

MEMS-oszcillátorok hordozható készülékek telepélettartamának növelésére

Kiss Zoltán – okl. villamosmérnök,
Export Igazgató, Endrich
Bauelemente Vertriebs GmbH

Akár elemes táplálású, vezetékmentes kommunikációra képes, akár hálózatra kötött IoT-eszközről beszélünk, az elem élettartamával kapcsolatos szempontokat is figyelembe kell venni. Cikkünkben megmutatjuk, hogy a szokásos kristályrezonátorokat MEMS-alapú oszcillátorokkal helyettesítve milyen előnyöket élvezhetünk.



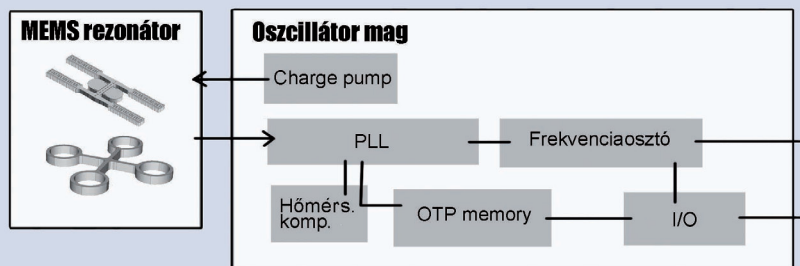
A digitális elektronikai eszköz mikrovezérlője számára szükséges órajelet a tervezőmérnökök ma még leggyakrabban kvarckristály-rezonátorokkal állítják elő, ami az oszcillátorokkal összevetve a kedvezőbb ár miatt kétségtelenül vonzó megoldás, viszont használatuk esetenként kompromisszumokat feltételez, és potenciális hibaforrásként jelentkezik az életciklus egy későbbi szakaszában. Kísérleti úton igazolt tény, hogy egy BlueTooth LE modul fogyasztása fordítottan arányos annak „alvásba töltött” idejével, és ebben az állapotban az időzítést biztosító 32,768 kHz-es valósidejű óra (RTC) pontossága (SCA – Sleep Clock Accuracy) közvetlen hatással van az elem élettartamára.

Hagyományos rezonátorok és oszcillátorok kiváltása MEMS-technológiával

A digitális elektronikához szükséges időzítés nem bonyolult, egy piezoelektromos kvarckristály rezonanciájával vezérelt Pierce oszcillátor – megfelelő szűrés és frekvenciaosztás alkalmazásával – elegendő a legtöbb feladathoz. Természetesen más piezoelektromos anyagok is léteznek, például kerámiaalapú rezonátorokból is készíthető oszcillátor. A hagyományos kvarcoszcillátorok speciális gyártástechnológiát igényelnek, a kristály vágása, szeletelése, csiszolása mind nagy precizitást igénylő feladat, a nagynevű gyár-

tók pedig rendelkeznek a szükséges ismeretekkel és felszereléssel ahhoz, hogy a megfelelő frekvenciákra hangolt eszközöket elkészítsék és azok stabilitását 15–20 évre garantálják. Azonban gyakran nincs tapasztalatuk az analóg elektronikában, az analóg chipet a piacon kell vásárolniuk, ami a minőségi megoldás biztosításának érdekében rengeteg többletköltséget jelent, komplex feladat, ami hosszú szállítási határidőkkel és minőségügyi feladatokkal jár együtt. Másrészt a félvezető-alapú óragyártóknak nincs tapasztalatuk a kvarckristályok speciális vákuumzárás kerámiafóliázásában, ami feltétele a magas Q faktor elérésének. Ebből kifolyólag a kombinált eszközök helyett választható külön tokozott rezonátor és analóg elektronika használatával nehéz megfelelni a piac elvárásának a miniaturizálás terén. Az elmúlt néhány évtizedben tehát a kvarckristályalapú oszcillátorok, órajel-generátorok és rezonátorok szerepeltek az elsődleges időreferencia-alkatrészként használható eszközök listáján, mivel nem létezett igazi alternatív megoldás. Napjainkban egy új technológia lép előtérbe, amelyben a MEMS-struktúra és az analóg elektronika együttesen épül az IC-tokba. A MEMS-rezonátor az analóg IC MEMS specifikus áramköri blokkjához kapcsolódik. Elektrosztatikus gerjesztés útján a MEMS-rezonátorban mechanikai rezgés keletkezik, amelynek érzékelésével és az analóg elektronika

1. ábra MEMS-oszcillátor belső felépítése



segítségével különböző órajelkimenetek építhetők ki az egyszerű félvezető-tokozásban.

