

# XXXVI. Kandó Konferencia

KK2020

2020. november 19-20.

ISBN 978-963-449-224-5

<http://konf2020.kvk.uni-obuda.hu>

(Angol és magyar nyelvű publikációk)

## *Magyar nyelvű publikációk:*

- 1. Egyedi szimulációs környezet kialakítása modellalapú szabályozások vizsgálatához** 2 - 18  
Érchegyi Attila , Dr. Rácz Ervin
- 2. Teszt- és kényszerfájl generátor FPGA fejlesztéshez és ennek használata, jelentősége az oktatásban** 19 - 32  
Borsos Döníz<sup>1</sup>, Fintor József<sup>2</sup>, Zsáry Gábor<sup>2</sup>
- 3. A szilícium alapú napelem menthet meg a kihalástól?** 33 - 42  
Ritter Csaba<sup>1</sup>, Kecske méti Zsombor<sup>2</sup>, Varga Zoltán<sup>3,4</sup>, Dr. Rácz Ervin<sup>5</sup>
- 4. Paks I, Paks II. közös üzeme, hatása a magyarországi villamosenergia-ellátásra** 43 - 53  
Német Márk<sup>1</sup>, Varga Zoltán<sup>2,3</sup>, Dr. Rácz Ervin<sup>4</sup>
- 5. A szilícium alapú napelem cella összehasonlítása a festékérzékenyített napelem cellával** 54 - 65  
Varga Zoltán<sup>1,2</sup>, Dr. Rácz Ervin<sup>3</sup>
- 6. Forgógépek mechanikai hibáinak elemzése áram jelalak-analízis módszerével** 66 - 86  
Bendiák István
- 7. Epitaxiás nano-struktúrák térfogatmeghatározásának néhány aspektusa** 87 - 95  
Zoltán Farkas, Antal Ürmös, Ákos Nemcsics

## *English Papers:*

- 8. Non-technical loss detection at unregistered points in power distribution systems** 97 - 108  
Márton Greber, Attila Fodor, Attila Magyar

- 9. Biometric identification and LoRaWAN communication problems in remote health monitoring** **109 - 120**  
Marcell Szántó
- 10. Additional wireless communication technologies that are used in LoRaWAN products and their importance in the field of personal and property protection** **121 - 130**  
Döníz Borsos

# Magyar publikációk

# Egyedi szimulációs környezet kialakítása modellalapú szabályozások vizsgálatához

**Érchegyi Attila , Dr. Rác Ervin**

attila.erchegyi@gmail.com , racz.ervin@kvk.uni-obuda.hu

---

*Abstract: Kutatásom azt a célt szolgálja, hogy létrehozzak egy, a valóságot megközelítő szimulációs környezetet a modell alapú szabályozások teszteléséhez. Az előadás során a készülő dolgozatomból kiindulva, meghatározom, hogy a teljesítmény-hőmérséklet transzformáción felül, milyen járulékos fizikai jelenségek befolyásolják a hőmérséklet szabályozás működését. Ezeket matematikai úton közelítem meg, majd az így kapott függvényeket implementálom C# nyelven. Töreksem arra, hogy az eredmény moduláris és paraméterezhető legyen. Ezután, a modulokat egyesével vizsgálat alá veszem, és értékelem a működésüket. Az előadásom végén bemutatok egy komplex környezetet, amelyben megvizsgálom egy modellalapú szabályozás működését.*

*Keywords: szimuláció; modellalapú szabályozás; hőmérséklet szabályozás; C#*

---

## 1. Bevezető

Az egyik munkám során az volt a feladatom, hogy egy több különálló helyiségből álló épület légtechnikájának vezérlését alakítsam át. Az első szempont az volt, hogy az aktuális rendszer két különálló részből tevődik össze, amelyeket egy rendszerbe kell összevonnom. A PLC vezérli a légbefűvást, elszívást, és a szűrők eltömődésének figyelését, mellette egy analóg szabályozó pedig a helyiség temperálásáért és légnyomásuk differenciálásáért felel. A másik szempont, hogy az alkalmazott technológiák miatt, nincs lehetőség a helyi kísérletezgetésre, hanem egy előre jól beállított, és bizonyított működésű rendszert kell hadrendbe állítanom. Ezért ezt a feladatot a fizikai jelenségek leírásával közelítettem meg, és arra építettem föl a szabályozásokat. A teszteléshez valamilyen modellre van szükségem. Az arányosan kicsinyített modell megépítését elvettem, mert nem biztos, hogy a működése megegyezne a valósággal. Ezért maradt az a megoldás, hogy egy számítógépes modellt alkotok meg, amely a lehető legnagyobb pontossággal tükrözi a valóságot. A következőkben erről fogok beszélni.

A fejezetekben említett programkódok hosszára tekintettel, nem a cikkbe illeszttem be azokat, hanem külön, a githubon teszem elérhetővé őket. Az elérési lehetőségre minden esetben hivatkozom.



## 2. Fűtőteljesítmények időbeli felfutása

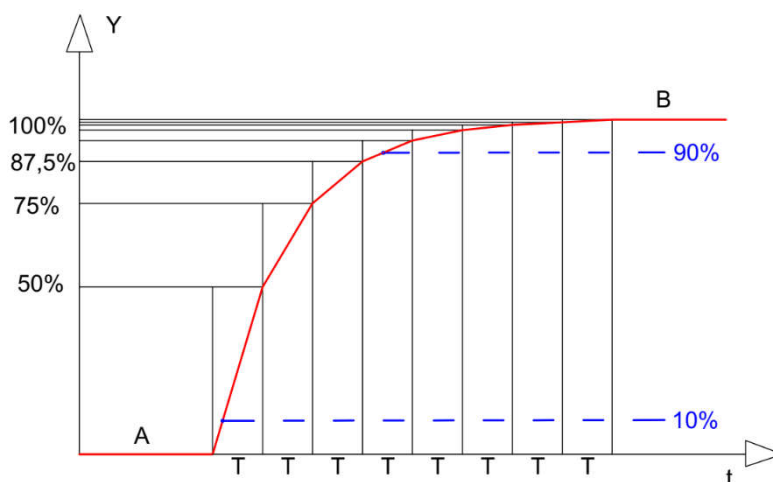
Bekapcsoláskor a fűtőteljesítmények által leadott teljesítmény csak fokozatosan éri el a névlegest. Ennek okát az atom-, és rácsszerkezetben kell keresni. Vegyünk egy pár atomból álló rácsszerkezetet, amitegységnyi energiával gerjesztünk. Az első atom ezt mind elnyeli, és a többi atomhoz képest jobban elkezd rezegni. Ezzel instabil állapotba, gerjesztetté válik. Mivel ez a gerjesztett állapot nem tartható fenn, ezért az atom a többlet energiát, illetve annak egy részét kibocsátja, átadja a szomszédos atomoknak. Így ha nem is lesznek azonos állapotban, de csökken a közöttük lévő energia különbség. De azok is tovább, tovább és tovább fogják adni, amíg a rácsszerkezet javarészt minden atomja egy stabil, de magasabb energiaszintű állapotba nem kerül. Belátható, hogy egy ilyen energialöket eloszlása nem egy pillanat alatt zajlik le.

Ha tovább gondolkodjuk a jelenséget, amely teljesítmény felfutásnál fellép, akkor az is elmondható, hogy a felfutás meredeksége időben változó, mert a belső energia növekedésével, nő a fűtőművet alkotó fűtőteljesítmények belső ellenállása is. Az ellenállás növekedésével a töltések áramlása így lassul. Vagyis csökken az a gerjesztés, ami a rácsszerkezet energiájának növekedését okozza. Ez a folyamat mindaddig lassul, amíg a stabil állapotot el nem érjük. Ebben az állapotban a betáplált energia már csak arra elegendő, hogy pótoljuk azt a veszteséget, amelyet az áramló levegő vesz el.

Ezek alapján nézzük meg, hogy a fenti jelenséget miként tudjuk a szimulációban létrehozni. Ehhez térjünk vissza az ógörögökhöz, akiknek a matematikában is nagyon sokat köszönhetünk. Élt közöttük egy Zénón nevű filozófus, akihez 8 paradoxont köthetünk. Az egyikben Achilleus egy teknőssel versenyez. Mivel Achilleusz feltételezte, hogy gyorsabb lesz a teknősnél, ezért adott neki száz láb előnyt. Mire utána indult, a teknős már tovább ment. Így a száz láb után, kevesebb, de még mindig valamennyi hátrányban maradt. Minden ilyen „ugrásával”, lefaragott ebből, de a paradoxon szerint sose érte utol a teknőst. Ha feltételezzük, hogy a közöttük lévő távolság mindig feleződik, akkor kapunk egy matematikailag jól leírható, és programkódként jól implementálható függvényt, amely alkalmas a felfutás szimulálására.

Most kapcsoljuk ki a fűtőművet, és nézzük meg, hogy ez esetben mi történik. A rendszer stabil állapotában az áramló közeg közel annyi energiát vont el a fűtéstől, mint amennyit villamosan betápláltunk. Amikor kikapcsoljuk a betáplálást, akkor ez az utánpótlás megszűnik, és elkezd csökkenni a fűtőmű remanens energiája. Ahogy a névleges teljesítményt, úgy a bekapcsolás előtti állapotot se tudjuk elérni pillanatszerűen. Ennek vizsgálatához ismét vissza kell térnünk a korábban vázolt elmélethez. Az áramló közeg a fűtőteljesítmények felületéről, azaz a rác szelős atomjairól vesz el energiát. Ahogy a felfűtésnél, itt is a rácspontokban lévő atomok egymásnak fogják tovább és tovább adni az energiájuk egy részét, amivel ismét stabil állapotba kerülnek. Ez a transzfer nem történhet meg pillanatszerűen, és ez

okozza majd a pillanatnyi leadott teljesítmény időben elnyújtott lefutását. Ahogy csökken a teljes fűtőmű energiája, azzal együtt csökken a közte, és az áramló közeg közötti energiakülönbség is. Így elmondható, hogy egyre kisebb és kisebb energiadagokat kell az atomoknak egymásközt átadniuk. Ezáltal lassul a fűtőmű visszahűlése, a lefutáskor a felfutás tükörképét kapjuk. Azaz a fűtőmű kezdetben meredeken veszít az energiájából, majd egyre lassabban éri el a kezdeti, vagy nevezhetjük úgyis, hogy nyugalmi állapotát. A szimulációban nem csak a fűtési, hanem a visszahűlési folyamatot is meg kell valósítanunk. Mellette azt is figyelembe kell venni, hogy a felfűtéskor nemcsak betáplálásunk volt, hanem az áramló közeg miatt veszteségünk is, amíg hűtéskor, csak az utóbbi. Ezért a két folyamat lefutása időben különbözik, a visszahűlés gyorsabban történik. Ez a felfutásnál nagyobb, a lefutásnál pedig kisebb érték lesz.



1. ábra: Felfutási meredekségek az egyes T szakaszokon

A felfutás szimulálásához először határozzunk meg egy egységnyi időt, amely legyen  $T$ ! Az első  $T$  idő alatt fut fel a függvényünk a végérték feléig, és utána minden egységnyi idő alatt a fennmaradó különbség felével nő, vagyis a végértéket folyamatosan közelítjük, de sohasé érjük el. Ez felírható úgy, hogy:

$$B-A \approx \frac{B-A}{2} + \frac{B-A}{4} + \frac{B-A}{8} + \frac{B-A}{16} + \dots + \frac{B-A}{2^n} \quad (1)$$

$$B - A \approx \sum_{i=1}^n \frac{B-A}{2^i} \quad \text{ha } i \in \mathbb{N}^+ \quad (2)$$

Az  $A$  és  $B$  különbségének felosztását a végtelenségig folytathatnánk, ezért szabjunk egy ésszerű határt annak, hogy meddig végezzük el a valós matematikai sor összegzését. Ezt úgy tegyük, hogy eressünk egy olyan pontot, amely a  $T$  egész számú többszöröse, és a kiinduló ( $A$ ) és végérték ( $B$ ) különbségének 1%-át éppen nem haladja meg. Ez a feltétel a szimulációnak már egy elfogadható pontosságot ad.

## 1. Táblázat

A felfutás meredeksége az egyes T szakaszokon a végértékhez viszonyítva

Időegység	1T	2T	3T	4T	5T	6T	7T	8T
$\Delta Y$	50%	25%	12,5%	6,25%	3,125%	1,5625%	0,78125%	0,78125%
Y	50%	75%	87,5%	93,75%	96,875%	98,4375%	99,21875%	100%

A fenti táblázat alapján kimondható, hogy a sor összegzésének 7. lépésben elérünk egy olyan pontot, ahol a pontosságunk 1%-nál már éppen jobb. Ezen felül, a táblázatban felvettem egy 8T időpillanatot is. Ennek oka, hogy a szimulációban szeretnék lehetőséget adni arra is, hogy a valósággal ellentétben a fűtőteljesítmény elérhesse a névleges értéket. A későbbiekben úgy fogom kialakítani a rutint, hogy bemeneti paraméterként meghatározható legyen, hogy a felfutás elérheti-e vagy sem a végértéket. Vagyis, hogy a felfutás 7T vagy 8T ideig tartson.

Ahhoz, hogy a felfutást implementálni tudjam a programba, kell egy bemenő paraméter, amely meghatározza a felfutás hosszát. Erre két lehetőség van. Az első, hogy megadom a 8T illetve 7T idő pontos értékét, azaz a beállási időt. A másik, hogy a felfutási időt [1] adom meg, amelyet gyakrabban használnak az egyes szakirodalmakban. Ezt az időt a következőképpen definiálják: A felfutási idő, a függvény felfutási szakaszán felvett két pont között eltelt idő. Általában ezt a két pontot a végérték 10% és 90%-nál határozzák meg. A továbbiakban én is ennél a meghatározásnál maradok.

A következő lépésben összefüggést kell teremtenünk a felfutási idő, és a korábban bevezetett egységnyi idő között. Amennyiben visszatérünk az 1. táblázathoz, akkor megállapíthatjuk, hogy a névleges 10%-ához tartozó pillanatérték a függvényen 0T és 1T, míg a 90%-ához tartozó 3T és 4T között található. Ezek különböző, de ismert meredekségű szakaszok, ezért a bekapcsolástól (0T) eltelt időt a függvény mindkét keresett pontjára könnyedén meghatározhatjuk:

$$t_{10\%} = \frac{T}{Y_1 - Y_0} * Y_{10\%} = \frac{T}{50 - 0} * 10 = \frac{1}{5} * T \quad (3)$$

$$t_{90\%} = 3 * T + \frac{T}{Y_4 - Y_3} * (Y_{90\%} - Y_3) = 3 * T + \frac{T}{93,75 - 87,5} * (90 - 87,5) = \frac{17}{5} * T \quad (4)$$

Ezek különbségeként megkapjuk a felfutási időt:

$$t_{fel} = t_{90\%} - t_{10\%} = \frac{17}{5} * T - \frac{1}{5} * T = \frac{16}{5} * T = 3,2 * T \quad (5)$$

Mivel az egységnyi időt keressük, és a felfutási időt határozzuk meg paraméterként, ezért az egyenletet T-re átrendezve megkapjuk, hogy:

$$T = 0,3125 * t_{fel} \quad (6)$$

Most térjünk át az elméletről a program implementálására. Először is létrehoztam egy „Felfutas” nevű classt [2]. Felvettem lokális változókat, amelyekben az

inicializálási paramétereket, és átmeneti értékeket fogom tárolni. Létrehoztam a példányosításkor lefutó függvényt (public Felfutas(...)), amelynek a bemenő paraméterei definiálják a fel-, és lefutást. A függvénytörzsben található a paraméterek eltárolása, és szükség esetén, az egységnyi idők kiszámítása.

A Felfutas class következő része, a „work” függvény. Itt bemenetként meg kell adni, hogy be van-e kapcsolva a fűtőmű, vagy sem. A függvény lefutásakor első lépésben megvizsgálja, hogy a bemeneti adat értéke megváltozott-e az előző állapothoz képest. Mivel a fűtőteljesítmények vagy be-, vagy kikapcsolt állapotban vannak, ezért a bemeneti bool változó kellőképpen definiálja azok állapotát. Több fűtőmű esetén többször kell példányosítani majd a Felfutas classst.

A „work” függvény további részében megvizsgálja T\_tar értékét, vagyis, hogy a fel- vagy lefutás melyik meredekségű szakaszán tart a program. Ez alapján kiszámolja az aktuális kimeneti értéket a következő egyenlet alapján:

$$kimenet = korábbi\ érték \pm maximális\ érték * meredekség * (főciklusidő / T\ időalap) \quad (7)$$

Vagyis a kimeneti érték megkapható, ha a korábbi kimeneti értékhez hozzáadjuk az adott szakaszra számított legkisebb változást. Ez a változás a névleges teljesítmény, az adott T egységidejére vonatkozó meredekség, és a főciklusidő és időalap hányadosának szorzatából számítható ki. A kimeneti értéket mind két irányba korlátozzuk, hogy ne lépje túl az adott szakaszra vonatkozó határértékeket.

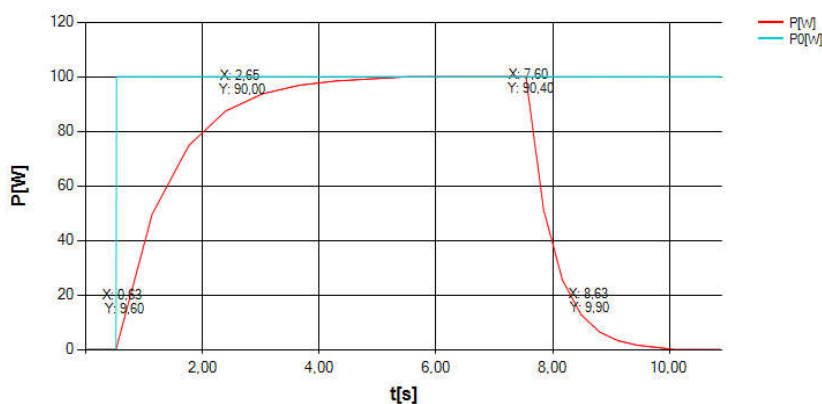
Ezután a függvény eltárolja a jelenlegi időt és ez alapján, ha szükséges, átugrik a következő szakaszra, a végén pedig visszatér a kiszámított teljesítmény értékkel.

Térjünk át a program tesztelésére. Inicializáláskor a következő paraméterekkel példányosítottam a classst:

$$fel = new Felfutas(100, 8, -1.0f, -1.0f, 2, 1, 10); \quad (8)$$

Vagyis a fűtés névleges teljesítményét 100W-ban határoztam meg. A szakaszok száma 8, azaz a névleges teljesítményt el fogja érni a kimeneti függvény. T időegységeket nem, de a fel- és lefutásokat 2s-ban és 1s-ban határoztam meg, illetve megadtam a főciklusidőt milliszekundumban.

A főciklust egy 10ms-os timer megszakításaként létrehoztam. Ebbe helyeztem el a „fel” -ként példányosított Felfutas class „work” függvényét. Majd a kimeneti értéket egy chart-ban ábrázoltam a névleges teljesítménnyel párhuzamosan. Eredményként a következőt kaptam:



2. ábra: A Felfutas class work függvény kimeneteként kapott le és felfutási függvény

Az látható, hogy a fűtőteljesítmény bekapcsolásakor először meredeken nő a pillanatnyi teljesítmény értéke. Ahogy telik az idő telítésbe megy, rásimul a névleges teljesítményt szimbolizáló vízszintes egyenesre. A felfutási szakaszon jelöltem a felfutási idő deffiniójához tartozó két pontot. Az egyiket a 10%-os, másikat az 90%-os érték körül. A két pont között eltelt idő, vagyis  $\Delta X$  megegyezik az inicializáláskor megadott 2 másodperccel.

Nézzük a lefutást! Itt a teljesítmény kikapcsolása után meredeken el kezd csökkenni a pillanatnyi teljesítmény. Majd az eredeti állapot megközelítve a meredekség csökken, és lassan rásimul az X tengelyre. Ahogy a felfutási szakaszon, itt is jelöltem az ominózus két pontot. Ez esetben is elmondható, hogy a két pont X koordinátájának különbsége megegyezik a megadott lefutási idővel.

A kis eltérést mindkét esetben az okozza, hogy a főciklusidő, és az egységnyi idők között nincs teljesen 1 nagyságrendnyi különbség. Ám ennek ellenére elmondható, hogy a várt működést elértem valamint az, hogy a létrehozott classt a továbbiakban tudom használni a fel- és lefutás szimulálására.

### 3. Légcsatorna késleltetés

A fűtőműveken áthaladva a levegő, légcsatornákon keresztül jut el a fűteni kívánt helyiségig. Ennek hatására a rendszerben egy késleltetés jelenik meg. Maga a késleltetés az az idő, amely alatt a fűtőműtől eljut a levegő a helyiségig. Egy szakasz okozta késleltetés meghatározható a légcsatorna hosszának és az áramló levegő közepes sebességének hányadosából. Ez akkor, és csak akkor igaz, ha ideális gázt feltételezünk, amely állandó keresztmetszetű légcsatornában halad, és a vizsgált szakasz forrás- és nyelőmentes. Mi történik akkor, ha ebből egy vagy több állítás nem igaz? Induljunk ki a kontinuitási egyenletből, ami kimondja, hogy: „... az

állandó sűrűségű áramló közeg sebességének arányát a csatorna keresztmetszetek aránya szabja meg, [3].

$$A_1 * v_1 = A_2 * v_2 \quad (9)$$

ahol:

-  $A_1$  és  $A_2$ , a cső tetszőleges két pontjának keresztmetszete [ $m^2$ ]

-  $v_1$  és  $v_2$ , a kiválasztott két keresztmetszethez tartozó közeg áramlási sebesség [ $\frac{m}{s}$ ]

Ez felírható az  $A_1$  és  $A_2$  keresztmetszeteken egységnyi idő alatt áthaladó légmennyiségekkel is:

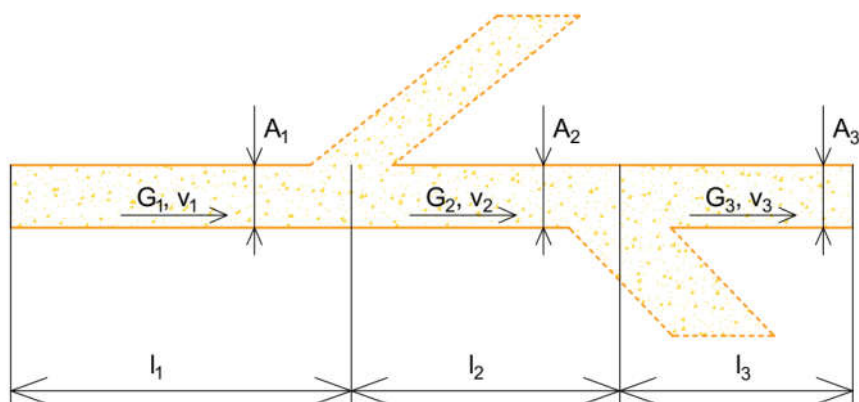
$$G = A * v \quad (10)$$

$$G_1 = G_2 \quad (11)$$

ahol:

-  $G_1$  és  $G_2$ , a cső két tetszőleges keresztmetszetén áthaladó légmennyiség [ $\frac{m^3}{s}$ ] vagy [ $\frac{m^3}{h}$ ]

Egy vizsgált rendszer esetén akkor nem beszélhetünk nyelőmentességről, ha több különálló helyiség temperálását egyazon fűtő- és hűtőmű látja el. Ekkor első lépésben redukálnunk kell az egységet csak azokra a légcsatornákra, amelyek a beavatkozó és a hőmérsékletérzékelő között található. Az így kapott redukált rendszert fel kell osztanunk kisebb szakaszokra, amelyeknek a kezdetét és a végét az elágazások, vagy a rendszer két végpontja határozza. A felosztás után kapott szakaszokra a szállított légmennyiségek és közepes sebességek leolvashatók a gépészeti tervekről. A gépészeti tervezés folyamán első lépésként meghatározzák a helyiségek térfogatából és a szükséges légcsereszámából a befűvott levegő mennyiségét. A helyiségektől visszafelé haladva az elágazásokban szállított légmennyiségeket összeadják, ebből megkapják az előző szakaszban szállított levegő mennyiségét. Az összevonásokat mindaddig elvégzik, amíg már nem marad több elágazás. Ez a mennyiség fogja meghatározni a befűvőventillátor teljesítményét.



3. ábra: A légszatórna felosztása és paramétere

Térjünk vissza a felvetett problémánkhoz. A fenti ábrán található egy légszatórna, amelyet három részre osztottam a korábban leírt kívánalmak alapján. Tegyük fel, hogy a gépészek mindegyik szakaszra megadták a szükséges paramétereiket. Ezek alapján a következő képletekkel határozhatjuk meg a szakaszok késleltetési idejét:

A szállított mennyiségből:

$$G = A * v \quad (12)$$

$$G = A * \frac{l}{t} \quad (13)$$

$$t = \frac{A * l}{G} \quad (14)$$

ahol:

- G, a csőszakasz által egységnyi idő alatt szállított légmennyiség  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$
- A, a csőszakasz keresztmetszete  $[m^2]$
- v, a csőszakaszban áramló levegő közepes sebessége  $\left[\frac{m}{s}\right]$
- l, a csőszakasz hossza  $[m]$
- t, a csőszakasz késleltetése  $[s]$

Az áramlás közepes sebességéből:

$$v = \frac{l}{t} \quad (15)$$

$$t = \frac{l}{v} \quad (16)$$

ahol:

- $v$ , a csőszakaszban áramló levegő közepes sebessége  $\left[\frac{m}{s}\right]$
- $l$ , a csőszakasz hossza  $[m]$
- $t$ , a csőszakasz késletetése  $[s]$

A nem forrásmentes esetet, pontosabban azt, ha egynél több forrásunk van, nem érdemes vizsgálni. Elméletben lehet ilyen, de a valóságban nem alkalmaznak több egymástól független fűtőművet, amelyek valahol a szállítási hely felé félúton egymásba csatlakoznának. Ehhez hasonló helyzet lehet, amikor:

- az elszívott levegő egy részét visszakeverik a befúvotthoz. Ez a fűtőművek előtt történik meg. Komplex modell esetén érdemes figyelembe venni. Főleg, ha nincs a keverékre vonatkozó mért adatunk.
- tartalék ventilátorok esetén, amikor is az épület légtechnikájára vonatkozó előírások megkövetelik, hogy egyszeres hiba esetén is meglegyen a szükséges légbefúvás. Itt főleg az átkapcsolási tranziensek okozhatnak problémát.

Amit érdemes megvizsgálni, az a változó keresztmetszet. Az elágazások mellett, lehetnek olyan csőszakaszok, amelyeknek a keresztmetszete egy adott hosszban megváltozik. Ez esetben, a korábbi képlet már nem alkalmazható. Nézzük, miként kell eljárni ekkor:



4. ábra: Változó keresztmetszetű légesatorna

A fenti ábrán egy olyan csőszakasz látható, ahol a levegő egy kisebb,  $A_1$  keresztmetszeten lép be, és egy nagyobb,  $A_2$  keresztmetszeten lép ki. A kontinuitási törvény alapján elmondható, hogy kilépéskor a levegő áramlása lassabb lesz, mint belépéskor. Azt az időintervallumot keressük, ami alatt a levegő áthalad a csőszakaszon. Ehhez induljunk ki először az áramlási sebességből. Első lépésként felírható az átlagsebesség képlete:

$$v = \frac{l}{t} \quad (17)$$

Ebből egy dolog ismert, a cső hossza. A  $t$  időt keressük, és az átlagsebességet kellene megadnunk. Mivel ismerjük a két keresztmetszetet, valamint a belépő levegő áramlási sebességét, meg tudjuk határozni kilépéskor a levegő sebességét:

$$A_1 * v_1 = A_2 * v_2 \quad (18)$$

ahol:



- $A_1$  és  $A_2$ , a csőszakasz két végének keresztmetszete
- $v_1$  és  $v_2$ , a csőszakasz végében mérhető pillanatnyi sebesség

A két pillanatnyi sebességből egyetlen egy esetben lehet az átlagsebességet meghatározni, ha a cső keresztmetszete egyenletesen változik. Ekkor a két pillanatnyi sebesség számtani közepéből kaphatjuk meg.

Általános esetet vizsgálva, már nagyon apró darabokra kell felosztanunk a csőszakaszt. Ekkor a ki és belépő oldalon a keresztmetszetet azonosnak lehet tekinteni. Minden ilyen csőszakaszban átáramló levegő pillanatnyi sebessége felírható a következő módon:

$$v_{pill} = \frac{\delta l}{t_{\delta l}} \quad (19)$$

ahol:

- $v_{pill}$ , a csőszakaszban áramló levegő pillanatnyi sebessége  $\left[\frac{m}{s}\right]$
- $\delta l$ , az egységnyi csőszakasz hossza  $[m]$
- $t_{\delta l}$ , az egységnyi csőszakasz késleltetése  $[s]$

Az egységnyi kis csőszakaszainkra felírhatjuk a pillanatnyi sebességet a szállított mennyiség, és a keresztmetszet alapján, ahogy korábban az állandó keresztmetszetű cső esetén is megtettük:

$$v_{pill} = \frac{G}{A_{\delta l}} \quad (20)$$

ahol:

- $A_{\delta l}$ , az egységnyi csőszakasz keresztmetszete  $[m^2]$

A két képletet vonjuk össze, és rendezzük át az egyik oldalát a késleltetési időre:

$$\frac{G}{A_{\delta l}} = \frac{\delta l}{t_{\delta l}} \quad (21)$$

$$t_{\delta l} = \frac{\delta l \cdot A_{\delta l}}{G} \quad (22)$$

Az alapján, amit kaptunk, két dolgot állapíthatunk meg. Az egyik a nevezőben található  $G$ , azaz a szállítási teljesítmény. A kontinuitási törvényből kiindulva ennek az értéke a csővezeték keresztmetszetétől független. Vagyis ez állandó. A másik, hogy a számlálóban az egységnyi csőhossz, és annak a keresztmetszetének szorzata egy térfogatot ad. Ez a térfogat az egységnyi csőhossz térfogata. Ezért kifejezhetjük a késleltetést a térfogattal is:

$$t_{\delta l} = \frac{V_{\delta l}}{G} \quad (23)$$

Most, hogy előbb felbontottuk a csövet állandó keresztmetszetű kis szakaszokra, majd meghatároztuk mindegyiknek a késleltetését, ideje újra összerakni, és megnézni mit kapunk:

$$t = \sum t_{\delta l} = \sum \frac{V_{\delta l}}{G} = \frac{\sum V_{\delta l}}{G} = \frac{V}{G} \quad (24)$$

Azt állítjuk, hogy véges, de nagyszámú állandó keresztmetszetű csőszakaszt hoztunk létre. Elméletben minden egyes darabnak tudjuk a térfogatát. Ha ezeket összerakjuk, akkor ismét az eredeti csőszakaszhoz jutunk. Így lényegében azt kaptuk, hogy a késleltetés kiszámítható a csőszakasz térfogata és a szállítási teljesítmény hányadosából, ahol a szállítási teljesítmény adott, valamint a térfogat ismert vagy számítható. Elmondható, hogy ez a képlet igaz lesz nem csak a változó keresztmetszetre, hanem az állandóra is, vagy akár a kanyaródó csőszakaszokra is egyaránt. Felmerül a kérdés, hogy lehetne-e az egész csövet egyben, a fűtőműtől a befűvásig egyetlen képlettel leírni? A válasz: nem! Pontosabban, nagyon kivételes esetben. Ugyanis, általában nem egy helyiség fűtését szolgálja ki egy-egy fűtőmű, hanem többét. Ezért, a teljes légcsatorna hosszát tekintve, az elején nagyobb szállítási mennyiségről beszélhetünk, mint a kilépő oldalon, ahol a hőmérséklet-mérésünk van.

Térjünk át a megvalósításra. Létrehoztam egy Csatorna nevű class-t [4], és benne két lokális változót. Az egyiket az idő, a másikat a bemeneti adatok tárolására. A class első függvénye, amely példányosításkor fut le, a bemeneti paraméterek alapján kiszámolja a szükséges késleltetést. Három féle módon teheti meg az alapján, hogy az első paraméternek milyen értéket adunk. Az első az állandó keresztmetszetű légcsatorna a szállított mennyiség ismeretében. A második az állandó keresztmetszetű légcsatorna a légáramlás sebessége ismeretében. A harmadik az általános, amivel a változó keresztmetszetű légcsatorna írható fel a térfogata és a szállított mennyiség ismeretében. A kiválasztott meghatározási módból kapott időtag alapján, ezután inicializálja az adat\_tar változótömböt.

A ciklikusan meghívható shift függvény felelős az adat\_tar tömb kezeléséért. Első lépésben eltolja a tárolt értékeket egyel, a tömb utolsó helyére pedig eltárolja a bemenő adatot. Majd, a műveletei befejeztével, visszatér a tömb első elemének értékével.

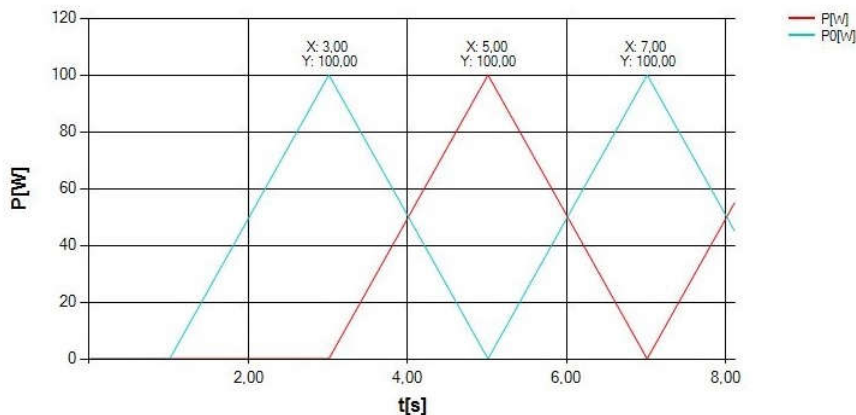
A működés teszteléséhez létrehoztam egy keretprogramot. Ennek az inicializáló szakaszában példányosítok egy Csatorna class-t, lcs néven, a következő paraméterekkel:

$$\text{lcs} = \text{new Csatorna}(2, -1, 4, -1, 2, -1, 10); \quad (25)$$

Itt megadom a 2-es módot, azaz egy állandó keresztmetszetű csatornát írok le a csatorna hosszával (4 m), és légáramlás sebességével (2 m/s). Ezáltal létrehoztam egy 201 elemű adattároló tömböt.

A keretprogram ciklikus része egy 10ms-os időzítő megszakítására fut le. Ebben hívom meg a lcs.shift() függvényt az aktuális bemenő értékkel. Az eredeti

teljesítmény értéket ( $P_0$ ), valamint az lcs classunk kimenetét ( $P$ ) egy chart-ba rögzíti minden ciklusban. Valamint a végén, létrehozta a  $P_0$  változását, hogy a kapott ábra szemléletes legyen. Így a következő ábrát kaptam:



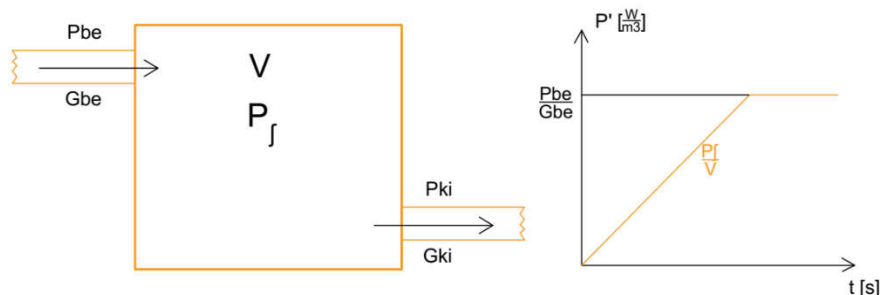
5. ábra: A Csatorna class work függvény kimenete a bemenő jel függvényében

Ezen kék színnel láthatjuk az eredeti teljesítmény értéket, ami a shift függvény bemenő értéke. Valamint piros színnel, a shift függvény kimenő értékét, ami már a cső késleltetésével töltünk el az időben. Mindegyik csúcs jelölve van, amit 100W-on érnek el. A két csúcs között pontosan 2 másodperc van. Ez megfelel annak a számított késleltetési időnek, ami a csatorna hosszának és a légáramlás sebességének hányadosa ad. Ezáltal kimondható, hogy az elméletben felvázolt, majd megvalósított függvény megfelel a várt működésnek, a továbbiakban használható a légszatorna késleltetésének szimulálására.

## 4. A helyiség integráló hatása

A modellezés utolsó lépéseként, nézzük meg, hogy mi tapasztalható akkor, amikor a légszatornából kilép a fűtött levegő a helyiségbe. Első lépésben határozzuk meg milyen paramétereink vannak. Adott a helyiség térfogata ( $V$ ). Erre határozzák meg a befűtött levegő mennyiségét ( $G_{be}$ ), a szükséges légcsereszám alapján. A befűtött levegőnek emellett többlet energiája van, ez a fűtőteljesítmény ( $P_{be}$ ), amellyel a külső levegő hőmérsékletéhez képest rendelkezik. A helyiségből minden esetben távozik a terem levegőjének egy része. Ez történhet aktív módon, elszívó légszatornával, vagy passzív módon, szivárgással a nyílászárókon keresztül. A kiáramló levegő térfogatát az határozza meg, hogy a helyiségre milyen nyomás értéket állapítanak meg. Lehet légköri, ekkor a kiáramló levegő térfogata megegyezik a beáramlóéval. Ilyen például egy átlagos irodahelyiség. Pormentes helyiség esetén túlnyomásos, ahol az elszívott levegő mennyisége kisebb, mint a

befűvotté. Illetve alulnyomásos, ahonnan a pormentes helyiségbe lépünk be. Ez utóbbinál nagyobb térfogatú levegőt kell kiszállítani a térből, mint amennyit bejuttattunk. A távozó levegő, ahogy a befűvott levegő, két paraméterrel rendelkezik: a szállított légmennyiséggel ( $G_{ki}$ ), és a fűtőteljesítményével ( $P_{ki}$ ).



6. ábra: A helyiséget szimuláló paraméterek és pillanatnyi értékük alakulása

Paraméterek meghatározása után nézzük meg, mi történik. Egységnyi idő alatt belép a helyiségbe  $G_{be}/t$  mennyiségű levegő, ami  $P_{be}$  fűtőteljesítményt hordoz magában. Ez a helyiség szempontjából azt jelenti, hogy a levegőjének belső energiája megnő. Azért, hogy a korábbiakhoz hasonlóan majd a helyiséget szimuláló programblokk kimenete teljesítmény legyen, a belső energia helyett, többlet hőteljesítményt fogok kifejezni. Így azt írhatjuk fel, hogy:

$$P_{fn} = P_{fn-1} + P_{be} \quad (26)$$

$$P_f = \int P_{be} \quad (27)$$

A helyiség hőteljesítményét megkapjuk a beáramló levegő fűtőteljesítményének integráljaként. Hozzá kell tenni azt, hogy az eredményként kapott függvény korlátos kell, hogy legyen. Az könnyen belátható, ha  $28^\circ\text{C}$ -os levegőt fűjünk be egy helyiségbe, akkor annak a hőmérséklete nem haladhatja meg a  $28^\circ\text{C}$ -ot, vagyis a befűvott levegő hőmérsékletét egyéb forrás nélkül. Befűvaskor két különböző hőmérsékletű közeg találkozik. Az energiájuk igyekszik kiegyenlítődni. A befűvott levegő mennyisége végtelennek tekinthető a helyiség levegőjéhez képest, a folyamatos fűtés és befűvás miatt, ezért a két közeg energiájának kiegyenlítésénél az tapasztalható, hogy a helyiség levegőjének energiája konvergál a befűvottéhoz.

A befűvás mellett, viszont elszívás is történik. Erről elmondható, hogy a meglévő hőteljesítmény egy részét elveszítjük. Ezt a mennyiségét a helyiség, és az elszívott levegő térfogatának hányadosa fogja meghatározni.

$$P_{fki} = P_{fn} \frac{G_{ki} \cdot t}{V} \quad (28)$$

Ha a fenti két képletet összevonom, akkor megkapom egy adott időpillanatban a helyiség többlet hőteljesítményének leírását:

$$P_{jn} = P_{jn-1} + P_{be}(t) - P_{jn-1} \frac{G_{ki} * t}{V} \quad (29)$$

$$P_{jn} = P_{jn-1} \left(1 - \frac{G_{ki} * t}{V}\right) + P_{be}(t) \quad (30)$$

Mivel a  $P_{be}$  értékét nem tudjuk, csak a fűtőművek pillanatnyi teljesítményét ( $P$ ), ezért a képletet az ismert adatok ismeretében kell módosítanunk:

$$P_{be} = P * \frac{G_{be}}{G} \quad (31)$$

$$P_{jn} = P_{jn-1} + P * \frac{G_{be}}{G} - P_{jn-1} \frac{G_{ki} * t}{V} \quad (32)$$

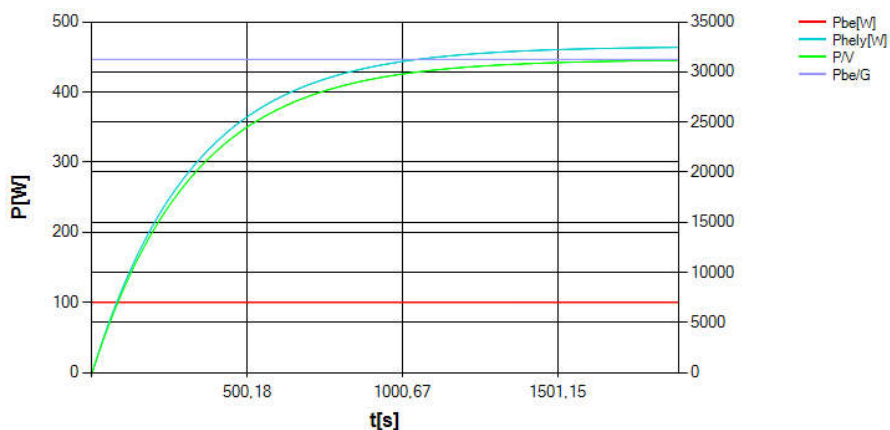
$$P_{jn} = P_{jn-1} \left(1 - \frac{G_{ki} * t}{V}\right) + P * \frac{G_{be}}{G} \quad (33)$$

A képletek ismeretében, áttérhetünk a megvalósításra. Létrehoztam egy Helyiseg nevű classt [5]. Ebben első lépésként, felvettem változókat a paraméterek és az aktuális állapot tárolására. Az inicializáló függvénye bemenő paraméterként várja a következőket: `init_V` – helyiség térfogata (m3), `init_G` – a teljese fűtött légmennyiség (m3/s), `init_Gbe` – helyiségbe befűvott levegő mennyisége (m3/s), `init_Gki` – helyiségből elszívott levegő mennyisége (m3/s), `init_alap` – főciklusidő (ms). Példányosításkor menti a létrehozott class a paramétereket. A ciklikusan meghívható függvény bemenete a pillanatnyi fűtőteljesítmény értéke a teljes fűtött légmennyiségre vonatkozóan.

