábra) [52].



49. ábra: Nyitott csatorna ellenállás és a hőmérséklet összefüggése

$$T_{ep(on)} \approx 6 \dots 9 \cdot 10^{-3} \quad (23)$$

ahol, $T_{ep(on)}$ az epitaxiális réteg hőmérsékleti együtthatója. [38] (A terhelőáram a nyitott drain-source csatorna ellenállására nincs jelentős hatással.) A hőmérséklet szignifikáns hatással van a nyitott drain-source csatorna ellenállásra, ΔT hőmérséklet emelkedés hatására (24) [39]

$$R_{DS(on)} = R_{DS(on)25} \cdot (1 + \Delta T \cdot T_{ep(on)}) \quad (24)$$

változás következik be, ahol $R_{DS(on)25}$ a nyitott drain-source csatorna ellenállásra 25°C-on. Amennyiben a félvezető réteghőmérséklete 100°C-al megemelkedik, a $R_{DS(on)25}$ ellenállása a másfélszeresére növekszik (25), más típusú MOSFET-ek esetében ez a kétszerese is lehet.

$$R_{DS(on)125} = 1,5 \dots 2 \cdot R_{DS(on)25} \quad (25)$$

ahol $R_{DS(on)125}$ a nyitott drain-source csatorna ellenállásra 125°C-on. A pillanatnyi teljesítményveszteség ($p(t)$) (26) alapján adható meg.

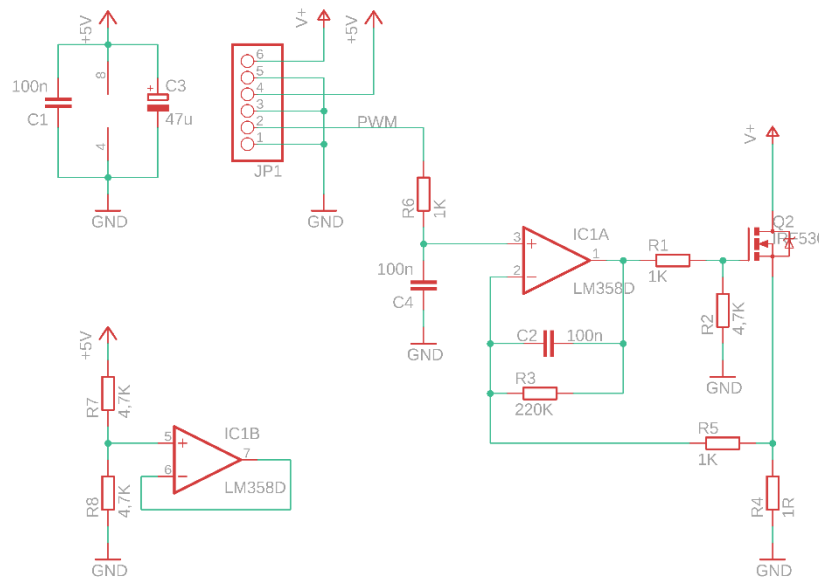
$$p(t) = i_D^2 \cdot R_{DS(on)} \quad (26)$$

ahol i_D a pillanatnyi drain áram.

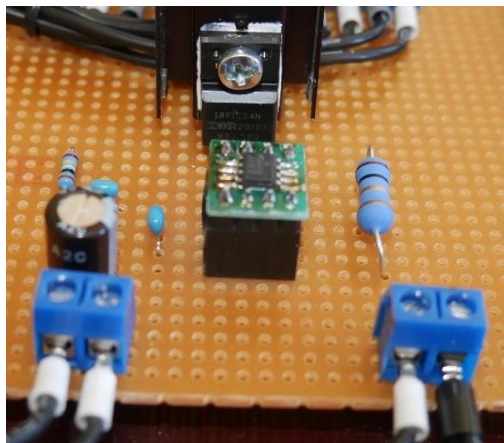
Mivel a félvezető réteghőmérséklet növekedésével növekszik a nyitott drain-source csatorna ellenállása, az eszközön bekövetkező teljesítményveszteség is növekszik, a félvezetőt fogadó modul hatásfoka csökken. [34]

2.4.7 Elektronikus műterhelés

Az 50. ábra látható a műterhelés kapcsolási rajza, a +5V-os ág táplálja az áramkört, a V+ ág a terhelendő feszültségforrás. A terhelést a Q₂ jelű N csatornás MOSFET csatornaellenállásának változtatásával lehet szabályozni. A terhelőáram az R₄ ellenálláson eső feszültséggel arányos. Az áramkört a mikrokontroller egy PWM jelen keresztül vezérli, a változtatható kitöltési tényezőjű négyzögjelet az R₆, C₄ által alkotott aluláteresztő szűrő simítja, IC_{1A} analóg kimeneti jele vezérli a Q₂ nyitását mértékét. A kitöltési tényezővel arányos terhelőáram lép fel a terhelendő tápegység modul kimenetén. IC₁ nem használt részáramkörét (IC_{1B}) az energifogyasztás csökkentése, illetve a nagyfrekvenciás gerjedés elkerülése céljából kötöttem le. A fizikai megvalósítás az 51. ábra látható.



50. ábra: Az elektronikus szabályozható műterhelés kapcsolási rajza

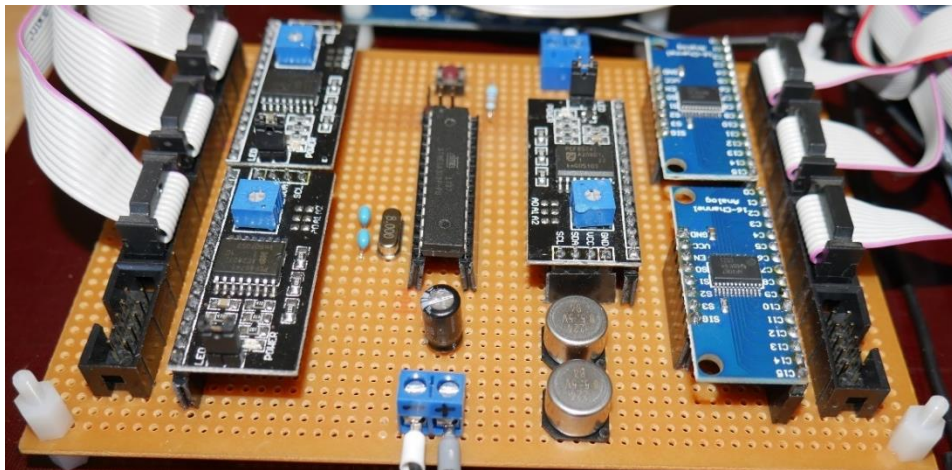


51. ábra: Az elektronikus szabályozható műterhelés megvalósítása

2.5 Redundáns, moduláris tápegység hardveres megvalósítása

A rendszer tesztelése céljából, egyszeres redundanciával megvalósított moduláris tápellátási rendszert építettem ki, ami szigetüzemű működésre is képes. A tápmodulok hatásfokának csökkenését kis értékű ellenállások soros közbeiktatásával oldottam meg.

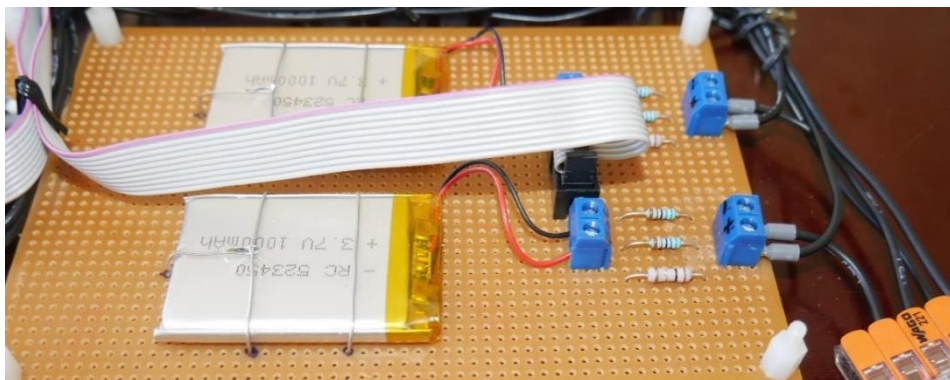
A fejlesztés során adatgyűjtésre alkalmas célműszerekkel dolgoztam. A vezérlő mikrokontroller feszültségek mérésére alkalmas bemeneteinek számát, analóg multiplexerekkel terjesztettem ki (52. ábra).



52. ábra: Mikrokontroller által vezérelt analóg multiplexerek és I/O bővítő modulok

2.5.1 Akkumulátor

Az akkumulátorok (53. ábra) jószágának meghatározása a hatásfok kiszámításán alapul. Az akkumulátorokba betáplált és az onnan kivett töltésmennyiség hányadosának változása utal az akkumulátor élettartamára. A nagy meredekségű hatásfok csökkenés – amit például megnövekedett belső ellenállást okozhat – egy jövőbeli meghibásodás bekövetkeztét jelzi előre.

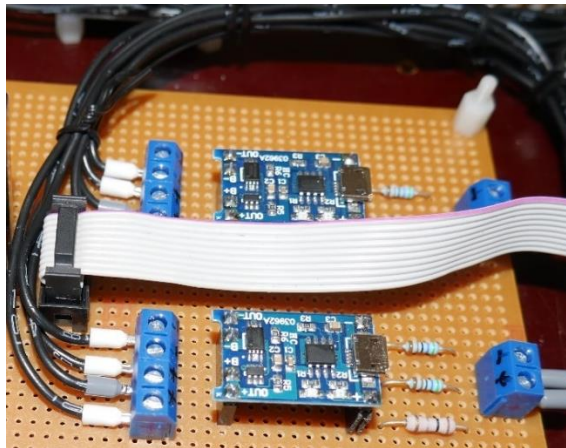


53. ábra: Redundáns akkumulátor modulok

2.5.2 Akkumulátor töltő

A modellben alkalmazott Li-Po akkumulátorok töltését végző modul (54. ábra) az akkumulátor szakszerű töltése mellett egyben az akkumulátorok védelmét is ellátja. A modul töltőárama az akkumulátorok maximális töltési áramával egyezik meg. A modul védelmi funkciója megakadályozza az akkumulátorok mélykisülését vagy a túl magas kisütési áram kialakulását.

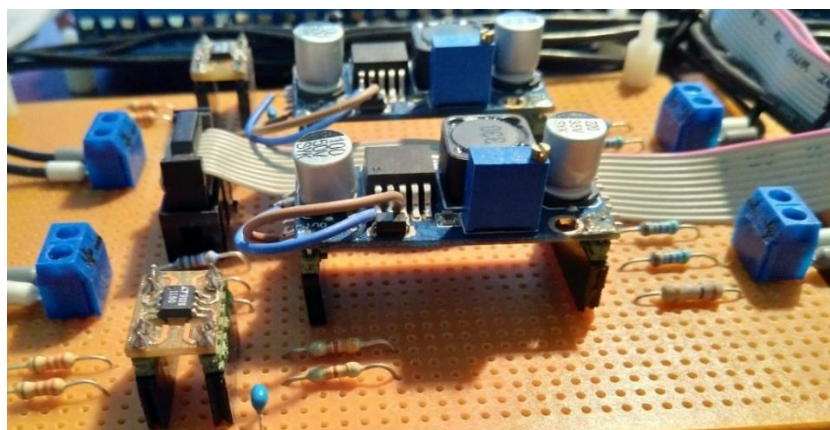
Az akkumulátor öregedésével, elhasználódásával, az akkumulátor töltéstároló kapacitása csökken és belső ellenállása növekszik – a hatásfok mérésével nyomon követhető az akkumulátorok élettartama.



54. ábra: Redundáns akkumulátor töltő modulok

2.5.3 DC/DC konverter

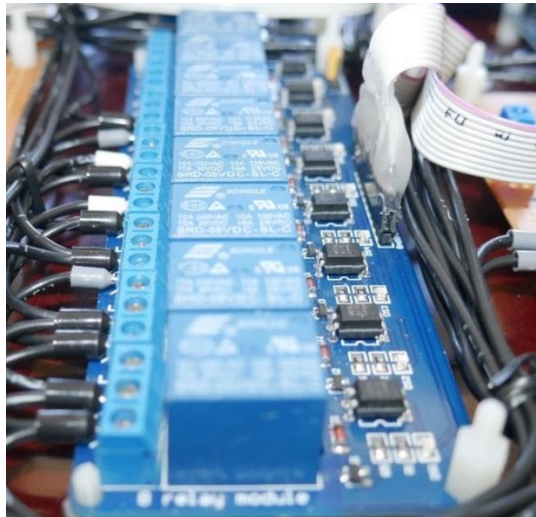
A moduláris tápellátási rendszer kimeneti feszültségét előállító DC/DC konverter (55. ábra) jóságát szintén hatásfok méréssel állapítom meg. A bemenő és kimenő teljesítmény hányadosából állítható elő a keresett indikátorérték. A konverter boost üzemmódban működik és terhelhetősége meghaladja az akkumulátorok által szolgáltatni képes vagy a terhelés által igényelt terhelőáramot.



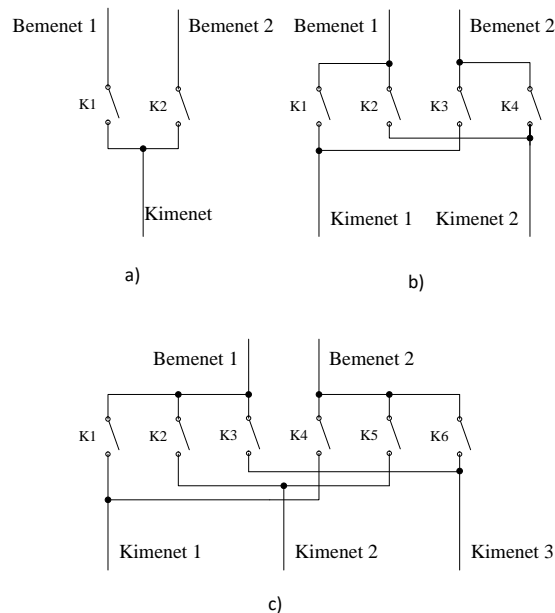
55. ábra: Redundáns DC/DC konverter modulok

2.5.4 Kapcsoló mátrix modellje

A bemutatott algoritmusokat tesztelő modelláramkör megépítésekor optocsatolón keresztül vezérelt relé modulok (56. ábra) kerültek felhasználásra, a beépített LED-es visszajelzés segítette a fejlesztési munkát. A kapcsolómátrix alap építőelemeinek elvi megvalósítása az 57. ábra látható. Egy célhardverben félvezető kapcsolóelemek, MOSFET-ek alkalmazása a célszerű, ezek nagyobb megbízhatóságú, gyorsabb kapcsolási sebességű, kisebb fogyasztású, egyszerűbben használható, kisebb méretű, kedvezőbb árú alkatrészek.



56. ábra: Kapcsolómátrix megvalósítása relékkel



57. ábra: Kapcsoló mátrix megvalósításának elve: a) két bemenet, egy kimenet; b) két bemenet, két kimenet; c) két bemenet, három kimenet

2.6 Redundáns, moduláris berendezés szoftveres megvalósítása [BB-3], [BB-6]

A hibatűrési előzmények kezdetén a redundancia használata a hardveres megoldásokra korlátozódik. A hibatűrés leggyakoribb megvalósítása az eszköz fizikai részeinek megsokszorozása volt, manapság azonban kifinomultabb lehetőségeink is vannak. Egy redundáns rendszer - az egyszerű rendszerhez képest - hozzáadott információt, erőforrásokat vagy időt tartalmaz.

A következő típusú redundanciákat különböztetjük meg:

- Hardverredundancia esetében extra hardvert adunk a rendszerhez, és általában hibafeltárára és hibatűrésre szolgál. Például a modulok többszörözése.
- A szoftver redundancia az eredeti szoftver alapértelmezett funkciói mellett, lehetőséget ad a hibák felderítésére, javításra. Például a várakozáshoz hozzárendelt időkorlát figyelése.
- Az információ redundancia, kiegészítő információ, amelyet a hiba észleléséhez használnak - ha lehetséges, a hibajavításhoz -, amelyre nincs szükség a készülék alapértelmezett funkcióihoz. Például a hibajavító bitek használatával.
- Az időredundancia a hibadetektáláshoz és a hibatűréshez használt extra idő. Például azonos számítások többszöri futtatása és az eredmények konzisztenciájának ellenőrzése.

Bármely típusú redundanciát növelő módszer kerül alkalmazásra, a költségek növekedni fognak. A hardveres redundancia megválasztásakor további alkatrészekre van szükség, az áramigény, az eszköz mérete és a fejlesztés költsége is növekedni fog. Ha szoftverredundanciát alkalmazunk, annak van hatása a hardverredundanciára is, mert nagyobb teljesítményű processzorra és nagyobb memóriakapacitásra van szükségünk, illetve több időre van szükség a fejlesztési fázisban is.

2.6.1 Alacsony redundanciájú firmware

A megbízhatóság növelhető a szoftver szegmensek számának növelésével, a redundáns szoftver szegmensek által visszaadott kimenetek összehasonlításával, szavaztatásával. Ezen eredményekből generált érték a következő szoftver modul egyik bemeneti paramétere.

Az 1.3 fejezetben bemutatott többségi szavazó programozott implementálása szerint, három különböző módszer futtatható párhuzamosan. Ezeknek az eljárásoknak az eredményeit a többségi szavazónak össze kell hasonlítania. Egy hibás szoftvermodul esetén a többségi szavazó helyes kimenetet fog generálni, a megvalósítása egyszerű, így a megbízhatósága az összehasonlításra

kerülő alprogramokénál magasabb, de meghibásodása esetén a rendszer hibás működést eredményezhet. A szavazók többszörözése kis számítási kapacitást igényel, de a rendszer működési ideje növekszik, - előnye, hogy elkerülhető a jellemzően nagy bonyolultságú dedikált hardver -, emellett független rendszerek esetén a szinkronizálási problémákat is meg kell oldani.

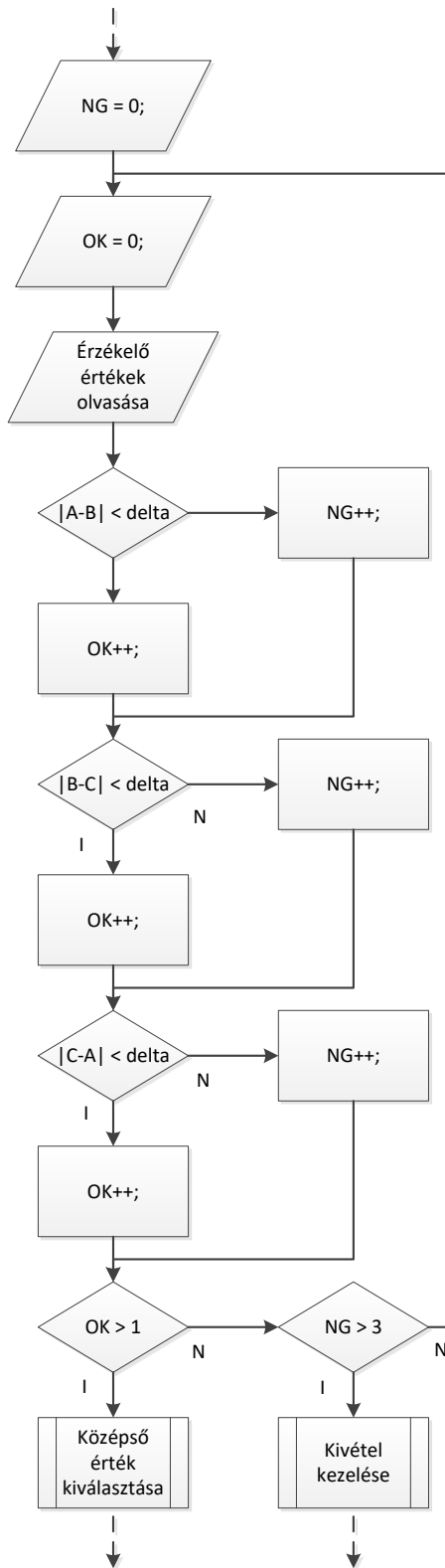
Redundáns érzékelők kimeneti jeleinek kiértékelésekor a mérőeszközök különbségéből adódóan a mért értékek is különböznek – hibátlan érzékelők esetén is. Szoftveres oldalon egyszerűen kezelhetők az eltérések. Egy választott vagy dinamikusan változó delta tartományon belül a mért értékek különbségei nem generálnak hibaeseményt. A megengedett tartományból történő kilépés esetén a hiba kezelése következik. Az algoritmus a 58. ábra követhető nyomon.

A kiválasztás vagy a kimeneti értéket meghatározó algoritmus szándékosan egyszerű és mellőz minden magasabb szintű, nagyobb számítási igényű eljárást, hogy az alacsony költségű eszközökbe is hatékonyan implementálható legyen. A kimeneti érték számítása továbbfejleszthető a mért értékek egymáshoz képesti távolsága alapján fordítottan arányosan súlyozott átlag képzésével (27).

$$\overline{x_{ki}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{be}} x_{be_i} (w_{be_{max}} - w_{be_i})}{\sum_{i=1}^{n_{be}} 2 (w_{be_{max}} - w_{be_i})} \quad (27)$$

ahol $\overline{x_{ki}}$ a súlyozott átlag, n_{be} a bemenő jelek száma, x_{be} a bemenő jelek tömbje, w_{be} a bemenő jelek súlyainak tömbje, $w_{be_{max}}$ pedig a bemenő jelek súlyainak maximális értéke.

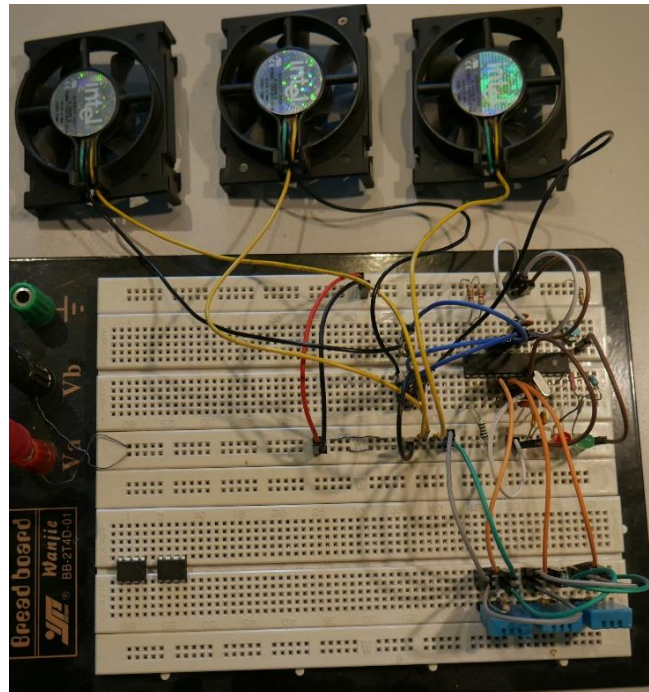
Egy beavatkozó esetében nem többszörözhetjük a szavazó algoritmusokat. Több redundáns beavatkozó esetén az egymástól eltérő struktúrájú szavazó algoritmusok nagyban növelik a megbízhatóságot. A megbízhatóság abban az egyszerűsített esetben is növekszik amikor csak egy szoftveres szavazót alkalmazunk és annak kimeneti eredménye több redundáns beavatkozót egyazon jellel vezérel.



58. ábra: Többségi szavazó delta algoritmusának folyamatábrája

A fejlesztéshez három azonos típusú hőmérséklet érzékelőt és három azonos típusú ventilátort, mint beavatkozót alkalmaztam. A mért hőmérsékletet szabályozható meleg levegő befújásával változtattam. Az érzékelők által mért értékek közötti eltérés növelése érdekében, a hűtést végző beavatkozók légáramát egy papírlappal csillapítottam, így szeparálva az érzékelőket. A fent leírt algoritmusok tesztelésére szolgáló, mikrokontroller által vezérelt prototípust mutatja be az 59. ábra.

További kiegészítő, hatékony, de gyakran elhanyagolt, a megbízhatóságot növelő szoftveres lehetőség a téves címzés kezelése. Amennyiben egy hibás memóriacímzés következtében a program egy nem használt memóriaterületre ugrik (innen a hibamentes program futást nem tudná folytatni), a nem használt memóriaterület egy hibakezelésre kijelölt memóriaterületre ugró utasítással van feltöltve, így a hiba detektálás megoldható, valamint a hibás működés is elkerülhető.



59. ábra: Szoftveres többségi szavazást megvalósító modell áramkör

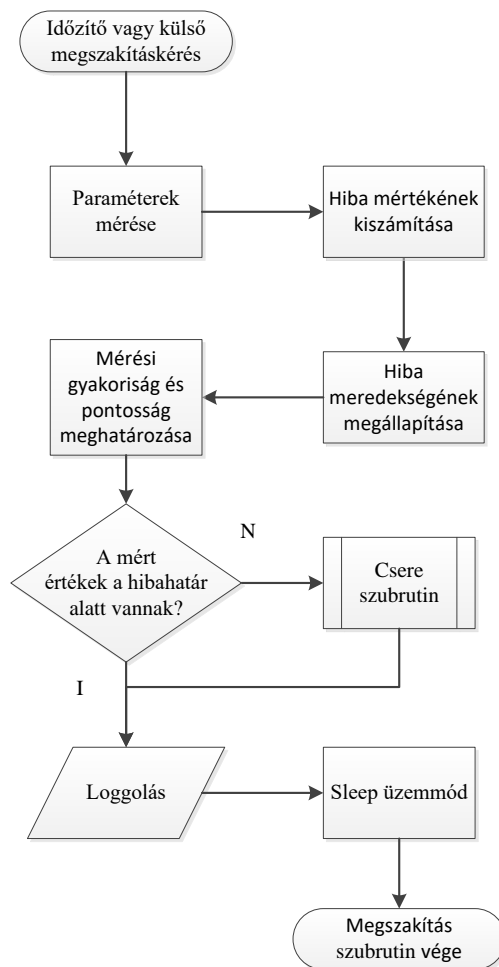
2.6.2 Vezérlési lehetőségek

A monitorozó rendszer a tápegység modulok bemeneti és kimeneti feszültségeinek és áramainak mérése segítségével kalkulálja a modulok primer és szekunder teljesítményét. Ezek felhasználásával pedig kiszámítja a tápegység modulok hatékonyságát. Amennyiben ez az érték egy előre meghatározott szint alatt van, vagy több mérés után a tárolt eredmények alapján megállapítható, hogy az egység állapota romlik (a hatékonyság értéke egy meghatározott szint alá

csökken), a monitorozó rendszer hibajelzést küld a felügyeleti rendszer számára, és a Csere szubrutinra ugrik.

