



Pázmány Péter Katolikus Egyetem
Információs Technológiai és Bionikai Kar

TDK dolgozat

Intelligens fogyasztásmérő viselkedésalapú fogyasztófelismeréssel

Németh Dániel István
Mérnök informatikus BSc

2021

Témavezető:
dr. Tornai Kálmán

Absztrakt

Az elektromos fogyasztók klasszifikációja viselkedésük alapján több szempontból is lényeges feladat intelligens háztartás vagy elektromos hálózat részeként. Egy ilyen rendszer megteremti a lehetőséget az intelligens felügyeletre, valamint lehetővé teszi a beavatkozást is, amellyel pillanatnyi terhelésváltozásokra jobban reagáló, a kapacitás elosztást hatékonyabban megvalósító hálózat létrehozása lehetséges. A jelenlegi eszközök önma-gukban nem alkalmasak erre, ezért a folyamat automatizálása számos előnyt jelent. Az elektromos hálózat intelligens felügyelete lehetővé teszi például a hálózati fogyasztás üte-mezését, és ezáltal a hálózati terhelés nagyságának befolyásolását.

A létező mérőeszközök esetén az intelligens hálózat kialakításának koncepciója a csatlakoztatott eszköz automatizációján alapul, központi vezérlés mellett. Azonban ezek statikusan programozott eszközök, azaz hiányzik belőlük az a képesség, ami a csatlakoztatott fogyasztót felismeri és dinamikusan alkalmazkodik, profilt képes váltani. Ezen probléma megoldására rövid mérési idősorok feldolgozása ad megoldást. Saját kutatásom erre a problémára keresi a megoldást, amelynek első lépésként a Petrović et al által létrehozott rendszert [1] vizsgáltam meg. Az ötlet alapja, hogy az egyes csatlakoztatott fogyasztók adott (módosított) bemeneti gerjesztésekre különböző választ (torzítást) adnak, amely mérhető. A módszer előnye, hogy nagyon rövid mérési periódus, az így gyűjtött adatok pedig ezt követően gépi tanulási eszközökkel klasszifikálhatók.

A kutatás első részében a mérőeszköz hardver került megtervezésre és megépítésre. A mért adatokat először Support Vector Machines klasszifikációs módszerrel vizsgáltam. Fontos szempont, hogy az eszköz csak minimális mennyiségű adatot gyűjtsön, ami csökkenti a mérési időt és a klasszifikációs modell létrehozásának, valamint a klasszifikáció végrehajtásának erőforrásigényét. A kutatás során először elméleti számolásokkal kerestem optimális megoldást a mérés tulajdonságainak (mérési profil) meghatározására, majd kísérleti méréseket is végeztem így meghatározott mérési profilokkal. A kísérleti mérések alapján kevesebb, mint egy másodperces mérési idő is elegendő volt 99% feletti pontosságú klasszifikációhoz. A kutatás során a nyílt halmaz alapú klasszifikációt is megvizsgáltam a mérési adatokon.

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés	4
2	Szakirodalom áttekintése	5
2.1	Hálózati fogyasztásmérés	5
2.2	Active Sensing Approach to Electrical Load Classification by Smart Plug [1]	9
2.3	Nyílt halmaz alapú felismerési módszerek	11
2.4	LSTM Rekurens hálózatok	12
2.5	A tervezett mérőeszköz által végzett mérések elméleti háttere	13
2.6	Felhasznált programkönyvtárak	15
2.7	Klasszifikációs metrika	16
3	A mérőeszköz	17
3.1	A mérőeszköz hardver	17
3.2	A mérőeszköz kalibrációja	17
3.3	A mérőeszköz szoftvere	17
3.4	A mérések hibája	21
4	Kísérleti mérések	23
4.1	Lényegkiemelés	23
4.2	SVM klasszifikáció	25
5	Klasszifikáció további mérésekkel	26
5.1	Klasszifikáció kevesebb adattal	26
5.2	Optimális megoldás keresése kevesebb adattal történő méréshez	31
5.3	SVM klasszifikációs eredmények az extrapolált adatokon	33
6	Klasszifikációs eredmények más mérési profilokkal	38
6.1	Mérési profilok meghatározása	38
6.2	Mérőeszköz szoftver módosítása	38
6.3	Mérés a meghatározott mérési profilokkal	39
6.4	Nyílt halmaz alapú felismerési módszer vizsgálata	42
6.5	A mérési profilokkal végzett mérések klasszifikálása Fully Connected neurális hálózattal	42
6.6	Klasszifikáció LSTM neurális hálózattal	45
7	Összefoglalás	47
7.1	Jövőbeli tervek	47

1 Bevezetés

Napjainkban a megújuló energiaforrások elterjedése miatt az elektromos hálózat terhelés-elosztása egyre nagyobb hangsúlyt kap. A smart grid-nek képesnek kell lennie az energia-termelés és fogyasztás kiegyensúlyozására (load balancing). Az ilyen hálózat hatékony működéséhez a csatlakoztatott hálózati fogyasztók ismerete szükséges. A ma elérhető okos mérőeszközök nem képesek felismerni a csatlakoztatott fogyasztót. A fogyasztást mérik, valamint képesek a fogyasztó áramellátásának manuálisan vezérelt, valamint automatizált ki- és bekapcsolására. A kutatás célja egy olyan mérőeszköz létrehozása volt, mely rövid idő alatt képes felismerni a csatlakoztatott fogyasztót. A csatlakoztatott fogyasztó ismerete alapján lehetőség nyílik a terhelés befolyásolására, a fogyasztó ezen információ alapján történő vezérlésére. A fogyasztók gyors felismerése lehetőséget ad a fogyasztók automatizált vezérlésére és így a hálózati terhelés befolyásolására. A tervezett mérőeszköz akár egy másodperc alatt is képes elég adatot gyűjteni az eszköz felismeréséhez. Ez egy terheléelosztó rendszer esetén például értékes információ, a rendszer a csatlakoztatott fogyasztó adatai alapján meghatározhatja a terhelés várható változását.

A kutatás során a Petrović et al által létrehozott rendszert [1] vizsgáltam meg először, ahol az adatok gyűjtése a hálózati jel manipulálása (levágása) mellett történt. Ebből kiindulva megvizsgáltam a megoldás egy továbbfejlesztett, gyorsabb változatát. A mérőeszköz megtervezésekor fontos szempont volt, hogy könnyen beszerezhető, olcsó komponensei legyenek, így mind további kutatásokhoz, mind termékként egyszerűen megépíthető legyen. Az eszközben egy WiFi-t támogató mikrokontroller van, így az eszköz a későbbiekben akár vezeték nélkül is vezérelhető, továbbíthatja a mérési adatokat. A mérésekből kinyert feature-ökon zajlott először az SVM alapú klasszifikációs módszer vizsgálata. Az elvégzett mérések alapján megvizsgálásra került a mérési idő csökkentése, amihez az elméleti számolások után további mérések voltak szükségesek. Ekkor került bevezetésre a mérési profilok fogalma is. A klasszifikációs megoldások pontosságának vizsgálata a kijelölt mérési profilokkal végzett mérési adatokból kinyert feature-ökon valósult meg.

2 Szakirodalom áttekintése

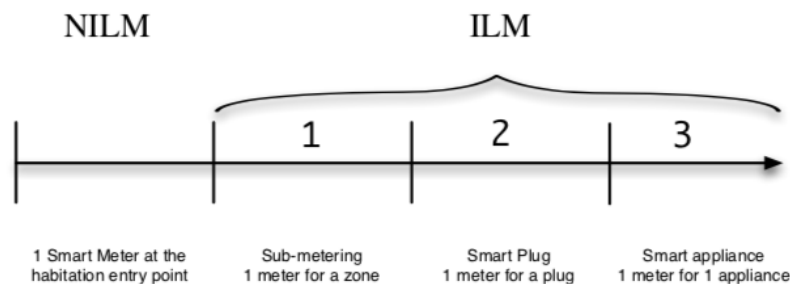
A hálózati fogyasztók elektromos fogyasztásának vizsgálata kulcsfontosságú a hálózat fogyasztásának optimalizálásához. Ez a fejezet áttekinti az elektromos fogyasztásméréssel kapcsolatos szakirodalmat, a felhasznált gépi tanulási módszereket, valamint az elkészített mérőeszköz működésének elméleti hátterét.

2.1. Hálózati fogyasztásmérés

Az elektromos fogyasztásmérés egyik célja, hogy lehetőséget adjon a hálózat terhelésének befolyásolására. A napelemek és más megújuló energiaforrások elterjedésével az elektromos hálózatok fogyasztásának befolyásolása kulcsfontosságú az elérhető energia hatékony felhasználásához [2]. A Manar Jaradat et al. által publikált cikkben [2] a fogyasztói oldal általi fogyasztásütemezést (Demand-Side Management – DSM) egy lineáris programozási problémaként közelítették meg. A cél a megújuló energiaforrás kihasználásának maximalizálása és a fogyasztott elektromos áram árának minimalizálása.

Az elektromos fogyasztók fogyasztásának mérése történhet intruzív és nem-intruzív módon [3]. A Nem-Intruzív fogyasztásmérés (Non-Intrusive Load Monitoring – NILM) okos elektromos fogyasztásmérővel (Smart Meter - SM) történhet. Az okos villanyóra képes kommunikálni az elektromos szolgáltatóval, ezáltal segítve az okos elektromos hálózat (Smart Grid) működését a háztartás fogyasztási adatainak továbbításával. NILM esetén a háztartásban további eszközt nem szerel fel a szolgáltató. Mivel egyetlen ponton méri az okos villanyóra a háztartás fogyasztását, így az egyes fogyasztók energiafelhasználásának összege kerül rögzítésre. Ekkor szükség van az energiafogyasztás görbéjének felbontására (disaggregation) a fogyasztást alkotó fogyasztók meghatározásához.

A másik megoldás az Intruzív fogyasztásmérés (Intrusive Load Monitoring -ILM) amikor a fogyasztók energiafogyasztását külön-külön méri a rendszer. Antonio Ridi et al.



2.1. ábra. NILM és ILM kategóriái. Forrás: [3]



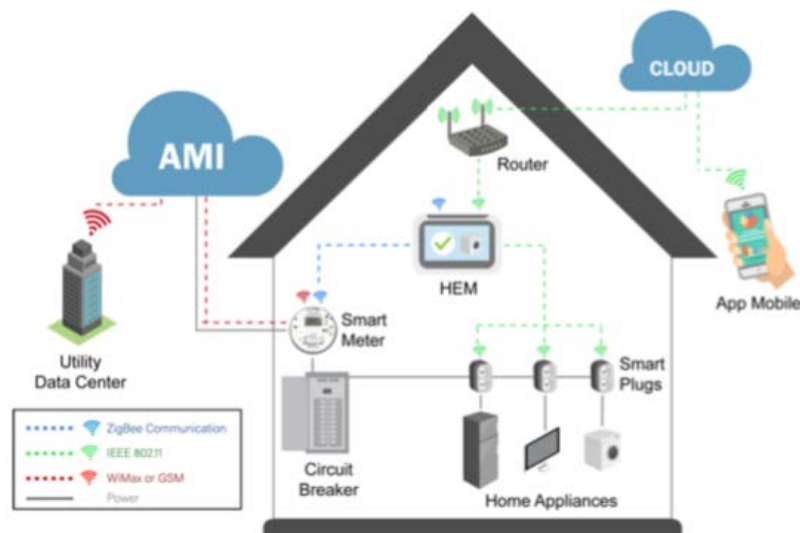
2.2. ábra. Fogyasztók hanggal történő vezérlését megvalósító hálózat. Forrás: [4]

által publikált cikk [3] az ILM eszközöket három kategóriába sorolja (2.1. ábra):

- ILM 1 : Egyes zónák fogyasztásának mérése egy háztartásban vagy épületben.
- ILM 2 : A fogyasztásmérők a hálózati csatlakozóknál találhatóak és a csatlakozóra kötött eszköz vagy eszközök fogyasztását mérik.
- ILM 3 : Minden eszköz energiafogyasztását külön méri a rendszer. A mérőeszköz vagy közvetlenül a fogyasztóba van beépítve vagy a fogyasztó számára kijelölt hálózati csatlakozóba.

A fogyasztók automatikus, illetve hanggal vagy más módon történő vezérlése (ki- és bekapcsolása) is fontos napjainkban [4]. A jelenleg elérhető technológiákkal lehetséges az eszközök okos konnektorokon keresztül történő vezérlése (2.2. ábra), azonban az eszköz beállítását, illetve a konnektorhoz csatlakoztatott eszköz adatait a felhasználónak kell megadnia, hiszen a jelenleg kapható eszközök nem képesek felismerni a konnektorra csatlakoztatott eszközt.

A jelenleg kapható okos dugalmérők sok évvel le vannak maradva a témával kapcsolatos kutatások eredményeitől [5]. Ezek az okos konnektorok (Smart Plugs) a rájuk kötött fogyasztót tudják ki- és bekapcsolni, illetve ezt ütemezni, távolról vezérelni. A legtöbb ilyen okos konnektor nem tudja meghatározni, hogy milyen eszköz van hozzákötve, és így a felhasználónak kell manuálisan megadni a konnektor be- és kikapcsolásának ütemezését. A Luis Gomes et al. által leírt rendszer [5] lényege, hogy míg a legtöbb eszköz csak a fogyasztási adatokat képes rögzíteni, addig a tervezett eszköz környezeti érzékelőket (hang, mozgás, hőmérséklet, páratartalom, CO₂) is tartalmaz. A megosztott tudás (shared knowledge) réteg lényege, hogy a gyűjtött adatokból a rendszer meg tudja határozni olyan dolgokat mint, hogy a csatlakoztatott eszköz használva van-e az adott pillanatban, használva lesz-e a következő egy órában, illetve hogy fogyaszt-e energiát és

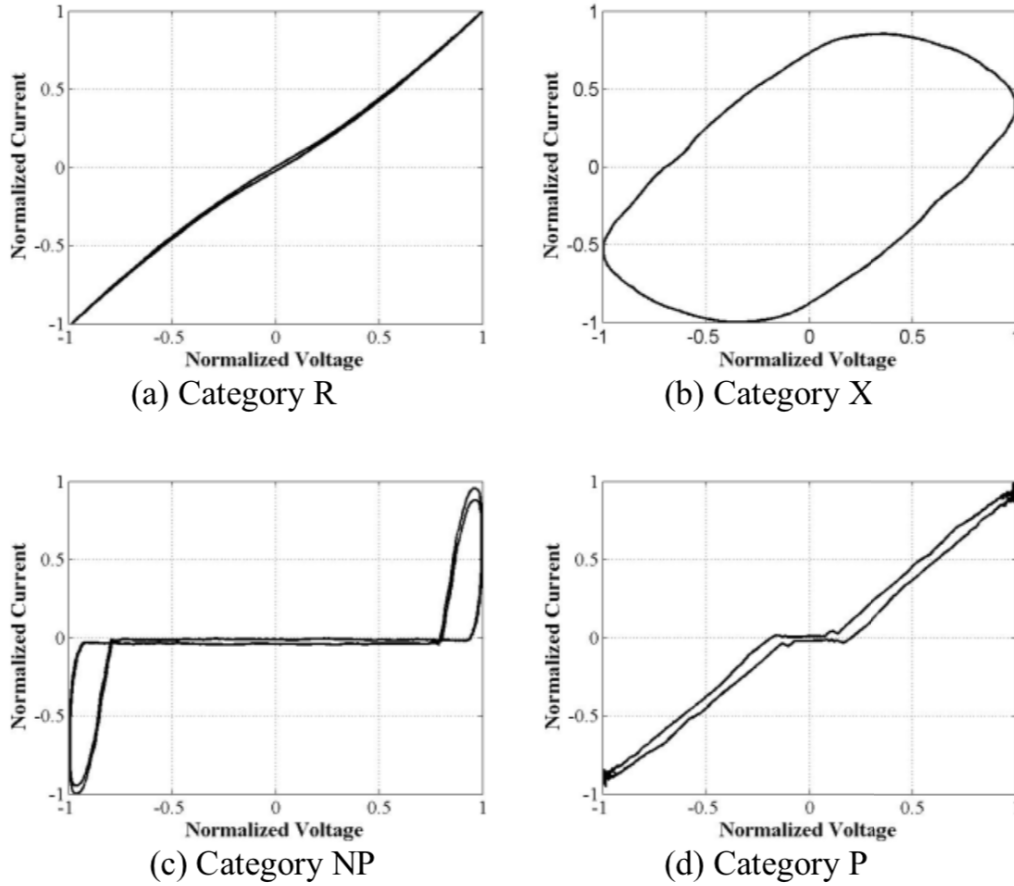


2.3. ábra. Artur F. da S. Veloso et al. által bemutatott rendszer. Forrás: [7]

fogyasztani fog-e energiát a következő egy órában. A dugalmérők egymással kommunikálnak és ezáltal nemcsak a saját adataikat használhatják a korábban említett kérdések eldöntésére. Egy ilyen rendszer lehetővé teszi az elektromos berendezések kikapcsolását és a fogyasztás ütemezését.

Az elektromos hálózati eszközök fogyasztása, illetve a fogyasztás változása is összefüggésben áll/állhat különböző külső tényezőkkel. A Tin Petrovic et al. által publikált cikkben [6] egy WiFi router fogyasztási adatainak segítségével határozták meg a helyiségben tartózkodók számát. Egy WiFi router fogyasztását befolyásolja a rajta átmenő adatforgalom, amit pedig a csatlakozott eszközök száma befolyásol. Az eszközök számát pedig az adott helyiségben tartózkodó emberek száma befolyásolja. A kutatók két hipotézise szerint a WiFi router fogyasztása arányos a rajta áthaladó hálózati forgalommal, illetve a hálózati forgalom arányos a helyiségben tartózkodók számával. A kísérletek során három router fogyasztását vizsgálták egy helyiségben. A helyiségben tartózkodók számának meghatározására kamerákat használtak, melyek 10 percenként készítettek képet a helyiségről. Ezután a mért adatokat 120 mintánként (egy perc alatt gyűjtött adat) csoportosították. Ezen csoportokhoz kiszámolták az minimum, maximum, illetve átlagos teljesítményt. A három router minimum, maximum és átlagos fogyasztásából, illetve az emberek számából álltak a 10 dimenziós vektorok, amin a klasszifikációt elvégezték random forest classifier használatával. Azt, hogy tartózkodik-e személy a helyiségben, egy perces csoportosítás esetén 99,34%-os pontossággal tudták meghatározni, míg a helyiségben tartózkodók számát 93%-os pontossággal.

