

Optocsatolók degradációjának kompenzációja

Compensation for degradation of optocouplers

Beszédes Bertalan

Óbudai Egyetem, Alba Regia Műszaki Kar, Székesfehérvár, Magyarország
beszedes.bertalan@amk.uni-obuda.hu

Összefoglalás — 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 degradáció néven is ismert. Néhány esetben a LED által kibocsátott fény teljesítménye az idő előrehaladtával növekedhet. Ez a jelenség a p-n átmenet elektrolumineszcenciájának velejárója, és mértéke előre meg nem jósolható. A túlzott mértékű degradáció az optimális műkö-déstől való eltérést vagy katasztrofális rendszerhibát okozhat. Ez az cikk a robusztus, mik-rokontroller alapú kompenzáló megoldást mutat be a vázolt problémára.

Kulcsszavak: optocsatoló, degradáció, LED, fényerő, megbízhatóság, stabilitás, kompenzáció, redundancia, fotodióda, fototranzisztor, optikai közeg, kimeneti fokozat, galvanikus elválasztás, izoláció, digitális potenciométer

Abstract — An optocoupler is an optoelectronic device based on a pair of light-emitting and light-detecting components. The attenuation in the emitted light also affects the output signal of the component. This change in gain is also known as CTR degradation, although in some cases the light output emitted may increase over time. This phenomenon is inherent in the electroluminescence of the p-n junction and its extent is unpredictable. Excessive degradation can cause deviations from an optimal operation or a catastrophic system failure. This paper presents a robust, microcontroller-based compensating solution to the outlined problem.

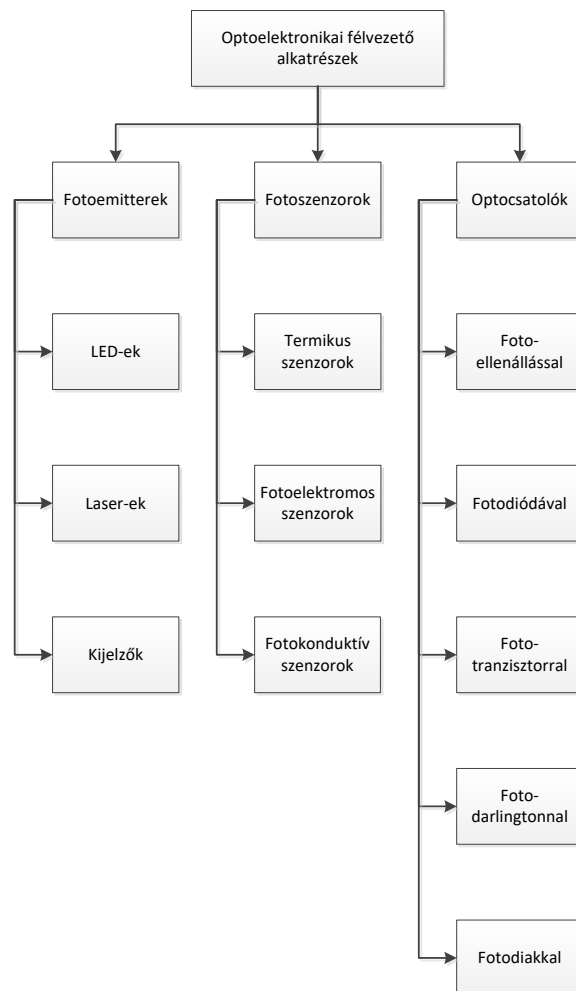
Keywords: optocoupler, degradation, LED, brightness, reliability, stability, compensation, redundancy, photodiode, phototransistor, optical medium, output stage, galvanic isolation, isolation, digital potentiometer

1 BEVEZETÉS

Az optoelektronikus komponenseket által kibocsátott fény az elektromágneses spektrum látható vagy infravörös régióba esnek. Az optoelektronikai eszközök elektromos-optikai vagy optikai-elektromos átalakítók, ha mindkét funkció jelen van az eszközben, akkor optocsatolókról beszélünk (1. ábra). [1]

1.1 Fény kibocsátó diódák degradációja

Az optocsatoló olyan elektronikai alkatrész, amely két galvanikusan elválasztott áramkör között tipikusan IR-fény segítségével továbbítja az elektromos jeleket. Az optocsatolókat optoizolátoroknak vagy optikai izolátoroknak is nevezik. Ezeknek az eszközöknek a megbízhatóságát szinte magától értetődőnek tartják. Az alfejezetben a hangsúly a LED-ek és az optocsatolók adaptív degradációs kompenzációján van.

