

VILÁGMOZGATÓ ÁRAMKÖR • AGYI BESZÉD • EZERJÓFÚ-MOZGALOM • TELEPORTÁLÁS?

LXXXI. évfolyam ■ 31. szám ■ 2026. július 31. Ára: 800 Ft

Előfizetőknek: 600 Ft

ELETTUDOMÁNY

BOLGÁR
DÍSZBOGÁR



MITŐL LESZNEK FENNTARTHATÓBBAK?

VILÁGUNKAT MOZGATÓ ÁRAMKÖRÖK

Az írás a BME, a Pro
Progressio Alapítvány és
az Élet és Tudomány 2026.
évi cikkpályázatán második
helyezést ért el a hallgatói
kategóriában.



NYÁK, NYHL, PCB? A nyomtatott áramkört hordozó kulcseleme a mai elektronikai rendszereknek, de talán nem is az elnevezésük az izgalmas, hanem hogy belássuk, mindenhol jelen vannak: a mosógépben, a mikrohullámú sütőben, a TV-ben, a telefonokban, az autókban, de még a műholdakban is. Digitalizált életünk útján járva csak picit túlzás, ha kimondjuk: világunkat ezek a bizonyos lapok és a rajtuk található alkatrészek, chippek mozgatják. Kérdés azonban, hogy mit tudunk kezdeni az egyre nagyobb léptékben gyártott elektronikákkal, ha egyszer elévülnek és tömegesen válnak hulladékká?

Képzeljük magunk elé gyermekkorunk kedves használati tárgyát, ami sokunk számára játék is volt egyben. A régi zseblámpánk talán még ma is az éjjeli szekrényünk környékén tanyázik, és bele sem gondolunk, hogy ebben már egy komplett áramkör lapul. Igaz, igen egyszerű: egy elem mint forrás, egy kapcsoló, az a bizonyos izzó, és pár vezeték, illetve az alkotóelemeket összekapcsoló forrasztott kötések. A fejlődéssel az áramkörök egyre komplexebbé váltak, így szükségünk volt egy olyan megoldásra, amellyel rendezetten, nagy sűrűségben tudunk sok-sok vezetékkel elvezetni és áramkörti elemeket összekapcsolni. A vezetékek halmaza egy bonyolult áramkör esetén több ezernyi független összekapcsolási pontot jelent, ami térben bekötögetve, gubancos gombolyag formájában több műszaki problémát okozna, mint megoldást. Ezért alkották meg a lapszerű hordozót, amit sokan önmagában is (igaz tévesen) „áramkörnek” neveznek. A NYÁK váza régebben még papírt is tartalmazott, ma legtöbbször FR4 (üvegszál erősítésű epoxi) kompozit. Erre rögzítik a rézrétegeket, feldolgozás után síkba rendezve az úgynevezett vezetősávokat, huzalokat. A síkokat több rétegben, speciális esetben akár 30-40

„emeleten” keresztül is kidolgozhatjuk, a hordozó viszont ettől még lapszerű marad, ami a szervezettség, szerelhetőség, tartás és elrendezhetőség szempontjából is fontos kitél. A jellegzetes zöld színt egy forrasztásgátló lakkréteg adja, de ez nem a hordozó környezetbarát mi-voltát jelzi színével. Inkább egyfajta védelemként és szerelési segédteggként szolgál, hogy a rajta szabadon hagyott területekre, a forrasztási felületekre, elektromosan és mechanikailag is beköthessük az olykor bogárszerű formákat öltő alkatrészeket.

Így ér körbe az áram...

A hordozókon található vezetékek tehát még nem jelentenek áramkört; ahhoz, hogy valóban megtörténjen az összeköttetés a forrás pozitív és negatív vége között, az alkatrészekre is szükség van. Az áramkörti modulok a bekötésükkel lesznek komplett szerelvények. A furatszerelhető alkatrészek lábait a hordozón kialakított furatok tudják fogadni, míg a felületszerelhető alkatrészek kivezetései a hordozó felületén kialakított szabad rézfelületek. Az alkatrészeket jellemzően a szerelési folyamat végén elhelyezett forrasztási lépésben rögzítik. A sablonalapú, stencilnyomtatással felvitt forrasztókrembe (pasztába) automata beültető robotok



segítségével helyezik bele az alkatrészeket, jellemzően teljesen automatizált módon. Az összeállított alkatrész-pasztá-hordozó rendszert ezután forrasztókemencébe helyezik, ahol a forrasztópasztá megolvastásával és lehűtésével kialakítják a forrasztott kötet. Sorozatgyártásban alagútke-mencéket alkalmaznak, ahol szállítószalag segítségével több fűtési zónán át halad a hordozó, és

