

Kisfogyasztású érzékelők tervezése

NAGY GERGELY

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Elektronikus Eszközök Tanszék
gregn@freemail.hu

Kulcsszavak: integrált hőmérséklet-érzékelők, kisfogyasztású áramkörök, áramreferencia-áramkör

Az áramkörök fogyasztásának csökkentésére alkalmas módszer a használaton kívüli részegységek kikapcsolhatóvá tétele. Lényeges áramfelvétel-csökkenés érhető el, ha mindig csak azok az áramköri elemek fogyasztanak, amelyek éppen valamilyen műveletet végeznek, vagy értéket tárolnak. Analóg áramköröknél bizonyos helyzetekben a kikapcsolás és az újraindítás nem triviális feladat. Jelen munkában egy hőmérsékletfüggő áramreferencia kikapcsolhatóságának és indításának megoldásáról lesz szó. Két, az áramfelvétel minimalizálását segítő megoldást mutatunk be. Az első esetben a kiindulópont egy már létező, de tökéletlenül működő kapcsolat, a másik teljesen önálló fejlesztés.

1. Az integrált hőmérséklet-érzékelők szerepe

Az integrált áramkörök méretcsökkenésével, és bonyolultságuk valamint sebességük növekedésével a hőmérséklet-érzékelők szerepe egyre nő. A további sebességnövelés útjában álló egyik legnagyobb probléma a növekvő disszipáció, amely az áramkör túlmelegedéséhez, és így tönkremeneteléhez vezethet. A modern mikroprocesszorokban elterjedten alkalmaznak hőmérséklet-érzékelőket, amelyek túlmelegedés esetén csökkentik a működési frekvenciát, és így az áramfelvételt is.

Nagy szükség van tehát olyan áramkörökre, amelyek képesek érzékelni és elektromos jellé alakítani környezetük hőmérsékletének értékét. A hagyományos hőmérséklet-érzékelők áram- vagy feszültség-kimenetűek. Ilyen például egy dióda, amelyen ha állandó áramot engedünk át, a rajta eső feszültség (nyitófeszültség) csökken, ha a hőmérséklet növekszik.

Az analóg kimeneti jellel az a probléma, hogy azt mindenképpen digitalizálni kell ahhoz, hogy egy logikai áramkör döntéseket hozhasson a mért értékek alapján, ráadásul a zavarérzékenysége is jelentős.

A hőmérséklettel arányos analóg jelet tehát érdemes az érzékeléshez lehető legközelebb átalakítani valamilyen digitális jellé. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Elektronikus Eszközök Tanszékén megtervezett hőmérséklet-érzékelő [1] frekvencia-kimenetű. Egy hőmérsékletfüggő áramgenerátor áramával arányos frekvenciájú jelet szolgáltat a kimenetén, amely így könnyen feldolgozható digitálisan (1. ábra).

1. ábra
A frekvencia kimenetű szenzor jelének digitális feldolgozása

A szenzor kimenete egy számláló órajele, amely tehát a jel frekvenciájának ütemére számol. Egy párhuzamos betöltésű, sorosan kiléptethető regiszterbe megfelelő periódusonként beolvassa a számláló értékét, majd az egymás után érkező jelek különbségét véve, ismerve a mintavételi időt, kiszámolható a szenzor frekvenciája:

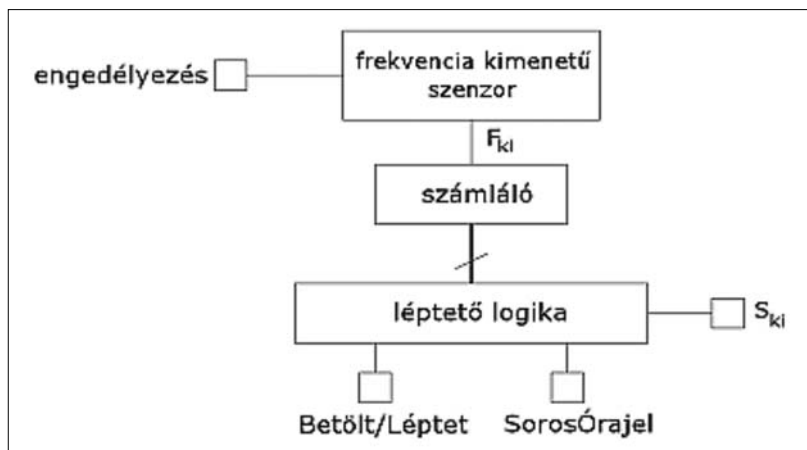
$$f = \frac{S_{ki}(t_1) - S_{ki}(t_0)}{t_1 - t_0}$$