Egy adott fogyasztó elektromos fogyasztásának adataiból nagy pontossággal fel lehet ismerni gépi tanulási módszerek segítségével a dugaljra csatlakoztatott eszközt. Az Artur F. da S. Veloso et al. által publikált cikk [7] egy olyan rendszert mutat be (2.3. ábra) ahol az okos fogyasztásmérők egy központi node-dal kommunikálnak, ami a rendszer vezérlését végzi az otthoni hálózaton belül. Az okos csatlakozók az elektromos terhe-

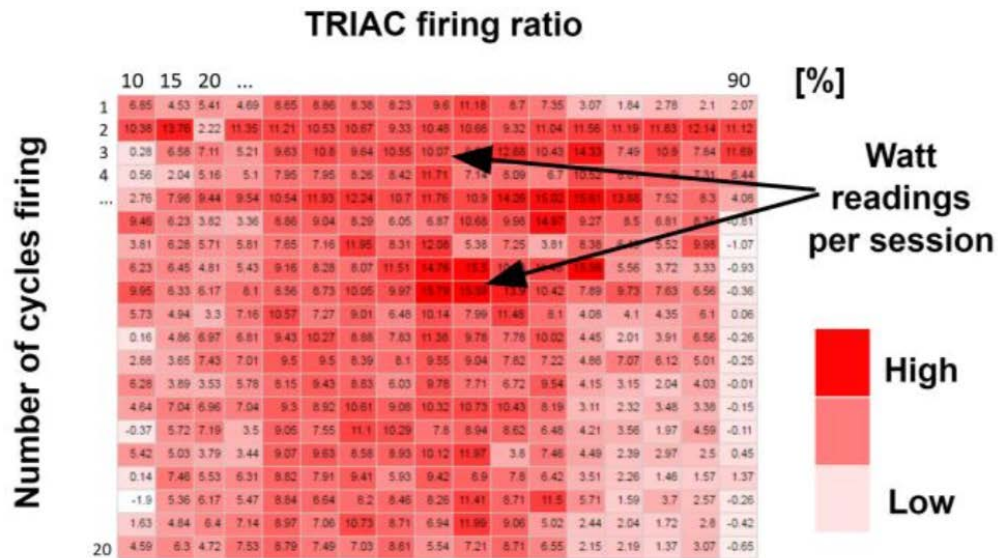


2.4. ábra. Különböző fogyasztók Feszültség-Áramerősség görbéje. Forrás: [8]

lés egyedi karakterisztikáinak segítségével azonosítják a csatlakoztatott eszközt (ELS – Electric Load Signature). A rendszer gépi tanulási algoritmus segítségével azonosítja a fogyasztót. Az azonosításhoz szükséges egyedi karakterisztikák meghatározásához minden eszköz fogyasztását egy órán keresztül másodpercenként rögzítették. A fogyasztó azonosításához kétféle klasszifikációs modellt használtak. Az első modell (A modell) egy döntési fa algoritmus, míg a második (B modell) Naive Bayes klasszifikációt alkalmaz. A bemenetek az elektromos fogyasztási adatok, a kimenet pedig az azonosított eszköz. Az okos csatlakozó által mért adatok a feszültség, áramerősség, power factor, látszólagos teljesítmény (apparent power) és aktív teljesítmény (active power). Az A modell pontossága 93,5%, míg a B modellé 99,9%.

Az elektromos fogyasztók klasszifikációját Liang Du et al. Feszültség-Áramerősség görbék segítségével végezték [8]. Különböző típusú fogyasztók más görbét rajzolnak ki. Ez látszik a 2.4. ábrán. Liang Du et al. a fogyasztókat hét kategóriába sorolták az áramköri karakterisztikáik alapján:

- Rezisztív fogyasztók (Category R) amik ellenállást tartalmaznak, és nincs fáziskülönbség a feszültség és áramerősség görbék között.
- Reaktív fogyasztók (Category X) ahol induktivitás van közvetlen a bemenetre kötve



2.5. ábra. A jelalak-módosításra adott válasz mátrixa. Forrás: [1]

egy egyenirányító után, emiatt nagy a fázisszög.

- Power Factor (PF) korrekció nélküli eszközök (Category NP)
- Power Factor korrekciós eszközök (Category P)
- Összetett struktúrájú fogyasztók (Category M)
- Lineáris fogyasztók (Category T)
- Fázisszög vezérelt fogyasztók (Category PAC)

Az így kapott görbéket egy bináris elemű mátrixszá alakították át, majd az így kapott adatok segítségével klasszifikálták a fogyasztókat Supervised Self-Organizing Map (SSOM) neurális hálózat segítségével.

Antonio Ridi et al. kutatásukban [9] két különböző klasszifikációs módszert is használtak. A Gaussian Mixture Models, illetve K-Nearest Neighbors klasszifikációs módszereket alkalmazták egy fogyasztó szignatúra adatbázis elemein.

2.2. Active Sensing Approach to Electrical Load Classification by Smart Plug [1]

A kutatás egyik alapjául szolgáló cikk a Petrović et al. által létrehozott rendszert mutatja be. A rendszer az elektromos fogyasztók bemenő hálózati jelalakjának befolyásolására adott választ rögzíti. A jelalak módosítását egy TRIAC (TRiode for Alternating Current) félvezető segítségével valósították meg. A fogyasztó teljesítményét egy Arduino Mega2560 mikrokontroller segítségével mérték 0,2ms-os gyakorisággal. Az így gyűjtött adatokat a mikrokontroller a hozzá csatlakoztatott számítógépnek továbbította. A hálózati jelalak módosítása során két paramétert vezéreltek. A jel maszkolásának arányát

(10-95%, 5%-os léptékben) és a maszkolás ciklusainak számát (1-20, egyesével). Egy ciklus 50 Hz-es hálózat esetén 20ms, tehát kis idő alatt sok mérést lehet elvégezni. A mért feszültség, áramerősség és teljesítmény értékek átlagából (több, mint 250 000 maszkolás) három darab 17x20-as mátrixot hoztak létre. A teljesítmény mátrixának megjelenítése a 2.5. ábrán látható. A csatlakoztatott fogyasztó gerjesztésre adott válasza a fogyasztó áramkörének karakterisztikáitól függ. Ez látható a 2.6. ábrán is. Ezáltal lehetséges egy hálózati fogyasztó azonosítása a mátrixa alapján.

A fogyasztók osztályozásához egy FC (Fully Connected) neurális hálózatot alkalmaztak. A bemeneti réteg 340 neuronból áll, melyek a teljesítmény értékek. A feszültség és áramerősség adatok használata csökkentette a klasszifikáció pontosságát, ezért azt nem vették figyelembe. Négy réteges hálózat esetén a klasszifikáció pontossága 96,5% volt.

A Petrović et al. által leírt módszer előnye, hogy az eszköz klasszifikációja gyorsan történik meg, hiszen egy ilyen, a fogyasztó gerjesztésekre adott válaszait tartalmazó mátrix létrehozása mindössze 45 másodpercbe telik.

2.3. Nyílt halmaz alapú felismerési módszerek

A nyílt halmaz alapú felismerési módszereknél fontos az alábbi két fogalom ismerete:

- Outlier detection: Ebben az esetben ismertek outlier mérések, melyek a tanítás során is felhasználásra kerülnek.
- Novelty detection: Ebben az esetben nem ismertek az osztályba nem illő mérések, a tanítás során nincsenek jelen. A továbbiakban ez a módszer kerül ismertetésre, megvizsgálásra.

Walter J. Scheirer et al. [10] bevezeti a klasszifikációs feladat nyíltságát:

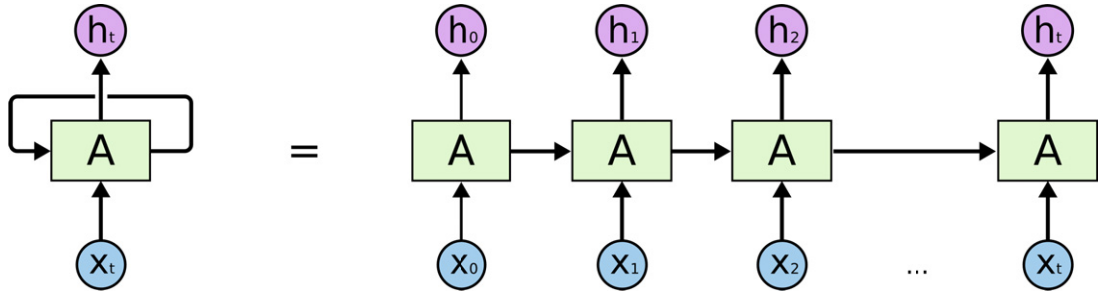
$$openness = 1 - \sqrt{\frac{2 \cdot |training\ classes|}{|testing\ classes| + |target\ classes|}}$$

A fenti egyenletben a training classes a tanulás során, a testing classes a tesztelés során, a target classes pedig az összes felismerendő osztályok számát jelöli. Látható, hogy abban az esetben, ha minden osztály szerepel a tanulásnál és tesztelésnél is, a nyíltság (openness) 0. Ennek tipikus esete a kutatás során is megvizsgált Multiclass SVM klasszifikációs módszer. Novelty detection esetén a tanítás során nem mindegyik osztály van jelen.

Hálózati fogyasztók klasszifikációja esetén a feladat az, hogy a rendszer felismerje ha a csatlakoztatott fogyasztó ismeretlen, nem szerepelt a tanító halmazban. Az ismeretlen fogyasztóról a rendszer mérési adatokat gyűjt, majd új modellt hoz létre.

A probléma nehézsége, hogy a tanulás során nincs információ az ismeretlen osztályokról. A feladat meghatározni a problémához megfelelő veszteség függvényt (loss function) függvényt és minimalizálni a kockázatot (R_I) [10]:

$$\arg \min_f \left\{ R_I(f) := \int_{\mathbb{R}^d \times \mathbb{N}} L(x, y, f(x)) P(x, y) \right\}$$



2.7. ábra. Rekurrens neurális hálózat egy darabja és az állapotainak idő szerinti kibontása. Forrás: [11]

Ahol d a feature vektorok dimenziója, y az osztályok labeljei ($y \in \mathbb{N}$), $P(x, y)$ az ismeretlen valószínűségi mérték $\mathbb{R}^d \times \mathbb{N}$ felett, f a keresett függvény ami minimalizálja az $L(x, y, f(x))$ veszteségfüggvényt.

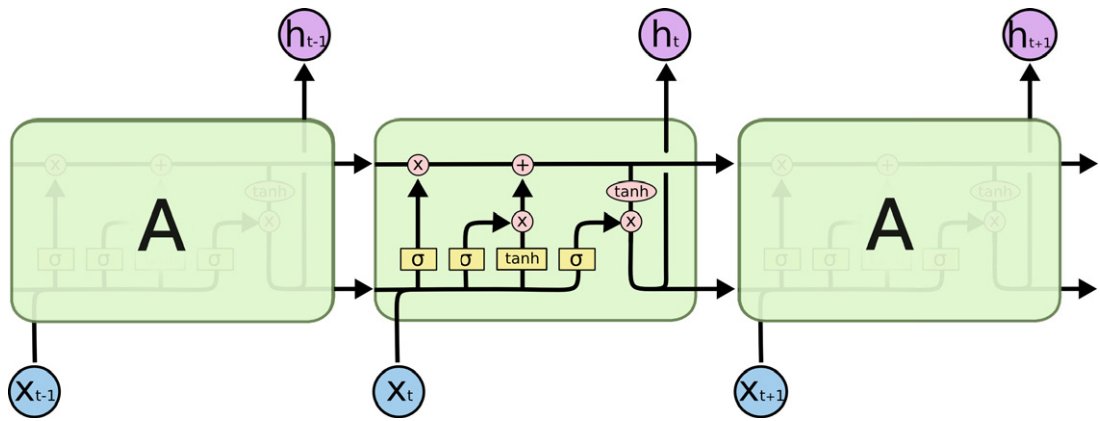
A fogyasztófelismerési feladat esetén az alábbiakat kell figyelembe venni:

- A teljes rendszer döntéseket hoz, profilt vált a csatlakoztatott fogyasztó típusa alapján.
- Ismeretlen eszköz detektálása esetén a rendszernek külső bement szükséges, új eszköz esetén a mérési profil megadása, már ismert de ismeretlennek klasszifikált esetben a tényleges osztály megadása. Mindkét esetben a mérőeszköz további méréseket végez és a klasszifikációt végző modellt változtatja.

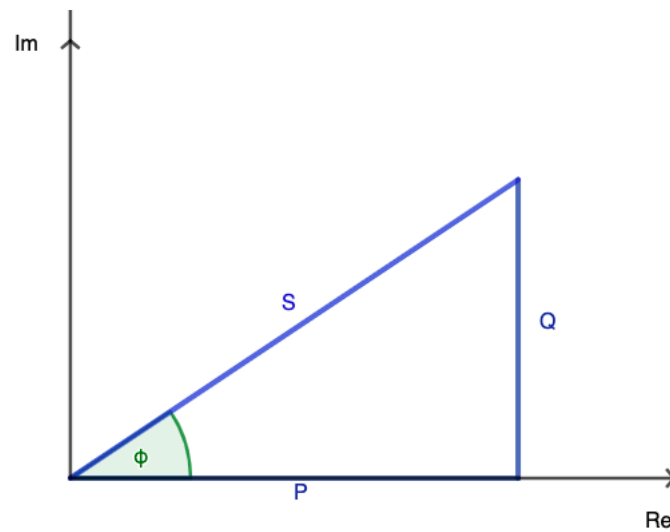
A fentiekfigyelembe vételével jelen esetben a hamisan ismertnek klasszifikált ismeretlen minimalizálása a feladat, tehát a rossz profil alkalmazásának elkerülése a cél. Ezen esetben elfogadhatóbb, ha esetleg ismert eszközöket is ismeretlennek klasszifikál a rendszer. A kutatás során ezen prioritások figyelembevételével kerültek beállításra az RBF kernel-es single class SVM alapú novelty detection rendszer paraméterei.

2.4. LSTM Rekurrens hálózatok

A Long Short Term Memory alapú neurális hálózatok a gradiens eltűnésének problémájára adnak megoldást. A hagyományos rekurrens neurális hálózatoknál probléma volt a tanítás során a hiba visszavezetése (backpropagation) esetén a gradiens eltűnése. A 2.7. ábrán látszik egy rekurrens hálózat része és annak különböző idővel változó állapotai. A kimenet függhet sokkal korábbi bementektől is, amelyeket a hálózat a gyakorlatban nem képes megtanulni [11]. Erre jelent megoldást az LSTM, melynek belső felépítése a 2.8. ábrán látszik. Minden cellának állapota van, mely az előző cella állapotának manipulált változata. Az így létrehozott neurális hálózat bemenetei az x_t vektorok.



2.8. ábra. Az LSTM alapú hálózat felépítése. Forrás: [11]



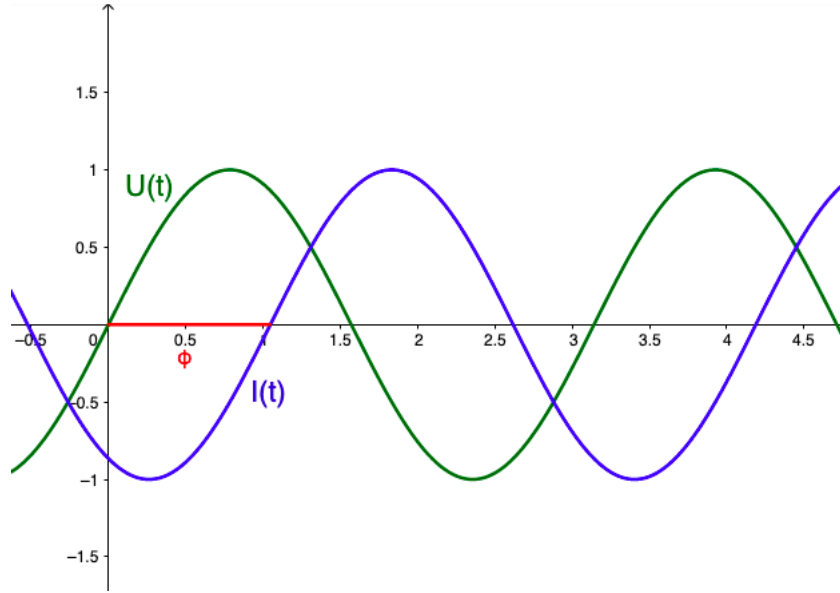
2.9. ábra. A komplex teljesítmény geometriai ábrázolása.

2.5. A tervezett mérőeszköz által végzett mérések elméleti háttere

A bemutatásra kerülő megtervezett és megépített mérőeszköz a 230V-os hálózati jelből feszültséget és áramerősséget mér.

A váltóáramú fogyasztásmérés elméleti hátteréhez az alábbi fogalmak ismerete szükséges:

- Valós teljesítmény (P) - Az a teljesítmény, amit a fogyasztó felhasznál, a villanyóra mér. Mértékegysége: Watt (W)
- Meddő teljesítmény (Q) - A teljesítmény azon része, ami nem végez munkát a fogyasztón. Mértékegysége: Volt-Amper reaktív (var)
- Komplex teljesítmény (S) - A valós és meddő teljesítmény összege. Mértékegysége: Volt-Amper (VA)
- Látszólagos teljesítmény ($|S|$) - A komplex teljesítmény nagysága. Mértékegysége:



2.10. ábra. A fáziskülönbség ábrázolása az áramerősség és feszültség jelalakjával.

Volt-Amper (VA)

- Fáziskülönbség (ϕ) - Az áramerősség és feszültség hulláma közti fáziseltérés szöge (2.10. ábra).
- Teljesítménytényező (PF - Power Factor) = $\cos \phi$ - A valós teljesítmény és a lát-szólagos teljesítmény aránya.

A fenti fogalmak közötti összefüggés a komplex síkon a 2.9. ábrán látható.

A mérőeszköz RMS feszültséget és áramerősséget, valamint a valós teljesítményt méri. Jelölések:

- n : Az egy mérési időszak alatt gyűjtött mérések száma
- $U[k]$: A k időpillanatban mért feszültségérték
- $I[k]$: A k időpillanatban mért áramerősségérték

A mérőeszköz a feszültséget az alábbi képlet szerint méri:

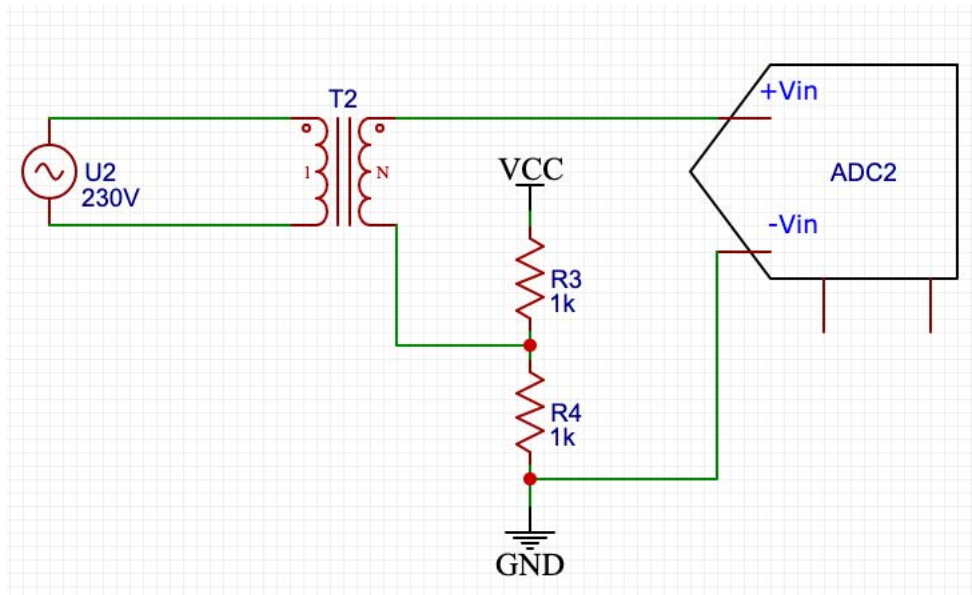
$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n U[k]^2} \quad (2.1)$$

Az áramerősséget:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n I[k]^2} \quad (2.2)$$

A valós teljesítményt pedig az alábbi képlet szerint:

$$P = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n U[k]I[k] \quad (2.3)$$



2.11. ábra. Váltóáramú feszültségmérés transzformátorral és offsettel.