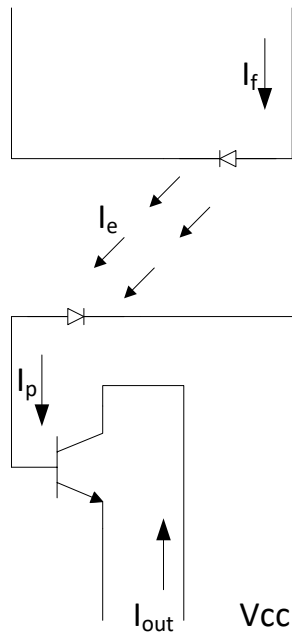


1. ábra: Optikai félvezető alkatrészek

Az optocsatolók általános típusa egy fényforrásból (LED), egy dielektromos akadályból és egy érzékelőből (fototranzisztor) áll egy tokozáson belül (2. ábra). Az optocsatolók mind digitális, mind analóg jelek továbbítására alkalmasak.

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 (LPE - Liquid Phase Epitaxy) – 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 elektromágneses hullámok a p-n átmeneten keresztül hagyják el a felületet. A LED paramétereit a chip geometriai kialakítása is befolyásolja. [2]



2. ábra: Az optocsatoló sematikus váza

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 előre-haladtával egy öngerjesztő folyamattá válik.

A chip meghibásodásának fő okát a tokozás okozza. Az optocsatoló burkolatának - a LED és a fényérzékelő eszköz, valamint a köztük lévő térrész burkolatának - átlátszónak kell lennie. Ha az átlátszó anyagnak és az IC-t tokozó anyagnak nem azonos a hőegyütthatója, akkor ez számos problémát válthat ki, például a tokozás és a bondolás közötti feszültség okozta bondolás leszakadást, a mechanikai igénybevétel következményeként, az átlátszó epoxi elválását a szubsztráttól és a hajlító feszültség hatására bekövetkező átlátszó epoxi repedését. [3]

Kísérleti eredmények alapján [4] 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 öregítési teszteredményeinek jelentős varianciát mutatnak. A tesztek alapján a korai életciklusban bekövetkező hatásokat nehéz értelmezni, ez az eltérő gyártási sorozatokban 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 élet-tartam 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 üzemi működés tesztelése reális módszer [5].

1.2 Az 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. Az áramátviteli tényező változását az alábbi kifejezés szemlélteti:

$$\Delta CTR = CTR_i - CTR_f \quad (1)$$

, 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.

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

$$I_f(U_f) = Ae^{\frac{qU_f}{kT_k}} + Be^{\frac{qU_f}{2kT_k}} \quad (2)$$

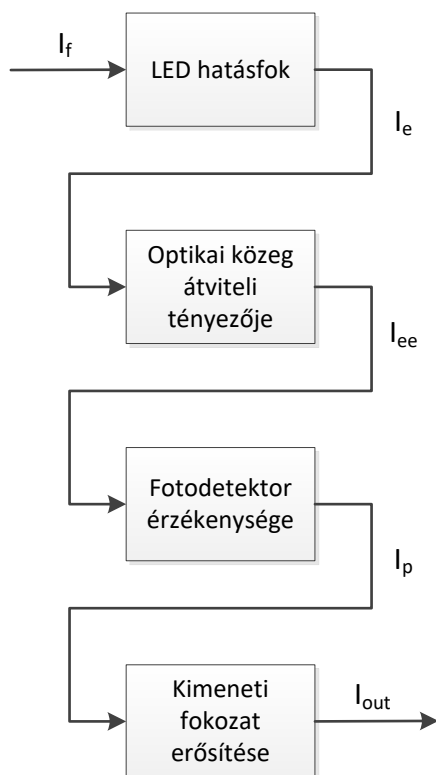
, ahol I_f a LED-en nyitóirányban folyó áram értéke; U_f a LED-en nyitóirányban eső feszültség értéke; A és B a LED munkapontjától függő konstansok; q az elektron töltése; k Boltzmann állandó és T_k a hőmérséklet Kelvin fokban.