Előzőkhöz hasonlóan létrehoztam egy keretprogramot, amelynek inicializáló részében példányosítottam egy Helyiseg classt a következő módon:

$$\text{hely} = \text{new Helyiseg}(72.93\text{f}, 0.224\text{f}, 0.224\text{f}, 0.224\text{f}, 10); \quad (34)$$

A bemenő paramétereket egy valós eset alapján választottam ki. A vizsgált helyiség térfogata 72.93m<sup>3</sup>. A befűvott, és elszívott levegő egyaránt 0.224m<sup>3</sup>/s. Úgy választottam ki a teljes fűtött légmennyiséget, hogy az a beáramló levegő mennyiségével azonos legyen, így a szimulációból kapott eredmény átláthatóbb. A főprogram ciklus ideje 10ms. Ezek alapján a következő eredményre jutottam:



7. ábra: A Helyiség class work függvény kimeneteként kapott pillanatnyi teljesítmény a bemenő teljesítmény függvényében

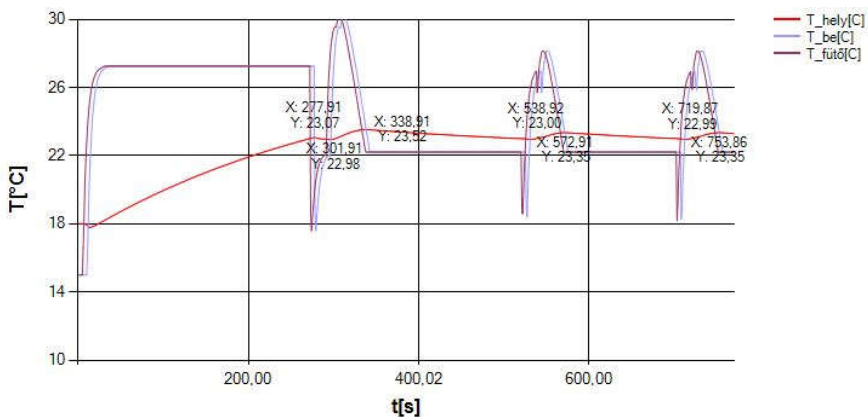
A futás során a beáramló levegő többlet hőteljesítménye 100W. Négy dolgot jelenítettem meg a grafikonon: a beáramló levegő hőteljesítményét ( $P_{be}$ ), a helyiség hőteljesítményét ( $P_{hely}$ ), a helyiség egységnyi térfogatára vett hőteljesítményt ( $P/V$ ) és a befűvott levegő egységnyi térfogatára jutó hőteljesítményt. A kapott grafikonon azt láthatjuk, hogy az állandó fűtés mellett megindul a helyiség hőteljesítménye, vagy hétköznapi kifejezéssel akár azt is mondhatjuk, hogy a hőmérsékletének növekedése. Ez mindaddig folytatódik, amíg el nem éri a  $P/V$  görbe a  $P_{be}/G$  egyenest. Vagyis, amíg a helyiség egységnyi térfogatának hőteljesítménye el nem éri az befűvott levegő térfogatának egységére jutót. A tapasztalt jelenség, megfelel az elvártnak, vagyis, hogy folyamatosan melegedik addig a helyiség, amíg annak a hőmérséklete el nem éri a befűvott levegő hőmérsékletét.

## 5. Befejezés

Az elemek megalkotása után, összeillesztem őket egy valós eset modellezésére. Az épületben, amelyet vizsgálok, olyan fűtőmű található, amely 6 külön kapcsolható fűtőtelsítményből áll. Ez, és a ventilátor együtt több helyiséget lát el. A fűtött levegő különböző elágazások után éri el mindet. Három különböző hőmérséklet-érzékelőnk van. Az egyik közülük a vizsgált helyiségben található meg. Egy a külső levegő hőmérsékletét, egy pedig a befűvott levegő hőmérsékletét méri. A modellhez példányosítottam 6 Felfutas class-t, egyesével mindegyik fűtőtelsítményre. A légcsatornákat 9 Csatorna class-val hoztam létre. Majd a végére illesztettem egy Helyiség class-t, amit temperálok. A fűtőműveket egymással párhuzamosan, a többi elemet pedig sorosan kötöttem össze egy átmeneti változóval. A vizsgált

szabályozásom ezektől függetlenül külön függvényben futtattam, és bemeneti paraméternek az aktuális hőmérséklet értékeit adom, kimenetként a Felfutas class-ok kétállapotú bemeneteit kapom meg.

Induljunk ki egy üzemszüneti állapotból. A szabadban  $15\text{ °C}$  van. A fűtés nincs üzemben, de a felügyelt szobában  $18\text{ °C}$  van. Azt a megkötést kell tennünk az ott tartózkodó személyzet érdekében, hogy a befűvott levegő hőmérséklete nem haladhatja meg a  $28\text{ °C}$ -ot. Elindítva a modellt, a következő eredményt kaptam:



8. ábra: Az összeállított szimuláció eredményei a technológiai szempontból kiemelt helyeken

Az ábrán három dolgot ábrázoltam. Pirossal a helyiség hőmérsékletét, kékkkel a befűvott levegő hőmérsékletét, lilával pedig egy fiktív hőmérsékletet, amely közvetlenül a fűtőműből kilépő levegőé. Ez utóbbira azért volt szükség, hogy bemutassam mekkora az a késleltetés, amíg a forrástól eljut a levegő helyiségig. A grafikon alapján azt láthatjuk, hogy a helyiség integrálásával összehasonlítva ez a holtidő ebben a példában nem számottevő, de jelen van.

Nézzük, hogy alakul a helyiség hőmérséklete! Induláskor még hideg levegőt fúj be a rendszer egy rövid ideig. Ezért a szobában egy rövid ideig csökken a hőmérséklet, de nem számottevően. Fokozatosan fűtjük a helyiséget a megengedett maximális hőmérsékletű levegővel, hogy minél előbb elérje a kívánt hőmérsékletet. Amint a hőmérséklet eléri a  $23\text{ °C}$ -ot, átvált a program a finom szabályozásra. Azt a kilengést, amely látható a kék és lila görbén, a fűtőteljesítmények átváltása okozza. A szoftver ekkor két nagy fűtőteljesítményt kapcsol át. Amíg az egyik teljesítmény felfut, addig a másiké csökken, de valamennyi hőt továbbra is leadnak a korábban működő fűtőteljesítmények.

Látható, hogy a későbbiekben szépen beáll a helyiség hőmérséklete. A szabályozás kicsivel több mint  $0,3\text{ °C}$ -os eltéréssel képes ezt tartani. A kék görbe kilengései is kisebbek, mivel kisebb teljesítményeket kell csak átkapcsolni hőmérséklet tartásához, viszont, mind a három megjelenített a hőmérsékleti csúcsérték átlépi a  $28\text{ °C}$ -os határt. Ez azt jelenti, hogy egy rövid ideig a megengedettnél magasabb

hőmérsékletű levegőt juttatunk be a helyiségbe. Ezért, a szabályozásban szükséges majd az átkapcsolások figyelembevétele. Időben el kell tolni a ki, és bekapcsolásokat egymástól.

Összeségében elmondható, hogy a modell megfelel a cikk elején támasztott elvárásoknak, vagyis moduláris és kellőképpen beállítható a rendelkezésre álló gépészeti adatokkal. Ugyanakkor, tovább is kell fejlesztenem, hogy komplexebb vizsgálatokat is végre tudjak hajtani vele. Az első, hogy a teljesítmény felfutásoknál megoldást kell keresnem, hogy paraméterezhető legyen pusztán a fűtőmű fizikai jellemzőivel is, mivel nem minden esetben áll rendelkezésre adat a felfutási időkről. A másik, hogy olyan, most elhanyagolt jelenségekkel is foglalkoznom kell, mint a hővesztések a falakon, hőátadás a csatorna falán, valamint áramlási anomáliák a helyiségekben vagy légcsatornáknakban. A célom, hogy a végén eljussak egy olyan felhasználóbarát eszközre, amiben az építészeti és gépészeti adatok és rajzok alapján egy komplett épületet össze tudok állítani, és a nem kontrollált helyiségek esetén is megtudhatók a hőmérsékletük alakulása.

## 6. Hivatkozások

[1] Neszveda József, “A minőségi jellemzők az időtartományban”, Automatika I., Klasszikus szabályozásemélet, Budapest, 2010, 95.-96. oldal

[2] Felfutás class (2020), Érchegyi Attila, Elérve: 2020.11.20 [Online], Elérés: [https://github.com/Mad31nCh3rn0b11/modell\\_szimu/blob/main/felfutas](https://github.com/Mad31nCh3rn0b11/modell_szimu/blob/main/felfutas)

[3] Dr. Fekete Iván, Dr. Menyhárt József, “Ideális gázok áramlástörvényei”, A légtechnikai elméleti alapjai, Budapest, 1975, 66. oldal

[4] Csatorna class (2020), Érchegyi Attila, Elérve: 2020.11.20 [Online], Elérés: - [https://github.com/Mad31nCh3rn0b11/modell\\_szimu/blob/main/csatorna](https://github.com/Mad31nCh3rn0b11/modell_szimu/blob/main/csatorna)

[5] Helyiség class (2020), Érchegyi Attila, Elérve: 2020.11.20 [Online], Elérés: - [https://github.com/Mad31nCh3rn0b11/modell\\_szimu/blob/main/helyiseg](https://github.com/Mad31nCh3rn0b11/modell_szimu/blob/main/helyiseg)



# Teszt- és kényszerfájl generátor FPGA fejlesztéshez és ennek használata, jelentősége az oktatásban

**Borsos Döniz<sup>1</sup>, Fintor József<sup>2</sup>, Zsáry Gábor<sup>2</sup>**

Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola, Budapest<sup>1</sup>

Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Műszertechnikai és Automatizálási Intézet, Budapest<sup>2</sup>

[borsos.doniz@kvk.uni-obuda.hu](mailto:borsos.doniz@kvk.uni-obuda.hu)

[fintor.j@stud.uni-obuda.hu](mailto:fintor.j@stud.uni-obuda.hu)

[zsarygabor@stud.uni-obuda.hu](mailto:zsarygabor@stud.uni-obuda.hu)

---

*Absztrakt: Az FPGA-k iránti keresletben folyamatos növekedés figyelhető meg az elmúlt évek adatait tekintve. Ezt legjobban az mutatja, hogy az FPGA-k piaca 2014 és 2019 között megduplázódott, 5 milliárd USD-ről közel 10 milliárd USD-re nőtt, továbbá ez az érték 2024-re várhatóan eléri a 20 milliárd amerikai dollárt. Ennek következtében a fejlesztéstámogató szoftverek iránti igény is megnőtt. FPGA-ra való fejlesztés során két alapvető feladat a teszt-és kényszerfájl készítése, melyek esetében hatékonyan alkalmazhatók konfiguráló, generáló programok. Az ilyen alkalmazások nem csak fejlesztés során, hanem az oktatásban is segítséget nyújtanak. A tanulmány egy FPGA-khoz fejlesztett teszt- és kényszerfájl generátorral foglalkozik, emellett a program oktatásbeli aspektusait vizsgálja.*

*Kulcsszavak: FPGA, tesztfile, kényszerfile, szoftver, oktatás*

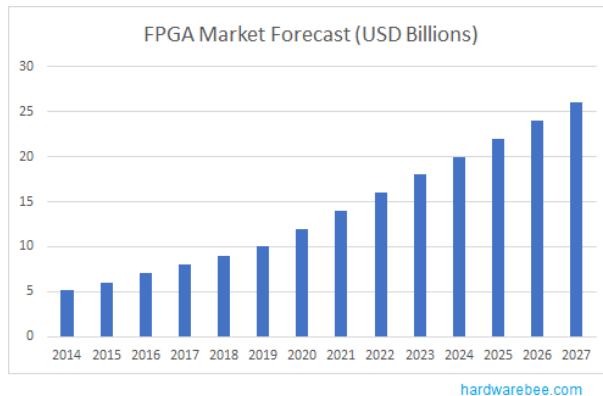
*Abstract: Demand for FPGAs has been growing steadily over the past few years. This is best illustrated by the fact that the FPGA market doubled between 2014 and 2019, growing from \$5 billion to nearly \$10 billion, and is expected to double again by 2024. As a result, the demand for the use of support software during the development process has also increased. A basic task during development is to create test and constraint files, for which configuration and generation programs can be used effectively. Such applications also help in education. The study deals with a test and constraint file generator developed for FPGAs and involves examining the use of the software in education. Keywords: FPGA, test file, constraint file, software, education*

*Keywords: FPGA, test file, constraint file, software, education*

---

# 1 Bevezetés

Tapasztalataink szerint a mérnök hallgatók közül meglepően kevesen találkoznak FPGA programozással, pedig az iparban nagy kereslet van FPGA programozókra, hiszen az FPGA-k iránti kereslet folyamatosan növekszik. Az FPGA-k piaca 2014 és 2019 között megduplázódott, 5 milliárd USD-ről közel 10 milliárd USD-re nőtt, továbbá ez az érték 2024-re várhatóan eléri a 20 milliárd amerikai dollárt [1].



Ábra 1

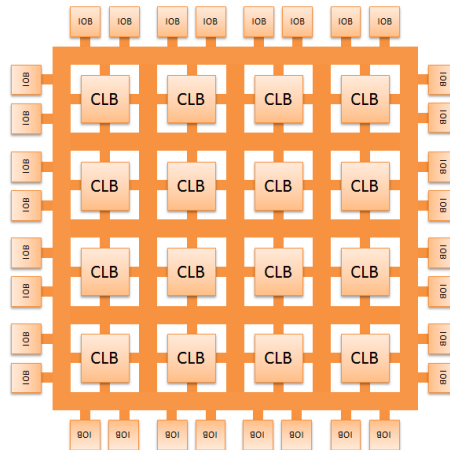
FPGA piac becsült növekedése 2014 és 2027 között<sup>1</sup>

De mi is az az FPGA? Olyan integrált áramkör, amely programozható logikai blokkokból és újra konfigurálható összeköttetésekből áll. Az általános logikai blokkok két fő részből állnak, az úgynevezett LUT-ból, mely segítségével kombinációs hálózatot tudunk létrehozni és Flip-Flopokból, mely szekvenciális hálózat realizálásában vesz részt. Az FPGA többfajta dedikált blokkokat is tartalmazhat, például input-, output blokkokat a külvilággal való kommunikációhoz, memória blokkokat adatok tárolásához, hardveres szorzó blokkokat, memóriavezérlőt külső memória illesztéséhez és analóg digitális átalakítókat is. Ezeket a blokkokat kapcsolja össze az újrakonfigurálható huzalozás [2].

---

<sup>1</sup>Forrás: <https://hardwarebee.com/fpga-market-forecast-2014-2027/>

Letöltés dátuma: 2020.11.15.



Ábra 2  
FPGA elvi felépítése<sup>2</sup>

A konfigurálást úgynevezett hardver leíró nyelvel (HDL) lehet elvégezni. Akkor használunk ilyen megoldást, ha a nagysebességű párhuzamos műveletvégzés különösen fontos és gyorsan változó valós idejű jelekkel dolgozunk. Ilyen például, a digitális jelfeldolgozás, képfeldolgozás, mesterséges neurális hálózatok, hardvertervezés.

Az Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Karán a hallgatók megismerhetik az egyik vezető FPGA gyártó, a Xilinx, fejlesztői környezetét a Vivado Design Suite-et a Nexys 4 fejlesztői board használatával.

A Vivado fejlesztői környezet számos segítséget nyújt az egyszerű és gyors fejlesztéshez. A megírt programunk működését szimulálni tudjuk még mielőtt a hardveren kipróbálnánk. Ehhez szükséges egy úgynevezett tesztfájl készítése, melyben leírhatjuk a várt bemeneteket. Ha alaposan leteszteltük a programunkat a szimulátorban, akkor jöhet a valós környezetben való munka. A programunk be- és kimeneti vektorjainak hozzárendelése az FPGA lábaihoz egy úgynevezett kényszerfájlban történik. Ez a kényszerfájl formátum gyártótól függ. A mi esetünkben a Xilinx saját kényszerfájl formátumát használjuk.

Ez a két fájl nagyrészen ismétlődő és előre meghatározott elemeket tartalmaz. Ezek megírása monoton, hosszadalmas és könnyen hibázhatunk bennük, de automatikus generálásuk könnyen megvalósítható. Számos ilyen programot

---

<sup>2</sup>Forrás: [http://moodle.autolab.uni-pannon.hu/Mecha\\_tananyag/autoipari\\_beagyazott\\_rendszerek/images/1000020100000243000023D37AC7087.png](http://moodle.autolab.uni-pannon.hu/Mecha_tananyag/autoipari_beagyazott_rendszerek/images/1000020100000243000023D37AC7087.png) Letöltés dátuma: 2020.11.15.

találhatunk, böngészőből futtatható vagy letölthető formában, de használatuk során gyakran problémákba ütközhetünk.

Körbe kérdeztünk hallgatótársaink között<sup>3</sup> és a megkérdezettek közül, a túlnyomó többség, 93% használ valamilyen kód generáló alkalmazást, legyen az webes felületen használható vagy letöltött programként futtatható. Jelentős részüknek, 43%-uknak volt valamilyen problémája a generált kóddal, például hibás a kód vagy nem támogat bizonyos funkciókat. A kódgenerátorok elérhetőségéről is sokan panaszkodtak, a megkérdezettek 33%-a által használt szoftver nem érhető el többé.

## **2 FPGA\_Tools fejlesztése és bemutatása**

### **2.1 Python nyelv**

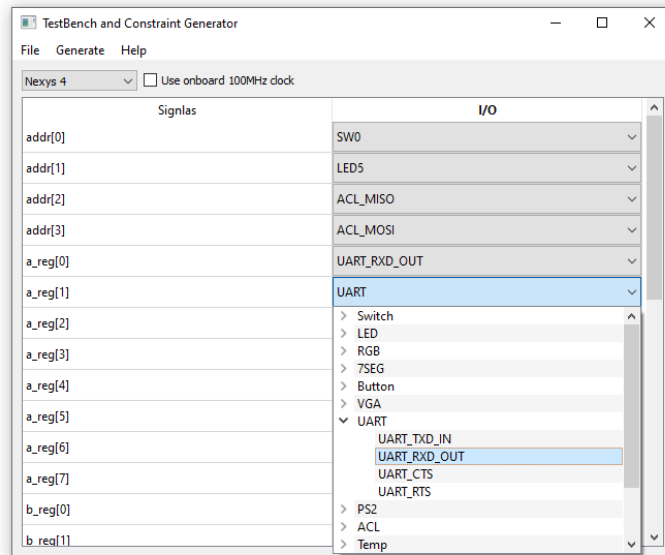
Napjainkban a Python az egyik legkedveltebb nyelvnek mondható. Két független programnyelv-népszerűség elemző weboldal mérései is alátámasztják ezt [3] [4]. A nyelv népszerűsége főként abban rejlik, hogy könnyen átlátható, egyszerű megtanulni és szinte minden területen alkalmazható, legyen az akár beágyazott környezet, mesterséges intelligencia, szervezeti folyamat automatizálás, vagy big data elemzés. Ennek következtében, számtalan közösség által készített könyvtár és oktatóanyag található meg az interneten, melyek segítségével bárki könnyedén megismerkedhet a programnyelvvvel. A [profession.hu](http://profession.hu) szoftverfejlesztői álláshirdetése nagy részében szükséges ismeretként tüntetik fel a Python nyelvet. A nagy igény miatt az egyetemeken is oktatási anyag részét képezi a nyelv, köztük a karunkon is nagy népszerűségnek örvendenek a nyelvvel kapcsolatos tárgyak. Az említett okok miatt, erre a nyelvre esett a választás.

### **2.2 Az alkalmazás működése és funkciói**

A szoftver tervezése és fejlesztése során arra törekedtünk, hogy egyszerű és könnyen átlátható legyen a felhasználói felülete. Mivel elsősorban oktatási célból készült a program, ezért az internetkapcsolat nélküli számítógépes alkalmazást választottuk, mert az egyetemi órákon számonkérés során nincs lehetőség internet használatára és így webszervert sem kell fenntartani az üzemeltetéséhez.

---

<sup>3</sup> A hallgatókat online kérdőívben kérdeztük meg.



Ábra 3

Az FPGA\_Tools alkalmazás működés közben

A szoftver egyik fő funkciója a tesztpad generálás, amelyhez először be kell tallózni a VHDL forrásfájlt. Ezt a File menüpont alatt, a Browse gombra kattintva az aktuális operációs rendszer fájlkezelőjének segítségével lehet megtenni. A választott fájl tallózása után, megjelenik a szoftverben az összes jel az adott modul portlistájából (3. ábra), melynek csak a kényszer generálásakor lesz szerepe. A generálást a Generate menüpont alatti TestBench gombbal lehet elvégezni és menteni a kívánt helyre. A generátor importálja a szükséges könyvtárakat, elkészíti az architektúrát, amelyben felsorolja a forrásfájlból kinyert portokat, létrehozza a lokális jeleket és elvégzi a portok, belső jelekhez való hozzárendelését, amelyek együttesen adják a tesztpad vázát.

A másik funkciója pedig, a kényszerfájl generálás. Lehetőség van a forrásfájl minden egyes jeléhez egy funkciót választani az adott fejlesztői panelhez tartozó funkciólistából, amelyek csoportba rendezve jelennek meg, segítve a felhasználót a navigálásban. A fejlesztőpanelek között a szoftver bal felső sarkában van lehetőség a váltásra, az ábrán a Nexys 4-es panel van kiválasztva. Egyelőre a szoftver csak az órán használt fejlesztőpaneleket támogatja, de lehetőség van saját funkció lista és lábkiosztás hozzáadására JSON file formájában, a szoftver projekt GitHub oldalán<sup>4</sup> leírt formátumban. Ha megfelelően lett hozzáadva a lista, akkor

<sup>4</sup> [https://github.com/Fint0r/FPGA\\_Tools#custom-port-list-format](https://github.com/Fint0r/FPGA_Tools#custom-port-list-format)

megjelenik a panelválasztóban. A megfelelő funkciók kiválasztása után a Generate menüpont alatt a Constraint gombbal lehet generálni és menteni a kényszerfájlt, a Vivado fejlesztői környezet által támogatott XDC fájlként.

## 2.3 Folyamatos fejlesztés, elérhetőség biztosítása

Manapság nagyon népszerű a nyílt forráskódú szoftvercsomagok készítése az ilyen jellegű fejlesztéstámogató programok körében, mert költséghatékony, könnyű terjeszteni és a közösség tagjai is bevonhatók a fejlesztésbe. Az egyik legismertebb forráskódmegosztó weboldal a GitHub, amely, a szoftverfejlesztésben leggyakrabban használt verziókezelőhöz, a Git-hez készült. A célunk elsősorban az volt, hogy bárki számára elérhető szoftvert készítsünk, ezért választottuk a legnépszerűbb programkód megosztó weboldalt, melynek segítségével bonyolítottuk le a probléma bejelentések kezelését, illetve a fejlesztők közötti együttműködést.

A szoftver elérhető a PyPI weboldalán<sup>5</sup> is, mint könyvtár, erre azért volt szükség, mert a program MIT licenccel van ellátva, mint nyílt forráskódú szoftver, ezért futtatható állomány generálása esetén az operációs rendszer letilthatja, mint nem biztonságos forrásból származó alkalmazás. Ezért, ha PyPI weboldaláról (pip-en keresztül) történik a letöltés, akkor natívan futtatható python-nal, így azok is tudják használni, akiknek az operációs rendszere letiltotta a futtatást.

## 3 FPGA\_Tools szerepe az oktatásban

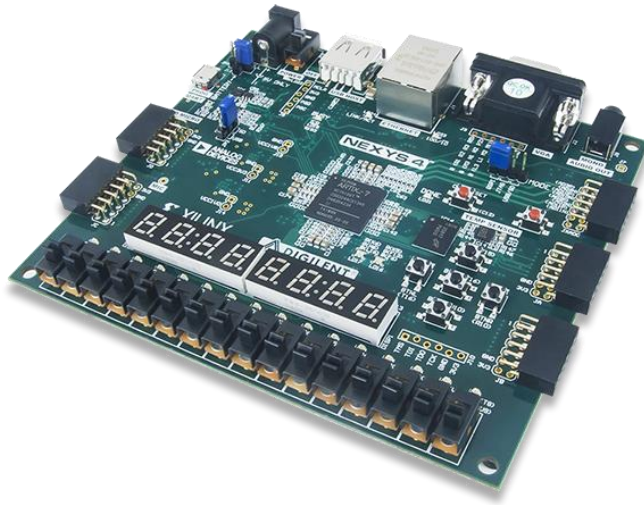
### 3.1 FPGA oktatás

A Kandó Kálmán Villamosmérnöki Karon a Műszertechnikai és Automatizálási Intézetben 2006. óta folyik FPGA oktatás az Automatizált gyártórendszerek II. laboratórium és az Információs rendszerek előadás keretein belül<sup>6</sup>. A hallgatók az Automatizált gyártórendszerek laboratóriumi gyakorlatok alatt megismerhetnek a hardverleírás alapjaival, a fejlesztés lépéseivel. Az Automatizált gyártórendszerek II. labor folytatásaként, a hallgatók az Információs rendszerek tárgy keretein belül mélyíthetik el ismereteiket az FPGA-k világában. Ezek a tantárgyak 6. és 7. félévben kerülnek meghirdetésre specializálódott hallgatók részére. Az oktatás során a fejlesztés VHDL nyelven folyik Xilinx Vivado környezetet és Nexys 4 Artix-7 FPGA Trainer Board-ot használva (4. ábra).

---

<sup>5</sup><https://pypi.org/project/fpgatools/>

<sup>6</sup>A hallgatók az említett két tantárgy mellett még Digitális technikából, Beágyazott rendszerekből és Jelfeldolgozásból is találkozhatnak FPGA alapokkal.



Ábra 4  
Nexys 4 Artix-7 FPGA Trainer Board<sup>7</sup>

Az oktatás gyakorlat-orientált, az egyes témakörök alkalmazásokkal, példákkal kerülnek ismertetésre. A tantárgyakon tárgyalt főbb témakörök a következők:

- FPGA felépítése, alkalmazási területei
- Korszerű FPGA architektúrák
- Bevezetés a hardverleírásba
- VHDL nyelvi elemek, HDL modellezési szintek
- Xilinx Vivado fejlesztői környezet megismerése
- Kombinációs és logikai hálózatok megvalósítása
- FPGA programozása
- XDC file szerkesztése
- Tesztfile készítése
- ChipScope Pro virtuális műszerek használata
- IP-k felhasználása, készítése
- SoC, PSoC megoldások
- MicroBlaze alapú rendszer tervezése és fejlesztése

---

<sup>7</sup> Forrás: [https://th.bing.com/th/id/OIP.OBsoSyB\\_d4oqK6QUHWdraAHaGA?pid=Api&rs=1](https://th.bing.com/th/id/OIP.OBsoSyB_d4oqK6QUHWdraAHaGA?pid=Api&rs=1) Letöltés dátuma: 2020.11.08.

## 3.2 Hallgatók által gyakran elkövetett hibák FPGA fejlesztés során

A gyakorlat-orientált oktatás célja, hogy a hallgatók az oktató által ismertett példákat megértsék és kipróbálják, de emellett kiemelten hangsúlyos az önálló munkavégzés. Mind a mintapéldák másolása, mind az önálló kódolás magában hordozza a hibázás lehetőségét. Ezek a hibák főként figyelmetlenségből és/vagy gépelésből adódnak; feltételezve, hogy a kellő ismeretekkel rendelkezik a hallgató. Ennek tükrében, elkülöníthetők a kellő ismeret hiányából adódó hibák is.

Ha a hallgató nem rendelkezik elég gyakorlattal a hibakeresésben, akkor azokat nagy valószínűséggel nem fogja megtalálni és nem tudja önállóan kijavítani. Ilyenkor két eset fordul elő tipikusan. Az egyik eset az, mikor a hallgató ezt nem jelzi és emiatt lemaradt, nem tud tovább haladni, ez a rosszabb változat. A másik eset, amikor szól, az oktató segítségét kéri. Ha tanórán túl sok hallgatónak kell segíteni, akkor az óra folytonossága sérülhet.

A továbbiakban az FPGA fejlesztés során, tesztfile és kényszerfile készítésekor, elkövetett figyelmetlenségből/elgépelésből adódó hibák kerülnek ismertetésre az oktatási tapasztalatok alapján. A példák az oktatás során használt környezetre vonatkoznak.

### 3.2.1 Tesztfileok készítése során elkövetett gyakori hibák

Az elkészített kódok tesztelésére általában nem a fizikai eszközön kerül sor, hanem tesztfájlokat készítenek a hallgatók. A tesztfájlok segítségével és a fejlesztői környezet szimulációs eszközét használva lehetőség nyílik az elkészített modulok viselkedési szimulációjára. A hallgatók által elkövetett gyakori hibák ismertetése szintaktikailag helyes kódrészleteken kerülnek bemutatásra.

A hallgatók által tipikusan elkövetett hibák első csoportja a tesztfájlból használt objektumok deklarációjához [5] köthető. Az 5. ábrán látható egy példa jel objektumok deklarációjára, vörös számokkal jelölve a kritikus részeket.

```
7 |  
8 | architecture Behavioral of adder_tb is  
9 |     signal A B_tb      : STD_LOGIC_VECTOR (1 downto 0);  
10 | 4. signal C_in_tb     : STD_LOGIC; 5.  
11 | signal C_out_tb      : STD_LOGIC; 3.  
12 | signal S_tb          : STD_LOGIC;  
13 |
```

Ábra 5

Gyakori hibák az objektumok deklarációjában

Az objektumok deklarációja esetén először az objektumot kell megadni, ezt követően egy azonosítót hozzá, majd kettőspontot követően a típust, végezetül opcionálisan egy kifejezés, kezdőérték is rendelhető hozzá, de tesztfájl esetén ezt



ritkábban alkalmazzuk. Az 1. számmal jelölt hiba arra utal, hogy a hallgatók a kettőspont után gyakran megadnak egy speciális módosítót, azaz az irányát a jelnek (in, out, inout, buffer, linkage), melyre itt nem, hogy nincs szükség, de szintaktikailag sem helyes. A 2. jelölt rész azt mutatja, hogy abban az esetben, ha vektorokkal, bitfüzérékkel dolgozunk, gyakran elmarad a bitszám megadása vagy a méret nem egyezik. A 3. jelölés a sorok végét lezáró pontos vessző elhagyására utal. A 4. tipikus hibafaktor az objektum nevének leghagyása. Az 5. jelölés pedig arra utal, hogy a kötelező kettőspont is sokszor lemaradt a deklarációból. Összeségében elmondható a jelek deklarációjáról az is, hogy az architektúra deklarációs részében kell megadni, azaz a *begin* kulcsszó elé kell kerülnie, gyakran szokott ezzel is probléma lenni, hogy nem elé, hanem mögé írják a hallgatók.

A hallgatók által elkövetett tipikus hibák második csoportja a tesztelni kívánt *komponens deklarációjához* [5] köthető. A komponens (*component*) egy entitás-architektúra párt reprezentál. Egy komponenst a példányosítás előtt deklarálni kell. Az előzőekben ismertetettekhez hasonlóan az architektúra *begin* előtti részében. Az ezzel kapcsolatos tipikus hibák és helyeik a 6. ábrán láthatók, szintén vörös számokkal jelölve.

```

14 component adder is
15     Port ( A_B : in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
16           C_in  : in STD_LOGIC;
17           C_out : out STD_LOGIC;
18           S    : out STD_LOGIC
19     );
20 end component;
21
22 begin

```

The image shows a code snippet for a component declaration in VHDL. The code is as follows:

```

14 component adder is
15     Port ( A_B : in STD_LOGIC_VECTOR(1 downto 0);
16           C_in  : in STD_LOGIC;
17           C_out : out STD_LOGIC;
18           S    : out STD_LOGIC
19     );
20 end component;
21
22 begin

```

Annotations (1-8) point to specific errors in the code:

- 1. Points to the opening 'component' keyword.
- 2. Points to the colon after 'A\_B' in the port list.
- 3. Points to the missing semicolon at the end of the port list.
- 4. Points to the missing semicolon after the closing parenthesis of the port list.
- 5. Points to the missing semicolon after the closing parenthesis of the component declaration.
- 6. Points to the missing semicolon after the closing parenthesis of the component declaration.
- 7. Points to the missing semicolon after the closing parenthesis of the component declaration.
- 8. Points to the missing semicolon after the closing parenthesis of the component declaration.

Ábra 6

Gyakori hibák a komponens deklarációjában

A hallgatók a komponens deklarálásakor a *component* és az *end component* (1.) részt gyakran leghagyják, vagy valamilyen más kulcsszót írnak helyette. A komponens deklarációja során meg kell adni a komponens generic listáját, ha van, és a port listáját. Gyakran előfordul, hogy a két listában szereplő elemek közül valamelyik kimarad a felsorolásból vagy az azonosítója elírásra kerül, ezt 2.-vel került jelzésre. A 3. jelölés mutatja, hogy a listaelemek pontosvesszővel kerülnek elválasztásra egymástól, de a 4. helynél látszik, hogy az utolsó elem után már nincs pontosvessző. Itt tipikusan vagy leghagynak pontosvesszőt a hallgatók, vagy helyette vesszőt írnak, de előfordul, hogy az utolsó listaelem után is kiteszik azt. Ezek mindegyike szintén szintaktikailag helytelen. Az gömbölyű zárójel között megadott listákat is pontosvesszővel kell zárni, mely elhagyása szintén tipikus hibának tekinthető, ezt jelzi az 5. sorszám. Az objektumok deklarációjával

ellentétben, a port listában szükség van a jelek módosítóinak (6.) helyes megadására. Ezek elhagyása vagy elírása szintaktikai hibát okoz. A 7. hiba pedig hasonló az objektum deklarációnál elkövetett hibáknál ismertetett 2. számmal jelölve. Kiemelhető még a 8. eset, amikor a komponens nevének helytelen megadása történik.

A deklarációs rész után, már lehetséges a komponens *példányosítása* [5]. A példányosítás során elkövetett tipikus hibákat a 7. ábra mutatja. A példányosítást az architektúra definíciós részében kell megtenni, azaz a *begin* (1.) utáni részben.

```
22 begin
23
24 add: adder port map (
25     A_B => A_B_tb,
26     C_in => C_in_tb,
27     C_out => C_out_tb,
28     S => S_tb,
29 );
```

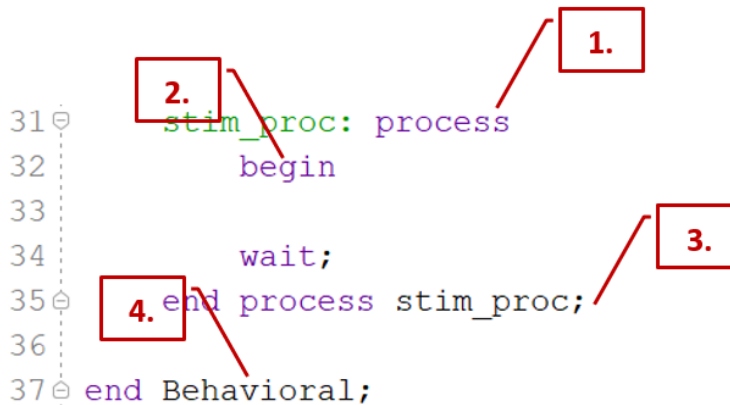
Ábra 7

Gyakori hibák a komponens példányosítása során

Itt ugyanúgy előfordul, hogy a komponens nevét (2.) elírja a hallgató. A 3., 4. és 6. jelölések vesző hibákra utalnak. A port map-ben minden sor végén vesszőnek (3.) kell lennie, kivéve az utolsó soránál (4.). A port map gömbölyű zárójel között kerül megadásra és a legvégét pontosvessző (6.) zárja le, mely szintén el szokott maradni. Az 5. jelölés arra utal, hogy a megfeleltetés során a => kitétel esetén vagy leghagyják a hallgatók a =, > valamelyikét, vagy hibásan <=> használják. Természetesen itt előfordulhat még az is, hogy rossz jelekre végzik a megfeleltetést vagy kimarad valami a sorból.

A negyedik kiemelt rész a tesztfájlból a *stimulációs process* [5], mellyel a szimulációs eseteket szokás előállítani, ez a 8. ábrán látható.

```
31 ⊖ stim_proc: process
32     begin
33
34     wait;
35 ⊖ 4. end process stim_proc;
36
37 ⊖ end Behavioral;
```



Ábra 8

Gyakori hibák a stimulációs process-ben

Tipikus hiba a process (1.) kezdeti sorának végére felesleges vessző betételen, ugyanakkor gyakran elmarad vagy hibás a lezáró sor (3.). Kifejtve, a pontosvessző, az end process rész le szokott maradni vagy a végén a címke elírásra kerül. Előfordul az is, hogy az architektúra lezáró sora (4.) elé kerül véletlenül a process, mely szintén szintaktikai hibát eredményez.

Az előbbieken ismertetett tipikus esetekből és példákból látszik, hogy még egy ilyen egyszerű tesztfile készítése során is rengeteg hibát el tudnak követni a hallgatók figyelmetlenségből, rossz gépelésből, másolásból adódóan.

### 3.2.2 Kényszerfileok készítése során elkövetett gyakori hibák

A kényszerfájlok elkészítésére a FPGA eszközök fizikai programozásához van szükségünk. A 9. ábrán a Nexys4 FPGA fejlesztői panelhez hozzáférhető kényszerfile sablon részlete látható. Ezt szerkesztve tudjuk az elkészített hálózathoz tartozó kényszereket megadni. Az ábrán látható, hogy egy 721 soros szöveges file-ról beszélünk. Ennek a szerkesztése a nagy méretéből adódóan is hordoz magában hibalehetőséget.

```

6: ## Clock signal
7: ##Bank = 35, Pin name = IO_L12P_T1_MRCC_35, Sch name = CLK100MHZ
8: #set_property PACKAGE_PIN E3 [get_ports clk]
9: #set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports clk]
10: #create_clock -add -name sys_clk_pin -period 10.00 -waveform {0 5} [get_ports clk]
11:
12: ## Switches
13: ##Bank = 34, Pin name = IO_L21P_T3_DQS_34, Sch name = SW0
14: #set_property PACKAGE_PIN U9 [get_ports {sw[0]}]
15: #set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {sw[0]}]
16: ##Bank = 34, Pin name = IO_25_34, Sch name = SW1
17: #set_property PACKAGE_PIN U8 [get_ports {sw[1]}]
18: #set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {sw[1]}]
19: ##Bank = 34, Pin name = IO_L23P_T3_34, Sch name = SW2
20: #set_property PACKAGE_PIN R7 [get_ports {sw[2]}]
21: #set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {sw[2]}]
22: ##Bank = 34, Pin name = IO_L19P_T3_34, Sch name = SW3
23: #set_property PACKAGE_PIN R6 [get_ports {sw[3]}]
24: #set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {sw[3]}]
...
716: ##Bank = 14, Pin name = IO_L10P_T1_D14_14, Sch name = CRAM_A21
717: #set_property PACKAGE_PIN M16 [get_ports {MemAdr[21]}]
718: #set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {MemAdr[21]}]
719: ##Bank = 14, Pin name = IO_L23N_T3_A02_D18_14, Sch name = CRAM_A22
720: #set_property PACKAGE_PIN U13 [get_ports {MemAdr[22]}]
721: #set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {MemAdr[22]}]

```

Ábra 9

Nexys4 kényszerfájl sablon

A 10. ábrán láthatók a *kényszerfájlokhoz* [6] tartozó tipikus hibák jelölései egy helyesen elkészített kódrészleten. Egy ilyen kényszerfájlhoz úgy lehet hozzáférni, hogy egyik sora sem aktív, mindegyik kommentként szerepel. A szerkesztéshez a megfelelő sorok előtt ki kell venni a #-et, majd az elnevezéseket kell testre szabni.

```

1: ## Switches
2: ##Bank = 34, Pin name = IO_L21P_T3_DQS_34, Sch name = SW0
3: #set_property PACKAGE_PIN U9 [get_ports {A_B[0]}]
4: #set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {A_B[0]}]
5: ##Bank = 34, Pin name = IO_25_34, Sch name = SW1
6: #set_property PACKAGE_PIN U8 [get_ports A_B[1]]
7: #set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports A_B[1]]
8: ##Bank = 34, Pin name = IO_L23P_T3_34, Sch name = SW2
9: #set_property PACKAGE_PIN R7 [get_ports C_in]
10: #set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports C_in]
11: ## LEDs
12: ##Bank = 34, Pin name = IO_L24N_T3_34, Sch name = LED0
13: #set_property PACKAGE_PIN T8 [get_ports S]
14: #set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports S]
15: ##Bank = 34, Pin name = IO_L21N_T3_DQS_34, Sch name = LED1
16: #set_property PACKAGE_PIN V9 [get_ports C_out]
17: #set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports C_out]

```

Ábra 10

Gyakori hibák a kényszerfájlban

Tipikus hibák között szerepel, ha a hallgató nem megfelelő sor előtt (1.) veszi ki a #-et vagy nem veszi azt ki (2., 3.). További hibák, a `get_ports` (4.) kitörlése, a `{}` pár (5.) egyik felének a törlése és a `[]` pár (8.) egyik vagy mindkettő felének az eltávolítása. Gyakran előforduló hiba még a jelek nevének elírása (7.) vagy azonos megadása (itt számít a kis- és nagybetű), illetve vektorok, bitfüzerek (6.)

esetén a megfelelő elem jelölése. Mindezek mellett, előfordulnak még olyan esetek, amikor a hallgató nem használt PIN-eket is aktívra tesz, vagy korábbi felhasználásból adódóan nem veszi azt észre. Sajnos előfordulnak olyan problémák is, mikor összekeverednek a PIN-ek megadásai és például egy kapcsolóra szánt jel egy LED PIN-re kerül, amely a működésben okozhat rendellenességeket.