A monitorozó rendszernek jelentős mennyiségű adatot kell feldolgoznia. A költséghatékony mikrokontroller vezérelte rendszer egyszerre csak egy pont mérését képes elvégezni, valamint az analóg-digitál átalakítás is végesen kis idő alatt zajlik le. A tápmodulok méréséhez relatív nagy számú mérési pont tartozik, a hatékony műveletvégzés céljából az egyes pontok mérésének gyakorisága és az analóg-digitál átalakítás pontossága (a mérés ideje) dinamikusan változtatható.

Amennyiben egy mérési ponthoz tartozó hiba az ideálistól csekély eltérést mutat, annak ellenőrzése kisebb gyakorisággal és redukált pontossággal is elvégezhető, így csökkentve a nyomon követésére szánt időablakot. Ha a mérési ponthoz tartozó hiba megnövekszik célszerű megnövelni a mérési pont ellenőrzésének gyakoriságát és a mérés pontosságát. Ha a mérési ponthoz tartozó hiba változási sebessége is növekszik, célszerű tovább növelni a mérési ponthoz tartozó mérési gyakoriságot és pontosságát, a változás nyomon követése érdekében. A mért és tárolt adatok jól használhatók hiba előrejelző funkciókhoz. Az eljárás erősen alkalmazásfüggő, egyszerű implementálása történhet egy look-up table-ben leírt függvény segítségével (60. ábra).



60. ábra: A főprogram folyamatábrája

2.6.3 Működési módok

A felhasználónak lehetősége van a működési mód kiválasztására, valamint lehetősége van az alábbi szempontok súlyozására. Ha az eszköz élettartamát szeretné maximálni – mert a karbantartás nehéz, az eszközhöz nehezen hozzáférhető vagy cél az energiahatékonyság növelése – a Csere üzemmódot választja. A Modulok cseréje szubrutin elsősorban a modulok hatásfoka alapján vált a redundáns elemek között, de az élettartam meghosszabbítása céljából a modulok hőmérsékletadatai alapján is válthat (az aktív üzemben lévő modul hőmérséklete megemelkedik), így kímélve a hőterheléstől és a gyorsabb öregedéstől az alkatrészeket.

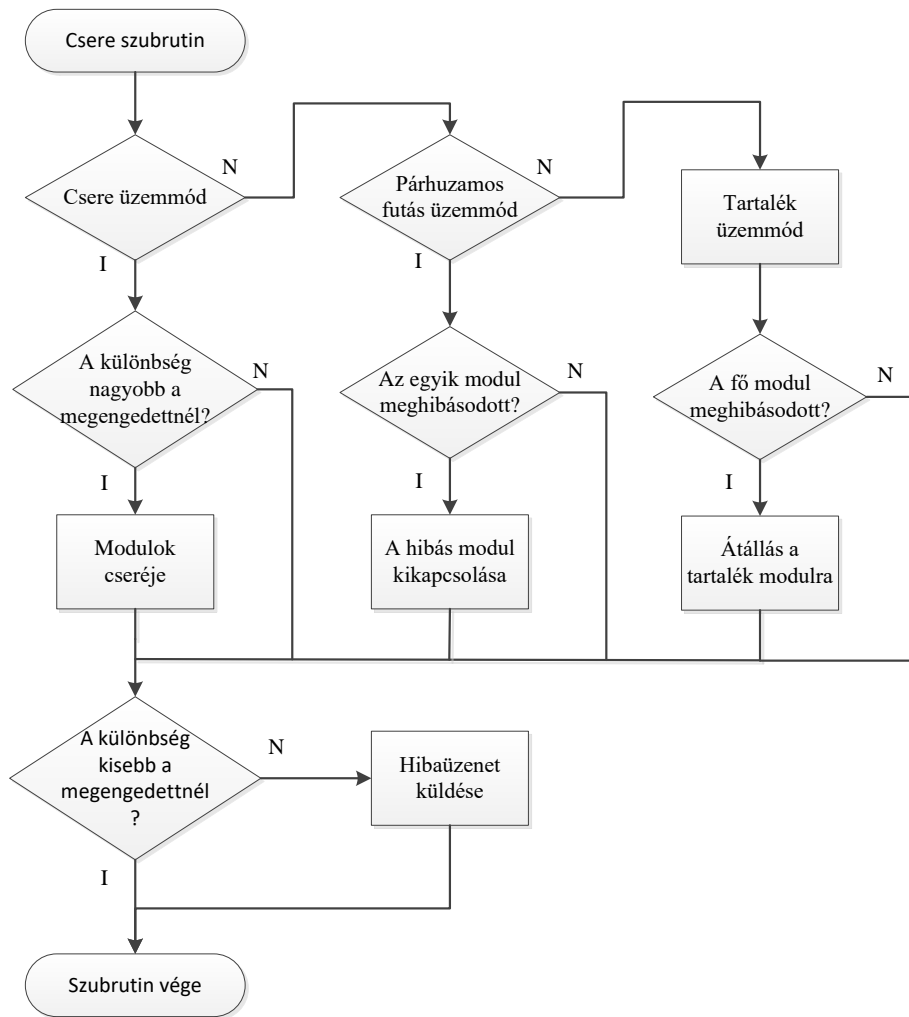
A magasabb megbízhatóság a fő cél, akkor a párhuzamos futtatás (Simultaneously running) üzemmód aktiválása a célszerű. Ebben az esetben a redundáns modulok 50-50%-os terheléssel együtt futnak, a hőterhelés magasabb, mint az előző esetben, az egyik modul meghibásodása esetén a másik kisebb tranzienssel veszi át a 100%-os terhelést.

Könnyebben hozzáférhető vagy szervizelhető berendezések táplálásánál javasolt ez a vezérlési mód. A modulok együttfutása esetén az egyik modul meghibásodásával a rendszerben maradó modul meghibásodásának valószínűsége is megnő, valamint a megmaradt 100%-os terhelésen járó modul meghibásodása esetén nincs több tartalék modul a rendszerben. A 100%-os terhelést csak a szervizelésig kell elviselnie a rendszerben maradó modulnak, ezért kisebb teljesítmény ráhagyást alkalmazhatunk, mint a *Csere* (Swapping) vagy a *Tartalék* (Backup) üzemmód esetében.

A harmadik működési mód a klasszikus tartalék üzemmód. Az elsődleges tápegységet felépítő modul meghibásodását követően a tartalékmodul veszi át a feladatait. Ebben az esetben a tartalék modul még sokáig üzembiztos maradhat a *Párhuzamos futás* (Simultaneously running) módnál nagyobb teljesítmény tartalék miatt, bár meghibásodás után szintén nem tartalmaz a rendszer tartalék elemet az adott szinten.

Az elsődlegesen aktív modult meghibásodásig vagy egy előre meghatározott hatásfok romlásig szimultán üzemelő vagy melegtartalékot képező modulok energiafogyasztása magasabb lesz, mint a hidegtartalékot képező redundáns részegységeké.

Mindhárom esetben – de különösen a Backup mód esetében – fontos a modulok időszakos tesztelése, működőképességük megállapítása. A mérés történhet a 2.4.7. fejezetben említett elektronikus terhelés segítségével, vagy a nem aktív modul relatív rövid idejű üzembe helyezésével – az üzemi hőmérséklet eléréséig és az üzem közbeni mérések elvégzése idejéig.



61. ábra: Csere alprogram folyamatábrája

2.6.4 Felhasználói optimalizáció

A szigetüzemű tápellátással rendelkező berendezések esetében a rendelkezésre állás-üzemidő-teljesítmény közötti egyensúlyról dönthet a felhasználó. Az energiafelhasználás (ébredési idő, számítási idő és teljesítmény) valamint a mérések pontossága és gyakorisága is kínál beállítási lehetőséget. Programozott megoldással automatizálható – a felhasználói beállításokhoz igazodva – az energiafelhasználás, csökkenthető a mérések gyakorisága (csökkentve az ébredési időt) valamint a mérések pontossága (csökkentve a mérési és számítási időt) amennyiben a mért érték nem, vagy csak nagyon lassan változik. Amennyiben a mért paraméter változási sebessége megnövekszik, akkor a mérési gyakoriság és a mérési pontosság is követi azt.

A berendezést vezérlő modul szabályozási feladatait a felhasználó egyszerűen változtathatná a megengedett határok között. A beavatkozásra jó megoldás egy változóval való szorzás vagy a kimenet jelváltozási sebességének limitálása. A haladó felhasználói beállítások esetében

lehetőség van az üzemi paraméterek konfigurálására, a referencia szintek, hiszterézis értékek és időzítések egyedi megadására.

Az eszköz lehetőséget nyújthat a felhasználó számára a teljesítmény-élettartam mérleg beállítására egy öt állású mérleg skálán. Az akkumulátor (powerbank) esetében, ez azt jelenti, hogy ha a felhasználó a teljesítményt választja, akkor az nagyobb töltőáramot (gyorsabb töltést), megváltozott töltési diagramot, magasabb töltőfeszültséget, alacsonyabb mélykisülési feszültséget, nagyobb maximális terhelőáramot jelent. Eredményképpen az akkumulátorból nagyobb töltésmennyiség használható fel, de az elektrokémiai elemeket is nagyobb terhelés éri. A nagyobb teljesítmény ára, az akkumulátor élettartamának csökkenése. Amennyiben az élettartam felé billen a mérleg, az előbb említettekkel ellentétes irányú beállítások íródnak be a vezérlőrendszerbe.

Elektronikus energiaátalakítók (például akkumulátortöltő elektronika, DC/DC konverter, ..., stb.) esetében gyakori meghibásodás a teljesítményfélvezető kapcsolóelemek (mint az a 2.4.5-ös és 2.4.6-os alfejezetben bemutatam), nagyfrekvenciával terhelt diódák, induktivitások, szűrő kondenzátorok, akkumulátorok. A nagyobb terhelőáram nagyobb terhelést jelent az említett alkatrészekre. A MOSFET-ek csatorna ellenállása (szaturációban) megnövekszik, ez nagyobb disszipációt eredményez, ami tovább gyorsítja az alkatrészek öregedését. Az elektrolit kondenzátorok kiszáradnak a hő hatására, belső ekvivalens ellenállásuk megnövekszik. Hőterhelés hatására az akkumulátorok ciklusideje, a villamos szigetelések szigetelőképesége csökken.

A terhelő hatások a modul hatásfokának a romlásához, illetve megnövekedett energiafelhasználáshoz vezetnek. A hőterhelés elleni védekezés a hőveszteség csökkentésével, például a berendezés hatásfokának javításával vagy teljesítményének időfüggő maximalizálásával, illetve az elem hűtésével történhet. A megfelelő konstrukció kialakítása részben kompenzálja a kevésbé minőségi alkatrészválasztásból következő hátrányokat.

Egy villamos gépek vezérlése esetében is van lehetőség a teljesítmény-hatásfok-élettartam értékek súlyozására. Az adott fordulatszámhoz tartozó üzemi áram maximálható, az indítási áram vagy a fordulatszám változásakor fellépő áram csúcsok csökkenthetőek, ha a fordulatszám változásának sebességét vagy a motor által felvehető impulzusszerű áramok értékének maximuma csökken. Eredményképpen a villanymotor hő- és mechanikai terhelése, energiafelvétele csökken. Kommutátoros motor esetében a kommutátor és a szénkefék élettartama növekszik. A

motorvezérlő és meghajtó elektronika szintén tartalmaz félvezetőket, melyek élettartama a kisebb terhelések hatására megnövekszik.

3 MEGBÍZHATÓSÁGOT NÖVELŐ ELJÁRÁSOK

Az elektronikus alkatrészek költségeinek csökkenése egyre elfogadhatóbb kompromisszumot jelent a hardver redundancia használatára. A megvalósítás szerint passzív, aktív és hibrid megjelenési formákba csoportosíthatóak, a gyakorlatban az utóbbi az optimális megoldás.

3.1 Redundáns felépítésű vezérlőegység [BB-7]

Egy vezérlőegység meghibásodhat, és ennek következményei a kényelmetlenségtől a katasztrófaig terjednek. A redundáns modulokat tartalmazó hibatűrő rendszerben, a hibatűrés megvalósítása érdekében, a berendezésnek tartalmaznia kell egy felügyeleti vezérlést. Ez a gyakorlatban lehet egy mikrovezérlő köré épülő nagy megbízhatóságú, illetve üzembiztonságú irányító egység.

Az alkalmazáskritikus rendszerek, repülőgépek, a vasúti jelzővezérlők, az orvostechikai eszközök, eróművek, ..., stb. esetében a meghibásodás vizsmajor eseményt idézhet elő. Ezeknek a rendszereknek három vagy több vezérlőegységük van, és egy összetett többségi logikán alapuló szavazási rendszert használnak a hibatűrés megvalósításához.

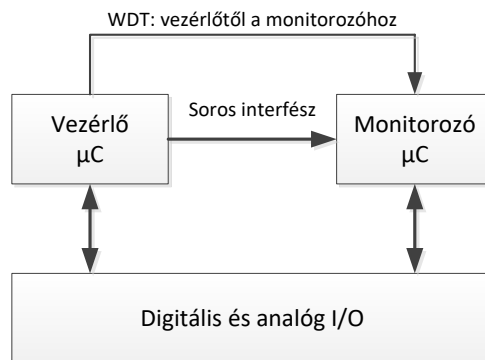
A TMR típusú eljárás előnye az egyszerű felépítés, hátránya a magas eszközígény. Egy köztes megoldás két vezérlőegység alkalmazása, a javasolt architektúra a költségek csökkentését célozza, valamint a kommersz és egyes ipari célra használható berendezések megbízhatóságát növeli.

3.1.1 CON-MON architektúra

A két vezérlő mikrokontrollerrel felépített CON-MON²⁷ architektúra egy hatékony módszer a megbízhatóság növelésére. A rendszer két vezérlőre (mikrokontrollerre) épül, az egyik végzi az általa irányított berendezés vezérlését (a vezérlés feladatát teljes mértékben ellátja), a másik (monitorozó) mikrokontroller soros interfészen keresztül tartja a kapcsolatot a vezérlő mikrokontrollerrel (62. ábra). A vezérlést végző mikrokontrollerhez képest, a monitorozó mikrokontroller jellemzően kisebb teljesítményű. A CON-MON architektúra megbízhatósága

²⁷ CON-MON - Control-and-Monitor - vezérlés és monitorozás

alacsonyabb, mint a TMR típusú rendszereké, de szintén képes a hiba detektálására és riasztás küldésére, amikor a vezérlést végző mikrokontroller hibás működést eredményez.



62. ábra: CON-MON architektúra

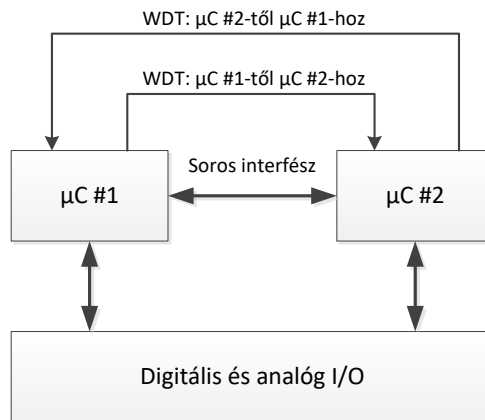
Az architektúra előnye, hogy tájékoztatást nyújt a karbantartás és fejlesztés számára arról, hogy a hiba milyen körülmények között keletkezett. A kis mikrokontroller naplózza a fő mikrokontroller állapotait. Amikor a vezérlő mikrokontroller hiba miatt újraindul, – a monitorozó mikrokontroller hiányában – a környezettel kapcsolatos részletek, a pontos idő, az I/O állapotok, a rendszer állapota, az aktív szubrutin, ..., stb., elvesznek, és a meghibásodás csak akkor válna észlelté, amikor a fő mikrokontroller újraindul, az újraindítást kiváltó rendszerállapotok pedig elvesznek. Amennyiben a hiba ismeretlen körülmények között vagy véletlenszerűen fordul elő, az üzem közbeni külső eszközzel történő monitorozás és hibakeresés erőforrásigényes művelet. A CON-MON architektúrában a kisebb mikrokontroller naplózza ezeket a fő mikrokontrollert is érintő adatokat, így a hiba körülményei könnyen megismerhetők, annak kialakulása felderíthető.

3.1.2 Duplikált vezérlőegység alkalmazása

A CON-MON architektúránál nagyobb megbízhatóságot igénylő alkalmazások esetében mindkét mikrokontrollernek képesnek kell lennie a vezérlési és monitorozási feladatkör ellátására. Amennyiben az egyik (éppen vezérlési feladatokat végző) mikrokontroller hibás működést produkál, akkor a másik (éppen monitorozási feladatokat végző) mikrokontrollernek kell átvennie a vezérlési feladatkört, hogy a vezérelt rendszer üzemzavar nélkül működhessen tovább.

A duplikált vezérlőegységgel felépített rendszerek extra hardver és szoftver modulokat tartalmaznak a megbízhatóságot növelő funkciók megvalósítása céljából (63. ábra). A hibatűrés mechanizmusát megvalósító, jelen alfejezetben bemutatott architektúra a mikrokontroller belső perifériáit alkalmazza, elsősorban biztonsági időzítő áramkört és a soros kommunikációra alkalmas áramköröket. Az alkalmazástól függően, a mikrokontrollerek közötti kommunikációra célszerű a

külső perifériák által nem használt protokollokat választani például, USART²⁸, I²C²⁹, SPI³⁰, CAN³¹, ..., stb.



63. ábra: Duplikált vezérlőegység architektúráis felépítése

A beépített öndiagnosztikai funkciók (BIST³²) előre meghatározott bemenetek hatását vizsgálják a rendszer vagy részáramkör kimenetén. A BIST architektúra kimenetén található komparátor, a mért és az előre meghatározott rendszerkimenet eltérése alapján dönt a működőképesség helyességéről. Az eljárás hiányossága, hogy nélkülözi az üzemi körülmények közötti, valós idejű kimenetek kiértékelésének képességét.

A boundary scan eljárás a nagy integráltsági fokú áramkörök tesztelésére alkalmas, kommunikációra a JTAG³³ interfészt használjuk. Előnye a moduláris funkcionális teszt futtatásának lehetősége, de a csak a technológiát támogató IC-k esetében, valamint a termékfejlesztés is erőforrásigényes.

A hibadetektáló öndiagnosztikai funkció egyik legegyszerűbb esete a belső watchdog timer használata. Nem igényel jelentős hardvert, és a modern kontrollerek integrált formában tartalmazzák. A WDT nagy előnye, hogy sikeresen alkalmazható szoftveres és hardveres hibák felderítésére, általában sokkal egyszerűbb, mint a vele felügyelt egységek, ezért megbízhatóbb azoknál.

²⁸ USART - Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter - univerzális szinkron/aszinkron adó/vevő

²⁹ I²C - Inter-Integrated Circuit - IC közötti kommunikáció

³⁰ SPI - Serial Peripheral Interface - szinkron soros kommunikációs interfész

³¹ CAN - Controller Area Network - vezérlők fedélzeti hálózata

³² BIST - Built In Self Test - beépített öndiagnosztikai eljárás

³³ JTAG - Joint Test Action Group

A watchdog időzítő nem detektálja az összes lehetséges hibát, csak megerősíti az egység működőképességét. A watchdog alkalmazásakor a számláló újraindítási utasításait a fő ciklusba érdemes helyezni. A számlálási periódus hosszát pedig mindig az alkalmazás sajátos jellemzőihez kell igazítani, például: válaszütem, feladatok futási ideje.

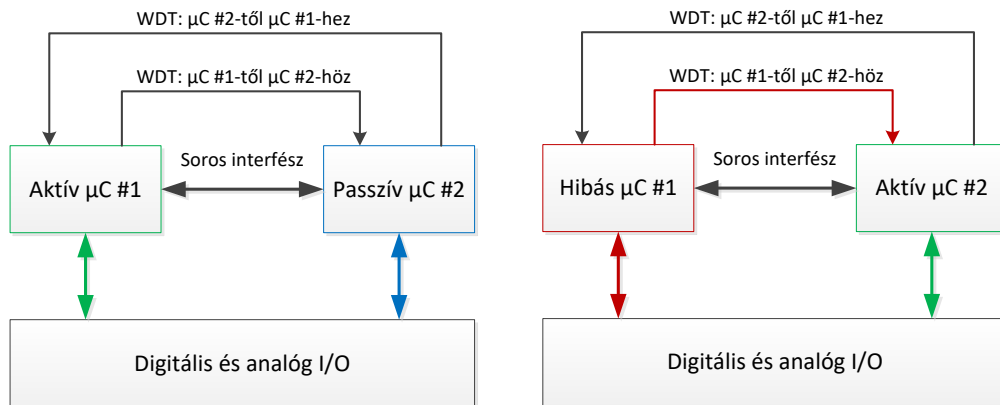
A duplikált vezérlő által irányított rendszer helyes kivitelezéséhez az alábbi szempontokat célszerű figyelembe venni. Időbe telik, amíg a monitorozó mikrokontroller átveszi a hibás, eredetileg vezérlést végző mikrokontroller feladatait (átkapcsolási idő). A rendszeradatoknak és a felhasználói adatoknak konzisztenseknek kell lenniük a két vezérlőben (adatintegritás). Közös buszt kell biztosítani a két vezérlő számára (például ICSP³⁴). A rendszer problémáinak azonosítása és elkülönítése céljából diagnosztikai funkciók kiépítése szükséges (beépített önteszt).

Az aktív hibát vétő mikrokontroller a watchdog időzítő túlsordulása után újraindul és öndiagnosztikát futtat, hogy azonosítsa a probléma hardverhez vagy szoftverhez kapcsolódik-e. A problémával kapcsolatos hibakódot generál és értesíti a felügyeleti rendszert. Eközben a passzív mikrokontroller átveszi a vezérlést és a rendszert üzemszerűen működteti, így a rendszer fő funkcionalitása nem szenved hiányt. A 64. ábra és a 65. ábra segítségével nyomon követhető a változás menete.

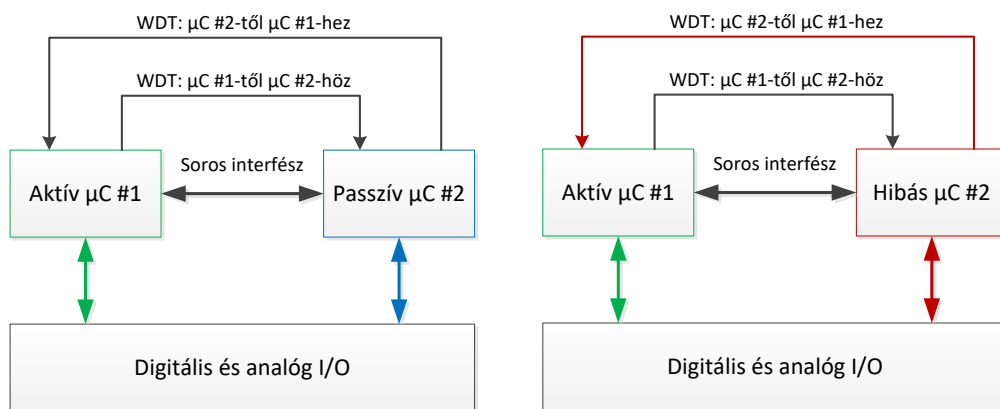
A rendszert működtető szoftver feladata a naplózás, hiba bekövetkezése után az üzemeltető értesítése, a karbantartás elvégzése után a duplex mód újbóli engedélyezése. A működtető szoftverbe épített vezérlésátadási mód alapján, az eltérő integráltsági szintekkel összhangban változik a rendszer bonyolultsága.

A legegyszerűbb üzemmód a biztonsági időzítő áramkör jelzésére történő teljes vezérlés átvétel (hot-stand-by architektúra). Ebben az esetben szoftver mérete csak kis mértékben növekszik. Amire figyelmet kell fordítani, az a vezérelt rendszer aktuális állapotának figyelembevétele, valamint a felügyeleti rendszer értesítése. A passzív mikrokontroller energiatakarékos (sleep) üzemmódban van, ameddig az aktív mikrokontroller irányítási műveleteket végez. A vezérlésátvétel finomsága a redundancia integráltsági fokától függ. Mindkét esetben az utolsó feladat az adatok naplózása és frissítése.

³⁴ ICSP - In Circuit Serial Programming - áramkörön belüli programozás



64. ábra: Az aktív mikrokontroller meghibásodásakor lejátszóó vezérlés átvétel



65. ábra: A passzív mikrokontroller meghibásodása

A komplexebb szoftveres eljárás precízebb megoldást nyújt. Mindkét mikrokontroller párhuzamosan megkapja ugyanazokat a bejövő jeleket és ezek alapján futtatja ugyanazt a vezérlő programot. Az irányított rendszerbe történő beavatkozás lehetősége továbbra is csak az aktív mikrokontroller számára érhető el. A vezérlő mikrokontrollerek státusza közel azonos, így a vezérlés átvétel az előzőekben bemutatott módszernél gyorsabban zajlik le. A megoldás hátránya a megnövekedett energiafogyasztás, mivel mindkét mikrokontroller aktív (amikor nincs sleep üzemmód) és szimultán végeznek üzemi feladatokat. Megbízhatóság kritikus rendszerek esetében célszerű az ismertetett architektúra alkalmazása, gyakorlati példát a 3.1.4. fejezetben mutatok be.