Idővel, állandó nyitóirányú áram mellett a radiatív diffúziós áram csökken - az A paraméter érték-ének 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. [6]

A 3. ábra látható rendszermodell, egy lineáris tartományban üzemeltetett optocsatoló alapvető paramétereit szemlélteti. A bemeneti áram és a kimeneti áram kapcsolata a következő:

$$CTR = \frac{I_{out}}{I_f} 100 [\%] = KR_p \eta(I_f, t) \beta(I_p, t) \quad (3)$$

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 határozunk 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.



3. ábra: Az optocsatoló modellje

Állandó bemeneti nyitóirányú áramnál – amikor K és R_p is állandó –, a fenti egyenlet (3) normált formája a következőképpen írható fel:

$$\frac{\Delta CTR}{CTR} = \frac{\Delta \eta}{\eta} + \frac{\Delta \eta}{\eta} \frac{\delta \ln \beta}{\delta \ln I_p} + \frac{\Delta \beta}{\beta} \quad (4)$$

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. [7] Kísérleti alapon meg lehet állapítani a lebomlás várható statisztikai értékét egy adott típusú készülék esetében,

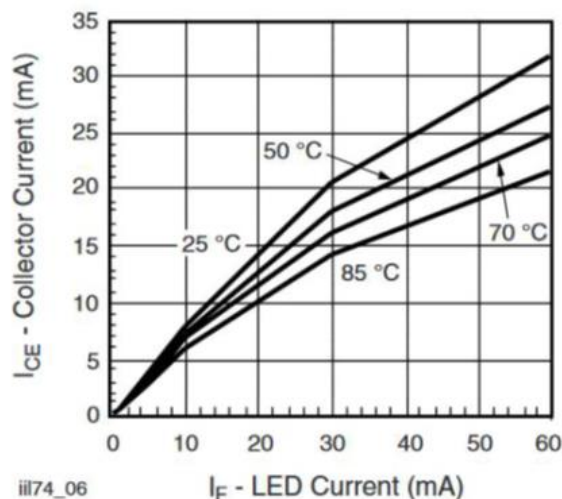
azonban ez a görbe teljesen más akár csak egy másik sorozatban gyártott alkatrésznél, és az ugyanazon sorozatban gyártott alkatrészek esetében is különbözhet. A LED-ek által emittált fotonok fluxusváltozása – állandó nyitóirányú árammal vezérelve – sem számítható ki pontosan, ezért a CTR degradáció sem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

2 ÁRAMKÖRI PROTOTÍPUS REALIZÁCIÓJA

2.1 Hardverkörnyezet 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 (4. ábra), a LED áramsűrűségétől is és az alkatrész degradáltsági fokától is. [8]

Az optocsatoló ofszet hibáját kompenzálni kell. A megbízhatóság olyasmiről, amit „beépíteni” kell, és nem „kitesztelni”. Az optocsatoló kompenzálásához pontos referencifeszültség használata szükséges. Adott időközönként az optocsatoló bemenetét ezzel a referencifeszültséggel meghajtva és a vizsgált alkatrész kimeneti feszültségértékét mérve, megkapható az feszültségeltolódás értéke. A feszültségforrások közötti átkapcsolás történhet analóg multiplexerrel – ezt egy konstans $n \times 10$ Ohm kontaktellenállású kapcsolóként szükséges figyelembe venni –, vagy egy arányozott érintkezővel szerelt relével. Az elkészített modelláramkörben egy Hamlin relé került alkalmazásra – a maximális kontaktellenállása 0,200 Ohm.