Látszik, hogy itt, a kényszerfile-ok esetén is rengeteg lehetőség van hibákat elkövetni. Még így is, hogy egy előre elkészített sablont kell szerkeszteni. Abban az esetben, ha a hallgatóknak a sablon nélkül kéne dolgozniuk és önállóan megírni a kényszerfile tartalmát, még több hibalehetőség kerülne elő.

### **3.3 FPGA\_Tools használata oktatói szemmel**

A generátor programok és szoftverek használata nem egy újkeletű dolog fejlesztések során és ez igaz az oktatásra is. Emellett, az ipari tapasztalatok azt mutatják, hogy egyre gyakoribb a felhasználásuk. Oktatás folyamán, mikrokontroller programozással kapcsolatos tantárgyak esetén előfordul a kód-konfigurátor és generátor szoftverek használata, mi is alkalmazzuk.

Ilyen szoftverek esetén gyakran felmerül a kérdés, hogy mikor és milyen célzattal alkalmazzuk ezeket. Három esetet emelnénk ki. Az egyik eset az, amikor a hallgató nem rendelkezik kellő tudással vagy megfelelő gyakorlattal az adott feladat területén. Ekkor demonstrációs célzattal és a gyors sikerélmény elérése miatt hasznos lehet ilyen generátor szoftverek használata. A másik eset, amikor a hallgató birtokában van a feladat elkészítéséhez szükséges ismeretanyag és kellő rutinnal is rendelkezik benne. Ilyenkor, egy generátor szoftver alkalmazása nagyban gyorsítja és hatékonyabbá teszi a munkát. A harmadik eset az, amikor ezeket a szoftvereket a hallgató ellenőrzésre tudja használni.

Oktatói szemmel, mindhárom esetben hasznos lehet egy ilyen szoftver. Hozzá kell tenni azt is, hogy a korábban felsorolt, a hallgatók által gyakran elkövetett hibák az FPGA fejlesztés során az FPGA\_Tools szoftver használatával megszüntethetők, de legalábbis minimálisra csökkenthetők. Minél kevesebb hallgatók által elkövetett hibát kell az oktátónak megtalálnia és kijavítania, annál gördülékenyebben, hatékonyabban lehet tartani egy órát. Emellett meg kell jegyezni azt is, hogy ez nem azt jelenti, hogy a hallgatóknak nem kell képesnek lenniük önállóan, generátor program használata nélkül, tesztfájlt és kényszerfájlt készíteniük.

## Konklúzió

Az FPGA\_Tools program az Információs rendszerek előadás, hetedik féléves tantárgy, keretén belül alkalmazásra került, teszt- és kényszerfájl generálására is. A hallgatói visszajelzések és az oktatói tapasztalatok alapján bebizonyosodott, hogy a szoftver használata nagymértékben lecsökkenti az elkövetett hibák számát, és az ilyen fájlok létrehozásához szükséges időt. Mindezeket figyelembe véve, az alkalmazást tervezzük az elkövetkezendő félévek során az FPGA oktatás részeként bevezetni. Az FPGA\_Tools fejlesztése folyamatosan zajlik, melyek során az egyetemről és az egyetemen kívülről érkező javaslatokat, észrevételeket is igyekszünk figyelembe venni.

## Referenciák

- [1] FPGA Market Forecast 2014-2027 <https://hardwarebee.com/fpga-market-forecast-2014-2027/> (2020.09.15.)
- [2] Karen Parnell, Nick Mehta: Programmable Logic Design Quick Start Handbook. Xilinx, Inc.: 2004
- [3] Popularity of Programming Language <https://pypl.github.io/PYPL.html> (2020.11.17.)
- [4] TIOBE Index for December 2020 <https://www.tiobe.com/tiobe-index/> (2020.12.01.)
- [5] IEEE Std 1076 IEEE Standard VHDL Language Reference Manual 2000 <https://edg.uchicago.edu/~tang/VHDLref.pdf> (2020.10.15.)
- [6] Xilinx: Vivado Design Suite - User Guide Using Constraints 2018 [https://www.xilinx.com/support/documentation/sw\\_manuals/xilinx2018\\_1/ug903-vivado-using-constraints.pdf](https://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx2018_1/ug903-vivado-using-constraints.pdf) (2020.11.17.)

# A szilícium alapú napelem menthet meg a kihalástól?

**Ritter Csaba<sup>1</sup>, Kecskeméti Zsombor<sup>2</sup>, Varga Zoltán<sup>3,4</sup>, Dr. Rácz Ervin<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnök Kar (villamosmérnök B.Sc. hallgató), Villamosenergetikai Intézet, 1034 Budapest, Bécsi út 96/A, [rittcsabi@gmail.com](mailto:rittcsabi@gmail.com)

<sup>2</sup> Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnök Kar (villamosmérnök B.Sc. hallgató), Villamosenergetikai Intézet, 1034 Budapest, Bécsi út 96/A, [zsomborkecskemeti@gmail.com](mailto:zsomborkecskemeti@gmail.com)

<sup>3</sup> Óbudai Egyetem, Alkalmazott Informatika és Alkalmazott Matematika Doktori Iskola (PhD hallgató) 1034 Budapest, Bécsi út 96/B, [varga.zoltan@uni-obuda.hu](mailto:varga.zoltan@uni-obuda.hu)

<sup>4</sup> Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Villamosenergetikai Intézet, 1034 Budapest, Bécsi út 96/A, [varga.zoltan@uni-obuda.hu](mailto:varga.zoltan@uni-obuda.hu)

<sup>5</sup> Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Villamosenergetikai Intézet, 1034 Budapest, Bécsi út 96/A, [racz.ervin@uni-obuda.hu](mailto:racz.ervin@uni-obuda.hu)

---

*A XXI. században a környezetvédelem az egyik legfontosabb téma, amely a Földünket foglalkoztatja. A tiszta energia az, ami akár a bolygónk jövőjét is jelentheti. A földben található szén, olaj és a földgáz alapú fosszilis tüzelőanyagok nem tudják a végtelenségig ellátni a bolygónkat villamosenergiával, ezért ennek a kiküszöbölésén dolgoztak a kutatók és mérnökök évtizedeken át, amíg végül felfedezték, hogyan tudják a naptól jövő energiát villamos energiatermelésre fordítani. Napjainkban a leggyorsabban fejlődő és bővülő energiatermelő egységek a napelem panelek. Ezek a működésük közben nem, vagy kevésbé bocsátanak ki káros anyagot. Ilyen mértékű káros anyag kibocsátás csupán a tisztán tartása által keletkezhet. A több évtizedes hatékony termeléshez elengedhetetlen a panelek karbantartása, tisztítása. Tudományos munkánkban részletesen bemutatjuk a szilícium alapú napelemek készítését [1], és az élettartamuk utáni újrahasznosítását. Szó fog esni az újrahasznosítás fontosságáról és fajtáiról is [2]. Az elhasznált napelem veszélyes hulladéknak minősül, amely rossz helyen, illetve kezében súlyosan szennyezheti a környezetünket [2]. Cikkünkben közelebbről ismertetjük a napelemek gyártását és az elhasznált napelem panelek újrahasznosításának folyamatát. Betekintést nyújtunk a napelem panel előállításába és ismertetjük a későbbi amortizációját, a felhasználás utáni folyamatokat.*

*Kulcsszavak: PV; napelem, Si, újrahasznosítás*

---

## 1. Bevezető

A XXI. század rohanó világában egy létfontosságú téma a környezetvédelem. Ezen belül pedig a tiszta energia, amely akár a bolygónk jövőjét is jelentheti. A földben található fosszilis tüzelőanyagok, mint a szén, az olaj és a földgáz nem tudják a végtelenségig ellátni a bolygónkat villamosenergiával, erre lehet megoldás a napelem.

*Cikkünkben bemutatjuk, hogy a napelem (mono- és polikristályos napelem) milyen technológia felhasználásával készül el, illetve életpályája végén milyen újrahasznosítási eljárásokat kell alkalmazni.*

## 2. Napelemek és fajtái

Napjainkban a napelem panel az egyik leggyorsabban fejlődő megújuló alternatív energiatermelő egység. A panelek működésük közben nem, vagy kevésbé bocsátanak ki káros anyagot. Ilyen káros anyag kibocsátás a tisztán tartása által keletkezhet. Egy karbantartott napelem – a gyártástechnológiájától függően - akár több évtizedig is kitűnően tud működni, mindössze pár százalékot veszíthet hatékonyságából. Mint legnépszerűbb zöldenergia típus, a naptól a Földre körülbelül 174 petawatt energia érkezik, amely azt jelenti, hogy egy a Földre jutó egy óra napsugárzás energiája sokkal több, mint azaz energiamennyiség, amit az emberiség egy egész év alatt felhasznál.

A szilícium alapú napelemeket kettő nagy csoportba lehet osztani alapanyag szerinti felosztás esetén:

- kristályos napelem
- vékonyfilm-rétegű napelem fajtákra.

A kristályos szilícium alapú napelem tovább bontható két csoportra:

- monokristályos napelem
- polikristályos napelem.

A legmodernebb, legújabb technológiának a kristályos napelem számít a piacon. Ezek gyártása nagy tisztaságú szilícium cellákból készül, illetve sorba kötve, vízmentesen egy műanyag háttal és egy üveglap közé laminálva kerül elkészítésre. A monokristályos cellák esetén a szilícium egy egész tömbben dermed meg, illetve henger alakúra húzzák ki az anyagot egy elektromos térben. A polikristályos cellákat négyzet alakú tömbökbe öntik és több kristályban dermed meg. Viszonylag könnyű megkülönböztetni a mono- és polikristályos napelemeket



az amorf napelemektől, mert legtöbbször a polikristályos négyzet alakú és a monokristályos nyolcszög alakú cellákban helyezkednek el.

Az említett napelem esetén hordozható napelem kivitel is létezik, amelyet úgy készítenek, hogy a gyártás során egy hajlítható hordozó rétegekre gözölnek fel a félvezető rétegeket. Az említett hajlítható hordozóra rétegre felgőzölt napelemek a vékony rétegű napelemek, amelyek hatásfoka 5-8% közé esik. A hatásfokuk megközelíti a kristályos napelemeket (körülbelül 12%). A vékonyréteg napelemek előnye, hogy háromszor kevesebb hely felületet foglalnak el a mono- és polikristályos napelemes rendszerekhez képest.

### **3. Előállítási folyamatok**

Mind a monokristályos, mind a polikristályos napelemeknek esetén a cellák alkotóeleme szilícium (Si), amit nagy tisztaságú szilícium-dioxidból nyerünk. A napelem cellának, hogy alkalmas legyen az előállításra egy hosszú gyártási folyamaton kell végig mennie. Az előállítás több lépcsős, amelynek a lépései: 1.) Szilícium polikristály (vegytisztá) előállítása 2.) Kristályhúzás 3.) A kristály felületének csiszolása 4.) Szeletelés 5.) Élek lekerekítése 6.) Szeletek simítása 7.) Polírozás 8.) Szeletek tisztítása 9.) Lézeres felülvizsgálás 10.) Epitaxális rétegnövesztés

Az első főbb feladat, hogy a szilícium-dioxidból el kell távolítani az oxigént, amit egy nagy olvasztómedencében, szén hozzáadásával érnek el. Ez a folyamat magas hőmérsékleten történik (kb. 2000 °C), ezután a szén megköti az oxigént és létrejön a CO<sub>2</sub> (szén-dioxid), mint melléktermék. A folyamat végén 99%-os tisztaságú szilíciumot kapunk, amelyet a következő lépésben oxigén-kloriddal oxidálnak, újra tisztítják. Ezáltal ki tudják tisztítani a maradék kalciumot, alumíniumot, bórt, vasat és foszfort. Az említett folyamatok energiaigényesek, ugyanis 300-1100 °C közötti hőmérséklet szükséges ezen kémiai folyamatoknak a lefolyásához. A napelemcella gyártáshoz minimum 6 N, vagyis 99,999999% tisztaságú szilícium szükséges. Következő lépésként a megkapott olvadékot ledarálják egészen apróra, majd újra megolvasztják és egy napelemcellához szükséges tisztaságú és méretű, megfelelő kristályszerkezetű tömböket alakítanak ki. A tömbösítéshez az iparban régóta használatos kiforrított módszert alkalmazzák, a Czochralski-eljárást. Ezen folyamatot Jan Czochralski találta fel, amelynek legfontosabb alkalmazása az egykristályos szilícium nagy hengeres rudjainak a növesztése. Ezen folyamat széleskörben elterjedt, az elektronikai iparban félvezető eszközök gyártásánál is alkalmazzák.

### Szilícium tömbösítése

A monokristályos szilícium alapú napelem esetén a szilícium tömbösítését követően a megkapott szilíciumhengereket gyémántszemcsés huzaloszívó berendezésekkel szögletesítik, majd felszeletelik 160 - 210 mikrométer vastagságú lapkákká.

A polikristályos szilícium alapú napelem esetén egy nagyobb kád formájú kemencében több pontból kiindulva növesztik ki a szilíciumkristályokat. A nagy tömböket ezután 1100 °C-on, - ami alacsonyabb a Czochralski módszernél az alkalmazott hőmérséklet - nagyobb méretben történik a szilícium tömbösítése. Ezután a nagy tömböket, kisebb részekre szeletelik fel, viszont a vágási vonalak nem esnek egybe a kristályok széleivel. Az így kapott szilíciumlapkákon akár több szilíciumkristály kisebb” darabjai” is megtalálhatók. Ezek felhasználásával készül el a polikristályos napelemcellák. A megmaradt polikristályos lapkákon, teljesen jól kivehetőek a kristályok közötti határvonalak.

## 4. A napelemek utóélete

A napelemek a változó időjárási körülményeire jól bírják. Ez többnyire a gyártástechnológiának köszönhető, illetve a napelemek anyagainak úgy, mint alumínium, edzett üveg. További előnye, hogy nem tartalmaznak forgó, kopó alkatrészeket, amik az elhasználódásában időben előrevinnék. A megfelelő telepítés és üzemeltetés esetén a degradációjuk minimális. Az esetek egy bizonyos részében előfordulhat, hogy külső beavatkozás által rongálódik meg egy panel az élettartama lejárta előtt. Ilyen speciális esetek a balesetek, illetve a természeti katasztrófák. Az ilyen megrongálódott darabokat ugyan úgy újra lehet hasznosítani, mint az életciklusa végén járó elemeket, függetlenül attól, hogy milyen sérülés érte őket [7].

Nem kizárt, hogy legyártásuk és üzembehelyezésük után több hiba is kialakulhat a napelem panelekben. Korábbi kutatások kimutatták, hogy a napelemek meghibásodásának 40%-a, összeköthető mikroszkopikus nagyságú repedésekkel, törésekkel és hibákkal. Ezt a magas százalékos arányt próbálták csökkenteni, ezért 2008-ban új, vékony cellás paneleket kezdtek el gyártani.

Mivel a napelemek az elmúlt évtizedekben kezdtek el robbanás szerűen fejlődni, ezért még nem keletkezett számottevő elhasználódó napelem panel. A kutatók a tömeges meghibásodásukat a század közepére jósolják.

A szilícium alapú napelem panelekben olyan nehézfémek találhatóak, amelyek a természetre igen káros hatást gyakorolnak, emiatt az elhasználódott elemeknek kiemelten fontos az újrahasznosítása. Az Európai Unió törvényeket fogalmazott meg az elhasználódott panelekre. Ezen megfogalmazott törvények alapján, az Európai Unió tagállamok 2014-től kiemelten szigorúan veszik a

napelemek begyűjtését és felhasználását. Kötelezővé tették a cégeknek az ingyenes visszavételt és szállítást, akiknek követni kell a WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment Directive) által előírt szabványokat (2012/19/EU).

Ez az első szabályozás, ami kimondja, hogy a napelemek és más elektronikai felszerelések – úgy mint, a telefon, a tablet és az akkumulátor - veszélyes hulladéknak minősülnek és különleges eljárásmodot igényelnek az élettartamuk után.

Továbbá, a jelenlegi Európai WEEE irány csökkenti kívánja a globális klímaváltozást és az ökológiai lábnyomot a napelemek gyártásánál, ami körülbelül 16 kg CO<sub>2</sub> (szén-dioxid) elsődlegesen nem megújuló energiaforrással egyenértékű. Nagyobb mértékben pedig, 1 tonna újrahasznosított szilícium alapú napelem panel képes megtakarítani 800 kg CO<sub>2</sub>-tól egészen 1200 kg CO<sub>2</sub> –ig terjedő intervallumban, abban az esetben, ha az anyag 100%-ban első osztályú összetevőből áll össze.

Ahhoz, hogy ezeket a számokat elő tudják állítani, először is az összes szilícium alapú (monokristályos (c-Si), polikristályos (p-Si), amorf (a-Si) és vékonyrétegű (CIGS, CdTe) paneleket újra kell hasznosítani.

A fentebb említett napelemeket tömören három lépés szerint lehet újrahasznosítani:

- 1. Mechanikai, kémiai vagy hőkezeléses eltávolítással szétbontjuk a paneleket*
- 2. Kémiai bevonatot eltávolítjuk a rétegről*
- 3. Kivonjuk a kémiai összetevőket.*

Ezek a fázisok a különböző működésen alapuló napelem panelek újrahasznosítására vonatkozik, különösen:

- A mono- és polikristályos napelemek szétbontását pirolízissel végezzük el, hogy visszanyerjük a szilícium darabokat [9].
- A CIGS szolár cellák hő és kémiai kezeléssel megy keresztül, hogy kinyerjék a ritkafémeket (gallium, indium, szelén) és az üveget [9].
- Az amorf napelem cellákat mechanikai kezeléssel bontják darabjaira [9].

Részletezve bemutatásra kerülnek a cégeknél és üzemeknél leginkább elterjedt újrahasznosítási eljárások szilícium és a vékonyréteg alapú napelemek esetén.

## 4.1 Szilícium alapú napelem újrahasznosítása

Ennél az eljárásnál a már korábban összegyűjtött napelemeket, üveg és fém darabjaira bontják szét. A folyamatnál az üveg 95%-át, míg a fém alkatrészeket teljesen be tudják építeni az újrahasznosított cellákba. A fennmaradó összetevőket egy 500°C-ra felhevített kemencébe helyezik el, és addig melegítik, amíg szét nem tudják szedni az összeragasztott elemeket. Ennek a hevítésnek a következményeképpen a kapszulán maradó műanyagok teljesen leolvadnak és a szilícium cellák készen állnak a további munkálatokra, hogy a későbbiekben teljesen formázható legyen. A kifejlesztett technológia lehetővé teszi, hogy az elvált műanyag darabok ne a szemétkosárba kerüljenek, hanem az elvált darabokat a kemence fűtésénél újra tudják használni, ezáltal nem keletkezik számottevő hulladék, ami termeli a környezetet. A hőkezelés után a modulok fizikailag elkülönülnek. Ezeknek a moduloknak a 80%-át újra tudják használni, míg a fennmaradó részt tovább finomítják. A szilícium darabkákat kémiai úton megtisztítják, eltávolítják a felesleges szennyeződések a felületről. A megtisztított darabokat ismét a felhevített kemencébe helyezik, ahol megolvassztják őket és új modulokat öntenek. Ennek az eljárásnak az eredményeképpen a szilícium 85%-át újra tudják hasznosítani.

## 4.2 Vékonyréteg alapú napelem újrahasznosítása

Összehasonlítva a kristályos szilícium alapú napelem újrahasznosításával, ez a módszer jóval drasztikusabb és bonyolultabb. Az első lépésben a napelemeket egy szeletelő gépbe helyezik, ahol 4-5 milliméternél kisebb darabokra vágják. Ügyelnek arra, hogy a laminálás tartsa össze a belső alkatrészeket, amit a későbbiekben eltávolítanak. Ellentétben a kristályos szilícium alapú panelekkel, a maradék anyagok szilárd és folyékony halmazállapotból állnak. Annak érdekében, hogy elkülönítsék ezeket egymástól, forgódobos rendszerben a szilárd anyagokat bent tartják, amíg a folyadék a szitán át egy tartályba ki nem folyik.

A folyadékkal teli tartályok ezután egy fertőtlenítő folyamaton mennek keresztül, ami segítségével még jobban megtisztítják a folyadékot a lerakódott szennyeződéstől. Az így kapott folyékony anyagból kivonják az egymástól különböző félvezető testeket. Ezen lépést jelentősen meghatározza az adott üzemi fejlettségi szintje, viszont elmondható, hogy átlagosan a félvezető testek 95%-át újra fel tudják használni a további gyártások során. A szilárd halmazállapotú testek réteganyagokkal vannak szennyezve, amelyek tömege könnyebb, ezért a szennyeződések egy vibráló gép segítségével tudják eltávolítani. Végezetül az elkülönített testek egy öblítésen mennek keresztül, hogy megtisztítsák a lerakódott szennyeződésektől. A végeredmény pedig a tiszta üveg, amit 90%-os arányban tudnak felhasználni az újra gyártás közben [8] [10] [11]. Az újrahasznosító folyamatok mellett sokakban felmerülhet, hogy milyen más előnyökkel jár a környezet szempontjából feltéve, ha van. A megfelelően kidolgozott infrastruktúrának nem szabad gondot okoznia a jövőben ugrásszerűen megnövekedő, újrahasznosításra váró napelemek számára. Ez az amelkedés a gyárak terjeszkedését, új üzemek nyitását jelentheti, ami segít a térség munkaerőhiányának csökkentésében. Nem

csak a fotovillamos újrahasznosítás által megnövekedett munkahelyek száma fog több előnnyel járni, hanem nagyjából 11 milliárd font értékű lesz az újrahasznosított anyagok összértéke 2050-re. Ez lehetővé teszi, hogy 2 milliárd új napelem panelt gyártsanak, anélkül, hogy a Földben lévő nyersanyagokat felhasználják. Továbbá, ez azt is jelenti, hogy képesek leszünk 630 gigawatt villamosenergia termelésére, csak újrahasznosított, korábban már használt napelemből. Ezeket a napelemeket „double green” -nek is nevezik, mivel már egyszer újra lettek építve más, korábban leamortizálódott vagy újrahasznosított napelem panelekből.

## 5. Gazdasági nézet

Gazdasági szempontból nézve a kristályos szilícium alapú (mono- és polikristályos) napelem panelek uralják a napelem piac jelentős részét. Ezek a panelek (c-Si, p-Si) olcsóbb anyagokból állnak össze és az újrahasznosítás költsége jóval magasabb, mint egy hulladéklerakó telepen tárolni, ezzel az újrahasznosításával foglalkozó üzemeket kedvezőtlen gazdasági helyzetbe hozva. Ellentétben a vékony rétegű napelem újrahasznosítása (CIGS, CdTe) garantálja a nagyobb profitot, mert ezek drágább alapanyagokból és alkatrészekből épülnek fel. Az anyag koncentrációjának arányát, az újrahasznosítás mértékét és a nyersanyagok piaci értékét szemlélteti euró/ kilogramm-ban az 1. ábra. (LME árak - 2014. április).

	Anyagok												
	Al	Cd	Cu	Ga	In	Mo	Plas.	Se	Si	Sn	Te	Ü.	Zn
x-Si (%)	17,5		1,0				12,8		2,9			66	
CdTe (%)		0,08	0,03				3,0			0,02	0,07	97	
CIGS (%)			0,01	0,01	0,01	0,12	3,0	0,01				97	0,04
	Újrahasznosítási arány												
(%)	100	98	78	99	75	99	-	80	85	99	80	97	90
	Üzleti ár												
(€/kg)	1,3	1,24	4,8	199	543	19	0,09	42	1,5	16	77	0,1	1,4

1. ábra: A napelem összetevőinek arányai anyag, újrahasznosítási arány és üzleti árra levetítve, ahol Al: alumínium, Cd: kadmium, Cu: réz, Ga: gallium, In: indium, Mo: molybdenum, Plas: műanyag, Se: szelénium, Si: szilícium, Te: Temmurium, Ü.: üveg, Zn: cink.

## 6. Ökológiai lábnyom

Az egyik legfontosabb kérdés, hogy hiába hívjuk megújuló energiának, mekkora is az ökológiai lábnyoma egy fosszilis energiaforráshoz képest. Egy nagy előnye, hogy ezek a rendszerek pozitív hatást gyakorolhatnak a biológiai elvárásoknak mind a növény, mind az állatvilág esetében. Ebből kifolyólag a napelemeket fokozottan védett zöld területeken is telepíthetők, ha a megjelenése semmiféle tekintetben nem változtatja meg az élővilágot.

Ha sorra vesszük a napelem legfőbb alkotóelemeit, meglátjuk mennyire is káros a környezetre, ez a fajta zöldenergia.

**Üveg:** Csökkentet vas tartalmú speciális üveg, amelynek az újra hasznosítása már megoldott.

**Szilícium:** Egy erősen tisztított és kristályosított homok.

**Műanyag:** Rögzíti a szilícium lapokat és a szigetelést, a háttérét adja magának a napelemnek. Gyártástól és gyártótól függ, milyen könnyen dolgozható fel azonban az biztos, hogy egy tűzálló és veszélytelen anyagról van szó.

**Műanyagfólia:** Napelemnek a szigetelésére szolgál, csupán pár grammról van szó panelenként. Ez az anyag szintén gyártótól függően újrahasznosítható.

**Alumínium:** A fémhulladéokra szakosodott feldolgozó helyeken leadható és feldolgozható.

**Réz és Ón:** Újrafeldolgozható rézkábelek, forrasztási pontokon néhány gramm Ón fordul elő, ami minimális mennyiség és mellé veszélytelen is.

## 7. Összefoglalás

A napelem még egy közel sem tökéletes energiaforrás. Hátrányai közé sorolható a jelenlegi ára, de ez a jövőben a napelemes rendszerek árai csökkenni fognak, így még elterjedtebb lehet, mind Magyarországon, mind a világ bármely pontján. Az ára részben az előállítása miatt ennyire költséges, mert a Czochralski eljárás igen magas hő igényel az előállítás közben, így ez rengeteg energia igénybevétellel jár.

Mindemellett, nem mehetünk el szó nélkül a mégtöbb pozitív tulajdonsága mellett sem, mivel 1 m<sup>2</sup> mono- illetve polikristályos napelem 15 éves élettartamot feltételezve 450-500 kg CO<sub>2</sub>-t takarít meg, míg az amorf szilícium napelem csupán 160 kg CO<sub>2</sub> megtakarítására képes a földgáz felhasználásához viszonyítva. A mono- és polikristályos napelemek négyzetmétere így 120-140 gha megtakarítást jelent 15 év alatt, míg az amorf napelem esetén 44 gha-t. Szinte minden éghajlaton

használható, mindenhol más típus a leghatékonyabb és így egy örök energiaforrásból tudunk házakat, épületeket villamos energiával. Előállítás után környezetét egyáltalán nem szennyezi, ellenben ez a fajta zöldenergia szimpla használata, rengeteg CO<sub>2</sub> kibocsátásának megakadályozásához segít minket.

## 8. Irodalomjegyzék

- [1] <https://www.eon.hu/hu/blog/napenergia/napelem-tipusok-melyiket-valasszam.html?fbclid=IwAR09BUASiz9loQ6CAJziMI9q1U9QH3zZLO93tuoP1MvEWYabEVX1UYZuyVY>
- [2] <https://www.mnnsz.hu/napelemek-fajtai/?fbclid=IwAR2wJwP4IvZektfGBTLITob8dhir5HHJm0927LeVMdeAXfWUEPq8W7PoWs>
- [3] <https://www.solarpanel.wiki/category/solar-panels-information/>
- [4] <https://alternativeenergysourcesv.com/best-monocrystalline-solar-panels/>
- [5] <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/czochralski-process>
- [6] <https://www.vgfszaklap.hu/hirek/4518-a-szilicium-utja-a-napelemig>
- [7] <https://www.mvmpartner.hu/hu-HU/Szolgalatasok/Villamos-energia/Erdekesegek/Amegujuloenergiaforrasokosszehasonlitasakulonbozorgiaatalakitokeletciklusanakkornyezetihatasiszerint>
- [8] <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2017/10/the-opportunities-of-solar-panel-recycling>
- [9] Federica Cucchiella, Idiano D' Adamo, Paolo Rosa: *End-of-Life of used photovoltaic modules*, A financial analysis Renewable and Sustainable Energy Reviews 47 (2015)
- [10] Yan Xu , Jinhui Li , Quanyin Tan , Anesia Lauren Peters , Congren Yang : *Global status of recycling waste solar panels: A review*, Waste Management (2018)
- [11] Vasilis M. Fthenakis: *End-of-life management and recycling of PV modules*, Energy Policy 28 (2000)



## Paks I, Paks II. közös üzeme, hatása a magyarországi villamosenergia-ellátásra

Német Márk<sup>1</sup>, Varga Zoltán<sup>2,3</sup>, Dr. Rácz Ervin<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnök Kar (villamosmérnök B.Sc. hallgató), Villamosenergetikai Intézet, 1034 Budapest, Bécsi út 96/A, [nemet.mark@hotmail.com](mailto:nemet.mark@hotmail.com)

<sup>2</sup> Óbudai Egyetem, Alkalmazott Informatika és Alkalmazott Matematika Doktori Iskola (PhD hallgató) 1034 Budapest, Bécsi út 96/B, [varga.zoltan@uni-obuda.hu](mailto:varga.zoltan@uni-obuda.hu)

<sup>3</sup> Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Villamosenergetikai Intézet, 1034 Budapest, Bécsi út 96/A, [varga.zoltan@uni-obuda.hu](mailto:varga.zoltan@uni-obuda.hu)

<sup>4</sup> Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Villamosenergetikai Intézet, 1034 Budapest, Bécsi út 96/A, [racz.ervin@uni-obuda.hu](mailto:racz.ervin@uni-obuda.hu)

---

*Az Energiahatékonyság növelése érdekében Magyarország és Oroszország 2014. januárjában egy közös szerződéskötés keretében két új atomerőművi blokk építését irányozta elő a meglévő Paksi Atomerőmű mellé. 2018-ban elkezdődtek az első munkálatok a két új, VVER-1200 MW teljesítményű, 3+ generációs blokk megépítéséhez. Az új atomerőmű első 1200 MW blokkjának befejezése 2023-ra tehető. Várhatóan 2025-ben és 2026-ban kezdhetik meg a működésüket. A Paks I. 1-es számú blokkja 2012-ben, majd később a 2-es számú blokkja 2014-ben üzemidő hosszabbítást kapott. Mivel mindkét blokk 20-20 évvel tovább működhet, így, ha az új blokkok tervezett üzembehelyezése nem késik, közel 10 év közös üzem várható [1] [2].*

*A két új atomerőművi blokk építéséről, üzemeléséről kevés konkrét információ jutott napvilágra. Ezért úgy gondoltuk érdemes megvizsgálni, a működő Paks I. és a leendő Paks II. atomerőmű tervezett közel 10 éves közös üzemét. A közös üzem részletes jellemzése előtt rövid áttekintést adunk, hogy miért kell új atomerőművet építeni. Összefoglaljuk Paks I. atomerőmű fontos, és lényeges tulajdonságait. Bemutatjuk az épülő új Paks II-es VVER-1200 teljesítményű, 3+ generációs atomerőművi blokkok jellemvonásait, jellegzetességeit. Ismertetjük milyen különböző generációs atomerőművek üzemelnek.*

*Ezzel a munkánkkal a két erőmű közös működési periódusát kívánjuk bemutatni. Elemezzük, milyen változásokat hozhat a belépő új alaperőmű a magyarországi energiaellátási láncban, miként befolyásolja a közös üzem az egyenletes rendszerterhelést.*

*Keywords: atomerőmű, Paks 2, közösüzem, környezetvédelem*

---

## 1. Bevezetés

A meglévő Paksi atomerőmű mellé, két új VVER-1200-as típusú atomerőművi blokk építése kezdődött meg, amelynek befejezése 2025-2026-ban várható. A régi Paks I. atomerőművi blokkok üzemidő hosszabbítást kaptak. A hosszabbítás miatt létre tud jönni egy közös üzem, amely tartama, ha nem késik az építkezés, mintegy 10 évre tervezhető. A közös üzem bemutatása előtt rövid áttekintést adunk arról, hogy miért fontos egy új atomerőművet építeni [1].

A két új atomerőművi blokkról kevés információ jutott napvilágra. A világ több pontján ugyanilyen VVER-1200-as típusú blokk még kevés fut teljes üzemben, de több új atomerőmű már tesztelési fázisban van.

Ezzel a munkánkkal a két erőmű közös működési periódusát kívánjuk bemutatni. Elemezzük, milyen változásokat hozhat a belépő új alaperőmű a magyarországi energiaellátási láncban. Továbbá miként befolyásolja a közös üzem az egyenletes rendszerterhelést. A közös üzemhez kapcsolódó adatok részben az internetről származnak, részben a nemzetközi sajtóban is megjelent információkra támaszkodnak [2].

## 2. Érvek az atomerőmű mellett

A jelenlegi évszázadban a Földön egyértelmű jelek utalnak arra, hogy a hőmérséklet viszonyok megváltoztak. Egyre több a bizonyíték arra, hogy minden kontinensen tapasztalható a klímaváltozás. Ez a folyamat az utóbbi 15 évben felgyorsult és a változás veszélyt jelenthet Magyarországra és az egész világra nézve. Magyarország Kormánya 2019-ben csatlakozott az Európai Zöld Megállapodáshoz, amelynek célja, hogy 2050-ig elérjük a klímasemlegességet. Több hasonló kezdeményezés a Föld megmentéséért már sikerrel járt [3] [1].

### 2.1. Klímasemlegesség

A klímasemlegesség elérése érdekében olyan villamosenergia-előállító erőművet kell keresni, amely környezetbarát és kielégíti a megnövekedett energiaigényeket. Jelenleg nincs olyan elérhető „energiahordozó” amely 100%-ban úgymond tiszta lenne. A szélenergia és a napenergia legnagyobb problémája, ha nem fúj a szél, vagy éppen nem süt a nap, akkor nem termel villamos energiát, nem egyenletesen, vagy nem kellő mennyiségben. Az időjárás viszontagságainak ki vannak téve ezek a technológiák. Más szóval e megújuló energiaforrások általában térben és időben inhomogénul termelnek villamos energiát.

## 2.2. Környezetbarát

Egy atomerőmű nem függ a környezeti hatásoktól. A nukleáris erőmű a működése közben nem termel melléktermékként több millió tonna szén-dioxidot a levegőbe évente, ellenben a szénerőművel. Magyarországon jelenleg a legnagyobb szén-dioxid termelő az 51 éves Mátrai Erőmű. Természetesen egy nukleáris reaktorban is keletkezik veszélyes anyag, elhasznált hasadóanyag a felhasználás után. Ez a mennyiség függ a reaktor típusától, és a fűtőanyag tulajdonságaitól. Radioaktív hulladék-tárolóba kell elhelyezni a kiégett fűtőanyag kazettákat, mert a radioaktív anyagok felezési ideje rendkívül hosszú [4] [5].

## 2.3. Hosszútávú működés és biztonság

Annak érdekében, hogy minél kevesebb károsanyag kibocsátást termeljünk, törekedni kell a hosszú üzemidőre. Megfigyelve egy atomreaktor életciklusát, észrevehető, hogy a legrövidebb időszak az építkezés folyamata, a leghosszabb ideig pedig a bontási műveletek tarthatnak, ami akár 70 évig is elhúzódhat. Ahhoz, hogy a megnövekedett üzemidő biztonságos legyen, új technológiát használó berendezéseket kell alkotni. A legújabbak, a legmodernebbek és legbiztonságosabbak az összes korábban megjelent egységek tekintetében az úgynevezett 3+ generációs technológiát használó blokkok. A reaktort körbe vevő vasbeton kupolának (konténment) tűz, extrém szél, extrém csapadék, külső és belső hatások ellen is biztosnak kell lennie. Továbbá, szigorú biztonsági berendezések garantálják a blokkok biztonságos működését. Aktív és passzív védőberendezések védik a reaktormagot az esetleges károsodás megelőzése érdekében [6].

## 3. Atomerőművek a világban

Ma körülbelül 400 atomerőmű működik a Földön. Jelenleg 31 országban van még működő atomerőmű és évente átlagosan 24 új reaktor készül el. A világ többségi reaktorai három széles régióban található: Az USA Keleti része, Európa (Nyugat-Európa, Kelet-Európa), és a Távol-Kelet [7] [8].

### 3.1. Csillebércen az első atomreaktor

Magyarország élen járt az atomreaktorok kutatásában és ehhez kapcsolódó ismeretekben. Magyarországon Csillebércen, Budapest délnyugati szélén épült fel és 1959. március 25-én üzembe állt az első kutatási reaktor. Wigner Jenő 1933-ban cikket közölt a kisenergiás neutron-proton szórásról. Pár évvel később 1937-ben Teller Ede az orto- és para-hidrogénon való neutronszórás elméletet publikált.

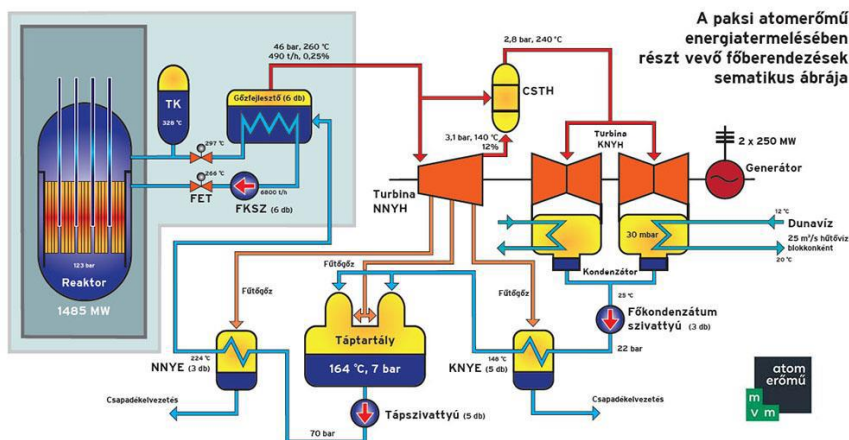
Ez a technológia lehetővé teszi az anyagon való roncsolásmentes áthatolást, az anyagok teljes vizsgálatát. Korábban pedig 1934-ben Szilárd Leó kidolgozta és szabadalmazta a neutronok által keltett maghasadás és láncreakció elvét [9].

### 3.2. Atomerőmű generációk

Az első atomerőművek/reaktorok az 1970-es évek előtt épültek, leginkább tesztelési és kutatási célokra. Elsődleges cél inkább hadipari, plutónium termelés volt, másodlagos volt a villamosenergia-termelés. Később, az 1970-es évek után épült atomreaktorok elsődleges célja már a villamosenergia előállítása volt, amelyek a második generációs atomerőművek csoportjába tartoznak. A mai napig működnek, de fokozatosan állítják le őket. Jellemzően 40 évnyi üzemidőt bírnak. Ebbe a második generációba tartozik bele a Paks I. atomreaktora. A harmadik generációs erőműveknek lehet tekinteni a 21. században épült atomerőműveket. Jelenleg ezek a típusok képviselik a legújabb, legfejlettebb és legmodernebb atomerőműveket. Ezen erőműveket már 60 éves üzemidőre tervezik. Terjedésüket a kiforrott tömeggyártás tette lehetővé [9] [10].

## 4. MVM Paksi Atomerőmű

A Paksi Atomerőmű még jelenleg Magyarország egyetlen atomerőműve. Az erőművet 4 db VVER-440 típusú blokk alkotja. A blokkok könnyűvízes, nyomottvízes (PWR) típusúak [11].



1. ábra Paks I atomerőmű sematikus ábra [9].

Eredetileg egy reaktor gyári névleges teljesítménye 440 MWe<sup>1</sup> volt. Ez egy későbbi fejlesztésnek köszönhetően 500 MWe-re növekedett. Ezáltal, a négy blokk együttes névleges teljesítménye 2000 MWe-ra emelkedett. Egy reaktorblokk hőteljesítménye 1480 MWt és az összes blokk összesen 1970 MWe elektromos összteljesítményt képes előállítani [11].