ahol S_{ki} a számlálóból kiolvasott érték, t_0 és t_1 pedig két egymást követő mintavételi időpillanat.

Ez az architektúra tehát különösen alkalmas arra, hogy digitális áramkörökhöz kapcsolódva a környezet hőmérsékletéről adjon azok számára könnyen feldolgozható információt.

2. Az érzékelő működése

A Elektronikus Eszközök Tanszékén nagy hagyományai vannak az integrált áramkörök hőmérsékleti viselkedését elemző kutatásoknak. Ezen munkák során készült el egy disszipátorokból és érzékelőkből álló, má-



rix elrendezésű áramkör. Ebben a disszipáló elemek tetszőlegesen be- és kikapcsolhatóak. A szenzorok segítségével tanulmányozható a hőterjedés a chip felületén. Mivel egyszerre egy adott érzékelő kimenetét figyeljük, adódik az igény, hogy a többi kikapcsolható legyen.

Az áramkör a hőmérséklet érzékelésére egy, a tantervben kifejlesztett eljárást alkalmaz [2]. A hőmérsékletfüggő elem egy áramforrás, amely szándékosan úgy lett kialakítva, hogy felerősítse a hőmérsékletváltozás kiváltotta munkaponti eltolódásokat. Az áramforrás jeléből ezután az áramával arányos frekvenciájú kimeneti jelet állítunk elő [3]. A forrás tranzisztoros kapcsolók által vezérelt módon felváltva tölt fel, illetve sűt ki egy kondenzátort. A kondenzátor feszültsége egy komparátor bemeneti jelét szolgáltatja. A komparátor másik bemenetén, szintén kapcsolók által vezérelve, két referencia feszültség van.

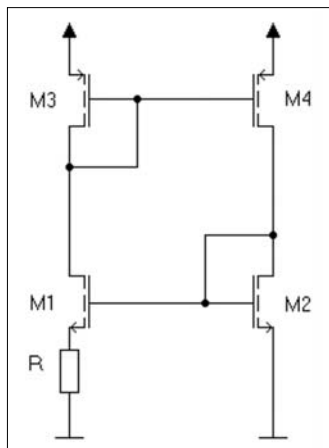
A kapcsolókat úgy vezéreljük, hogy amikor a töltő áram a kondenzátort a magasabbik referenciafeszültség szintjéig töltötte, akkor átkapcsolnak, és onnantól kezdve a hőmérsékletfüggő áram elkezd kisűtni a kondenzátort. Ekkor a komparátorra már a másik, alacsonyabb értékű referenciafeszültség van kapcsolva, így a kondenzátor kisűtése abba fog maradni, amikor annak feszültsége a referenciát eléri. Amikor ez bekövetkezik, az áram újra tölni kezdi a kondenzátort. Így alakul ki egy oszcilláció, amelynek frekvenciája a töltő árammal megegyező irányban változik, hiszen annál gyorsabban töltődik fel, illetve sűt ki a kondenzátor, minél nagyobb az áram.

A komparátor kimenete egyben a teljes kapcsolás kimenete is, és ez a potenciál, illetve az invertáltja vezérlik a kapcsolókat is.

3. Az áramforrás

Egy áramforrás alapeleme az önbeálló áramreferencia. Ennek alapkiosztása (2. ábra) egy ellenállásból és két áramtűrkörből áll. A kapcsolás két stabil állapottal rendelkezik: egyik a zérus feszültséghez és áramhoz tartozik, a másik ahhoz az áramhoz, amelyen működtetni szeretnénk a kapcsolást.