éri el az anyagrendszer által meghatározott hőmérsékleteket. A környezetvédelem jegyében már kivonták az ólmos forraszokat a gyártási folyamatokból, a manapság elterjedt módon használt ón–ezüst–réz ötvözetekhez akár 260 °C csúcshőmérsékleteket is rendelnek a gyártás során, de speciális alternatívaként találunk bizmuttartalmú, alacsony olvadáspontú ónforraszokat is, amelyek akár száz fokkal alacsonyabb értékeken is beköthetővé válnak.

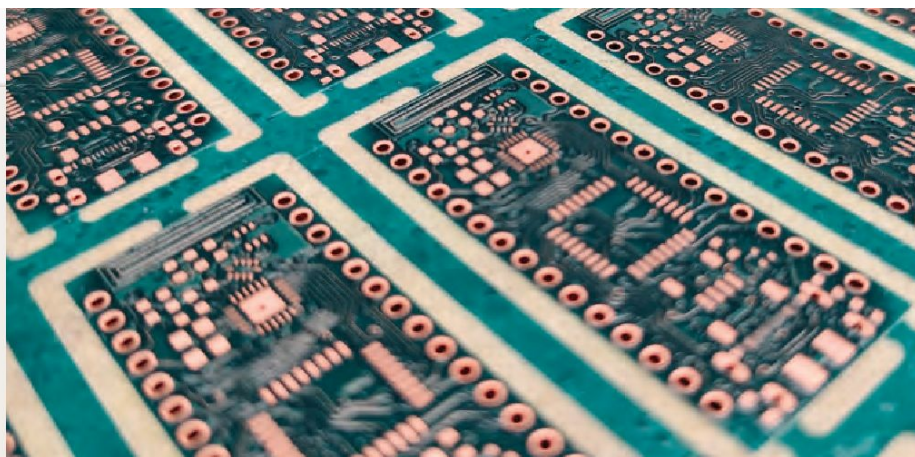
Hová tesszük az elévült kűtyűket?

Az elektronikai termékek iránti kereslet folyamatos növekedése miatt a világnak egy komoly problémával is

Tobzódnak az elektrokaticák: digitális dobókockajátékok bogárlábú integrált áramkörökkel, színes áramkört hordozókon



szembe kell néznie. Miközben újabb telefonok után vágyódunk, a számítógépeinket, háztartási berendezéseinket pár évente lecseréljük, a gazdaság motorján is megemeljük a fordulatszámot, az imént leírt gyártási folyamatokat elvégző vállalatok növekedését igazolva. Am egyben egy „lát-hatatlan” problémát is erősítünk. Amikor az elektronikai modulok,



PLA/en kompoziton készülő modern áramkörök. Első ránézésre szinte megkülönböztethetetlenek a szokásos fajtáktól.

