

# Fogyasztásmérő rendszer tervezése kiber-fizikai környezetbe

## Development of a consumption monitoring system in a cyber-physical environment

Farbaky Pál János<sup>1</sup>

<sup>1</sup>HUN-REN SZTAKI, 1111 Budapest, Kende utca 13-17, farbaky.pal@sztaki.hu

### Abstract

*The system called PowerHub is made to monitor the power consumption of the SmartFactory, a pilot cyber-physical production environment, and also to control its power supply. The SmartFactory models and presents the production processes in a compressed, easily conceivable space. It aims to educate manufacturing management and widely applied industrial methodologies. Moreover, it provides a controlled but physical production environment for testing. The PowerHub monitoring system operating within this Industry 4.0 environment will provide necessary power measurements for research regarding environmental protection and energy efficiency.*

**Keywords:** power consumption measurement, cyber-physical system, low-level programming, PCB designing

### Kivonat

*A PowerHub névre hallgató konstrukció feladata a SmartFactory kísérleti kiber-fizikai gyártórendszer energiahasználatának folyamatos monitorozása, illetve a tápellátás vezérlése. A SmartFactory a gyártási folyamatokat egy könnyen belátható térben, modellezve mutatja be, célja a gyártásirányítás és az iparban is elterjedt módszertanok oktatása, valamint tesztelése egy kontrollált, de valós gyártási környezetben. A PowerHub egy IPAR 4.0-s környezetben megvalósított mérőrendszer, ami később fontos környezetvédelmi és energiahatékonysági kutatásokhoz nyújthat fogyasztási adatokat.*

**Kulcsszavak:** fogyasztásmérés, kiber-fizikai rendszer, alacsony szintű programozás, nyomtatott áramkör tervezés

## 1. BEVEZETÉS

A SmartFactory egy kísérleti kiber-fizikai gyártórendszer, melynek célja egy modern gyártósor, és annak folyamatainak modellezése, egy lezsugorított, könnyen átlátható, szobányi területen. A terem a HUN-REN SZTAKI-n belül a Mérnöki és Üzleti Intelligencia Kutatólaboratóriumhoz tartozik. A bemutatótér kiépítése több mint 10 éve kezdődött, és azóta is folyamatos fejlesztés és bővítés alatt áll. [1] Egyik legújabb fejlesztéseként került megépítésre a PowerHub fogyasztásmonitorozó, és tápellátás-vezérlő rendszer. A PowerHub a gyártósor eszközeinek fogyasztását különálló csatornákon méri, és egy soros kommunikációs protokollal egy Raspberry felé továbbítja, ami így elérhetővé teszi az adatokat a hálózaton keresztül. A következő fejezetek a tervezési és megvalósítási folyamatot mutatják be.

## 2. RENDSZERTERV

A cél alacsony szintű, bővíthető és moduláris fogyasztásmérő és tápellátás-vezérlő egység tervezése, fizikai és soros kommunikációs vezérléssel, biztonsági funkciókkal.

### 2.1. Fogyasztók áramfelvétele

A SmartFactoryn belül párhuzamosan működő fogyasztók áramfelvétele nagyban meghatározza a tervezést, a választható alkatrészek tárházát. Az egyik első lépés volt a fogyasztók áramigényének mérése. A mérési eredményeket az 1 táblázat tartalmazza.

| Fogyasztó                | Feszültség [V] | Áramfelvétel [A] |
|--------------------------|----------------|------------------|
| Megmunkáló állomás – PLC | 24             | 1,71             |
| – MCU                    | 24             | 1,65             |
| – SBC                    | 12             | 0,47             |
| – MCU                    | 12             | 0,49             |
| Magasraktár              | 24             | 1,24             |
| Szállítószalag           | 24             | 0,65             |

## 2.2. Modularitás

A tervezésnél fontos igény volt a modularitás, az egyszerű bővíthetőség és cserélhetőség miatt. Jelenleg 21 különálló csatornára van szüksége a bemutatóteremben működő alegységeknek, viszont a folyamatos átalakulás és fejlesztések indokolják a bővíthetőséget. A busz rendszerű kommunikáció biztosítja a csatornák egyszerű bővíthetőségét. Az I2C kommunikáció nagy előnye, hogy a buszon akár 128 slave eszköz lehet, egészen addig, amíg az I2C címük különbözik.[2] Mind fogyasztásmérésre, mind tápellátás kapcsolására elérhetőek kész integrált áramkörök, amik az I2C kommunikációs protokollt alkalmazzák.