A SiTime nevű analóg félvezetőgyártó, amelynek a MEMS-technológia iránti elkötelezettsége a BOSCH és a Stanford egyetemi gyökerekhez nyúlik vissza, a hagyományos kvarcoszcillátorok és esetenként rezonátorok kiváltására alkalmas, azoknál fejlettebb, mégis sokszor olcsóbb megoldásokat kínál. Az általuk kínált MEMS/CMOS kombinált chippek több PLL egyidejű alkalmazásával különböző órajel-frekvenciát tudnak előállítani egyetlen tokban. Ez a kombinált megoldás jelentős előnyökkel bír a méretcsökkentés és az egyszerűsítés lehetőségét nyújtva. A SiTime eszközei előre programozhatók (OTP) és a hagyományos kvarcoszcillátorokat helyettesítik anélkül, hogy az áramkört át kellene tervezni. A programoz-

hatóság 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 programozóeszközt is rendelhet a gyors prototípusgyártáshoz. (1. ábra)

Ahogy az ábrán látható, az eszköz a MEMS-rezonátoron kívül hőmérséklet-kompenzáló, frekvenciaosztó, I/O driver és egyszerű programozható memória-áramkört tartalmaz. A SiTime képes 500 fs jitter elérésére kilohertzes eszközeinél, 0,1 ppm stabilitás és nagyon alacsony (700 nA) fogyasztás mellett.

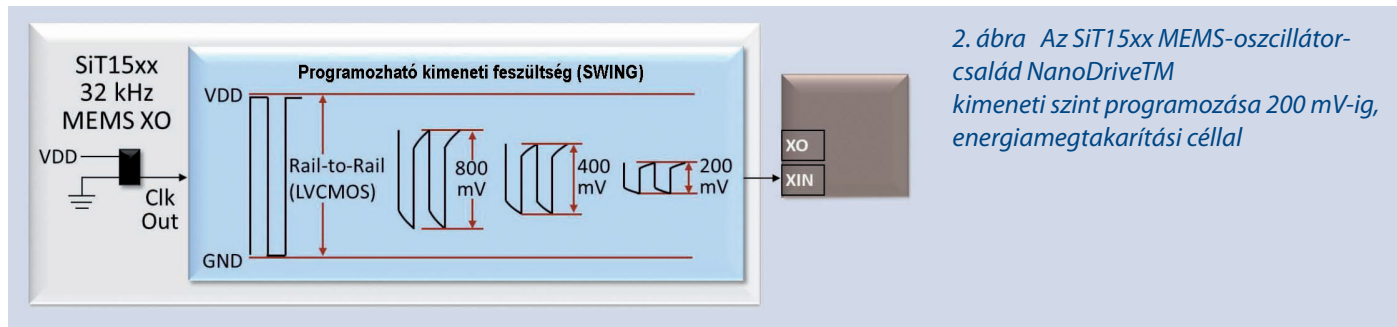
A programozhatóság a 6 decimális pontosságú frekvencia mellett kiterjed még a fel- és lefutási időkre is, ami az EMI és a jitter minimalizálásához szükséges.