## 5. MVM Paks II. Atomerőmű

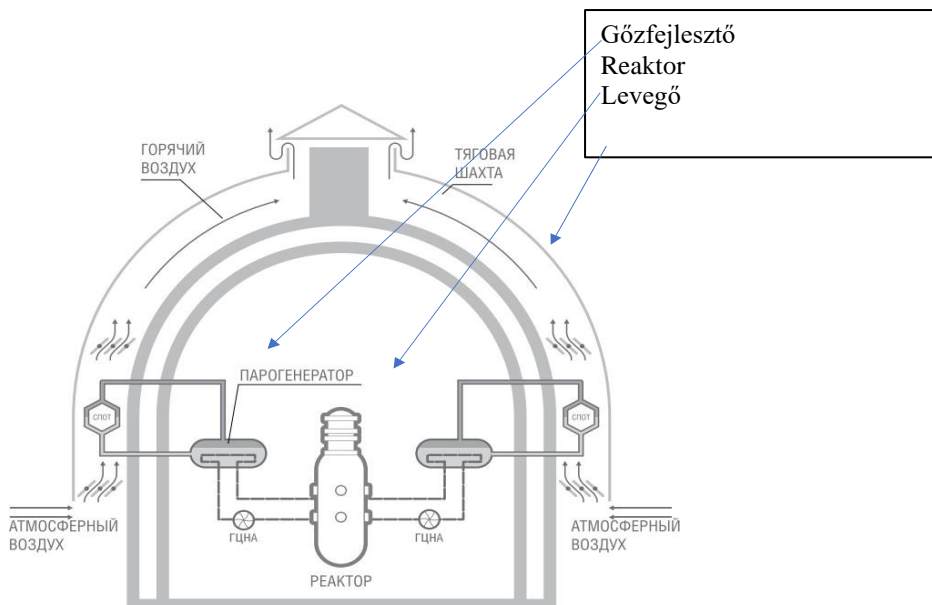
A reaktor tervezése során nagyobb figyelmet fordítottak az üzemanyaghatékonyaságra. A reaktor hőteljesítménye 3200 MWt, a névleges hőteljesítmény 1200 MWe, bár más források megemlítik a 1170 MWe teljesítményt is. A reaktor működését a legkorszerűbb műszaki és technológiai ellenőrzéseknek köszönhetően 60 évre tervezték. Az elsődleges moderátor és hűtőfolyadék a víz, könnyű víz. Ez azt jelenti, hogy nagy tisztaságú könnyű víz, H<sub>2</sub>O, amely feladata ebben a reaktor típusban, hogy hűtse a reaktort és moderátorként is funkcionáljon. A reaktor típusa nyomottvizes (PWR), a primer vízkörében magasnyomáson kering a víz cseppfolyós formában. Ebben a reaktorban a reaktormag kilépő oldalán a nyomás 16,2 MPa, és a víz pedig 328,9 °C. A reaktor egyébként maximálisan elviseli a 17,64 MPa nyomást, és 350 °C víz hőfokot. A reaktortartályon áthaladó víz mennyisége 86000 m<sup>3</sup>/h, és 290 m<sup>3</sup> hűtési víz fér el benne [12] [6].

1. táblázat: VVER-1200 típus műszaki adatai [12]

Műszaki jellemző	Paraméter
Reaktor hőteljesítmény	3200 MWt <sup>2</sup>
Névleges Villamos-teljesítmény	1200 MWe <sup>1</sup>
Üzemidő	60 év
Üzemanyagtípus	UO <sub>2</sub>
Reaktor típus	Nyomottvizes reaktor
Reaktormag kilépő csonki hőmérséklet	328,9°C
Reaktormag normál üzemi nyomás	16,2 MPa.

## 5.1. Reaktor passzív védelme

A legújabb generációs atomerőműveknél új passzív védelmi rendszert fejlesztettek ki a megnövelt biztonság érdekében. A VVER-1200 egy kéményhuzat rendszert kapott. A reaktorból a melegvíz négy gőzfejlesztőbe kerül. Onnan csöveken keresztül kerül kivezetésre a külső hőcserélőkbe. A kémény hatására a meleg levegő kiszáll a kupolán keresztül, majd a hidegebb víz visszakerül a gőzfejlesztőbe. A folyamat újra megismétlődik [13].

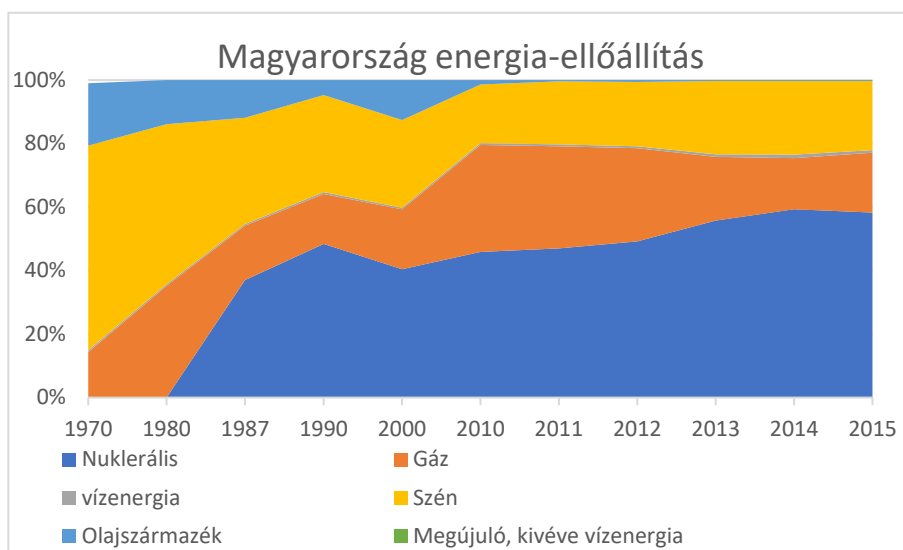


2. ábra A természetes kéményhatás segítségével lehet a reaktort hűteni [14]

## 6. Közös üzem Paks 1 és Paks 2

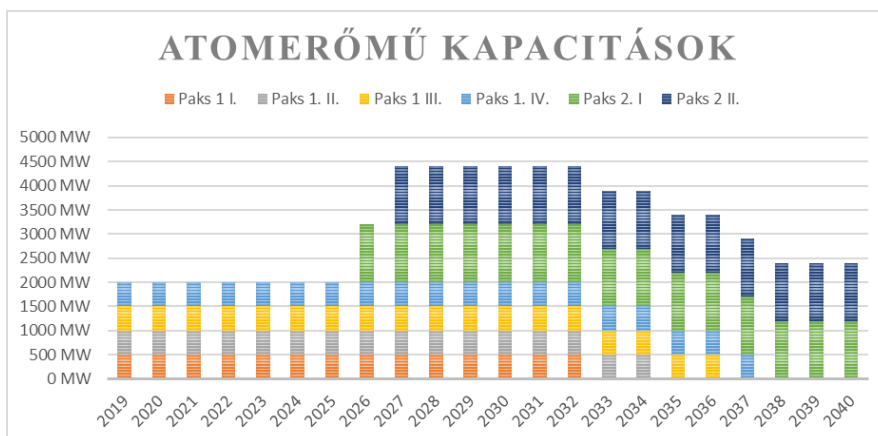
Magyarország nem rendelkezik egy olyan természetes erőforrással, ami kielégítené az energia szükségleteket. A régi, nem környezetbarát erőműveket folyamatosan le kell állítani.

Villamosenergia előállítás elemzése során láthatjuk, hogy most a Paks I. látja el 49% részesedéssel a magyar villamosenergia termelés jelentős részét. Ez után következnek a régebbi földgázzal működő erőművek, 27%-kal. A harmadik legnagyobb energiaforrás a szén és széntermékek felhasználásával működő erőművek. Ezek közül kiemelném a legnagyobbat, a Visontai Erőművet, amely nagyon környezetszennyező.



3. ábra Villamosenergia ellőállítása különböző erőművekből

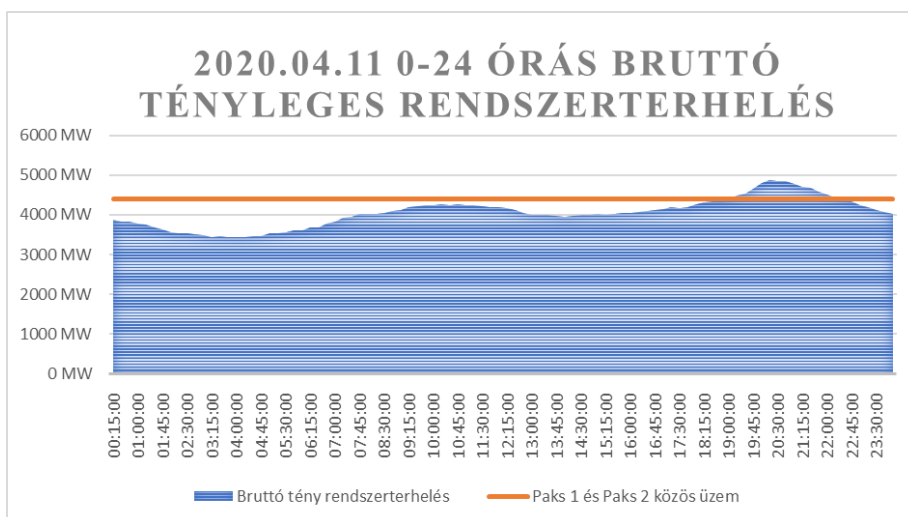
Többek között ez az egyik fő oka, amiért a választás az atomenergiára esett. Amennyiben az előírt ütemterv szerint halad az új atomerőmű blokkok építése, akkor akár az első termelési folyamatok 2026-2027 között megindulhatnak. Ha a tesztelési folyamatok megfelelő eredményeket produkálnak, akkor ebben az évben fog üzembe állni a Paksi II. Atomerőművön belül az 1. blokk. Ez bruttó új 1200 MW kapacitásbővülést jelent az energia előállításban. Egy évvel később 2027-ben tervezik a 2-es számú blokk bekapcsolását. Ez újabb 1200 MW bruttó MW-ot jelent. Ekkor a teljes üzem eléri a bruttó 4400 MW teljesítményt. Ez a bruttó villamos-energia előállítás fenntartható egészen 2033-ig. Pár sajtóhír között megjelent, hogy esetleg a régi reaktorok további üzemidő hosszabbítást kaphatnak.



4. ábra Atomerőművi kapacitások 2019-től 2040-ig

## 6.1. Közös üzem bruttó teljesítménye és a rendszerterhelés

A közös üzem alatt előállítható legnagyobb elérhető bruttó 4400 MW teljesítményt fogjuk a továbbiakban vizsgálni. A rendszerterhelés vizsgálathoz egy átlagos, 24-órás rendszerterhelést veszünk alapul, kizárva olyan külső befolyásoló tényezőket, mint a téli rendkívüli hideg napok miatti, vagy a nyári kiemelkedő forró napok miatti fogyasztás kilengéseket.



5. ábra A MAVIR adatok alapján saját kalkuláció

Egy átlagos napon a közös üzem teljesen ki tudja szolgálni a villamosigényeket. Ha esetleg késik az építkezés, akkor csökkenni fog a közösüzem, de kisebb időnél is pozitív hatással lesz a rendszerterhelésre, nem fogunk függeni olyan nagy mértékben a környező országok import energiájától. Az elektromos áram díja elképzelhető, hogy stabilabb lesz a fix hazai villamosenergia termelés miatt. Az is elképzelhető, hogy túltermelés lesz az 5 év közös üzem alatt. A túlkínálat hatásfokcsökkenést eredményez. A felesleget célszerű értékesítési csatornákon eladni (pl.: HUPX).

## 7. Összefoglalás

A megújuló energiaforrások legnagyobb hibája az időjárás viszonyoknak való kiszolgáltatottság. Az atomreaktor építkezések befejezését, az új reaktorblokkok beüzemelését Pakson 2023-ra és 2024-re tervezték. A közös üzem alatt azt az időszakot elemeztük, ahol az összes új és régi blokk működik. Ez az



időszak várhatóan 2027-től 2032-ig tart, amely időszáiban bruttó 4400 MWe teljesítményt tudunk megtermelni. A növekvő villamosigényeket a közös üzem ezen időszak alatt ki fogja elégíteni. Vélhetően nem szorulunk villamosenergia importálásra. A problémák ez utáni időszakban kezdődnek, a régi Paks I. 1.-4. blokkok leállítása rengeteg teljesítménykiesést okoz majd.

## Irodalomjegyzék

- [1] MTI, „Energia- és Klímapolitikáért Felelős Államtitkárság,” 13 január 2020. [Online]. Available: <https://www.kormany.hu/hu/innovacios-es-technologiai-miniszterium/energiaugyekert-es-klimapolitikaert-felelos-allamtitkar/hirek/a-kormany-klimapolitikajat-tamogatjak-a-valaszadok-es-az-ev-vegeig-kidolgozza-a-tarca-a-klimasemlegesség-2050-es-elereesehez-szu>. [Hozzáférés dátuma: 03 04 2020].
- [2] „Tárca nélküli miniszter,” [Online]. Available: <https://www.kormany.hu/hu/tarca-nelkuli-miniszter/hirek>.
- [3] N. Nikolett, „Évtizedek óta nem volt ilyen kicsi az ózonlyuk,” 19 12:05 09 2019. [Online]. Available: <https://24.hu/tudomany/2019/09/19/ozonlyuk-ozonreteg-kornyezetszennyezés-kornyezettudatosság-antarktisz/>. [Hozzáférés dátuma: 02 04 2020].
- [4] MTI, „Mátrai erőmű,” Portfólió, 20 December 2019. [Online]. Available: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:BV9oRJazBmUJ:https://www.portfolio.hu/uzlet/20191220/palkovics-az-allam-megvasarolja-a-matrai-eromuvet-410937+&cd=1&hl=hu&ct=clnk&gl=hu>. [Hozzáférés dátuma: 14 04 2020].
- [5] „Halálos radioaktív hulladéknak kell helyet kell találni egymillió évre – bezárja atomerőműveit Németország,” 30. november 2019. [Online]. Available: <https://www.szeretlekmagyarország.hu/halalos-radioaktiv-hulladéknak-kell-helyet-kell-talalni-egymillio-evre-bezarja-atomeromuveit-nemetország/>. [Hozzáférés dátuma: 13 04 2020].
- [6] „На Белорусскую АЭС привезли корпус реактора,” 29 12 2015. [Online]. Available: <https://tnenergy.livejournal.com/36079.html>.
- [7] EUstat, „Eustat-news,” 04 Május 2018. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN->

- 20180504-1?inheritRedirect=true&redirect=%2Ffeurostat%2F.  
[Hozzáférés dátuma: 8 04 2020].
- [8] „Mapped-the-worlds-nuclear-power-plants,” [Online]. Available: <https://www.carbonbrief.org/mapped-the-worlds-nuclear-power-plants>.
- [9] E. P. Dr. Rácz, „Nuklerális Erőművek,” Budapest, 2015.
- [10] G. Pór, „Atomenergia alapismeretek,” 2002. [Online]. Available: [regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0017\\_61\\_atomenergia\\_alapismeretek/ch01s03.html](http://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0017_61_atomenergia_alapismeretek/ch01s03.html).
- [11] „Az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. cégtörténetének bemutatása,” 8 Március 2014. [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20140308153548/http://www.atomeromu.hu/cegtortenet#>. [Hozzáférés dátuma: 14 04 2020].
- [12] „Pervyiy-VVER-1200,” [Online]. Available: [https://zavodfoto.mirtesen.ru/blog/43802635223/Pervyiy-VVER-1200-na-minimalnom-kontrolirUyemom-urovne-moschnost?utm\\_referrer=mirtesen.ru](https://zavodfoto.mirtesen.ru/blog/43802635223/Pervyiy-VVER-1200-na-minimalnom-kontrolirUyemom-urovne-moschnost?utm_referrer=mirtesen.ru).
- [13] J. G. Dragunov , S. B. Ryzhov , I. N. Vasilchenko , S. N. Kobelev és V. V. Vyalitsyn, „Az RP NPP-2006 alaptervezése,” 03 Március 2007. [Online]. Available: <http://www.atominfo.ru/news/air1749.htm>. [Hozzáférés dátuma: 14 04 2020].
- [14] „Uakon,” [Online]. Available: [https://blogs.uakron.edu/bahrami/files/2016/12/final\\_sample\\_solution.pdf](https://blogs.uakron.edu/bahrami/files/2016/12/final_sample_solution.pdf).
- [15] „The VVER today,” [Online]. Available: <https://www.rosatom.ru/upload/iblock/0be/0be1220af25741375138ecd1afb18743.pdf>.
- [16] „Szovjetunió Atomerőmű,” 2006. [Online]. Available: [http://elib.biblioatom.ru/text/andrushechko\\_aes-s-reaktorom-vver-1000\\_2010/go,538/](http://elib.biblioatom.ru/text/andrushechko_aes-s-reaktorom-vver-1000_2010/go,538/).
- [17] „Paksi II atomerőmű,” 2016. [Online]. Available: <https://www.paks2.hu/documents/20124/62965/I.+Fok%C3%BA+K%C3%B6rnyezetv%C3%A9delmi+Enged%C3%A9ly.pdf/64f4cabc-d4ad-73d5-f189-30e3c5f1e4a4>. [Hozzáférés dátuma: 14 04 2020].
- [18] „Mavir weblap,” MAVIR Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító ZRT, 11 04 2020. [Online]. Available: <http://www.mavir.hu/web/mavir/brutto-energia-napi>. [Hozzáférés dátuma: 11 04 2020].

- [19] „MAVIR határáramlás,” 14 04 2020. [Online]. Available: [https://spectrum.mavir.hu/webonelines/1669\\_gray.jpg](https://spectrum.mavir.hu/webonelines/1669_gray.jpg). [Hozzáférés dátuma: 14 04 2020].
- [20] „A Hazai Termelt Bruttó Villamosenergia Megoszlása 2019.,” 2019. [Online]. Available: [http://mavir.hu/documents/10258/232531361/VER+TERMEL%C3%89S%20MEGOSZL%C3%81S\\_adatok\\_20191231-%C3%A9n\\_20200120\\_MAVIRHONLAPRA.pdf/d7a51577-0baa-e6dd-98a4-9fdd7c1486d7](http://mavir.hu/documents/10258/232531361/VER+TERMEL%C3%89S%20MEGOSZL%C3%81S_adatok_20191231-%C3%A9n_20200120_MAVIRHONLAPRA.pdf/d7a51577-0baa-e6dd-98a4-9fdd7c1486d7).
- [21] I. Yagubkov, „mirtesen,” 22 Május 2015. [Online]. Available: [https://zavodfoto.mirtesen.ru/blog/43802635223/Pervyiy-VVER-1200-na-minimalnom-kontrolirUyemom-urovne-moschnost?utm\\_referrer=mirtesen.ru](https://zavodfoto.mirtesen.ru/blog/43802635223/Pervyiy-VVER-1200-na-minimalnom-kontrolirUyemom-urovne-moschnost?utm_referrer=mirtesen.ru). [Hozzáférés dátuma: 01 04 2020].
- [22] „VVER-1200,” 11 08 2011. [Online]. Available: [https://aris.iaea.org/PDF/VVER-1200\(V-392M\).pdf](https://aris.iaea.org/PDF/VVER-1200(V-392M).pdf). [Hozzáférés dátuma: 01 04 2020].

# A szilícium alapú napelem cella összehasonlítása a festékérzékenyített napelem cellával

Varga Zoltán<sup>1,2</sup>, Dr. Rácz Ervin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Óbudai Egyetem, Alkalmazott Informatika és Alkalmazott Matematika Doktori Iskola (PhD hallgató) 1034 Budapest, Bécsi út 96/B, [varga.zoltan@uni-obuda.hu](mailto:varga.zoltan@uni-obuda.hu)

<sup>2</sup> Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Villamosenergetikai Intézet, 1034 Budapest, Bécsi út 96/A, [varga.zoltan@uni-obuda.hu](mailto:varga.zoltan@uni-obuda.hu)

<sup>3</sup> Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Villamosenergetikai Intézet, 1034 Budapest, Bécsi út 96/A, [racz.ervin@uni-obuda.hu](mailto:racz.ervin@uni-obuda.hu)

---

*Egyes prognózisok szerint a festékérzékenyített napelem esélyes utódja lehet a kristályos szilícium alapú napelemeknek, ugyanis előállításuk olcsóbb és nem is annyira terheli a környezetet. Ennek hatására célul tűztük ki, hogy különböző paramétereket figyelembevételével – úgy, mint a rövidzárási áram, üresjárási feszültség, maximális teljesítmény, hatásfok, élettartam, működési hőmérséklet – összehasonlíjuk a szilícium alapú napelem cellát a festékérzékenyített napelem cellával.*

*Kulcsszavak: Dye Sensitized Solar Cell, festékérzékenyített napelem, DSSC, szilícium alapú napelem, hatásfok*

---

## 1. Bevezető

A globális klímaváltozás kapcsán sok szó esik a megújuló villamosenergia termelés kiaknázhatóságának lehetőségéről. A környezeti problémák további nyomást jelentenek (pl.: megnövekedett széndioxid kibocsátás) a mai társadalom energiafogyasztásának kielégítésében. Ezáltal korunk kutatói számos új, meghatározó kihívásokkal kell szembenézzenek. A napenergia közvetlen villamos energiává való átalakítása során a beeső fotonok szabad töltéshordozókat keltenek a napelem cella félvezetőanyagában, amelyet szétválasztunk [1].

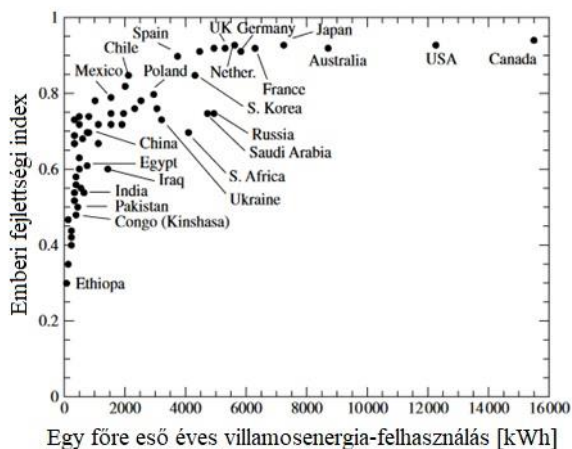
A piacot befolyásoló költségsökkentési kényszer és a különböző Európai Unió direktívák és célok kitűzése Magyarországon is elérhetővé teszi a napelem panelek szélesebb körben való sokszínű alkalmazását [2] [3]. A jelenlegi nemzetközi piacot a szilícium alapú napelem cellák dominálják, de a közeljövőben

a festékekkel érzékenyített napelem cellák ezen dominancia megtörését okozhatják. [4]

Célunkul tűztük ki, hogy különböző paramétereket figyelembevételével – úgy, mint az rövidzárási áram, üresjárási feszültség, maximális teljesítmény, hatásfok, élettartam - összehasonlítjuk a szilícium alapú napelem cellát a festékekkel érzékenyített napelem cellával.

## 2. A nagy kép

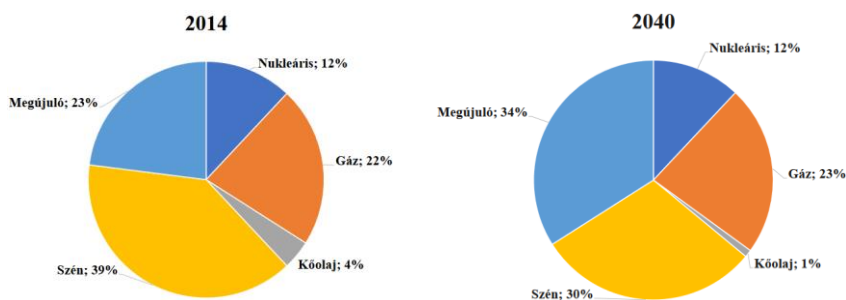
Az emberiség energiafogyasztásának igénye az utóbbi időben drámaian megnőtt. Az egy főre eső éves villamosenergia-fogyasztást a kutatók évente mérik és összehasonlítják, szembeállítják ezen értékeket országosan az emberi fejlettségi indexszel (angolul: Human Development Index, rövidítve: HDI). Ezáltal egy átfogó képet kaphatunk a villamosenergia fogyasztás és emberiség kapcsolatáról. Az 1. ábra egy 2000-es években készült HDI felmérést szemléltet, amelyet 60 országot, a Föld népességének 90%-át foglalja magába. Az emberi fejlettségi indexnek három összetevőből – úgy, mint a születéskor várható élettartam, oktatásban megszerzett tudás és egy főre jutó vásárlóerő paritáson számított bruttó hazai termék (GDP) - kalkulált érték, amely 0 és 1 közötti értéket vehet fel [5]



1. ábra: Emberi fejlettségi index (HDI) és. egy főre eső éves villamosenergia-felhasználás kapcsolata [5].

Tehát, az emberiségnek mindenképpen villamos energiára van szüksége. Manapság a megbízható és rugalmas energia rendszerek a fosszilis energiahordozókra alapoznak, amelyek domináns szerepet töltenek be világviszonylatban. A fosszilis energiahordozók tömeges felhasználásának

következménye az üvegházhatású gázok (pl.: CO<sub>2</sub>) légkörben való túlzott megjelenése. Az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése érdekében számos megújuló energiaforrást térképeztek fel az utóbbi időben, amelyek meghatározó figyelmet kapnak világszerte, mint alternatív megoldások a globális problémára. Egyes prognózisok szerint a megújuló energiák várhatóan 2030 körül megelőzik a szén, ezzel a legnagyobb energia forrássá válva, és 2040-re elérik a teljes energiatermelés 34%-át, amelyet a 2. ábra szemléltet [3].



2. ábra: Globális villamosenergia felhasználás viszonya 2014-ben és a prognosztizálások szerint 2040-re [3].

A megújuló energiafogyasztások közül a legnagyobb figyelmet világszemléletben a napenergia, azon belül is a napelem kapta 2016-ban [3]. Ezen szemlélet tovább is fennmaradt. A napenergiát közvetlenül villamosenergiává alakító eszköz a napelem (angolul: Photovoltaic, rövidítve PV). Néhány piaci elemző szerint 2050-re a napelem használata 25%-ot is elérheti a villamosenergia termelésben [3] [6]. Ezen meglátásmódot alátámasztja, hogy a napelemes rendszerek ára az elmúlt öt évben 50%-ot csökkent [3] [7].

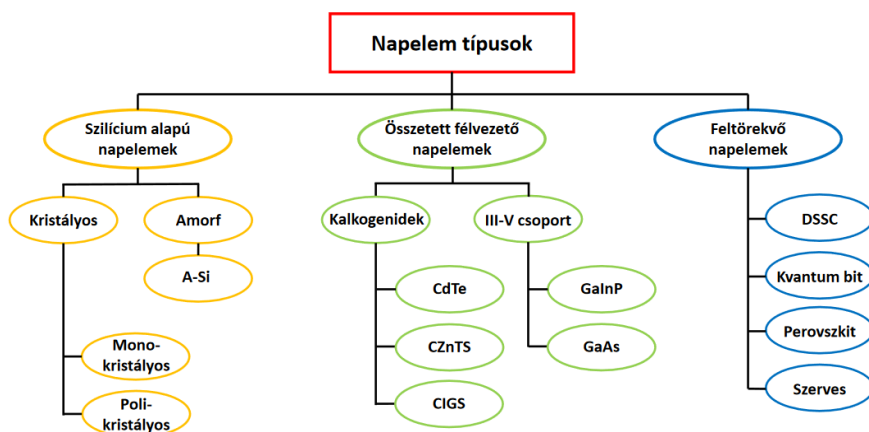
Habár, sok szó esik a napelemek ürügyén, hogy mennyire zöld technológia, de ezt az állítást egy életciklus elemzéssel (angolul: Life Cycle Analysis, rövidítve LCA) lehetne pontosan megállapítani. Az életciklus elemzést Dr. Tamaska László, Dr. Rédey Ákos és Vizi Szilárd az *Életciklus elemzés készítése* című könyvükben az alábbiaként definiálták: „Az életciklus-elemzés egy termék, folyamat vagy szolgáltatás életútja során vizsgálja a környezeti szempontokat és a potenciális hatásokat.” [8] Az életciklus elemzés három részből tevődik össze: termelés, üzemelés, lebontás. A napelemek vagy napelemes rendszerek esetén a termelés, szállítás és lebontás CO<sub>2</sub> kibocsátással jár. A napelemes rendszereket általában azért hívjuk zöld energiának, mert termelésük során egyáltalán vagy csak kevésbé terhelik a környezetet. Tehát, működésük közben nem vagy kevésbé bocsátanak ki szén-dioxidot. Az olvasóban felmerülhet, hogy egy napelem mikor bocsát ki CO<sub>2</sub>-t. A napelemes rendszerek esetén - földrajzi elhelyezkedésétől függően – előfordul a napelem panelek felületének a tisztítása, amely traktorra helyezett felülettisztító géppel vagy egyéb módokon történik.

### 3. Szemléletmód a napelemek ürügyén

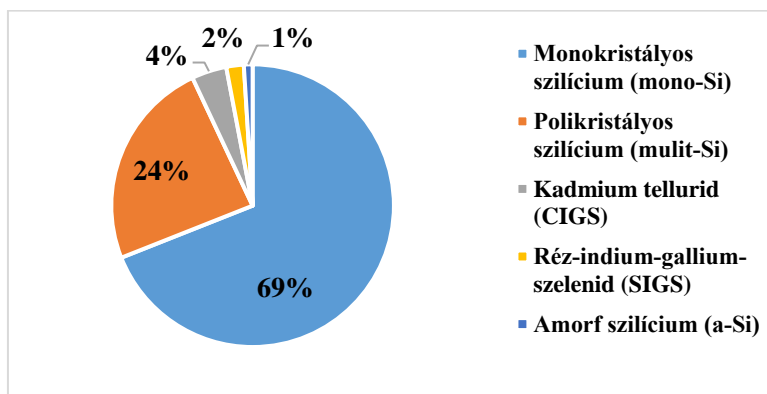
A korábbi fejezetekben bemutatásra került az emberiség villamosenergia szükségletének fontossága és arra való különböző törekvések, azon belül kiemelve a napelemet, annak fejlődési, gazdasági irányzatait a jelenre- és a jövőre való tekintettel. Ezúton érdemes áttekinteni a különböző napelemeket, illetve a fotogerjesztésre adott villamos paramétereit.

A napelemek egyik legszélesebb körben használt csoportosítási formája az anyag alapján történő csoportosítás. Az 4. ábra szemlélteti a napelemek csoportosítását (anyagjuk alapján). Ahogyan látható nagyon sok különböző napelem létezik, viszont Mariusz Malonwski és Haitham Abu-Rub a 2017-es cikkükben feltérképezték, hogy 2015-ben a világpiacon milyen napelem típusokat alkalmaznak a leggyakrabban, amely az 5. ábrán látható [3]. A cikkünkben minden napelem típus nem kerül bemutatásra. Kifejezetten a szilícium alapú napelemeket és a festékkérezkenyített napelemeket (angolul: Dye-Sensitized Solar Cell, DSSC), amelyek a feltörekvő napelem típusokba tartoznak mutatjuk be (lásd: 4. ábra legszélső oszlopa).

Az egyes napelem típusoknak eltérő a hatásfoka [9]. A hatásfok alatt a napelem felületére eső fotonok villamosenergiává való átalakításának hatásfokát értjük. A napelem villamos paramétereit – úgy, mint rövidzárási áram, üresjárási feszültség, teljesítmény, kitöltési tényező és hatásfok – több paramétertől függ, mint a besugárzás teljesítménye, hőmérséklet, napelem felületének tisztasága.



3. ábra: Napelemek csoportosítása alapanyag szerint, ahol a kalkogenidek a réz származékokat jelenti [10] [11].



4. ábra: A globális napelem piac eloszlása 2015-ben [3].

A napelem hatásfokát ( $\eta$ ) az alábbi képlet segítségével tudjuk kiszámolni:

$$\eta = \frac{V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF}{P_{IN}}$$

, ahol  $P_{IN}$  a napelemet ért besugárzás teljesítménye,  $V_{OC}$  az üresjárási feszültség,  $I_{SC}$  a rövidzárási áram és  $FF$  a kitöltési tényező. A kitöltési tényezőt (angolul: Fill Factor) két terület hányadosaként tudjuk kiszámítani és az értéke 0 és 1 közötti szám. A kitöltési tényezőt az alábbi képlet segítségével tudjuk kiszámítani:

$$FF = \frac{MPP}{I_{SC} \cdot V_{OC}}$$

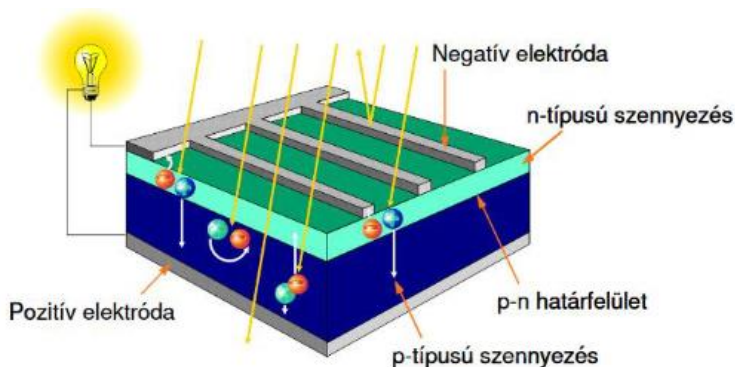
, ahol  $MPP$  a maximális teljesítményű pont.

## 4. Szilícium alapú napelem

Fentebb láthattuk, hogy a szilícium alapú napelemek elég nagy részt foglalnak el a napelem világpiacán. A szilícium alapú napelemekre jellemző a p-n átmenet. A p típusú anyagra (pl.: bór diffundálással) fémréteget visznek fel, amely a pozitív elektród (anód) szerepét tölti be. Az n típusú anyagra (pl.: foszfor diffundálással) vagy vékony fémszálakból készült hálózatot gözölnek, vagy egy nagy optikai áteresztőképességű vékony vezető oxid (angolul: Transparent Conductive Oxid) réteget alakítanak ki, amely a katód. A fémeztelen n-típusú felületet passziválják szilícium-dioxiddal ( $\text{SiO}_2$ ), amely a rekombinációs veszteség csökkentését segíti elő. A további veszteségek csökkentése érdekében egy antireflexiós felülettel, tükrözésgátló felülettel vonják be a passzivált felületet. Az antireflexiós réteget rápermetezéssel vagy anizotróp kémiai maratású strukturálással hozzák létre. Az elektromos tér hatására a félvezető belsejében a szabad töltések elektronokra és lyukakra válnak szét. Az elektronok az n réteg felé,



a lyukak a p réteg felé vándorolnak. A gerjesztett elektronok – amennyiben az elülső és hátoldali kontaktusok zárva vannak – körbeérnek a p rétegbe, ahol rekombinálódnak a lyukakkal. A megnövekedett energiájú elektronok áram formájában levezetik többlet energiájukat. Az 5. ábrán látható a mono- és polikristályos napelem cella keresztmetszeti képe. Az amorf szilícium esetén a felépítés kicsit eltérő. Az amorf szilíciumnál az úttörést egy semleges réteg jelenti, amely a p és n réteg között található [12].



5. ábra: Mono- és polikristályos napelem cella keresztmetszete [12].

A monokristályos napelem esetén a gyártástechnológiát figyelembe véve Chochralski-eljárással növesztenek egy nagyjából 1 méter hosszú és 30 cm átmérőjű szilícium egykristályt, amelyet felszeletelnek. A szeletelést követően pedig wafer-eket hoznak létre belőlük. A polikristályos napelemek esetén a lehűtött szilícium durva szemcséjű kristályszerkezetbe rendeződik, amelynek méretei a milliméterestől a centiméteresig is terjedhet [12].

## 5. Mi az a DSSC?

Mielőtt a festékérzékenyített napelem cella működési hátterébe belemennénk érdemes áttekinteni a történelmi előzményeket.

### Történelmi háttér

A fényérzékeny festékanyagot már a fényképészetben elkezdték használni. A fényképészetben ezüst-halogenideket használtak, amelyek tilossávja 2,7 – 3,2 eV nagyságrendű. Ebből kifolyólag érzéketlenek a látható spektrum nagy részére [13]. Az első pánkromatikus filmet egy német fényképész és fotokémikus, Hermann Wilhelm Vogel fejlesztette ki 1873-ban [13] [14]. Abban az időben alkalmazott fényképészeti emulziók a látható spektrum közül inkább az ultraibolya, ibolya és

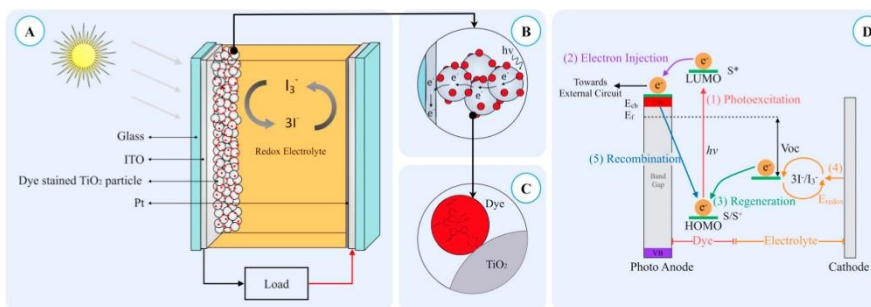
kék tartományra, illetve mérsékelten a zöld színre voltak érzékenyek. Vogel a látható spektrum maradék részére is érzékennyé tudta tenni a filmet fényérzékeny festékek hozzáadásával.

Később, hasonló kémiát használva, az első fényelektróda érzékenyítése megtörtént. A fényelektróda fény hatására elektronokat bocsát ki. Az áttörés az 1960-as években történt, amikor igazolták, hogy a fény által gerjesztett festék elektronokat juttat az n-típusú félvezető vezetési sávjába. A kutatók azzal az ötlettel álltak elő, hogy a fényérzékeny festék félvezető réteg felszínéhez kémiai úton történő kötődése hatékony üzemelést biztosít. Majd ezt követően felismerték, hogy mikroszemcsés anyagot érdemes használni a nagyobb felület érdekében. Így kezdte kibontakozni magát a festékérzékenyített napelem cella, de 1991-ig csak tudományos érdekesség maradt a kutatók számára a félvezető-elektrolit határfelületen fellépő fotokorrózió miatt. A 1,5 eV körüli tilossávú félvezetőknek nagy a hatékonysága, de közben erősen korrodálódnak. Ezzel szemben a 3-4 eV körüli félvezetőknek kisebb a hatásfoka, de többnyire ellenállóak a korrózióknak. Természetesen a kiválasztott elektrolit befolyásolja a korrózióknak a mértékét, jelentős mértékben csökkentheti. Megfelelő elektrolit kiválasztással a redoxpár könnyen oxidálható. Jelenleg, az n-típusú félvezetők felületén lezajló korrózió megoldott, de a p-típusú félvezetőknel még megoldatlan [13].

A korrózióval szemben történő ellenállás véget félvezető anyagnak a titán-dioxidot ( $\text{TiO}_2$ ) választották ki. A fotográfia és a foto-elektrokémia érdekes konvergenciája, hogy a fényképésztben használt ezüst-halogenidek tilossávja 2,7 – 3,2 eV nagyságrendűek érzéketlen a látható spektrum nagy részére csak úgy, mint a  $\text{TiO}_2$  [13]. A fentebb említett évszám, 1991, azért kiemelkedően fontos, mert abban az időben jelent meg a Nature folyóiratban Michael Grätzel cikke a festékérzékenyített napelem celláról, amely áttörő sikert eredményezett [4].

### **Festékérzékenyített napelem cella működése**

Technológiai oldalról nézve lényeges különbség van a hagyományos p-n átmenetes félvezető napelem cella és a festékérzékenyített napelem cella között. A különbség abban rejlik, hogy a szilícium alapú napelemeknél a félvezetők nyelik el a fotonokat és választják szét a töltéshordozókat, addig a DSSC-nél ez a kettő külön funkcióként jelenik meg. A belépő fotonokat egy kémiai úton félvezető rétegre felvitt festékérzékenyített réteg nyel el. A töltésszétválasztódás a két anyag határán történik, a gerjesztett elektronok bekerülnek a félvezető réteg vezetési sávjába, ahonnan az elektronok az üveghordozón, mint elektródon keresztül kivezethetők [4] [13] [15] [16].



6. ábra: A hagyományos festékképzékenyített napelem cella (DSSC) felépítése [4]

A beeső fotonok hatására a fényérzékeny festékréteg belső energiája megnő. A gerjesztés hatására megnőtt belső energiát a festékréteg elektronok injektálásával leadja. Az elektronok ezután egy n-típusú félvezető oxid rétegbe jutnak ( $\text{TiO}_2$ ), ahonnan az elektronok elvezetődnek egy hátoldali elektródához (anód). A festékanyag elvesztett, leadott elektronjait pótolni tudja egy jodid/trijodid ( $\text{I}^-/\text{I}_3^-$ ) elektronit oldatból, ami a fény ellenelektódtól (katód) vesz fel elektronokat. A katódhoz az elektronok egy fogyasztón (terhelésen) keresztül jutnak el, ezzel zárul az áramkör [4] [13] [15] [16].

## 6. Összehasonlítás

Az 1. táblázatban a szilícium alapú (mono- és polikristályos, amorf-Si) napelemek technológiai paraméterei láthatóak. A táblázatban szereplő számok közelítések és laboratóriumi környezetben mért értékeket prezentálnak. Viszont jól látható, hogy a monokristályos napelem esetén nyerhető ki a legnagyobb hatásfok. A költségcsökkentés mellett ez az egyik fő oka, hogy a monokristályos napelem uralja a globális napelem piacot [12]. A gyártók az egyes napelemekre a 20-25 éves élettartamot garantálják [12]. Továbbá, az üresjárási feszültség az amorf szilícium napelemnél mutatkozik nagy értéknek, de a rövidzárási áram esetén a monokristályos napelem mutat kedvezőbb, nagyobb értéket. Hasonlóképpen, ez igaz a kitöltési tényező esetén is. Miután áttekintettük a paramétereket érdemes készíteni egy táblázatot, amelyben az előnyök és a hátrányok szerepelnek.

A 2. táblázat szemlélteti a szilícium alapú napelem előnyeit és hátrányait. Az előnyök között láthatóan megjelenik a kedvező, magas kinyerhető hatásfok (kifejezetten monokristályos napelem esetén), de emellett érdemes kiemelni, hogy a szilícium, mint alapanyag jelentős mértékben előfordul a Földön. Hátrányok esetén egyből szembetűnik a hulladékképződés. Mono- és polikristályos napelemnél a vágás és szeletelés során a szilíciumkristályoknak körülbelül 50%-

a hulladékká válik. Valamint egy másik hátrány, hogy az elhasználódásukat követően veszélyes hulladéknak minősülnek.