A továbbiakban leírtak 230V-os 50Hz-es frekvenciájú (szinuszos jelalakú) váltóáramú hálózatot feltételeznek.

Váltóáramú rendszereknél a mérendő feszültség a fázis (Live) és nulla (Neutral) vezeték között esik. Ez a feszültségérték $\pm 326V$ között mozog. Ez az érték sokkal nagyobb, mint a legtöbb ADC méréstartomány, így ezt az értéket csökkenteni kell ahhoz, hogy mérni lehessen.

A mérőeszköz a feszültséget transzformátor segítségével méri. A hálózati transzformátor primer oldalára kell kötni a fázist és nullát, a kimenetét pedig feszültségosztóval történő offset után az ADC-re (2.11. ábra). Hálózati transzformátor használatának egyik előnye a mérési pontosság mellett az, hogy a transzformátor elválasztja az alacsonyfeszültségű komponenseket, mint például a mikrokontrollert, a 230V-os hálózattól.

Az áramerősség mérése áramváltó transzformátorral történt. Az áramváltó transzformátort a mérendő vezeték köré helyezve, a kimenetén a vezetéken átfolyó áramerősséggel arányos áram fog folyni. A módszer előnye, hogy a mérőeszköz el van szigetelve a hálózati feszültségtől. A kimeneti áramerősséget az alábbiak szerint lehet számolni:

$$I_{ki} = \frac{I_{be}}{N} \quad (2.4)$$

Ahol N az áramváltó transzformátor szekunder tekercsének menetszáma, I_{be} a primer vezetéken átfolyó áramerősség.

2.6. Felhasznált programkönyvtárak

A mérőeszköz szoftverének elkészítése az Arduino fejlesztőkörnyezetben készült [12]. Az adatok fogadására a számítógépen, valamint a klasszifikációkhoz Python3 nyelven kerültek elkészítésre a programok. Az SVM alapú klasszifikációhoz és novelty detection-höz a scikit-learn [13], az LSTM hálózathoz pedig a TensorFlow [14] lett felhasználva.

2.7. Klasszifikációs metrika

A dolgozat során a klasszifikáció eredményessége a pontossággal (accuracy) lett mérve, tehát a teszhalmaz helyesen klasszifikált elemeinek száma elosztva a teszhalmaz elemeinek számával.

A dolgozatban bemutatásra kerülő konfúziós mátrixok esetén a sorok jelölik a valódi osztályt (actual class), míg az oszlopok a klasszifikáció eredményeként kapott osztályt (predicted class).

3 A mérőeszköz

3.1. A mérőeszköz hardver

A mérőeszköz alapja az ESP32 mikrokontroller. A mikrokontrollerre van rákötve egy AC dimmer modul és egy transzformátor, illetve egy áramváltó transzformátor. A dimmer az AC jelalak levágásához, a transzformátorok pedig a fogyasztó viselkedésének méréséhez kellenek. Fontos megemlíteni, hogy a kísérleti mérések során szükség volt az áramkör és kapcsolási rajz módosítására, mivel az eredetileg az ESP32 IO0 pinjére kötött dimmer ZC jel megakadályozta az ESP32-t a belső flashről való bootolásban, ezért a csatlakozást az IO26 pinre kellett átkötni. Az eszköz kapcsolási rajza a 3.1. ábrán, mérőeszköz prototípus a 3.2. ábrán látható.

3.2. A mérőeszköz kalibrációja

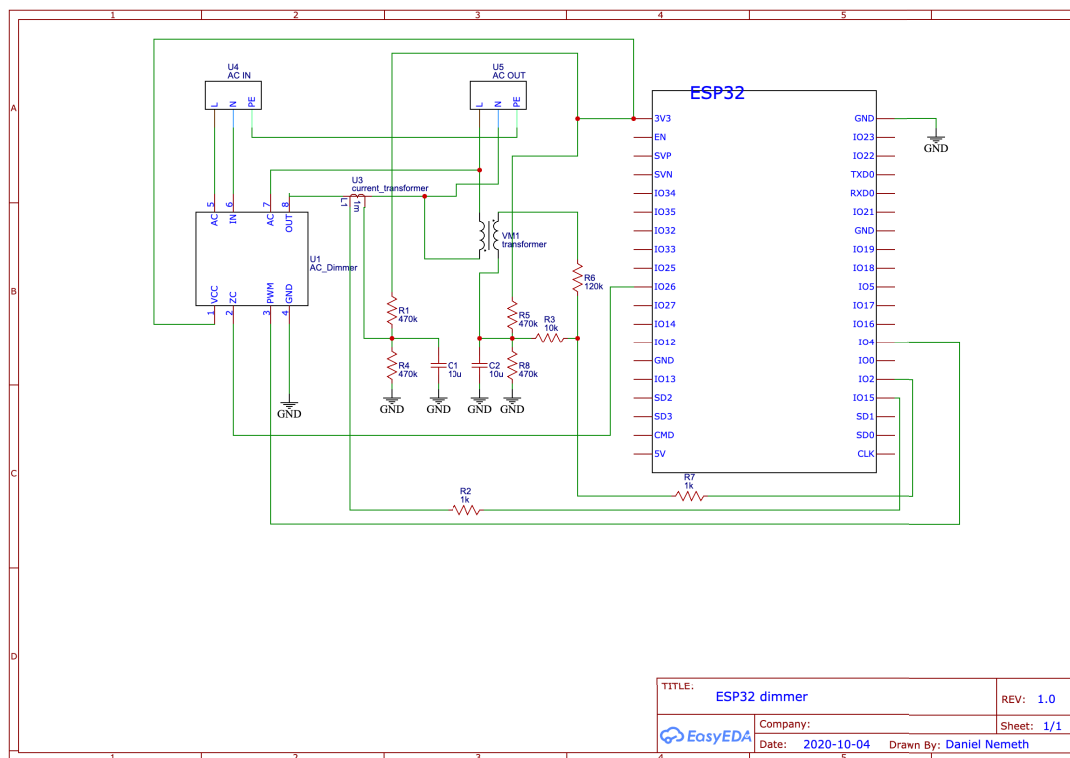
A mérőeszköz AC jeleket mér, így azok DC offsettel vannak eltolva, hogy az ESP32 ADC-je mérni tudja a bemenő jeleket. Emellett az ESP32 értesül a váltóáramú jel Zero Crossing eseményéről (ZC pin) is. A rendszert első lépésként kalibrálni kellett, hogy megfelelően mérje az AC értékeket. A kalibráció során kiderült, hogy a rendszer bekapcsolása után van egy tranziens mért adatoknál, ezért a rendszer az első 600 000 ADC mérést nem veszi figyelembe, ez nagyjából 36 másodpercnek felel meg. A prototípus első változata 500 000 mérés átlagából megállapította meg a DC offset értékét, ami nagyjából 30 másodpercet vett igénybe. Az offset érték végül egy, sok ilyen mérést átlagolva meghatározott fix érték lett.

A többi kalibrálási érték: a feszültség és áramerősség értékének meghatározása az ADC mérésekből manuálisan lett beállítva kalibrálási mérések után. Az eszköz egy Ubiquity mFi mPower mini mérési értékeihez lett kalibrálva. Az ESP32 ADC-je 12 bites, a transzformátor kimenetéről mért nyers ADC értékek a 3.3. ábrán láthatóak.

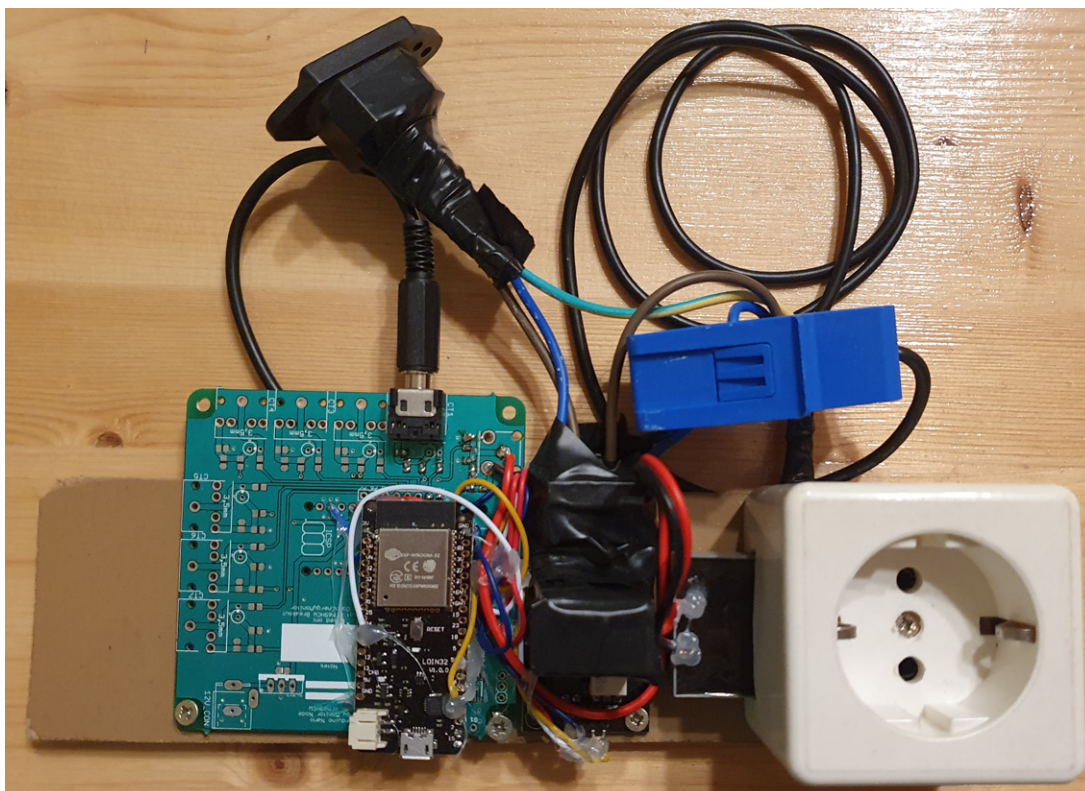
3.3. A mérőeszköz szoftvere

Az mérések elvégzéséhez kulcsfontosságú, hogy a jel levágása pontosan történjen meg. Ehhez szükséges tudni, hogy mikor történik a feszültséggörbe zero crossingja. Erre szolgál a dimmer modul ZC pinje, mely akkor küld magas jelet, ha ez történik. A ZC pin működése látható az oszcilloszkóppal készült 3.4. ábrán.

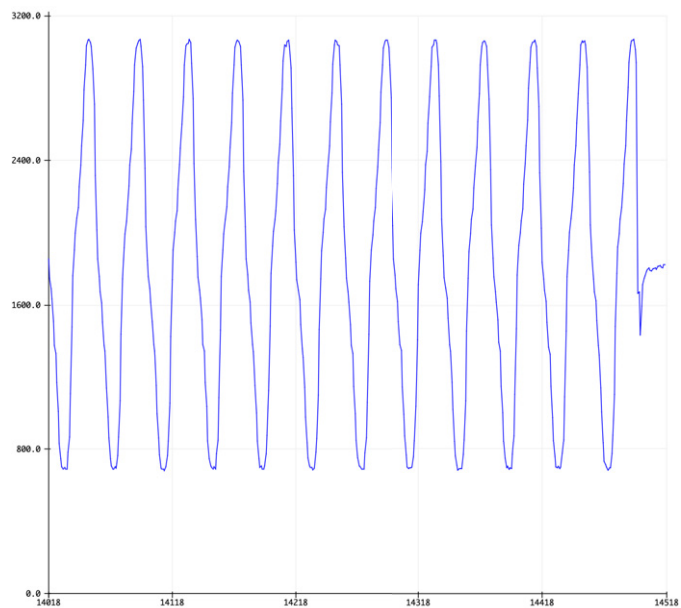
A tesztadatokat az ESP32 a serial portján keresztül a csatlakoztatott számítógépnek továbbítja. Az eszköz periódusonként 279-280 ADC mérést tud elvégezni. Egy periódus



3.1. ábra. Tervezett mérőeszköz kapcsolási rajza



3.2. ábra. A megépített mérőeszköz prototípus. A kék eszköz az áramváltó transzformátor. A dimmer a szigetelőszalaggal borított komponens.



3.3. ábra. Transzformátor kimenetének értéke az ESP32 adc-jével mérve



3.4. ábra. Transzformátor és Zero Crossing detektor kimenete oszcilloszkópon

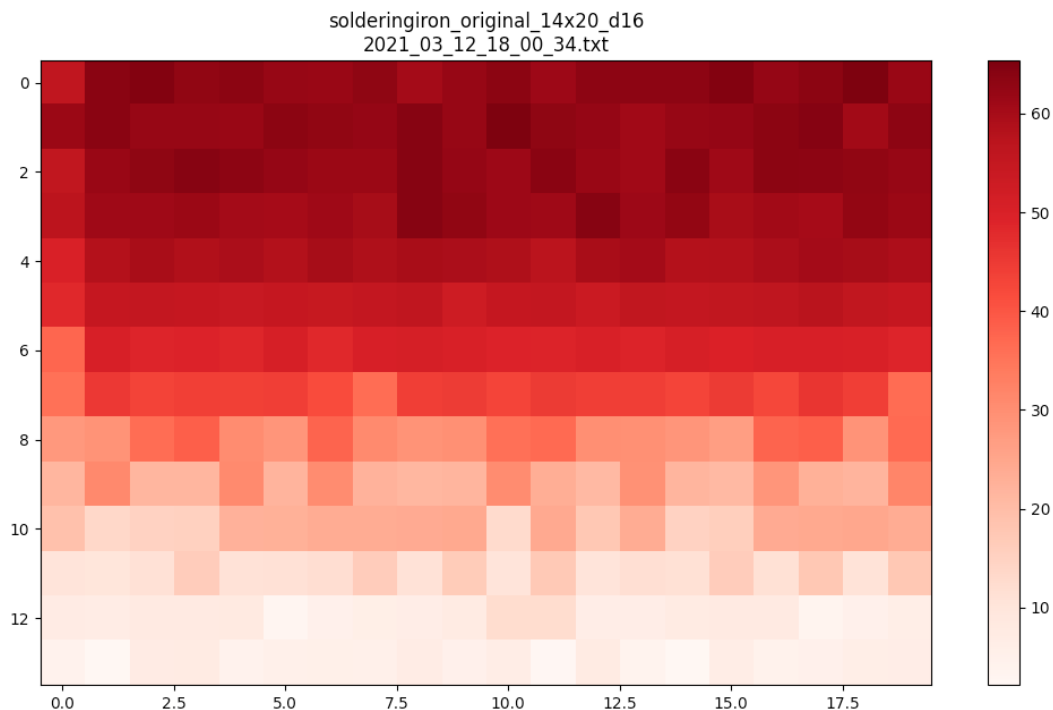
		Current																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
10%		0.086	0.093	0.083	0.087	0.086	0.09	0.076	0.074	0.069	0.082	0.07	0.087	0.082	0.076	0.083	0.077	0.077	0.083	0.078	0.077
15%		0.073	0.085	0.08	0.079	0.081	0.089	0.086	0.084	0.077	0.078	0.084	0.078	0.079	0.08	0.077	0.079	0.078	0.089	0.076	0.08
20%		0.072	0.08	0.081	0.086	0.082	0.08	0.079	0.077	0.082	0.086	0.087	0.084	0.065	0.088	0.081	0.068	0.081	0.077	0.075	0.076
25%		0.074	0.078	0.08	0.068	0.076	0.079	0.078	0.078	0.073	0.076	0.083	0.083	0.08	0.082	0.086	0.079	0.086	0.086	0.081	0.079
30%		0.066	0.075	0.078	0.082	0.076	0.077	0.067	0.075	0.082	0.08	0.075	0.084	0.077	0.073	0.089	0.075	0.077	0.075	0.081	0.091
35%		0.077	0.069	0.077	0.076	0.085	0.066	0.073	0.083	0.069	0.078	0.079	0.077	0.084	0.072	0.069	0.083	0.079	0.082	0.08	0.067
40%		0.073	0.086	0.077	0.087	0.074	0.074	0.069	0.07	0.075	0.079	0.071	0.071	0.079	0.084	0.075	0.084	0.068	0.077	0.071	0.074
45%		0.082	0.082	0.077	0.075	0.084	0.077	0.08	0.08	0.082	0.086	0.077	0.081	0.078	0.076	0.075	0.083	0.087	0.084	0.074	0.089
50%		0.107	0.103	0.097	0.098	0.101	0.105	0.099	0.105	0.099	0.104	0.098	0.101	0.1	0.105	0.108	0.102	0.101	0.105	0.102	0.102
55%		0.126	0.119	0.118	0.115	0.116	0.116	0.121	0.118	0.12	0.124	0.122	0.117	0.118	0.109	0.122	0.112	0.119	0.118	0.116	0.12
60%		0.18	0.143	0.14	0.132	0.135	0.131	0.134	0.136	0.133	0.132	0.132	0.132	0.135	0.133	0.14	0.132	0.135	0.133	0.133	0.135
65%		0.149	0.189	0.179	0.181	0.183	0.182	0.174	0.184	0.183	0.187	0.177	0.181	0.18	0.184	0.177	0.188	0.181	0.181	0.177	0.188
70%		0.061	0.172	0.194	0.194	0.2	0.19	0.198	0.195	0.197	0.196	0.198	0.201	0.192	0.195	0.2	0.199	0.195	0.195	0.198	0.199
75%		0.026	0.101	0.244	0.264	0.249	0.268	0.244	0.268	0.255	0.26	0.267	0.256	0.262	0.265	0.254	0.255	0.266	0.268	0.255	0.263
		Voltage																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
10%		216.2	221.2	220.7	220.7	220.9	221	220.9	221	221.1	221	220.5	220.8	220.9	220.5	220.5	220.6	220.8	220.8	221.2	221.3
15%		213.6	211.5	211.3	211.8	210.8	211.9	211.4	211.2	211.6	211.2	211.6	211.6	211.9	211.7	211.2	211.6	211.6	212	211.2	211.6
20%		199.9	202.7	202.5	202.1	201.9	202.7	202.2	202.3	202.8	202.6	202.4	202.9	203	202.1	202.4	202	202.6	202.7	202.8	202.9
25%		202.1	197.1	197.1	196.7	196.6	196.9	196.7	197.2	196.9	197	196.7	197	196.5	196.9	196.7	196.6	196.5	196.4	197.1	196.8
30%		194.8	193.8	193.8	194.3	193.9	193.8	193.9	193.6	193.8	194.2	193.7	193.8	194.2	193.8	193.6	193.9	194.1	193.8	193.8	194.2
35%		191.6	190.1	190.1	190.3	190.6	190.5	190.7	190.7	190.6	190.9	190.5	190.3	190.5	191.2	190.6	190.5	190.4	190.5	190.9	190.7
40%		186.4	188.7	188.5	188.3	188	187.7	188.8	187.9	188.2	188.4	187.9	188.1	188	188	188.2	187.9	188	188	187.9	187.7
45%		180.6	183.8	183.8	183.6	183.9	183.6	183.7	182.3	182.6	182.6	183.8	183.8	183.6	183.5	183.3	183.3	183.1	182.3	182.3	183.7
50%		169.7	174.6	174.8	174.6	175.1	173.8	174.6	174.3	174.7	174.7	174.3	174.2	174.1	174.3	173.8	174.4	174.3	174.6	174.2	173.9
55%		152.2	162.1	161.9	162	162.4	162	162.3	161.1	161.8	161.9	162.6	161.9	161.3	162.2	161.3	161.1	160.5	161	161.1	161.6
60%		129.5	145.8	145.2	144.8	146	145	144.5	144.2	146	145.2	144.5	145.9	144.9	144.5	145.8	144.7	143.9	145.4	144.6	144
65%		108	128	125.7	126.6	127.5	126.8	125.9	126.6	127.3	126.5	126	126.5	127.1	126.8	126	126.5	127.2	126.5	126.2	127.2
70%		101.5	102.7	102.5	101.7	102.6	101.6	102.7	102.3	102	102	101.7	102.6	102.4	102.2	102.7	102.6	102.7	102.6	102.2	101.8
75%		74.57	77.11	76.96	78.29	77.45	77.8	77.06	77.36	77.23	76.4	77.44	77.27	77.23	78.52	77.18	77.31	77.07	78.5	78.09	77.71
		Power																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
10%		6.006	9.493	7.875	8.076	8.429	9.156	7.46	6.368	6.109	6.658	6.381	6.842	6.2	6.814	8.355	7.406	7.269	7.556	6.199	7.591
15%		6.488	7.498	7.252	7.333	4.748	8.259	9.662	8.148	6.878	6.99	7.522	6.402	7.309	7.254	7.464	6.513	7.046	8.293	7.011	5.898
20%		5.495	6.475	7.233	7.417	7.094	7.757	7.096	7.021	7.08	6.284	8.1	7.656	4.837	6.678	7.499	5.133	6.424	6.855	7.242	7.097
25%		6.95	6.558	7.369	5.489	6.065	7.426	5.827	7.394	6.887	7.641	8.269	6.464	5.558	7.562	8.104	6.431	8.54	6.839	7.32	6.044
30%		6.793	6.765	6.65	7.929	7.169	6.172	6.249	6.225	7.59	8.122	7.257	7.343	6.941	5.852	8.017	7.314	6.218	6.201	8.459	7.331
35%		7.726	7.022	6.766	6.848	8.795	6.795	7.651	7.024	4.382	7.502	7.7	7.241	7.129	6.596	6.3	7.646	6.512	7.619	8.418	6.777
40%		7.326	8.39	8.597	8.676	6.074	5.98	6.317	6.658	8.086	6.882	6.492	7.598	6.466	7.929	6.965	8.225	4.953	7.891	6.654	6.977
45%		7.041	7.46	7.126	5.856	6.82	6.777	6.183	7.462	7.198	8.036	6.117	7.618	6.016	6.361	7.355	8.229	7.813	6.773	6.606	7.79
50%		7.64	7.8	6.641	7.267	8.351	7.805	7.828	7.316	7.746	8.149	7.896	7.643	7.252	7.962	7.585	7.89	7.303	7.897	8.135	7.913
55%		7.465	7.962	7.683	7.707	7.344	7.69	7.433	7.783	7.562	8.52	8.434	7.41	8.441	7.078	8.805	7.205	7.756	7.999	7.332	8.038
60%		7.306	8.868	8.364	7.387	7.799	6.465	7.804	8.202	8.176	7.995	6.889	7.444	7.965	6.973	9.249	6.963	7.48	7.156	8.459	7.418
65%		5.025	9.032	7.669	8.423	8.445	8.258	7.399	8.587	8.334	8.432	8.285	8.149	8.169	8.316	7.874	8.525	8.801	7.761	7.994	8.867
70%		1.318	6.626	8.686	8.054	8.127	8.021	7.914	8.306	8.237	8.332	8.037	8.68	8.115	8.115	8.483	8.111	8.252	8.236	8.149	7.253
75%		0.034	2.526	8.353	9.252	8.39	9.19	8.336	9.248	8.856	8.512	9.018	8.946	8.915	9.15	8.796	8.69	9.243	9.735	9.043	9.24