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 félvezetőalapú technológia. A MEMS-chip egy tiszta szilícium-mechanikai struktúra, amelynek tisztítása utáni vákuumos hermetikus lezárása biztosítja a szennyezetlenséget, ezáltal kizárja az öregedést gyorsító tényezőket. Ennek eredménye a harmincszor nagyobb MTBF (1150) és a max. 1,5 meghibásodás egymillió alkatrészenként.
3. Alacsonyabb helyigény a NYÁK lemezen – a MEMS-oszcillátorok teljesen integrált megoldást jelentenek, nem igényelnek külső alkatrészeket, mint például tápegység-leválasztó kondenzátorok, ezért komoly helymegtakarítást lehet elérni.
4. Az aktív MEMS-oszcillátor kimeneti vezérlője képes egyszerre 2-3 terhelés egyidejű kiszolgálására, ami lehetővé teszi, hogy több kristályt, a hozzájuk tartozó terhelő kondenzátorokkal egyetemben kiválasszon, ami jelentős BOM-költségmegtakarítást kínál a szükséges NYÁK-terület minimalizálása mellett, és ráadásul energiatakarékos is.
5. A MEMS-oszcillátor kevésbé érzékeny az elektromágneses interferenciára (EMI), mert nincsenek a hagyományos megoldásokban létező „zajgyűjtő” antennaként viselkedő rezonátor és az oszcillátor között NYÁK vonalak. A MEMS-chip és a CMOS elektronika összekapcsolására alkalmazott kötések vagy golyók extrém kis méretűek, ebből adódóan nem tapasztalható a kimenetre átszűrődő zaj, amely az órajelben jitter megjelenését idézné elő. Megjegyzendő az is,

hogy a MEMS-oszcillátorok nemcsak kevésbé érzékenyek az EMI-re, 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 felfutó élvezérlése. A lassabb fel- és lefutás csökkenti a digitális órajelben megjelenő felharmonikusokat, az ezen harmonikusok által gerjesztett elektromágneses energia ebből következően minimális lesz. A SiTime Spread Spectrum Clocking (SSC) oszcillátorai nemcsak az órajelvonal EMI radiációját csökkentik, 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 a kristályalapú megfelelőiknél –, ezáltal vibrációállósága mérések alapján tízszerese egy kristályoszcillátorénak.
7. A MEMS-oszcillátor bármilyen frekvencia esetén elérhető, mert a kimeneti frekvenciát minden esetben a programozható szorzótényezőkkel állítható PLL-ek állítják elő (lásd a 2. ábrán), ami széles frekvenciatartományon, akár hat digitális pontosságú egyedi frekvenciabeállítást tesz lehetővé egyszerű programozható (OTP) módon.
8. Az egész gyártmánycsaládra egyetlen minősítés szükséges, hiszen csak egy eszköz betervezése és jóváhagyása szükséges ebben az esetben 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 dokumentációnak az új körülményekre szóló kiterjesztése.