1. táblázat: Szilícium alapú napelem technológiai paramétereit [12]

	Monokristályos	Polikristályos	Amorf-Si
Hatásfok [%]	24,7	19,8	12,7
Élettartam	20-25 év		
Üresjárás feszültség [V]	0,7	0,65	0,88
Rövidzárási áram [mA/cm <sup>2</sup> ]	42,2	38,1	19,4
Kitöltési tényező [%]	82,8	79,5	74,1

2. táblázat: Szilícium alapú napelem előnyei és hátrányai

Előnyök	Hátrányok
<ul style="list-style-type: none"> <li>Jó hatásfokkal üzemelnek</li> <li>Az élettartamuk eléri a 25 évet is.</li> <li>Eljárási technológia jelentősen kiforrott.</li> <li>A szilícium, mint alapanyag bőségesen előfordul.</li> <li>A polikristályos napelem alacsony termelési költségű az egykristályoshoz képest.</li> <li>Amorf szilícium napelemnél kevés anyag kell, mivel 1 µm vastag réteg elegendő.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Monokristályos és polikristályos napelemnél a vágás és szeletelés során a szilíciumkristályoknak kb. 50%-a hulladékká válik.</li> <li>Előállításuk során terhelik a környezetet.</li> <li>Elhasználódását követően veszélyes hulladékként kell kezelni.</li> <li>Amorf szilíciummal alacsonyabb hatásfok érhető el, mint monokristályos napelemmel.</li> </ul>

A festékérzékenyített napelem előnyei és hátrányai összefoglaló táblázatot a 3. táblázat szemlélteti. Az előnyök között kiemelhető az építészetben való alkalmazhatóságuk, mert egyes épületszerkezeti elemeket is kiválthatnak. További előnyt jelent, hogy szórt fényben (diffúz fényben) is jelentős hatékonyságot mutatnak. Hatásfokuk akkor is elérheti a 11%-ot [4]. Egyik hátrányok, hogy a szilícium alapú napelemek költségeinek éles csökkentése más napelem technológiák háttérbe szorítását eredményezte. A festékérzékenyített napelemek fő

problémája az elektrolit, amely változó hőmérsékleten nem túl stabil. Alacsony hőmérsékleten befagyhat, ezzel csökkentve a villamosenergia termelést és fizikai károkat okozhat.

3. táblázat: Festékérzékenyített napelem előnyei és hátrányai

Előnyök	Hátrányok
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kiemelt szerepük van az építészeben: egyes épület-szerkezeti elemeket is kiválthatnak (pl.: árnyékoló elemként)</li> <li>• Átlátszó napelem egységek biztosítják a beltéri fényt és a bejutó fénynek köszönhetően a belső tér természetes melegítését is.</li> <li>• Szórt fényben is jelentős hatékonyságot mutatnak. Hatásfokuk akkor is megközelítette a 11%-ot.</li> <li>• A cella kitöltési tényezője 0,7 feletti nagyon alacsony fény intenzitásban is.</li> <li>• Konvencionális napelem celláknál kisebb a kitöltési tényezője (&lt;0,5) ugyanilyen feltételek mellett.</li> <li>• Természetes festékanyagok felhasználásával is lehet DSSC-t készíteni.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A szilícium alapú napelemek költségeinek éles csökkentése más típusú napelem technológiák háttérbe szorulását eredményezte.</li> <li>• A festékérzékenyített napelemek még kereskedelemben nem kaphatóak, tehát nagy-szabású telepítéseknél nem alkalmazzák.</li> <li>• Egyik fő problémája az elektrolit használata, amely változó hőmérsékleten nem túl stabil.</li> <li>• Az elektrolit alacsony hőmérsékleten lefagyhat, csökkentve a villamosenergiatermelést és fizikai károkat okozhat.</li> </ul>

## 7. Irodalomjegyzék

- [1] Bodnár István. Napelem hőmérsékletfüggésének kísérleten és szimuláción alapuló vizsgálata, Jelenkori társadalmi és gazdasági folyamatok, XII. évfolyam, 4.szám, pp. 195-206 (2017)
- [2] World Energy Outlook 2015, Int. Energy Agency (IEA), Paris, France, 2015.
- [3] M. Malinowski, J. I. Leon and H. Abu-Rub, "Solar Photovoltaic and Thermal Energy Systems: Current Technology and Future Trends," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 11, pp. 2132-2146, Nov. 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2690343.
- [4] Brian O'Regan, Michael Grätzel: A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films, Nature Publishing Group, Nature 353, pp. 737-740 (24. October 1991)
- [5] Antonio Luque, Steven Hegedus: Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Second Edition, 2011, John Wiley & Sons, Ltd, ISBN: 978-0-470-72169-8
- [6] Technology RoadMap Solar Photovoltaic Energy, Int. Energy Agency (IEA), Paris, France, 2014
- [7] Statistical Figures of the German Solar Power Sector (Photovoltaics), BSW-Solar 2011.
- [8] Dr. Tamaska László, Dr. Rédey Ákos, Vizi Szilárd: Életciklus elemzés készítése (2001) Veszprémi Egyetem Környezetmérnöki és Kémiai Technológia Tanszék Tisztább Termelés Magyarországi Központ ISBN 96 00 6829
- [9] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, and E. D. Dunlop, Solar Cell Efficiency Tables (Version 48). Hoboken, NJ, USA: Wiley, Nov. 2016.
- [10] Ibn-Mohammed, T., Koh, S.C.L., Reaney, I.M. et al. (2017). *Renew. Sustain. Energy Rev.*80:1321–1344.
- [11] Alagarsamy Pandikumar, Kandasamy Jothivenkatachalam, Karuppanapillai B. Bhojanaa: Interfacial Engineering in Functional Materials for Dye-Sensitized Solar Cells, 2020 SBN: 9781119557333
- [12] Armin Rauber: SOLTRAIN-G04 előadás Napelemtechnológiák és jellemzőik, (A fordítás a Soltrain projekt (4.1030/Z/02-067/2002 sz. EU Altener program) keretében, a SzIE Fizika és Folyamatirányítási Tanszék gondozásában készült.)
- [13] Grätzel, M.: Dye-sensitized solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 4(2), 145-153. (2003)

- [14] W. West, Proc. Vogel Centennial Symp., Photogr. Sci. Eng. 18 (1874)35.
- [15] Gyarmati Ádám: Titán-dioxid alapú, festékanyaggal érzékenyített napelemek fejlesztése, TDK dolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest (2015)
- [16] Varga Zoltán: Festékérzékenyített napelem cella hőmérséklet-függésének vizsgálata, TDK dolgozat, Óbudai Egyetem, 2019

## Forgógépek mechanikai hibáinak elemzése áram jelalak-analízis módszerével

**Bendiák István**

Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Automatika Intézet, Villamos Gépek Szakcsoport,  
[bendiak.istvan@uni-obuda.hu](mailto:bendiak.istvan@uni-obuda.hu), 1034 Budapest, Szőlő utca 4. AB.fsz.10

---

A dolgozat célterülete a villamos forgógépek diagnosztikai mérései, ez legyen ipari vagy ipari-kutatási alkalmazás. Az elmúlt évek elméleti és gyakorlati tapasztalatai jelentős alapot szolgáltattak a munka megszületéséhez.

Villamos forgógépek diagnosztikai eljárási és alkalmazási lehetőségük felmérése, ami azt jelenti, hogy a jelenleg ismert mérési módszerek mérlegelése és összevonása egy olyan gépspecifikus hiba megállapítására, ami még nem egyértelműen ismert megoldás. Léteznek roncsolás és roncsolásmentes folyamatok, mindkettő családból válogattam. A mérési sorozatban aszinkron motor vett részt az iparban széleskörűen alkalmazott géptípus.

Kulcsszavak: Áramjel, áramjelalak-analízis, Park-vektor, csapágyfrekvencia, csapágy külső gyűrű, belső gyűrű, gördülő elemek, pályageometria

---



## 1. Bevezető

A dolgozat célterülete a villamos forgógépek diagnosztikai mérései, ez legyen ipari vagy ipari-kutatási alkalmazás. Az elmúlt évek elméleti [1-160] és gyakorlati tapasztalatai jelentős alapot szolgáltatottak a munka megszületéséhez. A mechanikai meghibásodások jelentősen befolyásolják az ipari folyamatok átfutási idejét, valamint olyan alkalmazások szerepkörét, ahol a motor kiesése jelentős hátráltató tényező (szivattyúk, kompresszorok). A gépek üzemeltetése sokszor olyan helyen történik, ahol a hozzáférés is kihívást jelenthet, biztonsági zóna vagy más okok miatt. Előfordul az előre telepített szenzorok megsérülnek rezgés vagy túlzott hőmérséklet miatt bizonytalan adatokat szolgáltatnak, erre is megoldást kell találni.

Villamos forgógépek diagnosztikai eljárási és alkalmazási lehetőségük felmérése, ami azt jelenti, hogy a jelenleg ismert mérési módszerek mérlegelése és összevonása egy olyan gépspecifikus hiba megállapítására, ami még nem egyértelműen ismert megoldás. Léteznek roncsolás és roncsolásmentes folyamatok, mindkettő családból válogattam.

A diagnosztikai méréseknél az alábbi módszereket alkalmaztam:

- Áram Park-vektor és annak x és y-komponenséből spektrumok készítése
- Hőmérsékeltmérés és számolás

A fent felsorolt eljárások szolgáltatnak alapot a munka megkezdéséhez. A forgógépek mérésnél szem előtt kell tartani a hozzáférhetőség kérdését, hogyan lehetséges a munka kivitelezése, ami azt jelenti, hogy az általam elvégzett és átgondolt mérési módszerek két részre oszthatók.

- Laboratóriumi körülmények között kivitelezhető mérések.
- Ipari körülmények között elvégezhető mérések.

Az ipari körülmény alatt [1] azt értem, hogy a forgógép üzemeltetési körülményei nem teszik lehetővé a „könnyű” hozzáférést, illetve a zavartalan üzem biztosítása érdekében nem is megengedett. Az ipari csarnok esetében több motor dolgozik együtt. Ennek eredményeképpen értem a két részre osztást, mert laboratóriumi körülmények alatt azt értem, hogy minden olyan mérési körülményeit igyekeztem megteremteni, ami csak a gépre jellemző jel, illetve olyan zavaróhatást, amit nem sikerült elhárítani, annak a figyelembevételével dolgozni. A kiválasztott villamos gép aszinkron motor és terhelőgépként megjelenik az egyenáramú mérlegdinamó. A kialakított tengelykapcsolatok közvetítője körmös tengelykapcsoló.

A dolgozat célja ipari hibák kutatása specifikált mechanikai jellemzőkkel, amelyek korszerű megoldásokhoz vezetnek. A hazai és nemzetközi szakirodalom [1-160] is széleskörűen tárgyalja a mérési módszereket és ezen irodalmak segítségével indultam el és dolgoztam együtt.

## 2. Csapágyadatok előkészítési és feldolgozási kérdései, alapvető fogalmak

A csapágydiagnosztika széleskörben alkalmazott elemzési módszer [20-34], ennek azokat az elemeit használtam, amelyek alapjai annak, hogy az áramjel segítségével tudjak csapágyfrekvenciát megállapítani [76-159].

A csapágytípus keresésére az SKF katalógusait [42], [75-81] és szoftvereit használtam. Ennek alapján: a keresett csapágy: 6206. Milyen adatokkal rendelkezik ez a csapágy? Milyen számításokat kell elvégezni a geometriai adataiból? A csapágyra alapvető jellemzők: külső gyűrűs, belső gyűrű, gördülő elemek száma stb.

Csapágy hibafrekvenciák angol és magyar megfelelői (SKF) [76-79]:

**f<sub>ip</sub>**: Over-rolling frequency of one point on the inner ring/ A csapágy belső gyűrűre vonatkozó hibafrekvencia [Hz].

**f<sub>ep</sub>**: Over-rolling frequency of one point on the outer ring/ A csapágy külső gyűrűre vonatkozó hibafrekvencia [Hz].

**f<sub>rp</sub>**: Over-rolling frequency of one point on a rolling element/ A csapágy gördülő elemeire vonatkozó hibafrekvencia [Hz].

**f<sub>i</sub>**: Rotational frequency of the inner ring/ Belső gyűrű forgási frekvencia [Hz].

Számított csapágy adatai: Csapágy adatok származása: SKF online csapágykatalógus 6206 csapágy sorozatra való keresés alapján [76-79].

Ebben a számítási esetben a külső gyűrű áll a belső forog.

A csapágy típusa: Egysoros mélyhornyú golyóscsapágy.

Hibafrekvenciák számítása [1], [42], [71], [76-80] (elnevezések származási helye):

**f<sub>ep</sub>**: Over-rolling frequency of one point on the outer ring/A csapágy külső gyűrűre vonatkozó hibafrekvencia [Hz].

Fordulatszám értékre:  $n = 1435 \frac{1}{\text{min}}$ .

$$\mathbf{f_{ep} = 84,23 \text{ Hz}}$$

**f<sub>ip</sub>**: Over-rolling frequency of one point on the inner ring/ A csapágy belső gyűrűre vonatkozó hibafrekvencia [Hz].

$$\mathbf{f_{ip} = 131,01 \text{ Hz}}$$

**f<sub>i</sub>**: Rotational frequency of the inner ring/ Belső gyűrű forgási frekvencia [Hz].

$$f_i = \frac{1435 \frac{1}{\text{min}}}{60} = \mathbf{23,91 \text{ Hz}}$$

Forgási frekvencia értéke 23,91 Hz.

**f<sub>rp</sub>**: Over-rolling frequency of one point on a rolling element/ A csapágy gördülő elemeire vonatkozó hibafrekvencia [Hz].

$$\mathbf{f_{rp} = 104,82 \text{ Hz}}$$

A csapágy frekvenciák számítása fordulatszámfüggő mennyiség.

Összefoglalva [1], [42], [47], [71], [30-82]:

Névleges terhelési üzemállapotban keresendő frekvenciaértékek a rezgésspektrumban.

$$\mathbf{f_{ep} = 84,23 \text{ Hz}}$$

$$\mathbf{f_{ip} = 131,01 \text{ Hz}}$$

$$\mathbf{f_i = 23,91 \text{ Hz}}$$

$$\mathbf{f_{rp} = 104,82 \text{ Hz}}$$

Továbbiakban ezeket a frekvenciaértékeket fogom használni az áramjelalak-analízis elemzésénél [21].

### 3. Aszinkron motor diagnosztikai vizsgálata áram jelalak-analízis módszerével

Az előző fejezetben bemutatott számítási folyamat előzi meg a jelfeldolgozási lépéseket. Ezek az adatok adatbázisokban tárolhatók és tovább felhasználhatók [1].

A forgógép diagnosztika szerteágazó szakterület [71-159], ezért jelenleg csak az aszinkron géptípusra fogok koncentrálni. Az áram jelalak-analízis rendkívül széles [1], [21], [123-160] körben alkalmazott módszer, napjainkra már kidolgozott eszközparkkal és mérési eljárásokkal, ennek lehetőségeit [123-149] vizsgálom ebben a fejezetben. Ennek megfelelően a Park-vektorok (térvektorok) diagnosztikai [23-29] alkalmazása kap [45-49] elsődleges szerepet. A nemzetközi szakirodalmak [155-160] széleskörben tárgyalják a térvektoros vizsgálatokat, ennek módszernek tanulmányozása a cél. A fejezetek több spektrumot tartalmaznak, ennek az az oka, hogy minél szélesebb jelfeldolgozási lehetőséget lehessen megismerni.

A diagnosztikai [1] vizsgálatoknál a spektrumok jelentős szerepet töltenek az időben változó jelek ábrázolásánál. A spektrumok felvételének kérdése egyrészt a motor táplálási módja (hálózat vagy frekvenciaváltó), illetve összefoglalóan a motorra kapcsolt feszültség és áram kialakuló jelalakja és ezek frekvencia komponensei [1], [71-160].

### 4. Spektrumelemzés és gépspecifikus hibák felismerésének alapvető elképzelése

A következő feladatban fel kell állítani egy gépspecifikus adatrendszert, ami a motorról minél optimálisabb képet ad. Alapvető értelmezési eljárás az áramjelből képzett spektrumok szerint történik.

A számítás, ha ismerjük [1] a gép adatait, akkor a csapágygeometriai [21], [71] adataiból a korábban bemutatott módon kiszámíthatók a jellemző frekvenciák, ezek mechanikai fordulattól származnak rezgésmérés esetén jól használható, de áramspektrumnál csak kiinduló szám adatok. Következő lépés a csapágyfrekvenciák áramjelben történő megjelenési frekvenciáinak számítása. A másik módszer arra az esetre igaz, ha nincs információ gép csapágyairól, nem vagyunk benne biztosak, hogy pontosan milyen hibafrekvenciákat kell keresni.

Ebben az esetben a spektrumelemzése modell vagy modellek segítségével lehetséges, ami vonatkozhat csak a csapágyra és/vagy forgórészre, más alkatrészekre. Ha ez sem áll rendelkezésre, akkor milyen eljárást lehet használni? A spektrumban követni kell az összes kiugró értéket. De mi számít egyáltalán kimagasló értéknek, ha nem tudjuk frekvenciához rendelni? Lehetséges pl.: forgási frekvencia többszöröseihez, oldalsávjaihoz rendelni értéket és a tápfrekvencia is látható lesz a spektrumban, illetve az alapharmonikus és oldalsávjaihoz. Ennek ellenére hogyan lehetne egy frekvenciaértéket hibásnak feltételezni? Ebben az esetben az alapharmonikusból kiindulva [35], [124-160] referencia jelet kell képezni.

$$[A_{ii}] = \text{dB}$$

A spektrumok frekvenciatartományának felvétele olyan sávban kell, hogy történjen, ami a motorban „várhatóan” előforduló jelek jellemzői láthatóak. A frekvenciaváltós üzem nagy kihívást jelent, hiszen nagy felbontást (pl.: mintavételezésben) kell biztosítani. Nagyon lényeges szempont az áramérzékelő kiválasztása, mivel az egyik létfontosságú „hordozó” a frekvencia, ha bármi is hátrányosan kezdi **befolyásolni a frekvenciaátvitelt**, nem lehet **azonosítani a kívánt hibajelet**.

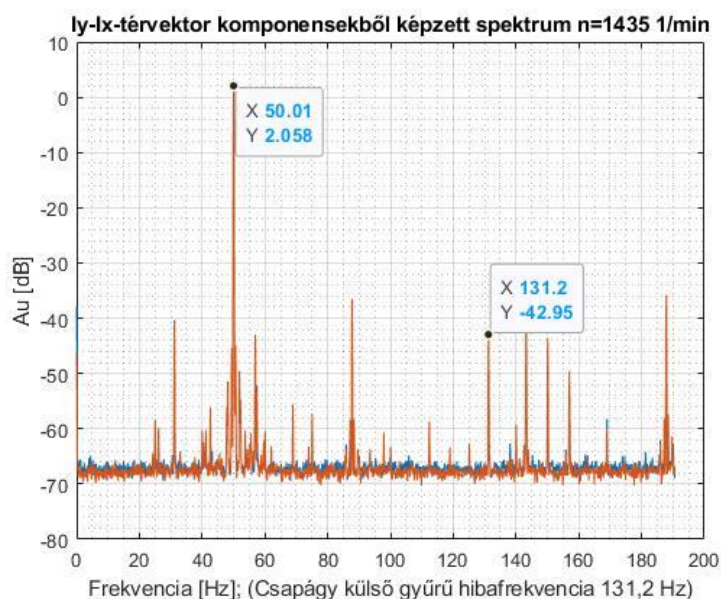
## 5. Háromfázisú aszinkron motor diagnosztikai célú térvektoros mérése szigetüzemben dolgozó szinkron generátorról

Mérési feltételek a névleges feszültség és frekvencia és stabilitás biztosítása (400 V, 50 Hz). Járatás 20 Nm állandó nyomaték esetén, a termikus hőegyensúly eléréséig. Mérés alatt minden jellemző ellenőrzése. A termikus hőegyensúly elérése után áramjel és hőmérsékleti viszonyok tisztázása. Egy melegedésmérési ciklus négy óra volt (ez az idő már túl volt termikus hőegyensúly elérésén). A mérés végén a következő alapértékek adódtak: 400 V; 50 Hz mellett; állórész áram 6,44 A, teljesítménytényező 0,84; felvett teljesítmény 3577,07 W; leadott tengely teljesítmény 3005,43 W, tengelynyomaték 20 Nm. Termikus viszonyok: állórész tekercs hőfok: 77,97 °C; forgórész hőfok: 91,11 °C ehhez tartozó fordulatszám:  $1435 \frac{1}{\text{min}}$ ; környezeti hőfok: 20,01 °C.

Több lépésben felvettem térvektor alkalmazásával az áramjelalokból képzett spektrumokat.

A számítások „kézi úton” és Matlab<sup>1</sup> használatával (illetve National Instruments DIAdem<sup>2</sup> szoftvert). A spektrumábrázolás és elemzés négy lépésben valósult meg, mert különböző frekvenciájú hibajeleket célszerű eltérő skálázással felvenni és megjeleníteni. A függőleges tengely logaritmikus, a vízszintes tengely lineáris beosztású (ettől szükség esetén eltértem).

A következőkben a spektrumok áttekintése következik. Az ábrákon fel van tüntetve az a fordulatszám, amin a mérés végzésekor érvényben volt, a motor névleges terheléssel üzemel a korábban bemutatott adatokkal. A négyzetben szereplő számértékek x-koordináta a frekvencia, y-koordináta pedig a keresett jel (vagy mért jel) és a szinusz effektív értékének hányadosa, annak logaritmus és 20-szal szorozva, decibel egységben.



5.1. ábra. Iy-Ix-térvektor komponensekből képzett spektrum 200 Hz-ig, számítás Matlab-bal.

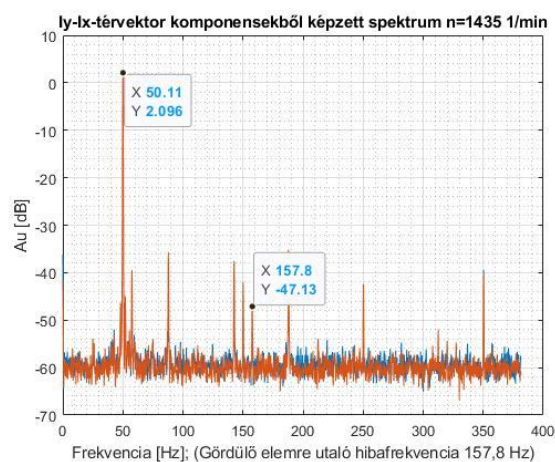
Az 5.1. ábrán látható spektrumon két frekvenciaérték van megjelölve (természetesen ettől részletesebben kell elemezni, az itt bemutatott eljárás egy kiindulási alap). Az első 50 Hz-es a térvektor szinuszához tartozó érték, a másik a 131,2 Hz-es komponens. Mire utalhat ez a jel? Az ábra alsó részén azt írom, hogy csapágy külső gyűrű

<sup>1</sup> <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

<sup>2</sup> <https://www.ni.com/hu-hu.html>

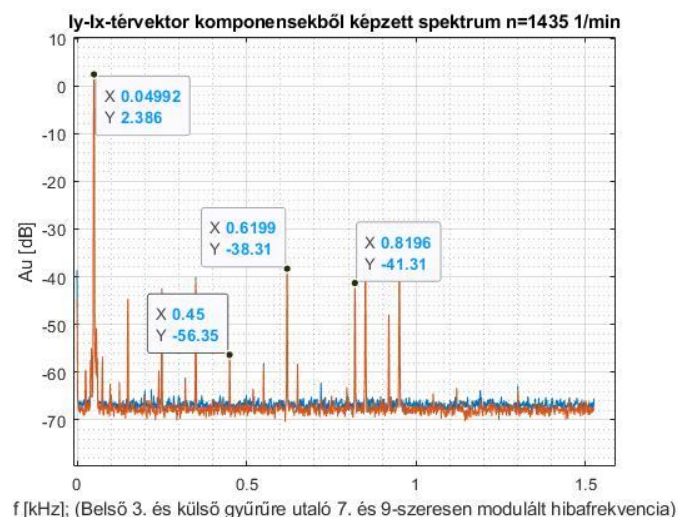
hibafrekvencia, de egy olyan esettel is szembe kell nézni, hogy a hibafrekvenciák hatnak egymásra. Ez azt jelenti, hogy a számításokat az 50 Hz moduláció miatt „nagyobb” rendszámokig el kell végezni és akkor célszerű következtetést levonni. Az állítás nem helytelen (a mérés alapján), valóban utal a csapágy külső gyűrű hibafrekvenciára, viszont egy másik összetevő is „modulál”.

A forgórészre utaló frekvencia 19. rendszámú modulált értéke „közel esik” a csapágy külső gyűrű 1. rendszámú modulált jelével. Ennek felismerése alapvető fontosságú egy gép állapotfelmérésnél. A spektrumban szereplő frekvencia utalhat mindkettőre? A motor forgórésze „jelfeldolgozás szempontjából nem teljesen ideális”, azaz a gyártási „pontatlanságok” gerjeszteni fogják a spektrumot. Ez nem azt jelenti, hogy egyértelműen a forgórész okolható hibával, hanem a rotoron kialakított kalicka és rudakban van „gyenge láncszem”, ami később hibaként persze előjöhethet, pl.: nagyobb fordulatszámokon. A csapágyhiba azért „dominánsabb”, mert ott 1. modulált értéknél jelentkeznek, a rotornál pedig 19. rendszámmal. A további elemzéshez felvettem a spektrumot nagyobb skálázásban.



5.2. ábra. Iy-Ix-térvektor komponensekből képzett spektrum 400 Hz-ig, számítás Matlab-ban.

Az 5.2. ábrán látható a térvektor Iy-Ix térvektor összetevőiből képzett spektrum 381 Hz-ig ábrázolva.

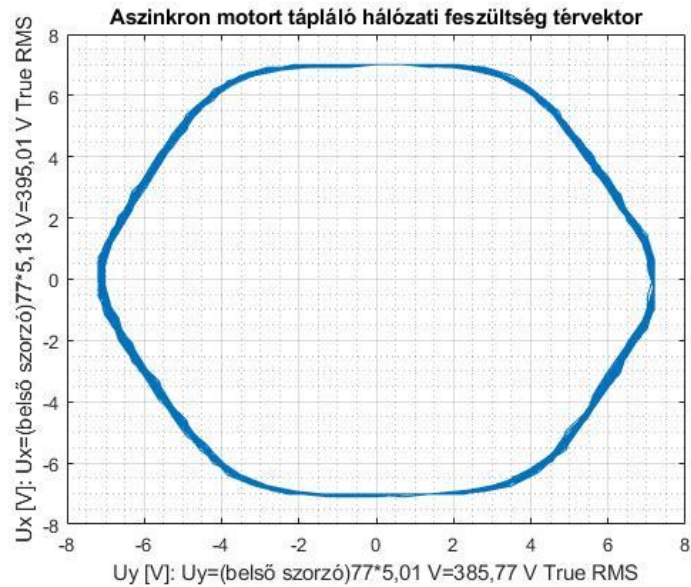


5.3. ábra. Iy-Ix-térvektor komponensekből képzett spektrum 1500 Hz-ig, számítás Matlab-ban.

A spektrumok az  $I_y$ - és  $I_x$ -térvektor összetevők szolgáltak alapjául. Matlab segítségével a mérés közbe a háromfázis áramaiból térvektort képeztem.

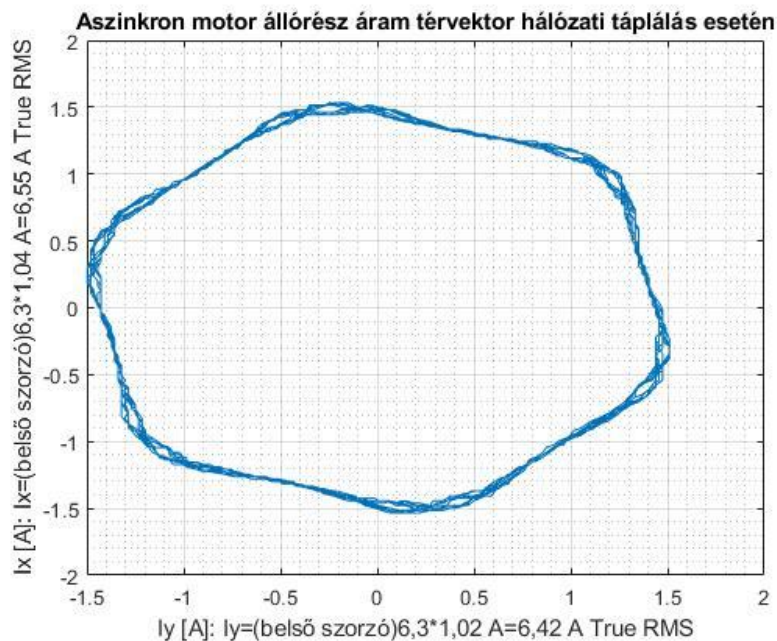
## 6. Háromfázisú aszinkron motor diagnosztikai célú térvektoros mérése hálózati táplálással

A mérés első szakaszában felvettem a hálózati feszültség térvektort a 6.1. ábrán látható módon.



6.1. ábra. Aszinkron motort tápláló hálózati feszültség térvektor

A feszültség mérés után következett az aszinkron motor állórész áram térvektor a 6.2. ábrán látható ábrát kaptam. A számítás Matlab segítségével történt.

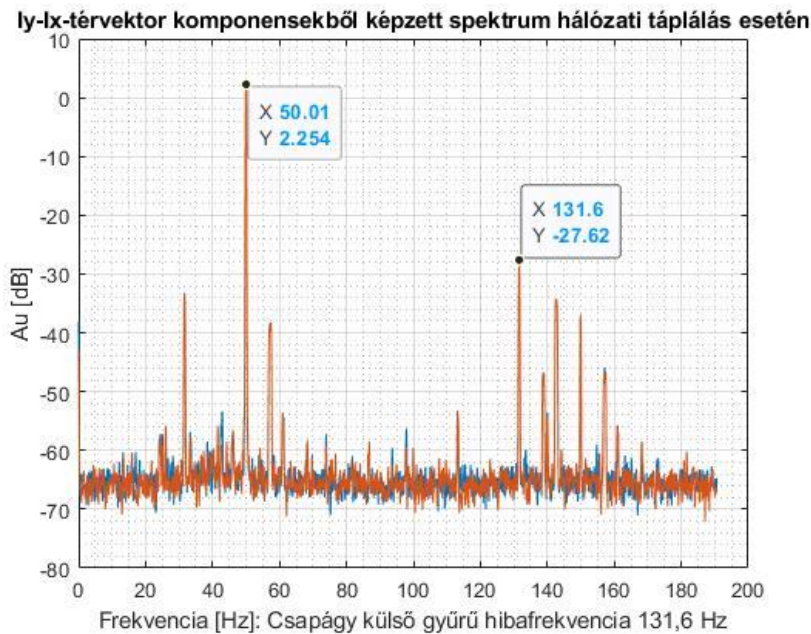


6.2. ábra. Aszinkron motor állórész áram térvektor hálózati táplálás esetén.

A hálózati táplálásnál 4-14 V-os határokbán a feszültség folyamatosan változott.

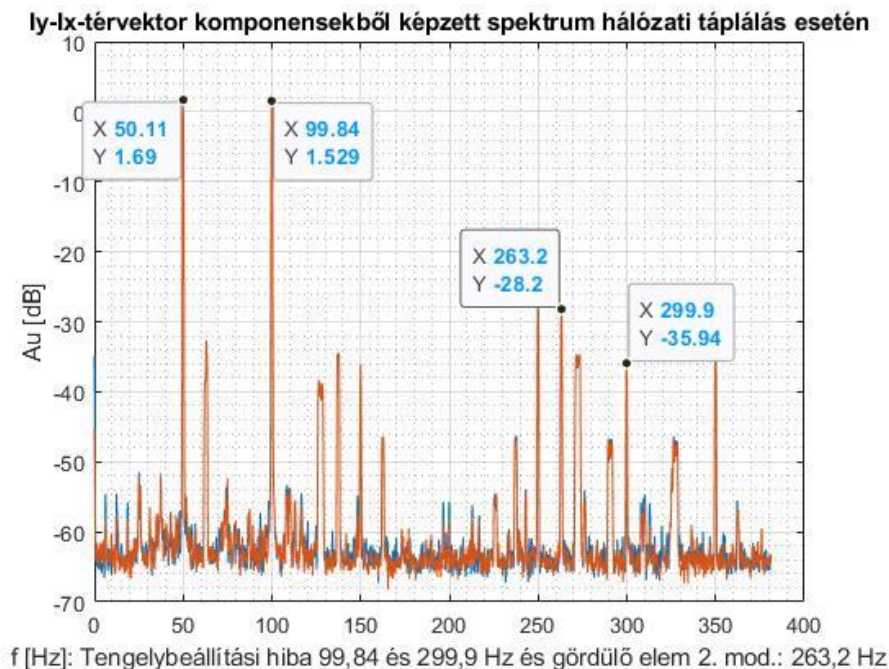


Aszinkron motor táplálása hálózatról, a mérési feltételek beállított nyomaték 20 Nm, az áram és feszültség a térvektornál bemutatott adatokkal történt. A fékpadot mindig a névleges nyomaték értékhez volt állítva és megvártam a termikus hőegyensúly elérését.



6.3. ábra. Iy-Ix-térvektor komponensekből képzett spektrum hálózati táplálás esetén.

Az első modulált harmonikusként szerepel -27,62 dB. Nézzük tovább a spektrumokat, milyen rendkívül fontos változást lehet még felfedezni? A magyarázat a 6.4. ábra alapján történik. A spektrum egy frekvencia érték már az 50 Hz-es jelhez mérhető „gerjesztést” hoz létre, ami „árulkodó” a további hibák megjelenésével kapcsolatosan.



6.4. ábra. Iy-Ix-térvektor komponensekből képzett spektrum hálózati táplálás esetén.

Ez azt is jelenti, hogy a tengelybeállítási hibával terheli a csapágy gördülő elemeit. A szinkron generátoros táplálás esetén még nem jelent meg számottevő értékkel ez a frekvencia

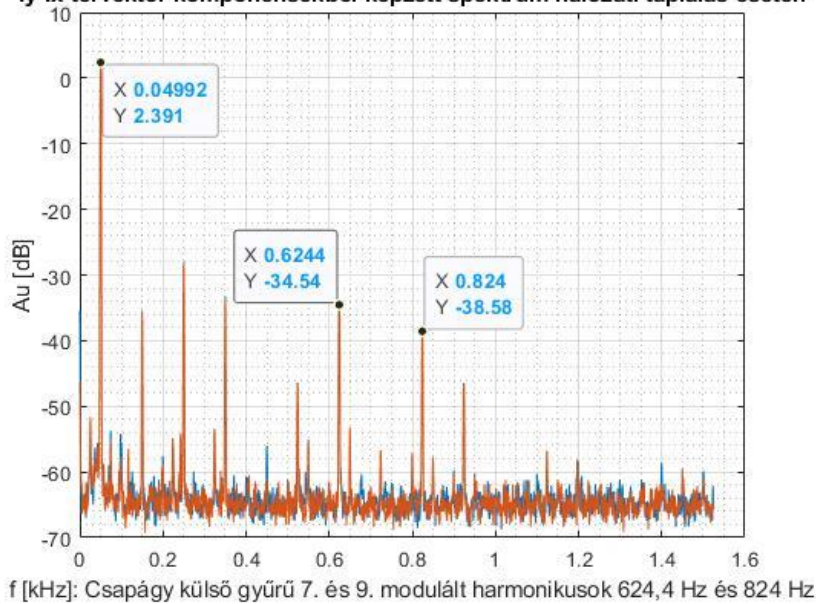
A tengelybeállítási hiba eredménye a mérési sorozat végén látható eredményt hozott. A körös tengelykapcsolón jól látható a köröm belső részén lévő sérült felület.



6.5. ábra. Tengelybeállítási hiba okozta tengelykapcsoló sérülés, belső részre eső közeli felvétel.

A vizsgálatot folytatom a legnagyobb frekvenciaosztású spektrummal.

**Iy-Ix-térvektor komponensekből képzett spektrum hálózati táplálás esetén**



6.6. ábra. Iy-Ix-térvektor komponensekből képzett spektrum hálózati táplálással.

Ezen a ponton a következő megállapításokat lehet tenni: A tengelybeállítási hiba gerjesztő hatása miatt a csapágy többlet terhelést kap és forgórész „ütési” frekvenciák is megjelennek. A mérési célja, hogy ezeket az egymásra gyakorolt hatásokat mérni lehessen és korrekciót vizsgálható legyen a spektrumok segítségével. Komoly megfigyelésnek tartom, hogy a „kisebb”, azaz, első vagy harmadik harmonikussal jelen lévő frekvencia összetevők mellett mutatkoznak meg a „magasabb”, vagyis 9. harmonikus feletti összetevők, amik egyféle előre jelzői a hibák egymásra hatásának.

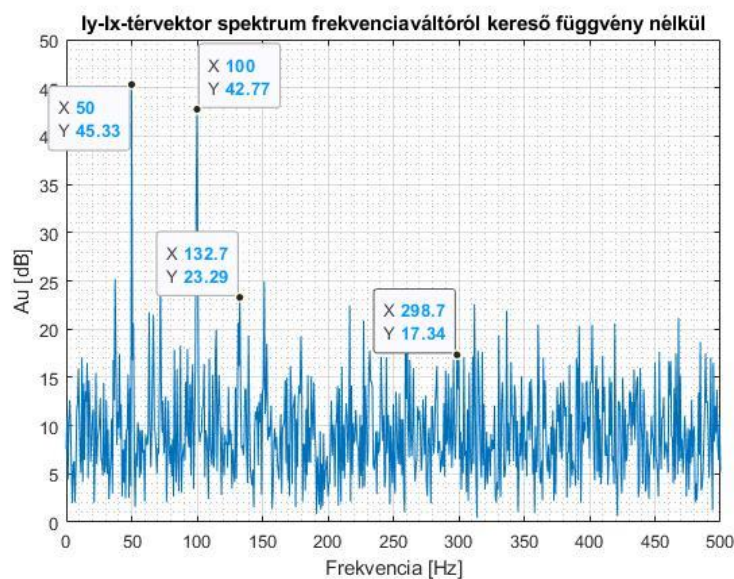
A két mérési futtatás, a szinkron generátoros és a hálózati eredménye a spektrumelemzések során, hogy sikerült a motort gyorsított öregítési szakaszba vinni.



## 7. Háromfázisú aszinkron motor diagnosztikai célú térvektoros mérése frekvenciaváltóról

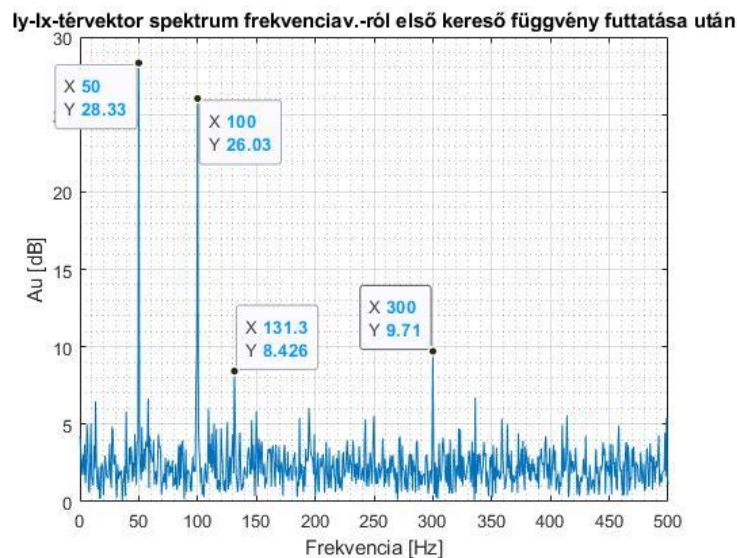
A harmadik mérési ciklus a frekvenciaváltós futtatás volt, jelfeldolgozásban „komoly” kihívást jelent a „közel szinuszos” tápláláshoz képest. A frekvenciaváltós üzem a hálózati és a szinkron generátoros tápláláshoz hasonlítva „felfogható” egy „impulzusszerű” állapotnak. A feszültség szinuszok elemzése specifikus szűrések módjával is lehetséges. A szinuszok elemzését Matlab-bal végeztem. A következő ábrákon szemléltetéssel bemutatom a „demodulációs” eljárást.

Tegyük „egy szűrési” eljárást az aszinkron motort tápláló állórész áramspektrumok esetén. Hogyan lehet megtalálni az azonosítandó frekvencia összetevőket a 7.1-5. ábrák segítségével. A program hatása, amely „felkutatja” az elemezni kívánt frekvenciájú jeleket 7.4-5. ábrán látható.

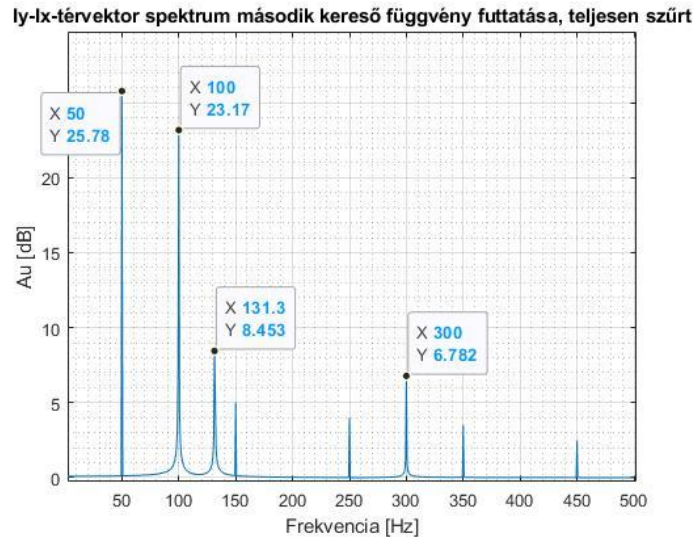


7.1. ábra. Áramjelből képzett spektrum a frekvenciaváltós üzemben, kereső függvény nélküli esetben.