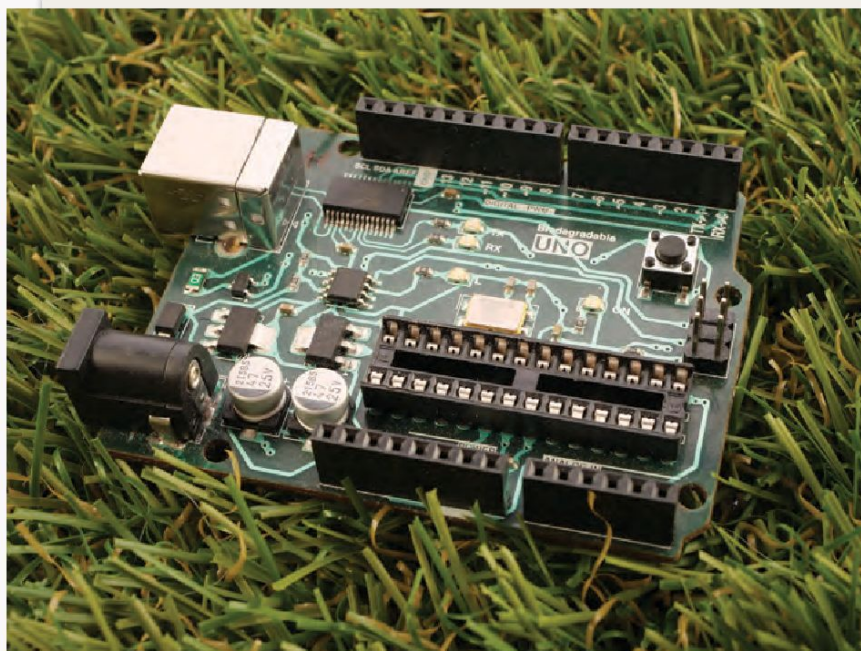
áramkörök elérik az életciklusuk végét, elektronikai hulladékká, másképpen e-hulladékká (angolul *e-waste*) válhatnak. Életünk szinte minden területét megkönnyítő elektronikáinkkal sajnos a környezetet is terheljük: a kitermelt, felhasznált nyersanyagokon túl évente mintegy 60 millió tonna e-hulladék keletkezéséért is felelősek vagyunk, amely szám egyes prognózisok szerint 2 millió tonnával változik évente, sajnos nem a csökkenő tendencia irányába. A társadalomnak egy újabb váratlan szempontot is figyelembe kell vennie: a ma hulladékát nem a tegnap megvásárolt telefon, de még csak nem is a lecserélt, „veterán” készülék képezi, hanem tíz-húsz évvel korábbi eszközeink, amiket a magánemberek és a vállalatok is csak hosszas idők után selejteznek, visznek el hulladékfeldolgozóba. Már ha elviszik: a feldolgozott hulladék csak töredéke kerül megfelelő feldolgozóba, és ezek is alacsony hatékonysággal nyerik vissza például az áramkörökben található nemesfémeket. A NYÁK? Nos, a készülékek és áramkört modulok akár 70 tömegszázalékát kitevő hordozó anyaga végül legtöbbször aprított hulladékként, vagy elégetés utáni salakanyagként végzi.

Környezetbarát áramkört hordozók

Erre jelenthet alternatívát a biológiai világ lebontható hordozók alkalmazása a jelenlegi FR4 helyett. A BME kutatói több egyetem és cég részvételével együtt, környezetbarát hordozók kutatásával, fejlesztésével is foglalkoznak. A legígéretesebb megoldás az ipari körülmények között komposztálható politejsav (PLA) műanyag használata, amely

kaphat lenszövet szálerősítést, de akár gyapjúkitöltést is, különböző rétegelrendezésekben. Az így készült anyagok biológiailag lebonthatóak, de maguktól nem bomlanak le, ehhez meg kell teremteni a megadott feltételeket. Normális üzemi körülmények között viszont kompozitként fogadhatják az áramkört kialakításhoz szükséges rézrétegeket, majd a már meglévő technológiákkal teljesen kompatibilis módon gyárthatóak, szerelhetőek lesznek, egészen az áramkört modul szintjéig. A környezetbarát hordozók a hőterhelés hatására az iparban szabványos FR4-hez képest jellemzően nagyobb mértékben deformálódnak, a belső szerkezetük magas hő hatására sérülhet. A hőre lágyulás sajnos a lebontható műanyagok általános sajátossága, viszont léteznek megoldások a 260 °C körüli gyártási hőmérsékletek elkerülésére. Az alacsony olvadáspontú, minőségben közel csereszabatos ón–bizmut forraszanyagokkal nemcsak kíméletesen tudjuk szerelni a környezetbarát elektronikai moduljainkat, hanem a rezsiköltségen is csökkenthetünk, révén száz fokot „spórolunk” a kemence felfűtésén.

Tipikus kérdés, hogy egy ilyen áramkör végül „elbomlik-e” magától, és hogy mi történik a rézzel, valamint a maradék áramkört alkatrészekkel az így készült modulok életciklusának végén. Nos, a hordozót mechanikusan szeparálhatjuk a huzalozástól, kötésektől és chipektől, csatlakozóktól, amelyek összegyűjtése technológiai szempontból



Arduino UNO-variáns: a tanulók körében népszerű beágyazott elektronikai fejlesztőkészlet PLA/len hordozón kialakítva

viszonylag egyszerű feladat. De egy különleges technika is kifejlesztés alatt áll: az áramköri hordozóról a nemesfémeket (például rezet) biológiai úton, baktériumok segítségével is feldolgozhatjuk. A maradék vázanyagot pedig komposztálандó anyagként kezelhetjük.