3.1.3 Külső redundáns biztonsági időzítő áramkör alkalmazása

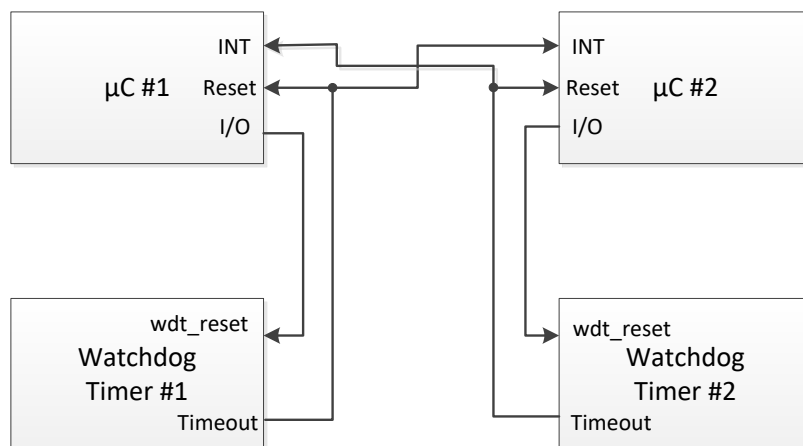
A mikrokontrollerekbe integrált biztonsági időzítő áramkörök számlálója véges szóhosszúságú, az órajelüket adó előosztó áramkör is véges felbontású. Több mikrokontroller által végezhető időzítési vagy kommunikációs feladat hossza is meghaladhatja a WDT által maximálisan rendelkezésre álló időkeretet (W_{to}). A külső könyvtárak használata tovább nehezíti az időszakos törlés feladatát, a

`wdt_reset` hívások megfelelő helyre történő elhelyezése nehéz, és egyes (már említett) soros rutinok esetében nem megvalósítható. A probléma feloldása lehet a külső watchdog timer áramkör használata.

A külső watchdog időzítő hosszabb időkereteket enged meg, mint a mikrokontroller belső WDT perifériája. A külső WDT a hosszabb szekvenciák kezelésére is alkalmas, egyszerűsége és a mikrokontrollertől való függetlensége okán üzembiztossága is magasabb, mint a belső watchdog időzítő. A 3.1.2 fejezetben leírt architektúrát kiegészítve, a 66. ábra mutatja be a módosított rendszer felépítését.

Programozási vagy fordítási hibából adódóan (függvényhívásokkor vagy időzítő-, előosztó áramkörök kezelése során), a belső WDT periféria beállításai megváltozhatnak vagy teljesen lekapcsolhat az áramkör. (Indokolt esetben természetesen a külső WDT áramkör is paraméterezhető vagy lekapcsolható.)

Amennyiben a mikrokontroller tápfeszültsége az alsó határértéke alá csökkenne (brownout), a belső WDT üzembiztossága már nem garantált. Külső WDT esetében a megfelelő pufferelés esetén vagy amennyiben a WDT tápfeszültsége alacsonyabb, mint a mikrokontroller tápfeszültsége, a biztonsági időzítő áramkör működőképes marad.



66. ábra: Redundáns mikrokontrolleres architektúra külső WDT áramkörökkel

3.1.4 A modell megvalósítása

A mikrokontrollerek funkcionális felcserélhetősége okán a feltöltött programkódnak a két vezérlőben azonosnak kell lennie. A mikrokontroller rendszerben betöltött funkciójától függetlenül implementálhatónak kell lennie a kódnak. Az aktív mikrokontroller vezérli a rendszert, a passzív mikrokontroller pedig követi az aktív mikrokontroller programját, végrehajtja az utasításokat és a függvényhívásokat.

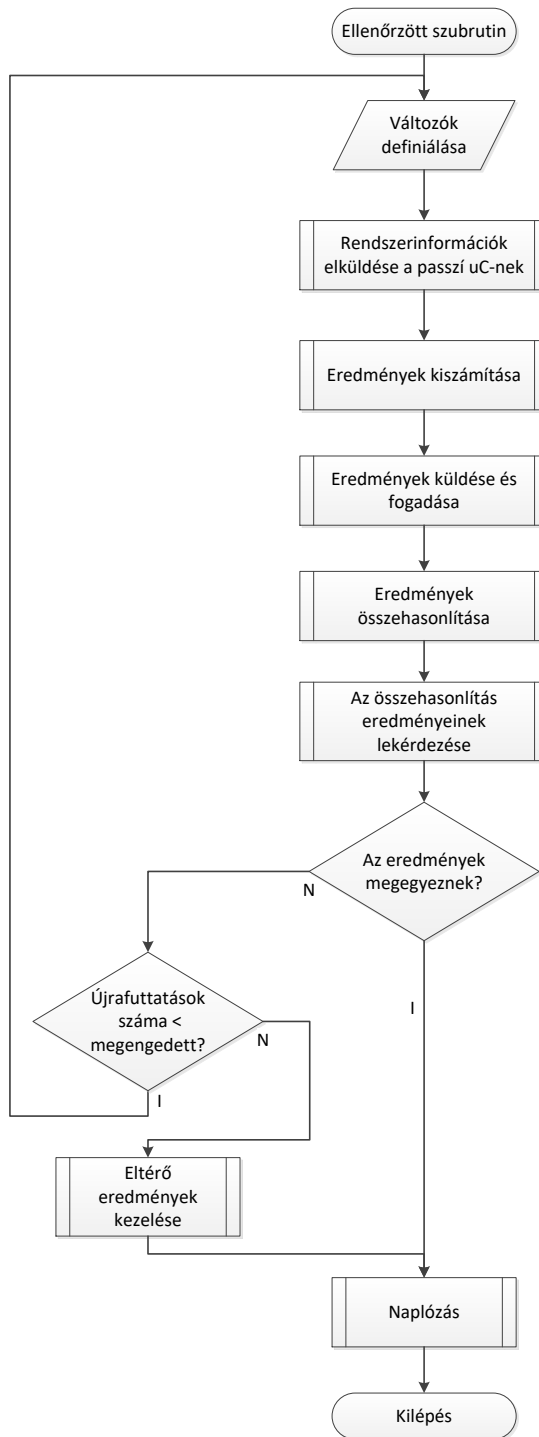
A mikrokontrollerek párhuzamos futásakor – az integráltsági fokuknak megfelelően – a számítási eredmények összevetésre kerülnek. A gyakorlatban a döntések a szubrutin hívások előtt történnek, hogy megbizonyosodjunk tényleg szükség van a művelet sor elvégzésére, valamint meghatározott függvények visszatérési értékeinek előállításakor, a kalkuláció validálásaként alkalmazott (67. ábra).

Az eredmények eltérésekor az egyik mikrokontroller hibázott, duplikált rendszermodulok összehasonlításakor nem állapítható meg, hogy melyik modul, de annak valószínűsége, hogy a duplikált mikrokontrollerek egyazon végesen kis időablakon belül, ugyanolyan módon hibásodjanak meg, nagyon alacsony.

Véletlen hiba esetén, az eltérést mutató szoftverblokk mindkét mikrokontrollerben történő újra futtatása egy lehetséges megoldás a problémára. Amennyiben többszöri futtatás után is eltérés van az eredmények között, feltételezhető a memóriaterület sérülése, megoldásként egy eddig még nem használt, azonos funkcionalitású memóriaterület kiválasztása szükséges. A gyakorlatban a program memóriának a programkód általi redundáns felhasználása lehet egy egyszerű implementáció. Az eszköz indulásakor egy írható/olvasható, tápfeszültség elvételekor nem felejtő regiszter tartalma alapján dől el a programmemória kezdőcíme, melyet eltérő számítási eredmények esetén a rendszer átír másik kezdőcímre.

A hiba észlelésekor nem dönthető el, hogy melyik mikrokontroller tévedett, mindkettőnek át kell térnie az új programmemóriát tartalmazó területre. A változások archiválása minden esemény bekövetkeztekor kiemelt jelentőségű. Az újbóli futtatás és összehasonlítás után, amennyiben a számítások megegyeznek, az előzőleg számított értékekkel összevetve az új eredményt, meghatározható, hogy melyik mikrokontroller állított elő helytelen eredményt. A hibás programmemóriát a hibát vétő kontroller nem használhatónak jelöli meg az említett memóriastátusz regiszterben. Az eddig bemutatott szoftveres eljárás optimalizált erőforrás befektetés mellett nyújt megnövelt megbízhatóságot, hátránya a mikrokontrollerek megnövekedett programmemória igénye.

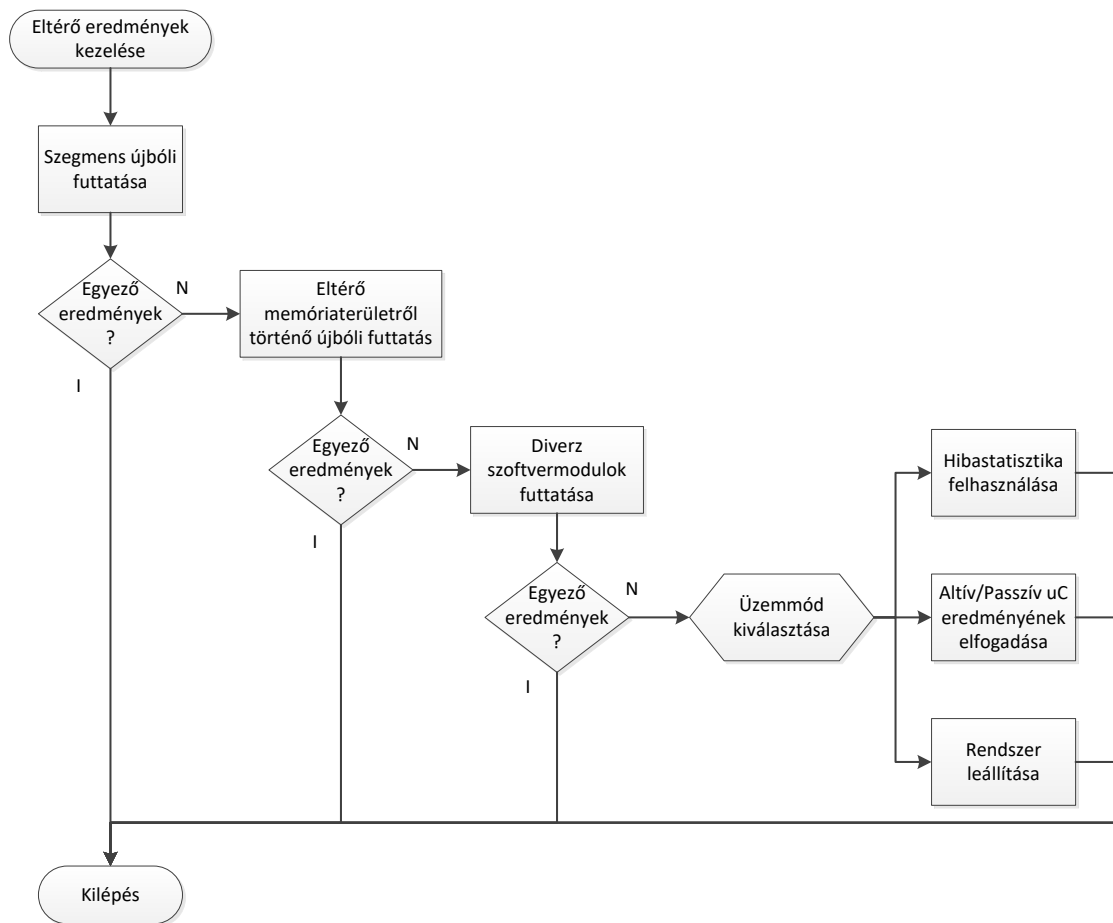
Amennyiben a differens memóriaterületről történő újbóli futtatás eredményeinek összevetése is eltér, az egyik mikrokontroller műveletvégző egységét érintheti a meghibásodás. A programkód diverz felépítésével, ugyanazt a funkciót különböző műveletek elvégzése során előállítva és az eredményeket újból összevetve van lehetőség a hiba forrásának felderítésére.



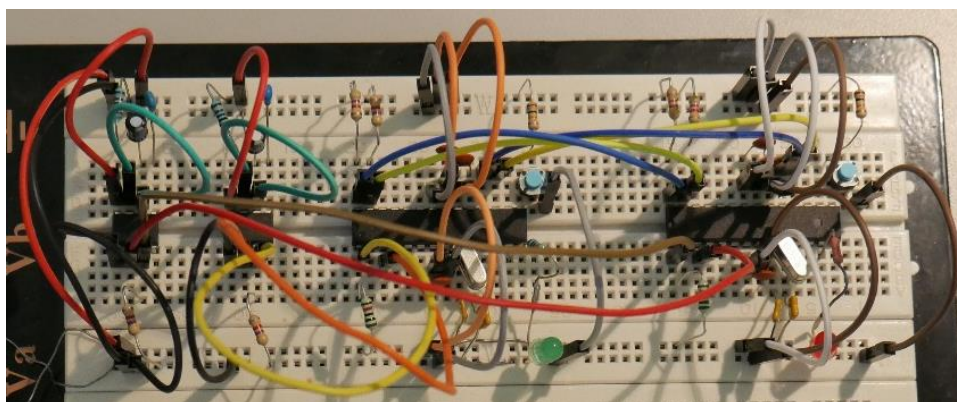
67. ábra: Duplikált aktív vezérlő ellenőrzött alprogramjának folyamatábrája

További differencia esetén a szoftver végfelhasználói beállítása szerint a rendszer leállhat, vagy tovább működhet, az aktív vagy a passzív mikrokontroller eredménye alapján. Amennyiben a múltban már volt eltérés az eredményösszehasonlító eljárás során, és meghatározásra került a hibás eredményt produkáló mikrokontrollerre, a rendszer a hibastatisztika alapján dönt a

megbízhatóbb eredményről. A kifejlesztett működési módokat a 68. ábra foglalja össze, a megvalósított modelláramkör a 69. ábra látható.



68. ábra: Duplikált vezérlőegységek hibakezelő eljárása



69. ábra: Redundáns mikrokontrollert tartalmazó modell áramkör

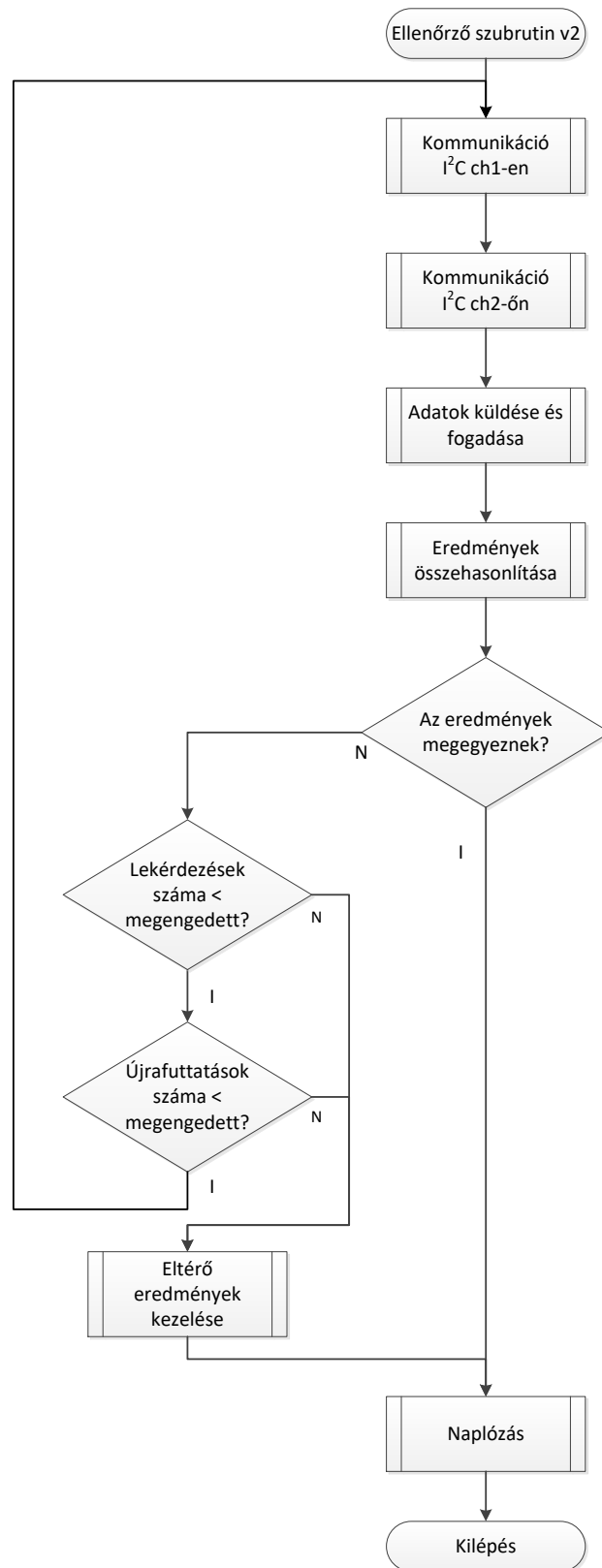
3.1.5 Kommunikációs csatorna megbízhatóságának növelése

A mikrokontrollerek közötti kommunikációban is fellép hiba és ez okozhatja a 3.1.2. fejezetben leírt összehasonlító eljárásakor előálló hibás eredményt. Eltérő eredmény esetében minden üzenetküldés többször megismétlésre kerül. Ha öt üzenetből egy eltérő, az megfeleltethető véletlen hibának – a hibastatisztikába ekkor is jegyzésre kerül az esemény. Eltérő beérkező üzenetek esetében a csatorna zajos, nem használható, a rendszer működése megbízhatatlanná válik.

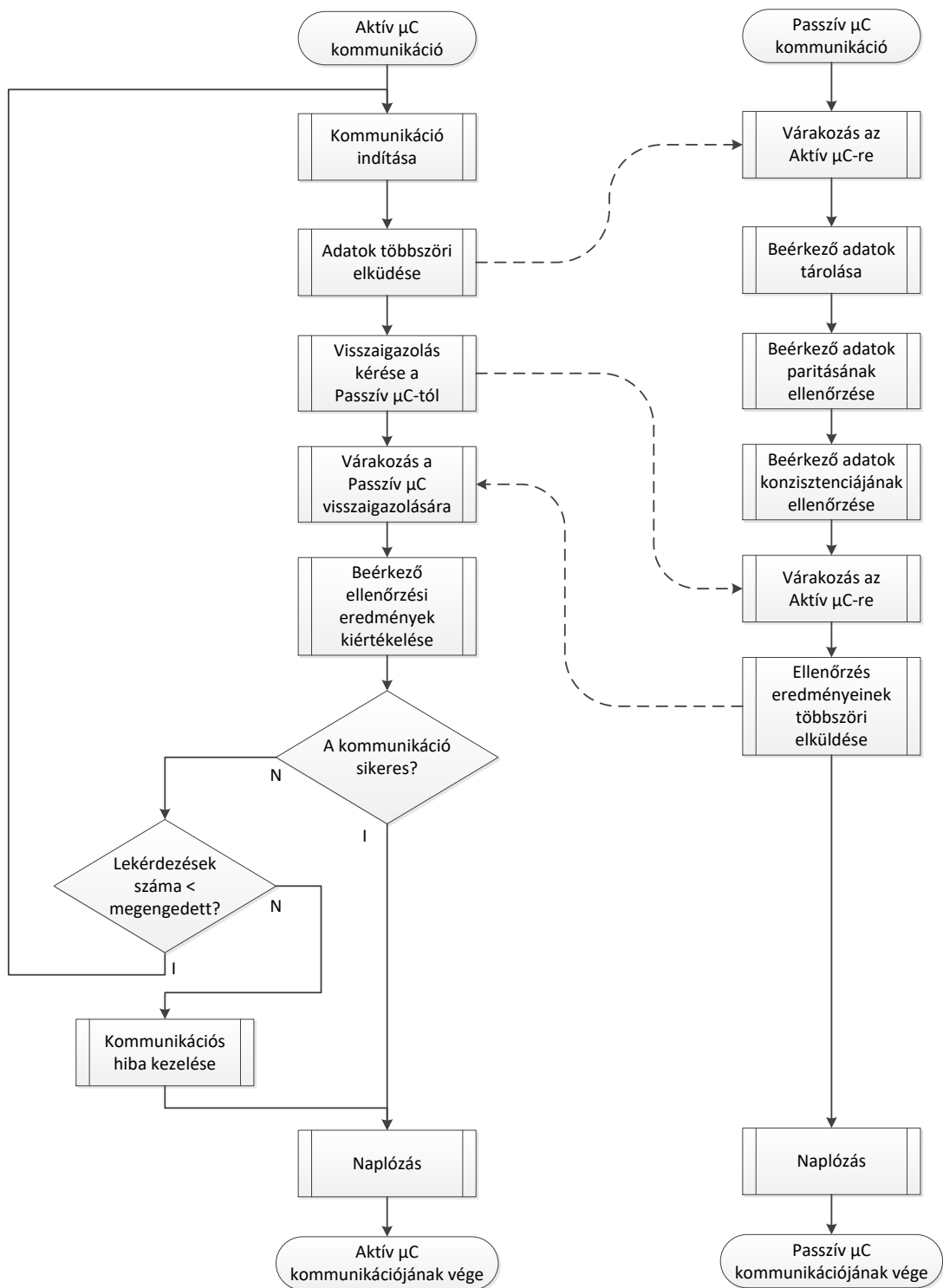
A mikrokontrollernek külső perifériák által nem használt kommunikációs csatornáján kialakítható egy, az előzőekben ismertetettnél megbízhatóbb, redundáns felépítésű mikrokontrollerek közötti kommunikáció. Két hardveres I²C perifériával rendelkező mikrokontroller esetében mindkét fizikai csatorna kiépítésre kerül, valamint mindkét csatornán időosztásos kommunikáció valósul meg. A kifejlesztett algoritmust a 70. ábra mutatja be.

A mikrokontrollerek közötti üzenetváltás során egy üzenet többször kerül elküldésre. A beérkező üzenetek megfelelő mértékű egyezősége esetén, az üzenet érvényesnek tekinthető. Annak valószínűsége minimális, hogy öt üzenetküldésből, háromszor azonos módon hibásodjon meg az üzenet. Hibás üzenet detektálásakor a fogadó fél nem küld visszaigazolást a küldőnek, így a küldő észleli a hibás adatátvitelt és újabb küldést kísérel meg. Többszöri kommunikációs hiba esetén a rendszer hibaüzenetet küld.

Az eljárás mind az aktív, mind a passzív mikrokontroller esetében alkalmazott, több kommunikációs csatorna esetében, minden csatornán megvalósított. Az eljárás vázelemei a 71. ábra követhető nyomon. A két soros csatornán ugyanaz az üzenetváltás valósul meg, egyezésük esetén az üzenet megbízhatónak tekinthető, különbözőség esetén a hiba detektálásra kerül és a már bemutatott elve alapján lehetséges a kezelése.



70. ábra: Mikrokontrollerek közötti megnövelt megbízhatóságú kommunikáció



71. ábra: Az Aktív és a Passzív mikrokontroller közötti kommunikáció

3.2 Redundáns felépítésű fotovoltaikus egység [BB-10], [BB-11]

A jelenlegi energetikai rendszernek nem feltétele a centralizált hálózat. A szakemberek nagy mennyiségű erőforrás felhasználásával, fejlesztik a megújuló energiaforrásokat. A fejlesztések

eredményeként már polgári célra is elérhetőek olyan napenergiát hasznosító megoldások, amelyek képesek épületek vagy berendezések villamos tápellátásának biztosítására. [18]

3.2.1 Szigetüzemű napelemes rendszerek

A szigetüzemű tápellátást biztosító rendszerek, a villamos hálózattól függetlenül látják el feladatukat, a kutatás alkalmazási területéből adódóan az önálló működésre is képes rendszereket vizsgálom. Az előállított villamos energia szempontjából léteznek egyenáramot, illetve váltakozó áramot előállító sziget üzemben működő, napenergiát hasznosító rendszerek. A napelemek, az akkumulátor töltő, a DC/DC konverter és az inverter jelentős mértékben meghatározza a rendszer teljesítményét, hatásfokát és egyéb üzemi paramétereit.

A rendszer a napelemek segítségével megtermelt energiát az akkumulátorokban tárolja. Az energiaforrásból érkező- vagy az akkumulátorban tárolt energiát a tápellátó rendszerre csatlakoztatott berendezés fogja felhasználni.

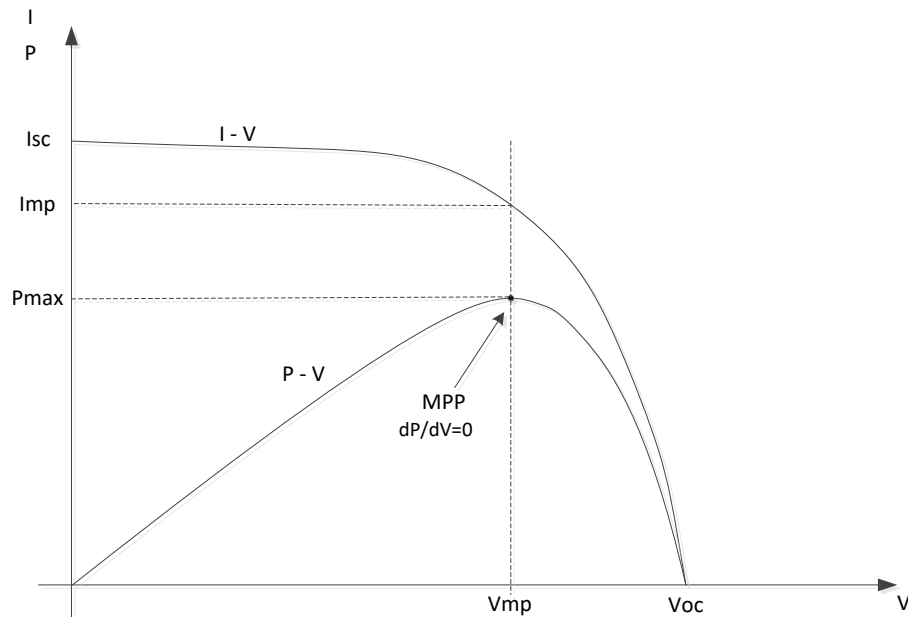
Az akkumulátor töltésére alkalmazott áramkör feladata illeszteni a napelem paneleket az akkumulátorhoz. Ez esetben szükséges figyelembe venni a napelem terhelésének optimalizálását, valamint az akkumulátor típusához illeszkedő töltési módokat. A különböző technológiákkal gyártott akkumulátorok különböző töltési diagramokkal rendelkeznek, ezeknek be nem tartása a rendszer elem élettartamának nagy mértékű csökkenését eredményezhetik.