Az összetevők a korábban elemzett tengelybeállítási és a csapágy külső gyűrű hiba.

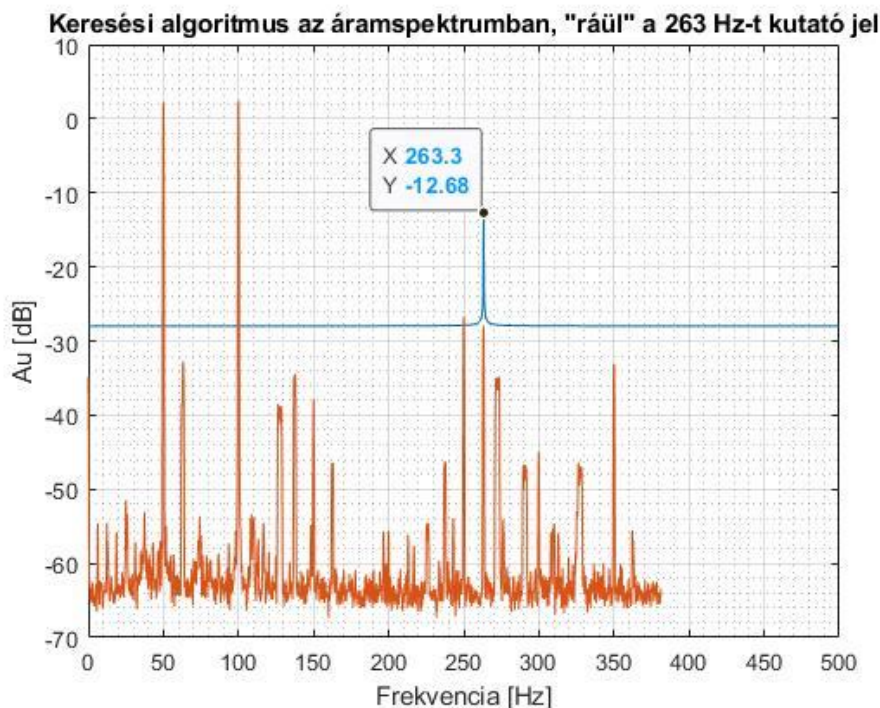


7.2. ábra. Áramjelből képzett spektrum frekvenciaváltóról táplált állapotban első kereső függvény futtatása után.

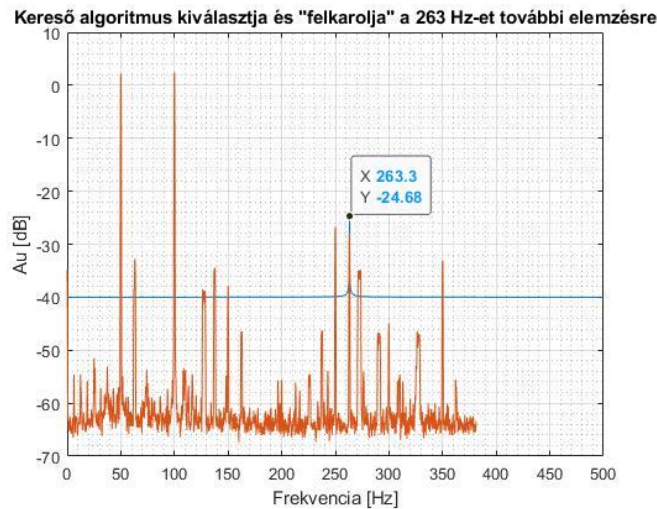


7.3. ábra. Áramjelből képzett spektrum frekvenciaváltóról táplált állapotban, teljesen „szűrt” állapotban, a keresett frekvenciájú jelekkel.

A szűrés olyan követelményeket kíván, hogy a keresett hibafrekvenciájú jelek megmaradjanak hordozóként, ha ezt kiszűrjük, akkor **azonosíthatatlan lesz** a keresett hiba. A spektrumelemzésénél a számítás megegyezik az előző fejezetekben bemutatott menettel, ezért most a számítás levezetésétől eltekintek. Egy jel komponens, **nem látható** a spektrumban, ez a **gördülő elemekre** (263,2 Hz) vonatkozó összetevő, oka egy új eljárás kidolgozása, amely „ha szükséges” meg is „**semmisíti a jelet**”. Ennek a résznek célja szűrési eljárás képszerű bemutatása. Azt is látni, hogy meg kell változtatni az eddigi programozási módszert, mert a megváltozott jelfeldolgozási követelmény teljesen más elemzést tesz szükségessé. Most pedig nézzünk a kereső algoritmus működését 6.4-5. ábrák.



7.4. ábra. A kereső algoritmus kiválasztja a jelet.



7.5. ábra. A kereső algoritmus „felkarolja” a kiválasztott jelet és további elemzést végez.

A számítás folyamatának bemutatására a spektrumokat választottam, a programnyelv hosszú, nehezen átlátható. Az algoritmus feladata a jel minél alaposabb elemzése. Ezt az eljárást jel eltávolításra is lehet használni (szoftveres elemzésben), ennek korlátja nincs, csak a valóság hű elemzés, feladattól függően. A számításra a méréskor került sor, mert úgy gondoltam, a „nagy számú” jelek elemzésére „válogatott” értelmezésre lesz szükség. Az alábbi megfogalmazásra jutottam:

### 7.1. Összefoglalás: A dolgozat újdonságkutatásának első pontja az alábbi kérdésre épül:

Háromfázisú aszinkron motor áram-térvektor komponensekből képzett spektrum (táplálás legyen hálózati vagy frekvenciaváltón keresztül) segítségével megvalósított csapágyfrekvencia keresés, azzal jellemezve, hogy az áramspektrum előállítás után és/vagy közben egy olyan kereső függvény (algoritmus) van futtatva, amely specifikusan kutatja a csapágyra utaló jeleket, aminek alaphordozója a frekvencia és szűrés előtt és után figyelembe veszi az amplitúdóváltozást. A kereső algoritmus képes jeleket „kiemelni” és „eltüntetni”, jeleket „többszörözni” is. Valamint ezeket a jeleket frekvenciaösszetevőit az áram térvektor pályageometria leírásának alapján előfordulási valószínűséggel is tudja számítani. Az algoritmus tanulja a géphibát és előállít referencia spektrumokat és ezekből térvektor mintát állít vissza.

### 7.2. Összefoglalás: A dolgozat újdonságkutatásának második kérdése:

Aszinkron motor állórész áram térvektor pályageometria alakhűségének vizsgálata ívhossz számító algoritmussal, azzal jellemezve, hogy a számítás értelmezi a pályáiv alakját és erre megfelelő integrandust választ, majd az ívhossz értékét tárolja és összehasonlítja a következő mérési eredménnyel, továbbá a kereső algoritmus „értelmezi” a vizsgált jel frekvenciáját és annak amplitúdóját. Minden jelösszetevő más-más pályageometriát képez, ennek feltérképezése a számítás alapvető feladata. Továbbá a kereső algoritmus csapágyak hibafrekvenciájának specifikált függvényeivel is rendelkezik az első állításban bemutatott módon, vagyis az algoritmus másik feladata a térvektor modell előállítása a számítás segítéséhez és/vagy élettartambecslés végrehajtása. Megjegyzendő, hogy az állítás elemei külön-külön ismert megoldások [124-160], újdonságkeresés az együttes hatásban kutatható.

## **8. Irodalomjegyzék**

- [1] Bendiák István, Aszinkron motorok diagnosztikai módszerei, TDK dolgozat, 2019 őszi félév, Budapest, 2019
- [2] Dr. Prohászka János, Bevezetés az anyagtudományba I. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1988, ISBN 963 8354 (A Szerkezetvizsgálat módszerei és mechanikai tulajdonságok című fejezetek.)
- [3] Kárász Péter, Schmidt Edit, Operációkutatás, Budapest, 2004; BMF NIK 5008; 177/2004, (85-98. oldalak, számpélda: 94-98 oldalak alapján)
- [4] Dr. Fekete István, Matematika és számítástechnika 1. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1986  
ISBN 963 10 6844 7
- [5] Dr. Fekete István, Matematika és számítástechnika 2. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1986  
ISBN 963 10 6844 7
- [6] Gáspár László, Temesi József, Lineáris programozási gyakorlatok, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1990;  
ISBN 963 18 5558 9
- [7] Dr. Tóth Irén, Operációkutatás I. Nemzeti Tankönyvkiadó Budapest, 1987, ISBN 963 19 1150 0
- [8] Dr. Csernyák László, Operációkutatás II. Nemzeti Tankönyvkiadó Budapest, 1990; ISBN 963 19 0916 6
- [9] Frederich S. Hillier, Gerald J. Liebermann, Bevezetés az operációkutatásba, LSI Oktatóközpont, A Mikroelektronika Alkalmazásának Kultúrájáért Alapítvány Budapest, 1994, ISBN 963 577134 7; Hálózatok elemzése: A PERT-CPM-módszer 237-257. oldal
- [10] <https://www.mateking.hu/szamitastudomany-alapjai/cpm-es-pert-algoritmus>
- [11] <https://www.mateking.hu/szamitastudomany-alapjai/cpm-es-pert-algoritmus/feladat-cpm-kritikus-ut-2>
- [12] <http://math.bme.hu/~hujter/klafszky.htm>
- [13] [https://www.unimiskolc.hu/~matente/oktatasi%20tananyagok/HALOZATI\\_FOLYAMOK.html#d5e2925](https://www.unimiskolc.hu/~matente/oktatasi%20tananyagok/HALOZATI_FOLYAMOK.html#d5e2925)
- [14] <http://www.inf.u-szeged.hu/~london/publ/grafalg.pdf>
- [15] Bendiák István, Aszinkron motorok újratekercselési technológiáinak hatása a magas hatásfokú aszinkron motorok paramétereire, TDK dolgozat, Budapest 2019
- [16] Peresztegi Sándor, Villamos gépek konstrukciós változatai, Budapest 2012
- [17] Peresztegi Sándor, Gyártmánydokumentáció (Aszinkron motor), Budapest, 2016
- [18] Barabás Miklós, Villamos gépek II. Műszaki Könyvkiadó 1972
- [19] Dr. Asztalos Péter, Villamos gépek II. példatár, Műszaki Könyvkiadó 1989
- [20] Jafar Zarei, Javad Poshtan, An advanced Park's vectors approach for bearing fault detection, Tribology International 42 (2009) 213-219
- [21] Jean-Claude Trigeassou, Electrical Machines Diagnosis, First published, 2011, Great Britain and the United States by ISTE Ltd and John & Sons, Inc. ISBN 978 1 84821 263 3
- [22] Dr. Nagy István, Állapotfüggő Karbantartás, Műszaki Diagnosztika I. Rezgésdiagnosztika, Delta-3N Kft. Paks, 2006
- [23] Jafar Zarei, Shirin Yousefizadeh, Department of Control Engineering, School of Electrical and Electronics Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, zarei@sutech.ac.ir, Fault Detection in Induction Motors using Park's Vector Approach and Wavelet Analysis, 2014 International Conference on Mechatronics and Control (ICMC) July 3 - 5, 2014, Jinzhou, China

- [24] Nabil Ngote, Said Guedira, Mohamed Cherkaoui and Mohammed Ouassaid, "A New Hybrid "Park's Vector – Time Synchronous Averaging" Approach to the Induction Motor-fault Monitoring and Diagnosis, J Electr Eng Technol Vol. 9, No. 2: 559-568, 2014, <http://dx.doi.org/10.5370/JEET.2014.9.2.559>
- [25] A. Siddique, G.S. Yadava, B.P. Singh, "A review of stator fault monitoring techniques of induction motors," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, no. 1, pp. 106-114, Mar. 2005.
- [26] S.M.A. Cruz, A.J.M. Cardoso, "Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's vector approach," Electric Machines and Power Systems, vol. 28, no. 4, pp. 289-299, Apr. 2000.
- [27] J.W. Zhang, N.H. Zhu, L. Yang, Q. Yao, Q. Lu, "A Fault Diagnosis Approach for Broken Rotor Bars Based on EMD and Envelope Analysis," Journal of China University of Mining and Technology, vol. 17, no. 2, pp. 205-209, Jun. 2007.
- [28] Glenn D. White, Introduction to Machine Vibration, Part Number 8569, Version 2.3, DLI Engineering Corp. 1998
- [29] James I. Taylor, The Vibration Analysis Handbook, A Practical Guide for Solving Rotating Machinery Problems, Second Edition, 2003 USA, ISBN: 0-9640517-2-9
- [30] Dr. Dömötör Ferenc, A rezgésdiagnosztika elemei, SKF Svéd Golyóscsapágy Rt. Budaörs, 1996.
- [31] Dr. Kégl Tibor, Szabó József, Műszaki diagnosztika, Kézirat, Budapest, 1993
- [32] Jafar Zarei, Javad Poshtan, Bearing fault detection using wavelet packet transform of induction motor stator current, Department of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Narmak 16846, Tehran, Iran, Received 27 November 2005; received in revised form 10 April 2006; accepted 19 July 2006 Available online 20 September 2006
- [33] Dr. Timár Peregrin László-Fazekas Albert-Kiss József-Miklós András-Dr. S. J. Yang, Villamos gépek zaja és rezgése, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1986
- [34] Lukács Ottó, Matematikai Statisztika, Műszaki Könyvkiadó, Budapest 2002
- [35] Zombori Béla, Elektronika (5.kiadás), Nemzeti Tankönyvkiadó-Tankönyvmester Kiadó, Budapest, 2004
- [36] Ctirad Smetana, Zaj-és rezgésmérés, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1975
- [37] EVIG gyártmánydokumentációs adatlap, Budapest
- [38] VZ Zárt Motorok Rövidrezárt Forgórészszel 0,55...30 kW 3 fázis, Gyártmányismertető, Kiadványszám: R-1646, Egyesült Villamosgépgyár, Budapest, X., Gyömrői út 128., 1971. szeptember
- [39] RZ, CK, CZK 225...355 Típusú Zárt, Kisfeszültségű Aszinkron Motorok 30...250 kW, Gyártmányismertető, Kiadványszám: EP-14, Egyesült Villamosgépgyár, Budapest, X., Gyömrői út 128., 1973. június
- [40] CZD Típusú Csúszógyűrűs Forgórészű Darumotorok, Gyártmányismertető, Kiadványszám: R-7816, Egyesült Villamosgépgyár, Budapest, X., Gyömrői út 128., 1981.
- [41] Я.С.Гурин, Б.И. Кузнецов (Ya.S.Gurin, B.I. Kuznecov), Проектирование Серий Электрических Машин (Villamos Gépek Sorozatának Tervezése), Москва, 1978
- [42] SKF Svéd Golyóscsapágy Részvénytársaság, H-1091 Budapest IX., Üllői út 55., 4000 H. sz. katalógus, Felelős kiadó: Kállay István igazgató, 89.0373 Kossuth Nyomda, Budapest, 1989
- [43] V. Ferno Pires, J. F. Martins, A. J. Pires, Eigenvector/eigenvalue analysis of a 3D current referential fault detection and diagnosis of an induction motor, Energy Conversion and Management 51 (2010) 901-907
- [44] R.R. Obaid, Sch. of Electr. & Comput. Eng., Georgia Inst. of Technol., Atlanta, GA, USA  
T.G. Habetler, Sch. of Electr. & Comput. Eng., Georgia Inst. of Technol., Atlanta, GA, USA



**XXXVI. Kandó Konferencia  
2020. november 19-20.**

J.R. Stack, Sch. of Electr. & Comput. Eng., Georgia Inst. of Technol., Atlanta, GA, USA

Stator current analysis for bearing damage detection in induction motors, Print ISBN: 0-7803-7838-5, Date of Conference: 24-26 Aug. 2003

[45] A. Roque, J. M. F. Calado and J. M. Ruiz, Vibration Analysis versus Current Signature Analysis, Supervision and Safety of Technical Processes, August 29-31, 2012. Mexico City, Mexico

[46] Sukhjeet Singh, Amit Kumar, Navin Kumar, Motor Current Signature Analysis for Bearing Fault Detection in Mechanical Systems, Science Direct, Procedia Materials Science 6 (2014) 171-177

[47] Bendiák István, Aszinkron motorok csapágydiagnosztikája, TDK dolgozat, Budapest 2019

[48] Izzet Önel, Mohamed Benbouzid, Induction Motors Bearing Failures Detection and Diagnosis: Park and Concordia Transform Approaches Comparative Study, Izzet Önel, Mohamed Benbouzid. Induction Motors Bearing Failures Detection and Diagnosis: Park and Concordia Transform Approaches Comparative Study. IEEE IEMDC'07, May 2007, Antalya, Turkey. 2, pp.1073-1078, 2007. <hal-00531271, HAL Id: hal-00531271 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00531271> Submitted on 2 Nov 2010

[49] Mariana IORGULESCU, Robert BELOIU University of Pitesti, Electrical Engineering Departament, Pitesti, ROMANIA, Vibration and Current Monitoring for Fault's Diagnosis of Induction Motors, Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series, No. 32, 2008; ISSN 1842-4805

[50] William H. Yeadon, PE. Editor and Chief, Alan W. Yeadon, PE. Associate Editor, Handbook of Small Electric Motors, McGraw Hill, New York, Chicago, San Francisco, Lisbon, London, Madrid, Toronto, Mexico City, New Delhi, Sydney, Toronto. 2003.

[51] Szabó József Zoltán, Rezgésdiagnosztikai vizsgálatok és haditechnikai alkalmazhatóságuk kutatása, PhD értekezés, 2010, Budapest

[52] Ahmed Alwodai, Tie Wang, Zhi Chen, Fendshou Gu, Robert Cattley, Andrew Ball, A Study of Motor Bearing Fault Diagnosis Using Modulation Signal Bispectrum Analysis of Motor Current Signals, Journal of Signal and Information Processing, 2013, 4, 72-79

[53] Neelam Mehala #1, Ratna Dahiya \*2, Detection of Bearing Faults of Induction Motor Using Park's Vector Approach, 1# Department of Electronics and Communication Engineering YMCA University of Science and Technology, Faridabad-121006(Haryana) INDIA, 2\* Department of Electrical Engineering National Institute of Technology Kurukshetra-136119 (Haryana) INDIA, Neelam Mehala et al. /International Journal of Engineering and Technology Vol.2(4), 2010, 263-266

[54] M.S. Othman1\*, M.Z. Nuawi1 and R. Mohamed2, Induction Motor Bearing Fault Diagnostics Using i-kaz™ and Decision Tree Classification, 1Department of Mechanical and Material Engineering, 2Department of Electrical, Electronic and Systems Engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia, Jalan Bangi 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia. \*Email: sufian@jkr.gov.my, International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME) ISSN: 2229-8649 (Print); ISSN: 2180-1606 (Online); Volume 13, Issue 2 pp. 3361 - 3372, September 2016 ©Universiti Malaysia Pahang Publishing

[55] Partha Sarathee Bhowmik1, Sourav Pradhan2 and Mangal Prakash3, Fault Diagnostic and Monitoring Methods of Induction Motor: A Review, 1Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Durgapur, India, 2Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Durgapur, India, 3Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Durgapur, India, International Journal of Applied Control, Electrical and Electronics Engineering (IJACEEE) Volume 1, Number 1, May 2013

- [56] WEIDONG LI Pinchin Environmental Ltd, 5749 Coopers Avenue, Mississauga, Ontario, L4Z 1R9, Canada, CHRIS K. MECHEFSKE Department of Mechanical and Materials Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, K7L 3N6, Canada (chrism@me.queensu.ca), Detection of Induction Motor Faults: A Comparison of Stator Current, Vibration and Acoustic Methods, (Received 10 August 2004 accepted 24 October 2005)
- [57] Muhammad Aman Sheikh, Nursyarizal Mohd Nor, Taib Ibrahim, Sheikh Tahir Bakhsh, M.Irfan, Nordin B Saad, An Intelligent Automated Method to Diagnose and Segregate Induction Motor Faults, J. Electrical Systems 13-2 (2017): 241-254
- [58] Akshat Singhal, Meera A. Khandekar, Bearing Fault Detection in Induction Motor Using Motor Current Signature Analysis, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering Vol. 2, Issue 7, July 2013
- [59] Martin Blödt, Pierre Granjon, Bertrand Raison, Jérémie Regnier, Mechanical Fault Detection in Induction Motor Drives Through Stator Current Monitoring - Theory and Application Examples, HAL Id: hal-00485734 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00485734> Submitted on 21 May 2010,
- [60] Sukhjeet Singh, Amit Kumar, Navin Kumar, Motor Current Signature Analysis for Bearing Fault Detection in Mechanical Systems, 3rd International Conference on Materials Processing and Characterisation (ICMPC 2014), ScienceDirect
- [61] A Dissertation by Lin Wang, Induction Motor Bearing Fault Detection Using a Sensorless Approach, Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, May 2007
- [62] Mounir Djeddi, Member IEEE, Pierre Granjon, and Benoit Leprettre, Bearing Fault Diagnosis in Induction Machine Based on Current Analysis Using High-Resolution Technique, Date Added to IEEE Xplore: 04 December 2007
- [63] Retter Gyula: Egységes villamos gép elmélet, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1976
- [64] SILEX IPARI AUTOMATIZÁLÁSI KFT. TMI-02 Villamos forgatónyomatékmérő műszer, Használati útmutató, Azonosítószám: 300-01-01-090-2.1, 2000 november
- [65] Norbert Hesselmann, Digitális jelfeldolgozás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985
- [66] Farkas András-Gemeter Jenő-Nagy Lóránt: Villamos gépek, ÓE-KVK 2043, Budapest, 2010
- [67] Kovács K. Pál: Villamos gépek tranziens folyamatai, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1970
- [68] Halász Sándor: Villamos hajtások, Havas&Társ, Budapest, 1987
- [69] Halász Sándor: Automatizált villamos hajtások I., Tankönyvkiadó, Budapest, 1989
- [70] Halász Sándor-Hunyár Mátyás-Schmidt István: Automatizált villamos hajtások II., Műegyetem Kiadó, Budapest, 1998
- [71] Lipovszky György, Sólyomvári Károly, Varga Gábor, Gépek rezgésvizsgálata és a karbantartás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981
- [72] Molnár László, dr. Varga László, Gördülőcsapágyazások tervezése, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977
- [73] By Brian P. Graney and Ken Starry, Rolling Element Bearing Analysis, From Materials Evaluation, Vol. 70, No. 1, pp: 78-85, Copyright 2011 The American Society for Nondestructive Testing, Inc. Materials Evaluation-January 2012
- [74] AS 2625 Part 1 – 'Rotating and Reciprocating Machinery' - Mechanical Vibration: Part 1- Basis for Specifying Evaluating Standards; AS 2625 Part 1 Severity Guidelines; AS 2625 Part 4 – 1986 „Measurement and Evaluation

**XXXVI. Kandó Konferencia  
2020. november 19-20.**

of Vibration Severity of Small Rotating Machines”. For machines with power ratings less than 300 kW; AS 1359 Part 114-1997 „Rotating Electrical Machines-General Requirements. Part 114: Vibration Measurements and Limits” ;ISO 10816-1:1995 (E). Part 1: General Guidelines.

[75] Mariana IORGULESCU, Robert BELOIU University of Pitesti, Electrical Engineering Departament, Pitesti, ROMANIA, Vibration and Current Monitoring for Fault’s Diagnosis of Induction Motors, Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series, No. 32, 2008; ISSN 1842-4805

[76] SKF Bearing Calculator program: Csapágy típusára ellenőrzött számítás és a csapágyfrekvenciák értékeinek, elnevezéseinek a származási helye: Oldal cím:

<http://webtools.skf.com/BearingCalc/submitCalculation.action?null&ni=1425&ne=0>

[77] SKF online csapágy katalógus: Oldalcím:

<https://www.skf.com/us/knowledge-centre/engineering-tools/skfbearingcalculator.html>

[78] SKF online katalógus csapágy geometriai adatainak megismerése céljából: Oldalcím

<https://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/index.html?designation=6206>

[79] <http://www.jp.nsk.com/app02/BearingGuide/html/bearing32765.htm#>

[80] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, The Finite Element Method, McGraw-Hill 1989.

[81] P.P. Silvester, R.L. Ferrari, Finite Elements for Electrical Engineers, Third Edition, Cambridge University Press, 1996.

[82] J.L. Coulomb, G. Meunier, "Finite element implementation of virtual work principle for magnetic or electric force or torque computation", IEEE Trans.Magn. Vol.20 no 5, pp.1894-1896, 1984.

[83] Z. Ren, A. Razek, "Local force computation in deformable bodies using edge elements", IEEE Trans.Magn., Vol.28, 1992, pp.1212-1215.

[84] J.T. Oden, Mechanics of Elastic Structures, McGraw-Hill 1967.

[85] W.T. Thomson, Theory of Vibrations with Applications, Fourth Edition, Prentice-Hall 1993.

[86] L. Meirovich, Computational Methods in Structural Dynamics, Sijthoff & Noordhoff 1980.

[87] W. Heylen, S. Lammens, P. Sas, Modal Analysis Theory and Testing, Katholieke Universiteit

[88] Bendiák István, Villamos hajtásrendszerek rezgései, XXXIII. Kandó Konferencia, Budapest, 2017

[89] William H. Yeadon, PE. Editor and Chief, Alan W. Yeadon, PE. Associate Editor, Handbook of Small Electric Motors, McGraw Hill, New York, Chicago, San Francisco, Lisbon, London, Madrid, Toronto, Mexico City, New Delhi, Sydney, Toronto. 2003.

[90] Ali Emadi, Energy-Efficient Electric Motors, Third Edition, Revised and Expanded, 2005, Founding Editor, Marlin O. Thurston, Department of Electrical Engineering, The Ohio State University Columbus, Ohio.

[91] Irving Gottlieb, Practical Electric Motor Handbook (Villamos motorok gyakorlata kézikönyv) (94-96 old. , 160. old.), An imprint of Butterworth-Heinemann, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, first published 1997.

[92] Andrzej M. Trzynadlowski, Control of Induction Motors, Department of Electrical Engineering, University of Nevada, Academic Press, 2001.

[93] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, IEEE Power Engineering Society, 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA, 1 November 2004.



- [94] B. Teraja Textbook of Electrical Technology AC and DC Machines, Volume II. 2006 (500-506 old.)
- [95] M. A. Laughton CEng., D. J. Warne CEng, Electrical Engineers Reference Book, Sixteenth edition 2003, Oxford. (706-708 old.)
- [96] Malcolm Barnes, Variable Speed Drives and Power Electronics, First published 2003, An imprint of Elsevier, Printed and bound in Great Britain, Oxford.
- [97] Szabadalmi leírás: Device for Varying the Number of Poles in Alternate-Current Motors. Robert Dahlander. Specification Forming Part of Letters Patent No. 725,415, dated April 14, 1903.
- [98] Szabadalmi leírás: azonosító szám: US006088906A, cím: Method of Manufacturing Squirrel Cage Rotors, Patent Number: 6,088,906 Date of Patent: Jul. 18, 2000.
- [99] Szabadalmi leírás: JP2013051766, Squirrel Cage Rotor and Rotary Electric Machine, dátum: 2013. 03. 14.
- [100] Szabadalom: Inventor: Voggeser Volker, Thumm Gerhard, Wolf Michael. Cím: Squirrel Cage Cotor and its Component Parts and Method for Producing a Squirrel Cage Rotor. N0: EP2782222, 2014. 09. 24.
- [101] Használatiminta: CN202135022, inventor: Jiwei LV; Dun LI. Cím: Three-Phase Asynchronous Motor Capable of Adjusting Locked Totor Torque. 2012. 02. 01.
- [102] Szabadalom: CN102244444, inventor: Jiwei LV; Dun LI. Cím: Three-Phase Asynchronous Motor with Adjustable Locked Rotor Torque. 2011. 11. 16.
- [103] Günter; Flachmann, Horst (1983). Die Meisterprüfung Elektrische Maschinen und Steuerungstechnik (in German) (4 ed.). Würzburg,Germany: Vogel-Verlag.
- [104] Liska József, Villamos Gépek IV. Aszinkron gépek, harmadik kiadás, Tankönyvkiadó, Budapest 1968, (40-50 old.)
- [104] Nemzetközi szabadalmi adatbázis: Espacenet (EPO)
- [105] Nemzetközi szabadalmi adatbázis: Google Patens
- [106] Szabadalmi bejelentés: JP2013051766, Squirrel Cage Rotor and Rotary Electric Machine, dátum: 2013. 03. 14.
- [107] Szabadalom: UA81804, inventor: Petrenko Oleksandr Mykolaiovych, cím: Asynchronous Electric Motor. 2008. 02. 11.
- [108] Szabadalom:2/10 Pole Double-Winding Double Speed Three Phase Asynchronous motor, inventor: Yu Haigang, azonosítószám: CN203674839, dátum: 2014. 06. 26.
- [109] Szabadalom: 2/8 Pole Duplex Winding Double-Speed Three Phase Asynchronous Motor, inventor: Yu Haigang, azonosítószám: CN203608054, dátum: 2014. 05. 21.
- [110] Szabadalom: 4/10 Pole Duplex Winding Double-Speed Three Phase Asynchronous Motor, inventor: Yu Haigang, azonosítószám: CN203608053, dátum: 2014. 05. 21.
- [111] Szabadalom: 2/6 Pole Duplex Winding Double-Speed Three Phase Asynchronous Motor, inventor: Yu Haigang, azonosítószám: CN203608052, dátum: 2014. 05. 21.
- [112] Szabadalom: 4/8 Pole Duplex Winding Double-Speed Three Phase Asynchronous Motor, inventor: Yu Haigang, azonosítószám: CN203607950, dátum: 2014. 05. 21.
- [113] Szabadalom: 6/10 Pole Duplex Winding Double-Speed Three Phase Asynchronous Motor, inventor: Yu Haigang, azonosítószám: CN203589978, dátum: 2014. 05. 07.
- [114] Szabadalom: 8/12 Pole Duplex Winding Double-Speed Three Phase Asynchronous Motor, inventor: Yu Haigang, azonosítószám: CN203589977, dátum: 2014. 05. 07.

**XXXVI. Kandó Konferencia  
2020. november 19-20.**

- [115] Szabadalom: 6/8 Pole Duplex Winding Double-Speed Three Phase Asynchronous Motor, inventor: Yu Haigang, azonosítószám: CN203589914, dátum: 2014. 05. 07.
- [116] Szabadalom: 4/12 Pole Duplex Winding Double-Speed Three Phase Asynchronous Motor, inventor: Yu Haigang, azonosítószám: CN203589874, dátum: 2014. 05. 07.
- [117] Szabadalom: 8/10 Pole Duplex Winding Double-Speed Three Phase Asynchronous Motor, inventor: Yu Haigang, azonosítószám: CN203589873, dátum: 2014. 05. 07.
- [118] Szabadalom: 4/6 Pole-Changing Double Winding Double-Speed Three Phase Asynchronous Motor, inventor: Yu Haigang, azonosítószám: CN202634223, dátum: 2012. 12. 26.
- [119] Szabadalom: 2/4 Pole Single Winding Double-Speed Three Phase Asynchronous Motor, inventor: Yu Haigang, azonosítószám: CN202076901, dátum: 2011. 12. 14.
- [120] Szabadalom: Torque Rise Double-Speed Motor, inventor: Chao Huiyan, azonosítószám: CN202978577, dátum: 2013. 06. 05.
- [121] Szabadalom: Three Phase, Pole-Changing Rotary Electric Machines, inventor: Gordon Hindle Rawcliffe, Bristol, England, assignor to National Research Development Corporation, London, England. Filed, Apr. 13, 1962, Ser. No. 187,249, Claims priority, application Great Britain, Apr. 20, 1961. US3175144
- [122] Bendiák István, Aszinkron gépek gyakorlati kérdései, Budapest 2015 (2015-ben lezárt majd 2017-ben Dunaujvárosban bemutatott OTDK dolgozat)
- [123]<https://patents.google.com/?q=bearing&q=fault+asynchronous&q=motor&oq=bearing+fault+asynchronous+motor>
- | Publication   | Publication Date           | Title   |
|---|----------------------------|---|
| Tématerülethez kapcsolódó szabadalmak világviszonylatban: |                            |   |
| [124]   | Henao et al. 2005          | Analytical approach of the stator current frequency harmonics computation for detection of induction machine rotor faults                         |
| [125]   | Shah et al. 2009           | Stator-interturn-fault detection of doubly fed induction generators using rotor-current and search-coil-voltage signature analysis                |
| [126]   | US5270640A 1993-12-14      | Method for incipient failure detection in electric machines   |
| [127]   | Zhang et al. 2003          | A novel detection method of motor broken rotor bars based on wavelet ridge  |
| [128]   | Puche-Panadero et al. 2009 | Improved resolution of the MCSA method via Hilbert transform, enabling the diagnosis of rotor asymmetries at very low slip                        |
| [129]   | Drif et al. 2014           | Stator fault diagnostics in squirrel cage three-phase induction motor drives using the instantaneous active and reactive power signature analyses |
| [130]   | Kim et al. 2003            | Sensorless fault diagnosis of induction motors  |
| [131]   | Djurovic et al. 2012       | Condition monitoring of wind turbine induction generators with rotor electrical asymmetry   |
| [132]   | Kliman et al. 1997         | Sensorless, online motor diagnostics  |
| [133]   | CN103328990B 2017-03-22    | A method and apparatus for diagnosis of the transformer   |
| [134]   | US7042229B2 2006-05-09     | System and method for on line monitoring of insulation condition for DC machines  |
| [135]   | US6236227B1 2001-05-22     | Method and apparatus for turn fault detection in multi-phase AC motors  |

- [136] CN103782509B 2016-11-09 Fault detection system for inner winding of the synchronous generator, a computer program product and method
- [137] CN102565574B 2014-10-29 Ship power quality monitoring system
- [138] CN202735425U 2013-02-13 Power transformer fault detection system based on vibration
- [139] CN101930047B 2012-12-12 On-line monitoring device of transformer winding state and monitoring method thereof
- [140] CN101188354B 2010-06-09 Test simulation method for failure line selection of small current ground system
- [141] Frosini et al. 2012 A novel approach to detect short circuits in low voltage induction motor by stray flux measurement
- [142] CN101017191A 2007-08-15 On-line fault diagnosis method on rotor winding inter turn short-circuit of turbine generator
- [143] US20050218906A1 2005-10-06 System and method for monitoring of insulation condition
- [145] US8536839B2 2013-09-17 Device and method for monitoring and/or analyzing rotors of electric machines in operation
- [146] CN102484365A 2012-05-30 A method of fault phase selection and fault type determination
- [147] CN100462729C 2009-02-18 On-line monitoring method for winding turn-to-turn short-circuit of distribution generator stator based on multi-criterion mixing
- [148] US7081760B2 2006-07-25 Method of diagnosing a broken bar fault in an induction motor
- [149] George B. Thomas, Maurice D. Weir, Joel Hass, Frank R. Giordano, Thomas-féle Kalkulus 2. Második kiadás. II. kötet, Typotex Budapest 2010, 93-93 oldalak.
- [150] Bárczy Barnabás, Integrálszámítás példatár, 7. kiadás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1997, ISBN 963 16 1085 5 (hetedik kiadás), felhasznált oldalak: 7-30. és számpélda alapját képezte a 4. példa feladata 249-250. oldalak
- [151] Reiman István, Matematika, Typotex, Budapest, 2011, ISBN 978 963 279 300 9
- [152] Kármán Tódor; Maurice A. Biot, Matematikai módszerek műszaki feladatok megoldására, Műszaki Könyvkiadó Budapest, 1963
- [153] Dr. Nagy István, Baksai Gábor, Dr. Sólyomvári Károly, Állapotfüggő Karbantartás, Műszaki Diagnosztika II., Termográfia, Delta-3N Kft. 7030 Paks, Jedlik Á. u. 2. 2007, ISBN 978 963 06 0808 4
- [154] Rahne Eric, Termográfia, Elméleti és gyakorlati mérés technika, Invest-Marketing Bt., Budapest 2018, ISBN 978-963-87401-6-8
- [155] Alain Glumineau • Jesús de León Morale, Sensorless AC Electric Motor Control, Robust Advanced Design Techniques and Applications, Springer, ISSN 1430-9491 ISSN 2193-1577 (electronic), Advances in Industrial Control ISBN 978-3-319-14585-3 ISBN 978-3-319-14586-0 (eBook) DOI 10.1007/978-3-319-14586-0
- [156] W.T. Thomson, M. Fenger, "Case histories of current signature analysis to detect faults in induction motor drives," in Proc. IEMDC'03, 2003, pp. 1459-1465.
- [157] C. J. Dister and R. Schiferl, "Using temperature, voltage, and/or speed measurements to improve trending of induction motors RMS currents in process control and diagnostics," in Proc. IAS Annual Meeting, 1998, pp. 312-318.

**XXXVI. Kandó Konferencia  
2020. november 19-20.**

[158] L. Serrano Iribarnegaray, "The Modern Space Vector Theory, Part I: Its Coherent Formulation and Its Advantages for Transient Analysis of Converter-Fed AC Machines," *European Transactions on Electrical Power*, vol. 3, no. 2, pp. 171-180, Mar.-Apr. 1993.

[159] A.H. Bonnett, G.C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, no. 4, pp. 921-937, Jul.-Aug. 1992.

[160] Edited by Rui Esteves Araújo, *Induction Motors – Modelling and Control*, Published by InTech, Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, First published, November, 2012

Printed in Croatia, ISBN 978-953-51-0843-6

[161] A cikk a GINOP-2.3.4-15-2016-00003, „Felsőoktatási és Ipari Együtműködési Központ – Kutatási infrastruktúra fejlesztése Felsőoktatási és Ipari Együtműködési Központ a Széchenyi István Egyetemen” című pályázat támogatásával készült. This work was supported by FIEK program (Center for cooperation between higher education and the industries at the Széchenyi István University, GINOP-2.3.4-15-2016-00003)

# Epitaxiás nano-struktúrák térfogatmeghatározásának néhány aspektusa

**Zoltán Farkas, Antal Ürmös, Ákos Nemesics**

Óbudai Egyetem, Mikroelektronikai és Technológiai Intézet, 1084 Budapest,  
Tavaszmező utca 17. farkas.zoltan@uni-obuda.hu, urmos.antal@uni-obuda.hu,  
nemesics.akos@uni-obuda.hu.

---

*Abstract: Jelen munkában az epitaxiálisan növesztett nano-struktúrák térfogatmeghatározás néhány vonatkozását tárgyaljuk. A csepp-epitaxia lehetővé teszi a változatos formájú és térfogatú nanostruktúrák előállítását. Ezt a változatos formavilágot írjuk le hiperbolikus függvényekkel. A nano-struktúrák folyonos-átmenetű leírását valósítjuk meg állandó térfogat feltétel mellett a függvény-paraméter-függvények meghatározásával. Ez lehetőséget ad számunkra a térfogat analitikus meghatározására. A dolgozat végén a hiperbolikus burkológörbéjű nano-objektumok térfogatmeghatározásának néhány aspektusát említjük meg.*

*Keywords: epitaxia, nano-struktúrák, napelem*

---

## 1 Bevezetés

Az alacsony-dimenziós rendszerek, ezen belül a zéró-dimenziós (0D) nano-struktúrák a félvezető-tudományi kutatások és a félvezetőeszköz-fejlesztések homlokterében állnak. Ezen alacsony-dimenziós struktúrák félvezetőeszközökben való alkalmazása a tulajdonságokat drasztikusan javítja. Két-dimenziós (2D) rendszer a tranzistorban megnöveli a működési frekvenciát. Optikai eszközökben a hatásfokot. 2D nélküli LED-et már nem is lehet kapni. A napelem hatásfokát a 2D-ből álló szuperrács 40 % fölé emeli [1]. Újabb lépcső az epitaxiális 0D struktúrák. A napelemekben ez 60-80 %-os hatásfok-növekedést eredményez. De megoldás lehet a számítástechnika jelen problémáira is [2].

A 0D epitaxiás nano-struktúrák előállításának ipari méretekben alkalmazott módja s feszültség-indukált eljárás. Ennek a módszernek mind anyagválasztás mind pedig az eredményül kapott struktúrát illetően korlátai vannak. E módszer alternatívája a csepp-epitaxia. E módszer lehetővé teszi változatos formájú, felületi sűrűségű és térfogatú nano-objektumok előállítását [3].

Az eszközökben való alkalmazást illetően alapvető fontosságú, hogy a felületen megjelenő nano-struktúrák alakját és térfogatát meg tudjuk határozni. Ezek mind elektromos-struktúra-meghatározás, mind pedig technológiai szempontból fontosak. A változatos formát összetett hiperbolikus függvényekkel írhatjuk le [4]. Dolgozatunkban bemutatjuk a struktúrák átmeneteinek állandó térfogat feltétel mellett meghatározott függvény-paraméter függvényeit. A dolgozat végén a térfogati integrálás néhány aspektusát tárgyaljuk.

## 2 A változatos nano-struktúra formák leírása

A korábbi munkáinkban a nano-struktúrák geometriai jellemzésére négy paramétert ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ) használtunk [5]. A paraméterek definíciója az 1. ábrán látható. Első közelítésben a nano-struktúrákat körszimmetrikusnak vesszük, így keresztmetszetük által leírhatóak.