Innovatív és fenntartható

A BME-n zajló kutatások a közel-múltban az EU Innovációs Radarján is feltűntek, mégpedig öt innovatív pontban. A biológiailag lebontható, égésgátolt és vázerősített PLA/len kompozit, mint NYÁK-hordozó, önmagában innovatív, amelyhez a gyártási folyamatok is újdonságként társulnak, egészen a kompozit öszszepréslésétől az áramköri vezetőpályák kialakításán át a modul megfelelően optimalizált végszereléséig. Kutatómunkánk fontos eleme az áramköri tervek új anyaghoz és annak hulladékként történő feldolgozásához történő igazítása, már a tervezőasztalon. Az első valódi PLA/len-alapú tesztáramkörök a 2026-2027-es tanévben fognak megjelenni. A BME az Arduino-val, a Grenoble-i Műszaki Egyetemen és más partnerekkel karöltve egy speciális, közös tervezésű-gyártású, tanulóknak és alkotóknak szánt beágyazott elektronikai kreatív modullal teszteli a környezetbarát elektronikákban rejlő lehetőséget. Fontos üzenet,

hogy az így készült modulokat a diákok foghassák először kezükbe, akik a jövő mérnökeként, környezettudatos, akár ökoszorongással terhelt szakmájukban valódi változás felé terelhessék az iparágat, a fenntarthatóság jegyében.

Ennek a fogalomnak a boncolása persze mérnöki körökben sokszor a kedélyek borzolására is alkalmas lehet. Mégis, a fenntarthatóság igen fontos irányokat jelöl ki. A fenntarthatósági modell szerint a piacnak úgy kell növekedést felmutatnia, hogy közben a környezeti erőforrásokat a holnapi napon is ugyanúgy elérhessük, mint ahogyan ma kezdtük el a munkát. Hogyan lehet ezt egy környezetbarát hordozóval segíteni? Alkalmazásuk az ENSZ Fenntartható Fejlődési Célok (Sustainable Development Goals, SDGs) pontjai mentén is értelmezhetővé válik, ha megnézzük ezeket a feltételeket. Az SDG9 tekintetében az ipari innováció és infrastruktúra

megújítása a cél. Meglévő infrastruktúrákkal, minimális költség-ráfordítással adaptálhatjuk az új típusú hordozókat. Az SDG12 a felelős gyártás és fogyasztás oldaláról megvilágítva válik közérthetővé: a jövőben a terméket megvásárló fogyasztó olyan alapanyagot választhat, amely elkészítése kedvezőbb gyártási feltételekkel, EU-forrásokból érkező körforgásos anyagokból zajlott. Az SDG13 az éghajlatváltozás elleni fellépést sürgeti: a környezetbarát áramköri hordozók már a korai vizsgálatok eredményei alapján is jelentősen csökkenthetik az elektronikai gyártásban jelentkező káros anyagok kibocsátását és a gyártási energiaigényt.

Ez az elektronika zöld jövője?

Bár a koncepció ígéretes, egyelőre a jelenleg ismert anyagi paraméterek, korlátozott kísérleti utakon igazolt megbízhatósági kérdések, és a hosszadalmas várható ipari befogadás miatt első körben a kommersz, lakossági elektronikákban történő alkalmazás a cél. Ám a 2025. évi elemzések alapján, és a feltörekvő mesterséges intelligenciát támogató termékek és okoseszközök miatt ezermilliárd dolláros piacra tekinthetünk a hordozóval. Ha ennek csak egy adott szegletét érinti kezdetekben az átmenet, már hatalmas lenyomatot hagyunk magunk után, remélhetően a jövő generációk és egy tudatosabb elektronikai fogyasztási közösség szolgálatában.

HAVELLANT GERGŐ,
TAPPERNER ZOLTÁN
BME Villamosmérnöki és
Informatika Kar

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk megírásához nyújtott segítségéért köszönetet szeretnénk mondani PhD-tanulmányaink témavezetőjének, Dr. Géczy Attilának és az általa vezetett Desire4EU- és BEATRICE-pályázatoknak. Előbbi a HORIZON-EIC-2023-PATHFINDERCHALLENGES-01-04 programon belül a DESIRE4EU, No. 101161251, utóbbi az M-ERA.NET BEATRICE (Biobased eGradable flAme reTardant pRinted eCo-Electronics, project No. 100688487) címmel segíti a fenntarthatóbb elektronikák magas szintű megvalósítását és a koncepció ismertetését.