A terhelés meghajtására hivatott áramkör feladata illeszteni az akkumulátor feszültségét a terhelés bemeneti feszültségigényéhez. Egyenáramú meghajtás esetében egy DC/DC konverter, váltakozó feszültségű kimenet esetében egy inverter alkalmazása szükséges. Szigetüzemű tápellátás és inverteres kimeneti fokozat esetében, a hálózati 50/60Hz-es frekvencia és az inverter kimeneti frekvenciájának szinkronizálása nem szükséges. [101]

3.2.2 Fotovoltaikus cellák és napelem panelek alkalmazása

A tápellátó rendszer számára a napelem panelek biztosítják az energiaellátást. A napelem panelek kimenete a megvilágítottságtól (napszaktól, évszaktól, felhőzettség-, illetve szennyezettség mértékétől) függően széles határok között változhat. A legnagyobb hatásfok eléréséhez, a napelem táblák teljesítmény illesztése szükséges (72. ábra). Az akkumulátor töltő elektronika feladata a napelem táblák munkapontjának beállítása, ehhez az MPPT³⁵ töltési algoritmust alkalmazza. Az akkumulátor töltő elektronikának képesnek kell lennie a beérkező széles határok között változó feszültség és áram értékek mérésére és kezelésére.

³⁵ MPPT - Max Power Point Tracking - maximális munkapont követés



72. ábra: Fotovoltaikus cellák karakterisztikája

3.2.3 Napelemek elhelyezése

A napelemek dőlését Magyarországon – a földrajzi elhelyezkedésből adódóan – megközelítőleg 45°-os szögben javasolt beállítani, a forgató mechanizmus középállásában déli irányban - ebben az esetben biztosítható az optimális éves energiatermelés. A javasolt dőlésszög csak egy iránymutatás a teljes évre vonatkozó beállításhoz, mivel a nyári és téli időszakban eltérő a Nap pályájának magassága. Nyári időszakban, délben közelíti a vízszintes helyzetet, téli időszakban viszont ez kedvezőtlen pozíció lenne. A nyári középállásban célszerű 36°-ra télen pedig 59°-ra beállítani a napelem panelek dőlésszögét. A dőlésszög másik fontos momentuma, hogy a táblákra rakódott hó csak akkor tud távozni, ha a lejtés megfelelő, ennek okán nem javasolt a 40°-nál kisebb szögben történő elhelyezés.

Jelen minta alkalmazásban ismertetett megoldás törekszik a költségek és a rendszer hatásfokának optimalizálására is, valamint a robusztus mechanikai kivitel megvalósítására, ezért csak a tengelyirányú forgató mechanikát alkalmazza.

A berendezés elhelyezését tekintve talajra helyezve az aljnövényzet és az esetleges fák koronája miatt nem lenne megfelelő a besugárzást, ezért javasolt kiemelni, valamint az esetleges kamerarendszernek is megfelelőbb, ha a magasságból figyelheti meg a terepet.

A hatásfok maximumára, a kiválasztott napelem gyártási technológiája is hatással van. A kristályos szilícium napelem egy a kereskedelmi forgalomban kapható költséghatékony napelem technológia, az egyik legmagasabb hatásfokkal rendelkezik (20-24%). [22]

3.2.4 Teljesítményigény meghatározása

A kutatást támogató modellben, a környezet monitorozó rendszer, a video felvevő rendszerrel, a vezeték nélküli kapcsolattal, és az éjszakai infravörös fényt kibocsátó LED-del, 24 órára átlagolva, átlagosan 20W teljesítményigénnyel rendelkeznek. Ez 24 óra leforgása alatt 480 Wh-nyi energiamennyiséget jelent. 12V-os akkumulátorokat és rendszerfeszültséget alkalmazva ez 40Ah kapacitást jelent. Az alkalmazott akkumulátor technológia, a környezeti hőmérséklet, és a várható gyengén napsütéses órák száma függvényében további korrekciók szükségesek.

Akkumulátorok esetében a belőlük kinyerhető töltésmennyiség megállapításakor, a maximális töltési és a minimális kisütési feszültség különbségének figyelembevételével is számolni kell. Javasolt az ipari alkalmazásra gyártott, kötött elektrolitú (zselés - gel), szeleppel ellátott, savas, zárt ólomakkumulátorok beépítése. A minőségi típusok a névleges feszültségük 20%-ára is károsodás nélkül kisüthetőek. A technológiát alkalmazva a feszültséglépcső 9,6V lehet, ami legalább 50Ah-s akkumulátor kapacitást jelent. [32]

30 év meteorológiai adatait figyelembe véve, magyarországi a nyári hónapokban nagyjából 3,7-szer több a napsütéses órák száma, mint a téli hónapokban. A téli -10°C-os környezeti hőmérséklet mellett az említett akkumulátor kapacitása nagyjából a 65%-ra esik vissza. Az említett üzemi körülmények a legridegebb alkalmazási környezetet feltételezik. A rendelkezésre állás biztosításának igénye függvényében, az akkumulátor kapacitásának megnövelésének mértéke meghatározható – ez mindenképpen a költségek növekedését vonja maga után.

3.2.5 Redundáns napelem panel fizikai kiépítésének lehetősége

A rendszer egyik kulcsfontosságú eleme maga a fotovoltikus komponens, a napelem. Ennek optimális elektronikus illesztéséről, mint releváns mérnöki problémáról már esett szó a 3.2.2 fejezetben. A feladat napelem működéséből adódó hibák kiküszöbölése, a hatásfok növelésének egyik módja a Nap pályájának követése. [42] Sok cikk tárgyalta a napelem optimális helyzetét, két tengelyen követve a Nap pályáját. [82]

A kísérleti modell az irodalom alapján épül fel. A gyakorlatból vett probléma a napelemek szennyezése és károsodása, ezáltal a termelt energia csökkentése. A felhasználói tapasztalatok alapján ezek a szennyeződések lehetnek; szennyezett eső (por tartalommal), homokvihár (szél

által szállított por), ipari szennyezés, mezőgazdasági tevékenységből származó szennyeződés, biológiai szennyezés rovarok, madarak, állatok, ..., stb.

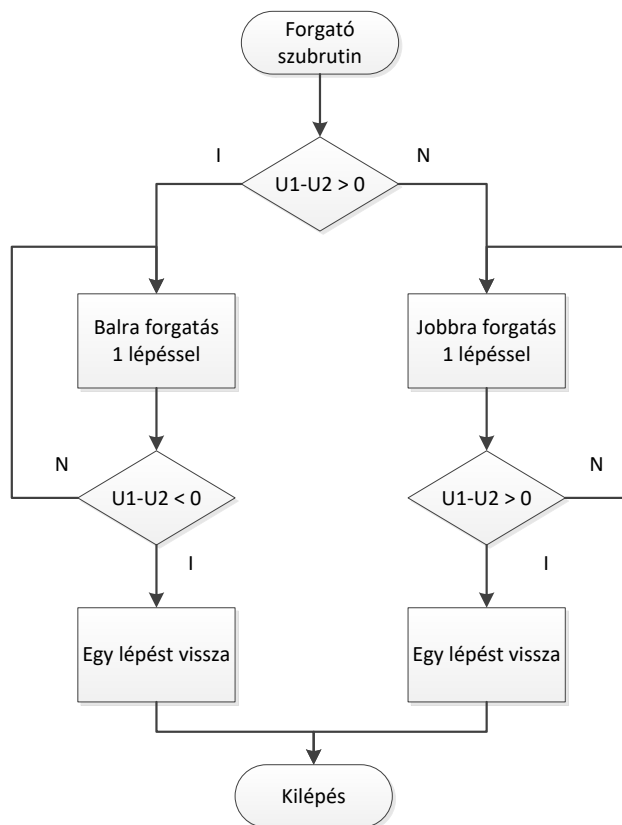
A sérülés visszafordíthatatlan állapot, amelyet bármilyen mechanikai behatás kiválthat, például jégeső, emberi beavatkozás. A szennyeződést ütemezett vagy szükséges karbantartási művelettel lehet eltávolítani. A mechanikai sérüléseket csak cserével lehet orvosolni.

A felhasználó számára fontos értesülni a teljesítményromlásról, és a megbízható működés érdekében fontos valamilyen redundáns rendszer kifejlesztése.

A 76. ábra látható elrendezés egy duplikált egytengelyű napelemet ábrázol. A vezérelt tengely kettős funkcióval rendelkezik; a napelem az aktív és a korábban inaktív napelemet jelentős 180 fokos forgással helyettesíti, ha a teljesítmény jelentősen csökken. A tartalék napelem valószínűleg nagyobb hatékonysággal fog működni, mint amit szennyezettnek vagy sérültnek nyilvánított a rendszer. Az inaktívvá vált napelemet a karbantartás során tisztítják vagy kicserélik.

Egy tengely, mikrokontroller segítségével történő vezérlésével [49], lehetőségünk van meghatározni annak optimális helyzetét a Nap aktuális helyzetéhez viszonyítva, folyamatosan alkalmazkodva a változáshoz. [74] A Nap helyzetének érzékelése történhet többek között elektro-optikai érzékelők segítségével [17], vagy a napelemből kinyerhető maximális teljesítmény megállapításával [73]. Az említett érzékelési megoldások alkalmazása nagy beállítási pontosságot tesz lehetővé jó időjárási körülmények között. Az érzékelők kimeneti jeleinek feldolgozása történhet analóg komponensek (tranzisztorok, műveleti erősítők) [95] vagy analóg-digitál átalakító segítségével [100]. A 73. ábra szerinti algoritmus vázolja az optoelektronikai elemek kimeneti jeleit feldolgozó szoftveres megvalósítást. Egy hibrid alkalmazás tovább növeli a megbízhatóságot.

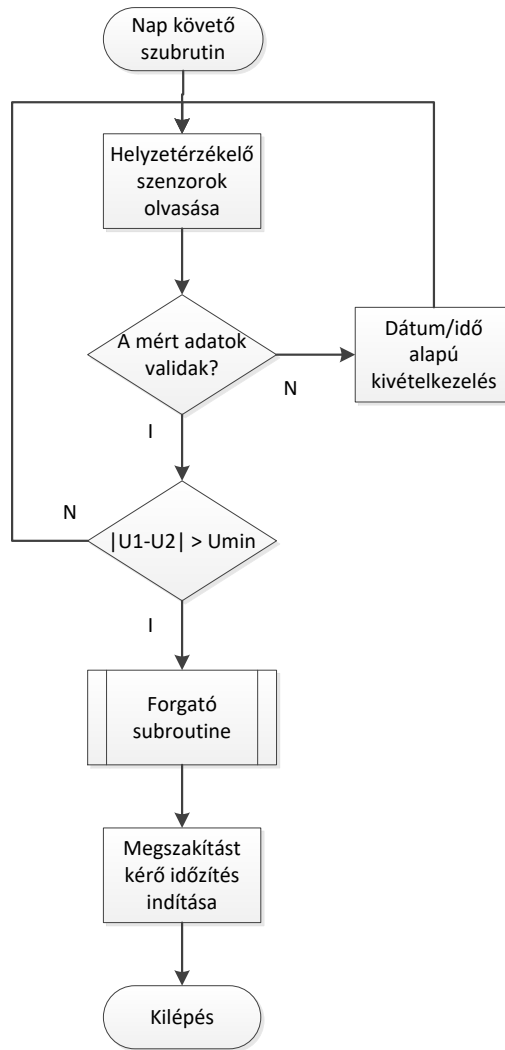
U_1 és U_2 a két digitalizált érzékelőkimenet, a kisebb érték irányába fog a napelem panel fordulni. A túlzott elfordulás érzékelése után a napelem panel egy egységet visszalép, és ezzel a pontossággal megelégedve a rendszer kilép a forgató algoritmusból.



73. ábra: Napelem panel forgató algoritmus

Felhős időjárás körülmények között a szórt fény forrásának költséghatékony megállapítása a koordináta és dátum/idő adatok alapján lehetséges. [59] Az alkalmazott mikrokontroller (vagy az azt kiegészítő memória) képes tárolni a kronológiai adatokat, a felbontás növelése a tárolt adatokat felhasználó interpoláció segítségével lehetséges. Három bemeneti szögérték segítségével már szoftveres többségi -, középérték szavazó vagy egyéb átlagoló algoritmus (2.6.1 fejezet) is megvalósítható (74. ábra).

Az elsődleges napelem panel, a tartalék napelem panel és a nap mozgását detektáló érzékelők kimeneteinek súlyozott, valamint normalizált értékei felhasználhatóak a beérkező fény mennyiség megállapítására. A beérkező fény mennyiség ismeretében kalkulálható az elsődleges napelem elvárt kimeneti teljesítménye (adott terhelés mellett), amennyiben ettől eltérő eredményt mér a rendszer a napelem panel hatásfokromlását detektálhatja.



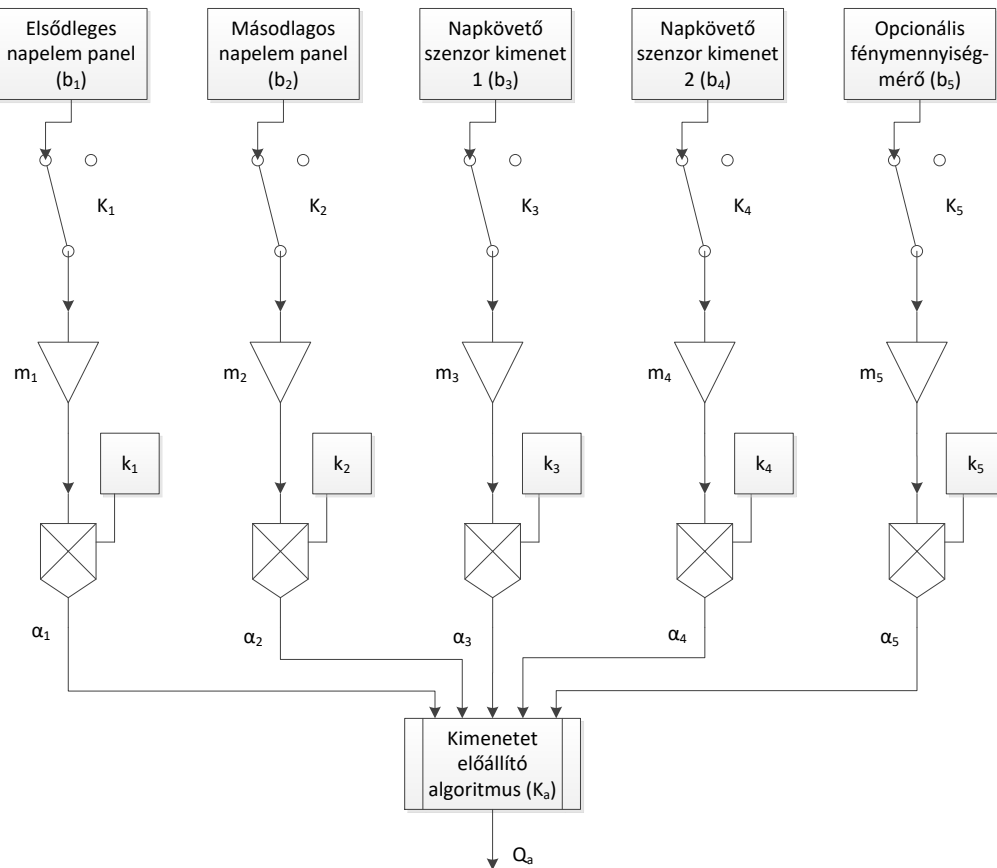
74. ábra: Nap követő algoritmus

Opcionálisan – mint redundáns érzékelő – a besugárzást érzékelő félvezető is elhelyezhető a napelem mellett, amely katasztrofális meghibásodás esetén nagy segítség lehet a rendszerállapot meghatározásában, a beérkező fény mennyiség mérésében, illetve a napelem panelek jóságának megállapításában. Szintén alkalmazhatóak a szoftveres többségi -, középérték szavazó vagy egyéb átlagoló algoritmusok (75. ábra).

A K_n kapcsolókat a vezérlő rendszer inaktíválja amennyiben a bemenő jelet egy másik szoftverkomponens megbízhatatlannak jelöli meg. Az m_n erősítők a bemenő jelek súlyozását látják el, a k_n konstansok a szorzó áramkörök segítségével a bemenő jeleket normálják. A α_n kimeneti jelet (28) szerint állnak elő.

$$Q_a = K_a [\alpha_n (\overline{k_n K_n m_n b_n})] \quad (28)$$

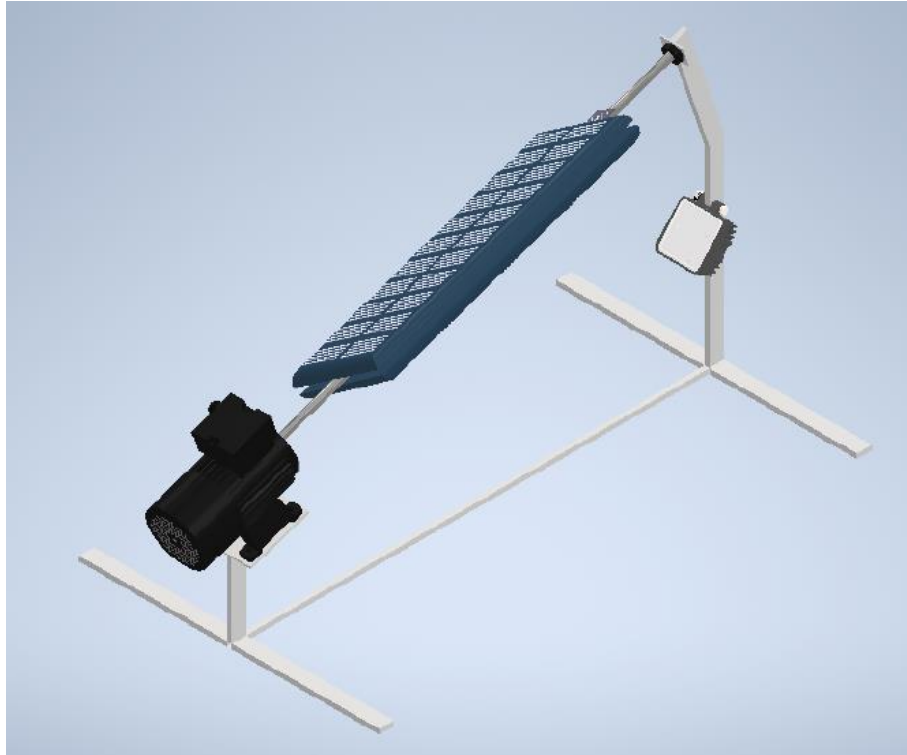
A fizikai forgást megvalósító működtető egység egy léptetőmotor, amely a napelemeket magában foglaló mechanizmust egy áttételen keresztül, – opcionálisan egy szöghajtással – illetve egy tengelykapcsoló segítségével forgatja.



75. ábra: Szoftveres fénymennyiség mérő algoritmus működési vázlat

Különösen fontos egy napelem-pótlási stratégia kidolgozása. Az aktív elem önmagával való összehasonlítása nem eredményezhet megoldást. Opcióként felmerül, ha több hasonló napelem van a rendszerben, azok összehasonlíthatóak egymással. Ha csak egy duplikált napelem van a javasolt elrendezésben, akkor annak állapotáról a tartalék napelemmel történő összevetése adhat információt.

Az egytengelyes forgási mechanizmussal rendelkező duplikált napelem további robusztusságot ad a rendszernek. A 76. ábra szerinti konstrukcióban a még nem használt (azaz hibátlan) tartalék napelem, a szórt fény vagy mesterséges megvilágítás segítségével nyújt használható mérési adatokat. Az optimalizált eljárás segítségével implementálható kiértékelés egy empirikus úton megállapított look-up-table interpolációjával elvégezhető.



76. ábra: Egytengelyes forgási mechanizmussal rendelkező redundáns napelem panel izometrikus ábrája

3.3 Nagy megbízhatóságú adatnaplózás a beágyazott rendszerek területén [BB-1]

A beágyazott rendszerek célszerű feladata az általuk kezelt események és mért adatok naplózása. Egyes nagy megbízhatóságú alkalmazásokban redundáns adattárolásra és archiválásra van szükség. A telepített berendezés működését nagyáramú ipari eszközök, közeli villámcsapás, tranziens elektromágneses zavart, EMP³⁶ zavarás ..., stb. befolyásolhatja. Károsíthatja a beágyazott rendszer által mért adatokat. Ebben a fejezetben bemutatok egy megoldást az adatok biztonságának megőrzésére, és azon adatok megjelölésére, amelyek hibákat tartalmazhatnak.

A beágyazott rendszer általában olyan számítógépes rendszer, amely egy bonyolultabb elektromos vagy mechanikus rendszer részeként végez előre meghatározott feladatokat. A kis számítási igényű funkciók esetében a rendszernek nem számottevő költségű eleme. Magasabb

³⁶ EMP - Electromagnetic Pulse - elektromágneses impulzus

szintű alkalmazásokhoz nagyobb teljesítményű mikrokontrollerre, digitális jelfeldolgozóra (DSP³⁷), FPGA-ra, FPAA³⁸-ra vagy mainstream processzorra van szükség.

A telekommunikációs bázisállomások, repülőgép és repülésirányító rendszerek, az erőművi folyamatirányító rendszerek, olaj- és gázkutatás, kötőtpályás közlekedési jelzőrendszerek, bányászati járművek és felszerelések, életfunkció figyelő eszközök, defibrillátorok, vállalatirányítási rendszerek, ..., stb. olyan misszió kritikus területek, ahol a magas megbízhatóság alapfeltétel. Ezen belül az adattárolást igénylő területek részfeladatai magukba foglalják a környezeti adatok tárolását, események naplózását, audio- és videókommunikáció archiválását, ..., stb.

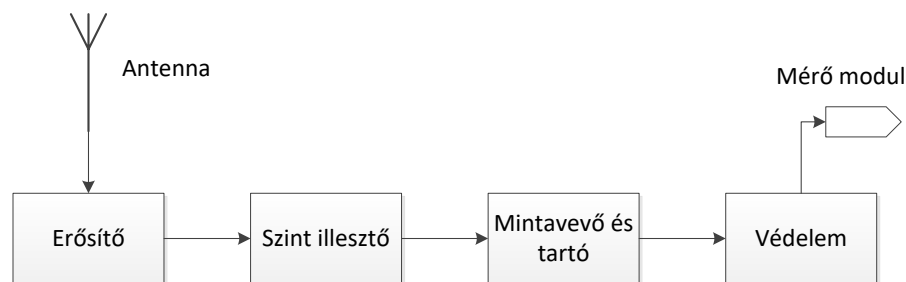
3.3.1 Beágyazott rendszerek adattárolói

A beágyazott rendszer által végrehajtott konkrét alkalmazástól függetlenül a rendszer alapos elemzése meghatározza a tárolási megoldások követelményeit. A flash tárolóeszközök a leggyakoribbak a mikrokontrolleres alkalmazásokban, például az USB DOM (Disk-On-Module), microSD Card, SD Card.

A háttértárolók több fizikai és kommunikációs interfészsel valamint változatos gyártástechnológiával illetve, széles skálájú tápfeszültség igényvel rendelkeznek. Az alábbiakban ismertetett architektúra alkalmazható a fent említett megoldásokhoz.

3.3.2 Elektromágneses zavar detektálása

Az elektromos berendezések megzavarására alkalmas elektromágneses sugárzás detektálására, az elektromos és mágneses térerő érzékelésére alkalmas E-field és H-field szondák is alkalmasak. Rendszerbe történő integrálásukkor az érzékelő szonda és a mikrokontroller bemenete közötti illesztés megoldása szükséges, ennek blokkvázlatát mutatja a 77. ábra.



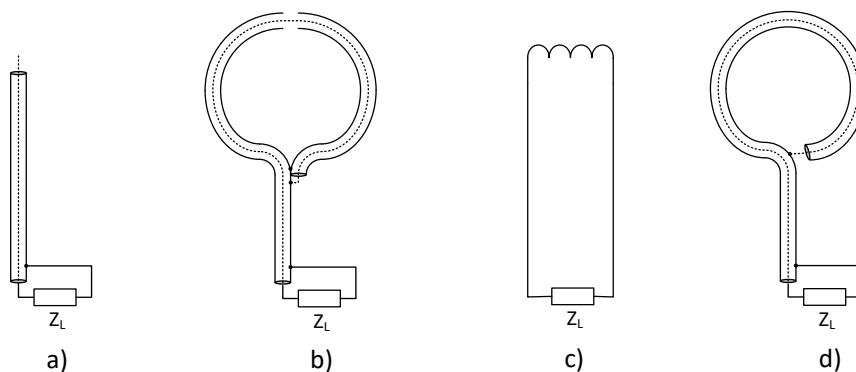
77. ábra: Érzékelő modul felépítésének blokkvázlata

³⁷ DSP - Digital Signal Processor – digitális jelfeldolgozó processzor

³⁸ FPAA - Field-Programmable Analog Array - felhasználás helyén programozható analóg mátrix

A célzott elektromos térerőt detektáló antenna kialakításának egy lehetséges módját szemlélteti a 78. ábra, elsődlegesen az elektromos mező változására reagál és alapvetően érzéketlenek a vizsgált tér orientációjára. További érzékelési lehetőség a H-field szonda (alapvetően egy földelt hurok), amelyek elsődlegesen az áramváltozások által létrehozott mágneses mezőre reagál (78. ábra). Egy árnyékolatlan hurok képes érzékelni mind az elektromos, mind a mágneses tereket (78. ábra). [45]

A H-field szondák érzékenyek a vizsgált tér orientációjára, csak a hurokkal azonos síkban lévő áramutakra reagálnak, ez azt jelenti, hogy az áramváltozásokat csak két irányból képes felismerni. A mágneses mező bejövő irányának meghatározásához - és naplózásához - legalább három H-mező szondát szükséges alkalmazni. A tápvezetékek monitorozása szintén fontos, a 78. ábra látható kiépítés is sikerrel alkalmazható. A tápvezetékek rádiófrekvenciás zavarainak elnyomására alkalmazható ferritgyűrű is felhasználható a mérendő vezetékek és a szonda csatolásának erősítésére. [37] A telepítést könnyíti a felcsíptethető, osztott műanyag ház, ferromágneses RF árnyékolóbilincs alkalmazása.