3.5. ábra. 5W terhelés alatti USB töltő mérési eredményei

egy zero crossing eseménytől az onnan számított második zero crossing eseményig tart, vagyis 50Hz-es hálózat esetén 20ms-ig.

A mérés során a feszültségjel elejének az eszköz 10%-át vágja le 20 perióduson keresztül, majd 16 perióduson át nem vág le semmit. Ez ismétlődik mindig 5%-kal többet vágva le egészen 75%-ig. Az eszköz a 2.5. fejezetben leírtak szerint feszültséget, áramerősséget és teljesítményt mér. Az ESP32 kétféleképpen lehet mérni, hogy amíg az egyik mag az adatokat méri, addig a másik elvégzi a szükséges számításokat és az értékeket a serial porton továbbítja. A megvalósítás két buffert használ. Amíg az egyik mag az egyikbe ír, addig a másik mag a másik bufferből dolgozik. Minden periódushoz külön mérési értékek tartoznak, így összesen három darab 14x20-as mátrix keletkezik a teszt 10 másodperces időtartama alatt. Egy 5W-os terhelés alatti USB töltőről végzett mérés mátrixai láthatók a 3.5. ábrán.

A mérés menete a 3.6. ábrával szemléltethető jól. Az ábra a teljesítményadatokat mutatja. Minden sor egy levágási értéknek felel meg. A legfelső sor 10%-nak, a legalsó



3.6. ábra. Egy mérés teljesítmény adatainak vizualizálása. Minden sor egy adott levágási érték méréseit tartalmazza, legfelső sor a 10%-os, a legalsó a 75%-os levágási arány-nak felel meg. A mátrix celláihoz tartozó értékek mérése a bal felső sarokból indul és sorfolytonosan zajlik.

75%-nak. A mátrixot a bal felső sarokból indulva soronként tölti fel adatokkal a rendszer. Minden sor után 16 periódust vár mielőtt a következő sorra ugrik. Minden cella egy periódus mérését tartalmazza.

3.4. A mérések hibája

Mint minden mérőeszköznek, így ennek az eszköznek is van mérési hibája. Ezt legjobban a 3.7. ábrán látszik. A mérés csatlakoztatott fogyasztó nélkül futott 100-szor. Az ábrán a mért teljesítménymátrix elemeinek átlagos, legkisebb és legnagyobb mért értékei láthatók.

AVG Measured power with no load																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
10%	-0.64	-0.3	-0.31	-0.05	-0.33	-0.15	-0.19	-0.17	-0.24	-0.06	-0.22	-0.04	-0.19	-0.16	-0.39	-0.28	-0.2	-0.33	-0.26	-0.34
15%	-0.13	-0.32	-0.14	-0.24	-0.31	-0.26	-0.21	-0.19	-0.35	-0.13	-0.02	-0.12	-0.2	-0.01	-0.23	-0.19	-0.13	-0.29	-0.37	-0.12
20%	-0.44	-0.11	-0.23	-0.28	-0.16	-0.1	-0.19	-0.1	-0.12	-0.16	-0.25	-0.06	-0.12	-0.14	-0.29	-0.21	-0.24	-0.14	0.014	-0.28
25%	-0.52	-0.08	-0.1	-0.28	-0.26	-0.08	-0.4	-0.13	-0.21	-0.19	-0.2	-0.03	-0.31	-0.19	-0.28	-0.16	-0.26	-0.15	-0.23	-0.12
30%	-0.25	-0.26	-0.09	-0.14	-0.26	-0.12	0.003	-0.18	-0.05	-0.12	-0.09	-0.17	-0.27	-0.2	-0.23	-0.15	-0.24	-0.22	-0.12	-0.11
35%	-0.08	-0.03	-0.22	-0	-0.08	-0.08	-0.2	-0.27	-0.08	-0.11	-0.24	-0.01	-0.16	-0.02	-0.08	-0.17	-0.2	-0.29	-0.24	-0.19
40%	-0.23	-0.17	-0.16	-0.04	3E-04	-0.2	-0.24	-0.17	-0.13	-0.01	-0.03	-0.08	-0.24	-0.07	-0.1	-0.04	-0.26	-0.06	-0.15	-0.2
45%	-0.24	-0.23	-0.22	-0.17	-0.21	-0.05	-0.18	-0.29	-0.18	-0.3	-0.25	-0.12	-0.23	-0.15	-0.18	-0.12	-0.23	-0.33	-0.23	-0.21
50%	-0.36	-0.2	-0.26	-0.15	-0.21	-0.27	-0.32	-0.26	-0.27	-0.29	-0.34	-0.17	-0.25	-0.32	-0.1	-0.15	-0.28	-0.29	-0.31	-0.13
55%	-0.43	-0.23	-0.26	-0.24	-0.17	-0.21	-0.45	-0.3	-0.26	-0.33	-0.29	-0.21	-0.36	-0.32	-0.34	-0.3	-0.29	-0.2	-0.29	-0.26
60%	-0.5	-0.31	-0.22	-0.31	-0.25	-0.31	-0.23	-0.26	-0.38	-0.23	-0.3	-0.3	-0.28	-0.34	-0.32	-0.36	-0.26	-0.22	-0.27	-0.3
65%	-0.5	-0.26	-0.28	-0.32	-0.25	-0.25	-0.24	-0.2	-0.24	-0.23	-0.25	-0.27	-0.29	-0.26	-0.31	-0.32	-0.32	-0.23	-0.28	-0.33
70%	-0.5	-0.27	-0.23	-0.23	-0.25	-0.25	-0.23	-0.21	-0.21	-0.26	-0.21	-0.18	-0.2	-0.15	-0.2	-0.22	-0.23	-0.2	-0.24	-0.14
75%	-0.33	-0.15	-0.18	-0.09	-0.12	-0.15	-0.15	-0.12	-0.18	-0.14	-0.17	-0.13	-0.14	-0.21	-0.16	-0.16	-0.14	-0.16	-0.15	-0.16

MIN Measured power with no load																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
10%	-6.49	-4.79	-1.95	-2.43	-7.07	-2.81	-2.91	-9.35	-7.59	-2.43	-4.31	-2.56	-3.1	-2.75	-2.79	-2.57	-2.31	-2.97	-2.49	-3.25
15%	-2.58	-5.14	-2.78	-2.35	-6.87	-3.82	-2.95	-2.52	-2.56	-1.76	-2.28	-2.15	-2.51	-2.26	-3.9	-1.94	-2.89	-2.31	-3.19	-3.42
20%	-2.94	-2.74	-2.35	-1.91	-4.36	-3.57	-2.94	-2.14	-2.05	-2.39	-5.35	-2.46	-2.13	-1.94	-7.89	-7.12	-3.16	-2.55	-2.09	-7.3
25%	-2.82	-1.64	-2.37	-2.32	-2.13	-3.67	-3	-2.04	-2.02	-2.8	-2.89	-1.76	-1.95	-2.58	-6.5	-2.21	-2.04	-2.25	-2.68	-2.21
30%	-2.53	-2.45	-2.48	-1.83	-2.37	-2.41	-2.05	-1.91	-2.56	-2.94	-2	-1.79	-2.2	-4.53	-3.11	-2.05	-2.28	-2.07	-2.24	-2.66
35%	-2.09	-2.67	-2.94	-1.75	-2.12	-2.64	-2.6	-2.43	-3.16	-2.24	-2.27	-1.9	-2.07	-2.21	-1.64	-2.2	-2.93	-4.24	-1.88	-2.58
40%	-2.78	-2.11	-2.3	-1.91	-2.19	-1.98	-2.2	-1.75	-1.57	-2.02	-1.5	-1.86	-2.24	-1.88	-1.83	-2.34	-1.94	-1.59	-2.44	-1.78
45%	-2.47	-1.74	-2.01	-1.64	-2.79	-2.07	-2.05	-1.87	-1.64	-1.88	-2	-1.94	-1.56	-2.19	-3.51	-2.17	-1.77	-1.65	-2.43	-1.38
50%	-1.98	-1.88	-2.09	-1.45	-1.67	-1.65	-1.74	-1.97	-1.91	-2.2	-1.97	-1.56	-1.66	-2.9	-1.56	-1.89	-1.93	-2.24	-2	-1.83
55%	-1.84	-2.51	-3.44	-1.63	-1.79	-1.61	-2.01	-1.61	-2.11	-1.52	-1.41	-1.64	-2	-3.82	-4.16	-2.07	-2.24	-2.02	-1.51	-4.28
60%	-1.81	-1.58	-1.91	-1.62	-1.3	-3.7	-1.66	-1.34	-1.57	-1.64	-2.01	-2.79	-1.59	-1.65	-1.21	-1.66	-1.53	-1.2	-1.25	-1.87
65%	-1.5	-1.24	-1.3	-1.2	-1.59	-1.17	-1.03	-1.56	-1.05	-1.36	-1.39	-1.02	-2.08	-1.04	-1.26	-3.77	-1.54	-1.8	-3.59	-2.77
70%	-1.3	-2.31	-0.92	-1.13	-1.23	-1.3	-1.43	-0.89	-0.96	-0.93	-0.9	-0.94	-0.89	-1.08	-1.08	-1.3	-1.37	-0.99	-1.17	-1.14
75%	-0.75	-1.79	-0.79	-0.76	-0.71	-0.88	-1.71	-0.56	-0.89	-0.84	-0.6	-0.72	-1.12	-0.81	-0.82	-0.83	-1.03	-0.8	-0.98	-1

MAX Measured power with no load																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
10%	1.358	1.951	1.554	2.066	3.474	2.149	2.694	7.643	2.429	1.573	2.498	2.896	5.581	2.351	1.736	2.656	2.689	3.124	1.663	3.86
15%	6.771	1.849	2.953	3.339	2.275	1.972	1.779	1.833	2.21	2.574	1.527	1.88	2.913	6.256	3.591	2.544	1.788	2.432	1.143	7.294
20%	1.699	2.289	1.789	2.477	2.11	1.591	1.851	2.586	1.887	2.053	1.736	2.511	3.692	2.672	2.391	3.003	5.974	3.32	8.033	4.207
25%	2.459	2.046	6.1	1.591	2.702	2.02	1.625	2.077	2.083	4.946	2.42	1.907	3.529	2.004	1.277	1.678	2.137	1.693	4.361	2.302
30%	1.848	2.661	2.822	2.137	1.331	1.647	5.065	1.83	2.77	1.383	2.006	1.72	1.865	4.66	1.238	2.183	1.913	1.485	5.15	1.514
35%	1.607	1.929	2.245	1.6	3.239	2.493	1.41	1.556	2.097	1.422	1.991	1.706	1.631	1.976	1.855	1.825	1.735	1.859	1.932	2.138
40%	2.074	1.199	2.665	6.541	2.204	1.661	2.075	1.257	1.665	1.73	1.679	1.787	1.759	2.264	1.175	1.73	1.405	2.094	3.429	1.123
45%	1.186	1.801	1.807	1.372	0.997	3.213	1.505	1.533	2.135	1.409	1.299	1.999	1.454	2.006	1.83	2.339	1.437	0.945	2.075	1.221
50%	3.448	1.721	1.191	1.13	1.571	1.233	1.405	1.557	1.374	1.752	1.48	5.472	1.519	1.16	1.912	1.511	1.456	1.407	2.996	1.525
55%	1.113	1.352	1.45	1.347	1.409	3.858	1.2	0.905	1.469	1.018	1.306	3.756	1.482	0.908	0.925	0.856	3.321	2.514	1.023	1.237
60%	0.478	0.782	0.878	0.91	0.938	1.856	1.17	3.088	0.918	1.167	0.994	3.249	3.681	0.808	0.85	0.694	0.666	1.038	0.749	1.096
65%	2.068	0.66	0.658	0.541	0.978	0.951	0.934	2.294	0.963	0.849	0.493	0.657	1.439	0.903	1.071	0.598	0.377	1.566	0.951	0.53
70%	0.717	0.381	0.602	0.668	0.479	2.064	0.88	0.42	0.531	1.588	0.489	0.594	0.413	2.063	0.96	0.785	0.553	0.666	0.615	1.528
75%	0.165	0.468	0.37	0.286	0.57	0.579	0.541	0.696	0.617	1.27	0.751	0.717	0.924	0.365	0.38	0.823	0.48	0.457	0.46	0.485

3.7. ábra. A mérőeszköz mérései fogyasztó csatlakoztatása nélkül. Az adatok 100 mérésből származnak, a cellák mértékegysége Watt.

4 Kísérleti mérések

A kész mérőeszköz-prototípussal az alábbi kísérleti mérések lettek elvégezve:

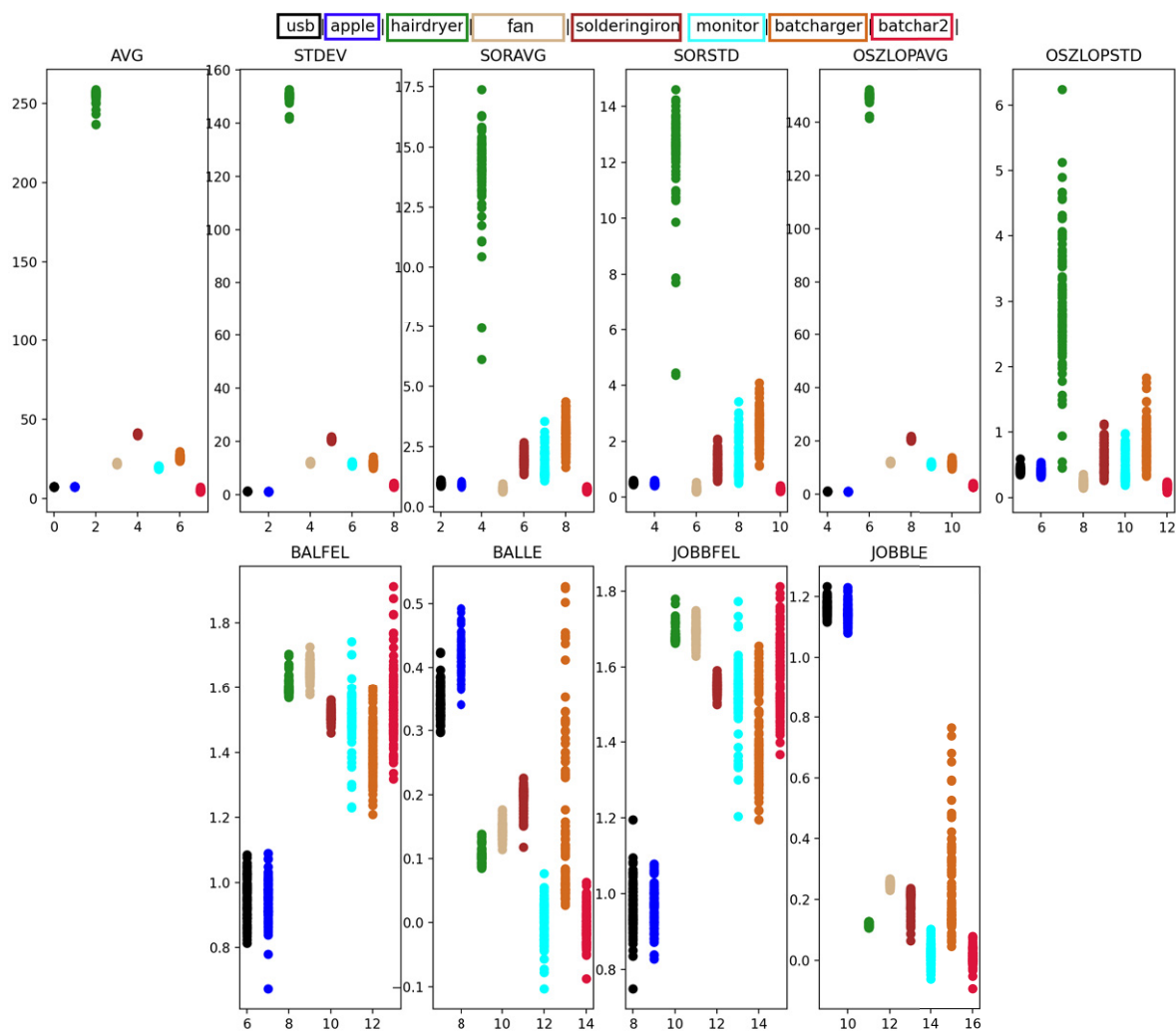
Eszköz neve	Tesztek száma
USB-s töltő 5W terheléssel (<i>usb</i>)	100
Apple USB-s töltő 5W terheléssel (<i>apple</i>)	100
Hajszárító (<i>hairdryer</i>)	100
Ventillátor (<i>fan</i>)	100
Forrasztópáka (<i>solderingiron</i>)	100
Monitor (<i>monitor</i>)	100
4A-es ólomzselés akkutöltő (<i>batcharger</i>)	100
800mA-es ólomzselés akkutöltő (<i>batchar2</i>)	100

4.1. Lényegkiemelés

Az alábbi karakterisztikák kerültek kinyerésre a nyers mérési adatokból:

- AVG: Mátrix elemeinek átlaga
- STDEV: Mátrix elemeinek szórása
- SORAVG: Mátrixsorok szórásának átlaga
- SORSTD: Mátrixsorok szórásának szórása
- OSZLOPAVG: Mátrixoszlopok szórásának átlaga
- OSZLOPSTD: Mátrixoszlopok szórásának szórása
- BALFEL: A mátrix bal felső 2x2-es négyzetes mátrix elemeinek átlaga osztva AVG-vel
- BALLE: A mátrix bal alsó 2x2-es négyzetes mátrix elemeinek átlaga osztva AVG-vel
- JOBBFEL: A mátrix jobb felső 2x2-es négyzetes mátrix elemeinek átlaga osztva AVG-vel
- JOBBLE: A mátrix jobb alsó 2x2-es négyzetes mátrix elemeinek átlaga osztva AVG-vel

A fenti karakterisztikákat kiszámolva a 4.1. ábrán látható pontok lesznek a mérésekhez tartozó értékek. Az ábrán látható, hogy egyes fogyasztók, mint például a hajszárító, egyszerűen elkülöníthetők a többitől.