A MEMS-oszcillátorok energiatakarékossági jellemzői

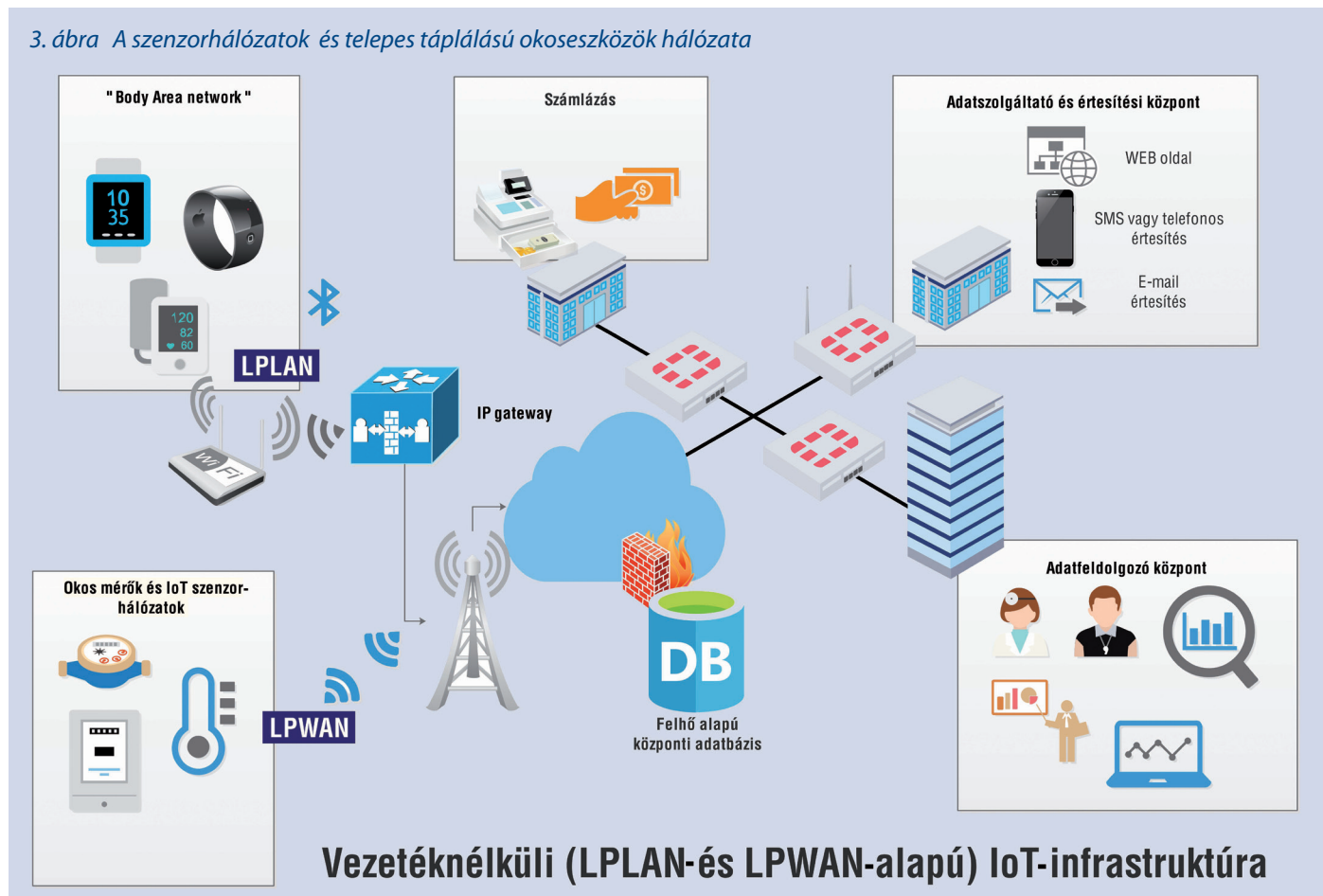
A digitális áramkörök lelke a mikrokontroller, ami elemes táplálás esetére szinte mindig többszintű energiatakarékossági módokba kapcsolható. Azonban még a legalacsonyabb fogyasztású, alvó módban is szükség van legalább a valós idejű óra (RTC) működtetésére, amit általában egy 32,768 kHz-es kristályrezonátor / -oszcillátor időzít. Egy ilyen oszcillátor fogyasztása kb. 1-2 μA áramerősség és 3,0 V feszültség mellett 2-3 μW . Egy IoT-eszköz lítiumelemről 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. Az SiT15xx-család a szilícium MEMS-oszcillátorok új generációját képviseli, amely 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 energiatakarékossági jellemzői az 1,2 V-ig való működés, az 1 Hz-ig programozható frekvencia és a programozható kimeneti feszültség (swing).

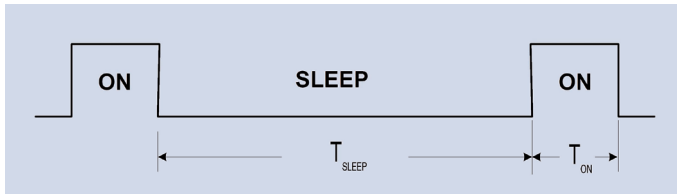
Programozható frekvencia:

Az alacsonyabb frekvencia jelentősen csökkenti a kimeneti terhelőáramot, például a 32,768 kHz működési frekvencia 10 kHz-re csökkentése 30%-os áramcsökkentést okoz, míg az 1 Hz-es üzem 99%-os megtakarítással jár. Az 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)
 - $V_{outpp} = 2,1 \text{ V}$
 - $I_{dd \text{ Core}} = 750 \text{ nA}$
 - $I_{dd \text{ kimeneti vezérlő}}: (165 \text{ nA/V})(2,1 \text{ V}) = 347 \text{ nA}$
 - Terhelőáram: $(10 \text{ pF})(2,1 \text{ V})(32,768 \text{ kHz}) = 688 \text{ nA}$
- Teljes áramfelvétel = $750 \text{ nA} + 347 \text{ nA} + 688 \text{ nA} = 1785 \text{ nA}$
- Ha a frekvenciát 10 kHz-re csökkentjük, akkor a következőképpen alakul az áramfelvétel:
- Terhelőáram: $(10 \text{ pF})(2,1 \text{ V})(10 \text{ kHz}) = 210 \text{ nA}$
- Teljes áramfelvétel = $750 \text{ nA} + 347 \text{ nA} + 210 \text{ nA} = 1307 \text{ nA}$