78. ábra: Érzékelő elemek: a) Elektromos tér érzékelő szonda; b) Középen megszakított mágneses tér érzékelő szonda; c) Árnyékolatlan elektromágneses tér érzékelő szonda; d) A nyaknál megszakított mágneses tér érzékelő szonda

Az EMIRR³⁹-t decibelben (dB) mérik, hasonlóan a PSRR⁴⁰ és a CMRR⁴¹ paraméterekhez. Az EMIRR egy logaritmusos arány, ahol a magasabb decibel értékek megfelelnek a jobb elnyomási tényezőnek és a magasabb immunitásnak. Az EMIRR-t a következőképpen számítják ki:

$$EMIRR [dB] = 20 \cdot \lg \left(\frac{V_{RF-p}}{\Delta V_{OS}} \right) + 20 \cdot \lg \left(\frac{V_{RF-p}}{100mV_p} \right) \quad (29)$$

³⁹ EMIRR - Electromagnetic Interference Rejection Ratio - elektromágneses interferencia elnyomási tényező

⁴⁰ PSRR - Power Supply Rejection Ratio - tápaj elnyomási tényező

⁴¹ CMRR - Common Mode Rejection Ratio – közös módusú zajelnyomási tényező

ahol a V_{RF_p} az RF feszültség csúcserőértéke, ΔV_{OS} az egyenáramú feszültségeltolódás, amely az alkalmazott rádiófrekvenciás jel hatására következik be. Az egyenlet második tagja az EMIRR-t $100mV_p$ bemeneti jel esetén képviseli. [26] A V_{RF_p} és a ΔV_{OS} közötti összefüggés az alábbi egyenletben látható, miután a fenti egyenlet megoldódott ΔV_{OS} -re:

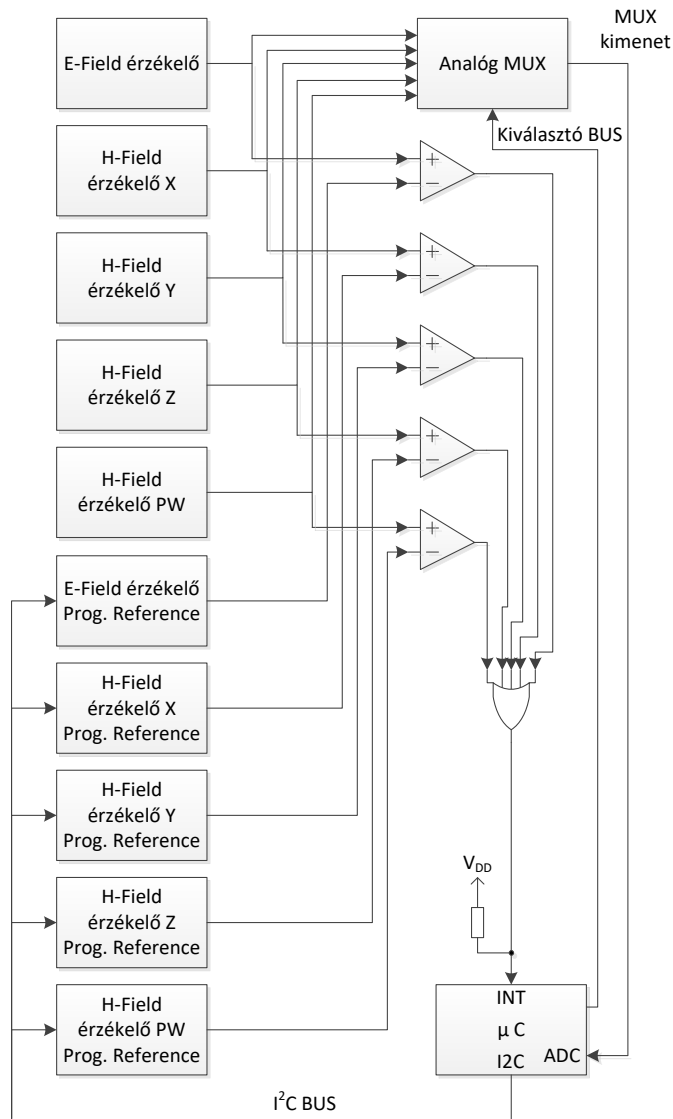
$$\Delta V_{OS} = \left(\frac{V_{RF_p}}{100mV_p} \right) \cdot 10^{-\left(\frac{EMIRR [dB]}{20} \right)} \quad (30)$$

3.3.3 Független felügyeleti szerv megvalósítása

A zavarást érzékelő rendszer számára célszerű megadni a nem maszkolható megszakításkérés lehetőségét a mikrovezérlő irányába, ha valamelyik szonda az engedélyezettnél nagyobb elektromágneses interferenciát észlel. Ezt a funkciót a precíziós, nagy kimeneti impedanciájú csúcsetektor áramkör és a referencia-komparátor valósítja meg. Amennyiben a referenciaszint skálázható - a referenciafeszültségét a mikrovezérlő programozhatja -, akkor az elektromágneses interferencia detektor testreszabható, valamint a rendszer adaptív funkciókat is igénybe vehet. (79. ábra)

Megszakításkérés érvényre jutása után, a mikrovezérlő az analóg multiplexeren keresztül meg tudja mérni a mintavevő és tartó áramkörök kimeneti feszültségeit. A mintavevő és tartó áramkörök egyik fontos paramétere, hogy meddig tartják az utolsó csúcserőértéket. A megszakításkérés érvényre jutásának, az analóg-digitális átalakításnak, a kiértékelésnek és a naplózás műveleti idejéhez szükséges hangolni a rendszert. A mérés kiértékelése után a mikrovezérlő dönt, hogy archiválja-e a rendszer adatait a galvanikusan elkülönített és árnyékolt biztonsági adattárolóba. Az eredmények és a beállítások alapján, hiteles vagy megkérdőjelezhető adatként jelöli meg.

A mikrokontroller a multiplexert címezheti párhuzamos vezetékekkel vagy soros buszon keresztül. A párhuzamos címzés gyorsabb, de a mikrokontroller relatív nagy mennyiségű lábát felhasználja. Soros buszon keresztüli kommunikációra képes multiplexer vagy soros buszon vezérelhető portbővítő IC alkalmazása esetében a felhasznált mikrokontroller lábak csökkennek, de a mintavevő és tartó áramkörök analóg-digitális átalakító általi elérési ideje növekszik.



79. ábra: Az érzékelő rendszer blokkdiagramja

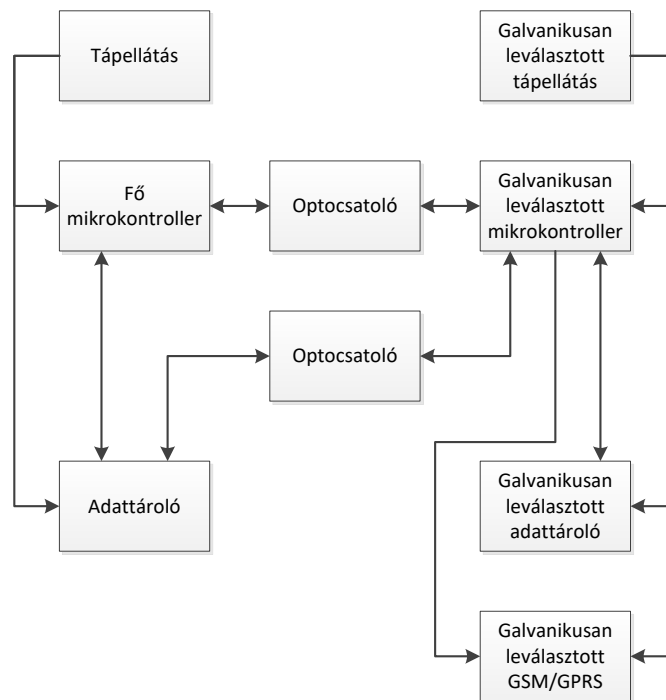
3.3.4 Galvanikusan leválasztott adattárolás

Biztonságkritikus rendszerek esetén biztosítani kell a valid rendszeradatok archiválását egy izolált adattárolóra. Ehhez a redundáns modulhoz meg kell valósítani a galvanikusan leválasztott tápfeszültség ellátást is.

A beágyazott rendszer helyi adattárolója szintén veszteséget szenvedhet a külső elektromágneses interferencia miatt. A biztonsági adattárolót is védeni kell ezektől a hatásoktól, árnyékolással kell ellátni.

Vezetett zavarok ellen a biztonsági másolat tárolójának adatátviteli vonalait is galvanikusan el kell különíteni. Ha az elsődleges beágyazott rendszer és a biztonsági adattároló között nincs fémes vezetékkapcsolat, akkor a tápellátást biztosítani kell a biztonsági mentéshez használható

mikrokontroller számára, lokális – szintén az árnyékolt térben elhelyezett – akkumulátorral és tápegységgel. A rendszer felépítését a 80. ábra mutatja.



80. ábra: Kiterjesztett érzékelésű, galvanikusan leválasztott rendszerarchitektúra

Az adatbuszok galvanikus leválasztása optikai csatolással megvalósítható. A gyakorlatban infravörös hullámhossztartományba eső vezeték nélküli kommunikációval, optocsatolókkal vagy optikai szálakkal valósítható meg. Az infravörös technológia költséghatékony és immunisabb az interferenciával szemben, mint a Bluetooth, LoRa, Wi-Fi, ..., stb. technológiák. Az IR⁴² fény az elektromágneses skála rövidebb hullámhosszú tartományában helyezkedik el, elegendő sávzélességet tud biztosítani bármilyen kommunikációs protokollhoz - amelyet az adattárak kezelésére használna a beágyazott rendszer.

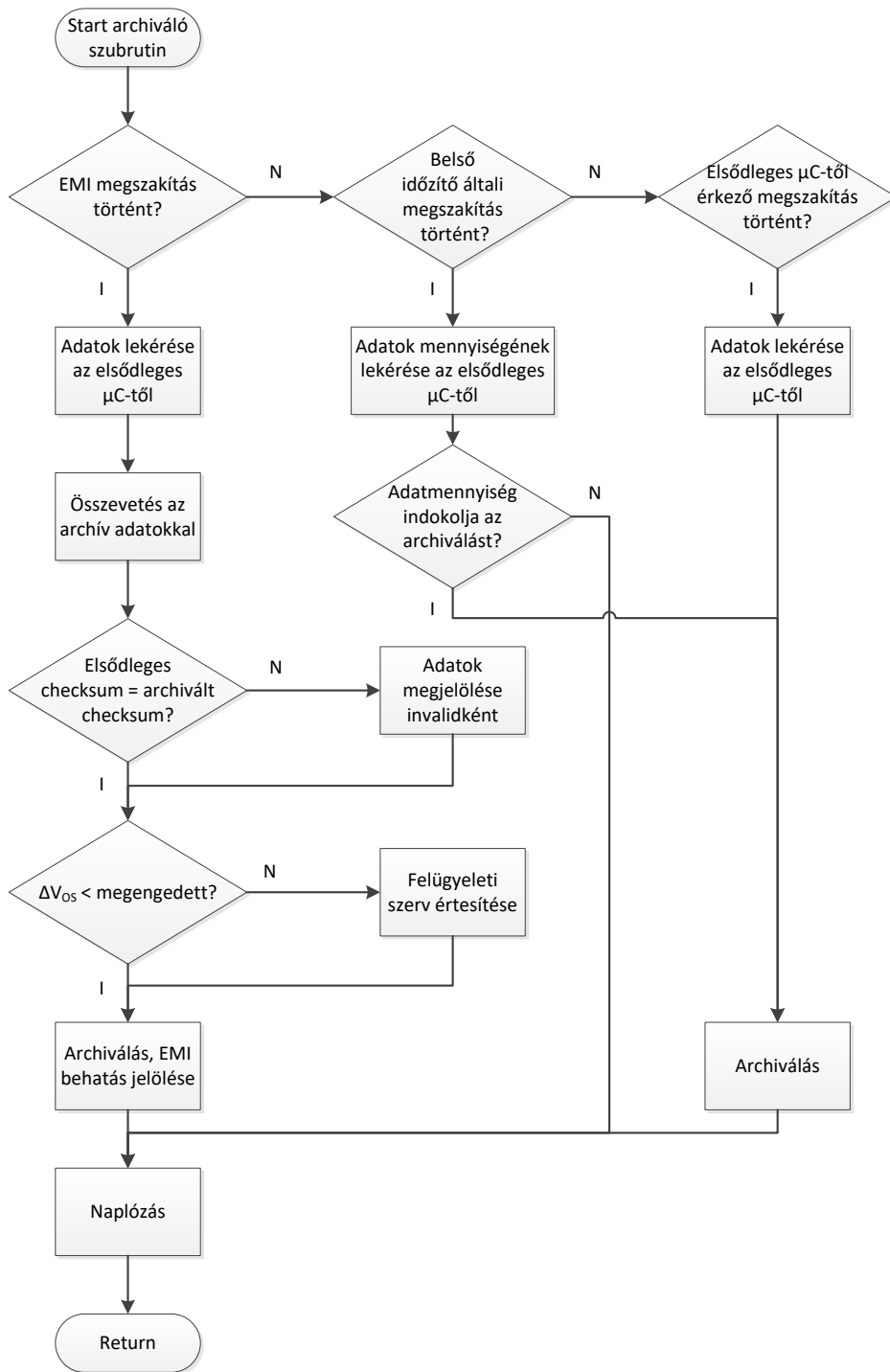
Az alkalmazás IR LED-eket, fotodiódákat, fototranzisztorokat használ az IR-adatok küldésére és fogadására. Esetleges vezeték nélküli csatorna használata esetében, a kommunikációs közegbe hatoló zavaró külső fény ellen árnyékolással védekezni kell. Az említett alkatrészek költséghatékonyan használhatóak akár több párhuzamos csatorna kiépítése esetében is. Nagy sávzélességet igénylő alkalmazások esetében optikai, kapacitív vagy mágneses elven működő busz izolátorok állnak rendelkezésre. Hátrányuk, hogy beszerzési költségük jóval magasabbak a fent említett megoldásoknál.

⁴² IR - Infra Red - infravörös

A bemutatott rendszer beépíthető egy önállóan működőképes konstrukció mellé is, a környezeti zajártalmak észlelése vagy szándékos zavarás érzékelése céljából. Igény szerint az önálló konstrukció belső vezérlőjelei is monitorozhatóak, archiválhatóak. Az adatarchiváló és az EMI érzékelő mikrovezérlő – mint egy rendszer fölé ágyazott diagnosztikai feladatokat is ellátó beágyazott rendszer – közvetlenül értesítést vagy riasztást küldhet egy központi felügyeleti szervnek, ha nem megfelelő működést tapasztal vagy egyéb rendellenes körülményeket érzékel.

Az adatmentés felügyelő beágyazott rendszer alacsony fogyasztású komponensekből épül fel, a mikrokontroller is a lehető legtöbb időt tölti alvó üzemmódban, hogy az üzemidő minél tovább kitolható legyen. Az ébresztése (az EMI érzékelők vagy az elsődleges mikrokontroller általi) külső, hardveres vagy (időzítő lejártakor vagy belső periféria műveletvégzésének befejezésekor előálló) belső, szoftveres megszakításkérés esetén következik be. A műveletvégzés, kommunikáció vagy naplózás műveletei után, a mikrokontroller visszatér alvó üzemmódba. Az archiválást felügyelő elválasztott mikrokontroller folyamatábrája követhető a 81. ábra.

Az ismertetett optimalizált architektúrával megállapítható, a tartalék adattárolóval rendelkező beágyazott rendszer által mért és tárolt adatok megbízhatósága, valamint jelölhető az elektromágneses interferencia általi esetleges befolyásoltság.



81. ábra: Az archiválást végző szubrutin folyamatábrája

3.4 Alacsony redundanciájú kompenzáció [BB-4]

Az optocsatoló egy optoelektronikus eszköz, amely egy fénykibocsátó és fénydetektor páron alapul. A kibocsátott fényben bekövetkező csillapítás hatással van az alkatrész kimeneti jelére is.

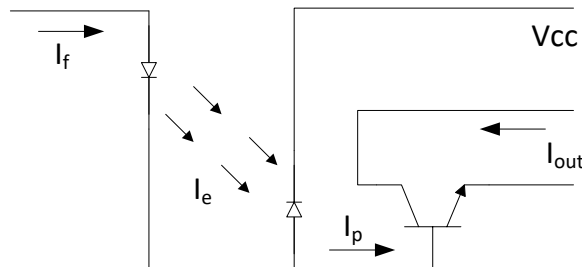
Ez az erősítésváltozás CTR^{43} degradáció néven is ismert, bár néhány esetben a kibocsátott fénytjeljesítmény idővel növekedhet. Ez a jelenség a P-N átmenet elektrolumineszcenciájának velejárója, és mértéke előre meg nem jósolható. A túlzott mértékű degradáció az optimális működéstől való eltérést vagy katasztrofális rendszerhibát okozhat. Ez az alfejezet a robusztus, mikrokontroller alapú kompenzáló megoldást mutat be a vázolt problémára.

Az optoelektronikus komponenseket által kibocsátott elektromágneses hullám spektrum látható fény vagy infravörös régióba esik. Az optoelektronikai eszközök elektromos-optikai vagy optikai-elektromos átalakítók, ha mindkét funkció jelen van az eszközben, akkor fotoelektromos átalakítókról beszélünk. [21]

3.4.1 Fény kibocsátó diódák degradációja

Az optocsatoló két galvanikusan elválasztott áramkör között tipikusan IR-fény segítségével továbbítja az elektromos jeleket. Az alfejezetben a hangsúly a LED-ek és az optocsatolók adaptív degradációs kompenzációján van.

Az optocsatolók általános típusa egy fényforrásból (LED), egy dielektromos akadályból és egy érzékelőből (fototranzisztor) áll egy tokozáson belül (82. ábra). Az optocsatolók mind digitális, mind analóg feszültségek továbbítására alkalmasak.



82. ábra: Az optocsatoló sematikus váza

A vörös LED-ek egyik leggyakrabban alkalmazott alapanyaga a GaAsP és a GaP. A fénykibocsátás közvetlen lyuk- és elektronrekombinációval érhető el. Egy általános félvezető hordozóra történő félvezető vegyületek (pl. InGaAsP) kiváló minőségű rétegnövesztéséhez, – a leggyakoribb módszer a folyékony fázisú epitaxia (LPE⁴⁴) – biztosítani kell a kristályrácsok illeszkedését. A sikeres technológiai folyamat megakadályozza a diszlokációk és egyéb hibák kialakulását, amelyek befolyásolhatják az emisszió hatékonyságát és megbízhatóságát. A sugárzott

⁴³ CTR - Current Transfer Ration - áramátviteli tényező

⁴⁴ LPE - liquid phase epitaxy - folyékony fázisú epitaxia

elektromágneses hullámok a P-N átmeneten keresztül hagyják el a felületet. A LED paramétereit a félvezető geometriai kialakítása is befolyásolja. [19]

A LED P-N átmenete határozott nyitóirányú előfeszítést kap. A kibocsátott fotonok mennyisége lineárisan korrelál a nyitóirányú árammal. A degradáció fő okai az irreverzibilis kristályrács elmozdulások és hibák. Ezeknél a hibáknál kialakulnak nem emittáló rekombinációs csomópontok, amelyek csökkentik a LED kvantumhatékonyságát. A fent említett csomópontok az elnyelt energiát felhasználják méretük növeléséhez és új, nem emittáló rekombinációs csomópontok létrehozásához. Az energiaelnyelés nem kívánt hőmérsékletnövekedéssel jár, ami így az idő előrehaladtával egy öngerjesztő folyamattá válik.

Az optocsatoló burkolatának - a LED és a fényérzékelő eszköz, valamint a köztük lévő térész burkolatának - átlátszónak kell lennie. Ha az átlátszó anyagnak és az IC-t tokozó anyagnak nem azonos a hőgyűtthatója, akkor ez számos problémát válthat ki, például a félvezető és az átlátszó epoxi elválását, valamint az átlátszó epoxi repedését. [10]

Kísérleti eredmények alapján [112] a technológiai folyamatok, a szennyeződések koncentrációja és a félvezető adalékolásának finom különbségei jelentős eltéréseket okoznak a különböző sorozatokban gyártott LED-ek között. A LED-ek öregedési mechanizmusa még nem teljesen ismert, ezért nehéz megjósolni a meghibásodásokat anélkül, hogy a tényleges tételnél erőforrás-igényes vizsgálatokat végeznénk.

LED-ek öregbítési teszteredményeinek jelentős varianciát mutatnak. A tesztek alapján a korai életciklusban bekövetkező hatásokat nehéz értelmezni, ez az eltérő gyártási sorozatban készült eszközparaméterek különbözőségére vezethető vissza. A megbízhatóság kérdésköréből vizsgálódva, az élettartam végének megállapítása az egyik legfontosabb feladat.

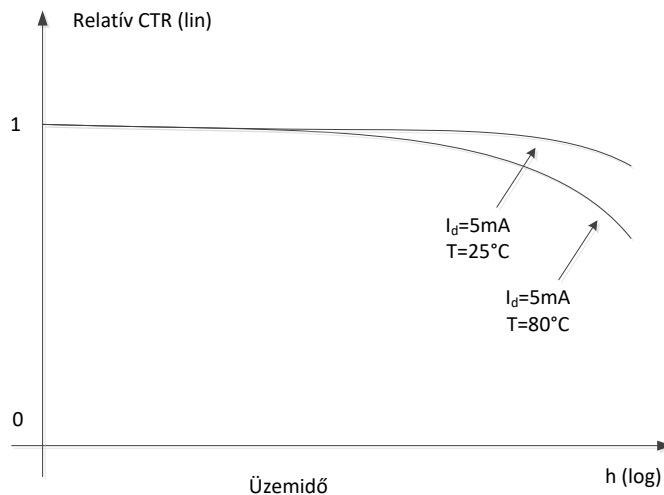
A LED-ek meghibásodása fokozatos folyamat, és attól is függ, milyen peremfeltételt állítottak az eszköz meghibásodásának meghatározása céljából. A LED-ek élettartamának végét gyakran abban a pontban határozzák meg, amikor az emittált teljesítmény 70% -ra csökken. Más, megengedőbb meghatározások szerint az eredeti érték 50% -ára vagy $1/e$ -re csökkenés jelzi az élettartam végét. Az elektronikai eszközök élettartamának meghatározásához egy másik paramétere arra utal, hogy mennyi idő alatt következik be a vizsgált populáció bizonyos százalékának meghibásodása. A távközlési rendszerekben ez 2%, és ezen a területen a szakaszos üzemű működés tesztelése reális módszer [20].

3.4.2 Optocsatolók megbízhatósága

Az optocsatolók LED-eket is tartalmaznak, ezért az optocsatolók esetében is jelentkezik az átvitt teljesítmény változása. A jelenség a digitális jelek átvitele során nem okoz problémát, de az analóg jelek továbbításakor kihívásokat jelenthet. Ha az optocsatoló erősítése az idő múlásával változik, akkor ezt a CTR paraméter degradációjának nevezzük (83. ábra). Az áramátviteli tényező változását az alábbi kifejezés szemlélteti (31).

$$\Delta \text{CTR} = \text{CTR}_i - \text{CTR}_f \quad (31)$$

ahol a CTR_i a kezdeti áramátviteli tényező, és a CTR_f a végső áramátviteli tényező. Hosszú élettartamú és nagy megbízhatóságú rendszerben – az alkalmazás körülményeitől függően – ezt a degradációt kompenzálni kell.



83. ábra: CTR degradáció becsült görbéje az üzemidő és az üzemi hőmérséklet függvényében

A CTR degradációjának fő oka az optocsatolóba beépített LED kvantumhatásfokának csökkenése. A kvantumhatásfokot a LED nyitóirányú előfeszítésekor folyó elektronok és az emittált fotonok mennyiségének arány határozza meg. A nyitóirányú áram a diffúziós áramra – a radiatív komponens – és a tértöltések rekombinációját képviselő áramra – nem radiatív komponens – bontható fel (32).

$$I_f(U_f) = A e^{\frac{qU_f}{kT_k}} + B e^{\frac{qU_f}{2kT_k}} \quad (32)$$

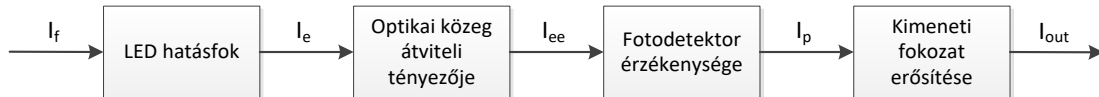
ahol I_f a LED-en nyitóirányban folyó áram értéke; U_f a LED-en nyitóirányban eső feszültség értéke; A és B a LED munkapontjától függő konstansok; q az elektron töltése; k Boltzmann állandó és T_k a hőmérséklet Kelvin fokban.

Idővel, állandó nyitóirányú áram mellett a radiatív diffúziós áram csökken - az A paraméter értékének csökkenése miatt, és a nem radiatív tértöltések rekombinációjára fordított áram növekszik - a B paraméter értékének növekedésével. Az emittált fény csökkenésével arányosan növekszik, a tértöltések rekombinációs árama, és a P-N átmenet áramsűrűsége is növekszik, ezzel a P-N átmenet hőmérséklete is növekszik. A magasabb réteghőmérséklet felgyorsítja az alkatrész öregedését. [41]

A 84. ábra látható rendszermodell, egy lineáris tartományban üzemeltetett optocsatoló alapvető paramétereit szemlélteti. A bemeneti áram és a kimeneti áram kapcsolata (33) írja le.

$$CTR = \frac{I_{out}}{I_f} 100[\%] = KR_p \eta(I_f, t) \beta(I_p, t) \quad (33)$$

ahol I_{out} a kimeneti áram; K az optikai út átviteli tényezője; R_p szintén állandó, amely a fotodetektor ellenállását képviseli és a bejövő fotonokra eső generált elektronok számaként határozzuk meg; η a LED kvantumhatásfoka, ami függ a nyitóirányú áramtól és az üzemiidőtől; β a kimeneti fokozat erősítése, amely a fotóáram és az üzemiidő függvénye; I_p a fotodetektorok árama, ami szintén függ a detektorra érkező fotonok számától.