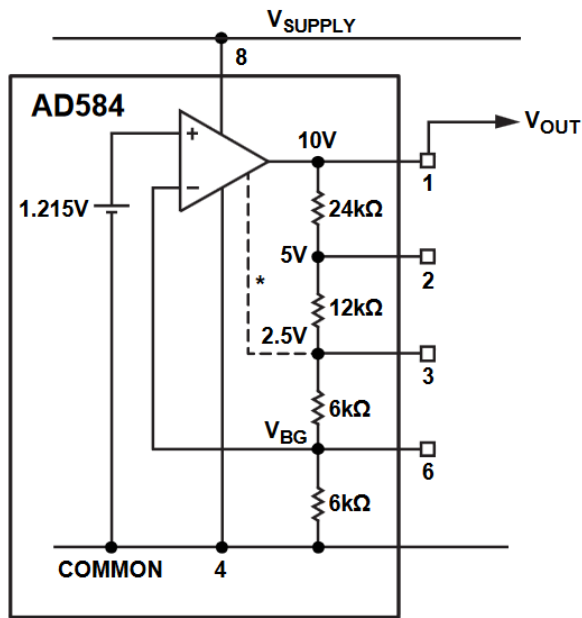


4. ábra: A LED munkapontjának eltolódása a hőmérséklet hatására

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. Stabilitását tekintve a maximális kimeneti feszültségváltozás 15ppm/°C az üzemi

hőmérséklettartományban. Az alkatrész felépítését az 5. ábra mutatja be.



5. ábra: Referencia feszültséget szolgáltató áramkör blokkvázlata [10]

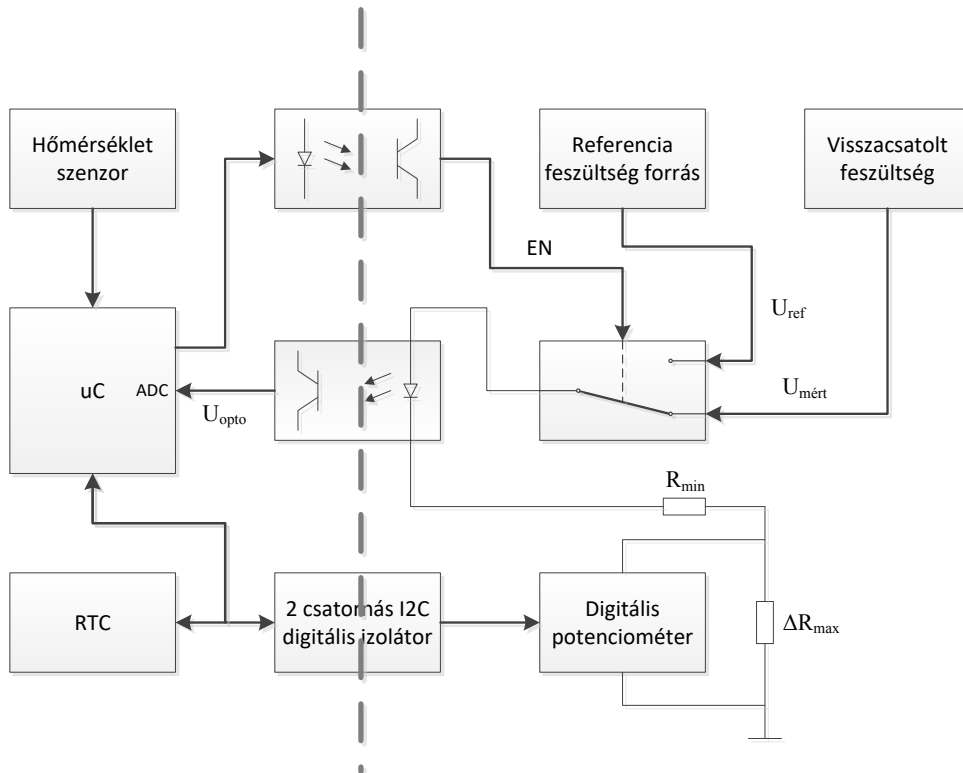
A fejlesztés során rugalmasságot biztosított a négy programozható kimeneti feszültsége: 10V, 7,5V, 5V és

2,5V, és könnyen használható, mivel nincs szükség jelentős mennyiségű külső alkatrészekre. A legstabilabb feszültséget a 10V-os kimeneten tapasztaltam, 11V-12V tápfeszültség esetében, valamint 0-25°C környezeti hőmérséklet 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 6. ábra szemlélteti, ahol ΔR_{max} az ellenállás változásának tervezett maximális értéke, R_{min} az optocsatolók áramkorlátozó ellenállásának minimális értéke, U_{ref} a referenciafeszültség értéke, $U_{mért}$ a visszacsatolt feszültség értéke, U_{opto} pedig az optocsatoló kimeneti feszültségének értéke.