## 2.3. Mikrovezérlő

A feladatra kiválasztott mikrovezérlő egy SZTAKI-s fejlesztésű, ATmega644-es processzorra épülő mikrovezérlő volt. Az ATmega vezérlők igen elterjedtek, könnyű elérhetőségük, széles felhasználhatóságuk, és alacsony áruk miatt. A hobbielektronikával foglalkozók körében jól ismert Arduino mikrovezérlők jó része is ezeken az ATmega processzorokon alapul. A 644-es mikrovezérlő programozható Arduino IDE-n keresztül C++ nyelven.

## 3. ELEMKÉSZLET KIVÁLASZTÁSA

A megvalósítási folyamat fontos lépése az elvárt funkciók és tulajdonságok mentén az elemkészlet kiválasztása.

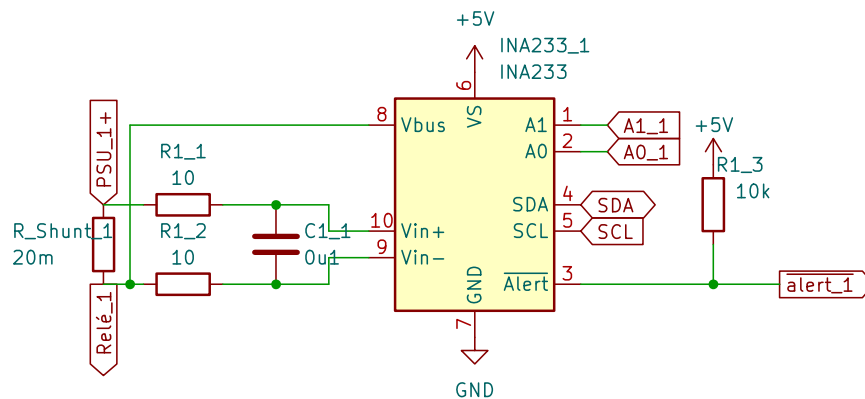
### 3.1. Választott mérési módszer

Az INA233 egy kompakt fogyasztásmérő IC, Delta-Sigma típusú 16 Bit-es AD átalakítóval. Az integrált áramkört specifikusan fogyasztásmérésre tervezték, így minden szükséges funkcióval rendelkezik. Az eszköz párhuzamosan méri a söntön eső ellenállást, illetve a buszfeszültséget. Az INA233 az alapvető mérési funkciókon felül nyújt további lehetőségeket, például a belső teljesítmény számolást. A söntellenállás és a tervezett maximális áramfelvétel függvényében egy kalibrációs együttható elmenthető az integrált áramkör egyik regiszterébe, így az INA233 a söntfeszültségből áramot tud számolni, valamint azt a buszfeszültséggel összeszorozva, a teljesítményt is számolja. A mérőegységből a címzési logikának köszönhetően akár tizenhat kerülhet közös I2C buszra. Az adatlapból [3] kiolvasható legfontosabb mérési paramétereket a 2. táblázat tartalmazza. A kiegészítő áramkör az adatlapban szereplő ajánlások szerint készült el, a sematikus ábrája az 1. ábrán látható.