84. ábra: Az optocsatoló modellje

Állandó bemeneti nyitóirányú áramnál – amikor K és R_p is állandó –, (33) normált formája (34) szerint.

$$\frac{\Delta CTR}{CTR} = \frac{\Delta \eta}{\eta} + \frac{\Delta \eta}{\eta} \frac{\delta \ln \beta}{\delta \ln I_p} + \frac{\Delta \beta}{\beta} \quad (34)$$

Az első tényező a CTR változásának fő oka, a LED által emittált fény degradációja okán, aminek mértéke szorosan összefügg a meghajtó áram szintjével. A második tényező a CTR változásának másodlagos okát jelenti, a fotodetektor áramának és a hozzá tartozó kimeneti fokozat erősítésének változása miatt következik be. A harmadik tényező a kimeneti tranzisztor erősítésében bekövetkező változást indikálja, legtöbb esetben elhanyagolható.

Számos különböző tényező befolyásolhatja a CTR degradáció mértékét. Általában a degradáció a P-N átmenet elektromos és termikus igénybevételének eredménye. [98] Kísérleti alapon meg lehet

állapítani a lebomlás várható statisztikai értékét egy adott típusú készülék esetében, azonban ez a görbe teljesen más akár csak egy másik sorozatban gyártott alkatrésznél, és az ugyanazon sorozatban gyártott alkatrészek esetében is különbözhet. A LED-ek által emittált fotonok fluxusváltozása - állandó nyitóirányú árammal vezérelve – sem számítható ki pontosan, ezért a CTR degradáció sem becsülhető.

3.4.3 Áramköri prototípus megvalósítása

Ez a megvalósítás egy a primer és a szekunder kört galvanikusan elválasztó tápegység kompenzációját mutatja be. Az általa meghajtott terhelés nagy stabilitású és pontosságú tápfeszültséget igényel. A tápegység áramkörében van egy visszacsatolási hurok, amely tartalmaz optocsatolót. A visszacsatolt analóg feszültség arányos a tápegység kimeneti feszültségével. Az optocsatoló CTR paramétere függ a réteghőmérsékletétől, a LED áramsűrűségétől is és az alkatrész degradáltsági fokától is.

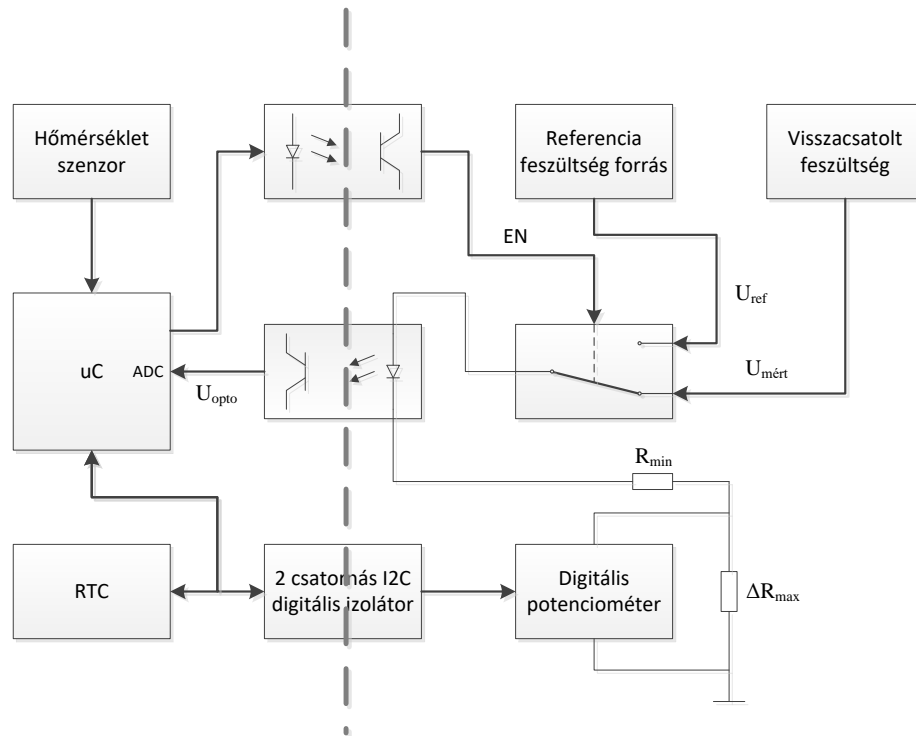
Az optocsatoló offszet hibáját kompenzálni kell. A megbízhatóság olyasmi, amit „beépíteni” kell, és nem „kitesztelni”. Az optocsatoló kompenzálásához pontos referenciafeszültség használata szükséges. Adott időközönként az optocsatoló bemenetét ezzel a referenciafeszültséggel meghajtva és a vizsgált alkatrész kimeneti feszültségértékét mérve, megkapható az feszültségeltolódás értéke. A feszültségforrások közötti átkapcsolás történhet analóg multiplexerrel – ezt egy konstans $n \times 10 \Omega$ kontaktellenállású kapcsolóként szükséges figyelembe venni –, vagy egy aranyozott érintkezővel szerelt relével. Az elkészített modelláramkörben egy Hamlin relé került alkalmazásra – a maximális kontaktellenállása $0,2 \Omega$.

Az optocsatoló kimenetét egy analóg-digitális átalakító konvertálja, egy mikrokontroller belső perifériája is használható. Az ADC felbontása meghatározza a mérés, és így a kompenzálás pontosságát is. Az digitalizáció ideje nem kritikus, mivel nincs szükség nagy frekvenciájú átkapcsolásra a két feszültségforrás között.

A precíziós feszültség referencia ebben a megvalósításban egy AD584 modul. A fejlesztés során rugalmasságot biztosított a négy programozható kimeneti feszültsége: 10V, 7,5V, 5V és 2,5V. A legstabilabb feszültséget a 10V-os kimeneten tapasztaltam, 11V-12V tápfeszültség mellett.

A digitális potenciométer segítségével megoldható az optocsatoló referencia feszültségforrásról táplált áramgenerátoros meghajtása, az áramkorlátozó ellenállás precíz beállítása. A modell áramkörben az MCP40D1x IC került alkalmazásra. A megvalósítás igényeitől függő kiépítésben nagy pontossággal kompenzálja az optocsatolót.

A prototípus áramkör felépítését a 85. ábra szemlélteti, ahol ΔR_{\max} az ellenállás változásának tervezett maximális értéke, R_{\min} az optocsatoló áramkorlátozó ellenállásának minimális értéke, U_{ref} a referenciafeszültség értéke, $U_{\text{mért}}$ a visszacsatolt feszültség értéke, U_{opto} pedig az optocsatoló kimeneti feszültségének értéke.



85. ábra: Optocsatoló degradációját kompenzáló áramkör felépítése

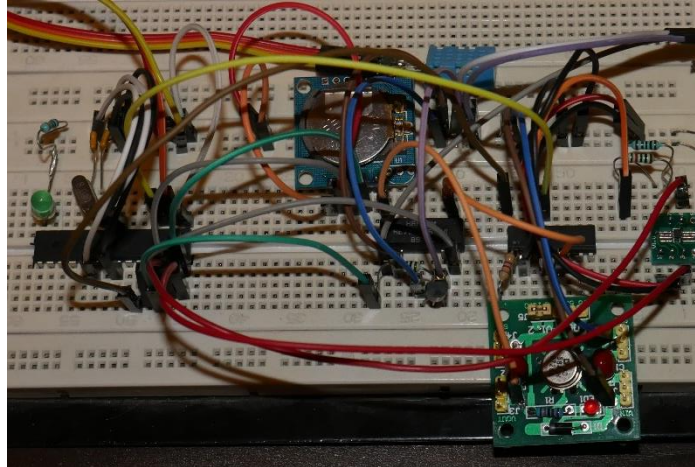
A galvanikus leválasztás miatt a vezérlőjelek összekapcsolására is szükség van optocsatolóra. Jelen kiépítésben ez kimerül a relé vezérlésére használt digitális jelben, amely megoldható egy általános optocsatolóval, valamint szükség van még két digitális jel átviteléhez a programozható ellenállás vezérléséhez. Ennek az alkatrésznek az I²C busz sebességéhez illeszkednie kell, amely teljes sebességben 400kbit/s lehet. Az áramkör modellje a 86. ábra látható.

A CMOS⁴⁵ alapú, digitális kommunikáció izolálását lehetővé tévő buszinterfész fő előnyei az optocsatolókkal szemben a következők: nincs öregedés vagy teljesítményromlás az idő múlásával; növeli a rendszer megbízhatóságát - a tízszer alacsonyabb meghibásodási arány (FIT⁴⁶) miatt; jobb zajvédelem; szélesebb hőmérsékleti tartomány; lehetővé teszi a tervezők számára, hogy nagyobb sávzélességet érjenek el, kisebb méretű áramköröket valósítsanak meg.

⁴⁵ CMOS - Complementary Metal-Oxide Semiconductor - komplementer fém-oxid félvezető

⁴⁶ FIT - Failure Rate - meghibásodási arány

Az ADUM125x egy mágneses leválasztási technológiát alkalmazó IC, amely egy 1MHz-ig terjedő frekvenciatartományban használható és teljes izolációt biztosít az I²C interfészt támogatásával. Eltérő technológiájú megoldás lehet például az Si86xx integrált áramkör család, ami RF izoláción alapul, és támogatja az I²C buszt 1,7 MHz-ig. Mindkettő megoldás robusztus működést tesz lehetővé szélsőséges alkalmazási körülmények között.



86. ábra: Optocsatoló degradációját kompenzáló áramkör modellje

Az optocsatoló kompenzációs alprogram meghívása a főprogramból történik, előre meghatározott feltételek alapján. A feltétel lehet egy bizonyos üzemóra elérte vagy a hőmérséklet megváltozása is. Amint a 86. ábra látható, hőmérsékletérzékelő és valós idejű óra (RTC⁴⁷) is megtalálható a rendszerben. A szoftver figyeli és naplózza a környezeti és belső adatokat. Ha a hőmérsékletváltozás nagyobb, mint egy előre meghatározott érték, vagy a berendezés a kitűzött üzemórát elérte, akkor a rendszer az optocsatoló kompenzációs alprogramot (87. ábra) meghívja.

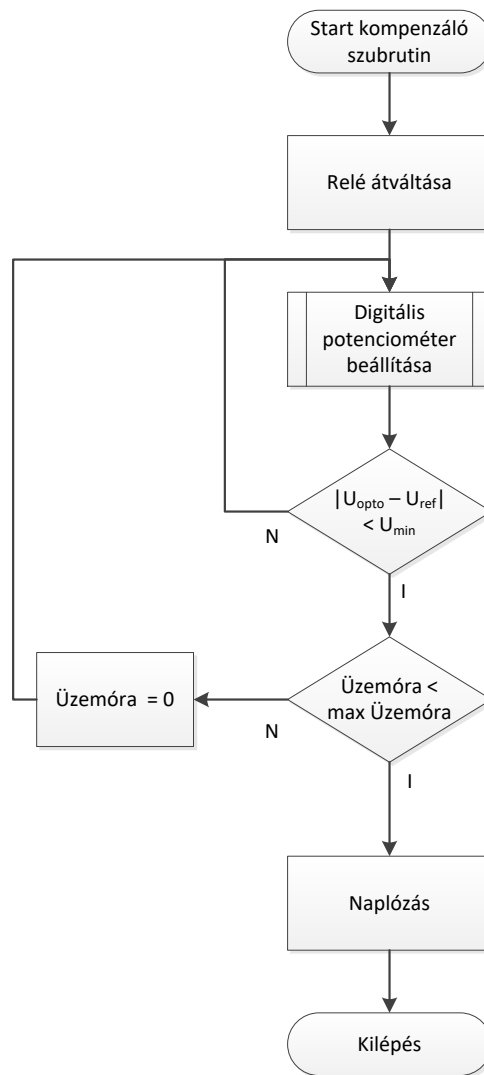
A kompenzációs folyamatban először a mért értéket leválasztása történik meg az optocsatoló bemenetéről, majd a referencia feszültségforrást kerül csatlakoztatásra helyére – a mikrokontroller által vezérelt relével. Az optocsatoló kompenzációja a digitális potenciométer beállításával történik a fokozatos közelítés módszerével.

A digitális potenciométer kvantált ellenállásértékek felvételére alkalmas, ezért egy „elérhető legjobb értéket” állít be a szoftver, a 73. ábra analógiájára (88. ábra). A gyakorlatban, áramköri konstrukciótól függően ez lehet akár a zajszint alatt is. Az alprogramból való visszatérés után, az optocsatoló kompenzálásra került. A relé átkapcsolásával, a referenciafeszültség leválik az

⁴⁷ RTC - Real Time Clock - valós idejű óra

optocsatoló bemenetéről, és a mérendő jel csatlakozik a helyéhez, a visszacsatoló hurok újra zárttá válik.

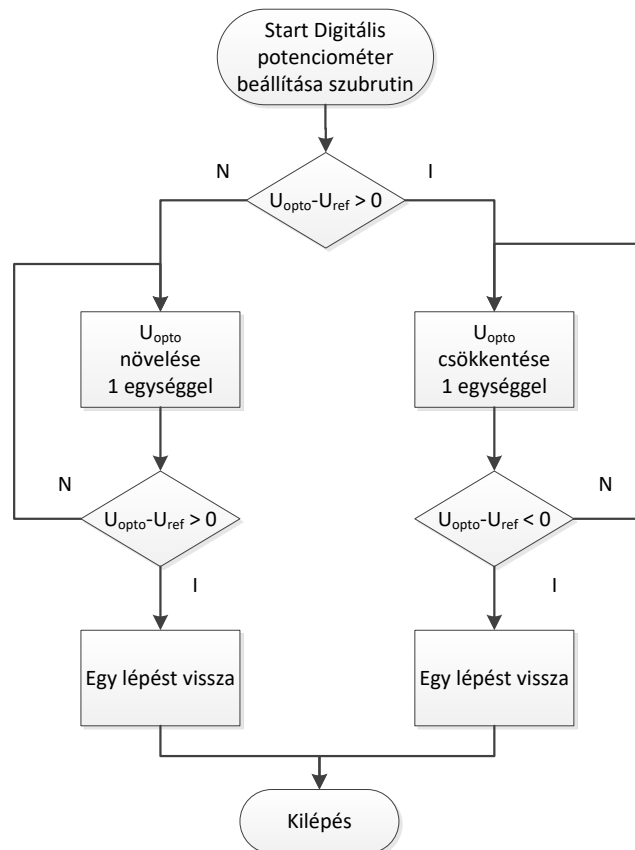
U_{ref} a mikrokontroller által ismert, U_{opto} pedig a mért érték. Amennyiben a kompenzált (mért) érték a célérték (referencia feszültség szint) alatt vagy felett van, a rezisztív digitális-analóg konverter értéke úgy változik, hogy közelítse azt. A beállítani kívánt célérték átlépése után a digitális potméter egy egységet visszalép, és ezzel a pontossággal megelégedve a rendszer kilép a digitális potenciométert beállító algoritmusból.



87. ábra: Kompenzációs alprogram folyamatábrája

Ez a rutin futtatható a tápegység vezérlőjén kívül is, de kis számítási igénye miatt célszerű beágyazni a már jelen lévő mikrokontrollerbe. Megvalósítható a tápegységet kezelő mikrokontrolleren belül egy könyvtár importálásával és a bemutatott hardverarchitektúra

kialakításával. A fent említett modulok megduplázásával a rendszer megbízhatósága tovább növelhető. Az architektúra alkalmazható hálózati tápellátás esetén, valamint mobil tápellátó rendszerek esetében is. A javasolt megoldás némi extra hardver- és szoftverredundanciát igényel, mégis alacsony költséggel megvalósítható.



88. ábra: Digitális potenciométer beállításának algoritmus

ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK

Új tudományos eredmények

A bemutatott redundáns felépítésű tápegység nagy mértékben növeli a megbízhatóságot. Az önmagát monitorozni képes költséghatékony megoldás és a moduláris architektúra nagy mértékben növeli a karbantarthatóságot, ami jelentős mértékben képes emelni egy berendezés élettartamát, így csökkentve a globális emissziót.

A kutatás során más-más alkalmazási területeket figyelembe véve, különböző megbízhatóságot növelő módszerekkel megmutattam az adott alrendszer fejlesztési lehetőségeit. Kitértem a látens teszt lehetőségére, az adaptív, illetve prediktív rendszerek alkalmazására, valamint a redundáns rendszerek alkalmazási lehetőségeire. Az eredményeim valós példákon keresztül mutattam be, számításokkal és mérésekkel ellenőriztem.

A kutatásomhoz kapcsolódó, oktatásban is alkalmazható területekről, oktatási segédanyagokat; oktatási segédeszközöket; jegyzetet; tananyagot; műszerleírást, használati-, mérési-, útmutatót készítettem. Az eredményeimet megjelentettem, hazai és nemzetközi publikációkban tettem közzé.

Az értekezésemben bemutatott kutatómunka új tudományos eredményei az alábbi tézisekben foglalhatók össze:

1. Az elektronikus rendszer megbízhatóságának növelése céljából új eljárásokat mutattam meg a vezérlőként mikrokontrollert alkalmazó olyan rendszerekre vonatkozóan, melyeknél a megvalósítás módozatai függenek az alkalmazott technológiától és az integráltság fokától.
 - 1.1. Olyan új rendszerkialakítási elvet dolgoztam ki, amely egy beágyazott rendszer feladatait és szükséges hardverelemeit kiegészítve képes az irányított rendszerbe beavatkozni, a minőségi paraméterek javításával. [BB-4] [BB-10]
 - 1.2. Adatbiztonságot növelő eljárást fejlesztettem ki a beágyazott rendszerek területén, ami biztosítja egy rendszer által tárolt információk validitását. [BB-1]
 - 1.3. Olyan új elvet alkalmaztam, amely segítségével egy teljesítményfokozatot tartalmazó hibrid elektronikai rendszert alkotó modul élettartamát megnöveltem. [BB-2]
2. Új rendszertechikai megközelítést vezettem be, amelyben a felhasználónak lehetősége nyílik befolyásolni egy redundáns, moduláris rendszer általános értelemben vett megbízhatósági paramétereit, az alkalmazás helyétől, módjától és a végrehajtandó feladattól függően.

- 2.1. Új eljárást mutattam be két egymással együttműködő, redundáns mikrokontroller vezérlésmegosztására, a hiba lokalizáló és a hiba helyreállító képessége kapcsán. [BB-7]
- 2.2. Olyan megoldást dolgoztam ki, amely redundáns felépítésű fotovoltaikus tápellátó egység megbízhatóságát és rendelkezésre állását újszerű eljárással nagy mértékben megnöveli. [BB-8]
3. Eddig még nem alkalmazott berendezés optimalizációt végeztem el a kommersz és ipari elektronikus berendezésekkel és rendszerekkel kapcsolatban, a teljesítmény, élettartam, energiafogyasztás kapcsán.
 - 3.1. Megbízhatóságot növelő eljárás gyakorlati implementációját végeztem el, amelyet eddig még nem alkalmazott architektúrális interpretáció mellett alakítottam ki. [BB-6] [BB-11]
 - 3.2. Új architektúrális megoldást fejlesztettem ki a vizsgált redundáns, moduláris rendszer állapotának lekérdezésére, melyben a felhasználó saját szempontjai szerint súlyozhatja az üzemi, és a működés szélső értékeit korlátozó paramétereit. [BB-5], [BB-9]
 - 3.3. Egy új algoritmust dolgoztam ki a mikrokontroller által vezérelt, redundáns, moduláris rendszer működéséhez, amelyben a felhasználó az áramkör sajátosságai és az alkalmazás körülményei alapján befolyásolhatja a működési módokat. [BB-3]

Ajánlások

A bemutatott rendszerarchitektúra mind kommersz, mind ipari berendezésekben egyaránt sikerrel implementálható, kiemelten a magas megbízhatóságot igénylő alkalmazások területén. Egy mikrokontroller vezérelt berendezés tervezésekor a bemutatott architektúrális lehetőségek mérlegelésével és alkalmazásával, a tervezők hatásos megbízhatóságot növelő stratégiát képesek bevezetni.

A végfelhasználók technológiai képességeinek folyamatos fejlődése támogatja a moduláris, könnyen karbantartható eszközök újbóli megjelenését. A gyártók számára van piaci rés a kommersz és ipari eszközök terén a felhasználói optimalizációt és javíthatóságot biztosító konstrukciók számára – a szükséges többletköltség fejében. A szerző azt reméli, hogy a műszaki berendezések moduláris felépítése, valamint a telepítési és javítási kézikönyvek újra divatba jönnek.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ez úton szeretném megköszönni az Óbudai Egyetem – Biztonságtudományi Doktori Iskola és az Alba Regia Műszaki Kar munkatársainak az értekezésem elkészítéséhez nyújtott segítségüket. Szeretném külön megköszönni témavezetőmnek a munka elkészítéséhez nyújtott önzetlen szakmai- és oktatói segítségét. Ugyancsak szeretném megköszönni családomnak a személyes támogatásukat és bátorításukat az értekezés elkészítésében.

IRODALOMJEGYZÉK

Felhasznált irodalom

- [1] A. Avizienis, G. C. Gilley, F. P. Mathur, D. A. Rennels, J. A. Rohr and D. K. Rubin, "The STAR (Self-Testing And Repairing) Computer: An Investigation of the Theory and Practice of Fault-Tolerant Computer Design," in IEEE Transactions on Computers, vol. C-20, no. 11, pp. 1312-1321, Nov. 1971, doi: 10.1109/T-C.1971.223133.
- [2] A. Balázs, A. Baksa, H. Bitterlich, I. Hernyes, O. Küchemann, Z. Pálos, J. Rustenbach, W. Schmidt, P. Spanyoli, J. Sulyán, S. Szalai, L. Várhalmi (2016): Command and data management system (CDMS) of the Philae lander, *Acta Astronautica* 125 pp. 105-117.
- [3] A. Ejlali, B. M. Al-Hashimi, M. T. Schmitz, P. Rosinger and S. G. Miremadi, "Combined time and information redundancy for SEU-tolerance in energy-efficient real-time systems," in IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, vol. 14, no. 4, pp. 323-335, April 2006, doi: 10.1109/TVLSI.2006.874355.
- [4] A. Lifa, P. Eles, Z. Peng and V. Izosimov, "Hardware/software optimization of error detection implementation for real-time embedded systems," 2010 IEEE/ACM/IFIP International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES+ISSS), Scottsdale, AZ, 2010, pp. 41-50, doi: 10.1145/1878961.1878970.
- [5] A. M. Stanisavljević, V. A. Katić, B. P. Dumnić, and B. P. Popadić, "A Comprehensive Overview of Digital Signal Processing Methods for Voltage Disturbance Detection and Analysis in Modern Distribution Grids with Distributed Generation," *Acta Polytech. Hung.*, vol. 16, no. 5, Aug. 2019, doi: 10.12700/APH.16.5.2019.5.8.
- [6] A. Soualhi, G. Clerc, and H. Razik, "Detection and Diagnosis of Faults in Induction Motor Using an Improved Artificial Ant Clustering Technique," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 4053–4062, Sep. 2013, doi: 10.1109/TIE.2012.2230598.
- [7] A. Szűts, „Developing a Complex Decision-Making Framework for Evaluating the Energy-Efficiency of Residential Property Investments”. *ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA* 12: 6 pp. 231-248., 18 p. (2015)
- [8] A. Szűts, I. Krómer: „Developing a Fuzzy Analytic Hierarchy Process for Choosing the Energetically Optimal Solution at the Early Design Phase of a Building”, *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 12, No. 3, pp. 25-39, 2015
- [9] A. Szűts, I. Krómer: „Estimating Hungarian Household Energy Consumption Using Artificial Neural Networks”, *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 11, No. 4 pp. 155-168, 2014

- [10] Amerasekera. E. A., Campbell, D. S. Failure mechanisms in semiconductor devices. J. Wiley & Sons. Chichester. 1987
- [11] Andreas Steininger, Herbert Schweinzer. Towards an optimal combination of error detection mechanisms. *Microprocessing and Microprogramming*. Volume 32, Issues 1–5. 1991. 253-259.pp., ISSN 0165-6074. doi:10.1016/0165-6074(91)90355-W.
- [12] B. M. Ebrahimi, M. Javan Roshtkhari, J. Faiz, and S. V. Khatami, "Advanced Eccentricity Fault Recognition in Permanent Magnet Synchronous Motors Using Stator Current Signature Analysis," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 4, pp. 2041–2052, Apr. 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2263777.
- [13] B. Parhami, "Voting algorithms," in *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 43, no. 4, pp. 617-629, Dec. 1994, doi: 10.1109/24.370218.
- [14] B. Parhami. *Computer Arithmetic: Algorithms and Hardware Designs (The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering)* 2nd edition. Oxford University Press. New York. 2010. 672.p. ISBN 978-0-19-532848-6.
- [15] B. Parhami. *Fault-Tolerant Reversible Circuits. 2006 Fortieth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, 2006, pp. 1726-1729, doi: 10.1109/ACSSC.2006.355056.
- [16] B. W. Johnson, J. H. Aylor and H. H. Hana, "Efficient use of time and hardware redundancy for concurrent error detection in a 32-bit VLSI adder," in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 23, no. 1, pp. 208-215, Feb. 1988, doi: 10.1109/4.281.
- [17] B.P. Edwards. Computer based sun following system. *Solar Energy*, 21 (6) (1978), pp. 491-498
- [18] Berek Lajos. *Biztonságtechnika*. Budapest: Nemzeti Közszolgálati Egyetem. 2014. 48 p.
- [19] Bergh, A. A., Dean, P. J. *Light-emitting diodes*. Clarendon Press. 1976
- [20] Biijenescu, T. I. CTR degradation and ageing problem of optocouplers. *Proc. of the fourth international conference on solid-state and integrated-circuit technology*. Beijing, China. October 24-28, 1995. pp. 173-175
- [21] Biijenescu, T. I. Degradation and reliability problems of optocouplers. *Proc. of Annual Semiconductor Conference - CAS '93*, Sinaia, Romania. 1993.
- [22] Boes EC, Maish AB. Advances in concentrator technology. In: *Proceedings of 19th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1987. p. 985–91
- [23] Bradley Efron (1983) Estimating the Error Rate of a Prediction Rule: Improvement on Cross-Validation, *Journal of the American Statistical Association*, 78:382, 316-331, DOI: 10.1080/01621459.1983.10477973

- [24] CE Ebeling. An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering. Waveland Press Inc. 2019. ISBN: 978-1478637349
- [25] Chengmo Yang and Alex Orailoglu. Predictable execution adaptivity through embedding dynamic reconfigurability into static MPSoC schedules. In Proceedings of the 5th IEEE/ACM international conference on Hardware/software codesign and system synthesis (CODES+ISSS '07). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 15–20. 2007. doi: 10.1145/1289816.1289824
- [26] Chris Hall, Thomas Kuehl. EMI Rejection Ratio of Operational Amplifiers. SBOA128A. 2011.
- [27] Dakai Zhu, R. Melhem and D. Mosse, "The effects of energy management on reliability in real-time embedded systems," IEEE/ACM International Conference on Computer Aided Design, 2004. ICCAD-2004., San Jose, CA, USA, 2004, pp. 35-40, doi: 10.1109/ICCAD.2004.1382539.
- [28] David W. Coit. Maximization of System Reliability with a Choice of Redundancy Strategies, IIE Transactions, 35:6, 535-543, 2003. DOI: 10.1080/07408170304420
- [29] Douglas Wyche Caldwell. Minimalist Fault-Tolerance Techniques for Mitigating Single-Event Effects in Non-Radiation-Hardened Microcontrollers. University Of California. Los Angeles. 1998.
- [30] E. J. McCluskey, "Design techniques for testable embedded error checkers," in Computer, vol. 23, no. 7, pp. 84-88, July 1990, doi: 10.1109/2.56855.
- [31] Eckhardt, Dave E., Caglayan, Alper K., Knight, John C. An experimental evaluation of software redundancy as a strategy for improving reliability. Technical Memorandum (TM). NASA Langley Research Center Hampton, VA., United States. May 1990.
- [32] FIAMM Energy Technology - SMG Battery Range. https://www.fiamm.com/fileadmin//user_upload/SMGS_FOLDER_EMEA_ENG.pdf (letöltve: 2020.10.09.)
- [33] Francis P. Mathur and Algirdas Avižienis. 1970. Reliability analysis and architecture of a hybrid-redundant digital system: generalized triple modular redundancy with self-repair. In Proceedings of the May 5-7, 1970, spring joint computer conference (AFIPS '70 (Spring)). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 375–383. DOI: 10.1145/1476936.1476994
- [34] G. Gergely et al., "Surface excitation correction of the inelastic mean free path in selected conducting polymers," Appl. Surf. Sci., vol. 252, no. 14, pp. 4982–4989, May 2006, doi: 10.1016/j.apsusc.2005.07.017.

