

MEMS OSCILLÁTOROK HASZNÁLATA VEZETÉKMENTES KOMMUNIKÁCIÓJÚ, HORDOZHATÓ KÉSZÜLÉKEK TELEPÉLETTARTAMÁNAK NÖVELÉSÉRE

A digitális elektronikai eszköz mikrovezérlője számára szükséges órajelet a tervezőmérnökök ma még leggyakrabban kvarckristály-rezonátorokkal állítják elő, ami az oszcillátorokkal összevetve az olcsóbb ár okán kétségtelenül vonzó megoldás, viszont használatuk esetenként kompromisszumokat feltételez, és potenciális hibaforrásként jelentkezik az alkalmazás életciklusa egy későbbi szakaszában. Amennyiben elemes táplálású, valamilyen vezetékmentes kommunikációra képes, akár hálózatba kötött IoT eszköztől beszélünk, további, az elem élettartamával kapcsolatos szempontokat is figyelembe kell venni. Kísérleti úton igazolt tény, hogy egy Bluetooth LE modul fogyasztása fordítottan arányos annak „alvásban töltött” idejével, és az ebben az állapotban az időzítést biztosító 32,768 kHz-es valósídejű óra (RTC) pontossága (SCA – Sleep Clock Accuracy) közvetlen hatással van az elem élettartamára. Cikkünkben megmutatjuk, hogy a szokásos kristályrezonátorokat MEMS-alapú oszcillátorokkal helyettesítve milyen előnyöket élvezhetünk

Hagyományos rezonátorok és oszcillátorok kiváltása MEMS technológiával

Lapunk novemberi számában részletesen bemutattuk a MEMS-alapú oszcillátorok tulajdonságait, és összehasonlítottuk ezek alkalmazhatóságát a digitális áramkörök órajelének előállítására rendelkezésre álló technológiákkal. A bemutatott gyártó SiTime eszközei előre programozhatók (OTP) és a hagyományos kvarcoszcillátorokat helyettesítik anélkül, hogy az áramkört át kellene tervezni. A

programozhatóság flexibilis terméktervezést tesz lehetővé, csökken általa a szállítási határidő, és mindeközben jelentős, akár 85%-os méretcsökkenés is elérhető. A gyári programozhatóságon túl a vásárló saját, olcsó USB csatlakozású programozóeszközt is rendelhet a gyors prototípusgyártáshoz.

Emlékeztetőül: a MEMS oszcillátorok előnye a kvarckristályokkal szemben

1. Az áramkörillesztés egyszerűsödik (Plug 'n' play), nincs szükség a kristály és az oszcillátor illesztésére.
2. A minőség és a megbízhatóság nő, hiszen a bonyolult kvarckristály-gyártási technológiákkal szemben a MEMS oszcillátorok gyártástechnológiája a kiforrott CMOS félvezető wafer-alapú technológia. A MEMS chip egy tiszta szilíciummechanikai struktúra, melynek tisztítása utáni vákuumos hermetikus lezárása biztosítja a szennyezésmertességet, így kizárja az öregedést gyorsító tényezőket. Ennek eredménye a harmincszor nagyobb MTBF (1150) és a max. 1,5 meghibásodás egymillió alkatrészenként.