INA233 fontosabb tulajdonságai [3]

2. táblázat

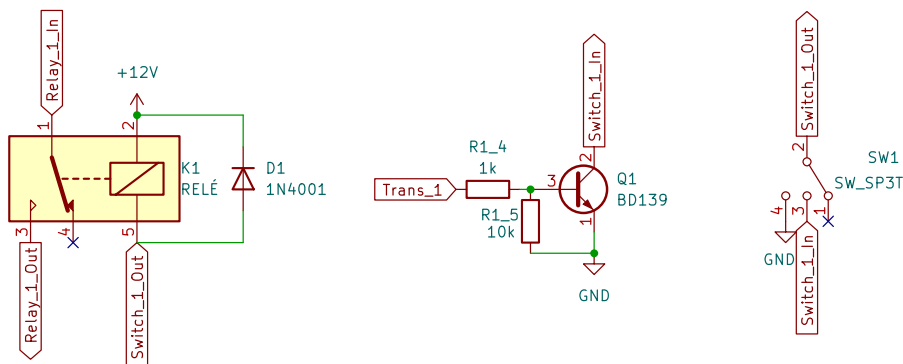
| Megnevezés          | Min    | Max     | Mértékegység |
|---------------------|--------|---------|--------------|
| Tápfeszültség       | 2,7    | 5,5     | V            |
| Buszfeszültség      | 0      | 36      | V            |
| Söntfeszültség      | -81,92 | 81,9175 | mV           |
| Felbontás           |        | 16      | Bit          |
| Söntfeszültség hiba | 0,02   | 0,1     | %            |
| Buszfeszültség hiba | 0,02   | 0,1     | %            |



1. ábra. *INA233* sematikus ábrája

### 3.2. Választott táp kapcsolás

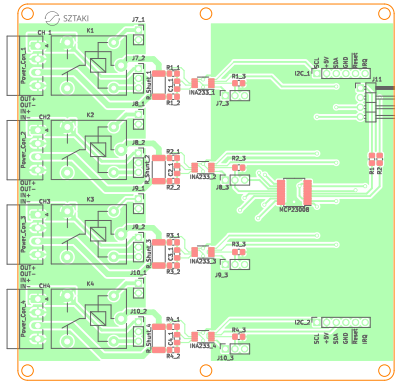
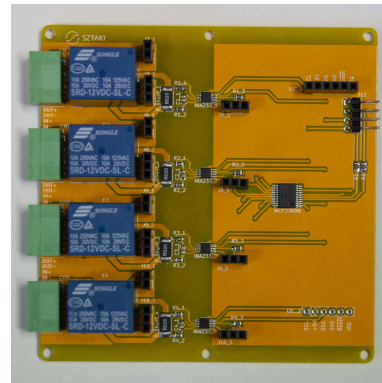
A galvanikus leválasztás, és egyszerű működésünk miatt relés kapcsolás került beépítésre a PowerHub moduljain. A relé tekercse 12[V]-os, mivel így a kapcsolási tranziens jelenségek a mérő IC tápellátáson nem jelennek meg. A tekercset egy MCP23008 IO bővítő vezérli egy BD139 típusú NPN tranzisztoron keresztül. Az MCP23008 az I2C protokoll szerint kapott jel alapján nyolc lábat tud ki vagy bemenetként konfigurálni, nagyon hasonlóan az Arduino-n található lábakhoz. Az IC összesen nyolc lehetséges I2C címmel konfigurálható. [4] A relé kapcsolás sematikus felépítése a 2. ábrán látható.



2. ábra. Relé kapcsolás sematikus ábrája

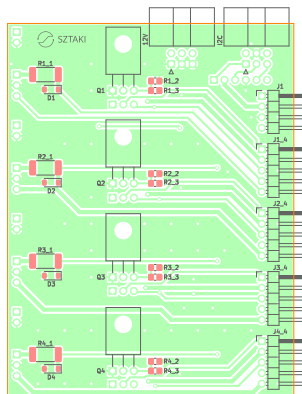
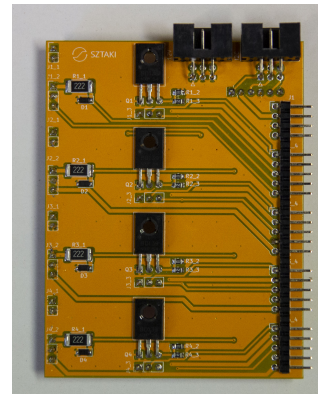
### 3.3. Nyomtatott áramkör megtervezése