Amikor tápfeszültséget kapcsolunk az áramkörre, akkor – amennyiben a tranzisztor gate-jére nem adunk vezérlést – a két elem a zérus értékhez tartozó munkapontba kerül. Amennyiben a másik munkapontba szeretnénk helyezni őket, indító áramkörre van szükség.



2. ábra
Önbeálló áramreferencia

Az R ellenállás tulajdonképpen egy negatív áram visszacsatolást eredményez. Ha – például a hőmérséklet változása miatt eltolódott munkapont következtében – megnő M2 árama, akkor megnő M1-é is, hiszen áttükröződik. Azonban ekkor megnő az R ellenálláson eső feszültség is, amitől lecsökken M1 gate-source feszültsége, így M1 árama is. Ez felül visszatükröződik M2 ágába is, így az áram lecsökken, stabil értéken marad.

Az általunk vizsgált szenzorban a hőmérsékletfüggő felerősítése érdekében az ellenállás a referencia másik ágába kerül, és egy „diódának kapcsolt” MOS tranzisztor valósítja meg. A referencia kimeneti ellenállása meg lett növelve úgy, hogy stabil munkapontba állított tranzisztorok kerültek a felső áramtűrkör alá (3. ábra).

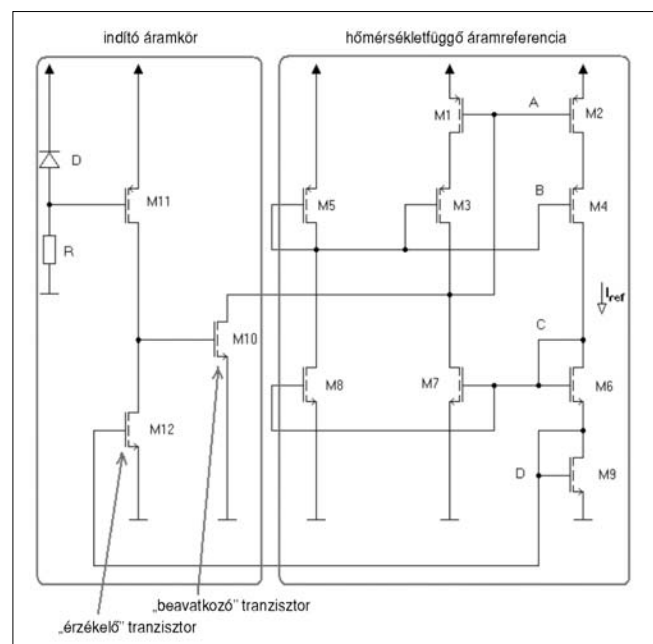
Az áramreferencia egy kétállapotú áramkör, ezért indítóáramkörre van szüksége, hogy a munkapontjába bekerüljön. Egy indítóáramkör lehet statikus, vagy dinamikus. Az előbbi azt jelenti, hogy egy „érzékelő” tranzisztor folyamatosan figyeli azt, hogy a referencia munkapontban van-e. Amíg nincs, úgy vezérel egy vagy több „beavatkozó” tranzisztor, hogy az segítsen az áramkörnek elindulni. Amikor ez megtörtént, a vezérlés kikapcsolja a beavatkozó tranzisztor.

Egy dinamikus indítóáramkör általában egy egy-időállandós dinamikus tag, amely a tápfeszültség megjelenése után lejátszódó ugrásválaszt követően állandósult állapotba kerül. Ezt az időállandónyi késleltetést lehet felhasználni.

Az általam vizsgált szenzorban (3. ábra) statikus indítóáramkör szerepel, amelynek érzékelő tranzisztor a M12-es, beavatkozó tranzisztor pedig az M10-es.