3. Alacsonyabb helyfoglalás a NYÁK-lemezen – a MEMS oszcillátorok teljesen integrált megoldást jelentenek, nem igényelnek külső komponenseket, mint például tápegység-leválasztó kondenzátorok, így komoly helymegtakarítást értünk el.
4. Az aktív MEMS oszcillátor kimeneti vezérlője képes egyszerre 2-3 terhelés egyidejű kiszolgálására, ami lehetővé teszi, hogy több kristályt – a hozzájuk tartozó terhelőkondenzátorokkal egyetemben – kiváltunk, ami jelentős BOM-költség-megtakarítást kínál a szükséges NYÁK-terület minimalizálása mellett – és ráadásul energiatakarékos is.
5. A MEMS oszcillátor kevésbé érzékeny az elektromágneses interferenciára (EMI), mivel nincsenek a hagyományos megoldásokban létező „zajgyűjtő” antennaként viselkedő rezonátor és az oszcillátor közötti NYÁK-vonalak. A MEMS chip és a CMOS elektronika összekapcsolására alkalmazott kötések vagy golyók extrém kisméretűek, így nem lesz a kimenetre átcsatolódo zaj, amely az órajelben jitter megjelenését idézné elő. (Megjegyzendő az is, hogy a MEMS oszcillátorok nemcsak kevésbé érzékenyek az EMI-ra, de az ilyen alapon működő időzítés maga is kisebb elektromágneses interferenciaforrás, mint a hagyományos, kristályalapú megoldások.) A SiTime MEMS oszcillátorokat ellátták néhány olyan beépített megoldással, ami az óra által gerjesztett elektromágneses zavar energiáját csökkenti. Az egyik ilyen a SoftEdge™ órajel lefutó- és felfutóél-vezérlés. A lassabb fel- és lefutás csökkenti a digitális órajelben megjelenő felharmonikusokat, az ezen harmonikusok által gerjesztett elektromágneses energia így minimális lesz. A SiTime Spread Spectrum Clocking (SSC) oszcillátorai nemcsak az órajelvonalon EMI-radiációját csökkentik,



1. ábra. A SiTime MEMS

hanem a teljes hálózatét, ami erről az oszcillátorról kapja az órajelet.

6. A MEMS oszcillátor kevésbé érzékeny a mechanikai vibrációra, hiszen a MEMS-rendszer tömege töredéke, általában három nagyságrenddel kisebb, mint a kristályé, az ezekben ébredő erők is nagyságrendekkel kisebbek, mint a kristályalapú megfelelőiknél, így vibrációállósága mérések alapján tízszerese egy kristályoszcillátorénak.
7. A MEMS oszcillátor bármilyen frekvenciára elérhető, mert a kimeneti frekvenciát minden esetben a programozható szorzótényezőkkel állítható PLL-ek állítják elő, ami széles frekvenciatartományon, akár 6 digités pontosságú egyedi frekvenciabeállítást tesz lehetővé egyszer programozható (OTP) módon.
8. Az egész gyártmánycsaládra csak egyetlen kvalifikáció szükséges, hiszen csupán egy eszköz betervezése és jóváhagyása szükséges ebben az esetben még akkor is, ha eltérő frekvenciájú, tápfeszültségű vagy pontosságú időzítésre van szükség egy későbbi NYÁK-változat esetén, mivel ezek a paraméterek mind programozással beállíthatók. Ilyen esetben általában elegendő az eredeti kvalifikációs dokumentáció új körülményekre szóló kiterjesztése.

A MEMS oszcillátorok energiatakarékosági jellemzői

A digitális áramkörök lelke a mikrokontroller, ami elemes táplálás esetére szinte mindig többszintű energiatakarékosági módokba kapcsolható. Ám még a legalacsonyabb fogyasztású alvó módban is szükség van legalább a valós idejű óra (RTC) működtetésére, amit általában egy 32,768 kHz-es kristályrezonátor/oszcillátor időzít. Egy ilyen oszcillátor fogyasztása kb. 1-2 μA áramerősség és 3,0 V feszültség mellett 2-3 μW . Egy IoT eszköz

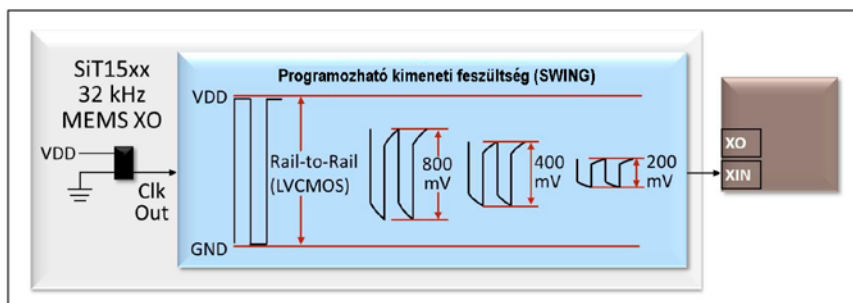
lítiumeleméről általánosságban elmondható, hogy a hosszú ideig tartó alvási idő alatt ez a terhelés jobban meríti, mint a rövid ideig tartó tényleges üzem, így az elem élettartama szempontjából kritikus a 32 kHz-es oszcillátor fogyasztása. A SiT15xx-család a szilícium MEMS oszcillátorok új generációját képviseli, mely elsősorban a hagyományos on-chip oszcillátorok, külső kvarcoszcillátorok és kvarckristályok energiahatékony kiváltására készült. A MEMS oszcillátorok tipikusan 750 nA áramerősséggel táplálhatók. Az új család további energiatakarékosági jellemzői az 1,2 V-ig való működés, az 1 Hz-ig programozható frekvencia és a programozható kimeneti feszültség (swing).

