

CSL félvezető-modulok élettartam függősége a terhelési idő függvényében

Takács Árpád

Fizikus MSc,

Tudományos adatanalitika specializáció

5. évfolyam



BOSCH

Témavezetők

Zsurzsa Sándor

Robert Bosch Kft.

Prof. Dr. Lendvai János

ELTE TTK

Tartalomjegyzék

Köszönetnyilvánítás	3
Absztrakt	4
Szójegyzék	5
1. Az alapvető ismeretek bemutatása	7
1.1. Az élettartam tesztek bemutatása	7
1.1.1. Az általam vizsgált élettartam teszt áttekintése	8
PC_{sec} teszt	8
1.2. Az élettartam modellezés alapjai	9
1.2.1. A meghibásodási módok áttekintése	10
1.2.2. Élettartam modellek	11
1.3. A félvezető modulok hőtani tulajdonságainak jellemzése	14
1.3.1. Hőellenállás	14
1.3.2. Hővezetés	15
1.3.3. Hőtároló képesség	15
1.3.4. Hőimpedancia	15
1.4. A teljesítményelektronika alapjai	16
1.4.1. A félvezető modulok működése	16
1.4.2. A félvezető modulok felépítése	16
1.5. ECPE Guideline AQG324	17
1.5.1. A meghibásodási kritériumok	18
2. A kutatás főbb lépéseinek áttekintése	19
2.1. A feladat definiálása	19
2.2. A projekt megvalósításának lépései	20
3. Hőterjedés szimulációja a minta design elemein	22
3.1. A hőtani szimulációk alapjai	22
3.2. Bevezetés a Reduced Order Modeling-be (ROM)	23
3.2.1. A ROM rendszer modelljének dinamikája	23

3.3.	A port loss paraméter meghatározása	24
3.3.1.	A folyamat lépései	25
3.3.2.	A busbar hőmérsékletmérés eredményei	29
3.4.	Az ideális port loss paraméter beállítása	31
3.5.	A szimulációs paraméterek beállítása	32
3.5.1.	Időlépések számának beállítása	33
3.6.	A termikus szimuláció eredményei	36
3.6.1.	A t_{on} paraméter elvi határának vizsgálata	36
3.6.2.	Az áram és a hőmérséklet-ingadozás kapcsolata	37
3.7.	A szimuláció validációja	38
	A terhelőáram és a t_{on} kapcsolata adott hőmérséklet ingadozásra	39
4.	A CSL félvezető modulok tesztelése	41
4.1.	A szükséges terhelőáram kimérése	41
4.2.	Az élettartam teszt futtatása	42
5.	A teszteredmények elemzése	44
6.	Az elért eredmények és a munkám összefoglalása	47
	Irodalomjegyzék	49

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni Zsurzsa Sándornak és Dóbé Zoltánnak, akik témavezetőként irányították és támogatták a munkámat.

Köszönöm Alen-Pilip Prskalo-nak a félvezető modulokkal és az élettartam-tesztekkel kapcsolatban nyújtott szakmai segítségét.

Tóth Józsefnek és Tafferner Józsefnek hálás vagyok, hogy segítettek a tesztberendezések beállításában és kezelésében, ami alapvető fontosságú volt a kísérletek sikeres megvalósításához.

Köszönöm továbbá Nagy Bencének és Hidas Annának a szimulációk terén nyújtott iránymutatásukat, mely nagyban hozzájárult a projekt eredményességéhez.

Hálával tartozom Dr. Lendvai Jánosnak az egyetemi támogatásért, valamint hogy befogadta a projektet az egyetem részéről.

Végül, de nem utolsósorban, szeretném megköszönni a Robert Bosch GmbH valamennyi dolgozójának munkáját, amely nélkül a projekt nem valósulhatott volna meg.