A modulon belül négy csatorna került kialakításra, az INA233 címzési rendszere miatt. Az áramkörön belül a négy csatorna teljesen azonosan épül fel, egyedül a címző lábuk tér el, így a NYÁK tervezésnél egy csatorna elrendezése után a többi már adott volt. A nyomtatott áramkörök terveihez a KiCAD ingyenesen elérhető áramkörtervező adta a szoftveres környezetet. Az áramkör három különálló lapból áll. Az alaplapon kapott helyet a mérőáramkör, valamint a kapcsoló relé és az azt meghajtó IO expander. Az alaplapon a készült verzió a 3. képeken látható. Az emeleten a relé tekercset ellátó 12[V]-os tranzisztorok kaptak helyet, illetve az I2C busz, valamint a 12[V]-os táp csatlakozói. Az emelet terve és a megvalósult áramkör a 4. képeken látható. Az előlapra került minden olyan alkatrész, ami a felhasználó felé ki- és bemenetként funkcionál. Az előlapon találhatóak az állapotot jelző LED-ek, az I2C címzéshez használt jumperek, valamint a szoftveres relévezérlést felülíró kapcsolók is. Az előlap terve és a betelepített kész NYÁK-lap az 5. képeken látható. A használt áramkört elemek közül áramlimit szempontjából a felső határt az INA233 határozza meg, a rendszer legfeljebb 4[A]-es fogyasztók monitorozására képes.

(a) NYÁK *terv*

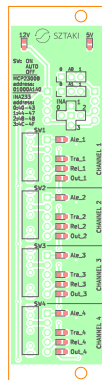
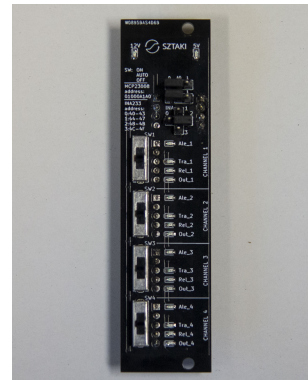
(b) kész NYÁK

3. ábra. Alaplap

(a) NYÁK *terv*

(b) kész NYÁK

4. ábra. Emelet

(a) NYÁK *terv*

(b) kész NYÁK

5. ábra. Előlap

### 3.4. Mikrovezérlő shield tervezése

A megfelelő számú modulok vezérléséhez szükség volt egy shield tervezésére, ami ráillik a mikrovezérlőre. A shield fő feladata az I2C buszok leválasztása, amihez egy multiplexer IC a legegyszerűbb megoldás. A TCA9548 egy nyolc csatornás I2C kapcsoló, amit szintén I2C parancsokkal lehet vezérelni. Az adatlapban [5] szereplő ajánlott áramkörön kívül még helyet kapott a NYÁK lapon az I2C buszok csatlakozója, valamint négy nyomógomb közvetlen irányításhoz.

## 4. INTEGRÁCIÓ

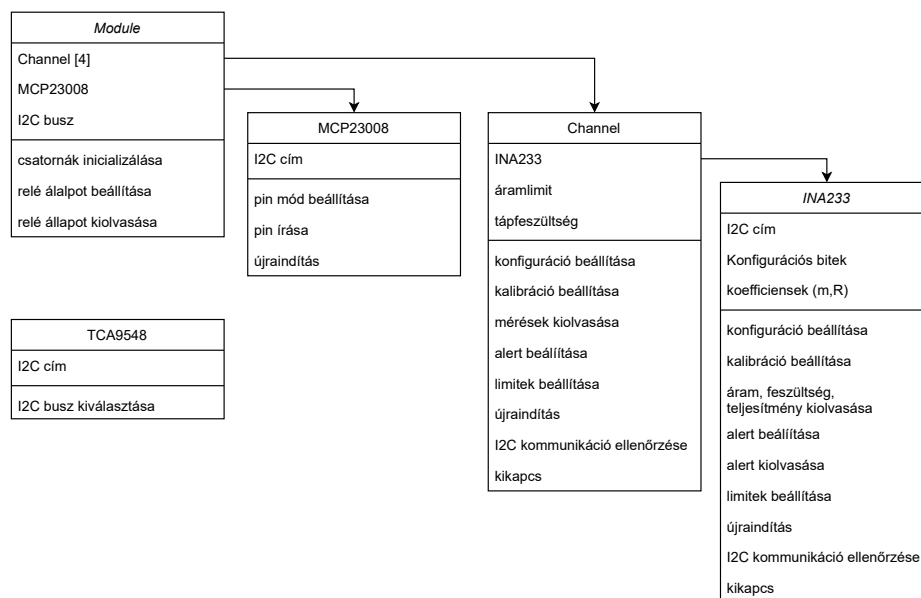
Az integráció folyamatához tartozott a nyomtatott áramkörök betelepítése, valamint a mikrovezérlőn használt szoftver megírása, illetve a konstrukciót befoglaló tartórendszer megtervezése.