a) Programozható frekvencia

Az alacsonyabb frekvencia jelentősen csökkenti a kimeneti terhelőáramot, példaként a 32,768 kHz működési frekvencia 10 kHz-re csökkentése 30%-os áramcsökkentést okoz, míg az 1 Hz-es üzem 99%-os megtakarítással jár. A SiT15xx MEMS oszcillátorok 1 Hz-től 32 kHz-ig programozhatók, így jelentős energiamegtakarítás érhető el velük.

Példa 10 pF terhelési kapacitás feltételezésével:

- $V_{dd} = 3,0 \text{ V}$ (átlag)
 - $V_{outpp} = 2,1 \text{ V}$
 - $I_{dd} \text{ Core} = 750 \text{ nA}$
 - I_{dd} kimeneti vezérlő:
 $(165 \text{ nA/V})(2,1 \text{ V}) = 347 \text{ nA}$
 - Terhelőáram
 $(10 \text{ pF})(2,1 \text{ V})(32,768 \text{ kHz}) = 688 \text{ nA}$
- Teljes áramfelvétel =
 $750 \text{ nA} + 347 \text{ nA} + 688 \text{ nA} = \mathbf{1785 \text{ nA}}$
- Ha a frekvenciát 10 kHz-re csökkentjük, az áramfelvétel a következőképpen alakul:
- Terhelőáram
 $(10 \text{ pF})(2,1 \text{ V})(10 \text{ kHz}) = 210 \text{ nA}$
- Teljes áramfelvétel =
 $750 \text{ nA} + 347 \text{ nA} + 210 \text{ nA} = \mathbf{1307 \text{ nA}}$



2. ábra. A SiT 15xx MEMS oszcillátorcsalád NanoDrive™ kimenetiszint-programozása 200 mV-ig, energiamegtakarítási céllal

b) Programozható kimeneti feszültség (swing)

Új energiamegtakarítási mód érhető el az új generációs szilícium MEMS-alapú oszcillátorok esetében, a NanoDrive™ technológia, mely a kimeneti feszültség programozhatóságát teszi lehetővé. A kimeneti szint teljes értéktől 200 mV-ig csökkenthető, így megtakarítva akár az energia 40%-át.

A korábbi példa szerint a teljes áramfelvétel 10 pF terhelési kapacitás, 32,768 kHz frekvencia és $V_{dd} = 2,1\text{ V}$ mellett:
 $I = 750\text{ nA} + 347\text{ nA} + 688\text{ nA} = 1785\text{ nA}$

Ha a frekvenciát 10 kHz-re, a kimeneti szintet pedig 500 mV-ra csökkentjük, az áramfelvétel a következőképpen alakul:

- $V_{outpp} = V_{OH} - V_{OL} = 0,5\text{ V}$ ($V_{OH} = 1,1\text{ V}$, $V_{OL} = 0,6\text{ V}$)
- Terhelőáram
 $(10\text{ pF})(0,5\text{ V})(10\text{ kHz}) = 50\text{ nA}$
- I_{dd} Output Driver
 $(50\text{ nA/V})(0,5\text{ V}) = 25\text{ nA}$
- Teljes áramfelvétel =
 $750\text{ nA} + 50\text{ nA} + 25\text{ nA} = 825\text{ nA}$