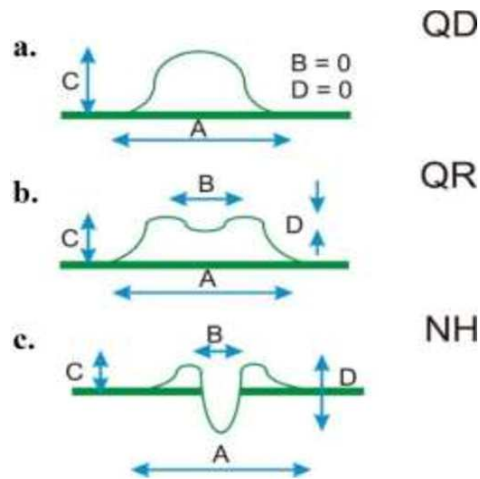


Figure 1

Az epitaxiális nano-struktúrák geometriai paraméterei [5].

A számításainkban a nano-struktúrák geometriai paraméterei helyett összetett hiperbolikus függvény paramétereket használtunk [4]. A hiperbolikus függvényekkel ill. paramétereivel nem csak a jellemző ill. szinguláris pontok távolságait adjuk meg hanem a struktúra alakját is megadjuk. A számításainkban használt összetett hiperbolikus függvények az alábbiakban látható.

$$y = A_1 * \operatorname{sech}^2(\alpha_1 x) - 2A_2 * \operatorname{sech}^4(\alpha_2 x) + 4 * A_2 * \operatorname{sech}^2(\alpha_2 x) * \tanh^2(\alpha_2 x)$$

$$y = A_1 \left( \frac{2}{e^{\alpha_1 x} + e^{-\alpha_1 x}} \right)^2 - 2A_2 \left( \frac{2}{e^{\alpha_2 x} + e^{-\alpha_2 x}} \right)^4 + 4A_2 \frac{(e^{\alpha_2 x} - e^{-\alpha_2 x})^2}{(e^{\alpha_2 x} + e^{-\alpha_2 x})^4}$$

A függvény négy paraméterét ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ) változtatva azt tűztük ki, hogy a kvantumpont – kvantumgyűrű – nanolyuk (QD - QR - NH) spektrumon keresztülhaladva olyan struktúrák keresztmetszetét kapjuk meg, amelyek magassága 7 egység, alapkörének sugara pedig 30 egység. A magasság 0 szinthez képest egyértelműen meghatározható, viszont a szóban forgó hiperbolikus függvényre jellemző, hogy semmilyen véges  $x$  értékre nem ad pontosan 0-t. Így ha ragaszkodunk az alapkör azon definíciójához, hogy az alapkör annak a tartománynak az átmérője, ahol a függvény 0, akkor a legtöbb esetben végtelent kapunk erre a mennyiségre. Ezért az általános műszaki (matematikai) gyakorlatnak megfelelően az alapkör definíciójaként azt választottuk, hogy „annak a tartománynak az átmérője, ahol a struktúra magassága nagyobb, mint a magasság 5%-a”. A modellünk szerint egy egységnek egy nanométert feleltetünk meg.

### 3 A függvény-paraméter függvények meghatározása

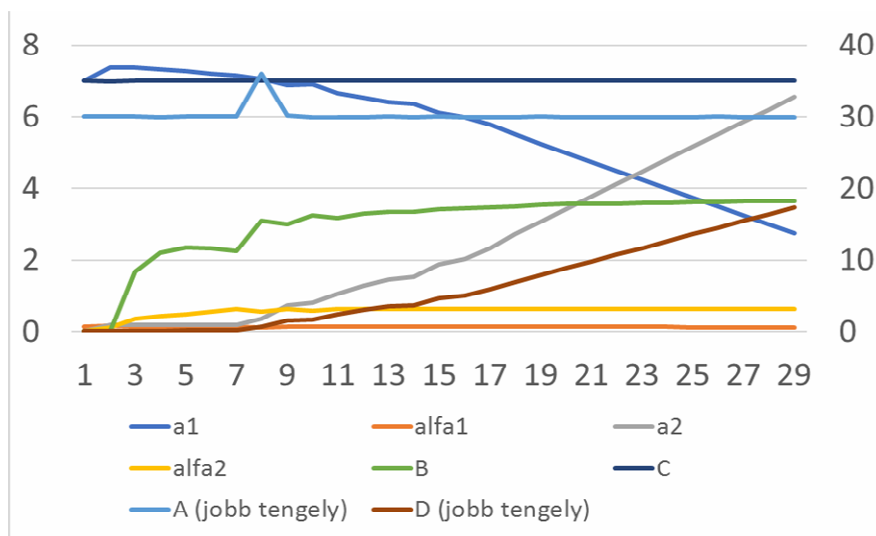
Négy kísérletsorozatot végeztünk, mindegyikhez mellékeljük a beállított hiperbolikus paraméterek négy oszlopát, az eredményül kapott geometriai paraméterek négy oszlopát tartalmazó táblázatot.

A táblázatból látható, hogy az  $a_1$  paraméter lassan csökken, az  $a_2$  paraméter lassan nő, az  $\alpha_1$  és  $\alpha_2$ , eltekintve a kezdeti (QD, alacsony  $D$  paraméterű QR) ingadozásoktól, gyakorlatilag változatlan. A geometriai  $A$  paraméter (alapkör átmérő) és a  $C$  paraméter (struktúramagasság) a fentieknek megfelelően állandó, hiszen ez volt a cél a hiperbolikus paraméterek beállításánál. A  $B$  paraméter (gyűrűátmérő) lassan nő, de nagyjából 3 nm körül alakul, a  $D$  paraméter (gyűrű illetve nanolyuk középső „bemélyedése” a struktúra legmagasabb pontjához képest) lassan nő.

1. Táblázat

hiperbolic parameters				geometric parameters			
a1	alfa1	a2	alfa2	A (jobb tengely)	B	C	D (jobb tengely)
7.002	0.145	0	dont care	30.04	-	7.002	-
7.37	0.157	0.195	0.107	30.04	0	6.98	0
7.375	0.146	0.195	0.357	30.02	1.68	6.999	0.014
7.32	0.147	0.195	0.425	29.94	2.2	6.996	0.066
7.27	0.146	0.195	0.495	30.08	2.34	7.01	0.13
7.21	0.146	0.195	0.56	30.04	2.32	7.002	0.182
7.165	0.146	0.195	0.624	30	2.26	7	0.225
7.065	0.121	0.37	0.566	36.06	3.1	7.005	0.68
6.871	0.144	0.74	0.644	30.12	3	7.001	1.61
6.896	0.145	0.811	0.588	29.92	3.26	7.002	1.728
6.666	0.144	1.066	0.636	29.9	3.18	6.999	2.465
6.526	0.143	1.281	0.625	29.96	3.3	6.995	3.031
6.411	0.142	1.451	0.625	30.04	3.34	7	3.491
6.351	0.142	1.531	0.625	29.98	3.36	6.995	3.706
6.111	0.14	1.886	0.625	30.1	3.42	7.009	4.67
5.996	0.14	2.031	0.625	29.98	3.44	6.995	5.061
5.791	0.139	2.326	0.625	29.92	3.46	7	5.861
5.506	0.137	2.731	0.625	29.98	3.5	7.008	6.964
5.251	0.135	3.081	0.625	30.06	3.54	7.007	7.918
5.001	0.134	3.426	0.625	29.9	3.56	7.004	8.855
4.75	0.132	3.776	0.625	29.96	3.56	7.007	9.809
4.5	0.13	4.121	0.625	29.98	3.58	7.006	10.748
4.25	0.128	4.466	0.625	29.98	3.6	7.006	11.688
4	0.126	4.816	0.625	29.96	3.6	7.008	12.64
3.75	0.124	5.16	0.625	29.9	3.62	7.005	13.575
3.5	0.121	5.51	0.625	30.04	3.62	7.008	14.528
3.25	0.119	5.855	0.625	29.88	3.64	7.005	15.465
3	0.116	6.195	0.625	29.94	3.64	6.999	16.389
2.745	0.113	6.55	0.625	29.9	3.64	6.998	17.353





2. ábra

A hiperbolikus függvény paramétereinek változása állandó struktúra-térfogat mellett. A nano-struktúra közepén lévő bemélyedés nagyjából a  $B$  paraméter mellett történt.

A következő táblázatban a hiperbolikus paraméterek hasonlóképpen változnak, mint az első táblázatban. Az  $a_1$  csökken,  $a_2$  nő, az  $\text{alfa}_1$  némileg magasabb szinten, az  $\text{alfa}_2$  pedig alacsonyabb szinten stabilizálódott, mint az első táblázatban. Az  $A$  és  $C$  geometriai paraméterek a fentiek szerint állandóak, azonban a  $B$  paraméter folyamatosan növekszik (egyre „tágabb” a gyűrű), a  $D$  paraméter pedig nő (mélyül a kvantumgyűrű illetve a nanolyuk).

A harmadik táblázatban éppen a másodikkal ellentétes folyamat figyelhető meg. A  $B$  paraméter csökkenésével jár együtt a  $D$  paraméter növekedése („csökkenő gyűrűátmérő mellett nő a középső bemélyedés”). Ezt az  $a_1$  paraméter csökkenésével, az  $a_2$  és az  $\text{alfa}_2$  növelésével tudtuk elérni.

2. táblázat

drilling hole with widening ring

hiperbolic parameters				geometric parameters			
a1	alfa1	a2	alfa2	A	B	C	D
7.002	0.145	0	dont care	30.04	-	7.002	-
7.427	0.147	0.24	0.354	30.047	2.24	6.993	0.046
7.377	0.147	0.24	0.401	30	2.5	6.999	0.102
7.467	0.147	0.455	0.379	30.08	3.52	7.001	0.444
7.477	0.147	0.5	0.379	30.08	3.66	7.013	0.236
7.477	0.147	0.55	0.372	30.08	3.8	7	0.623
7.477	0.147	0.6	0.369	30.08	3.94	7	0.723
7.477	0.147	0.645	0.366	30.08	4.04	7	0.813
7.477	0.147	0.7	0.362	30.1	4.18	7	0.923
7.462	0.147	0.745	0.362	30.08	4.26	6.999	1.027
7.442	0.147	0.8	0.362	30.06	4.34	6.998	1.156
7.442	0.147	0.85	0.358	30.06	4.44	7	1.258
7.422	0.147	0.9	0.358	30.04	4.52	7.001	1.379
7.377	0.147	1	0.358	30	4.64	7	1.623
7.302	0.147	1.15	0.358	29.92	4.8	7	1.998
7.207	0.146	1.3	0.358	30.04	4.96	7.001	2.394
7.022	0.145	1.6	0.358	30.06	5.18	7.01	3.188
6.847	0.144	1.85	0.358	30.08	5.32	7.012	3.865
6.732	0.144	2	0.358	29.98	5.4	7.001	4.269
6.542	0.143	2.25	0.358	29.98	5.5	7	4.958
6.362	0.142	2.5	0.358	29.98	5.6	7.012	5.65
6.167	0.141	2.75	0.358	29.98	5.68	7.013	6.346
5.967	0.14	3	0.358	29.94	5.76	7.012	7.045
5.535	0.137	3.5	0.358	30.06	5.88	6.998	8.463

5.13	0.135	4	0.358	29.94	5.98	6.999	9.869
------	-------	---	-------	-------	------	-------	-------

A negyedik táblázatban szereplő beállításokkal a  $B$  paraméter nagy értékének előállítása volt a cél. Ezt az  $a_1$  és  $a_2$  paraméterek magas értékének beállításával érték el, az alfa1 értéke is magasabb, mint az eddigi kísérletsorozatokban.

4. táblázat

hiperbolic parameters				geometric parameters			
a1	alfa1	a2	alfa2	A	B	C	D
7.002	0.145	0	dont care	30.04	-	7.002	-
14.2	0.25	5	0.183	30	8.12	6.998	2.798
16.245	0.4	9.31	0.201	30.02	10.46	7	9.375
15	0.475	10.03	0.204	29.94	10.84	7	12.062

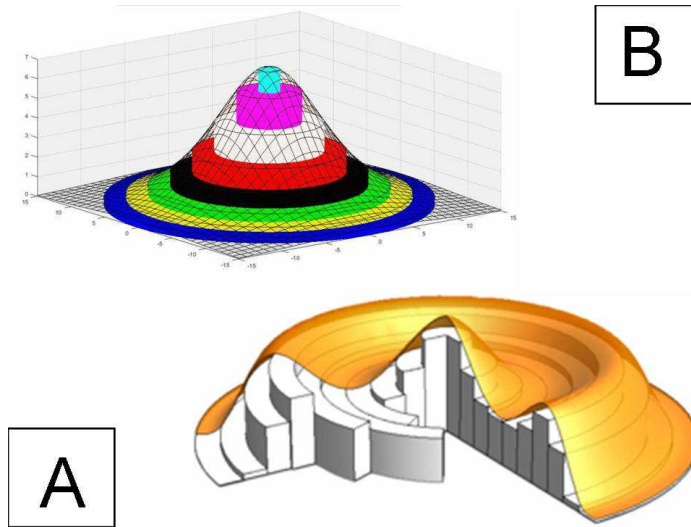
A hiperbolikus paraméterek szerepét a nano-struktúra alakításban az alábbiakban lehet összefoglalni.

- $a_1$  növelése csökkenti a nano-lyuk (kvantumgyűrű mélységét) és magasítja a struktúrát.
- $a_2$  növelése mélyíti a nano-lyukat és magasítja a struktúrát.
- alfa1 növelése csökkenti a struktúra átmérőjét és csökkenti a nano-lyuk mélységét, a középső bemélyedést akár túbe is átviheti.
- alfa2 növelése csökkenti a struktúra átmérőjét és a gyűrű belső átmérőjét, valamint csökkenti a kvantumgyűrűben, nano-lyukban kialakuló tű magasságát.

## 1 Konklúzió és kitekintés

A különböző alakú nano-struktúrák formájának analitikus leírása, mind technológiai, mind pedig alkalmazás szempontjából fontos. Az analitikus leírás lehetőséget teremt egyrészt a térfogat meghatározására, ami a leválasztott anyagmennyiség számításához, kontrolálásához segítség. Példának említhetjük, hogy a számítás a vertikálisan sorolt QD-ok technológiájánál (NH feltöltés) is segítségre lehet [6]. Alkalmazástechnikai segítség lehet az energetikai struktúra

számolásokat támogató az újfajta ill. nagyobb hatásfokú eszközök tervezésénél (band-gap-engineering). Jelen dolgozatban az adott leválasztott anyag térfogat morfológiai változásait követtük az  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  paraméterek függvényeinek meghatározásával.



3. ábra

A térfogat-meghatározás illusztrálása (A) térfogat meghatározás összetett forgástest esetén (ábra forrása: [https://en.wikipedia.org/wiki/Shell\\_integration](https://en.wikipedia.org/wiki/Shell_integration)) és (B) QD esetén

Amint a fentiekből látható a következő lépés a térfogat-meghatározás, hiszen a különböző struktúrák előállítása során az anyagmennyiség (eltekintve a deszorpciótól) állandó. Első közelítésben forgásszimmetrikusnak tekinthetjük a nano-objektumot [7]. Forgástest térfogatának kiszámítására, az ismert téglányösszeges numerikus integrálás 3D megfelelője az egymásba ágyazott koaxiális hengerek térfogatösszegének kiszámítása. (Egy változat a konstans magasságú téglányok helyettesítése trapézokkal, így a trapézmódszer forgástestre való alkalmazásával a térfogatszámítás ugyan bonyolultabb de pontosabb lenne.) A technológiailag releváns (001) kristályfelületet használjuk, ami zink-blende struktúra esetén köztudottan anizotróp. Így a jobb közelítés érdekében az ellipszis tengelymetszetű térfogat-számítás is fontos, ahol a megnyúlás mértéke szintén technológiafüggő.

## Hivatkozások

- [1] Nemcsics Ákos: A napelem és fejlesztési perspektívái; Akadémiai Kiadó, Budapest, 2001
- [2] Ákos Nemcsics: Droplet Epitaxy as a Tool for the QD-Based Circuit Realization, Book chapter in Nonmagnetic and Magnetic Quantum Dots ; InTech (2018) pp. 43-59.
- [3] Ákos Nemcsics: Quantum Dots Prepared by Droplet Epitaxial Method, Book chapter in Quantum Dots - Theory and Applications ; InTech (2015) pp. 119-149.
- [4] J. Takács, Á. Nemcsics: QD to NH; Mathematical Modelling of Nanostructure Formations; Scientific Review, vol. 4, pp. 74-79, (2018)
- [5] A. Ürmös, Z. Farkas, M. Farkas, T. Sándor, L. T. Kóczy, Á. Nemcsics: Application of Self-Organizing Maps for Technological Support of Droplet Epitaxy, Acta Polytechnica Hungarica, vol. 14, pp. 207-224, (2017)
- [6] A. Ürmös, Z. Farkas, Á. Nemcsics: Contribution to the understanding of GaAs based nanohole filling; American Journal of Condensed Matter Physics, vol. 7, pp. 50-56, (2017)
- [7] G.A. Korn, T.M. Korn: Matematikai kézikönyv műszakiaknak; Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1975

# English paper

# Non-technical loss detection at unregistered points in power distribution systems

**Márton Greber, Attila Fodor, Attila Magyar**

University of Pannonia, Department of Information Technology, Egyetem u. 10,  
8200 Veszprém. Hungary, e-mails: greber.marton@virt.uni-pannon.hu,  
fodor.attila@virt.uni-pannon.hu, magyar.attila@virt.uni-pannon.hu

---

*Abstract: In this paper a non-technical loss (NTL) diagnostic method is proposed which considers faults at unregistered points in the distribution network. The method relies on the concept of smart grid, where every consumer is equipped with smart meters. Existing line segments are split up in order to detect and isolate faults at arbitrary points between metered points. The goal is to adjust the power and distance of these nodes such that the measured voltage profile is obtained. This results in a non-linear optimization problem, which is approximated using a genetic algorithm. Based on conservation of energy a local evaluation method is worked out. This is used to reduce the enormous search space of a fully extended network. The computational burden is further relaxed by showing the applicability of parallel computation for both diagnostic techniques.*

*Keywords: non-technical faults; fault detection; smart grid; distribution system; genetic algorithm;*

---

## 1 Introduction

The low-voltage grid is responsible for distributing power to end consumers. Because of this, the number of residential connections and human interaction is far greater than in the higher voltage level subsystems. Activities regarding the theft of electricity can be observed. The notion of non-technical loss (NTL) is a collective concept, it can originate from: meter tampering, measurement and billing errors or illegal connection. In any case it leads to consumed power which goes unaccounted, thereby contributing to financial deficit. [1] By tampering a metering device or conducting illegal connections on the utility equipment technical risks and reliability issues arise.

Tampering measurement devices, and fooling the meter readings is a relatively long known problem, to which working solutions are to be found. Through advanced features like detecting magnetic fields or the utilization of a so called “Hardware Against Software Privacy” key the trust and confidence at registered points gets

well established. [2] On the other side, dedicated diagnostic hardware can be also placed throughout the network. These are invasive methods meaning they require additional components, and active methods can be performed in the form of signal injection. By observing the distribution system state, if high NTL is estimated, the good customers can be disconnected and through a distortion signal the illegal point's performance can be reduced. [3] However, this imposes several security concerns if a good customer stays on during the purging period. A gentler approach is the injection of high frequency components, which are captured at installed LC trap points. These signals are affected by NTL thereby allow for detection, and isolation of edges. [4] Moreover if the installation of LC traps is infeasible a comparison between a no-load and on-load high frequency impedance calculation can serve as an indicator for the presence of NTL. [5]

The notion of smart grid combines the concepts of power and information system by forming a complex cyber-physical system. Among others, residential consumers are equipped with smart meters, enabling the reporting of measurements in 15-minute periods. Information from a neighbourhood is collected by a data concentrator, which sends the packets to the utility server. [6] This increased amount of information offers new possibilities in the diagnosis of NTLs. [7] There are two main approaches for detection: data oriented and network model oriented. This paper focuses on a model-based approach, which requires no cumulative dataset and learning process. On the other hand, the technical modelling requires domain specific knowledge and the resulting model tends to be complex. [8] In order to combat the complex nature of the diagnosis one can apply switching logic to various parts of the network. In this case, the task is to set the states of the switches in such a manner that a close to nominal operating condition is acquired, parts affected by NTL become isolated. [9] Utilizing first engineering principles the network can be broken down into elementary topologies where the condition for nominal operation is easier to compute. [10] In general, the indicator of NTL is the difference between an expected nominal voltage profile and the measured one. The goal is to reproduce the measured one through optimization. [11] These problems are often solved through soft computing techniques, which are computationally heavy. Efficient methods can be developed utilizing for example the topological properties of radial networks. Heuristics based on the direction of power flow allow for better compensation procedures for a network having power deficit by NTL. [12]

The parameters of fault are considered the missing power and the distance from neighbouring measured loads. All of the above-mentioned methods inspect the diagnosis of registered points – like cross verification – moreover methods which mention localisation give only estimation whether a given line segment is faulty or not. [13] By taking a given edge, splitting it up and inserting a hypothetical fault consumer, NTL at unknown location can be diagnosed. [14] The approach is based on the conservation of energy, and results in an optimization problem concerning network structure and load as well. [15] A similar idea can be found in high voltage



direct current transmission systems for diagnosing fault parameters of a long line segment. [16] In this case, the solution was achieved through a genetic algorithm approach. Moreover, the optimal placement of compensator capacitor banks poses a similar optimization problem, however quite often the location search space consists only from existing nodes. [17] From the above-mentioned reviews, it is clear that there is a need for further research in diagnosing and estimating fault parameters between metered nodes at arbitrary locations. The aim of this paper is to present a formal description to this problem which can be used to develop a general fault diagnostic expression. The approximate solution is presented as a genetic algorithm. The search space is taken into account by presenting search space reduction technique.

## 2 Distribution system modelling

The main components of the distribution system are the medium voltage to low voltage transformer station, also called feeder point, the distribution line and the consumer points. Throughout this work, single phase representation is used. The feeder point is represented as a voltage generator, Norton equivalent. The line segments are RL branches, the effect of mutual coupling is neglected. The type of the residential loads is constant P, Q. Every one of them is equipped with smart meter, capable of measuring active(P) and reactive(Q) power, voltage and current root mean square (RMS) values. Furthermore, it is assumed that NTLs can be found between metered points at arbitrary location, however one edge can contain one fault at most.

The topology of the network is described by the incidence matrix:  $\mathbf{A} \in \{-1,0,1\}^{n \times m}$ , where  $n$  is the number of vertices and  $m$  is the number of edges in the graph of the system. The entries of the incidence matrix are described in equation (1). Vectors are defined for the electrical quantities, an element of these corresponds to an edge in the graph:  $\mathbf{Y}$ -admittance,  $\mathbf{I}$ -current,  $\mathbf{U}$ -voltage and  $\mathbf{S}$ -power. All of these quantities are complex numbers:  $\mathbf{Y}, \mathbf{I}, \mathbf{U}, \mathbf{S} \in \mathbb{C}^{m \times 1}$ . However, calculations are performed referred to the edges of the graph, in the bus reference frame. A singular transformation utilizing the incidence matrix yields the bus admittance matrix:  $\mathbf{Y}_{bus} = \mathbf{A} \mathbf{diag}(\mathbf{Y}) \mathbf{A}^T$ . All the other quantities can be transformed into the bus reference frame by using the vertex-edge property of the incidence matrix, for example:  $\mathbf{U}_{bus} = \mathbf{A} \mathbf{U}$ .

$$a_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{edge } j \text{ is not connected to vertex } i \\ 1 & \text{edge } j \text{ is pointing towards vertex } i \\ -1 & \text{edge } j \text{ is pointing away from vertex } i \end{cases} \quad (1)$$

Then, Ohm's law can be formulated the following way:  $\mathbf{U}_{bus} = \mathbf{Y}_{bus}^{-1} \mathbf{I}_{bus}$ . The electrical parameters of the distribution system components are collected in separate vectors.  $\mathbf{Y}_{gen}, \mathbf{I}_{gen}$  describe the feeder point's Norton equivalent parameters.  $\mathbf{Y}_{line}$

contains the distribution line admittances. Finally,  $\mathbf{I}_{load}, \mathbf{S}_{load}$  contain the calculated current and the specified complex power at the residential consumer edges. The power flow equations are given as a set of non-linear equations in matrix form, see equation (2). The first equation is Ohm's law in the bus reference frame, where component-describing vectors are explicitly stated. The second equation is responsible for the constant P, Q load modelling.

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{bus} = \mathbf{A} \mathbf{diag}(\mathbf{Y}_{gen} + \mathbf{Y}_{line}) \mathbf{A}^T \mathbf{A} (\mathbf{I}_{gen} + \mathbf{I}_{load}) \\ \mathbf{S}_{load} = \mathbf{diag}(\mathbf{U}_{bus}) \mathbf{A} \mathbf{I}_{load}^* \end{cases} \quad (2)$$

The known parameters are the incidence matrix, the admittances, the Norton equivalent generator currents and the load power values. The task is to find the bus voltages such that the specified power values are held.

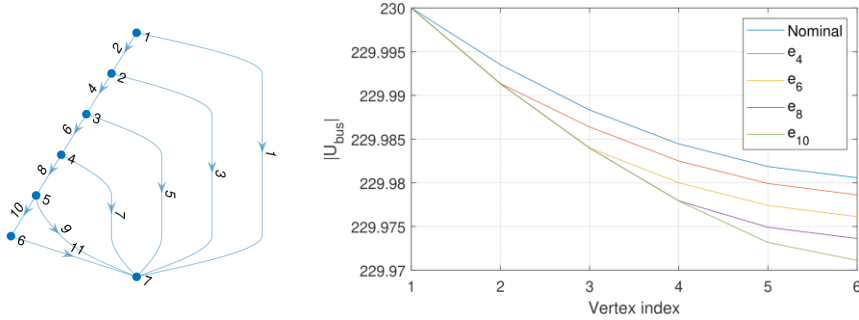


Figure 1 Left: graph of the network, edge notations: generator: 1, loads: 3, 5, 7, 9, 11, line segments: 2, 4, 6, 8, 10. Right: NTL on various points of the network and the change in voltage drop

## 2.1 Non-technical loss indicators

NTLs produce an undesirable effect in the power network: more power needs to be fed into it than it is expected. Therefore, the analysis of NTLs is heavily reliant on the conservation of energy. Measured quantities from this point on are denoted by tilde. If the sum of measured feeder current is greater than the sum of all measured customers there is a fault in the network. This follows from Kirchhoff's current law (KCL):  $\sum \tilde{\mathbf{I}}_{gen} > \sum \tilde{\mathbf{I}}_{load}$ . Let us now consider the consumed powers. By taking the power measurements and calculating the power flow, the losses can be estimated. If the measured generated power is greater than the measured load plus the calculated losses, there is a fault condition:  $\sum \tilde{\mathbf{S}}_{gen} > \sum \tilde{\mathbf{S}}_{load} + \sum \mathbf{S}_{loss}$ . Furthermore, if more current is flowing through the distribution lines than expected, the increased current produces a greater voltage drop on it. Therefore, if the difference between the measured bus voltages and the calculated voltages is greater than zero, there is NTL in the network:  $0 < \sum_{i=1}^n (\tilde{u}_{bus_i} - |u_{bus_i}|)^2$ . Since the measured voltage is an RMS value, the bus voltages from the complex power flow must be taken as the absolute value. All of these expressions can be used for fault

detection (FD). A simple example is shown in Figure 1. Edge 1 is the feeder, edges 3, 5, 7, 9, 11 are the load edges, the others are line edges. The nominal voltage profile is shown in blue, then separate faults are inserted onto the line edges. The difference between nominal and faulty profile is clear to see on Figure 1.

### 3 Network extension-based diagnosis

In the previous example the NTL was somewhere on the line, there was no information about it in the graph. In order to formulate a diagnostic method for such fault, the network needs to be extended. The main idea is, that all the distribution line segments are split up according to a division point and a hypothetical fault consumer is inserted (see Figure 2).

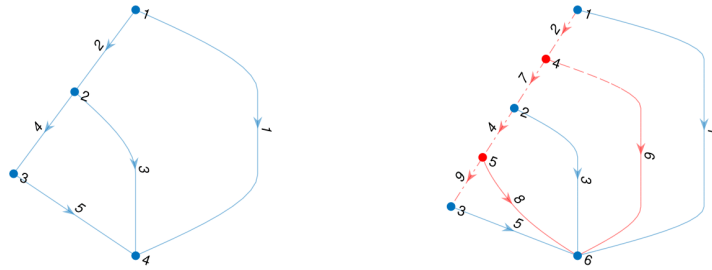


Figure 2 Left: the network before the extension, edges 2 and 4 are the lines to be split. Right: the extended network, edges 6 and 8 are the hypothetical fault load edges

Dividing the existing line segment impedance through the division point ( $0 < d < 1$ ) allows to set the fault distance from the neighboring edges. The inserted hypothetical fault consumer is modelled like all the other real customers. Setting the consumed power value allows for adjusting the fault magnitude. In order to create a fully extended network all the line segments need to be located. For every edge insert a new vertex, route the old-line segment to this vertex and add a new edge pointing from the fault node to the original edge's end node. For example on Figure 2: old edge 2, new fault node 4, route edges  $1 \rightarrow 4$ , insert new edge 7 route  $4 \rightarrow 2$ . Then a so-called extended network is obtained, which is described by quantities denoted by a hat:  $\hat{\mathbf{A}}, \hat{\mathbf{I}}, \hat{\mathbf{U}}, \hat{\mathbf{Y}}, \hat{\mathbf{S}}$ . The number of vertices is  $\hat{n}$ , the number of edges is  $\hat{m}$  in the extended network. The hypothetical fault powers of the inserted edges are collected in  $\mathbf{S}_{fault}$ , the distance describing division points are collected in  $\mathbf{D}_{fault}$ . These quantities need to be incorporated in the power flow calculation, resulting in the extended network power flow equations (equation (3)). The hypothetical fault power values need to be substituted into the load power vector, therefore  $\hat{\mathbf{S}}_{load}$  becomes a function of the fault power. Moreover, the extended line

admittance vector becomes a function of the division point vector, since the extended network's line admittances are determined according to them.

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{U}}_{bus} = \hat{\mathbf{A}} \text{diag}(\mathbf{Y}_{gen} + \hat{\mathbf{Y}}_{line}(\mathbf{D}_{fault})) \hat{\mathbf{A}}^T \hat{\mathbf{A}} (\mathbf{I}_{gen} + \hat{\mathbf{I}}_{load}) \\ \hat{\mathbf{S}}_{load}(\mathbf{S}_{fault}) = \text{diag}(\hat{\mathbf{U}}_{bus}) \hat{\mathbf{A}} \hat{\mathbf{I}}_{load}^* \end{cases} \quad (3)$$

The NTL diagnosis is described as a non-linear optimization problem in equation (4). Given a set of fault parameters, the non-linear load flow equations are solved. Measurement data is only available for the vertices in the original network (vertex indexes: 1 ...  $n$ ). Therefore, the difference between measured and calculated voltages are calculated. The goal of the fault diagnostic method is to use the extended network, and adjust the fault parameters ( $\mathbf{S}_{fault}$ ,  $\mathbf{D}_{fault}$ ), such that the original voltage profile is obtained.

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{D}_{fault}, \mathbf{S}_{fault}} \quad & \sum_{i=1}^n (\hat{u}_{bus_i} - |\hat{u}_{bus_i}(\mathbf{D}_{fault}, \mathbf{S}_{fault})|)^2 \\ \text{s. t. :} \quad & \sum_{i=1}^{\hat{m}-m} S_{fault_i} = S_{missing} \\ & \forall i \in \{1 \dots \hat{m} - m\}, 0 < d_{fault_i} < 1 \end{aligned} \quad (4)$$

The formulation is bounded by constraints to manage feasibility. The sum of the injected hypothetical fault nodes must equal the recorded missing power. Additionally, all the division points must be between 0 and 1.

A solution to the constrained non-linear optimization problem is achieved through an evolutionary algorithm. A chromosome is a possible solution to the problem. In this case two simultaneous arrays of the fault parameters. Many random chromosomes are generated to form a generation. Chromosomes in a generation are ranked by their fitness value. It is a measure of how good of a solution they are, evaluated according to the objective function. The optimization constraints are enforced through a penalty function. This assigns a percentage increase in the fitness function if the constraints are violated. The top  $x\%$  go immediately into the upcoming generation, this is called elitism. New chromosomes are formed by taking existing ones and recombining them. Finally, some chromosomes are perturbed randomly in some of their values, which is called mutation. Through these three simple steps a new generation is formed. The process continues until the number of maximum generations is reached or a solution is found.

## 4 Search space reduction technique

By accomplishing a total network extension, the search space becomes enormous. In order to reduce it, a local evaluation-based technique is proposed. The idea came

from discrete convolution where one takes a kernel and it is shifted through the network. Through this process new information is gathered. This is translated into power system analysis. The local evaluation structure, the so-called kernel is depicted in Figure 3. There are four measured load points  $v_1 \dots v_4$  and the conservation of energy is observed in the middle line segment, depicted in red.

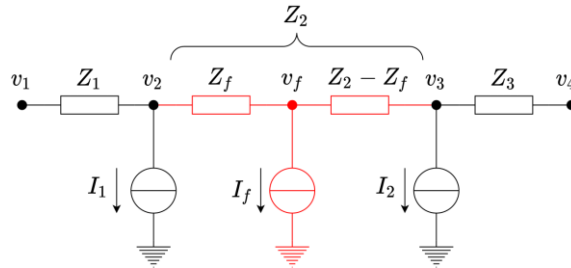


Figure 3 Local evaluation structure, vertices  $v_1 \dots v_4$  are metered points. Line segment  $Z_2$  is split up, and then a hypothetical fault is inserted at vertex  $v_f$

There are three unknowns:  $Z_f$  - the fault distance representing impedance,  $I_f$  - the fault current and  $U_{v_f}$  - the bus voltage at the point of NTL. Applying Kirchoff's current law, three equation can be formulated for vertices  $v_2, v_f, v_3$ . These are a set of linear equations. One can solve for  $I_f$  to obtain a verification indicator.

$$\begin{cases} \frac{U_{v_1} - U_{v_2}}{Z_1} + \frac{U_{v_f} - U_{v_2}}{Z_f} - I_1 = 0 & \text{: vertex } v_2 \\ \frac{U_{v_2} - U_{v_f}}{Z_f} + \frac{U_{v_3} - U_{v_f}}{Z_2 - Z_f} - I_f = 0 & \text{vertex } v_f \\ \frac{U_{v_4} - U_{v_3}}{Z_3} + \frac{U_{v_f} - U_{v_3}}{Z_2 - Z_f} - I_2 = 0 & \text{vertex } v_3 \end{cases} \quad (5)$$

The question arises that what happens if a fault is present not in the middle, rather on one of the side line segments of the structure? A so-called kernel shift procedure is developed to overcome this process. Let us consider a "street" of 8 customers in a series topology, where a fault is present between vertices 4,5. The kernel evaluation results are depicted in Table 1.

Table 1 Kernel shift evaluation

		Bus in kernel							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Starting bus	1	✓	✓	✓	✓				
	2		✗	✗	✗	✗			
	3			✗	✗	✗	✗		
	4				✗	✗	✗	✗	
	5					✓	✓	✓	✓

The columns denote the distribution line buses, whereas the rows denote the starting position of the kernel. If the evaluation results in  $I_f = 0$ , a '✓' (verified) is drawn, else '✗' (not verified) is present. The edge between vertices 4,5 is faulty, all the positions with starting bus = 1 and 5 are locally fault free, the conservation of energy is valid. All the other kernel positions contain the faulty edge. According to KCL there must be a current deficit therefore these edges are marked as not verified. The set of fault edges can be determined by performing a set minus operation on the verified and not verified sets. These sets contain edges of the network described as a pair of vertices.

$$\begin{aligned} \text{Verified} &= \{\{1,2\}, \{2,3\}, \{3,4\}, \{4,5\}, \{5,6\}, \{6,7\}, \{7,8\}\} \\ \text{Not verified} &= \{\{2,3\}, \{3,4\}, \{4,5\}, \{5,6\}, \{6,7\}\} \\ \text{Faulty} &= \text{Not verified} \setminus \text{Verified} = \{\{4,5\}\} \end{aligned} \quad (6)$$

Diagnosing the network in such local units of 4 vertices, allows for a fast checking process to observe which edges are fault free, thereby reducing search space. However, the method has some limitations. Unique isolation of the fault is only possible if and only if, at least three verified edges are present before and after the fault location (see Figure 4).



Figure 4 Uniquely determined faults: the faulty edges are separated by at least three verified edges, thereby unique isolation is possible



Figure 5 Three-edge criteria bottleneck: the faulty edges are separated by only two edges, in between edges are marked as faulty.

If the above-mentioned criteria is not fulfilled (see Figure 5) no matter what the fault status of the inner edges is, they become all marked as faulty. This is a case where the search space reduction technique has a bottleneck. It introduces edges, which may or may not be truly faulty; this is the case where the general optimization method needs to be applied.

## 5 Complete fault diagnostic process

The above-mentioned two methods can be used together in order to form a complex diagnostic procedure. The voltage criteria need to be checked, if the measured and calculated voltage profiles are different, there is a fault else, there is no fault, the process exits. In case of fault, one takes the local evaluation kernel and it is shifted through the network. Edges denoted as 'Faulty' are marked. These marked edges are used to construct a partially extended network. Finally, the genetic algorithm is started to approximate the fault parameter, but in this case with a much smaller search space.

Taking into consideration the reduction technique, soft computing methods like the genetic algorithm are computationally heavy and provide only approximate solutions. By considering that the fitness evaluation within a generation is computationally independent, and so are the kernel evaluations at different positions, such parts of the method can be executed in a parallel manner. This also offers the utilization of distributed resources and so horizontal scaling.

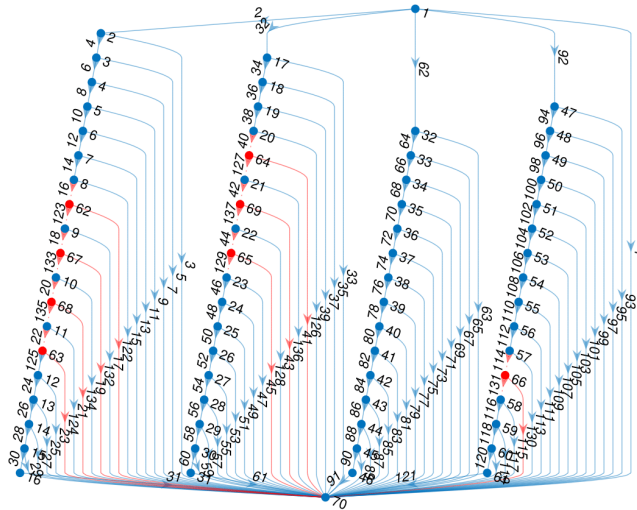


Figure 6 Case study network topology: blue vertices and edges denote the nominal network, the red components denote the partially extended network, which form the search space.

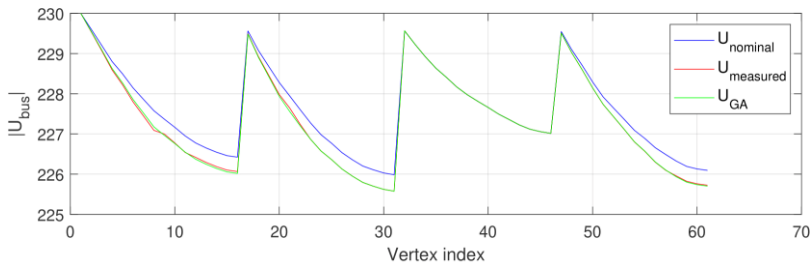


Figure 7 Voltage profile of the network: the blue plot denotes the nominal voltage profile, whereas the red line indicates the measured voltages. There is a difference between them. It indicates the presence of NTL in the network.

### 5.1 Case study

In order to demonstrate the procedure in action, a simulation case study was created. It is based on the curated IEEE low-voltage test feeder. We chose to make our own, in order to test the capabilities on a larger network. It contains 4 streets with 15 loads each. The distance between customers is 45 – 50m. Average RL parameters

where taken from the different cable types. For the simulation, parallel implementation of the proposed method was run on 3 PCs by utilizing MATLAB's distributed computing server. The networks topology is shown in Figure 6. 5 faults were inserted into the network (shown in red). Through simulation, measurement data was generated to represent real working conditions. The expected network operation was calculated by using only the components marked with blue. The voltage profile of the network is shown in Figure 7. The nominal or also called expected profile is shown with blue. With red - which is shadowed by green - the measured profile. Finally, green represents the voltage profile which was the result of the diagnostic procedure. At first sight the match is quite good.

Table 2 Case study genetic algorithm based optimization results

Vertex Id	$S_{fault}$	$\hat{S}_{fault}$	$d_{fault}$	$\hat{d}_{fault}$
66	$120 - 20i$	$167.90 - 28.95i$	0.5	0.15
64	$50 - 10i$	$310.90 - 53.60i$	0.6	0.45
69	–	$71.12 - 12.26$	–	0.70
65	$300 - 70i$	$19.04 - 3.28i$	0.8	0.68
	$350 - 80i$	$410.06 - 69.14$		
62	$250 - 50i$	$289.37 - 49.89i$	0.2	0.01
67	–	$0 + 0i$	–	–
68	–	$0 + 0i$	0.4	–
63	$100 + 0i$	$0 + 0i$	0.4	–
	$350 - 50i$	$289.37 - 49.89i$		

The graph presented above is the result of the network extension method. In Table 2 the detailed results regarding the best chromosome of the genetic algorithm are shown. The fault at node 66 was a fault alone, the kernel could isolate it, and the genetic algorithm's results are shown in the first section of the table.  $S_{fault}$  and  $d_{fault}$  represent the real values,  $\hat{S}_{fault}$  and  $\hat{d}_{fault}$  represent the approximated final values. The fault power is quite a good match. The fault distance has an error of 0.35. Next let's observe the section of nodes 20 – 23. As it can be seen in the table it was a section where there was a non-faulty edge between faults. This is why we have here 3 hypothetical insertions, the kernel's 3 edge rule. Here the individual fault powers are totally mixed, however total fault power, is well approximated. The same is the case for the last branch where an even bigger uncertainty was set by having two valid edges separate the fault. Overall, it can be seen that the detection is appropriate. On the contrary, the fault isolation works only good for unique faults, in that case fault parameters can be determined. In any case where the kernel limitations are violated the fault is isolated as a hotspot region. And fault parameters especially fault power is an approximation for the whole hot-spot.