Absztrakt

Az elektromos járművek egyik fontos alkotóeleme az inverter, amelynek feladata az egyenáram váltóárammá alakítása. Az inverter szíve a félvezető modul (PM), amelynek fejlesztésében az utóbbi években jelentős fejlődés tapasztalható. Az autógyártók részéről egyre növekvő igény mutatkozik a nagyobb teljesítményű, tartósabb és olcsóbb félvezető modulok iránt. A jelenleg használt modulok alkatrészeinek korlátai miatt nehézségek adódnak a nagyobb hatékonyság és teljesítménysűrűség elérésében. Ezért az utóbbi években több próbálkozás történt új és jobb modulok kifejlesztésére. Az újabb és modernebb modulok fejlesztésében fontos lépés azok élettartamának becslése. Az autógyártók elvárják, hogy a félvezető modulok fejlesztői bizonyos szabványok alapján garanciát vállaljanak arra, hogy a termék normál használat mellett átlagosan legalább 15 éven keresztül megőrzi a funkcióját. E követelmény teljesítése érdekében a fejlesztő cégek különböző módszereket alkalmaznak annak előrejelzésére, hogy bizonyos használattal kapcsolatos hatások hogyan károsíthatják a modult. Ez magában foglalja a hőmérsékleti, elektromos és mechanikai hatások következményeit a használat során. Ezeknek a környezeti hatásoknak a károsító hatásai szimulációk és élettartamtesztek révén becsülhetők meg. A tesztek során kulcsfontosságú, hogy a valós körülményeket a lehető legjobban modellezzük, amikor a termék meghibásodását vizsgáljuk. Ebben a vizsgálatban a tesztek időtartama döntő fontosságú, és annak esetleges csökkentése jelentős mennyiségű időt és pénzt takaríthat meg a fejlesztésben részt vevő cégek számára. Kutatásom elsődleges feladata annak meghatározása, hogy hogyan lehetne csökkenteni a tesztelés során használt terhelési időket. A rövidített tesztek során fontos, hogy a meghibásodási mód változatlan maradjon, így a kapott eredmények továbbra is leírják a termék öregedése során fellépő terheléseket.

Szójegyzék

Az alábbiakban a dolgozatomban használt fontosabb kifejezéseket foglaltam össze.

Fogalom	Definíció
CSL	Compact Silicon Carbide Line alapú kompakt teljesítménymodul-család. Ezzel a termékkel dolgoztam.
Gyorsított öregedési teszt	Egy olyan eljárás, amely során az alkatrészt vagy modult szélsőséges körülmények között (például nagy hőmérsékleten, mechanikai ciklusokkal vagy intenzív páratartalom mellett) üzemeltetik, hogy gyorsított módon idézzenek elő anyagfáradást és meghibásodásokat.
PC_{sec}	Egy olyan vizsgálati eljárás, amelyben a félvezető modult ismételt árammal való bekapcsolási-kikapcsolási ciklusoknak (power cycling) teszik ki. Ennek célja, hogy szimulálja a modul valós működése során fellépő termo-mechanikai feszültségeket, és felmérje az alkatrészek tartósságát.
APC (Active Power Cycler)	Aktív teljesítményszabályozásra képes tesztberendezés. Ezzel végeztem a PC_{sec} teszteket.
t_{on}	A PC_{sec} bekapcsolási időszaka, amikor áramot vezet.
t_{off}	A PC_{sec} kikapcsolási időszaka, amikor nem vezet áramot.
Pinfin	Egyik fajta hűtőtípus; tűskés hűtőborda, nagyobb hűtőfelület és jobb hőelvezetés.
Closed cooler	Másik fajta, zárt körű hűtőrendszer, ahol a hűtőfolyadék nem érintkezik a külső levegővel.
TBD	To Be Determined - Később kerül meghatározásra

IGBT	Szigetelt kapus bipoláris tranzisztor (Insulated Gate Bipolar Transistor), amelyet teljesítményelektronikai alkalmazásokban használnak.
MOSFET	Fém-oxid-félvezető térvezérlésű tranzisztor (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor), amelyet nagy sebességű kapcsolásra terveztek.
ΔT	Hőmérsékletkülönbség; az elért hőmérséklet maximális és minimális értékének különbsége egy ciklus során.
U_{DS}	Drain-source (csatorna-forrás) között eső feszültség amely a teszt során figyelt egyik paraméter.
SilOil	Szilikonolaj, amelyet hűtőközegként használnak.
FEM	Végeselem módszer (Finite Element Method), amelyet termikus és mechanikus szimulációk elvégzésére használnak.
ROM	Csökkentett méretű modell (Reduced Order Modeling), amely a nagy komplexitású rendszerek egyszerűsített szimulációjára szolgál (dimenzióanalízissel dolgozik).
ECPE Guideline AQG324	Az autóiipari teljesítményelektronikai modulok élettartam tesztelésére vonatkozó iránymutatás.
Weibull-görbe	Valószínűségi eloszlás, amelyet gyakran használnak élettartam tesztek kiértékelésére.
Busbar	Nagy áramerősségek vezetésére szolgáló fém sáv vagy rudazat, amelyet az elektromos csatlakozások biztosítására használnak.
Időlépések száma	Megadja azon diszkrét intervallumok számát, ahány részre a szimulálási intervallumot felosztjuk a diszkrétizáció során.
Port loss	A környezet és a termék közötti termikus kapcsolat teljesítményét adja meg.
Gyorsítási faktor	Olyan arányszám, amely megmutatja, hogy a gyorsított tesztkörülmények (például magasabb hőmérséklet vagy nagyobb terhelési ciklusok) milyen mértékben gyorsítják fel az alkatrész öregedését vagy meghibásodását a normál üzemi körülményekhez képest.