A statikus indítóáramkör hátránya, hogy kikapcsolt állapotban (amikor nincs szükség beavatkozásra) van áramfelvétele. Ennek oka az, hogy ilyen esetben a beavatkozó tranzisztor vezérlő elektródájára kapcsolódó

3. ábra Az áramreferencia kapcsolása



mindkét tranzisztor nyitva van, és a pont potenciálját a két tranzisztor csatorna méreteinek aránya dönti el. Az M11-es felhúzó tranzisztor csatorna-ellenállása nagy, az M12-esé kicsi, így a beavatkozó tranzisztor vezérlő elektródája közel földpotenciálra kerül. Eközben a két tranzisztoron keresztül áram folyik.

4. A fejlesztési feladat

A fejlesztés célja a korábbiakban ismertetett szenzor fogyasztásának minimalizálása. Ennek egyik lehetősége a szenzor kikapcsolása, amelynek során meg kell oldani az újraindítást is. Egy másik lehetséges mód egy alternatív indítóáramkör tervezése, amelynek nincsen statikus áramfelvétele, és a helyigénye is nagyon kicsi.

4.1. Az áramreferencia kikapcsolhatóságának megoldása

Ahogy arra már utaltunk, létezett egy korábbi kapcsolás [4], amely megoldani látszott a problémát, ám a működésével komoly gondok voltak:

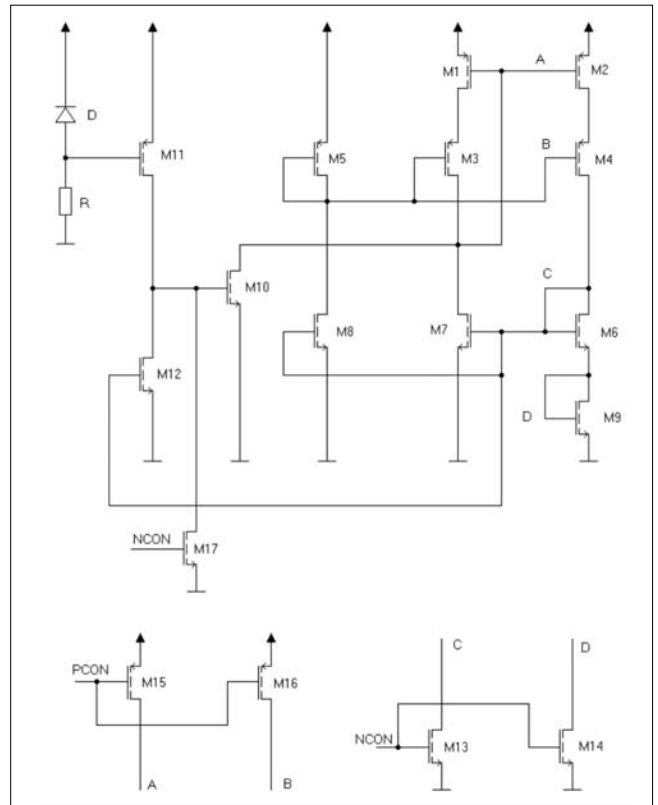
- az indító áramkör nagy hőmérsékleten bekapcsolt, és elrontotta a helyes működést;
- kikapcsoláskor az áramreferencia fogyasztása jelentős maradt;
- visszakapcsoláskor nem indult újra az áramkör – nem került vissza a munkapontba.

Célom a fenti hibák okának felderítése volt, és hogy megoldást találjak azok kiküszöbölésére.

Az első problémának az oka az volt, hogy magas hőmérsékleten az M12-es érzékelő tranzisztor nem nyitott ki eléggé, az azt vezérlő D pont potenciálja túl alacsony volt. A megoldást a vezérlő elektróda C pontra kötése jelentette.

A második hibát a kikapcsoló áramkör okozta. Az áramreferencia kikapcsolásakor az A és B pontokat tápfeszültségre, a C és D pontokat földpotenciálra kapcsoljuk. Ekkor azonban az M12 tranzisztor nem nyit ki, és így az M10-es kinyit. Ekkor az A pontot tápfeszültségre „húzó” tranzisztoron és a nyitott M10-esen keresztül kis ellenállású út nyílik a táp és a föld között, ami nagy áramot indít el. Erre a problémára az jelent megoldást, ha a beavatkozó (M10) tranzisztort is kikapcsoljuk. Ezzel jelentős csökkenést érhetünk el az áramfelvételben: a szimulációk alapján 6 V-os tápfeszültségnél, 27°C-on a teljes szenzor 72 μ A áramot vesz fel bekapcsolt, és 3,6 μ A áramot kikapcsolt állapotban.