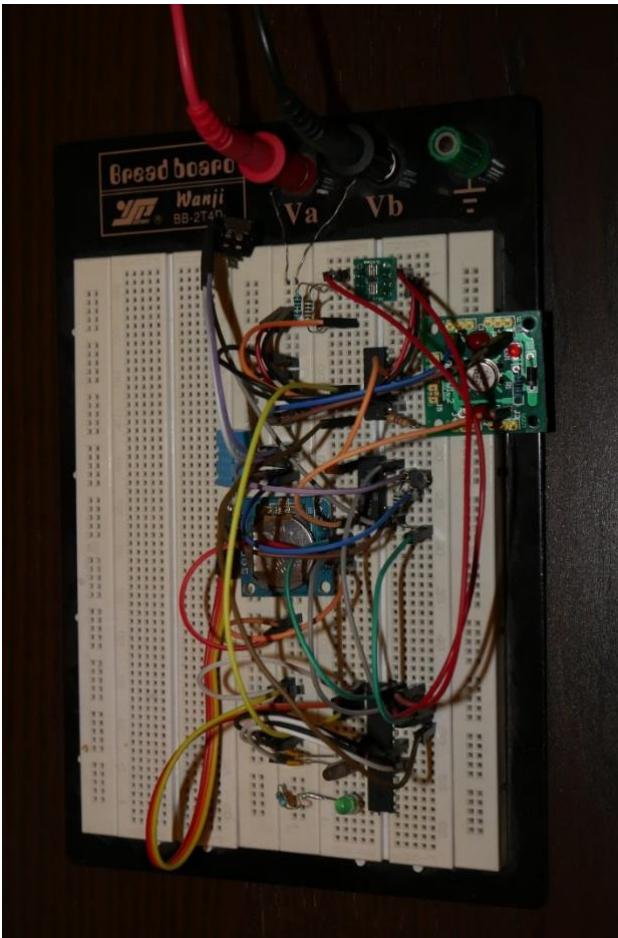
A galvanikus leválasztás miatt a vezérlőjelek összekapcsolására is szükség van optocsatolóra. Jelen kiépítésben ez kimerül a relé vezérlésére használt digitális jelben, amely megoldható egy általános optocsatolóval, valamint szükség van még két digitális jel átviteléhez a programozható ellenállás vezérléséhez. Ennek az alkatrésznek az I²C busz sebességéhez illeszkednie kell, amely teljes sebességben 400 kbit/s lehet. Az áramkör modellje az 7. ábrán látható.



6. ábra: Optocsatoló degradációját kompenzáló áramkör felépítése

A CMOS 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 (FIT) miatt; jobb zajvédelem; szélesebb hőmérsékleti tartomány; lehetővé teszi a tervezők számára, hogy nagyobb sávzélességet érjenek el egyben, kisebb méretű áramköröket valósítsanak meg.