### 4.1. Nyomtatott áramkörök összeszerelése

A kész áramkörti tervekhez a NYÁK lapok Kínában kerültek legyártásra, a PCBWay cégnél. Az alkatrészek pedig főként a Hestore online boltból lettek kiválasztva. Az elemek beültetése a NYÁK-ba sima forrasztópákával történt. A PowerHub jelenleg hat modult igényel, így ennek megfelelően, tartalékkal számolva tíz modulra elegendő alkatrész, és nyolc kész modul épült meg.

### 4.2. Szoftverfejlesztés lépései

Az Arduino nyílt forráskódú fejlesztési környezet, így a használt integrált áramkörökhöz elérhető volt kész könyvtár a funkciók többségével. Ezeket a könyvtárakat integrálva szükség volt egy központi PowerHub könyvtár létrehozására, ami egyben képes kezelni az összes integrált áramkört, valamint a csatornák és modulok kezelésére is rendelkezik beépített függvényekkel. A könyvtár struktúrája objektumorientált programozás alapelvei szerint épül fel. A struktúra a 6. ábrán látható.



6. ábra. PowerHub osztályok felépítése

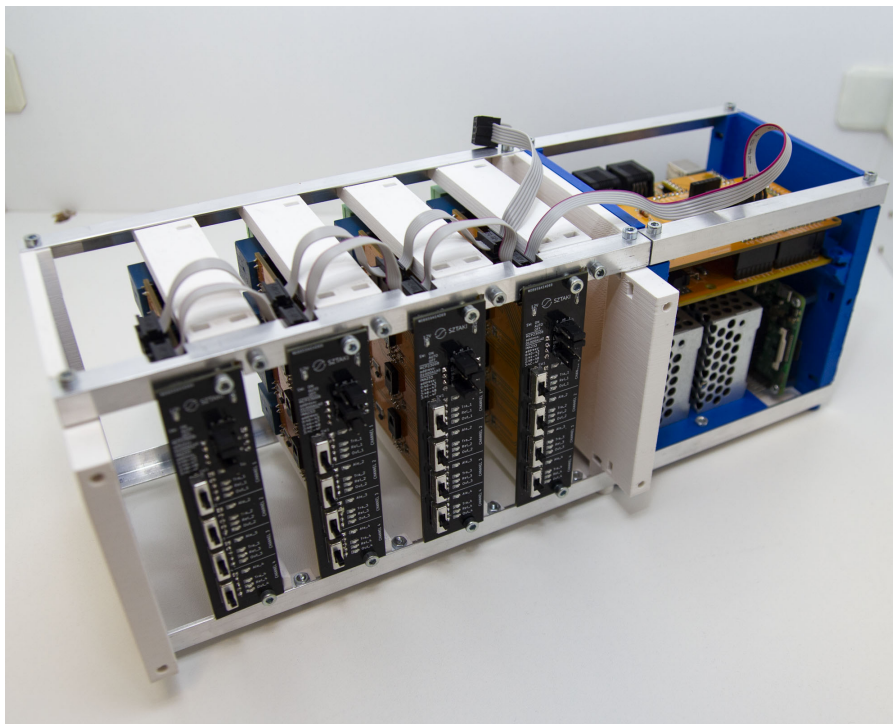
Az Arduino egy Raspberry-n keresztül kapja a parancsokat egyedi kommunikációs protokoll szerint. A legfőbb funkciók a mérési parancsok, melyek a mért feszültséget, áramot, és teljesítményt adják vissza, illetve a vezérlési parancsok, melyek a tápellátást kapcsolják. Fontos szerepet kaptak még a konfigurációs beállítások, amik például áramlimitet és biztonsági funkciókat határoznak meg.