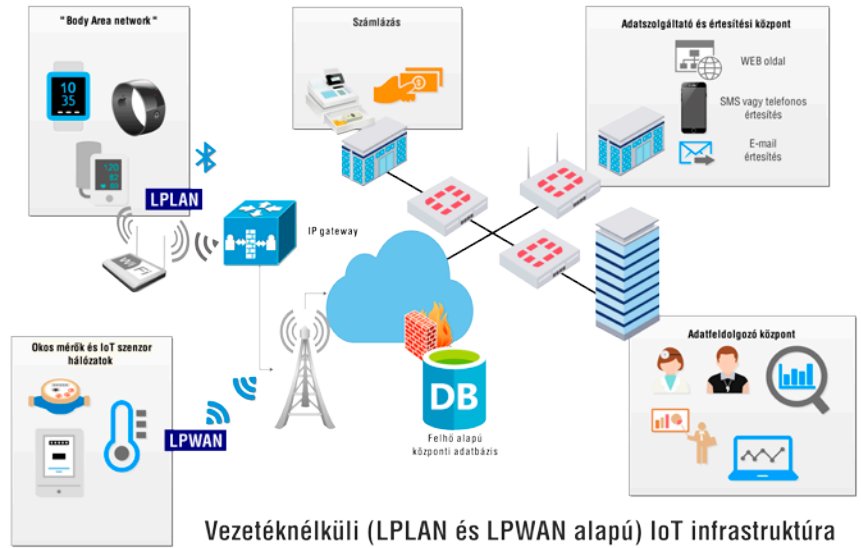
A vezeték nélküli kommunikáció jellemzői

A manapság az IoT területén használt hordozható készülékek, a hordható okoseszközök, a kommunikálásra képes orvosi eszközök, az okos fogyasztásmérők, a környezeti paraméterek monitorozására használt vezeték nélküli szenzorok közös jellemzője, hogy valamilyen rádiófrekvenciás (RF) kommunikáció útján juttatják adataikat valamilyen felhőalapú adatbázisba. Mivel elemes táplálású áramkörökről beszélünk, kézenfekvő valamilyen alacsony energiafogyasztású LAN- vagy WAN-megoldás használata. LPLAN-megoldásként manapság elsősorban BLE (Bluetooth® Low Energy) vagy Zigbee, míg LPWAN-megoldásként leggyakrabban LoRa, SigFox, vagy NB-IoT technológia használatos.

Minden vezeték nélküli kommunikációs eszköz ideje legnagyobb részét hasonló módon „tétlenül” tölti, éleszteni csak nagyon ritkán, az adattovábbítás idejére szükséges őket, fogyasztásuk ebben a rövid időszakban magas, azonban az aktív időszak hossza az alvásban töltött időhöz képest elhanyagolható. A hasonló jellemzők miatt az időzítés fogyasztásra gyakorolt hatásának vizsgálatához kiragadható az orvoselekt-

ronikában és a viselhető testszenzorok (wearable devices) területén leggyakrabban használt Bluetooth® Low Energy (BLE), ahol ez az arány például az ismert LPWAN eszközökhöz képest rosszabb, a 2–10 s alvási időhöz néhány ms hosszúságú ébren töltött idő társul. Az átlagos energiafogyasztás a kitöltési tényezőtől

(T_{ON}/T_{SLEEP}) függ, mely esetünkben igen kis értékű, és például ZigBee vagy más modulokkal összehasonlítva – többféle alvási időhosszt alapul véve – azoknál alacsonyabb marad. Kísérletekkel igazolható, hogy bármely lokális hálózati RF modul fogyasztása az alvási idő hosszával fordítottan arányos.