A harmadik problémát az indító áramkör okozta. Indításkor az eredeti áramkör mindössze az A pont potenciálját állította be, ám ezzel nem nyitotta ki a B ponthoz gate-jükkel kapcsolódó M4-es, illetve M3-as tranzisztort, amelyek így megakadályozták az áram elindulását. Ennek kiküszöbölésére a B pontot is a földpotenciál közelébe kell húzni indításkor.



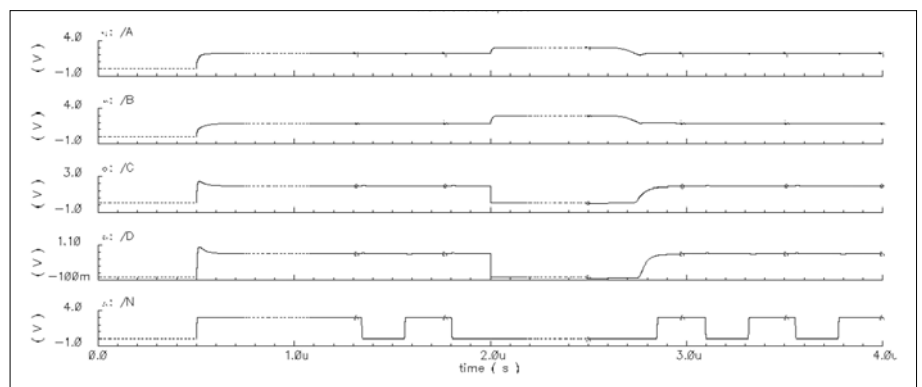
4. ábra A javított áramreferencia

A javított áramgenerátor a kikapcsoló tranzisztorokkal együtt a 4. ábrán látható. A tervezés során tehát az M12-es tranzisztor vezérlő elektródáját a D helyett a C pontra kötöttem, kikapcsolhatóvá tettem az indító áramkört az M17-es tranzisztorral, és az indító áramkörben elhelyeztem az M18-as tranzisztort, mely a B pont potenciálját a földpotenciál közelébe húzza bekapcsoláskor.

A javított áramgenerátor kapcsolása kiegészült kikapcsoló tranzisztorokkal (M13-M15) is. Ezek segítségével az áramkör belső, logikai jelei (NCON, PCON) képesek az áramkört be- és kikapcsolni. Ezzel megvalósítható az, hogy, amikor a kiválasztunk egy adott szenzort, hogy annak jele megjelenjen a kimeneten, akkor a többi szenzor automatikusan kikapcsol.

A tervezés a Cadence cég Opus tervezőrendszerében történt. Az 5. ábra bemutatja a teljes szenzor egy

5. ábra Az áramreferencia szimulációja



szimulációs eredményét. A kirajzolt jelek felülről haladva sorban: az áramgenerátor referencia-pontjai (A, B, C, D), és a frekvencia-jellegű kimenet. Jól látható, hogy az áramkör bekapcsolásakor a referencia-pontok igen hamar felveszik a munkaponti értéküket, ám a kimeneti jel csak késve kezd oszcillálni. Ennek az az oka, hogy az áramreferenciának fel kell tölteni a kezdetben teljesen kisütött kondenzátort. A későbbiekben a töltés és kisütés csak két, egymástól nem távoli referencia-feszültség között történik.