7. ábra: Optocsatoló degradációját kompenzáló áramkör prototípusa

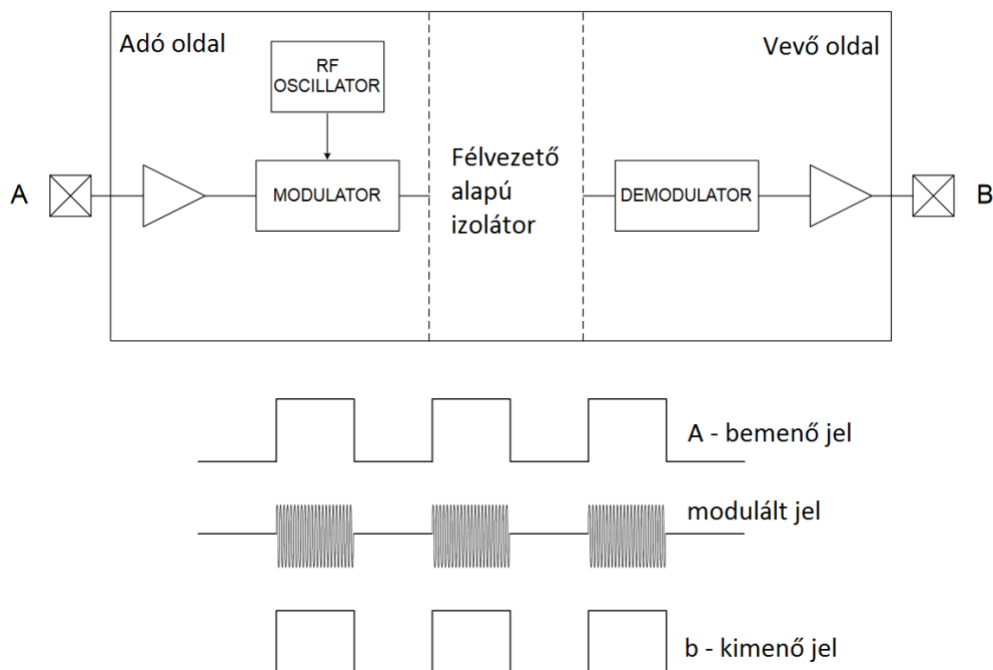
Például az ADUM125x egy mágneses leválasztási technológiát alkalmazó IC, amely egy 1MHz-ig terjedő frekvenciatartományban használható és teljes izolációt biztosít az I²C interfészt támogatásával. Eltérő technológiájú megoldás lehet például az Si86xx integrált áramkör család, ami RF izoláción alapul, és támogatja az I²C buszt 1,7 MHz-ig. Az utóbbi csatolási elv kifejtése a 8. ábrán követhető nyomon. Mindkettő megoldás robusztus működést tesz lehetővé zord ipari alkalmazásokban esetén is.

2.2 Szoftveres megvalósítás

Az optocsatoló kompenzációs alprogram meghívása a főprogramból történik, előre meghatározott feltételek alapján. A feltétel lehet egy bizonyos üzemóra elérése vagy a hőmérséklet megváltozása is. Amint a 6. ábrán látható, hőmérsékletérzékelő és valós idejű óra (RTC) 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 (9. ábra) meghívja. [9]

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 10. ábra analógiájára.