4.1. ábra. A mérések értékeinek eloszlása karakterisztikák szerint. Minden grafikon egy adott karakterisztikát mutat, a különböző színnel jelölt pontok az adott színnel jelölt fogyasztóhoz tartozó értékeket jelölik. Látható, hogy egyes fogyasztók könnyen elkülöníthetők a többitől.

Train: 10 Test: 90 runs:100 Accuracy 96.17%

	usb	apple_usb	hairdryer	fan	soldering	monitor	batchchar	batchchar2
usb	73.27	16.73	0	0	0	0	0	0
apple_usb	10.86	79.14	0	0	0	0	0	0
hairdryer	0	0	90	0	0	0	0	0
fan	0	0	0	90	0	0	0	0
soldering	0	0	0	0	90	0	0	0
monitor	0	0	0	0	0	90	0	0
batchchar	0	0	0	0	0	0	90	0
batchchar2	0	0	0	0	0	0	0	90

Train: 70 Test: 30 runs:100 Accuracy 97.02%

	usb	apple_usb	hairdryer	fan	soldering	monitor	batchchar	batchchar2
usb	26.37	3.63	0	0	0	0	0	0
apple_usb	3.52	26.48	0	0	0	0	0	0
hairdryer	0	0	30	0	0	0	0	0
fan	0	0	0	30	0	0	0	0
soldering	0	0	0	0	30	0	0	0
monitor	0	0	0	0	0	30	0	0
batchchar	0	0	0	0	0	0	30	0
batchchar2	0	0	0	0	0	0	0	30

4.2. ábra. A konfúziós mátrixok (confusion matrices) átlaga 100 klasszifikáció lefuttatása után. Látható, hogy a két USB-s eszköz megkülönböztetését leszámítva mindkét mátrix diagonális.

4.2. SVM klasszifikáció

Az adatokon SVM (Support Vector Machine) klasszifikátor segítségével klasszifikációt végezve a tévedési mátrix a bal belső sarkot leszámítva diagonális. A bal felső sarokban viszont két, azonos típusú (USB-s adapter 5W terheléssel) eszköz található, melyek közötti megkülönböztetés nem célja a kutatásnak. A pontosság így is 96% felett van már mindössze 10db mérés használatával a klasszifikátor tanítására. A konfúziós mátrixok a 4.2. ábrán láthatók.

5 Klasszifikáció további mérésekkel

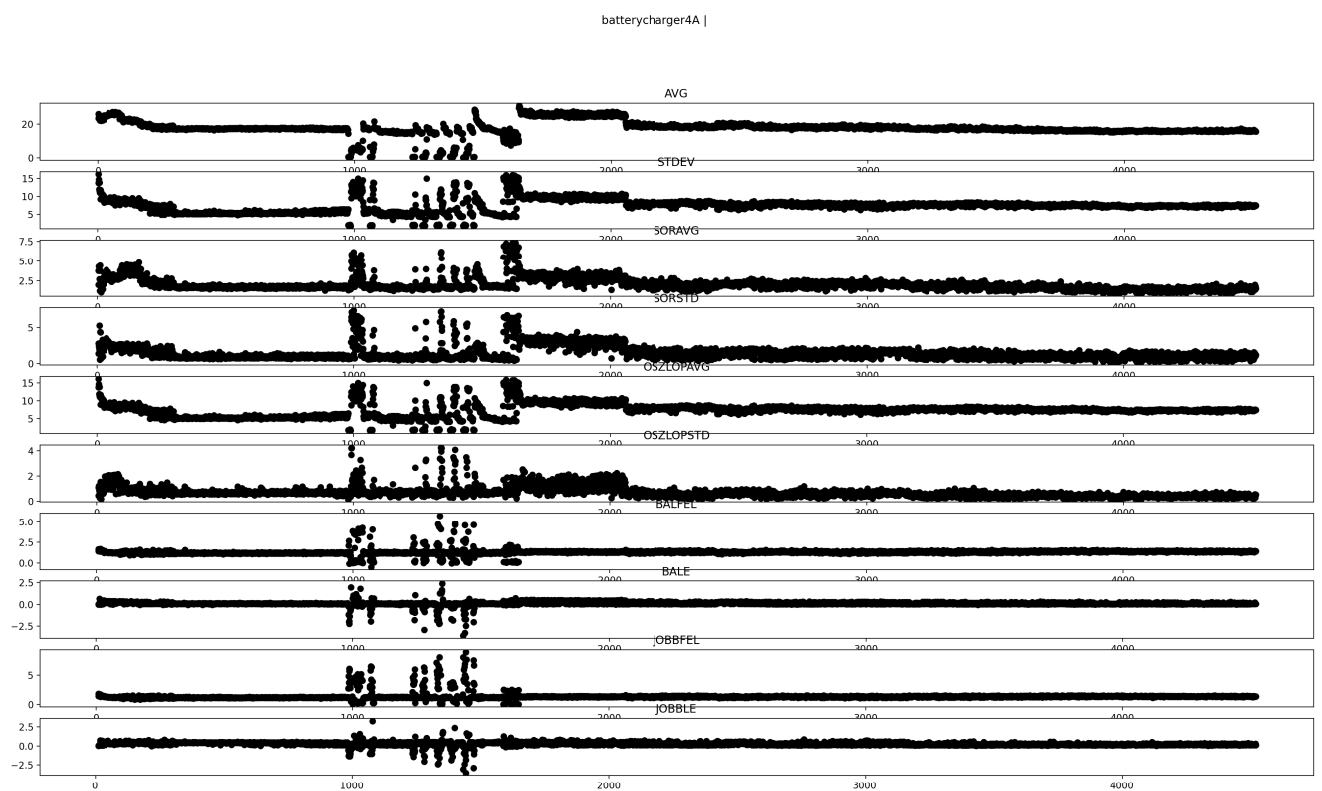
További eszközöket megvizsgálva, illetve a meglévő eszközökkel további méréseket végezve látszik, hogy egyes eszközök karakterisztikája időben változik, például akkutöltők esetén az 5.1., illetve 5.2 ábrákon látszik, iPad esetén pedig az 5.3. ábrán.

Az ezen adatokkal végzett SVM multiclass klasszifikáció eredményei az 5.4. ábrán láthatók, 100 futtatás eredménye átlagolva. A tanító halmaz 30%-os volt. Az átlagos pontosság 98.99%, míg a legrosszabb pontosság 98.75% volt.

5.1. Klasszifikáció kevesebb adattal

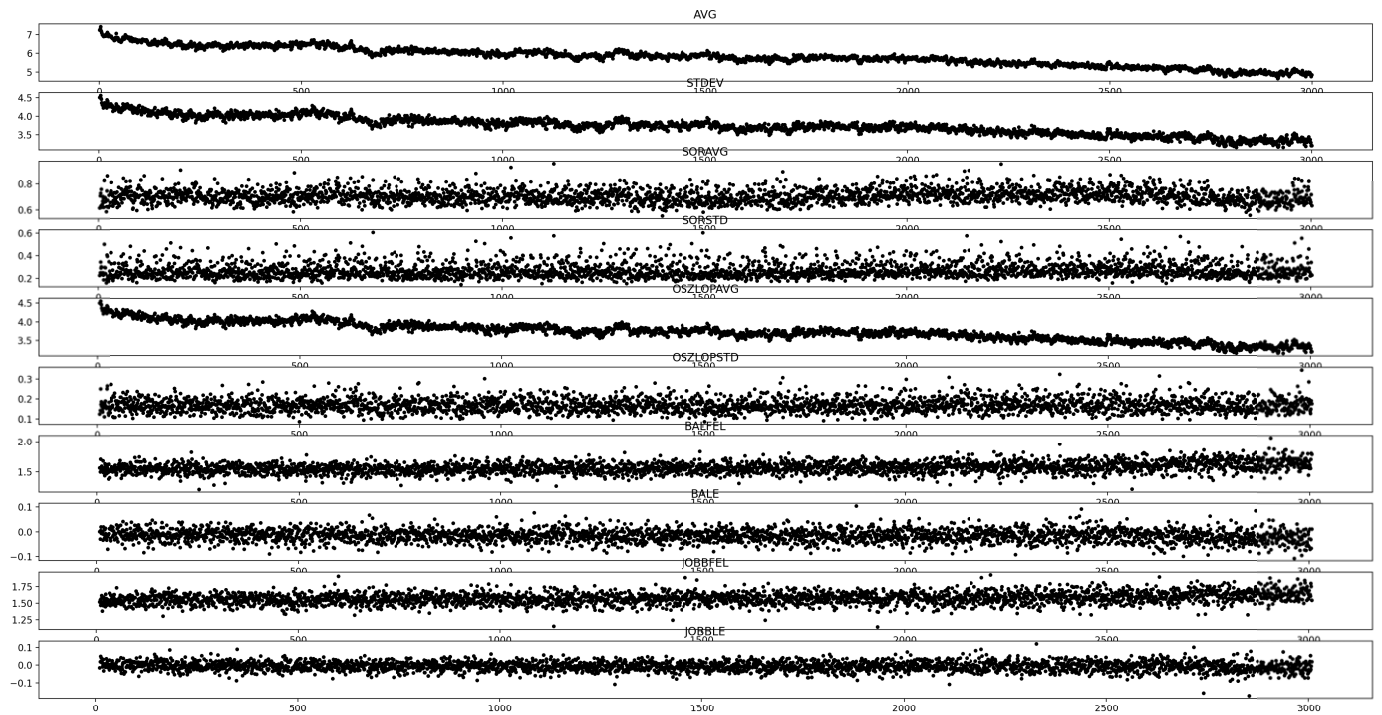
A fenti eredmények fényében azt vizsgáltam, hogy milyen hatással van a klasszifikációs eredményekre a mérés idejének csökkentése. Ehhez először is a meglévő adatokból 10%-os ugrással, és minden levágási arányhoz csak 10 mérési ponttal futtattam a klasszifikációt. Így a mérési adatok 7x10-es mátrixok lettek. Ekkor egy mérés ideje 3.64 másodperc lenne. A méréseknél az USB-s eszközök egy osztályba lettek összevonva (usbdevice), illetve egy új osztály is hozzáadásra került, egy 1000 lumen-es 13W-os nem dimmelhető izzó. A tesztelés során megerősítésre került, hogy a nem dimmelhető izzókat tényleg nem szabad dimmelni. Az izzó 1 óra folyamatos tesztelés után nem világított már, illetve elkezdett 60W körüli teljesítményt felvenni, ami miatt kísérletet le kellett állítani. A klasszifikációba nem kerültek be azok a mérések, ahol a fogyasztó átlagos teljesítménye nem haladta meg a 1.5W-ot. A klasszifikáció pontossága 30%-os tanító halmaz esetén 100 futásnál legrosszabb esetben 98.42% volt, míg átlagosan 98.78%. A konfúziós mátrix az 5.5. ábrán látható.

Hasonló módon elvégezve a klasszifikációt 4x8-as mátrix adatokon is, vagyis ahol 10%, 30%, 50% és 70% voltak a levágások, mindegyik levágási érték esetén az első 8 periódus mért értékeivel. Továbbra sem kerültek be a klasszifikációba azok a mérések, ahol a fogyasztó átlagos teljesítménye nem haladta meg a 1.5W-ot. Ekkor 100 futtatás esetén az átlagos pontosság 98.07%, míg a legrosszabb 97.73% volt. Egy ilyen méréshez 1.92 másodperc szükséges. A konfúziós mátrix az 5.6. ábrán látható.



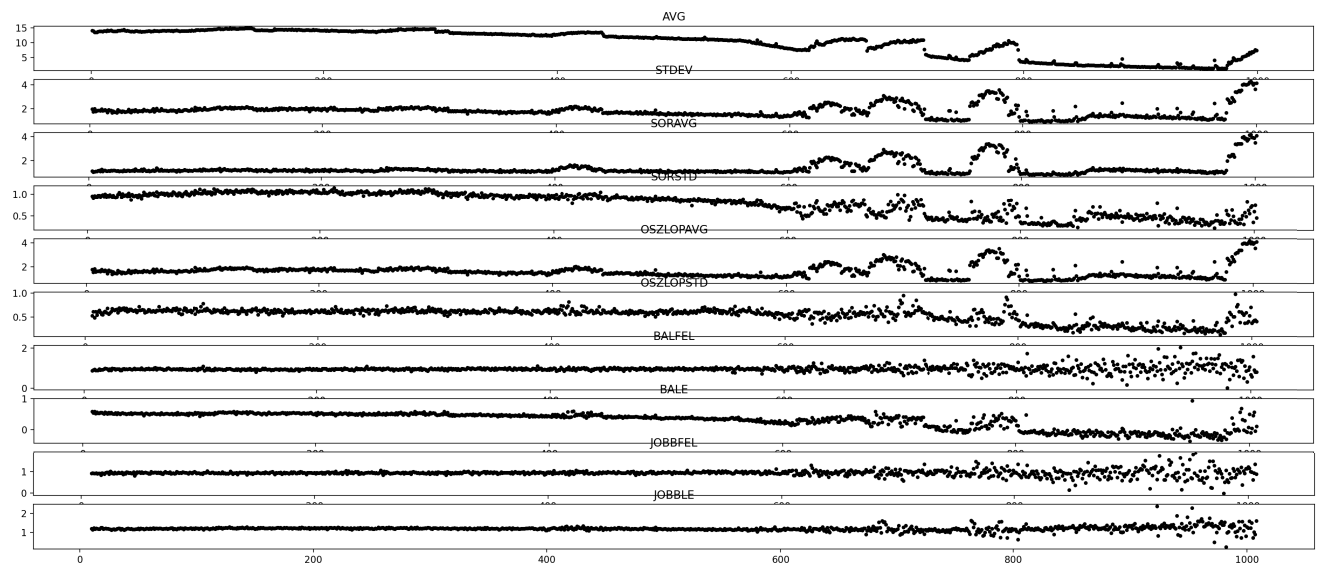
5.1. ábra. A 4A-es "okos" akkutöltő karakterisztikájának változása több töltési ciklus során.

batterycharger800mA |



5.2. ábra. A 800mA-es akkutöltő karakterisztikájának változása töltés során.

apple10Wipad |



5.3. ábra. iPad töltésének karakterisztikája.

	usb5V1A	appleusb5V1A	Fenyfuzer	apple10Wipad	LiionCharger	laptop	monitor	batterycharger 4A	batterycharger 800mA	HajszaritoFelHo fokon	hairdryer	fan	LedBulb	ledbulb1000lm 13w	infralamp	Szendvicssuto	solderingiron
usb5V1A	52.67	11.22	0	6.11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
appleusb5V1A	7.33	62.02	0	0.65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fenyfuzer	0	0	70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
apple10Wipad	0	0	0.93	697.15	0	0	0	0.01	0.62	0	0	0	1.29	0	0	0	0
LiionCharger	0	0	0	0	69.81	0	0	0.19	0	0	0	0	0	0	0	0	0
laptop	0	0	0	0	0	179.96	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04
monitor	0	0	0	0	0	0	48.17	21.83	0	0	0	0	0	0	0	0	0
batterycharger4A	0	0	4.55	0.87	4.4	0	14.05	3203.2	0.16	0	0	0.66	0.06	0.05	0	0	0
batterycharger800mA	0	0	0	0	0	0	0	0	2170	0	0	0	0	0	0	0	0
HajszaritoFelHofokon	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68.24	1.75	0	0	0	0	0.01	0
hairdryer	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.75	67.23	0	0	0	0	0.02	0
fan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	840	0	0	0	0	0
LedBulb	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0.71	0	0	0	69.09	0	0	0	0
ledbulb1000lm13w	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	276	0	0	0
infralamp	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	175	0	0
Szendvicssuto	0	0	1.33	0	0	0.65	0	0	0	0.06	0.66	0	0	0	0.06	67.24	0
solderingiron	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70

5.4. ábra. Konfúziós mátrix (100 futtatás eredményeit átlagolva) a további mérések eredményeit is felhasználva. A tanító halmazba minden osztályból a mérések 30%-a került. Az átlagos pontosság 98.99%.

	usbdevice	Fenyfuzer	LiionCharger	laptop	monitor	batterycharger4A	batterycharger800mA	HajszaritoFelHofokon	hairdryer	fan	LedBulb	ledbulb1000lm13w	infralamp	Szendvicssuto	solderingiron
usbdevice	812.98	0	0	0	0	0.03	0	0	0	0	8.99	0	0	0	0
Fenyfuzer	0	70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LiionCharger	0	0	67.03	0	0	2.97	0	0	0	0	0	0	0	0	0
laptop	0	0	0	180.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25
monitor	0	0	0	0	14.56	55.44	0	0	0	0	0	0	0	0	0
batterycharger4A	0.76	0	10.38	0	1	3127.79	0.12	0	0	9.58	1.34	0.03	0	0	0
batterycharger800mA	0	0	0	0	0	0	2170	0	0	0	0	0	0	0	0
HajszaritoFelHofokon	0	0	0	0	0	0	0	68.58	1.35	0	0	0	0	0.07	0
hairdryer	0	0	0	0	0	0	0	2.36	67.46	0	0	0	0	0.18	0
fan	0	0	0	0	0	0.18	0	0	0	839.82	0	0	0	0	0
LedBulb	3.68	0.03	0	0	0	0	0.01	0	0	0	66.28	0	0	0	0
ledbulb1000lm13w	0	0	0	0	0	0.15	0	0	0	0	0	276.85	0	0	0
infralamp	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	175	0	0
Szendvicssuto	0	0	0	0.62	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	68.36	0
solderingiron	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70

5.5. ábra. Konfúziós mátrix (100 futtatás eredményeit átlagolva). A 7x10-es mátrixokból származó adatokon. A tanító halmazba minden osztályból a mérések 30%-a került. Az átlagos pontosság 98.78%.

	usbdevice	Fenyfuzer	LiionCharger	laptop	monitor	batterycharger4A	batterycharger800mA	HajszaritoFelHofokon	hairdryer	fan	LedBulb	ledbulb1000lm13w	infralamp	Szendvicssuto	solderingiron
usbdevice	810.3	0	0	0	0	0.11	0.56	0	0	0	6.01	0.02	0	0	0
Fenyfuzer	0	69.86	0	0	0	0	0	0	0	0	0.14	0	0	0	0
LiionCharger	0	0	54.74	0	0	4.24	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0
laptop	0	0	0	180.82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.18
monitor	0	0	0	0	9.17	60.83	0	0	0	0	0	0	0	0	0
batterycharger4A	2.23	0.01	8.05	0	0.97	3063.61	0.1	0	0	55.96	1.06	0.01	0	0	0
batterycharger800mA	0	0	0	0	0	0	2170	0	0	0	0	0	0	0	0
HajszaritoFelHofokon	0	0	0	0	0	0	0	69.11	0.46	0	0	0	0	0.43	0
hairdryer	0	0	0	0	0	0	0	1.79	68.2	0	0	0	0	0.01	0
fan	0	0	0	0	0	0.96	0	0	0	839.04	0	0	0	0	0
LedBulb	6.86	2.67	0	0	0	0	0.59	0	0	0	59.88	0	0	0	0
ledbulb1000lm13w	0	0	0	0	0	0.13	0.01	0	0	0	0.01	276.85	0	0	0
infralamp	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	175	0	0
Szendvicssuto	0	1.34	0	0.62	0	0	0	0.21	0.55	0	0	0	0	67.28	0
solderingiron	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70

5.6. ábra. Konfúziós mátrix (100 futtatás eredményeit átlagolva). A 4x8-es mátrixokból származó adatokon. A tanító halmazba minden osztályból a mérések 30%-a került. Az átlagos pontosság 98.07%.