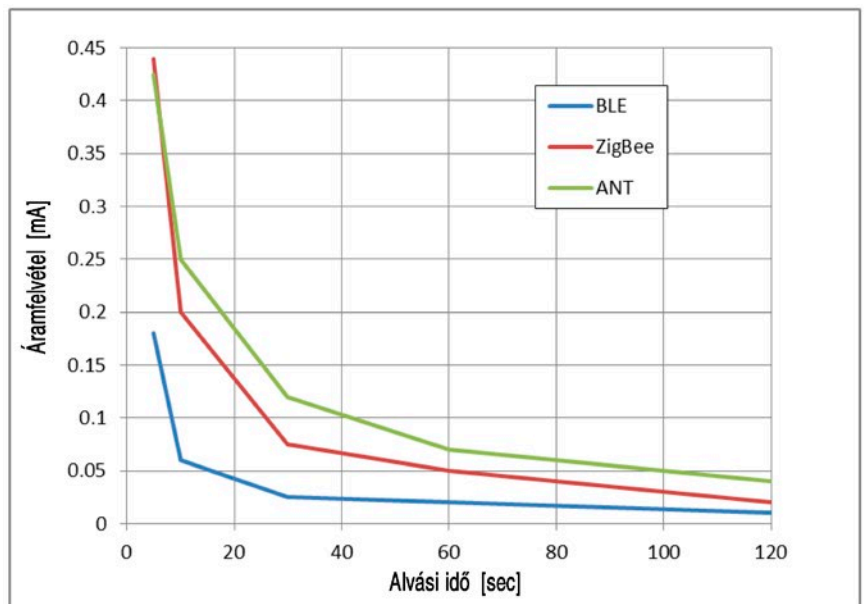


Vezetéknélküli (LPLAN és LPWAN alapú) IoT infrastruktúra

3. ábra. Szenzorhálózatok és telepes táplálású okoseszközök hálózata



4. ábra. Ciklikus aktivitás és alvó állapot, az energiafogyasztás a kitöltési tényezőtől függ (T_{ON}/T_{SLEEP})



5. ábra. Különböző RF átviteli technológiák áramfelvétele az alvási idő függvényében

A BLE hordozható IoT eszközökben

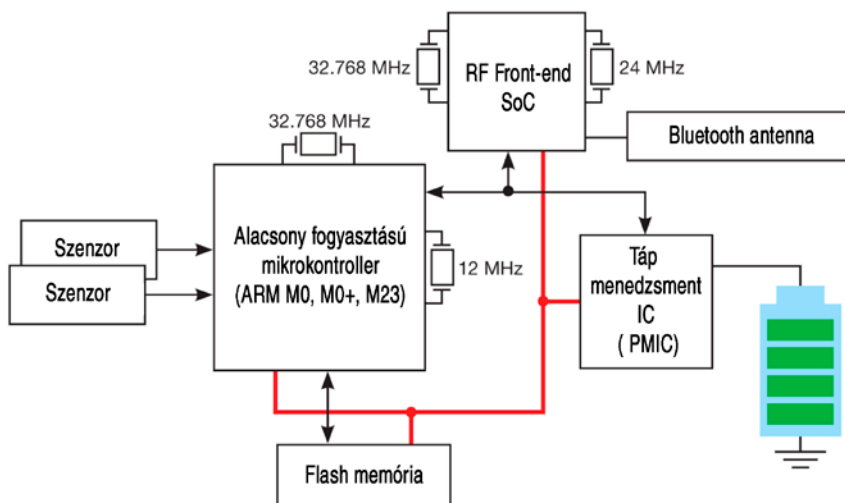
A tipikus vezetékmentes IoT szenzor alacsony fogyasztású 32 bites mikrokontroller köré épül, melyhez különböző biometrikus szenzorok, vagy egyéb fizikai mennyiségeket (nyomást, hőt, mágneses teret, látható fényt, stb.) detektálni képes érzékelők illeszkednek. A tápellátást jellemzően valamilyen lítiumelem, a külvilággal való kapcsolatot pedig egy RF front-end eszköz biztosítja.

A mikrokontroller a szenzorok adatait összegyűjtve azokat az I²C vagy UART buszon keresztül soros adatátvitellel juttatja a BLE RF front-end modulhoz, és ehhez a következő órajeleket használja:

- 12 MHz – az ARM-Cortex mag és a perifériák órajelének előállításához, jellemző pontossági elvárás: ±30 ppm min. 0 és 70 °C hőmérséklet-tartományon,
- 32,768 kHz – a valósídejű óra (RTC) és a Watch-dog funkcióhoz jellemző pontossági elvárás: 200 ppm min. 0 és 70 °C hőmérséklet-tartományon.