## Conclusion

A model-based fault detection method has been presented in this work for the handling of NTLs in distribution networks. The problem is traced back to a non-linear optimization problem. A solution was found by utilizing genetic algorithms. Computational burden was considered by introducing a search space reduction technique and parallel computing approach. Some interesting ideas for future applications are the implementation of the local kernel evaluation method on the data concentrator level for decentralized detection. The genetic algorithm could be improved through heuristics based on topology properties. Furthermore, the proposed method could be applied for faults in other physical domains with similar characteristics for example leakages in pipe networks.

## Acknowledgement

Project no. 131501 has been implemented with the support provided from the National Research, Development and Innovation Fund of Hungary, financed under the K\_19 funding scheme. A. Magyar was supported by the Janos Bolyai Research Scholarship of the Hungarian Academy of Sciences. Attila Magyar was supported by the UNKP-20-5 new national excellence program of the Ministry for Innovation and Technology.

## References

- [1] F. B. Lewis, "Costly 'Throw-Ups': Electricity Theft and Power Disruptions," *The Electricity Journal*, vol. 28, pp. 118-135, 2015.
- [2] R. Czechowski and A. M. Kosek, "The most frequent energy theft techniques and hazards in present power energy consumption," in *2016 Joint Workshop on Cyber- Physical Security and Resilience in Smart Grids (CPSR-SG)*, 2016.
- [3] S. S. S. R. Depuru, L. Wang and V. Devabhaktuni, "Electricity theft: Overview, issues, prevention and a smart meter based approach to control theft," *Energy Policy*, vol. 39, pp. 1007-1015, 2011.
- [4] A. K. Gupta, A. Mukherjee, A. Routray and R. Biswas, "A novel power theft detection algorithm for low voltage distribution network," in *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2017.
- [5] A. Pasdar and S. Mirzakuchaki, "A Solution to Remote Detecting of Illegal Electricity Usage Based on Smart Metering," in *2007 2nd International Workshop on Soft Computing Applications*, 2007.
- [6] D. Alahakoon and X. Yu, "Smart Electricity Meter Data Intelligence for Future Energy Systems: A Survey," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, pp. 425-436, 2016.
- [7] N. Katic, "Performance Analysis of Smart Grid Solutions in Distribution Power Systems," *ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA*, vol. 15, 2018.

- [8] G. M. Messinis and N. D. Hatziargyriou, "Review of non-technical loss detection methods," *Electric Power Systems Research*, vol. 158, pp. 250-266, 2018.
- [9] Q. Jin and R. Ju, "Fault Location for Distribution Network Based on Genetic Algorithm and Stage Treatment," in *2012 Spring Congress on Engineering and Technology*, 2012.
- [10] A. I. Pózna, A. Fodor and K. Hangos, "Model-based fault detection and isolation of non-technical losses in electrical networks," *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, vol. 25, p. 397-428, 2019.
- [11] V. Arya, K. Das, J. Hazra, S. Kalyanaraman, B. Narayanaswamy and D. P. Seetharamakrish, *Non-technical loss detection and localization*, Google Patents, 2017.
- [12] L. Marques, N. Silva, I. Miranda, E. Rodrigues and H. Leite, "Detection and localisation of non-technical losses in low voltage distribution networks," in *Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2016)*, 2016.
- [13] J. L. Viegas, P. R. Esteves, R. Melicio, V. M. F. Mendes and S. M. Vieira, "Solutions for detection of non-technical losses in the electricity grid: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, pp. 1256-1268, 2017.
- [14] H. F. Bernheim, J. H. HANSELL and M. R. Martin, *System and method for detecting and localizing non-technical losses in an electrical power distribution grid*, Google Patents, 2018.
- [15] P. Kádár, "Application of Optimization Techniques in the Power System Control," *ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA*, vol. 10, 9 2013.
- [16] Y. Li, S. Zhang, H. Li, Y. Zhai, W. Zhang and Y. Nie, "A fault location method based on genetic algorithm for high-voltage direct current transmission line," *European Transactions on Electrical Power*, vol. 22, pp. 866-878, 2012.
- [17] H. Abdellatif and K. Zehar, "Improvement of the Power Transmission of Distribution Feeders by Fixed Capacitor Banks," *ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA*, vol. 4, 2007.

# **Biometric identification and LoRaWAN communication problems in remote health monitoring**

**Marcell Szántó**

University of Óbuda Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering Institute of Instrumentation and Automation, Tavaszmező street 15, 1084, Budapest, Hungary

[marci199803@gmail.com](mailto:marci199803@gmail.com)

**Consultant: Tamás Sándor. Döníz Borsos**

---

*Abstract: Biometric identification is no longer an idea of the future, it's a possibility of the present. It's enough to think about everyday things like the new ID card, some laptops, and most cell phones. We can see that the use of biometric-based identification systems is growing on a large scale. Behind the rapid spread is both demand and offer. On the demand side, there is a demand for security. For example, states want to know who is crossing their borders, and companies want to know who is entering their buildings. On the supply side, compact and inexpensive devices appear that can be easily integrated into any system. Although experts believe that biometric identification can be considered extremely secure, these systems also have weaknesses. In the course of my research, I examine fingerprint-based recognition among biometric identification types in more depth. There are also two types of errors that affect system reliability. One is FAR, i.e. false acceptance, the other is FRR, i.e. false rejection. In my work, I would like to find a solution to how we can best reduce the first and second type errors (FAR and FRR) by changing the number of samples and tuning the acceptance threshold. The biggest difficulty with this is finding the EER (Equal Error Rate) point, as deviating from this point, the error rates show an increasing trend. Another topic of my research is the examination of LoRaWAN technology for reliability. The health and remote monitoring armband I designed uses LoRa communication to transmit information. The biggest advantage of the technology is the long-range, which is significantly influenced by environmental variables and current terrain conditions. I would like to find out what range the LoRa module I use can operate in different noise-laden environments, under different weather and terrain conditions. This can be used to establish a coverage area within which the exchange of information between the LoRa device and its associated gateway can be guaranteed.*

---

*Keywords: LoRaWAN, biometric, fingerprint, communication, identification*

---

## 1 Three basic methods of personal identification

Personal identification can be divided into active and passive methods depending on whether the involvement of the person to be identified is required. Based on the information used for identification, there are three basic ways to identify people:

- knowledge based
- property based
- biometrics

In the case of knowledge-based identification, the person is aware of information that can be verified during the identification procedure, such as a password or a PIN code.

In the case of estate-based identification, identification is done by a device that is in the person's possession, such as a key, barcode, or magnetic card.

The third option is to use biometrics when the verification is done using some physical or biological characteristics of the person.

As all three methods also have unavoidable drawbacks, neither alone provides sufficient protection. Therefore, it is recommended to use at least two of the three methods together, but independently of each other.

Of the three types of identification, biometric identification is the most reliable. In this method, we use a physical or biological feature of the human body that can be interpretable by machines. Examples are the uniqueness of the fingerprint, the ear, or the retina. Compared to the previous two methods, it is not a tool or information that is the basis for identification, but the person to be identified. This guarantees that the property on which the identification is based cannot be stolen and, in some cases, even a silent alarm can be activated by the person forced to identify. For example, you use another finger that also activates an alarm for authentication.

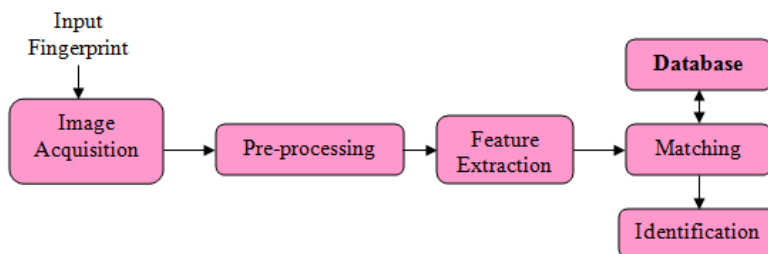


Figure 1

The process of biometric identification

## 1.1 Biometric identification [3] [4] [7]

The purpose of biometric systems is to determine whether the person to be identified is the same as a person already in the database. In the case of authentication, this means a comparison with a specific sample, while in the case of identification, the system must quickly search the database for the matching person or indicate that the person sought is not in the database.

The extraction of features differs for different biometric features. In the case of fingerprint identification, the goal is to find different patterns on the bitmap and to extract the characteristics of the given print from all of them. The comparison practically means the calculation of a similarity index, the value of which expresses the similarity of the two samples.

Examples of the reliability of biometric systems built with the appropriate features:

- Voice recognition: 1:50
- Fingerprint identification: 1: 500
- Iris identification: 1: 131.000
- Retinal identification: 1: 10.000.000+

Examples of asset rating indicators are ACOM<sup>1</sup> and MOA<sup>2</sup>.

ACOM will tell you to what extent the working principle of the device can exclude counterfeit samples. The MOA, as an indicator, refers to the security needs of a given device.

<sup>1</sup> ACOM: AntiCloning Operation Methods

<sup>2</sup> MOA: Mission Oriented Application

## 1.2 Fingerprint identification [2] [8]

The uniqueness of the fingerprint is given by the pattern of folds and grooves on the surface of the skin. These folds, also known as ruffled fibers, form different patterns that can be divided into larger units. Such are the vault, vortex, and loop.

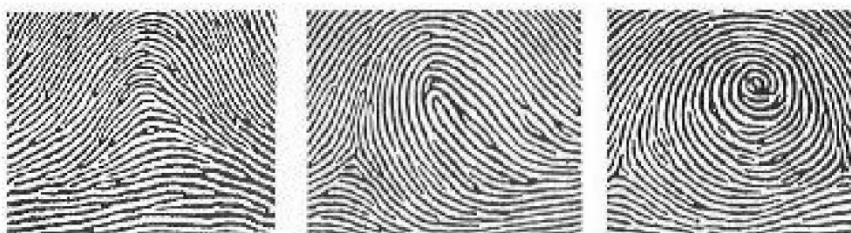


Figure 2

Vault, loop, swirl ruffle thread pattern

Typical points are hook, end, point, island, bridge, junction, intersection. The branching, end, or confluence of ruffled fibers is also called the minutia point.



Figure 3

Characteristic points formed by ruffled threads

There are distinguished points and lines for fingerprint processing that should be mentioned by all means. An example is a feature line. The feature line is essentially the innermost groove that surrounds the sample area. The sample area contains global characteristics, such as the base point, which is located in the center of the sample area and is also treated as a reference point. A delta is a curve with all three sides as a starting groove. It is fairly easy to determine the point, so

it is excellent for groove counting. The furrow number covers the number of furrows in the sample area.

### **1.3 Devices and operating principles [4]**

There are several technical solutions for scanning fingerprints, in which the similarity is that each examines the uniqueness of the ruffled fiber patterns found on the fingers. There are tools that, in addition to scanning the fingerprint, can also check to see if the finger is alive. This is done by testing for temperature and humidity. Among fingerprint reading devices, the greatest achievement is in reading techniques. There are two ways to do this. Optical and non-optical scanning.

Optical devices:

- Chip sensor
- Diffraction
- Total reflection

With this technology, the fingerprint to be processed is imaged on the surface of an image resolution device (CMOS, CCD element) using an optical system (prism, Fresnel lens).

Non-optical devices:

- Thermal analysis
- Radio frequency principle
- Ultrasonic principle
- Capacitive principle
- Pressure sensor principle

Devices operating on this principle create a fingerprint image from different pressure, capacity values, or reflected waves.

### **1.4 Preparing and processing the scanned image [5]**

We need to improve the image from the sensor so that we can separate the pleat and grooves well and reduce the noise. We use adaptive filters for this. We are helped by the parallel redundancy of the ruffled threads, according to which, although there is a rupture in the ruffled thread, we can also tell the orientation of the given groove about the smaller units. An adaptive filter is applied based on this parallel redundancy, which is then used to perform spatial convolution throughout the image. As a result, we will get an orientation map in which the

direction of the ruffled fibers is marked with lines. The most commonly used algorithm to perform this operation is the hierarchical orientation field-defining algorithm.

The steps of hierarchical orientation field-defining algorithm:

**Step 1:** Divide the image into  $W \times W$  blocks.

**Step 2:** Calculate the gradient ( $G_x$  and  $G_y$ ) for each pixel of each block.

**Step 3:** Determine the local orientation of each pixel  $(i, j)$ . We can use the following equations for this

$$(1.1) \quad V_x(i, j) = \sum_{u=i-\frac{W}{2}}^{i+\frac{W}{2}} \sum_{v=j-\frac{W}{2}}^{j+\frac{W}{2}} 2G_x(u, v)G_y(u, v)$$

$$(1.2) \quad V_y(i, j) = \sum_{u=i-\frac{W}{2}}^{i+\frac{W}{2}} \sum_{v=j-\frac{W}{2}}^{j+\frac{W}{2}} (2G_x^2(u, v) - G_y^2(u, v))$$

$$(1.3) \quad \theta(i, j) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{V_x(i, j)}{V_y(i, j)} \right)$$

**Step 4:** Calculate the consistency level of the orientation field for the neighborhood of the current  $(i, j)$  block. To do this, we use the following equations, where  $N$  is the number of blocks in  $d$ ,  $\theta i', j'$ , and  $\theta i, j$  are the ruffle fiber orientations in the  $(i', j')$ , and  $(i, j)$  blocks.

$$(1.4) \quad C(i, j) = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{(i', j') \in D} |\theta(i', j') - \theta(i, j)|^2}$$

$$(1.5) \quad |\theta' - \theta| = \begin{cases} d & \text{ha } (d = (\theta' - \theta + 360) \bmod 360) < 180 \\ d - 180 & \text{különben} \end{cases}$$

**Step 5:** If the consistency level is above a certain threshold, the value of  $C(i, j)$  must be recalculated with a lower resolution.

After preparing the image, we need to select the ruffled fibers. This is done by the so-called binarization method, which makes 2 of the 256 kinds of color intensity. The difficulty is that we cannot apply a constant threshold, since different images, but even the same two different sides of an image have different contrast values. To solve this, we use the Niblack algorithm, which examines the environment of a



given pixel and determines the threshold value for each pixel based on its mean and standard deviation.

Once we have sorted the ruffles, we need to reduce their width to 1 pixel. This makes it easier to notice the branches and ends.

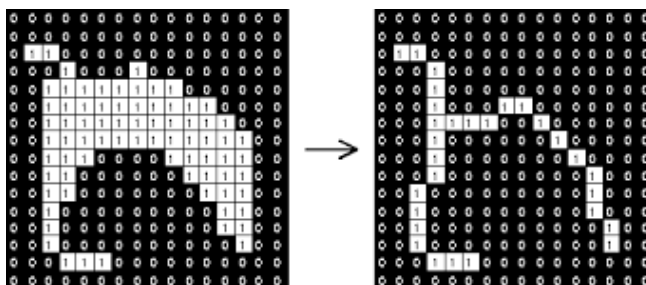


Figure 4

Thinning result on a binary image

When we scan an image and want to identify a person with it, we perform the above-mentioned operations on the new image and compare the neighborhoods of the minutiae. A neighborhood can contain at least 3 adjacent minutiae. They are spaced apart and have a relative orientation. In addition, we can even compare the type of minutiae in question if they are stored. If the comparison does not show a big difference, then the neighborhoods are considered the same.

## 1.5 Biological changes in the fingerprint [1] [6]

According to a 2012 study in Denmark, about 15% of people in the world suffer from manual dermatitis.



Figure 5

Hand dermatitis

The reasons for this are still debated, but it certainly contributes to damage to the skin barrier, the malfunction of the immune system, and prolonged or regular contact with substances that cause an allergic reaction. A study in Malaysia looked

at 200 people, 100 of whom had manual dermatitis and 100 were completely healthy. Fingerprint samples were taken from all 200 participants and during the experiment they had 3 opportunities to identify themselves using a fingerprint reader. Of the 100 participants with dermatitis, 27 failed to identify themselves.



Figure 6

Fingerprint of people with mild dermatitis

The article concluded that the larger the area of dystrophy (squamous cell disorder), the more likely the system will not recognize the fingerprint and thus cause a second type of error. There were areas on the fingers of 84 members of the patient group where fringe patterns were missing or the skin surface appeared stained due to the formation of a rough skin layer. People whose hands are exposed to constant irritation at work are much more likely to suffer from manual dermatitis. This layer includes healthcare workers who wash their hands very often, mechanics who come into contact with various oils and chemicals during physical work where their hands are used, and cooks, and kitchen workers.

## 1.6 My fingerprint comparison program [9] [10]

In my research, I would also like to use several fingerprint reading sensors based on the principle of operation to get an even more comprehensive picture of the quality of the samples produced and their dependence on the type of sensor. I decided to test an optical device and a non-optical device. Of the devices operating on the optical principle, I chose the GTS-511E2 based on chip sensor

technology, which is included in a Mikroe Fingerprint click. The other fingerprint reader is a capacitive Sparkfun SEN-15338 system. The Fingerprint click features the world's smallest optical fingerprint sensor, the GTS-511E2. The sensor uses digital light to capture a digital image of the fingerprint pattern. To distinguish between 2-dimensional images and real fingerprints, the CMOS image sensor has a special lens and cover. Considering how dark the lens is when a person presses their finger against the lens, an LED illuminates the lens from one side. The device can be communicated via SPI. Using the Windows application for Fingerprint click, I took pictures of my own fingerprints and used these pictures as a sample to create the image processing programs.



Figure 7

Image of Fingerprint click utility and a completed sample

The sensor provides an image that displays a relatively small area of the fingerprint and does not contain unnecessary information, so the segmentation step can be omitted. With segmentation, the part that does not contain a fingerprint is omitted from the image and the image is cropped only along the outline of the useful area. For the scanned samples to be comparable, they must first be processed. To do this, I wrote the image processing algorithms in C #, which performed the following tasks:

1. grayscale
2. ridge detection

3. enhancement
4. binarization
5. thinning
6. minutia-based comparison

The result of image processing is shown in Figure 8.

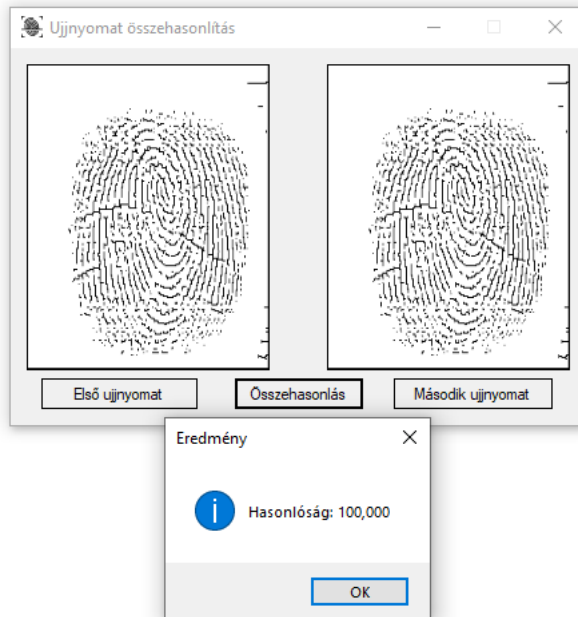


Figure 8

Sample comparison application user interface

Of the minutia searches, I'm basically just dealing with finding the bifurcation and the ending, because all the other minutias can be put together from these two.

The method of searching for minutes is to look at all 8 neighbors of a given pixel in the image of a line tapered 1 pixel wide. We take the sum of these pixels, and if this sum is equal to zero, there is no minucia. If only one of the adjacent points exists, we found an ending, and if two, a branch. The only flaw in the algorithm is that it can produce false minutes at both image errors and the edge of the sample. For this reason, we need to pay attention to the edge of the sample so as not to lay out minutias there. This can also be solved by subsequent minucia deletion.

## 1.7 Results

So far, I have taken fingerprint samples from 17 people of nearly the same age (21–23 years). From everyone, the thumb, index, and little finger were the sample samples selected. The first two have a damaged and worn pattern in most people due to very frequent use. In contrast, the little finger carried a completely intact and easily removable ruffle pattern on its surface in almost all subjects. There were 4 samples of each finger, two completely well-calibrated, clean-surface, fingerprint images placed in the center of the sensor, one image of a finger not placed in the center of the sensor but clean, and one image of an uncleaned finger not placed in the center of the sensor. Based on the tests performed so far, the comparative application successfully determines how much two samples match and also displays its percentage value. Comparison of the images taken with the sample bases of different qualities yielded the expected results in all three cases. This means that when comparing a good quality image to a good quality one, the similarity was greater than when comparing good quality and medium or good and poor quality images. A graphical representation of this is shown in Figure 9.

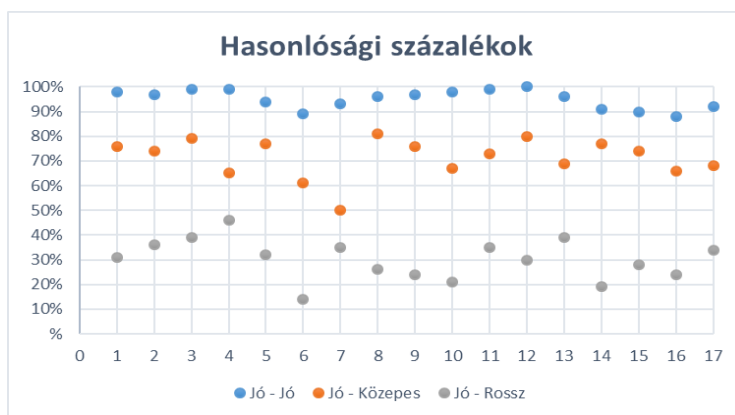


Figure 9

Percentages of similarity for each subject

The diagram in the figure shows a comparison of the samples taken from the index finger of each subject. The blue dots show the similarity of the two good quality samples, the yellow the good and medium quality, and the gray the good and poor quality samples. On the X-axis I displayed the number of subjects and on the Y-axis the percentage of similarity.

## References

- [1] Martin Drahansky Michal Dolezel, Jaroslav Urbanek, Eva Brezinova, and Tai-hoon Kim - Influence of Skin Diseases on Fingerprint Recognition – 26 February 2012
- [2] Tajti Balázs - A BIOMETRIKUS UJJNYOMAT AZONOSÍTÁS ALKALMAZÁSÁNAK ÚJ LEHETŐSÉGEI – Hadmérnök VII évfolyam 1. szám -2012 március
- [3] Lajkó Dóra – BIOMETRIA VILÁGA
- [4] Kovács Tibor, Milák István, Otti Csaba - A BIZTONSÁGTUDOMÁNY BIOMETRIAI ASPEKTUSAI
- [5] Venczel Viktor - Fingerprint Identification System – 2007 október
- [6] Chew Kek Lee, Choong Chor Chang, Asmah Johar - Fingerprint Changes and Verification Failure Among Patients With Hand Dermatitis – 2013
- [7] Venkata Krishna - Fingerprint enhancement and compression method using Morlet wavelet - 11 January 2011
- [8] Luca Didaci, Gian Luca Marcialis. Fabio Roli - Modelling FRR of Biometric Verification Systems Using the Template Co-update Algorithm -
- [9] Octavio Loyola-González, Miguel Angel Medina-Pérez, Andres Eduardo Gutierrez Rodriguez, Milton García Borroto: Framework in C# for Fingerprint Verification
- [10] Shlomo Greenberg, Mayer Aladjem, Daniel Kogan and Itshak Dimitrov: Fingerprint Image Enhancement using Filtering Techniques

# **Additional wireless communication technologies that are used in LoRaWAN products and their importance in the field of personal and property protection**

**Döniz Borsos**

Óbuda University Doctoral School on Safety and Security Sciences, Bécsi Street 96/b, 1034, Budapest, Hungary

[borsos.doniz@phd.uni-obuda.hu](mailto:borsos.doniz@phd.uni-obuda.hu)

---

*Abstract: The LoRaWAN wireless communication technology has several advantages: a wide range, significant interference immunity, and low power consumption. There are many possible uses for the technology. In addition to LoRaWAN communication, other communications are used in LoRaWAN products. These communications can play a complementary role, but they can also have the same or a higher priority. Roles and priorities depend on the specific technology or application area. In addition to the LoRaWAN communication, WiFi, Bluetooth Low Energy, or some LPWAN (Low-Power Wide-Area Network) technology is usually used. The paper deals with the description of wireless communications used in LoRaWAN products. IoT, and thus LoRaWAN solutions, are now for our convenience and have become necessary. As a result, the solutions are also part of the protection of people and property. The goal is to see how they relate to the devices' use. Among the investigative aspects, the personal and property protection aspect of the topic is of paramount importance. The review covers BLE and WiFi communications and focuses primarily on tracking applications.*

*Keywords: LoRaWAN, tracking, IoT, personal protection, property protection*

---

# 1 Introduction

Tracking systems can be found in many cases; they are no longer a novelty. It is usually used to track vehicles, people, animals, and other objects. Most of these systems are based on GPS [1][2]. The disadvantage of this is that it can be used outdoors effectively. Indoors, RFID technology is widely used for tracking tasks [3]. Another disadvantage of classical tracking systems is that they usually use GSM technology to send coordinates. There are many known features of GSM technology that make it not necessarily one of the best choices. Some of the more problematic features include the following:

- coverage problems can occur,
- its use is tied to a service provider and subscription,
- it is easy to shield or interfere with communication.

Fortunately, instead of the classic GPS + GSM solutions, we have several alternative options available to us. These include using some IoT (Internet of Things) technology, including LPWAN (Low Power Wide Area Network) technology [4][2].

The primary purpose of vehicle tracking systems is to reduce the detection time following a theft. Additional functions include the ability to indicate movement and even indicate that a car is leaving the selected area. Some systems offer more complex solutions that signal a door is opening, prevent a car from starting, or trigger alarms. This is a slightly different area; the paper does not address these features. Tracking individuals can have several purposes. One is to determine the state of the elderly, the sick, or the young to supervise their movements. The other purpose is to coordinate entry or monitor presence. In addition to these established uses, new areas and applications have appeared, but more on that later. Animal tracing is used for property protection, research, and monitoring purposes. Items are tracked to reduce theft, and such systems can also help with inventory and warehousing tasks.

From the above, it can be seen that several tracking tasks affect both personal and property protection issues. The overview covers how LoRaWAN technology, BLE, and WiFi relate to tracking. The first half of the article will describe the basic features of LoRaWAN technology, which will be followed by descriptions of WiFi and BLE technologies. Then, examples of applications will be presented. The second half of the article describes personal and property protection aspects, with an emphasis on tracing. There is a conclusion at the end of the review and suggested directions for further research.



## 2 Technology overview

### 2.1 LoRaWAN

LoRaWAN network communication is based on LoRa (long-range) radio communication. The basic features are the long distances over which data is transmitted and the low power consumption that results from its unique modulation. This modulation is called Chirp Spread Spectrum modulation (CSS). Communication in Europe typically takes place at 868 MHz, with bandwidths of 250 kHz and 125 kHz being used. Thanks to the ISM band used, it is also possible to set up private networks; no service provider is required. The data transfer rate is relatively not very high; it can be up to 50 kbps. Communication is two-way half-duplex; sending and receiving are also possible, but not simultaneously. [5][6]

In the case of LoRaWAN, the number of messages that can be sent per day is unlimited; the only limit is on transmission time. The transmission time limit is 1% of the time. The length of the payload of the messages that can be sent is not too long; it can be a maximum of 243 bytes. As previously mentioned, the data transmission distance can be up to 5–15 km and in cities up to several km. Positive communication features include the immunity to interference being relatively high and the communication being encrypted (AES128) [5][6]. The so-called adaptive data rate can be set for the devices, which automatically sets the communication to the best parameters. LoRaWAN communication supports the time difference of arrival location [7]. The LoRa Alliance handles specification development and certification [8].

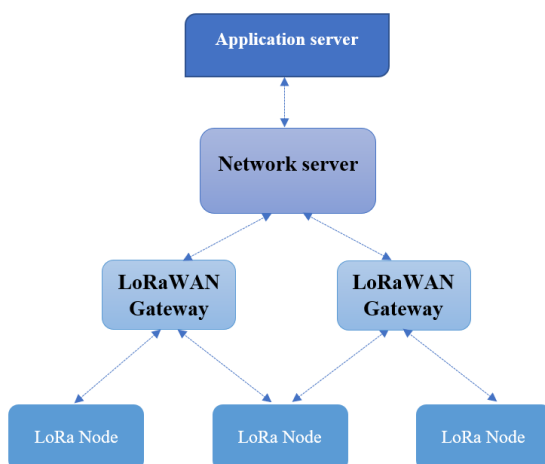


Figure 1

LoRaWAN network

LoRaWAN communication enables creating networks consisting of end-devices, gateways, network servers, and application servers based on the classic structure. The network topology is shown in the Figure 1.

A node can be connected to multiple gateways. The end-devices have three classes: A, B, and C [5]. Class A devices are typically used, but Class C devices are becoming more common. The Class A node has the lowest power consumption and can operate for up to 10 years on a simple button cell. However, the timing of the transmission of Class A devices is also the most limited. With three different profiles, it is easy to find the right one for a particular application.

All in all, it can be said that LoRaWAN technology is used in various applications and systems due to its long-range, low power consumption, high interference immunity, and the possibility of private networking. The application areas are specifically for machine-to-machine (M2M) and IoT solutions.

## 2.2 WiFi and Bluetooth Low Energy

One of the best known and most widespread wireless technologies is WiFi. The wireless data transmission protocol is based on the IEEE 802.11 standard. I would highlight the 802.11a / b / g / n / ac versions from this standard. The 802.11a standard [9] was issued in 1999 and is typically used for long-distance bridging for point-to-point connections. It uses the 5 GHz frequency band and has a maximum data rate of 54 Mbps. The modulation used is orthogonal frequency division multiplexing (OFDM). The 802.11a has a channel width of 20 MHz. The 802.11b standard [10] was also released in 1999, where communication takes place at 2.4 GHz with a maximum speed of 11 Mbps. According to the standard, the modulation used is direct sequence spread spectrum (DSSS) modulation; the channel width is 22 MHz. Older devices usually support this. The 802.11g standard [11] was released later in 2003. It combines the features of the previous two standards with some modifications. The data rate is up to 54 Mbps at 2.4 GHz, and the modulation used is OFDM and DSSS. The standard is backward compatible with 802.11b. Let us jump in time again; the 802.11n [12] standard was released in late 2009. The standard also allows 2.4 and 5 GHz communication, which is achieved with multiple-input multiple-output antenna (MIMO) technology. Here, the data transfer rate can be as high as 100 Mbps. The 5 GHz 802.11ac standard [13], released in late 2013, has already resulted in much higher data rates, capable of up to several 100 Mbps communications. It has also improved the stability of communication. With the passage of time and the emergence of new standards and increasing the data transfer speed and security, the data transfer distance also increased. Nowadays, perhaps the most common devices use 802.11n. [1]

In the world of IoT, the Bluetooth Low Energy (BLE) technology is becoming more prevalent. BLE came with the Bluetooth 4.0 specification, but it is

independent of the Classic Bluetooth [2]. Furthermore, its name denotes that it is characterized by low energy consumption. BLE utilises the 2.4 GHz ISM frequency band, its data transfer rate is around 1 Mbps, and the data transfer distance is around 100 m [14]. It uses 40 physically independent radio channels with 2 MHz bandwidth for communication [2]. Its consumption and communication characteristics are mainly used in sensors or devices where smaller data have to be transmitted over relatively short distances.

### 3 Multi-Technology Solutions

Multi-technology or hybrid solutions are solutions that use several communication technologies. An example of this is the combined use of LoRaWAN, WiFi, and BLE.

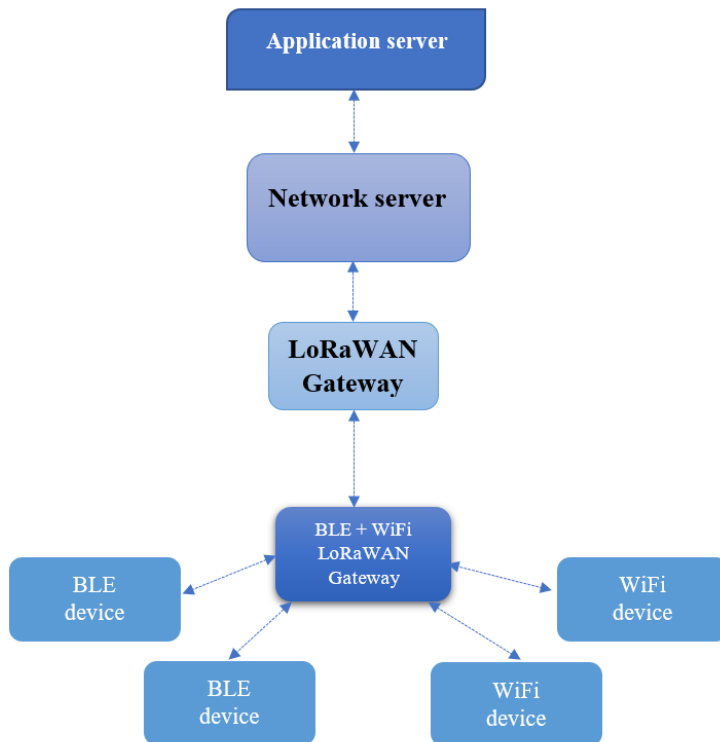


Figure 2  
Multi-Technology network

The Figure 2 shows a schematic of a BLE + WiFi + LoRaWAN network. The block of BLE devices indicates BLE beacons, which are small devices that can use BLE to send their IDs and additional small data and sensor data to devices that can receive it. Their use is usually in the field of tracing. They are often made in a wearable design and no larger than a matchbox or a thicker plastic card. In the Figure 2, WiFi device blocks indicate WiFi-enabled devices. These are typically cell phones, tablets, and notebooks. The BLE + WiFi + LoRaWAN gateway is a device that can receive data from BLE and WiFi devices and detect their proximity. After detection, the data is transmitted to LoRaWAN gateways via LoRa communication.

In the outlined system, the role of BLE and WiFi is to perform in-building positioning or positioning-related tasks, while the LoRaWAN technology is responsible for transmitting data, allowing remote monitoring.

When it comes to WiFi, the use of two types of location is common. One is supported to read the received signal strength indicator (RSSI) range [1]. The other is a time-based approach. The basis for positioning here is monitoring the arrival of RF signals (TOA) and transmitted signals (TOT) [1]. With these two methods, it is possible to implement positioning using WiFi technology. In addition to these, there are more straightforward solutions for determining stay based on proximity perception. Using BLE is a bit of a newer solution in positioning. Like WiFi, fingerprinting, signal propagation analysis, and proximity sensing are commonly used for location [2][15]. The study background does not include a detailed description of the technological background of these solutions.

## **4 Personal and property protection aspects**

One area of property protection is the topic of patrol control. Widespread patrol control systems operate with barcode, magnetic stripe, and proximity card identification [16]. An excellent alternative to this is the BLE + LoRaWAN solution. The guard wears a BLE beacon on his body or clothing, and his visible presence, movement, and route can be determined by passing near the checkpoints. Transmitters are usually designed to have a so-called panic button, which may be suitable for sending additional signals. Some devices can emit an audible signal or can signal with a vibration. These tools can also be used for vigilance monitoring.

Another area of property protection is the issue of entry. The purpose of entry is to regulate persons, vehicles, and possibly other objects or animals [16]. There can be several approaches to admission. One is to prevent unauthorized persons from entering a particular area. The other is that it is necessary to know how many are in a given building, area, and room. The combined use of BLE and LoRaWAN

can also be suitable for this, although a BLE transmitter can be used for identification in the same way as, say, a magnetic card or an RFID card.

It is not precisely the subject of admission, but related to it, residence and monitoring people's flow. In community areas where many people turn up, such as halls, stations, festivals, and malls, it can be essential to know how many people are in each area. This can be used to organize the living force effectively. It is easier to plan if it is possible to estimate how many people will be distributed in which areas at different times of the day. Moreover, it can even be used for immediate response. This does not require special devices, just the WiFi LoRaWAN network and the signal of WiFi-enabled devices in "passersby". In addition to organizing protection, in case of an unexpected event, it is also useful to know the number of people present and their approximate location. In the event of a fire or similar unfortunate incident, the evacuation can be organized.

With the emergence of the current COVID-19 epidemic situation, additional applications for tracking have emerged [17]. These include monitoring distance, contact tracing, proximity detection, signalling, monitoring, and limiting the number of people. The system outlined earlier may also be suitable for these tasks. In places where employees cannot or are not allowed to use a cell phone, BLE may be the solution, and in other cases, WiFi + LoRaWAN applications may be the solution. Of course, the combined application of the three technologies will cover a broader range of applications. Moreover, cleanings scheduled based on the number of visitors can be implemented.

In addition to following people, items cannot be left out of line. Using BLE + LoRaWAN technology, the number and location of products and equipment can be monitored, facilitating inventory. With the help of the BLE beacons applied to the objects, the devices' movement can be monitored, and their design can be indicated. It is also possible to report theft and restrict access. The BLE transmitters placed on the devices are already within reach, but goods are still relatively expensive to equip all objects. Their purchase is around one to three US dollars[2], which is still quite expensive compared to traditional solutions. As a result, it is applied to high-value or vital assets or where it has relevance.

## **Conclusion**

LoRaWAN technology's role was explicitly limited to signalling and data collection in the multi-technology systems and solutions related to the outlined tracing. The location and tracking examples were based on BLE and WiFi technologies. LoRaWAN technology is used in such solutions due to the possibility of private network design, long data transmission distance, and high interference immunity. Building and setting up a network can be relatively quick and straightforward all in such a way that the possibility of further expansion is not a problem either.

The overview described the introduction of tracing and the basic features of the three technologies (LoRaWAN, BLE, WiFi), presented a multi-technology system, and highlighted the personal and property protection aspects. It can be said that the application of the described solutions is especially typical in the field of patrol control, entry control, presence monitoring, and asset management. In addition, due to the current pandemic situation, areas of application related to defence have also emerged.

In the other phase of the research, it is worthwhile to carry out measurements and further studies related to the mentioned technologies by highlighting an application or an area. The study did not address this, but it is possible to do so. The investigation of the location possibilities of the LoRaWAN technology itself could be a further research direction.

## References

- [1] Makki, A.; Siddig, B.; Saad, M.; Bleakley, C.: *Survey of WiFi positioning using time-based techniques*. Computer Networks, Volume 88, 9 September 2015, Pages 218-233, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2015.06.015>
- [2] Ho, Y. H.; Chan, H. C. B.: *Decentralized adaptive indoor positioning protocol using Bluetooth Low Energy*. Computer Communications, Volume 159, 1 June 2020, Pages 231-244, <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.04.041>
- [3] Doss, R.; Trujillo-Rasua, R.; Piramuthu, S.: *Secure attribute-based search in RFID-based inventory control systems*. Decision Support Systems, Volume 132, May 2020, Pages 1-10, <https://doi.org/10.1016/j.dss.2020.113270>
- [4] Janssen, T.; Berkvens, R.; Weyn, M.: *Benchmarking RSS-based localization algorithms with LoRaWAN*. Internet of Things, Volume 11, September 2020, Pages 1-16, <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100235>
- [5] LoRa Alliance: *LoRaWAN Specification V1.0.3, 2018* <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-07/lorawan1.0.3.pdf>
- [6] Noura, H.; Hatoum, T.; Salman, O.; Yaacoub, J-P.; Chehab, A.: *LoRaWAN security survey: Issues, threats and possible mitigation techniques*. Internet of Things, Volume 12, December 2020, Pages 1-37, <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100303>

- [7] Aernouts, M.; BniLam, N.; Berkvens, R.; Weyn, M.: *TDAoA: A combination of TDoA and AoA localization with LoRaWAN*. Internet of Things, Volume 11, September 2020, Pages 1-12, <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100236>
- [8] LoRaAlliance: *About LoRa Alliance*. <https://lora-alliance.org/about-lora-alliance>, accessed 12<sup>th</sup> January 2020
- [9] IEEE Std 802.11a  
*IEEE standard for telecommunications and information exchange between systems - LAN/MAN specific requirements. Part 11: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High Speed Physical Layer in the 5 GHz band*
- [10] IEEE Std 802.11b  
*Supplement to IEEE standard for information technology—telecommunications and information exchange between systems—local and metropolitan area networks-specific requirements. Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: higher-speed physical layer extension in the 2.4 GHz Band.*
- [11] IEEE Std 802.11g  
*IEEE standard for information technology—telecommunications and information exchange between systems—local and metropolitan area networks-specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band.*
- [12] IEEE Std 802.11n  
*IEEE standard for information technology—local and metropolitan area networks-specific requirements. Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput.*
- [13] IEEE Std 802.11ac  
*IEEE Standard for Information technology—telecommunications and information exchange between systems—local and metropolitan area networks-specific requirements. Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications—Amendment 4: enhancements for very high throughput for operation in bands below 6 GHz.*
- [14] Cho, K.; Park, G.; Cho, W.; Seo, J.; Han, K.: *Performance analysis of device discovery of Bluetooth Low Energy (BLE) networks*. Computer Communications, Volume 81, 1 May 2016, Pages 72-85, <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2015.10.008>

- [15] Pu Y.-C., You P.-C.: *Indoor positioning system based on BLE location fingerprinting with classification approach*  
Appl. Math. Model., Volume 62, 2018, Pages: 654-663,  
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.06.031>
- [16] Utassy, S.: *Komplex villamos rendszerek biztonságtechnikai kérdései: doktori (PhD) értekezés.*  
Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem. Magyarország, Bolyai János  
Katonai Műszaki Kar, Katonai Műszaki Doktori Iskola, 2009,  
<http://m.ludita.uni-nke.hu/repozitorium/handle/11410/9723?show=full>
- [17] LoRa Alliance: *How LoRaWAN® Can Help Fight COVID-19.*  
<https://pages.servives/pages.lora-alliance.org/covid-19-lorawan-solutions/>,  
accessed 11<sup>th</sup> October 2020