- [35] G. Györök, "The FPAA realization of analog robust electronic circuit," in 2009 IEEE International Conference on Computational Cybernetics (ICCC), Jan. 2009, pp. 179–183, doi: 10.1109/ICCCYB.2009.5393941.
- [36] G. Latif-Shabgahi, J. M. Bass and S. Bennett, "A taxonomy for software voting algorithms used in safety-critical systems," in *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 53, no. 3, pp. 319-328, Sept. 2004, doi: 10.1109/TR.2004.832819.
- [37] G. S. Smith. "Loop antennas". R. C. Johnson & H. Jasik (Editors). Antenna Engineering Handbook, Chapter 5. McGraw-Hill, NY, 2nd Ed, 1984. ISBN 0-07-032291-0.
- [38] G. T. Orosz et al., "Experimental determination of electron inelastic scattering cross-sections in Si, Ge and III–V semiconductors," *Vacuum*, vol. 71, no. 1, pp. 147–152, May 2003, doi: 10.1016/S0042-207X(02)00729-7.
- [39] G. T. Orosz, A. Sulyok, G. Gergely, S. Gurbán, and M. Menyhard, "Calculation of the Surface Excitation Parameter for Si and Ge from Measured Electron Backscattered Spectra by Means of a Monte-Carlo Simulation," *Microsc. Microanal.*, vol. 9, no. 4, pp. 343–348, Aug. 2003, doi: 10.1017/S1431927603030241.
- [40] G.R Latif-Shabgahi, A novel algorithm for weighted average voting used in fault tolerant computing systems, *Microprocessors and Microsystems*, Volume 28, Issue 7, 2004, Pages 357-361, ISSN 0141-9331, <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2004.02.006>.
- [41] Gage. Stan I. Hewlett-Packard. Optoelectronics applications manual 1977
- [42] Gay CF, Yerkes JW, Wilson JH. Performance advantages of two-axis tracking for large flat-plate photovoltaic energy system. In: Proceedings of 16th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1982. p. 1368–71
- [43] Györök, György. Programozható analóg áramkörök mikrovezérlő környezetben. Székesfehérvár, Magyarország: Óbudai Egyetem (2013), 165 p. ISBN: 9786155018978
- [44] H. Chen and S. Lu, "Fault Diagnosis Digital Method for Power Transistors in Power Converters of Switched Reluctance Motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 2, pp. 749–763, Feb. 2013, doi: 10.1109/TIE.2012.2207661.
- [45] H. Whiteside, R. W. P. King. "The loop antenna as a probe". *IEEE Trans. On Antennas and Propagation*, Vol. AP12, May 1964, pp. 291-297.
- [46] Henderson, R., & Clark, K. Architectural Innovation: The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms. *Administrative Science Quarterly*, 35(1), 9-30. 1990. doi:10.2307/2393549

- [47] I. Czibere, I. Kovách, G. B. Megyesi. „Environmental Citizenship and Energy Efficiency in Four European Countries (Italy, The Netherlands, Switzerland and Hungary)”. SUSTAINABILITY 12: 3 Paper: 1154, 18 p. (2020)
- [48] I. Hwang, S. Kim, Y. Kim and C. E. Seah, "A Survey of Fault Detection, Isolation, and Reconfiguration Methods," in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 18, no. 3, pp. 636-653, May 2010, doi: 10.1109/TCST.2009.2026285.
- [49] İbrahim Sefa, Mehmet Demirtas, İlhami Çolak. Application of one-axis sun tracking system. *Energy Conversion and Management*. Volume 50, Issue 11. 2009. Pages 2709-2718. ISSN 0196-8904. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.06.018>.
- [50] IEA, „Average CO2 emissions intensity of hourly electricity supply in the European Union, 2018, and by scenario, 2040”, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/average-co2-emissions-intensity-of-hourly-electricity-supply-in-the-european-union-2018-and-by-scenario-2040> (letöltve: 2020.08.05.)
- [51] IEA, „World electricity final consumption by sector, 1974-2018”, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-electricity-final-consumption-by-sector-1974-2018> (letöltve: 2020.08.05.)
- [52] IRLB8743 MOSFET datasheet. International Rectifier. PD-96232. 9.pp. El Segundo. 2009.
- [53] Israel Koren, C. Mani Krishna. *Fault-Tolerant Systems*. Morgan Kaufmann; 1st Edition. 399.p. July 2010. ISBN: 978-0120885251
- [54] J. Gray and D. P. Siewiorek, "High-availability computer systems," in *Computer*, vol. 24, no. 9, pp. 39-48, Sept. 1991, doi: 10.1109/2.84898.
- [55] J. Hu, J. Wang, J. Zeng, and X. Zhong, "Model-Based Temperature Sensor Fault Detection and Fault-Tolerant Control of Urea-Selective Catalyst Reduction Control Systems," *Energies*, vol. 11, no. 7, p. 1800, Jul. 2018, doi: 10.3390/en11071800.
- [56] J. J. Suran, "Use of Passive Redundancy in Electronic Systems," in *IRE Transactions on Military Electronics*, vol. MIL-5, no. 3, pp. 202-208, July 1961, doi: 10.1109/IRET-MIL.1961.5008349.
- [57] J. K. Scott, G. R. Marseglia, L. Magni, R. D. Braatz, and D. M. Raimondo, "A hybrid stochastic-deterministic input design method for active fault diagnosis," in *52nd IEEE Conference on Decision and Control*, Dec. 2013, pp. 5656–5661, doi: 10.1109/CDC.2013.6760780.
- [58] J. Laprie. *Dependable Computing And Fault Tolerance : Concepts And Terminology*. in *Twenty-Fifth International Symposium on Fault-Tolerant Computing*, 1995, ' Highlights

- from Twenty-Five Years', Pasadena, CA, USA, 1995 pp. 2. doi: 10.1109/FTCSH.1995.532603
- [59] Jerin Kuriakose Tharamuttam, Andrew Keong Ng. Design and Development of an Automatic Solar Tracker. *Energy Procedia*. Volume 143. 2017. pp. 629-634. ISSN 1876-6102. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.738>.
- [60] Johnson, B. W. A Course on the Design of Reliable Digital Systems. *IEEE Transactions on Education*. Vol. E-30, No. 1, February 1987. pp. 27–36.
- [61] Johnson, B. W. *Design and Analysis of Fault Tolerant Digital Systems*. Addison-Wesley Publishing Company. Reading, Massachusetts. 1989.
- [62] Jörg Henkel, Lars Bauer, Joachim Becker. Design and architectures for dependable embedded systems. In *Proceedings of the seventh IEEE/ACM/IFIP international conference on Hardware/software codesign and system synthesis (CODES+ISSS '11)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 69–78. 2011. doi: 10.1145/2039370.2039384
- [63] K. Mohanram and N. A. Touba, "Partial error masking to reduce soft error failure rate in logic circuits," *Proceedings 18th IEEE Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems*, Boston, MA, USA, 2003, pp. 433-440, doi: 10.1109/DFTVS.2003.1250141.
- [64] K.J. Åström. Limitations on Control System Performance. *European Journal of Control*, Volume 6, Issue 1, 2000, Pages 2-20, ISSN 0947-3580, [https://doi.org/10.1016/S0947-3580\(00\)70906-X](https://doi.org/10.1016/S0947-3580(00)70906-X).
- [65] Kapur, K. C. and Lamberson, L. R. *Reliability in engineering design*. New York, John Wiley and Sons, Inc. 605 p. 1977.
- [66] Kövesi János. *Kockázat és megbízhatóság*. BME-MVT. 2004.
- [67] L. R. Neukirchner, A. Magyar, A. Fodor, N. D. Kutasi, and A. Kelemen, "Constrained Predictive Control of Three-PhaseBuck Rectifiers," *Acta Polytech. Hung.*, vol. 17, no. 1, pp. 41–60, 2020, doi: 10.12700/APH.17.1.2020.1.3.
- [68] Laprie J.C. (1992) *Dependability: Basic Concepts and Terminology*. In: Laprie J.C. (eds) *Dependability: Basic Concepts and Terminology*. Dependable Computing and Fault-Tolerant Systems, vol 5. Springer, Vienna. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-9170-5_1
- [69] M. Shahbazi, E. Jamshidpour, P. Poure, S. Saadate, and M. R. Zolghadri, "Open- and Short-Circuit Switch Fault Diagnosis for Nonisolated DC–DC Converters Using Field Programmable Gate Array," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 4136–4146, Sep. 2013, doi: 10.1109/TIE.2012.2224078.

- [70] M. Vacca, M. Graziano and M. Zamboni, "Majority Voter Full Characterization for Nanomagnet Logic Circuits," in *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 11, no. 5, pp. 940-947, Sept. 2012, doi: 10.1109/TNANO.2012.2207965.
- [71] M. Zamani, N. Farazmand and M. B. Tahoori, "Fault Masking and Diagnosis in Reversible Circuits," *2011 Sixteenth IEEE European Test Symposium*, Trondheim, 2011, pp. 69-74, doi: 10.1109/ETS.2011.19.
- [72] M.D. Krstic, M.K. Stojcev, G. Lj. Djordjevic, I.D. Andrejic. A mid-value select voter, *Microelectronics Reliability*, Volume 45, Issues 3–4, 2005, Pages 733-738, ISSN 0026-2714, <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2004.07.006>.
- [73] Maish AB. A self-aligning photovoltaic array tracking controller. In: *Proceedings of the 20th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1988
- [74] Martha Grabowski, Stephen D. Sanborn. Human performance and embedded intelligent technology in safety-critical systems, *International Journal of Human-Computer Studies*, Volume 58, Issue 6, 2003, Pages 637-670, ISSN 1071-5819, doi:10.1016/S1071-5819(03)00036-3.
- [75] N. M. A. Freire, J. O. Estima, and A. J. Marques Cardoso, "Open-Circuit Fault Diagnosis in PMSG Drives for Wind Turbine Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 3957–3967, Sep. 2013, doi: 10.1109/TIE.2012.2207655.
- [76] O. Serlin. 1984. Fault-Tolerant Systems in Commercial Applications. *Computer* 17, 8. August 1984. 19–30. pp. DOI:10.1109/MC.1984.1659214
- [77] P. E. Dodd and L. W. Massengill, "Basic mechanisms and modeling of single-event upset in digital microelectronics," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 50, no. 3, pp. 583-602, June 2003, doi: 10.1109/TNS.2003.813129.
- [78] P. Holcsik, J. Pálfi, Z. Čonka, and M. Avornicului, "A Theoretical Approach to The Implementation of Low-Voltage Smart Switch Boards," *Acta Polytech. Hung.*, vol. 16, no. 4, Jul. 2019, doi: 10.12700/APH.16.4.2019.4.7.
- [79] P. J. Mosterman and G. Biswas, "Diagnosis of continuous valued systems in transient operating regions," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, vol. 29, no. 6, pp. 554-565, Nov. 1999, doi: 10.1109/3468.798059.
- [80] P. Lezanski and M. Pilacinska, "The dominance-based rough set approach to cylindrical plunge grinding process diagnosis," *J. Intell. Manuf.*, vol. 29, no. 5, pp. 989–1004, Jun. 2018, doi: 10.1007/s10845-016-1230-1.
- [81] P. Lorczak, A. Caglayan and D. Eckhardt, "A theoretical investigation of generalized voters for redundant systems," in *1989 The Nineteenth International Symposium on*

- Fault-Tolerant Computing. Digest of Papers, Chicago, IL, USA, 1989 444.-451. pp. doi: 10.1109/FTCS.1989.105617
- [82] P. Roth, A. Georgiev, H. Boudinov. Cheap two axis sun following device. *Energy Conversion and Management*. Volume 46, Issues 7–8. 2005. pp. 1179-1192. ISSN 0196-8904. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.06.015>.
- [83] P. Szcześniak, G. Tadra, and Z. Fedyczak, "Model Predictive Control of Hybrid Transformer with Matrix Converter," *Acta Polytech. Hung.*, vol. 17, no. 1, pp. 25–40, 2020, doi: 10.12700/APH.17.1.2020.1.2.
- [84] Praveen Kumar Samudrala, Jeremy Ramos, Srinivas Katkoori. Selective triple Modular redundancy (STMR) based single-event upset (SEU) tolerant synthesis for FPGAs. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 51(5):2957 – 2969. November 2004. DOI: 10.1109/TNS.2004.834955
- [85] R Isermann. *Fault-diagnosis systems: an introduction from fault detection to fault tolerance*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 475. pp. 2006. ISBN: 978-3-540-30368-8
- [86] R. A. Maxon and K. M. C. Tan, "Anomaly detection in embedded systems," in *IEEE Transactions on Computers*, vol. 51, no. 2, pp. 108-120, Feb. 2002, doi: 10.1109/12.980003.
- [87] R. Ghimire, C. Zhang, and K. R. Pattipati, "A Rough Set-Theory-Based Fault-Diagnosis Method for an Electric Power-Steering System," *IEEEASME Trans. Mechatron.*, 2018, doi: 10.1109/TMECH.2018.2863119.
- [88] R. Isermann, *Supervision, fault-detection and fault-diagnosis methods — An introduction*, *Control Engineering Practice*, Volume 5, Issue 5, 1997, Pages 639-652, ISSN 0967-0661, [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(97\)00046-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(97)00046-4).
- [89] R. R. Lutz, "Analyzing software requirements errors in safety-critical, embedded systems," [1993] *Proceedings of the IEEE International Symposium on Requirements Engineering*, San Diego, CA, USA, 1993, pp. 126-133, doi: 10.1109/ISRE.1993.324825.
- [90] Rennels, "Fault-Tolerant Computing—Concepts and Examples," in *IEEE Transactions on Computers*, vol. C-33, no. 12, pp. 1116-1129, Dec. 1984, doi: 10.1109/TC.1984.1676390.
- [91] Rodney H. Green, John R. Doyle, Wade D. Cook, Preference voting and project ranking using DEA and cross-evaluation, *European Journal of Operational Research*, Volume 90, Issue 3, 1996, Pages 461-472, ISSN 0377-2217, [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00039-9](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00039-9).

- [92] S. Mitra and E. J. McCluskey, "Which concurrent error detection scheme to choose ?," *Proceedings International Test Conference 2000 (IEEE Cat. No.00CH37159)*, Atlantic City, NJ, USA, 2000, pp. 985-994, doi: 10.1109/TEST.2000.894311.
- [93] S. Mitra and E. J. McCluskey, "Word-voter: a new voter design for triple modular redundant systems," *Proceedings 18th IEEE VLSI Test Symposium*, Montreal, Quebec, Canada, 2000, pp. 465-470, doi: 10.1109/VTEST.2000.843880.
- [94] S. Yang, A. Bryant, P. Mawby, D. Xiang, L. Ran, and P. Tavner, "An Industry-Based Survey of Reliability in Power Electronic Converters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 3, pp. 1441–1451, May 2011, doi: 10.1109/TIA.2011.2124436.
- [95] S.S.N. Rumala. A shadow method for automatic tracking. *Solar Energy*, 37 (3) (1986). pp. 245-247
- [96] Selényi Endre. Megbízhatóságelmélet alapjai. BME-MIT. 2001.
- [97] T.-M. I. Băjenescu and M. I. Bazu, *Reliability of Electronic Components: A Practical Guide to Electronic Systems Manufacturing*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1999.
- [98] Ueda, O. *Reliability and degradation of III-V optical devices*. Artech House. Inc. Norwood, MA. 1996.
- [99] V. Narayanan and Y. Xie, "Reliability concerns in embedded system designs," in *Computer*, vol. 39, no. 1, pp. 118-120, Jan. 2006, doi: 10.1109/MC.2006.31.
- [100] V. Poulek, M. Libra. New solar tracker. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. Volume 51, Issue 2. 1998. Pages 113-120. ISSN 0927-0248. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(97\)00276-6](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(97)00276-6).
- [101] Vass Attila, Berek Lajos. Napenergia és az elektronikai jelzőrendszer, villamos energia hálózattól távol lévő objektumok védelmének lehetőségei. *HADMÉRNÖK* 24:(2) pp. 41-57. (2015)
- [102] Victor P. Nelson, Bill D. Carroll „Tutorial: Fault-Tolerant. Computing” *IEEE Computer Society Press*, Washington DC. 1987.
- [103] W. Kong, Y. Luo, Z. Qin, Y. Qi, and X. Lian, "Comprehensive Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Protection of In-Vehicle Intelligent Electric Power Supply Network," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 11, pp. 10453–10464, Nov. 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2921784.
- [104] X. Xiang, C. Yu, and Q. Zhang, "On intelligent risk analysis and critical decision of underwater robotic vehicle," *Ocean Eng.*, vol. 140, pp. 453–465, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.06.020.

- [105] Xilinx Inc. Carl Carmichael. Triple Module Redundancy Design Techniques for Virtex FPGAs. Application Note: Virtex Series. July 6, 2006. 37.pp. https://www.xilinx.com/support/documentation/application_notes/xapp197.pdf (letöltve: 2020.10.09.)
- [106] Xilinx Inc. MicroBlaze Triple Modular Redundancy (TMR) Subsystem v1.0. Product Guide. Vivado Design Suite PG268 November 22., 2019. 97.pp. https://www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/tmr/v1_0/pg268-tmr.pdf (letöltve: 2020.10.09.)
- [107] Y. C. Yeh, "Triple-triple redundant 777 primary flight computer," 1996 IEEE Aerospace Applications Conference. Proceedings, Aspen, CO, USA, 1996, pp. 293-307 vol.1, doi: 10.1109/AERO.1996.495891.
- [108] Y. Ichinomiya, S. Tanoue, M. Amagasaki, M. Iida, M. Kuga and T. Sueyoshi, "Improving the Robustness of a Softcore Processor against SEUs by Using TMR and Partial Reconfiguration," 2010 18th IEEE Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines, Charlotte, NC, 2010, pp. 47-54, doi: 10.1109/FCCM.2010.16.
- [109] Y. Song and B. Wang, "Survey on Reliability of Power Electronic Systems," IEEE Trans. Power Electron., vol. 28, no. 1, pp. 591–604, Jan. 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2192503.
- [110] Z. Gao, C. Cecati, and S. X. Ding, "A Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Techniques—Part I: Fault Diagnosis With Model-Based and Signal-Based Approaches," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 62, no. 6, pp. 3757–3767, Jun. 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2417501.
- [111] Z. Gao, C. Cecati, and S. X. Ding, "A Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Techniques—Part II: Fault Diagnosis With Knowledge-Based and Hybrid/Active Approaches," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 6, pp. 3768–3774, Jun. 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2419013.
- [112] Zippel, C. L. et al. Competing processes in long-term accelerated ageing of double heterostructure GaAlAs light emitting diodes. 1982. 1. Appl. Phys., vol. 53, pp. 1781-1786.
- [113] Shrivastava, Sakshi & Malviya, Sunil & Gupta, Neelesh. (2017). Built in Self Test Architecture Using Logic Module. International Journal of VLSI Design & Communication Systems. 8. 25-34. 10.5121/vlsic.2017.8403.

- [114] Voyiatzis, Ioannis & Paschalis, Antonis & Gizopoulos, Dimitris & Kranitis, Nektarios & Halatsis, Constantin. (2005). A Concurrent Built-In Self-Test Architecture Based on a Self-Testing RAM. Reliability, IEEE Transactions on. 54. 69 - 78. 10.1109/TR.2004.842091.

A Jelölt értekezésével kapcsolatos publikációi

- [BB-1] György Györök; Bertalan Beszédes: Highly reliable data logging in embedded systems, In: Anikó, Szakál; Iveta, Zamecnikova (szerk.) SAMI 2018: IEEE 16th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics : Dedicated to the Memory of Pioneer of Robotics Antal (Tony) K. Bejczy : proceedings, Seattle (WA), Amerikai Egyesült Államok : IEEE, (2018) pp. 49-54., 5 p.
- [BB-2] György Györök; Bertalan Beszédes: Fault tolerant power supply systems, In: Orosz, Gábor Tamás (szerk.) 11th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas (AIS 2016), Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, (2016) pp. 68-73., 6 p.
- [BB-3] György Györök; Bertalan Beszédes: Concept of a Reliable Redundant Off-grid Power Supply Chain, In: Szakál, Anikó (szerk.) SACI 2019: IEEE 13th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics : PROCEEDINGS, Temesvár, Románia : IEEE, (2019) pp. 205-10., 6 p.
- [BB-4] György Györök; Bertalan Beszédes: Adaptive optocoupler degradation compensation in isolated feedback loops, In: Szakál, Anikó (szerk.) IEEE 12th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI 2018), Temesvár, Románia: IEEE Romania Section, IEEE Hungary Section, (2018) pp. 167-172., 6 p.
- [BB-5] Attila Sáfár; Bertalan Beszédes: Educational Aspects of a Modular Power Management System, In: Orosz, Gábor Tamás (szerk.) AIS 2019: 14th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas organized in the frame of Hungarian Science Festival 2019 by Óbuda University, Székesfehérvár, Magyarország: Óbudai Egyetem, (2019) pp. 163-166., 4 p.
- [BB-6] György Györök; Bertalan Beszédes: Fault-tolerant Software Solutions in Microcontroller Based Systems, In: Orosz, Gábor Tamás (szerk.) AIS 2017 - 12th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas organized in the frame of Hungarian Science Festival 2017 by Óbuda University: Proceedings, November 9, 2017 Székesfehérvár, Hungary, Székesfehérvár, Magyarország: Óbudai Egyetem, (2017) pp. 7-12., 6 p.

- [BB-7] György Györök; Bertalan Beszédes: Duplicated Control Unit Based Embedded Fault-masking Systems, In: Szakál, Anikó (szerk.) IEEE 15th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics: SISY 2017: 15th IEEE International Symposium on Intelligent Systems and Informatics, New York (NY), Amerikai Egyesült Államok: IEEE, (2017) pp. 283-288. Paper: 8080567, 6 p.
- [BB-8] Bertalan Beszédes; Károly Széll; György Györök: A Highly Reliable, Modular, Redundant and Self-Monitoring PSU Architecture, ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA 17: 7 pp. 233-249., 14 p. (2020)
- [BB-9] Beszédes, Bertalan. Végfelhasználói igények megjelenése az energiafelhasználás hatékonyságának és a termék megbízhatóságának növelése érdekében. BIZTONSÁGTUDOMÁNYI SZEMLE 2 : 3 pp. 77-88. , 12 p. (2020)
- [BB-10] Beszédes Bertalan; Széll Károly; Györök György, Redundant Photo-Voltaic Power Cell in a Highly Reliable System, ELECTRONICS 10:11 p. 1253 (2021), <https://doi.org/10.3390/electronics10111253>
- [BB-11] Bertalan Beszédes; György Györök, Nagy megbízhatóságú, egy tengely mentén forgatható fotovoltikus feszültségforrás, BIZTONSÁGTUDOMÁNYI SZEMLE 3:2 pp. 73-83. 11 p. (2021)

A Jelölt értekezéséhez nem kapcsolódó publikációi

- [BB-12] György Györök; Bertalan Beszédes: Artificial Education Process Environment for Embedded Systems, In: Orosz, Gábor Tamás (szerk.) 9th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas - AIS2014 Székesfehérvár, Magyarország: Óbudai Egyetem, (2014) pp. 37-42., 6 p.
- [BB-13] György Györök; Alexander E. Baklanov; Bertalan Beszédes: Extension of Nodal Voltage Method with the Thermosensing, In: Orosz, Gábor Tamás (szerk.) AIS 2017 - 12th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas organized in the frame of Hungarian Science Festival 2017 by Óbuda University: Proceedings, November 9, 2017 Székesfehérvár, Hungary, Óbudai Egyetem, (2017) pp. 201-204., 4 p.
- [BB-14] Bertalan Beszédes; György Molnár; Attila Sáfár: Improvement of Network in an Educational Institution According to Demands of Industry 4.0, In: Orosz, Gábor (szerk.) AIS 2018 - 13th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas, Székesfehérvár, Magyarország: Óbudai Egyetem, Alba Regia Műszaki Kar, (2018) pp. 11-14., 4 p.