5.2. Optimális megoldás keresése kevesebb adattal történő méréshez

A továbbiakban az került vizsgálatra, hogy az előbb leírtakon kívül megvizsgálva rengeteg lehetőséget a mérési idő rövidítésére, milyen értékeket érdemes mérésekkel is megvizsgálni. A mérésekhez az alábbi jelölést alkalmaztam:

- $\langle r, percentage_min - percentage_max \rangle$

Ahol r a mérési mátrix sorainak számát jelöl, ami a különböző levágási százalékok száma. A $percentage_min$ és $percentage_max$ pedig a levágási százalékok legkisebb és legnagyobb értékét adja meg, vagyis a mérési mátrix első és utolsó sorának levágási értékeit. A többi levágási érték ezen értékek közötti, egyenletes lépésközzel.

A korábban mért mérésekből extrapolált kisebb mátrixoknál fontos megemlíteni, hogy az oszlopok közül az extrapolált adatoknál baloldaltól kell figyelembe venni az első h oszlopot, ahol h jelöli, hogy egy levágási százaléknál hány cikluson át tart a mérés. Azért az első h oszlopot kell figyelembe venni, mert a $(h + 1), (h + 2), \dots, 20$. oszlopoknál az eszköz már annyi ciklus óta volt kitéve ez adott levágásnak, ami csak h darab ciklus esetén nem valósul meg.

Az extrapolált mátrixok tehát az eredeti mátrix első h darab oszlopából alkotott mátrixnak a levágási százalékokkal meghatározott sorait tartalmazzák. A klasszifikáció ezen az adatokon történt.

Az így leírt módszer szerint megvizsgálásra került az extrapolált mátrixokkal elért SVM klasszifikáció eredménye az alábbi esetekhez:

- $\langle 14, 10\% - 75\% \rangle$ (Az eredeti mátrix összes sora)
- $\langle 7, 10\% - 70\% \rangle$ (10%,20%,30%,40%,50%,60%,70%)
- $\langle 5, 10\% - 70\% \rangle$ (10%,25%,40%,55%,70%)
- $\langle 4, 10\% - 70\% \rangle$ (10%,30%,50%,70%)
- $\langle 3, 10\% - 70\% \rangle$ (10%,40%,70%)
- $\langle 2, 10\% - 75\% \rangle$ (10%,75%)
- $\langle 3, 15\% - 75\% \rangle$ (15%,45%,75%)
- $\langle 4, 15\% - 75\% \rangle$ (15%,35%,55%,75%)
- $\langle 5, 15\% - 75\% \rangle$ (15%,30%,45%,60%,75%)
- $\langle 7, 15\% - 75\% \rangle$ (15%,25%,35%,45%,55%,65%,75%)

Minden esetet $h = 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20$ értékekhez külön-külön vizsgálva.

Dimensions: <12x2>

Accuracy: 0.9617752007136484

WORST Accuracy: 0.9482604817127565

	apple10Wipad	appleusb5V1A	usb5V1A	batterycharger4A	batterycharger800mA	fan	hairdryer	HajszarítóFelHofokon	infralamp	Fenyfuzer	LedBulb	ledbulb1000lm13w	laptop	LionCharger	monitor	solderingiron	Szendvicssuto
apple10Wipad	63.1	0.26	2.71	0	0	0	0	0	0	2.61	1.34	0	0	0	0	0	0
appleusb5V1A	0.82	57.7	11.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
usb5V1A	0.68	15.2	54.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
batterycharger4A	0	0	0	67.9	0	0.76	0	0	0	0	0	0.48	0	0	0.89	0	0
batterycharger800mA	0	0	0	0	70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
fan	0	0	0	0.2	0	69.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
hairdryer	0	0	0	0	0	0	69.7	0.29	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HajszarítóFelHofokon	0	0	0	0	0	0	0.07	69.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0.13
infralamp	0	0	0	0	0	0	0	0	70	0	0	0	0	0	0	0	0
Fenyfuzer	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37	0	0	0	0	0	0	0
LedBulb	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0.64	69.4	0	0	0	0	0	0
ledbulb1000lm13w	0	0	0	0.29	0.01	0	0	0	0	0	0	69.7	0	0	0	0	0
laptop	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	69.8	0	0	0.24	0
LionCharger	0.02	0	0	0.36	0.01	0.02	0	0	0	0	0	0	0	34.5	0	0.06	0
monitor	0	0	0	1.53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.85	67.6	0	0
solderingiron	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	0
Szendvicssuto	0	0	0	0	0	0	0.04	0.17	0	0	0	0	0.72	0	0	0	68.1

Result of 100 runs of the classification. Only measurements with an average of 1.5W or more were considered, maximum 100 samples from each class. 30-70 train-test ratio.

5.7. ábra. Konfúziós mátrix 100 futtatás eredményeinek átlagából. Az eredeti mérésekből extrapolált feature-ök: < 2, 10% - 75%>, h=12. A mátrix bal felső sarkában látható, hogy a különböző USB-s töltők között is képes nagy arányban helyesen klasszifikálni a méréseket az SVM. A hiba azonban rontja a számolt pontosság értékét. Az átlagos pontosság 96.18%.

5.3. SVM klasszifikációs eredmények az extrapolált adatokon

Minden a továbbiakban bemutatott eredményhez 100 futtatott klasszifikáció tartozik. Az eredményeknél ezen futtatások átlagos pontossága, valamint a 100 közül a legrosszabb eredményű pontosság kerül bemutatásra. A tesztek többféle módon lettek lefuttatva, mivel több USB-s eszköz is megvizsgálásra került és az ezek közötti téves klasszifikáció rontotta a pontosságot. Ez látható az 5.7. ábrán található konfúziós mátrix bal felső részén. Emellett mivel nem egyforma számú mérés állt rendelkezésre különböző eszközök esetén, ezért az egyes klasszifikációs osztályoknál maximum 100 darab mérés került felhasználásra. A klasszifikációhoz az 5.7. ábrán felsorolt eszközök mérési adatai kerültek felhasználásra. A továbbiakban bemutatott grafikonoknál az x tengelyen található mérési ciklusok száma a következő képpen került számolásra:

$$cycles = (h + 16) \cdot r \quad (5.1)$$

Ahol r a különböző levágási értékek száma, h pedig a már korábban definiált mérési ciklusok száma a levágási értékhez. Mivel az eredeti mérés során 16 ciklusnyi szünet volt két levágási arány mérése között, ezért itt is azzal számoltam.

Az eredmények abban az esetben, ha mindhárom USB-s eszköz külön osztályként szerepel, az 5.8. ábrán láthatóak. Ugyanezen eredmények az 5.9. ábrán grafikonon is ábrázolva vannak. Amint látható, az elméleti számítások alapján a pontosság adott ponton túl csak nagyon kis mértékben növekszik h értékének (egy levágási százalékhoz tartozó mérési ciklusok száma) növelésével.

Ehhez hasonlóak az eredmények akkor is, ha csak az iPad mérési adatai kerültek felhasználásra a három USB-s eszköz közül. Az eredmények az 5.10. ábrán, illetve az 5.11. ábrán láthatóak.

RESULTS for WORSE classification accuracy:										
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
<14,10%-75%>	95.34%	95.53%	95.54%	95.46%	96.39%	95.97%	95.71%	95.04%	95.97%	94.96%
<7,10%-70%>	92.72%	94.27%	94.45%	94.45%	94.87%	94.71%	94.54%	94.87%	93.95%	94.96%
<5,10%-70%>	91.49%	93.22%	93.84%	94.31%	94.18%	94.29%	94.12%	94.29%	94.28%	93.86%
<4,10%-70%>	91.13%	93.42%	93.62%	94.32%	94.09%	94.07%	93.83%	93.94%	93.19%	93.70%
<3,10%-70%>	91.23%	92.70%	93.98%	93.36%	93.69%	94.21%	94.17%	94.60%	94.44%	94.62%
<2,10%-75%>	91.28%	92.34%	94.05%	93.97%	92.74%	94.83%	95.01%	95.20%	94.24%	94.14%
<3,15%-75%>	89.87%	92.49%	93.37%	93.18%	93.47%	93.43%	94.15%	94.00%	93.91%	93.24%
<4,15%-75%>	91.67%	93.30%	94.13%	94.87%	92.76%	94.64%	94.47%	94.32%	94.17%	94.08%
<5,15%-75%>	94.20%	93.61%	93.77%	94.14%	94.33%	94.09%	93.92%	93.93%	94.17%	94.18%
<7,15%-75%>	91.82%	93.59%	93.67%	93.86%	93.85%	93.84%	93.86%	91.58%	92.68%	92.93%
RESULTS for AVERAGE classification accuracy:										
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
<14,10%-75%>	96.67%	96.84%	97.07%	97.33%	97.34%	97.15%	97.17%	96.94%	97.12%	96.88%
<7,10%-70%>	94.54%	95.46%	95.74%	96.03%	96.07%	96.03%	96.12%	96.14%	95.99%	96.11%
<5,10%-70%>	93.83%	95.27%	95.57%	95.78%	95.55%	95.44%	95.55%	95.37%	95.26%	95.26%
<4,10%-70%>	92.84%	94.66%	95.11%	95.45%	95.38%	95.39%	95.37%	95.25%	95.06%	95.32%
<3,10%-70%>	93.39%	94.44%	95.12%	95.39%	95.15%	95.47%	95.64%	95.69%	95.57%	95.55%
<2,10%-75%>	93.15%	93.95%	95.32%	95.48%	95.78%	96.18%	96.51%	96.34%	96.00%	95.92%
<3,15%-75%>	92.38%	94.25%	95.17%	95.16%	95.12%	95.30%	95.32%	95.20%	95.48%	95.38%
<4,15%-75%>	93.71%	94.71%	95.70%	96.19%	96.14%	96.04%	95.93%	95.81%	96.03%	96.16%
<5,15%-75%>	95.36%	95.14%	95.26%	95.68%	95.72%	95.73%	95.54%	95.43%	95.78%	95.58%
<7,15%-75%>	93.64%	94.94%	95.24%	95.23%	95.38%	95.31%	95.29%	94.74%	94.97%	94.85%

Result of 100 runs of the classification. Only measurements with an average of 1.5W or more were considered, maximum 100 samples from each class. 30-70 train-test ratio.

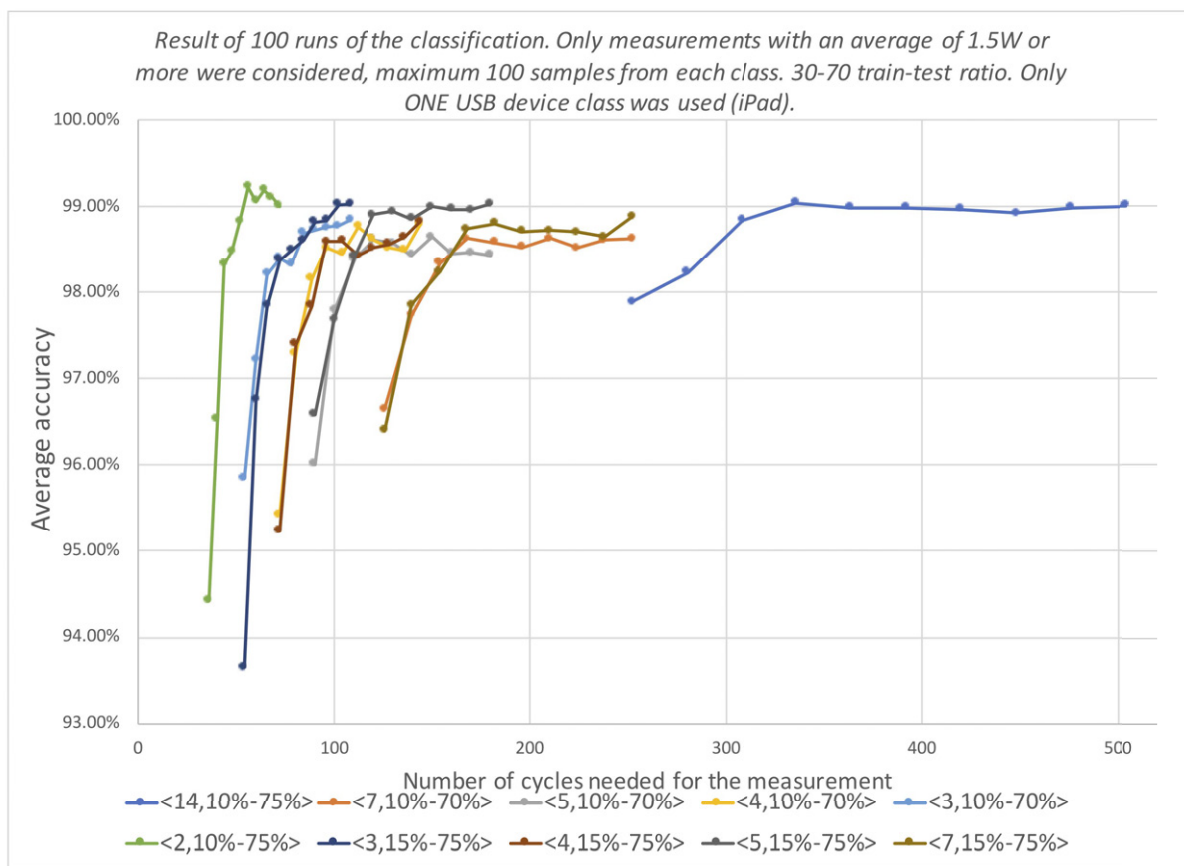
5.8. ábra. Az extrapolált mátrixokon végzett klasszifikáció eredményei. (Minden USB-s eszköz külön osztályként szerepelt.) Látható, hogy az adott levágási értékhez tartozó periódusok számának (h) növelésével a pontosság egy idő után már nem, vagy csak minimálisan javul.



5.9. ábra. Az extrapolált mátrixokon végzett klasszifikáció eredményei grafikonon ábrázolva. (Minden USB-s eszköz külön osztályként szerepelt.) Látható, hogy az adott levágási értékhez tartozó periódusok számának (h) növelésével a pontosság egy idő után már nem, vagy csak minimálisan javul.

RESULTS for WORSE classification accuracy:										
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
<14,10%-75%>	96.25%	96.56%	97.43%	98.00%	96.95%	97.90%	97.71%	97.62%	98.29%	97.71%
<7,10%-70%>	95.14%	96.08%	97.05%	97.05%	96.57%	96.76%	97.52%	96.00%	97.24%	97.14%
<5,10%-70%>	93.48%	96.39%	97.28%	97.20%	97.61%	96.86%	97.43%	97.14%	96.85%	96.85%
<4,10%-70%>	93.76%	95.34%	96.53%	96.73%	96.65%	97.50%	96.64%	96.56%	96.95%	97.52%
<3,10%-70%>	93.65%	95.19%	96.82%	96.86%	97.19%	97.29%	97.41%	97.42%	97.52%	97.52%
<2,10%-75%>	92.31%	94.84%	96.59%	97.02%	97.44%	97.96%	97.97%	98.07%	97.87%	97.67%
<3,15%-75%>	91.93%	95.50%	96.17%	97.11%	96.93%	97.25%	97.75%	97.08%	98.05%	97.67%
<4,15%-75%>	93.44%	96.04%	96.47%	97.18%	97.58%	97.49%	97.01%	96.63%	97.32%	97.79%
<5,15%-75%>	95.19%	96.56%	97.38%	97.30%	97.31%	97.51%	98.09%	97.51%	97.80%	98.09%
<7,15%-75%>	94.08%	96.60%	97.03%	97.14%	97.61%	97.04%	97.24%	96.37%	97.90%	98.09%
RESULTS for AVERAGE classification accuracy:										
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
<14,10%-75%>	97.89%	98.23%	98.84%	99.04%	98.99%	98.99%	98.97%	98.92%	98.99%	99.00%
<7,10%-70%>	96.65%	97.73%	98.34%	98.62%	98.58%	98.52%	98.62%	98.51%	98.61%	98.63%
<5,10%-70%>	96.01%	97.79%	98.39%	98.62%	98.57%	98.43%	98.65%	98.45%	98.46%	98.43%
<4,10%-70%>	95.43%	97.30%	98.16%	98.52%	98.45%	98.76%	98.62%	98.52%	98.49%	98.79%
<3,10%-70%>	95.85%	97.22%	98.21%	98.40%	98.32%	98.70%	98.73%	98.76%	98.78%	98.84%
<2,10%-75%>	94.42%	96.54%	98.32%	98.48%	98.83%	99.22%	99.07%	99.19%	99.11%	99.01%
<3,15%-75%>	93.65%	96.75%	97.84%	98.37%	98.49%	98.60%	98.82%	98.84%	99.02%	99.03%
<4,15%-75%>	95.23%	97.40%	97.84%	98.59%	98.60%	98.43%	98.52%	98.56%	98.65%	98.82%
<5,15%-75%>	96.58%	97.68%	98.42%	98.91%	98.94%	98.86%	99.00%	98.97%	98.95%	99.03%
<7,15%-75%>	96.40%	97.85%	98.24%	98.74%	98.80%	98.71%	98.72%	98.70%	98.65%	98.88%

5.10. ábra. Az extrapolált mátrixokon végzett klasszifikáció eredményei. (Csak egy USB osztály szerepelt: iPad.) Látható, hogy jobb a pontosság, mint amikor három USB-s osztály volt. Továbbra is fennáll, hogy adott levágási értékhez tartozó periódusok számának (h) növelésével a pontosság egy idő után már nem, vagy csak minimálisan javul.