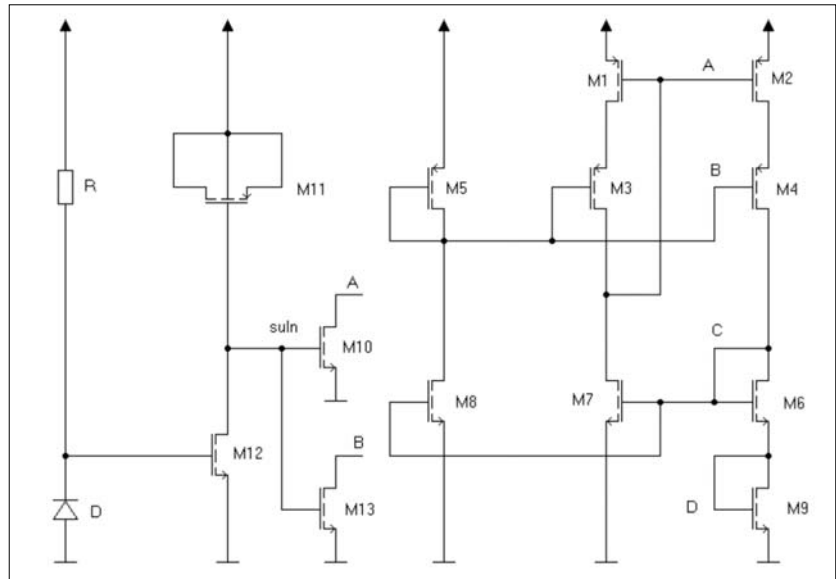
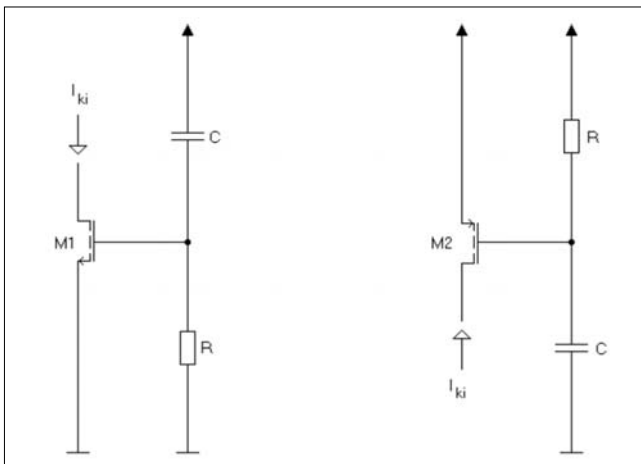
Az ábra közepén látható egy kikapcsolás és újraindítás. Kikapcsoláskor az A és B referenciapontok a tápfeszültséghez, a C és D pontok a földpotenciálhoz közeli értéket vesznek fel, így a munkaponti áramok értéke zérus lesz. Megfigyelhető, hogy az újraindítás jóval gyorsabban történik, mint az első indítás, ennek oka, hogy ilyenkor a kondenzátor még őrzi a rávitt töltést és csak az elszivárgott mennyiséget kell pótolni.

4.2. Egy alternatív indító áramkör megtervezése

Mint láttuk, a statikus indítóáramkörök működési elvükből következően mindenképpen fogyasztanak olyankor is, amikor az általuk vezérelt áramkör már munkapontban van. Dinamikus indítással ez a fogyasztás megszüntethető (6. ábra).

A dinamikus indítók egy tranzisztorból és egy RC tagból állnak. A tápfeszültség bekapcsolásakor a kondenzátor még nincs feltöltve, így az M1 n-MOS, illetve M2 p-MOS tranzisztorok kinyitnak. A kondenzátor az R ellenálláson keresztül feltöltődik, és ekkor a tranzisztorok bezárnak. A dinamikus indítóáramkörök előnye, hogy az elzáródás után zérus az áramfelvételük, hátrányuk, hogy amíg a tápfeszültség jelen van (a kondenzátor fel van töltve), addig nem tudnak újraindulni, így ha a kapcsolás kikerül a munkapontból (például ideiglenesen ki lett kapcsolva), nem tudják visszaállítani oda. Így dinamikus indítás esetén nem oldható meg, hogy az