3. ábra A szenzorhálózatok és telepes táplálású okos eszközök hálózata





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

Programozható kimeneti feszültség (swing):

Egy új energiamegtakarítási mód érhető el az új generációs szilícium MEMS-alapú oszcillátorok esetében, a NanoDrive™ technológia, amely a kimeneti feszültség programozhatóságát teszi lehetővé. A kimeneti szint a teljes értéktől 200 mV-ig csökkenthető, ezzel megtakarítva akár az energia 40%-át. (2. ábra)

A korábbi példa szerint a teljes áramfelvétel 10 pF terhelési kapacitás, 32,768 kHz frekvencia és $V_{DD} = 2,1$ 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, akkor a következőképpen alakul az áramfelvétel:

$$\bullet V_{outpp} = V_{OH} - V_{OL} = 0,5 \text{ V} \quad (V_{OH} = 1,1 \text{ V}, V_{OL} = 0,6 \text{ V})$$

$$\text{Terhelőáram: } (10 \text{ pF})(0,5 \text{ V})(10 \text{ kHz}) = 50 \text{ nA}$$

$$\bullet I_{dd} \text{ Output Driver: } (50 \text{ nA/V})(0,5 \text{ V}) = 25 \text{ nA}$$

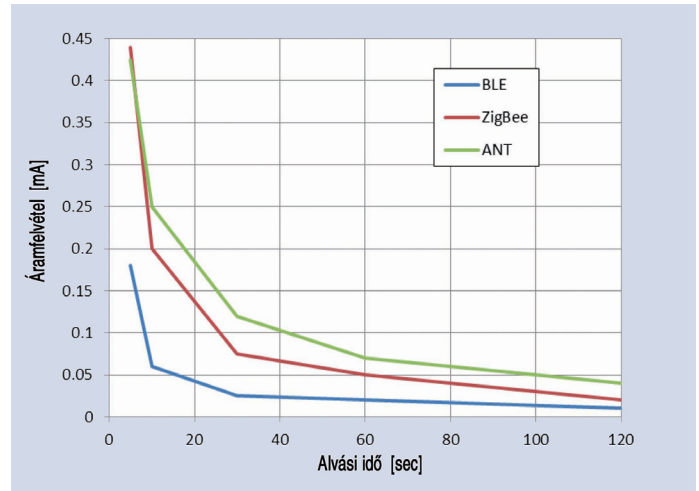
$$\text{Teljes áramfelvétel} = 750 \text{ nA} + 50 \text{ nA} + 25 \text{ nA} = 825 \text{ nA}$$

A vezeték nélküli kommunikáció jellemzői

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 elsősorban BLE (Bluetooth® Low Energy) vagy Zigbee, míg LPWAN megoldásként leggyakrabban LoRa, SigFox, vagy NB-IoT-technológia használatos manapság. (3. ábra)

Mindegyik vezeték nélküli kommunikációs eszköz hasonló módon, ideje legnagyobb részét „tétlenül” tölti, éleszteni nagyon ritkán, az adattovábbítás idejére szükséges őket, fogyasztásuk ebben a rövid időszakban magas, azonban az aktív időszak hossza elhanyagolható az alvásban töltött időhöz képest.