- [BB-15] Albina Kadyroldina; Assel Kussaiyn-Murat; Bertalan Beszedes; Alexander Krasavin; Darya Alontseva: Image Acquisition and Processing on Raspberry Pi in Matlab for 3D-Scanning, In: Orosz, Gábor Tamás (szerk.) AIS 2019: 14th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas organized in the frame of Hungarian Science Festival 2019 by Óbuda University, Székesfehérvár, Magyarország: Óbudai Egyetem, (2019) pp. 39-42., 4 p.
- [BB-16] György Györök; Alexander E. Baklanov; Bertalan Beszedes: Analog Displaying of Digital Quantities, In: Orosz, Gábor Tamás (szerk.) AIS 2019: 14th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas organized in the frame of Hungarian Science Festival 2019 by Óbuda University, Székesfehérvár, Magyarország: Óbudai Egyetem, (2019) pp. 65-68., 4 p.
- [BB-17] Péter Udvardy; Tamás Jancsó; Bertalan Beszedes: 3D modelling by UAV in a church, In: Rudolf, Andoga (szerk.) New Trends in Aviation Development 2019: NTinAD, (2019) pp. 189-192., 1 p.
- [BB-18] Mosavi, Amirhosein; Bertalan, Beszedes; Imre, Felde; Nadai, Laszlo; Gorji, Nima E., Electrical characterization of CIGS thin-film solar cells by two- and four-wire probe technique, MODERN PHYSICS LETTERS B 2020 p. 2050102, 16 p. (2020)
- [BB-19] Beszedes Bertalan: Munkavédelem – A villamosság biztonságtechnikája, Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem (2015), 59 p., ISBN: 9789634491538
- [BB-20] Ardabili Sina; Bertalan Beszedes; Laszlo Nadai; Karoly Szell; Mosavi Amir; Imre Felde: Comparative Analysis of Single and Hybrid Neuro-Fuzzy-Based Models for an Industrial Heating Ventilation and Air Conditioning Control System, In: 2020 RIVF International Conference on Computing and Communication Technologies (RIVF), (2020) pp. 1-6., 6 p.
- [BB-21] Nosratabadi Saeed; Karoly Szell; Bertalan Beszedes; Imre Felde; Ardabili Sina; Mosavi Amir: Comparative Analysis of ANN-ICA and ANN-GWO for Crop Yield Prediction, In: 2020 RIVF International Conference on Computing and Communication Technologies (RIVF), (2020) pp. 1-5., 5 p.
- [BB-22] Beszedes Bertalan; Sáfár Attila: Célgép építés I., Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem (2020), 111 p., ISBN: 9789634491965
- [BB-23] Beszedes Bertalan: Akusztikai ismeretek fejlesztése: Hangszóró építés, Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Alba Regia Műszaki Kar (2020), 129 p., ISBN: 9789634492016

- [BB-24] Bertalan Beszédes; Tamás Egressy: Measurements with a Non-Invasive Pulse oximetry Module, In: Orosz, Gábor Tamás (szerk.) 10th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas (AIS 2015): AIS 2015, Székesfehérvár, Magyarország: Óbudai Egyetem, (2015) pp. 33-37. Paper: 8, 5 p.
- [BB-25] Péter Udvardy; Bertalan Beszédes. Educational application of LEGO Mindstorms EV3 system by using different simulation environments. In: Szakál, Anikó (szerk.) 15th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas organized in the frame of Hungarian Science Festival 2020. Székesfehérvár, Magyarország: Óbudai Egyetem, (2020) pp. 133-136. 4 p.
- [BB-26] Udvardy, Péter; Beszédes, Bertalan; Tóth, Bence; Földi, Ádám; Botos, Ádám. Simulation of obstacle avoidance of an UAV. In: Rudolf, Andoga; Ladislav, Főző New Trends in Aviation Development 2020: The XV. International Scientific Conference. (2020) pp. 245-250. 6 p.
- [BB-27] Beszédes Bertalan. Szenzorok és aktuátorok II. Székesfehérvár, Magyarország: Óbudai Egyetem, Alba Regia Műszaki Kar (2020), 128 p. ISBN: 9789634492139
- [BB-28] Nikoletta Tolner; András Dávid; Bertalan Beszédes: Examination of digital circuits with simulation and measurement, In: Orosz, Gábor (szerk.) AIS 2018 - 13th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas, Székesfehérvár, Magyarország: Óbudai Egyetem, Alba Regia Műszaki Kar, (2018) pp. 36-41., 6 p.
- [BB-29] György Györök; András Dávid; Nikoletta Tolner; Bertalan Beszédes; Dániel Cseh: Supervision of the operation of digital circuits by Embedded Microcontroller, In: Orosz, Gábor (szerk.) AIS 2018 - 13th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas, Székesfehérvár, Magyarország: Óbudai Egyetem, Alba Regia Műszaki Kar, (2018) pp. 29-35., 7 p.
- [BB-30] György Györök; Tihomir Trifonov; Alexander E. Baklanov; Bertalan Beszédes; Svetlana V. Grigoryeva; Aizhan Zhaparova: A Special Robust Solution for Battery Based Power Supply, In: Orosz, Gábor Tamás (szerk.) 11th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas (AIS 2016), Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, (2016) pp. 32-35., 4 p.
- [BB-31] Beszédes Bertalan: Gyártási folyamatok és körülmények nyomon követése hőkamera alkalmazásával, Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem (2019), ISBN: 9789634491729
- [BB-32] György Györök; Bertalan Beszédes: Using Thermal Imaging Cameras to Test Electronical Systems, In: Kádár, Péter; P. Lamacchia, Francesco (szerk.) Proceedings

IEEE International Conference and Workshop in Óbuda on Electrical and Power Engineering : IEEE CANDO-EPE 2018, New York (NY), Amerikai Egyesült Államok : IEEE, (2018) pp. 147-152. Paper: 8, 6 p.

- [BB-33] György Györök; Bertalan Beszédes: Mistakes that can be Made During Thermographic Measurements and How to Avoid them, In: Orosz, Gábor Tamás (szerk.) AIS 2019: 14th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas organized in the frame of Hungarian Science Festival 2019 by Óbuda University, Székesfehérvár, Magyarország: Óbudai Egyetem, (2019) pp. 159-162., 4 p.
- [BB-34] Bertalan, Beszédes; Péter, Udvardy: Microcontroller Based Fuzzy Control System for Air Quality Controlling, In: Orosz, Gábor Tamás (szerk.) AIS 2019: 14th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas organized in the frame of Hungarian Science Festival 2019 by Óbuda University, Székesfehérvár, Magyarország: Óbudai Egyetem, (2019) pp. 48-53., 6 p.
- [BB-35] Bertalan Beszédes: Fast Printed Circuit Board Prototype Production Line in Educationan Environment, In: EEITE2019, (2019) Paper: 1, 10 p., ISSN: 2654-2099
- [BB-36] Beszédes Bertalan: Elektronikai gyártás és tesztelés – CAD/CAM szoftvercsomag, Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Alba Regia Műszaki Kar (2018), 129 p., ISBN: 9789634492023
- [BB-37] Beszédes Bertalan: Az Eagle - Egyszerűen Alkalmazható Grafikus Nyáktervező, Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Alba Regia Műszaki Kar (2017), 95 p., ISBN: 9789634491507
- [BB-38] Beszédes Bertalan: Elektronikusan támogatott gyors prototípus tervezés és gyártás, Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Alba Regia Műszaki Kar (2019), 42 p., ISBN: 9789634491514
- [BB-39] Beszédes Bertalan: Elektronikai technológia – Számítógéppel segített áramkörtervezés, Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem (2015), 51 p., ISBN: 9789634491521
- [BB-40] Beszédes Bertalan; Sáfár Attila; Széll Károly: Szenzorok és aktuátorok I., Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem (2020), 112 p., ISBN: 9789634491972
- [BB-41] Beszédes Bertalan: Szenzorok és aktuátorok III., Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem (2020), 114 p., ISBN: 9789634492108
- [BB-42] Bertalan Beszédes: Electronic Design and Fast Prototipe Production - ECAD/ECAM, Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Alba Regia Műszaki Kar (2019), 56 p., ISBN: 9789634491507

- [BB-43] Beszédes Bertalan: Végfelhasználói igények megjelenése az energiateljesítmény hatékonyságának és a termék megbízhatóságának növelése érdekében, Biztonságtudományi Szemle 2: 3 pp. 77-88., 12 p. (2020)
- [BB-44] Bertalan Beszédes; Attila Sáfár; Péter Udvardy; György Györök. Appearance of End User Needs to Increase Energy Efficiency and Product Reliability. In: Szakál, Anikó (szerk.) 15th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas organized in the frame of Hungarian Science Festival 2020. Székesfehérvár, Magyarország: Óbudai Egyetem, (2020) pp. 68-72., 5 p.
- [BB-45] Bertalan Beszédes: Reliable Presence and Intrusion Detection with Collaborative Sensor Modules in Electronic Property Protection Systems, In: Szakál, Anikó (szerk.) 2019 IEEE 17TH WORLD SYMPOSIUM ON APPLIED MACHINE INTELLIGENCE AND INFORMATICS (SAMI 2019), Herlany, Szlovákia: IEEE, (2019) pp. 354-360., 7 p.
- [BB-46] Bertalan Beszédes: Elektronikus vagyónvédelmi rendszerek lehetséges kiegészítő funkciói: Possible additional features of electronic property protection systems, BÁNKI KÖZLEMÉNYEK 1: 3 pp. 49-55. Paper: 75, 7 p. (2018)
- [BB-47] Bertalan, Beszédes ; György, Györök. Photovoltaic Panel Failure Prediction Using a Thermal Imaging Camera. In: Csuka, Ildikó; Simon, Gyula (szerk.) AIS 2021-16th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas – Proceedings. Székesfehérvár, Magyarország : Óbudai Egyetem (2021) pp. 59-63. , 5 p.

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: Általános értelemben vett megbízhatóság	15
2. ábra: A hiba szintjei	18
3. ábra: A hiba terjedése	19
4. ábra: Konstruktív technikák	22
5. ábra: A megbízhatóság növelésének módjai	24
6. ábra: TMR architektúra	25
7. ábra: Szekvenciális TMR architektúra	26
8. ábra: Logikai kapukból felépített szavazó áramkör	27
9. ábra: Three-state-es bufferekből felépített szavazó áramkör	28
10. ábra: Műveleti erősítővel felépített szavazó áramkör	29
11. ábra: Technológiai szavazó megvalósítása MOSFET-ekkel	30
12. ábra: Középtérték szavazó működési elve	31
13. ábra: Hardver redundancia megvalósítása	33
14. ábra: Idő redundancia megvalósítása	33
15. ábra: Hibrid idő és hardver redundancia megvalósítása	34
16. ábra: Idő és hardver redundancia együttes alkalmazása	35
17. ábra: Tartalékos rendszer általános architektúrája	37
18. ábra: Tartalékolt TMR architektúra	40
19. ábra: Triplex-duplex redundáns architektúra	41
20. ábra: Sift-out redundáns architektúra	42
21. ábra: Megbízhatóságot növelő eljárások	43
22. ábra: Külső feszültségforrásról táplált tápegység blokkvázlata	45
23. ábra: Külső feszültségforrásról táplált moduláris tápegység blokkvázlata	45
24. ábra: Külső vagy fotovoltaikus feszültségforrásról táplált moduláris tápegység blokkvázlata	46
25. ábra: Redundáns felépítésű tápegység blokkvázlata	48
26. ábra: Külső feszültségforrásból táplált, redundáns, moduláris felépítésű tápegység blokkvázlata	50
27. ábra: Külső feszültségforrásból táplált, redundáns, moduláris felépítésű tápegység modellje	51
28. ábra: Külső feszültségforrásból táplált, moduláris tápegység kapcsoló mátrix struktúrája	52
29. ábra: Redundáns felépítésű, fotovoltaikus feszültségforrás modellje	52
30. ábra: Fotovoltaikus és külső feszültségforrásból táplált, redundáns, egyszerűsített felépítésű, moduláris tápegység blokkvázlata	53

31. ábra: Külső feszültségforrásból táplált, egyszerűsített felépítésű, moduláris tápegység kapcsoló mátrixának struktúrája	54
32. ábra: Redundáns tápmodul mérési koncepciója	56
33. ábra: Tápvonalban elhelyezett mérőpontok	56
34. ábra: Tápegység kimeneti feszültségének hibáinak jelleggörbéi	57
35. ábra: Feszültségtüske után a kimeneti feszültség visszatér normál állapotba	58
36. ábra: Feszültségtüske után a kimeneti feszültség továbbra is a normál értéknél magasabb szinten marad	58
37. ábra: A kimeneti feszültség egy feszültségugrás után stabilan egy a normál szintnél magasabb értéken marad.....	58
38. ábra: Negatív feszültségtüske után a kimeneti feszültség visszatér normál állapotba	58
39. ábra: A kimeneti feszültség egy feszültségesés után stabilan egy a normál szintnél alacsony értéken marad.....	58
40. ábra: Instabil kimeneti feszültség 1	58
41. ábra: Instabil kimeneti feszültség 2.....	59
42. ábra: Instabil kimeneti feszültség 3.....	59
43. ábra: A tápegység mérésének és vezérlésének megoldása	59
44. ábra: Megszakítást kérő alrendszer	61
45. ábra: Redundáns MOSFET-ekkel felépített hibatűrő kapcsolóelem.....	62
46. ábra: MOSFET meghajtó áramkör	62
47. ábra: Bekapcsolási tranzienseket csillapító MOSFET meghajtó áramkör	63
48. ábra: A fejlesztési környezet	63
49. ábra: Nyitott csatorna ellenállás és a hőmérséklet összefüggése.....	64
50. ábra: Az elektronikusan szabályozható műterhelés kapcsolási rajza.....	65
51. ábra: Az elektronikusan szabályozható műterhelés megvalósítása	65
52. ábra: Mikrokontroller által vezérelt analóg multiplexerek és I/O bővítő modulok.....	66
53. ábra: Redundáns akkumulátor modulok	66
54. ábra: Redundáns akkumulátor töltő modulok.....	67
55. ábra: Redundáns DC/DC konverter modulok.....	67
56. ábra: Kapcsolómátrix megvalósítása relékkel.....	68
57. ábra: Kapcsoló mátrix megvalósításának elve: a) két bemenet, egy kimenet; b) két bemenet, két kimenet; c) két bemenet, három kimenet	68
58. ábra: Többségi szavazó delta algoritmusának folyamatábrája	71
59. ábra: Szoftveres többségi szavazást megvalósító modell áramkör.....	72

60. ábra: A főprogram folyamatábrája	74
61. ábra: Csere alprogram folyamatábrája.....	76
62. ábra: CON-MON architektúra	79
63. ábra: Duplikált vezérlőegység architektúrális felépítése	80
64. ábra: Az aktív mikrokontroller meghibásodásakor lejátszódó vezérlés átvétel	82
65. ábra: A passzív mikrokontroller meghibásodása	82
66. ábra: Redundáns mikrokontrolleres architektúra külső WDT áramkörökkel.....	83
67. ábra: Duplikált aktív vezérlő ellenőrzött alprogramjának folyamatábrája	85
68. ábra: Duplikált vezérlőegységek hibakezelő eljárása.....	86
69. ábra: Redundáns mikrokontrollert tartalmazó modell áramkör.....	86
70. ábra: Mikrokontrollerek közötti megnövelt megbízhatóságú kommunikáció	88
71. ábra: Az Aktív és a Passzív mikrokontroller közötti kommunikáció.....	89
72. ábra: Fotovoltaikus cellák karakterisztikája.....	91
73. ábra: Napelem panel forgató algoritmus	94
74. ábra: Nap követő algoritmus	95
75. ábra: Szoftveres fény mennyiség mérő algoritmus működési vázlata.....	96
76. ábra: Egytengelyes forgási mechanizmussal rendelkező redundáns napelem panel izometrikus ábrája.....	97
77. ábra: Érzékelő modul felépítésének blokkvázlata	98
78. ábra: Érzékelő elemek: a) Elektromos tér érzékelő szonda; b) Középen megszakított mágneses tér érzékelő szonda; c) Árnyékolatlan elektromágneses tér érzékelő szonda; d) A nyaknál megszakított mágneses tér érzékelő szonda.....	99
79. ábra: Az érzékelő rendszer blokkdiagramja	101
80. ábra: Kiterjesztett érzékelésű, galvanikusan leválasztott rendszerarchitektúra.....	102
81. ábra: Az archiválást végző szubrutin folyamatábrája	104
83. ábra: Az optocsatoló sematikus váza.....	105
84. ábra: CTR degradáció becsült görbéje az üzemidő és az üzemi hőmérséklet függvényében	107
85. ábra: Az optocsatoló modellje	108
86. ábra: Optocsatoló degradációját kompenzáló áramkör felépítése	110
87. ábra: Optocsatoló degradációját kompenzáló áramkör modellje.....	111
88. ábra: Kompenzációs alprogram folyamatábrája.....	112
89. ábra: Digitális potenciométer beállításának algoritmus.....	113

RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

5MR	Quintuple Modular Redundancy - penta moduláris redundancia
7MR	Septuple Modular Redundancy - hepta moduláris redundancia
ADC	Analog to Digital Converter - analóg digitális konverter
BITS	Built In Self Test - beépített öndiagnosztikai eljárás
BJT	Bipolar Junction Transistor - bipoláris tranzisztor
CAN	Controller Area Network - vezérlők fedélzeti hálózata
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor - komplementer fém-oxid félvezető
CMRR	Common Mode Rejection Ratio - közös módusú zajelnyomási tényező
CON-MON	Control-and-Monitor - vezérlés és monitorozás
CTR	Current Transfer Ratio - áramátviteli tényező
DMR	Double Module Redundancy - dupla moduláris redundancia
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory - elektronikusan törölhető programozható csak olvasható memória
EM	Electro Magnetic - elektromágneses
EMC	Electro Magnetic Interference - elektromágneses interferencia
EMIRR	Electromagnetic Interference Rejection Ratio - elektromágneses interferencia elnyomási tényező
ENSZ	Egyesült Nemzetek Szervezete - United Nations
FIT	Failure Rate - meghibásodási valószínűség
FPA	Field-Programmable Analog Array - felhasználás helyén programozható analóg áramkörmátrix
FPGA	Field-Programmable Gate Array - felhasználás helyén programozható logikai kapumátrix
GDP	Gross Domestic Product - bruttó hazai össztermék
I ² C	Inter-Integrated Circuit - IC közötti kommunikáció
ICSP	In Circuit Serial Programming - áramkörön belüli programozás
IR	Infra Red – infravörös
JTAG	Joint Test Action Group
LPE	Liquid Phase Epitaxy - folyékony fázisú epitaxia
LSB	Least Significant Bits - legkisebb helyiértékű bit
MEMS	Micro ElectroMechanical Systems - mikro elektromechanikus rendszerek
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor - fém oxid félvezető térvezérlésű tranzisztor

MPPT	Max Power Point Tracking - maximális teljesítményű munkapont követés
MTBF	Mean Time Between Failure - meghibásodások közötti átlagos idő
MTFF	Mean Time to First Failure - első meghibásodásig átlagosan eltelt idő
MTTF	Mean Time To Failure - meghibásodásig átlagosan eltelt idő
MTTF _D	Mean Time To Dangerous Failure - veszélyes meghibásodásig átlagosan eltelt idő
MTTR	Mean Time To Repair - átlagos javítási idő
NMR	N-Modular Redundancy - N moduláris redundancia
PSRR	Power Supply Rejection Ratio - tápszaj elnyomási tényező
RF	Radio Frequency - rádiófrekvenciás
RTC	Real Time Clock - valós idejű óra
SEB	Single-Event Burnout - sugárzás hatására bekövetkező meghibásodás
SEE	Single-Event Effect - sugárzás hatására bekövetkező esemény
SEGR	Single-Event Gate Rupture - sugárzás hatására bekövetkező kapuáramkörön belüli szakadás
SEL	Single-Event Latch-Up - sugárzás hatására bekövetkező kapuáramkörön belüli rövidzárlat
SEU	Single-Event Upset - sugárzás hatására bekövetkező logikai szint változás
SPI	Serial Peripheral Interface - szinkron soros kommunikációs interfész
SRAM	Static Random Access Memory - statikus tetszőleges hozzáférésű memória
TFC	Total Final Consumption - teljes energiafogyasztás
TMR	Triple Module Redundancy - tripla moduláris redundancia
TPES	Total Primary Energy Supply - teljes primer energiaellátás
UN	United Nations - Egyesült Nemzetek Szervezete
USART	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter - univerzális szinkron/aszinkron adó/vevő
WDT	Watch Dog Timer- biztonsági időzítő áramkör

ALKALMAZOTT SZIMBÓLUMOK

A	diffúziós áramhoz kapcsolódó konstans
AMUX	az analóg multiplexer működését írja le
A_{MUX}	az analóg multiplexert vezérlőjele
A_t	a rendszer rendelkezésre állásának valószínűsége
B	tértöltés rekombinációhoz kapcsolódó konstans
B_n	a logikai bemenetek értékei
r_m és r_{m+n}	a vizsgált áramkörü feszültség minimális és maximális határértéke
b_n	az analóg bemenetek értékei
C_{GD}	MOSFET gate-drain kapacitása
CTR_f	az aktuális áramátviteli tényező
CTR_i	a kezdeti áramátviteli tényező
F_t	a meghibásodási hajlandóság
f_{ts}	a technológiai szavazó működése
f_{ks}	a középérték szavazó működés
\bar{H}	hibajel vektor
iD	a pillanatnyi drain áram
If	nyitóirányban előfeszített P-N átmenet árama
I_{in}	bemeneti áram
I_{inn}	bemeneti áram mátrix
I_{mp}	munkaponti áram
I_{out}	kimeneti áram
I_{outn}	kimeneti áram mátrix
I_p	a fotodetektor árama
I_{sc}	rövidzárási áram
k	a Boltzmann állandó
k	a meghibásodások maximális száma
k_n	konstans érték
K	az optikai út átviteli tényező
K_a	kimenetet előállító algoritmus
K_n	n bemenetű kiértékelő
K_{kn}	n csatornás kapcsoló
KV	a kiértékelő és vezérlő modul működésének leírása

m_n	jelek súlyozása
MPP	maximális teljesítményű munkapont
MTBF	meghibásodások közötti átlagos idő
MTTR	átlagos javítási idő
n	a redundáns modulok száma
n_{be}	a bemenő jelek száma
O	az n bemenetű összehasonlító mátrix működésének leírása
$\rho(t)$	a pillanatnyi teljesítményvesztés
P_{max}	maximális teljesítmény
q	az elektron töltése
Q_a	az analóg kimenet értéke
Q_d	a digitális kimenet értéke
R	a fotodetektor optikai ellenállása
R	a rendszer százalékban kifejezett redundanciája
$R_{DS(on)}$	MOSFET nyitott drain-source csatornájának ellenállás
$R_{DS(on)125}$	a nyitott drain-source csatorna ellenállásra 125°C-on
$R_{DS(on)25}$	a nyitott drain-source csatorna ellenállásra 25°C-on
r_{min_n}	analóg referenciafeszültség minimuma
R_{min}	az ellenállás maximális értéke
r_{max_n}	analóg referenciafeszültség maximuma
R_p	a fotodetektor ellenállása
R_t	működőképességi hajlandóság
R_{th}	hidegtartalék működőképességi hajlandósága
R_{tm}	melegtartalék működőképességi hajlandósága
s	kapcsolóelemet vezérlő jel
S	a szavazómodul működésének leírása
S_k	az n mebenetű kapcsoló és szavazó modul működésének leírása
S_n	n bemenetű kapcsolóelem
T	a hőmérséklet Celsius fokban
$T_{ep(on)}$	az epitaxiális réteg hőmérsékleti együtthatója
T_k	a hőmérséklet Kelvin fokban
U_{DS}	MOSFET Drain-source feszültsége
U_f	nyitóirányban előfeszített P-N átmeneten eső feszültség

U_{GS}	MOSFET gate-source feszültsége
U_{in}	bemeneti feszültség
U_{inn}	bemeneti feszültség mátrix
$U_{mért}$	a visszacsatolt feszültség értéke
U_{opto}	az optocsatoló kimeneti feszültségének értéke
U_{out}	kimeneti feszültség
U_{outn}	kimeneti feszültség mátrix
U_{ref}	a referenciafeszültség értéke
v_V	vezérlő kimeneti jele
V	a vezérlőmodul működésének leírása
V_{mp}	munkaponti feszültség
V_{oc}	terheletlen kimeneti feszültség
V_{RF_p}	az RF feszültség csúcserőssége
$W_{be\ max}$	a bemenő jelek súlyainak maximális értéke
W_{be}	a bemenő jelek súlyainak tömbje
X_{be}	a bemenő jelek tömbje
X_{ki}	súlyozott kimeneti átlagérték
α	előző fokozat kimeneti értéke
$\bar{\alpha}$	kimeneti értékek vektora
$\overline{\alpha_{KM}}$	kapcsoló és vezérlő mátrix c
$\overline{\alpha_A}$	aktív modulok kimeneti vektora
$\overline{\alpha_T}$	tartalék modulok kimeneti vektora
β	kimeneti fokozat erősítése
Δ_{CTR}	az áramátviteli tényező változása
ΔR_{max}	az ellenállásváltozás maximális tartománya
ΔT	hőmérséklet emelkedés
ΔV_{OS}	az egyenáramú feszültségeltolódás
$\Delta\beta$	a kimeneti fokozat erősítésének változása
$\Delta\eta$	a quantum hatásfok változása
η	quantum hatásfok