1. fejezet

Az alapvető ismeretek bemutatása

1.1. Az élettartam tesztek bemutatása

Amikor egy félvezető modult megvásárol egy autógyártó, akkor szeretne egy becslést kapni arról, hogy "átlagos használat" mellett mennyi ideig lesz a termék működőképes az autóban. Felmerülhet a kérdés, hogy mi számít átlagos használatnak; ezt minden esetben az autógyártó mondja meg. Ehhez felállítanak egy profilt az adott típust használó vezetőről: átlagosan milyen távolságokra, milyen rendszerességgel, és milyen stílusban vezetnek. A példa kedvéért egy Volkswagen ID.4-es modellt vezető családanya városi környezetben vezet 2x15km-t munkába és 2x10km-t amíg a gyerekeit viszi iskolába és sportedzésre. Ezt hetente 5x teszi meg, hétvégén csak ritkán használja az autót.

Ezzel szemben egy Porsche Taycan-t vezető középkorú férfi "élményvezetésként" tekint erre az autóra, így csak hetente 2x veszi elő amikor megy vele 80km-t. Ekkor azonban nagyobb igénybevételnek van kitéve az autó az erősebb gyorsulásoknak és a nagyobb sebességnek köszönhetően.

A két (fiktív) esetben nyilvánvalóan más igénybetételnek van kitéve az autó, ennek megfelelően kapunk egy elvárást az autógyártók felől az egyes autótípusokhoz. Általános elvárás szokott lenni, hogy az adott autó típushoz tartozó termék átlagosan legalább 15 évig őrizze meg a funkcióját.

Felmerülhet a kérdés, hogy milyen módszerekkel lehetséges ennek az ellenőrzése; e célt szolgálják az ún. élettartam tesztek.

Az ilyen gyorsított öregedési tesztek célja a minta várható élettartamának meghatározása. Mivel egy teszt során nincs lehetőség normál használat szimulálása mellett évekig várni, így magasabb terhelést hozunk létre a napi használathoz képest annak érdekében hogy a minta gyorsabban meghibásodjon. Az ilyen teszteket gyorsított élettartam tesztnek nevezzük.

Érdekes kérdés, hogy a gyorsított öregítési tesztek eredményeiből mennyire lehet a normál használatból származó élettartamot előrejelezni; ennek módszereiről még részletesebben szó lesz.