6. ábra Dinamikus indító áramkörök



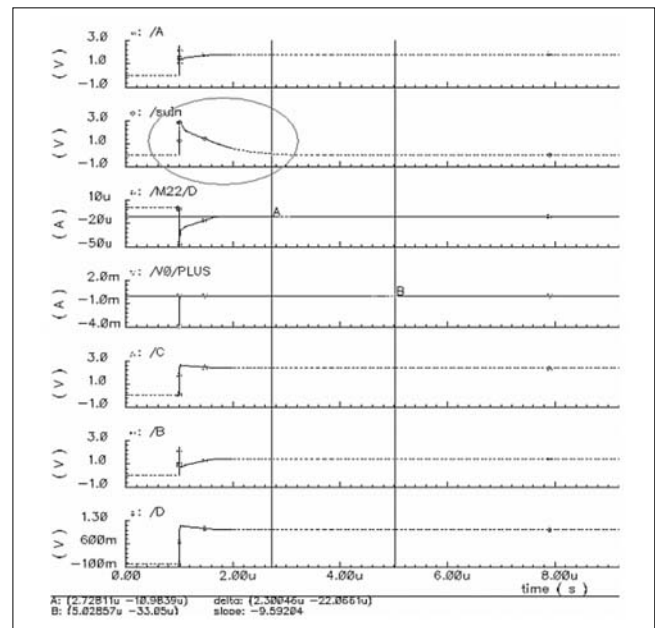
7. ábra Áramreferencia dinamikus indító áramkörrel

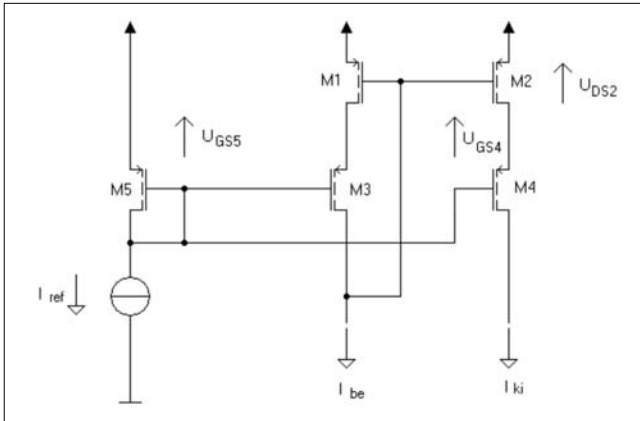
áramkör belső, logikai jelei által vezérelt módon kapcsoljuk be, illetve ki az áramreferenciát.

Megterveztem egy dinamikus indító áramkört a kapcsoláshoz (7. ábra). Az RC-tagban az ellenállás (M12) és a kondenzátor (M11) is tranzisztorból épül fel. Ebben a kapcsolásban is vezérelni kell mind az A, mind a B pontot a biztos munkapontba állás érdekében.

A kapcsolás helyes működését szimulációkkal igazoltam (8. ábra). Az indításkor fellépő ugrásválasz bekariázva látható. A kondenzátor kapacitását, ill. az ellenállás értékét úgy kellett beállítani, hogy az áramreferenciát a teljes vizsgált hőmérséklet-, és tápfeszültség tartományban elindítsa, de ne legyen feleslegesen nagy érték, ugyanis ez egyben nagy méretet is jelentene. A kapacitás ugyanis az adott tranzisztor gate-területétől, az ellenállás pedig a W/L arányától függ.

8. ábra A dinamikus indítás szimulációja





9. ábra Javított áramtükör méretezése

5. Megjegyzés az áramkörméretezéshez

Az áramkör kizárólag növekményes MOS tranzisztorokat tartalmaz. Az áramgenerátor tranzisztorainak W/L arányait (és ezzel a töltőáramot), valamint a kondenzátor méretét a megcélzott frekvencia-tartomány függvényében kell beállítani. Az áramreferencia méretezés szempontjából érzékeny pontja az M1-M5 tranzisztorokból álló javított áramtükör. Itt a megfelelő W/L arányokkal lehet biztosítani a helyes működést.

Az egyszerű kéttranzisztoros áramtükör kapcsolás továbbfejlesztésére azért van szükség (9. ábra), mert annak kimeneti ellenállása nem elegendően nagy, így az általa megvalósított áramgenerátor árama nem lesz független a terheléstől.