A hasonló jellemzők miatt az időzítés fogyasztásra gyakorolt hatásának vizsgálatához kiragadható az orvoselektronikában és a viselhető testszenzorok (wearable devices) területén leggyakrabban használt Bluetooth® Low Energy (BLE), ahol ez az arány például az ismert LPWAN eszközökhöz képest rossz-



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

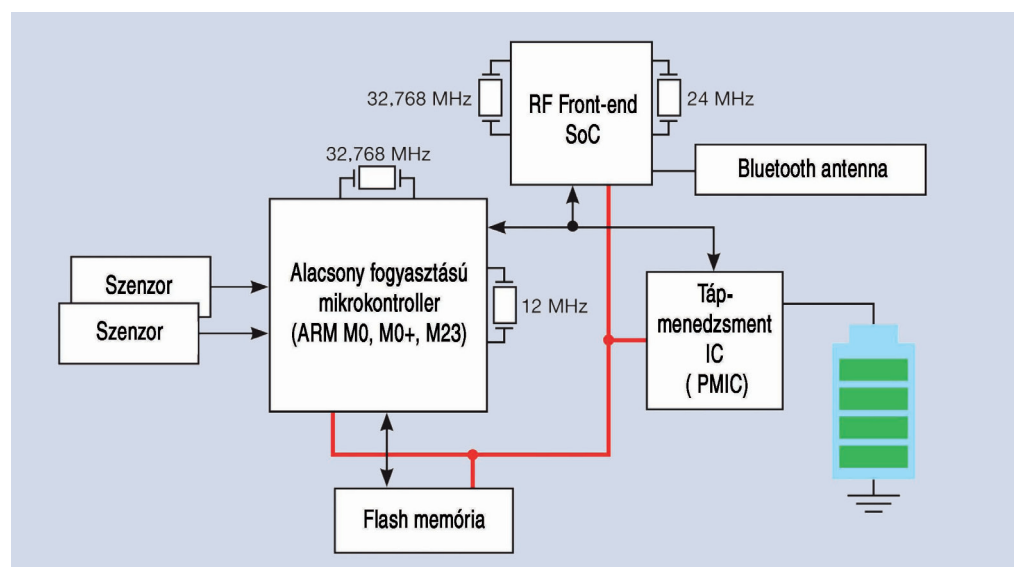
szabb, a 2-10 mp alvási időhöz néhány ms hosszúságú ébren töltött idő társul. Az átlagos energiafogyasztás a kitöltési tényezőtől (T_{ON}/T_{SLEEP}) függ, amely esetünkben igen kis értékű, és például ZigBee vagy más modulokkal összehasonlítva – többféle alvási időhosszt alapul véve –, azoknál alacsonyabb marad. Kísérletekkel igazolható, hogy bármely lokális hálózati RF modul fogyasztása az alvási idő hosszával fordítottan arányos. (4. és 5. ábra)

A BLE hordozható IoT-eszközökben

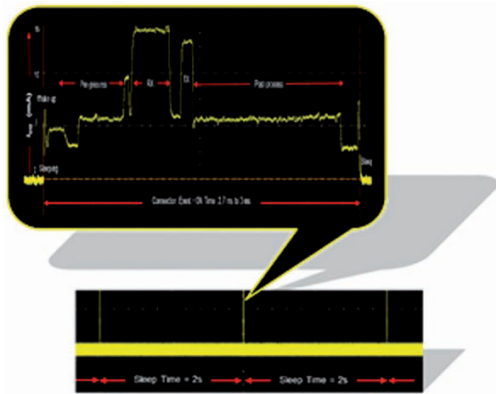
A tipikus vezetékmentes IoT-szenzor alacsony fogyasztású 32 bites mikrokontroller köré épül, amelyhez különböző biometrikus szenzorok, vagy egyéb fizikai mennyiségeket (nyomás, hő, mágneses tér, látható fény stb.) detektálni képes érzékelők illeszkednek. A tápellátást jellemzően valamilyen lítiumelem, a külvilággal való kapcsolatot pedig egy RF front-end eszköz biztosítja. (6. ábra)

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 órajeleének előállításához, jellemző pontossági elvárás: ± 30 ppm min. 0 és 70 °C hőmérséklet-tartományon,
- 32,768 kHz – a valós idejű óra (RTC) és a Watch-dog funkcióhoz, jellemző pontossági elvárás: 200 ppm min. 0 és 70 °C hőmérséklet-tartományon.