A BLE front-end a Bluetooth 4.0 PHY és a BLE linkrétegeket implementálja (a befoglalt GATT réteg profiljai: hőmérsékletmérés, biometrikus mérések) és a következő órajeleket igényli:

- 24 MHz – alapsávi és 2,5 GHz szintézis, jellemző pontossági elvárás: ±20 ppm min. 0 és 70 °C hőmérséklet-tartományon,
- 32,768 kHz – alvó állapotú valósídejű óra (RTC), jellemző pontossági elvárás: 200 ppm min. 0 és 70 °C hőmérséklet-tartományon.



6. ábra. Bluetooth Low Energy-alapú, elemes táplálású IoT eszköz blokkdiagramja

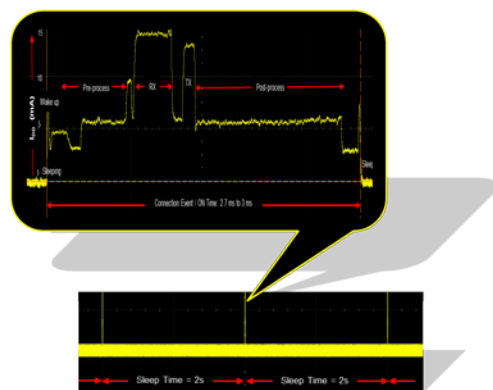
Kísérleti úton igazolt tény, hogy egy Bluetooth LE modul fogyasztása – csakúgy, mint a mikrokontrolleré – fordítottan arányos annak „alvásban töltött” idejével, és az ebben az állapotban az időzítést biztosító 32,768 kHz-es valósídejű óra (RTC) pontossága (SCA – Sleep Clock Accuracy) közvetlen hatással van az elem élettartamára. Ennek igazolásához meg kell ismernünk eszközünk „slave”-módban működő BLE modemjének és a párba állított „master” eszköz (BT-IP gateway) kapcsolódási metódusát.

A BT standard szerint a kapcsolódások közti szünet („sleep time” = „connection interval”) a 7,5 ms–4 s sávba esik, míg a bekapcsolt állapotban (adatforgalmazásban) töltött idő 0,08 ms–1,3 ms.

A BLE slave és master eszközök között a következő paraméterek kerülnek kicserélésre kapcsolódás közben:

1. Kapcsolódási intervallum („sleep time”) pl. 2 s,
2. Az alvási késleltetés mutatja majd, hogy hányszorosára növeljük az alvásidőt: N = 3 esetén a fenti példában 6 s (N<500),
3. Time out: amennyiben ezen időn belül nem érkezik válasz a párosított slave eszköztől, a master bontja a kapcsolatot.

A BT LINK réteg (Link Layer) üzenetváltásakor – minden kapcsolódási eseménykor – a master eszköz alvási RTC órapontossága (SCA) átadásra kerül, és a slave eszköz a saját alvó állapotbeli valósídejű órájának pontossága ismeretében határozza meg, mikor is kell felébrednie. Az időzítésbeli pontatlanságok a slave ébredésének rossz időzítéséhez vezethetnek,



7. ábra. Bluetooth Low Energy modul ébrenléti áramfelvétele

az esetlegesen korábban éled, mint ahogy a master az adatcsomagokat küldeni szeretné. Ez az időeltérés hosszabb „ON” állapotot eredményez, ami végső soron emelkedő fogyasztáshoz vezet. Az RX ablak megnövekedett szélessége a slave és master alvási RTC-pontosságától függ (SCA), tehát:

$$\Delta T_{RX} = (SCA_{master} + SCA_{slave}) \times 10^{-5} \times \Delta T_{connection}$$

ahol

- ΔT_{RX} : RX szélesebb időablaka
- $\Delta T_{connection}$: az utolsó kapcsolódási időintervallum
- SCA_{master} , SCA_{slave} : a vonatkozó 32,768 kHz-es RTC pontossága

A tervezőmérnök a master eszköz (BT-IP router) Bluetooth moduljának időzítését nem tudja befolyásolni, ezért az egyetlen lehetőség a ΔT_{RX} csökkentésére a slave-RTC kristályrezonátorának egy pontosabb eszközre való cseréje. A 32,768 kHz kristályt egy MEMS-alapú, 32,768 kHz-s TCXO (pl. SiTime SiT1552) való kiváltásával a 30 ppm pontosság 5 ppm-re növekszik. Mivel az IoT eszközben az energiatakarékos mikrokontroller csak néhány millisekondum időtartamú időszakokra kapcsol be, az „ON” állapotban a legnagyobb fogyasztás a BLE RF front-end modul miatt keletkezik.