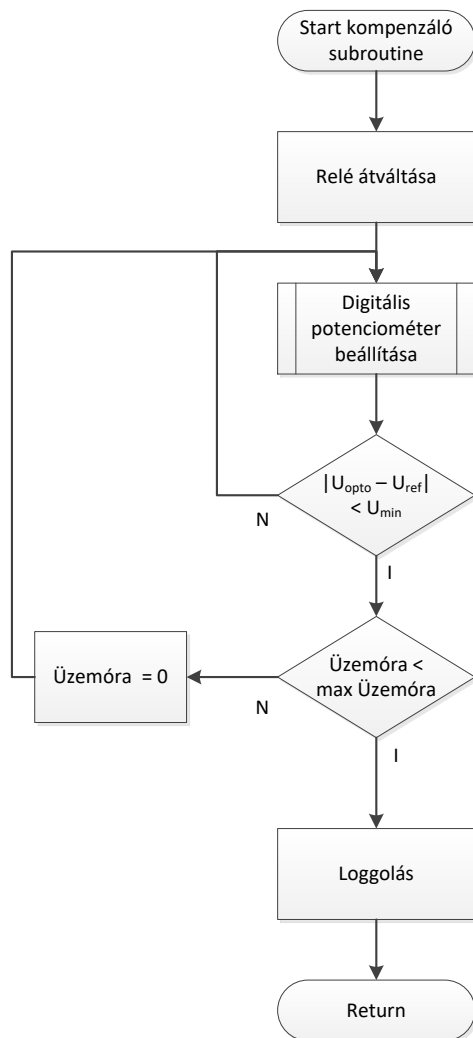


8. ábra: Rádiófrekvenciás izoláción alapuló galvanikus leválasztás

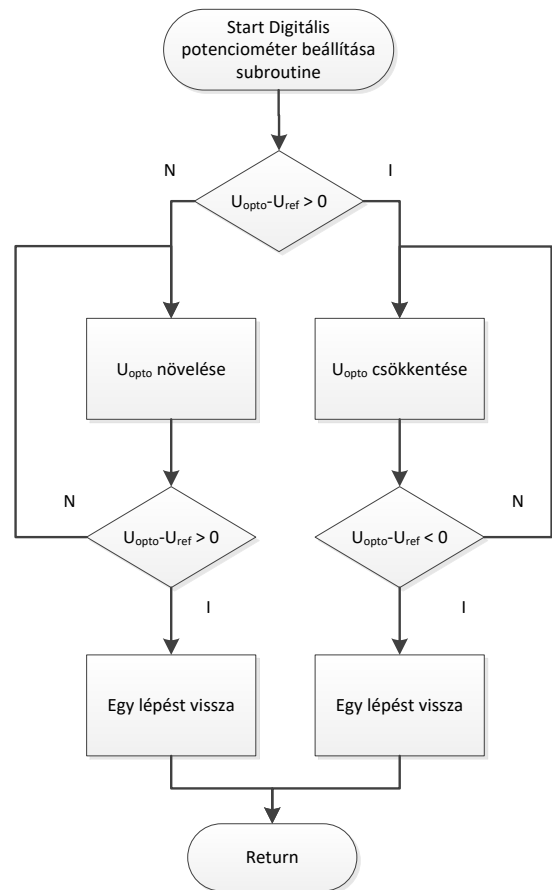
A gyakorlatban, áramkörü konstrukciótól függően ez lehet akár a zajszint alatt is. Az alprogramból való visszatérés után, az optocsatoló kompenzálásra került. A relé átkapcsolásával, a referenciafeszültség leválik az optocsatoló be-menetéről, és a mérendő jel csatlakozik a helyéhez, a visszacsatoló hurok 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.

Ez a rutin futtatható a tápegység vezérlőjén kívül is, de kis számítási igénye miatt célszerű be-ágyazni 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.



9. ábra: Kompenzációs alprogram folyamatábrája



10. ábra: Digitális potenciométer beállításának algoritmus

3 ÖSSZEFOGLALÁS

Az optocsatolók CTR degradációjának fő oka a beépített LED kvantumhatékonyságának csökkenése. A CTR degradációjának másodlagos okai az átlátszó epoxi öregedése, a fotodetektor érzékenységének csökkenése és a kimeneti erősítő erősítésének változása. A CTR degradálódásának sebessége és mértéke a gyártási technológiától és paramétereiktől, valamint a felhasználási körülményektől is függ, ezért aktuális értéke a gyakorlatban kiszámíthatatlan. Ezeket a változásokat kompenzálni kell egy nagy megbízhatóságú és nagy pontosságú áramkörön, ahol a precíz analóg jelcsatolás elengedhetetlen. Erre a célra alkalmazható a bemutatott robusztus megoldás. A javasolt architektúra némi extra hardver- és szoftverredundanciát igényel, mégis alacsony költséggel megvalósítható. A szerző véleménye szerint, a technika hasznos lehet polgári és ipari alkalmazásokban egyaránt.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Biijenescu, T. I. Degradation and reliability problems of optocouplers. Proc. of Annual Semiconductor Conference - CAS '93, Sinaia, Romania. 1993.
- [2] Bergh, A. A., Dean, P. J. Light-emitting diodes. Clarendon Press. 1976
- [3] Amerasekera. E. A., Campbell, D. S. Failure mechanisms in semiconductor devices. J. Wiley & Sons. Chichester. 1987
- [4] 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.

- [5] 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
- [6] Gage. Stan I. Hewlett-Packard. Optoelectronics applications manual 1977
- [7] Ueda, O. Reliability and degradation of III-V optical devices. Artech House. Inc. Norwood, MA. 1996.
- [8] Györök, György. Programozható analóg áramkörök mikrovezérlő környezetben. Székesfehérvár, Magyarország: Óbudai Egyetem (2013), 165 p. ISBN: 9786155018978
- [9] 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
- [10] Analog Devices. Pin Programmable Precision Voltage Reference. 12 p. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD584.pdf>