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



7. ábra Bluetooth Low Energy modul ébrenléti állapotú áramfelvétele

A BLE front-end a Bluetooth 4.0 PHY és a BLE-link rétegeket 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 valósidejű óra (RTC), jellemző pontossági elvárás: 200 ppm min. 0 és 70 °C hőmérséklet-tartományon.

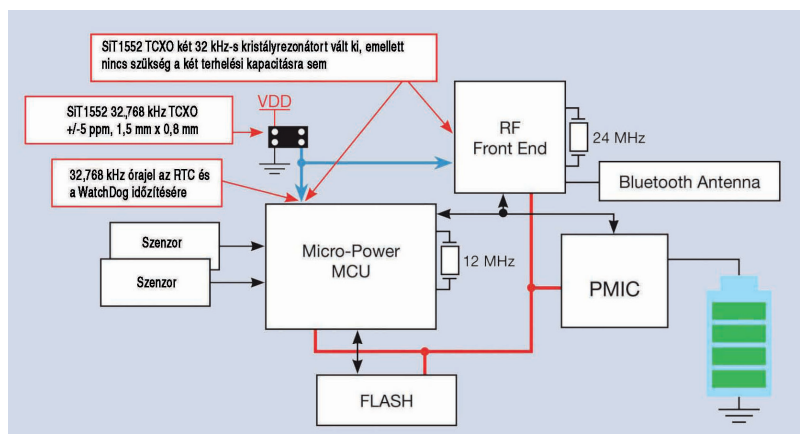
Kísérleti úton igazolt tény, hogy egy Bluetooth LE modul fogyasztása – csakúgy mint a mikrokontroller fogyasztása – fordítottan arányos annak „alvásban töltött” idejével, és az ebben az állapotban az időzítést biztosító 32,768 kHz-es valósidejű óra (RTC) pontossága (SCA – Sleep Clock Accuracy) közvetlen hatással van az elem élettartamára. Ennek igazolásához meg kell ismernünk eszközünk „slave” módban működő BLE modem és a párba állított „master” eszköz (BT-IP gateway) kapcsolódási metódusát. A BT standard szerint a kapcsolódások közti szünet („sleep time” = „connection intervall”) a 7,5 ms...4 s sávba esik, amíg a bekapcsolt állapotban (adatforgalmazásban) töltött idő 0,08 ms...1,3 ms. (7. ábra)

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

1. kapcsolódási intervallum („sleep time”) pl. 2 sec,
2. az alvási késleltetés mutatja majd, hogy hányszorosra növeljük az alvásidőt: N=3 esetén a fenti példában 6 sec (N<500),
3. Timeout: 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 óra pontossága

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



	Alvási idő = 2 sec	Alvási idő = 20 sec	Alvási idő = 50 sec
Sleep Clock Accuracy (SCA)	Korai bekapcsolás ΔT_{RX}		
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

8. ábra Az SCA hatása a korai ébredés csökkentésére

(SCA) átadásra kerül, és a slave eszköz a saját alvó állapotbeli valósidejű órájának pontossága ismeretében határozza meg, mikor is kell felébrednie. Az időzítésbeli pontatlanságok a slave ébredésének rossz időzítéséhez vezethetnek, amikor esetlegesen korábban ébred, mint ahogy a master az adatsomagokat 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:

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

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 kristálynak egy MEMS-alapú 32,768 kHz-es T_{CXO} -val (pl. SiTime SiT1552) való kiváltásával a 30 ppm pontosság 5 ppm-re növekszik. Mivel az IoT-eszközben az energiatakarékos mikrokontroller csak néhány milliszekundum időtartamú időszakokra kapcsol be, az „ON” állapotban a legnagyobb fogyasztás a BLE RF front-end modul miatt keletkezik. (8. ábra) Az ábrán jól látható, hogy 20 sec 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 (1,5 x 0,8 mm) 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, amellett, hogy az alvó állapotbeli fogyasztást, amely az elem számára a legkritikusabb terhelés, a felére csökkenti. (9. ábra)

Endrich Bauelemente Vertriebs GmbH

Sales Office Budapest

1191 Budapest, Corvin krt. 7-13., Tel.: + 36 1 297 4191

E-mail: hungary@endrich.com, www.endrich.com