Sleep Clock Accuracy (SCA)	Korai bekapcsolás ΔT_{RX}		
	Alvási idő = 2 s	Alvási idő = 20 s	Alvási idő = 50 s
5 ppm	0,01 ms	0,1 ms	0,25 ms
50 ppm	0,10 ms	1,0 ms	2,50 ms
70 ppm	0,14 ms	1,4 ms	3,50 ms
200 ppm	0,40 ms	4,0 ms	10,0 ms

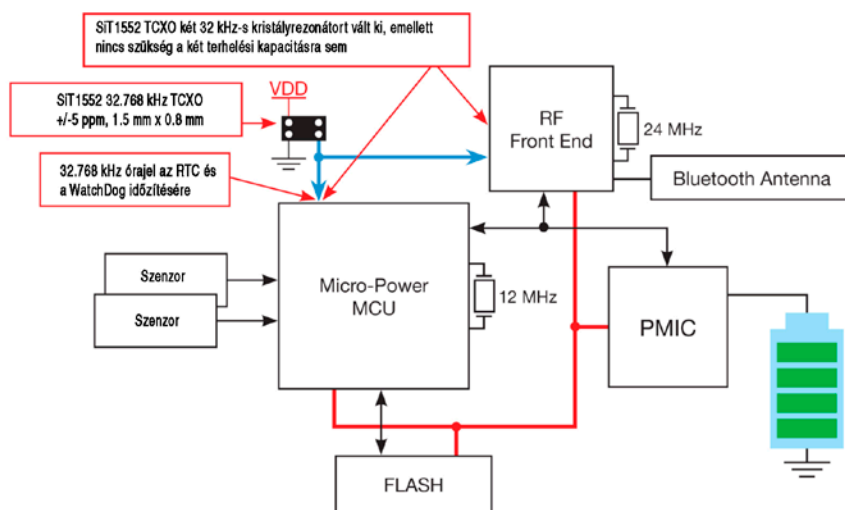
1. tábla. Az SCA hatása a korai ébredés csökkentésére

A táblázatban jól látható, hogy 20 s alvási időt feltételezve SCA = 5 ppm és SCA=200 ppm órahibák mellett a BLE modul tétlen vételi várakozásban töltött ideje (RX impulzus szélessége) negyvenszeres különbséget mutat.

A fogyasztásban ez a következőképpen jelentkezik:

$$P_2/P_1 = (T_{ON} + \Delta T_{RX1}) / (T_{ON} + \Delta T_{RX2}) = 2,26$$

Az összefüggésből több mint kétszeres elemélettartam következik, ha a 32,768 kHz-es kristályrezonátort egy kis méretű (1,5x0,8mm) SiTime SiT1552, a -40 ... +85 °C-os teljes működési hőmérséklet-tartományon ±5 ppm pontosságú MEMS TCXO-ra cseréljük. A MEMS oszcillátor alkalmas több CMOS-terhelés vezérlésére is, és nemcsak a nagy méretű BLE alvó RTC kristályt váltja ki, hanem az illesztéshez szükséges terhelési kapacitásokat is feleslegessé teszi, ezzel jelentős helyet takarít meg a NYÁK-lemezen, amelyet, hogy az alvó állapotbeli fogyasztást,



8. ábra. BLE kommunikációval rendelkező IoT eszköz optimalizált architektúra, MEMS oszcillátor használatával

amely az elem számára a legkritikusabb terhelés, a felére csökkenti.

KISS ZOLTÁN,
OKL. VILLAMOSMÉRNÖK, EXPORTIGAZGATÓ

ENDRICH BAUELEMENTE
VERTRIEBS GMBH
WWW.ENDRICH.HU