1.1.1. Az általam vizsgált élettartam teszt áttekintése

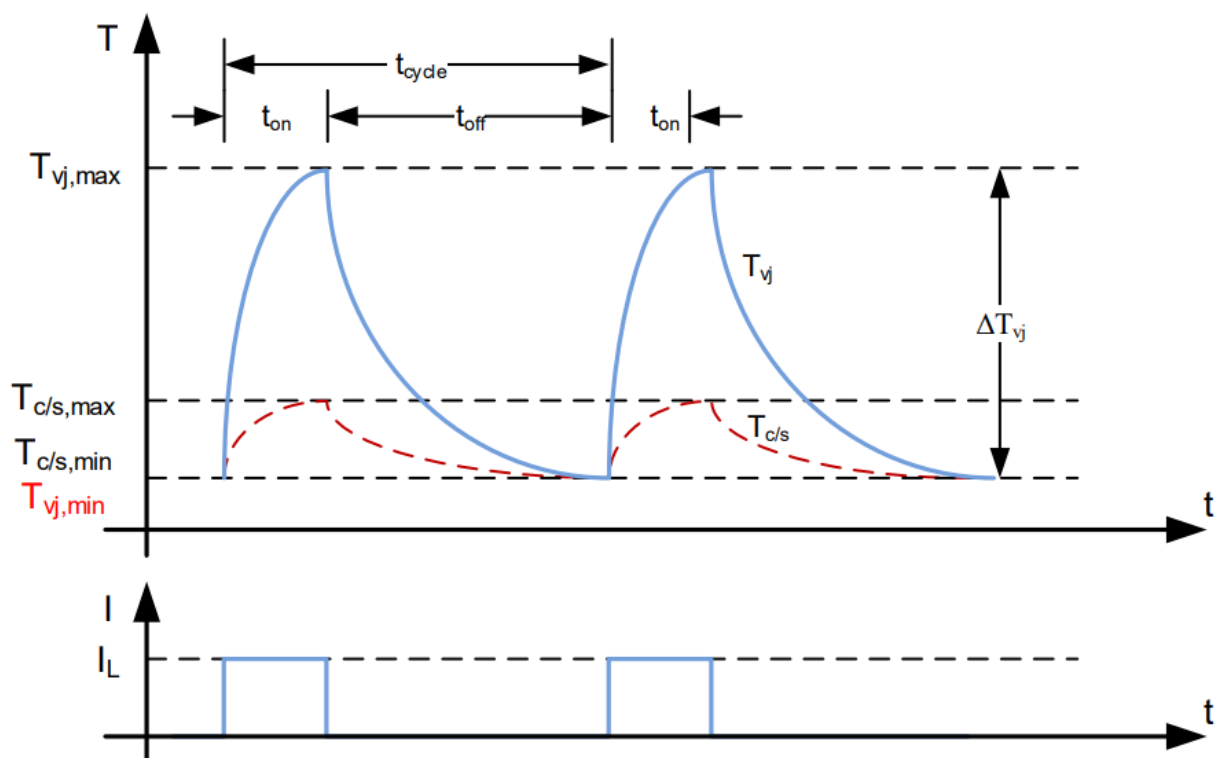
PC_{sec} teszt

Ez egy aktív teszt (a mintán áramot folytatunk át, és az áram hőhatása melegíti fel a mintát), melynek során a bekapcsolási idő (az az időtartam amíg a mintán áramot folytatunk át) meglehetősen rövid: kevesebb mint 5 másodperc. Miután a minta felmelegedett, bizonyos idő alatt a minta visszahűl az eredeti hőmérsékletére, és a ciklus kezdődik előről. A teszt során egy előre meghatározott hőmérsékletkülönbséget adunk meg (pl. 70K vagy 95K) melyet a bekapcsolási idő alatt el kívánunk érni. Ehhez meglehetősen nagy áramok használatára van szükség annak érdekében, hogy a minta ilyen rövid idő alatt megfelelően felmelegedjen (nagyságrendileg 300-400 A). Az ilyen rövid, intenzív terhelések leginkább a chipék környéki meghibásodásokért felelnek.

Néhány jelölés:

Paraméter	Jelölése
A chip hőmérsékletének emelkedése a teszt során a beállítási folyamat után	$\Delta T_{vj,start}$
Ciklusszám	N_{start}
Terhelőáram	I_L
A terhelőáram bekapcsolási ideje (fűtési periódus)	t_{on}
A terhelőáram kikapcsolási ideje (hűtési periódus)	t_{off}
A teszt kezdetén mért minimális chip hőmérséklet	$T_{vj,min}$
A teszt kezdetén mért maximális chip hőmérséklet	$T_{vj,max}$
Hűtőborda hőmérséklete (közvetett hűtésű modulok)	T_s
Alaplap hőmérséklete (közvetett hűtésű modulok alaplappal)	T_c
Hűtőközeg bemeneti hőmérséklete	T_{cool}
Hűtőközeg áramlási sebessége	Q_{cool}
Kapufeszültség	V_{gate}
Termikus ellenállás (a modul teszt során meghatározva)	R_{th}

1.1. táblázat. Szabályozott paraméterek teljesítményelektronikai modul teszteléshez [10]



1.1. ábra. A PC_{sec} teszt hőmérséklet és áramfejlődése az időben. [10]