5.11. ábra. Az extrapolált mátrixokon végzett klasszifikáció eredményei grafikonon ábrázolva. (Csak egy USB osztály szerepelt: iPad.) Látható, hogy jobb a pontosság, mint amikor három USB-s osztály volt. Továbbra is fennáll, hogy adott levágási értékhez tartozó periódusok számának (h) növelésével a pontosság egy idő után már nem, vagy csak minimálisan javul.

6 Klasszifikációs eredmények más mérési profilokkal

A mérési profilokat definiáljuk az 5.2. pontban bevezetett

$\langle r, percentage_min - percentage_max \rangle$ és h értékekkel, valamint d -vel. Így egy mérési profil az alábbiakból áll:

$$\{\langle r, percentage_min - percentage_max \rangle, h, d\}$$

Ahol $\langle r, percentage_min - percentage_max \rangle$ meghatározza a levágási százalékok számát és értékeit, h megadja az egy levágási arányhoz tartozó mérési ciklusok számát, d pedig a két levágási aránnyal történő mérés közötti ciklusok számát adja meg (vagyis, hogy mennyi ideig nem mér az eszköz egy levágási arány h darab mérésének befejezése után).

Ezek alapján egy mérés hossza az alábbiak szerint számolható:

$$cycles = h \cdot r + d \cdot (r - 1) \quad (6.1)$$

6.1. Mérési profilok meghatározása

Az 5.3. pontban ismertetett számolt eredmények alapján az alábbi mérési profilok kerültek kiválasztásra további mérésekhez:

- TEST_ORIG $\langle 14, 10\% - 75\% \rangle, h = 20, d = 16$ Mérési idő: 488 ciklus (9.76s)
- TEST_HALVED $\langle 7, 15\% - 75\% \rangle, h = 10, d = 8$ Mérési idő: 118 ciklus (2.36s)
- TEST_TINY $\langle 2, 10\% - 75\% \rangle, h = 12, d = 4$ Mérési idő: 28 ciklus (0.56s)
- TEST_FOUR $\langle 4, 15\% - 75\% \rangle, h = 8, d = 4$ Mérési idő: 44 ciklus (0.88s)

6.2. Mérőeszköz szoftver módosítása

A mérőeszközön futó programot módosítani kellett, hogy támogassa különböző mérési profilokkal történő mérések futtatását.

A mérőeszköz programja létrehoz 10 mérési profil slotot az ESP32 memóriájában, melybe be lehet tölteni mérési profilokat a serial porton keresztül. A profilokat felül lehet írni, illetve azok az eszköz kikapcsolásakor elvesznek. A mérés futtatásakor meg kell adni, hogy melyik slotban található mérési profil szerint történjen a mérés.

A számítógép oldalán is módosítani kellett a python scriptet, ami a mérési adatok fájlba írását, illetve a mérések elindítását végezte. A módosított script feltölti a profilokat, majd minden mérési profillal végez adott számú tesztet. Azért, hogy összehasonlíthatóak legyenek az eredmények, a script minden mérési profillal végez egy tesztet, és ezt ismétli. Azért, hogy a különböző mérési profilokkal végzett mérések ne befolyásolják egymást, minden mérés között 5 másodperc szünet volt.

6.3. Mérés a meghatározott mérési profilokkal

A 6.1. pontban meghatározott mérési profilokkal mérést végeztem az alábbi fogyasztókon:

- ipad10W - iPad töltése 10W-os apple adapterrel
- usbapple5V1A - Apple 5W-os usb adapter
- usb5V1A - 5W-os usb adapter
- batterycharger4A - 4A-es ólomzselés "okos" akkutöltő
- batterycharfer800mA - 800mA-es ólomzselés akkutöltő
- fan - ventillátor
- hairdryer - hajszárító
- incandescentbulb - hagyományos izzószálas villanykörte
- irlamp - infravörös hősugárzó lámpa
- laptop - laptop töltése
- monitor - lcd kijelzős monitor
- solderingiron - forrasztópáka

Minden fogyasztónál legalább 250 mérést végzett a rendszer.

Az SVM klasszifikációnál továbbra is csak a 1.5W-os átlagot meghaladó mérések lettek felhasználva. Minden klasszifikáció 100-szor futott le. A konfúziós mátrix, ezen klasszifikációk konfúziós mátrixainak átlaga, illetve rögzítésre került az átlagos és a 100 futásból a legrosszabb pontosság értéke. Az átlagos pontosság értékei az alábbi táblázatban láthatóak. A train halmazba osztályonként 30db mérés került, így a test-be maximum 220db.

Az átlagos pontosság eredményeit az alábbi táblázat tartalmazza:

Mérési profil	Mindhárom USB osztály	Egy USB osztály
TEST_ORIG	96.49%	99.56%
TEST_HALVED	93.36%	98.74%
TEST_TINY	91.89%	97.40%
TEST_FOUR	94.42%	99.35%

A konfúziós mátrixok a 6.1. és 6.2. ábrákon láthatóak.

Dimensions: <20x14>												
Accuracy: 0.9648768472906404												
WORST Accuracy: 0.9480863963622584												
	ipad10W	usbapple5V1A	usb5V1A	batterycharger4A	batterycharger800mA	fan	hairdryer	incandescentbulb	irlamp	laptop	monitor	solderingiron
ipad10W	219.9	0.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
usbapple5V1A	0	183.5	36.52	0	0	0	0	0	0	0	0	0
usb5V1A	0	46.06	173.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
batterycharger4A	0	0	0	215.7	0	0.01	0	0	0	1.17	3.14	0
batterycharger800mA	0	0	0	0	220	0	0	0	0	0	0	0
fan	0	0	0	0	0	219	0	0	0	0	0	0
hairdryer	0	0	0	0	0	0	220	0	0	0	0	0
incandescentbulb	0	0	0	0	0	0	0	220	0	0	0	0
irlamp	0	0	0	0	0	0	0	0.07	219.9	0	0	0
laptop	0	0	0	0	0	0.32	0	0.81	0	218.6	0	0.25
monitor	0	0	0	1.78	0	1.57	0	0	0	0	216.7	0
solderingiron	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0.88	0	0	219.1

Dimensions: <10x7>												
Accuracy: 0.933579545454546												
WORST Accuracy: 0.9098484848484848												
ipad10W	219.8	0.17	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
usbapple5V1A	0	174.5	45.52	0	0	0	0	0	0	0	0	0
usb5V1A	0	103.5	116.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
batterycharger4A	0	0	0	216.9	0	0	0	0	0	0.31	2.82	0
batterycharger800mA	0	0	0	0	220	0	0	0	0	0	0	0
fan	0	0	0	0	0	220	0	0	0	0	0	0
hairdryer	0	0	0	0	0	0	220	0	0	0	0	0
incandescentbulb	0	0	0	0	0	0	0	219.9	0.1	0	0	0
irlamp	0	0	0	0	0	0	0	0.87	219.1	0	0	0
laptop	0	0	0	0	0	1.56	0	4.64	0	210.6	0	3.17
monitor	0	0	0	1.93	0	4.53	0	0	0	0	213.5	0
solderingiron	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.26	0	213.7

Dimensions: <12x2>												
Accuracy: 0.9189427813565745												
WORST Accuracy: 0.8976885183781735												
ipad10W	217.5	1.07	1.42	0	0	0	0	0	0	0	0	0
usbapple5V1A	0.01	142.7	77.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
usb5V1A	0.55	76.89	142.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
batterycharger4A	0.21	0	0	219.1	0	0.08	0	0	0	0.08	0.57	0
batterycharger800mA	0	0	0	0	220	0	0	0	0	0	0	0
fan	0	0	0	0	0	220	0	0	0	0.03	0	0
hairdryer	0	0	0	0	0	0	220	0	0	0	0	0
incandescentbulb	0	0	0	0	0	0	0	219.2	0.84	0	0	0
irlamp	0	0	0	0	0	0	0	1.26	218.7	0	0	0
laptop	0	0	0	0	0	2.55	0	0	0	203.2	0	14.23
monitor	0	0	0	1.28	0	0	0	0	0	0	217.7	0
solderingiron	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35.54	0	184.5

Dimensions: <8x4>												
Accuracy: 0.9441818181818187												
WORST Accuracy: 0.9166666666666666												
ipad10W	218.3	1.54	0.17	0	0	0	0	0	0	0	0	0
usbapple5V1A	0	159.1	60.91	0	0	0	0	0	0	0	0	0
usb5V1A	0	70.32	149.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
batterycharger4A	0.05	0	0	218.2	0	0	0	0	0	0.72	1.04	0
batterycharger800mA	0	0	0	0	220	0	0	0	0	0	0	0
fan	0	0	0	0	0	220	0	0	0	0	0.01	0
hairdryer	0	0	0	0	0	0	220	0	0	0	0	0
incandescentbulb	0	0	0	0	0	0	0	219.7	0.35	0	0	0
irlamp	0	0	0	0	0	0	0	3.95	216.1	0	0	0
laptop	0	0	0	0	0	0.08	0	1.98	0	217.7	0	0.2
monitor	0	0	0	3.17	0.86	1.86	0	0	0	0	214.1	0
solderingiron	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.15	0	219.9

Result of 100 runs of the classification. Only measurements with an average of 1.5W or more were considered, maximum 250 samples from each class. TRAIN SAMPLE SIZE: 30.

6.1. ábra. Klasszifikációs eredmények a mérési profilokkal végzett méréseken. Train-Test halmaz arány: 12-88, tehát az osztályonkénti 250db mérésből mindössze 30db volt a tanításhoz használva. Látható, hogy a hiba nagyrészt a különböző USB-s eszközök megkülönböztetésének pontatlansága miatt van.

Dimensions: <20x14> Accuracy: 0.9956025466120964 WORST Accuracy: 0.9881764438381082										
TEST_ORIG										
	ipad10W	batterycharger4A	batterycharger800mA	fan	hairdryer	incandescentbulb	irlamp	laptop	monitor	solderingiron
ipad10W	220	0	0	0	0	0	0	0	0	0
batterycharger4A	0	215.7	0	0	0	0	0	1.22	3.05	0
batterycharger800mA	0	0	220	0	0	0	0	0	0	0
fan	0	0	0	219	0	0	0	0	0	0
hairdryer	0	0	0	0	220	0	0	0	0	0
incandescentbulb	0	0	0	0	0	220	0	0	0	0
irlamp	0	0	0	0	0	0.06	219.9	0	0	0
laptop	0	0	0	0.25	0	0.6	0	218.9	0	0.3
monitor	0	1.55	0	1.76	0	0	0	0	216.7	0
solderingiron	0	0	0	0	0	0.01	0.86	0.01	0	219.1

Dimensions: <10x7> Accuracy: 0.9873545454545452 WORST Accuracy: 0.96										
TEST_HALVED										
	ipad10W	batterycharger4A	batterycharger800mA	fan	hairdryer	incandescentbulb	irlamp	laptop	monitor	solderingiron
ipad10W	220	0	0	0	0	0	0	0	0	0
batterycharger4A	0	216.5	0	0	0	0	0	0.43	3.06	0
batterycharger800mA	0	0	220	0	0	0	0	0	0	0
fan	0	0	0	220	0	0	0	0	0.01	0
hairdryer	0	0	0	0	220	0	0	0	0	0
incandescentbulb	0	0	0	0	0	219.9	0.09	0	0	0
irlamp	0	0	0	0	0	0.64	219.4	0	0	0
laptop	0	0	0	1.58	0	4.36	0	210.6	0	3.43
monitor	0	2.41	0	5.23	0	0	0	0	212.4	0
solderingiron	0	0	0	0	0	0	0	6.58	0	213.4

Dimensions: <12x2> Accuracy: 0.9739745338790358 WORST Accuracy: 0.9404274670304684										
TEST_TINY										
	ipad10W	batterycharger4A	batterycharger800mA	fan	hairdryer	incandescentbulb	irlamp	laptop	monitor	solderingiron
ipad10W	220	0	0	0	0	0	0	0	0	0
batterycharger4A	0.12	219.2	0	0.06	0	0	0	0.1	0.5	0
batterycharger800mA	0	0	220	0	0	0	0	0	0	0
fan	0	0	0	220	0	0	0	0.02	0	0
hairdryer	0	0	0	0	220	0	0	0	0	0
incandescentbulb	0	0	0	0	0	218.9	1.12	0	0	0
irlamp	0	0	0	0	0	1.2	218.8	0	0	0
laptop	0	0	0	2.76	0	0	0	202.1	0	15.15
monitor	0	1.27	0	0	0	0	0	0	217.7	0
solderingiron	0	0	0	0	0	0	0	34.93	0	185.1

Dimensions: <8x4> Accuracy: 0.9934727272727276 WORST Accuracy: 0.9877272727272727										
TEST_FOUR										
	ipad10W	batterycharger4A	batterycharger800mA	fan	hairdryer	incandescentbulb	irlamp	laptop	monitor	solderingiron
ipad10W	220	0	0	0	0	0	0	0	0	0
batterycharger4A	0.12	218.4	0	0	0	0	0	0.78	0.69	0
batterycharger800mA	0	0	220	0	0	0	0	0	0	0
fan	0	0	0	220	0	0	0	0	0	0
hairdryer	0	0	0	0	220	0	0	0	0	0
incandescentbulb	0	0	0	0	0	219.5	0.49	0	0	0
irlamp	0	0	0	0	0	4.14	215.9	0	0	0
laptop	0	0	0	0.08	0	2.16	0	217.4	0	0.35
monitor	0	2.75	0.88	1.81	0	0	0	0	214.6	0
solderingiron	0	0	0	0	0	0	0	0.11	0	219.9

Result of 100 runs of the classification. Only measurements with an average of 1.5W or more were considered, maximum 250 samples from each class. Only one usb device class: iPad.
 TRAIN SAMPLE SIZE: 30.

6.2. ábra. Klasszifikációs eredmények a mérési profilokkal végzett méréseken egy USB osztály esetén. Train-Test halmaz arány: 12-88, tehát az osztályonkénti 250db mérésből mindössze 30db volt a tanításhoz használva. Látható, hogy a pontosság sokkal nagyobb, mint az előző esetben amikor három USB-s osztály volt.

6.4. Nyílt halmaz alapú felismerési módszer vizsgálata

A 2.3. részben leírtak alapján a különböző mérési profilokon megvizsgáltam a single class SVM alapú nyílt halmaz felismerési módszert.

Ismeretlen fogyasztók detektálása fontos egy fogyasztófelismerő rendszer esetén, hiszen a rendszer döntéseket hoz a klasszifikáció eredménye alapján. A rendszer esetén a prioritás a hibásan detektált esetek minimalizálása. Ezért a klasszifikációs modell esetén az esetleg ismert fogyasztók ismeretlennek klasszifikálása jobban elfogadható az alkalmazás szempontjából, mint egy ismeretlen fogyasztó helytelen klasszifikációja.

A kernel klasszifikációs paramétereinek beállítása a fent leírt prioritások alapján történt. A tesztek során csak egy USB-s fogyasztó osztály lett felhasználva, hiszen a megkülönböztetés különböző USB-s töltők között nem priorizált jelen esetben. Ha ismert USB-s töltő osztály mellett ismeretlen USB-s töltő felismerésére tekintettel kellett volna beállítani a kernel paramétereit, az a már ismert eszközök ismeretlennek klasszifikálásának esélyét növelte volna.

Az eredmények a 6.3. ábrán láthatóak. Ami feltűnő az eredményekből, az a hagyományos izzószálas villanykörte klasszifikációja.

6.5. A mérési profilokkal végzett mérések klasszifikálása Fully Connected neurális hálózattal

Mivel a kutatás alapötletét Petrović et al. cikke [1] adta, ezért megvizsgáltam a különböző mérési profilokkal gyűjtött adatokon a fully connected neurális hálózaton alapuló klasszifikáció eredményességét. A lényeges különbség Petrović et al. megoldásához képest, hogy nem a nyers teljesítményértékek a bemenetei a hálózatnak, hanem a 4.1. pontban definiált karakterisztikák átskálázott értékei voltak. Az eredmények a 6.4. ábrán láthatóak. Az aktiváló függvény a ReLU volt.

Az eredményeket összehasonlítottam az SVM klasszifikáció ugyanezen adathalmazon elért eredményeivel:

Mérési profil	SVM (egy USB osztály)	FC
TEST_ORIG	99.56%	99.51%
TEST_HALVED	98.74%	98.52%
TEST_TINY	97.40%	97.88%
TEST_FOUR	99.35%	98.50%

Amint látható, az átlagos pontosság mindkét esetben szinte azonos. Itt viszont fontos figyelembe venni, hogy míg SVM esetén a modell létrehozásához minden osztályból 30db mérési adat volt felhasználva, addig az FC hálózatnál 100db minta kellett azonos eredmény eléréséhez.

Test profile: TEST_ORIG			
Sample size:	Training 1350	Test (known class) 900	Unknown class 250
Omitted class	Classification accuracy		
ipad10W	97.41%	94.93%	100.00%
batterycharger4A	97.62%	95.46%	99.60%
batterycharger800mA	97.41%	95.05%	100.00%
fan	97.31%	94.96%	99.99%
hairdryer	98.36%	96.85%	100.00%
incandescentbulb	97.31%	94.78%	83.60%
irlamp	97.33%	94.84%	100.00%
laptop	97.85%	95.90%	100.00%
monitor	97.41%	94.87%	98.64%
solderingiron	97.45%	95.14%	100.00%
average accuracy	97.55%	95.28%	98.18%
(Averages from 100 runs)			

Test profile: TEST_HALVED			
Sample size:	Training 1350	Test (known class) 900	Unknown class 250
Omitted class	Classification accuracy		
ipad10W	96.23%	92.76%	100.00%
batterycharger4A	96.48%	93.34%	100.00%
batterycharger800mA	96.27%	92.59%	100.00%
fan	96.14%	92.58%	91.53%
hairdryer	98.10%	96.33%	100.00%
incandescentbulb	96.18%	92.78%	11.16%
irlamp	96.26%	92.64%	98.49%
laptop	96.82%	93.90%	100.00%
monitor	96.19%	92.56%	96.18%
solderingiron	96.22%	92.72%	100.00%
average accuracy	96.49%	93.22%	89.74%
(Averages from 100 runs)			

Test profile: TEST_TINY			
Sample size:	Training 1350	Test (known class) 900	Unknown class 250
Omitted class	Classification accuracy		
ipad10W	96.94%	94.09%	100.00%
batterycharger4A	97.76%	95.75%	100.00%
batterycharger800mA	96.92%	94.14%	100.00%
fan	96.86%	94.23%	100.00%
hairdryer	97.74%	95.64%	100.00%
incandescentbulb	96.89%	93.97%	63.52%
irlamp	96.90%	94.03%	90.12%
laptop	97.23%	94.36%	98.33%
monitor	96.99%	94.35%	100.00%
solderingiron	96.83%	93.75%	42.76%
average accuracy	97.11%	94.43%	89.47%
(Averages from 100 runs)			

Test profile: TEST_FOUR			
Sample size:	Training 1350	Test (known class) 900	Unknown class 250
Omitted class	Classification accuracy		
ipad10W	95.15%	90.66%	100.00%
batterycharger4A	95.69%	91.77%	99.98%
batterycharger800mA	95.14%	90.52%	100.00%
fan	95.09%	90.62%	83.03%
hairdryer	97.83%	95.93%	100.00%
incandescentbulb	95.15%	90.51%	0.62%
irlamp	95.13%	90.56%	96.26%
laptop	95.74%	91.78%	100.00%
monitor	95.22%	90.79%	97.03%
solderingiron	95.18%	90.57%	100.00%
average accuracy	95.53%	91.37%	87.69%
(Averages from 100 runs)			

6.3. ábra. SVM alapú novelty detection eredményei. Az ismert osztályonkénti 250 mérből 150 volt felhasználva a modell tanítására. Látható, hogy a hagyományos izzót a klasszifikátor nem tudta pontosan ismeretlennek detektálni. Ezen kívül a többi eszközt, mint ismeretlent az esetek 90-100%-ában helyesen detektálta.