A kapcsolatban nagyon fontos, hogy a tranzisztorok ne lépjenek ki a telítéses tartományból (szaturáció).

A huroktörvényből következően a munkaponti feszültségekre a következő egyenlet írható fel:

$$U_{GS5} = U_{GS4} + U_{DS2} \quad (1)$$

A gate-source feszültségek felírhatóak a nyitófeszültség (V_T) és a szaturációs feszültség segítségével:

$$U_{GS5} = U_{SAT5} + V_T \quad (2)$$

$$U_{GS4} = U_{SAT4} + V_T \quad (3)$$

Szaturációban a MOS tranzisztor drain-source feszültsége nem kisebb, mint a szaturációs feszültség. Határhelyzetben pont egyenlő vele. Mivel azt szeretnénk, hogy minden tranzisztor telítésben maradjon, ezért U_{DS2} helyére U_{SAT2} -t helyettesítünk, ami a határhelyzetet jelenti. Az M2 és az M4 tranzisztor azonos, így az ő szaturációs feszültségeik is azonosak ($U_{SAT4} = U_{SAT2}$), és a technológiából következően a nyitófeszültségek is jó közelítéssel azonosnak tekinthetők minden tranzisztornál. Ezek figyelembevételével (1)-be helyettesítve:

$$U_{SAT5} + V_T = U_{SAT} + V_T + U_{SAT} \quad (4)$$

A MOS tranzisztor karakterisztika egyenletéből kifejezhető a szaturációs feszültség:

$$U_{SAT} = U_{GS} - V_T = \sqrt{\frac{I_D \cdot L}{K \cdot W}} \quad (5)$$

ahol $K = \mu C_0 / 2$, és a technológiából következően minden tranzisztorra azonosnak tekinthető. Az áramtükörök miatt az M5 tranzisztoron ugyanaz a drain-áram folyik át, mint ami M2-n és M4-en, így amikor (5)-öt (4)-be helyettesítjük, I_{D2} , I_{D4} és I_{D5} helyére ugyanaz az áram írható:

$$\sqrt{\frac{I_D \cdot L_5}{K \cdot W_5}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{I_D \cdot L_2}{K \cdot W_2}} \quad (6)$$

A jobb oldalon W_2 és L_2 került a képletbe, mivel M2 és M4 méretei megegyeznek. I_D -vel és K -val egyszerűsíthetünk, és a négyzetre emelés és átrendezés után:

$$\frac{W_5}{L_5} = \frac{1}{4} \cdot \frac{W_2}{L_2} \quad (7)$$

Azt kaptuk tehát, hogy ha munkapontba állított tranzisztoros áramtüköröket (9. ábra) alkalmazunk, akkor a munkaponti feszültséget szolgáltató tranzisztor (M5) W/L aránya az áramtükör tranzisztorainak W/L arányának negyede kell legyen.

6. Összefoglalás

Jelen munka során a célom egy adott hőmérséklet-szenzor fogyasztásának a csökkentése volt. A problémára két megoldást adtam. Elsőként a már létező kapcsolást alakítottam át úgy, hogy kikapcsolható legyen, amikor nincs szükség az általa szolgáltatott jelre. Kikapcsolt állapotban a szenzor fogyasztása a huszadára a csökken.

Alternatív megoldásként pedig megterveztem egy egészen kis áramfelvételű, dinamikus indító áramkört a szenzorhoz.

Irodalom

[1] Székely Vladimír, CMOS compatible temperature sensors, Journal on communications, Vol XLVII, May 1996, pp.13–17.

[2] V. Székely, M. Rencz, S. Török, Cs. Márta, L. Lipták-Fegő, CMOS temperature sensors and built-in test circuitry for thermal testing of IC's, Sensors and Actuators, Special Issue, Vol. 471, No.1-2, Nov. 1998, pp.10–18.

[3] Hainzmann János, Varga Sándor, Zoltai József, Elektromos áramkörök, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2000, p.554.

[4] Harrer Margit, Termikus testchip szenzorainak tervezése és mérése, Diplomaterv, Budapest, 2003.