### 4.3. Tartórendszer megtervezése

A PowerHub mérőegységei úgynevezett Rackekből állnak össze, amiket 3D nyomtatott alkatrészek és alumínium profilok alkotnak. Az egymáshoz szerelt Dc Rack és vezérlőegység a 7. képen látható. A modulokat két csavar rögzíti egy sínben, így egyszerűen cserélhetők.

## 5. FEJLESZTÉSI, ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEK

A jelenlegi konstrukció a 12 illetve 24 [V]-os egyenfeszültséget méri, viszont a laborban található 220[V]-os váltóárammal működő eszközök is. A 220[V]-os fogyasztók monitorozására jelenleg nincs mérőeszköz. A PowerHub kiegészítéseként folyamatban van egy erre alkalmas modul tervezése, amivel a rendszer már teljes képet adna a labor energiafelhasználásáról.



7. ábra. Egy-máshoz rögzített Dc Rack és vezérlőegység

### 5.1. Tranziens vizsgálat

A fejlett fogyasztásmérő IC lehetőséget biztosít relatíve nagy frekvenciás tranziens vizsgálatra is, az INA233 mintavételezési ideje akár  $140[\mu s]$ -ra is lecsökkenthető. Az I2C kommunikáció és az Arduino sebessége miatt a teljes rendszer egy csatornát  $1,825[kHz]$ -es frekvencián,  $548[\mu s]$ -os mintavételezési idővel tud mérni. A jelenleg alkalmazott rendszer a tranziens vizsgálatból csak a maximálisan mért értéket adja vissza. A bemutatóterem üzembe helyezéséhez a PowerHub sorban, egyesével bekapcsolja a csatornákat és mintavételezi őket fél másodpercen keresztül, majd az összes csatorna bekapcsolása után a Raspberry felé kommunikálja a maximálisan mért áramértékeket. Ez a szekvenciális indítás védelmet nyújt a tápegységek hirtelen túlterhelésével szemben.

### 5.2. Mérési adatok jelentősége

A PowerHub fejlesztésének egyik legfontosabb része az gyárról kapott adatok bővítése. SmartFactoryban ezentúl lehetőség nyílik a folyamatok időbeli elemzése mellett azok fogyasztását is számszerűsíteni. A jövőben így a SZTAKI részt vehet energiafogyasztással kapcsolatos fontos kutatásokban és kézzel fogható tesztkörnyezetet biztosíthat. Ezzel olyan, a mai világban kulcsfontosságú irányokkal foglalkozhat, mint például a fenntartható fejlődés és környezetvédelem.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Kemény Z., Beregi R. J., Erdős G., Nacs J. *The MTA SZTAKI Smart Factory: Platform for Research and Project-oriented Skill Development in Higher Education*. Procedia CIRP. Elsevier BV, 2016, 54, 53–58. doi: [10.1016/j.procir.2016.05.060](https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.060)
- [2] Jonathan Valdez J. B. *Understanding the I2C Bus*. Texas Instruments Incorporated. 2015. <https://www.ti.com/lit/an/slua704/slua704.pdf>
- [3] *INA233 High-Side or Low-Side Measurement, Bidirectional Current and Power Monitor With I2C-, SMBus-, and PMBus-Compatible Interface*. Initial Release. Texas Instruments Incorporated. 2017. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina233.pdf>
- [4] *MCP23008/MCP23S08*. Revision G. Microchip Technology Inc. 2022. <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/APID/ProductDocuments/DataSheets/MCP23008-MCP23S08-Data-Sheet-DS20001919.pdf>
- [5] *TCA9548A Low-Voltage 8-Channel I2C Switch with Reset*. Revision H. Texas Instruments Incorporated. 2024. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tca9548a.pdf>