TEST_ORIG										
Dimensions: <20x14>										
Accuracy: 0.9950567044696463										
WORST Accuracy: 0.9853235490326885										
	ipad10W	batterycharger4A	batterycharger800mA	fan	hairdryer	incandescentbulb	irlamp	laptop	monitor	solderingiron
ipad10W	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0
batterycharger4A	0	147.8	0.2	0	0	0.12	0	0.07	1.8	0
batterycharger800mA	0	0	149.7	0.07	0	0	0	0	0.19	0
fan	0	0	0	149	0	0	0	0	0	0
hairdryer	0	0	0	0	150	0	0.05	0	0	0
incandescentbulb	0	0	0	0	0	149.5	0.51	0.01	0	0
irlamp	0	0	0	0	0.01	1.26	148.7	0	0	0
laptop	0	0	0	0	0.01	0.21	0.02	148.8	0.97	0
monitor	0.08	0.88	0.24	0	0	0	0	0.05	148.7	0.02
solderingiron	0.09	0.09	0	0.03	0.06	0.01	0.25	0.03	0.08	149.4

TEST_HALVED										
Dimensions: <10x7>										
Accuracy: 0.9851999999999994										
WORST Accuracy: 0.9406666666666667										
	ipad10W	batterycharger4A	batterycharger800mA	fan	hairdryer	incandescentbulb	irlamp	laptop	monitor	solderingiron
ipad10W	150	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0
batterycharger4A	0.04	147.8	0.17	0	0	0.01	0	0.04	1.96	0.01
batterycharger800mA	0	0	149.6	0.21	0	0	0	0	0.15	0
fan	0	0	0	150	0	0	0	0	0	0
hairdryer	0	0	0	0	149.9	0	0.11	0.02	0	0
incandescentbulb	0	0	0	0	0.05	141	8.89	0.08	0	0
irlamp	0	0	0	0	0	6.14	143.9	0	0	0
laptop	0	0.15	0	0	0	0.51	0.01	148.7	0.49	0.16
monitor	0	2.37	0.13	0	0	0	0	0.47	147	0.01
solderingiron	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150

TEST_TINY										
Dimensions: <12x2>										
Accuracy: 0.978819212808539										
WORST Accuracy: 0.961974649766511										
	ipad10W	batterycharger4A	batterycharger800mA	fan	hairdryer	incandescentbulb	irlamp	laptop	monitor	solderingiron
ipad10W	149.7	0.01	0	0	0	0	0	0	0.28	0
batterycharger4A	0.16	147.7	0.02	0	0	0	0.01	0.55	1.61	0
batterycharger800mA	0.13	0	149.8	0	0	0	0	0	0.03	0
fan	0	0	0	148.5	0	0	0	0.45	1.07	0
hairdryer	0	0	0	0	150	0	0.01	0	0	0
incandescentbulb	0	0	0	0	0	144.6	5.42	0	0	0
irlamp	0	0	0	0	0	6.12	143.9	0.01	0	0
laptop	0	1.14	0	1.05	0	0.63	0	139.8	0.15	7.19
monitor	0.08	3.23	0.01	0.21	0	0	0	0.97	144.5	0
solderingiron	0	0	0	0	0	0.01	0	1.2	0	148.8

TEST_FOUR										
Dimensions: <8x4>										
Accuracy: 0.9849999999999999										
WORST Accuracy: 0.972										
	ipad10W	batterycharger4A	batterycharger800mA	fan	hairdryer	incandescentbulb	irlamp	laptop	monitor	solderingiron
ipad10W	149.9	0.13	0	0	0	0	0	0	0	0
batterycharger4A	0.21	149.2	0.01	0	0	0	0	0.08	0.46	0
batterycharger800mA	0	0	149.3	0.06	0	0	0	0	0.67	0
fan	0	0	0.23	149.4	0	0	0	0	0.37	0
hairdryer	0	0	0	0	149.6	0	0.4	0	0	0
incandescentbulb	0.02	0	0	0	0	142.9	5.92	1.07	0	0.07
irlamp	0.02	0	0	0	0	5.76	144.1	0.08	0.01	0
laptop	0	0.49	0	0	0.02	2.26	0.03	146.7	0.35	0.19
monitor	0.14	1.25	0.92	0.76	0	0	0	0.29	146.6	0.07
solderingiron	0	0	0	0	0	0	0	0.16	0	149.8

Fully connected neural network with two hidden layers (sizes: 10, 6). Results of 100 runs of the classification. 250 samples from each class. TRAIN SAMPLE SIZE: 100.

6.4. ábra. Fully Connected Neurális Hálózattal végzett klasszifikáció eredményei. (Egy USB osztály volt felhasználva)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
15%	62.69	62.90	59.70	63.38	62.01	62.06	62.97	62.64	60.99	62.47	$X(0)$
25%	55.60	60.52	61.32	61.22	61.34	59.41	61.02	60.95	62.02	61.71	$X(1)$
35%	47.64	54.58	54.82	52.98	55.12	53.83	54.91	54.51	54.31	54.95	$X(2)$
45%	36.38	44.05	44.04	44.49	37.23	45.59	43.54	45.25	36.30	35.61	$X(3)$
55%	24.07	30.16	19.20	31.62	19.35	31.71	31.11	19.53	31.17	20.42	$X(4)$
65%	9.29	9.55	16.81	18.09	8.24	9.89	16.07	17.74	17.93	9.55	$X(5)$
75%	4.26	6.96	4.23	4.61	4.38	4.55	1.99	3.36	7.68	3.50	$X(6)$

6.5. ábra. Sorvektorok kinyerése a nyers teljesítményadatokról. Az ábrán a forrasztópáka TEST_HALVED mérési profillal gyűjtött teljesítményadatai szerepelnek. $X(r)$ jelöli az LSTM hálózat r -edik bemenetét.

6.6. Klasszifikáció LSTM neurális hálózattal

Az LSTM bemeneti adatok szempontjából lényegesen eltér az eddig bemutatott megoldásoktól. A bemenet nem egyetlen vektor, hanem több vektor. Az LSTM felépítése lehetővé teszi az idősoros adatok hatékony klasszifikálását. LSTM esetén a 4.1. pontban kinyert karakterisztikák használata nem vezetne hasznos eredményre, ezért a klasszifikációhoz a nyers teljesítményértékek mátrixai lettek felhasználva. A mátrixból vektorok kinyerésének legegyszerűbb módja az oszlop- vagy sorvektorok használata. Ha az oszlopvektorok a bemenetek, akkor adott t időpontban a bemeneti vektor a különböző levágási arányoknál a t . ciklus teljesítményértéke. Sorvektorok esetén minden vektor egy adott levágási arány méréseit tartalmazza, ekkor az egymás utáni bemenetek sorrendje megfelel a mérés kronológiai sorrendjének. Mindkét lehetőséget megvizsgálva a nagyobb mátrixok esetén (TEST_ORIG, TEST_HALVED) a sorvektorok használatával sokkal jobb pontosságot lehetett elérni, így a sorvektorok kerültek felhasználásra. A 6.5. ábrán látható, hogy hogyan kerültek kinyerésre az LSTM alapú neurális hálózat bemeneti vektorai ($X(0), \dots, X(r)$). Az így kinyert vektorok sorrendje megegyezik a mérés kori sorrenddel, így akár időszorként is értelmezhetők az adatok. Az LSTM 100 egységből állt. Az így kinyert adaton LSTM alapú klasszifikációt végezve egy USB osztály esetén a 100 futtatásból számolt pontosságok az alábbi táblázatban látható:

Mérési profil	Átlagos pontosság	Legrosszabb pontosság
TEST_ORIG	98.02%	90.09%
TEST_HALVED	98.78%	93.80%
TEST_TINY	98.86%	97.10%
TEST_FOUR	98.72%	95.70%

A tanuló halmazban az osztályonkénti 250 mérésből 150db volt. A konfúziós mátrixok a 6.6. ábrán láthatók.

TEST_ORIG										
Dimensions: <20x14>										
Accuracy: 0.9801801884174347										
WORST Accuracy: 0.9009009003639221										
	ipad10W	batterycharger4A	batterycharger800mA	fan	hairdryer	incandescentbulb	irlamp	laptop	monitor	solderingiron
ipad10W	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
batterycharger4A	0	99.35	0	0.01	0.04	0.22	0.01	0.06	0.31	0
batterycharger800mA	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0
fan	0	0	0	99	0	0	0	0	0	0
hairdryer	0	0	0	0	99.91	0	0.09	0	0	0
incandescentbulb	0	0	0	0	0.04	93.85	6.11	0	0	0
irlamp	0	0	0	0	0.1	11.52	88.38	0	0	0
laptop	0	0	0	0.01	0	0	0	99.86	0	0.13
monitor	0	1.09	0	0	0	0	0.02	0.01	98.88	0
solderingiron	0	0	0	0.02	0	0	0	0.01	0	99.97

TEST_HALVED										
Dimensions: <10x7>										
Accuracy: 0.9878399950265885										
WORST Accuracy: 0.9380000233650208										
	ipad10W	batterycharger4A	batterycharger800mA	fan	hairdryer	incandescentbulb	irlamp	laptop	monitor	solderingiron
ipad10W	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
batterycharger4A	0	99.4	0	0	0	0.02	0.21	0	0.37	0
batterycharger800mA	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0
fan	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0
hairdryer	0	0	0	0	99.93	0	0.07	0	0	0
incandescentbulb	0	0	0	0	0	95.64	4.36	0	0	0
irlamp	0	0	0	0	0	6.39	93.61	0	0	0
laptop	0	0	0	0	0	0	0	99.84	0	0.16
monitor	0	0.43	0	0	0	0	0	0.01	99.56	0
solderingiron	0	0	0	0	0	0	0	0.14	0	99.86

TEST_TINY										
Dimensions: <12x2>										
Accuracy: 0.9885685753822326										
WORST Accuracy: 0.9709709882736206										
	ipad10W	batterycharger4A	batterycharger800mA	fan	hairdryer	incandescentbulb	irlamp	laptop	monitor	solderingiron
ipad10W	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
batterycharger4A	0.24	97.69	0	0.02	0.16	0.61	0.44	0.58	0	0.26
batterycharger800mA	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0
fan	0	0	0	99.89	0	0	0	0.11	0	0
hairdryer	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0
incandescentbulb	0	0	0	0	0	97.02	2.98	0	0	0
irlamp	0	0	0	0	0.01	3.6	96.39	0	0	0
laptop	0	0	0	0.25	0	0	0	99.65	0.1	0
monitor	0	0.04	0	0.07	0	0	0	1.93	96.96	0
solderingiron	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	99.98

TEST_FOUR										
Dimensions: <8x4>										
Accuracy: 0.9872499984502793										
WORST Accuracy: 0.9570000171661377										
	ipad10W	batterycharger4A	batterycharger800mA	fan	hairdryer	incandescentbulb	irlamp	laptop	monitor	solderingiron
ipad10W	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
batterycharger4A	0	99	0	0.13	0.01	0.01	0.45	0	0.32	0.08
batterycharger800mA	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0
fan	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0
hairdryer	0	0	0	0	99.99	0	0.01	0	0	0
incandescentbulb	0	0	0	0	0	95.2	4.8	0	0	0
irlamp	0	0	0	0	0	5.77	94.23	0	0	0
laptop	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0
monitor	0	0.17	0.59	0.09	0	0	0	0.31	98.83	0.01
solderingiron	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100

RNN with a 100-unit LSTM layer. Results of 100 runs of the classification. 250 samples from each class. TRAIN SAMPLE SIZE: 150.

6.6. ábra. Fully Connected Neurális Hálózattal végzett klasszifikáció eredményei. (Egy USB osztály volt felhasználva)

7 Összefoglalás

A dolgozatban bemutatásra került a tervezett és megépített mérőeszköz mely képes a hálózati jelalak módosításával olyan karakterisztikus választ rögzíteni, mely segítségével másodpercek alatt felismerhető a csatlakoztatott eszköz. Fontos lépés volt a mérési adatokból lényeges feature-ök meghatározása.

A kísérleti méréseket megvizsgálva az SVM alapú klasszifikációs megoldás bizonyult a legelőnyösebbnek, mivel alacsonyabb a klasszifikáció erőforrásigénye és egy eszközből mindössze 30 mérés rögzítésével már 97-99%-os pontosság érhető el a mérési profiltól függően. Bevezetésre került a mérési profilok fogalma. A mérési profilokkal az elérni kívánt mérési idő, a klasszifikációs pontosság, illetve klasszifikációs erőforrásigények függvényében meghatározható olyan profil amely a legoptimálisabb az adott feladathoz. Kísérleti mérésekkel igazoltam, hogy lehetséges pontos klasszifikáció más, rövidebb mérési idejű mérési profilokkal. Látható, hogy mind az SVM, mind az FC (Fully Connected), mind az LSTM alapú klasszifikációval lehetőség van 97-99%-os pontosság elérésére. A neurális hálózat alapú klasszifikációs módszereknél a tanításnál lényegesen több mérés szükséges, mint SVM esetén. Nyílt halmaz alapú módszert is vizsgáltam, az ott bemutatott eredményeken látszik, hogy az SVM alapú novelty detection esetén a legtöbb ismeretlen eszközt hatékonyan detektálja ismeretlenként. Az eredményeken észrevehető, hogy a kevesebb adatot gyűjtő (és így rövidebb idő alatt végezhető) mérések esetén rosszabbak az eredmények, mint az eredeti mérési profillal végzett méréseknél.

A kutatás eredményei cikk formájában is publikálásra kerültek a SMARTGREENS 2022 konferencián: [15].

7.1. Jövőbeli tervek

Az ismeretlen eszközök detektálása fontos a fogyasztófelismerésnél, így további nyílt halmaz alapú felismerési módszereket tervezek megvizsgálni. Emellett a bemutatott mérési profilokkal lehetőség nyílt a gyűjtött adatmennyiség pontos meghatározására, a számítási igény csökkentésére. Azt tervezem vizsgálni, hogy az adatok mérőeszközön történő feldolgozása és klasszifikálása milyen módon és milyen mérési profil mellett valósítható meg. A cél úgy módosítani a mérőeszköz szoftverét, hogy képes legyen az SVM alapú klasszifikációt a mikrokontroller elvégezni. További irány az edge computing megoldások vizsgálata egy teljes mérőeszköz-rendszer kialakításához.

Köszönetnyilvánítások

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek Dr. Tornai Kálmánnak a visszajelzése-kért, javaslatokért és segítségért.

AZ INNOVÁCIÓS ÉS TECHNOLOGIAI MINISZTERIUM ÚNKP-20-1-I-PPKE-89 KÓD-SZÁMÚ ÚJ NEMZETI KIVÁLÓSÁG PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZ-TÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉ-SZÜLT.



NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI
ÉS INNOVÁCIÓS HIVATAL

Irodalom

- [1] T. Petrović és H. Morikawa, „Active sensing approach to electrical load classification by smart plug”, *2017 IEEE Power Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 2017, 1–5. old.
- [2] M. Jaradat, M. Jarrah, Y. Jararweh, M. Al-Ayyoub és A. Bousselham, „Integration of renewable energy in demand-side management for home appliances”, *2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 2014, 571–576. old.
- [3] A. Ridi, C. Gisler és J. Hennebert, „A Survey on Intrusive Load Monitoring for Appliance Recognition”, *2014 22nd International Conference on Pattern Recognition*, 2014, 3702–3707. old.
- [4] P. Mtshali és F. Khubisa, „A Smart Home Appliance Control System for Physically Disabled People”, *2019 Conference on Information Communications Technology and Society (ICTAS)*, 2019, 1–5. old.
- [5] L. Gomes, F. Sousa és Z. Vale, „An Intelligent Smart Plug with Shared Knowledge Capabilities”, *Sensors*, 18. évf., 11. sz., 3961. old., 2018. nov. DOI: [10.3390/s18113961](https://doi.org/10.3390/s18113961).
- [6] T. Petrovic, K. Echigo és H. Morikawa, „Determining occupancy from a WiFi router’s electric power consumption in an office environment”, *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, 2017, 1–6. old.
- [7] A. F. da S. Veloso, R. G. de Oliveira, A. A. Rodrigues, R. A. L. Rabelo és J. J. P. C. Rodrigues, „Cognitive Smart Plugs for Signature Identification of Residential Home Appliance Load using Machine Learning: From Theory to Practice”, *2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 2019, 1–6. old.
- [8] L. Du, D. He, R. G. Harley és T. G. Habetler, „Electric Load Classification by Binary Voltage–Current Trajectory Mapping”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7. évf., 1. sz., 358–365. old., 2016.
- [9] A. Ridi, C. Gisler és J. Hennebert, „Automatic identification of electrical appliances using smart plugs”, *2013 8th International Workshop on Systems, Signal Processing and their Applications (WoSSPA)*, 2013, 301–305. old.
- [10] W. J. Scheirer, A. de Rezende Rocha, A. Sapkota és T. E. Boulton, „Toward Open Set Recognition”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 35. évf., 7. sz., 1757–1772. old., 2013. DOI: [10.1109/TPAMI.2012.256](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2012.256).

- [11] C. Olah. cím: <https://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/>.
- [12] Arduino. cím: <https://www.arduino.cc/>.
- [13] scikit-learn. cím: <https://scikit-learn.org/stable/>.
- [14] Martin Abadi, Ashish Agarwal, Paul Barham, Eugene Brevdo, Zhifeng Chen, Craig Citro, Greg S. Corrado, Andy Davis, Jeffrey Dean, Matthieu Devin, Sanjay Ghemawat, Ian Goodfellow, Andrew Harp, Geoffrey Irving, Michael Isard, Y. Jia, Rafal Jozefowicz, Lukasz Kaiser, Manjunath Kudlur, Josh Levenberg, Dandelion Mané, Rajat Monga, Sherry Moore, Derek Murray, Chris Olah, Mike Schuster, Jonathon Shlens, Benoit Steiner, Ilya Sutskever, Kunal Talwar, Paul Tucker, Vincent Vanhoucke, Vijay Vasudevan, Fernanda Viégas, Oriol Vinyals, Pete Warden, Martin Wattenberg, Martin Wicke, Yuan Yu és Xiaoqiang Zheng, *TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Systems*, Software available from tensorflow.org, 2015. cím: <https://www.tensorflow.org/>.
- [15] D. Németh. és K. Tornai., „SP4LC: A Method for Recognizing Power Consumers in a Smart Plug”, *Proceedings of the 11th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems - SMARTGREENS*, INSTICC, SciTePress, 2022, 69–77. old., ISBN: 978-989-758-572-2. DOI: 10.5220/0010982800003203.