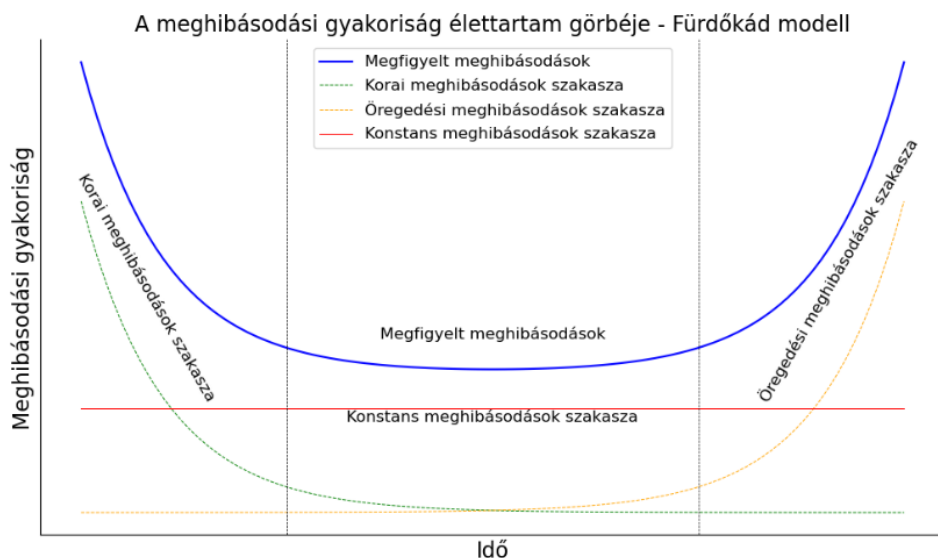
Ezen kívül léteznek más gyorsított öregedési tesztek is, amelyekkel a termék alkatrészeinek más körülmények közötti terhelésével vizsgáljuk a termék hibamechanizmusait.

1.2. Az élettartam modellezés alapjai

Az egyes eszközök elhasználódásának vizsgálatánál 3 különböző szakaszt különböztetünk meg:

1. Az első szakasz a termék működésének kezdeti ideje, amikor kijönnek a korai, gyártási hibák. Az ilyen jellegű hibák száma egy magas értékről folyamatosan csökken.
2. A második szakasz a állandósult hibagyakoriság szakasza, amikor már túl vagyunk a kezdeti hibákon. Ez a véletlenszerű meghibásodásokat írja le, aminek valószínűsége állandó a termék élete alatt.
3. A harmadik szakasz az öregedési idő, amikor az elhasználódástól megint nőni kezd a meghibásodási ráta. Ennek a valószínűsége a termék korának előrehaladtával nő.

A három különböző típusú meghibásodás mindegyikét egy-egy valószínűségi sűrűségfüggvénnyel lehet jellemezni, és a megfigyelt, tényleges meghibásodási sűrűségfüggvény ezeknek a három sűrűségfüggvénynek az összegeként adódik.



1.2. ábra. A termékek meghibásodási gyakoriságát az ún. fürdőkád modell adja meg.

A termékek élettartam tesztelése során mi a 3. szakaszban bekövetkező hibákat szeretnénk elemezni (az első szakaszban leginkább a gyártási hibák okozzák a termék meghibásodását, míg a véletlenszerű, random hiba a teljes élettartam alatt állandó eséllyel következik be).

1.2.1. A meghibásodási módok áttekintése

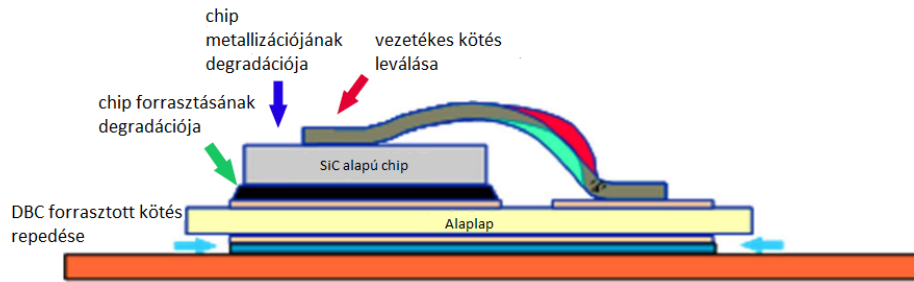
Egy termikus tesztelésénél megkülönböztethetünk passzív és aktív teszteket.

Ahogy a teljesítmény modulok átmennek a fűtési és hűtési fázisokon, termo-mechanikai feszültségek alakulnak ki bennük, amelyek idővel meghibásodáshoz vezethetnek. A termomechanikai stressz kialakulásának oka a termékben ébredő hőmérsékletgradiens, és az egyes alkatrészek eltérő anyagának hőtágulási együtthatója. A legfőbb meghibásodási mechanizmusok a következők:

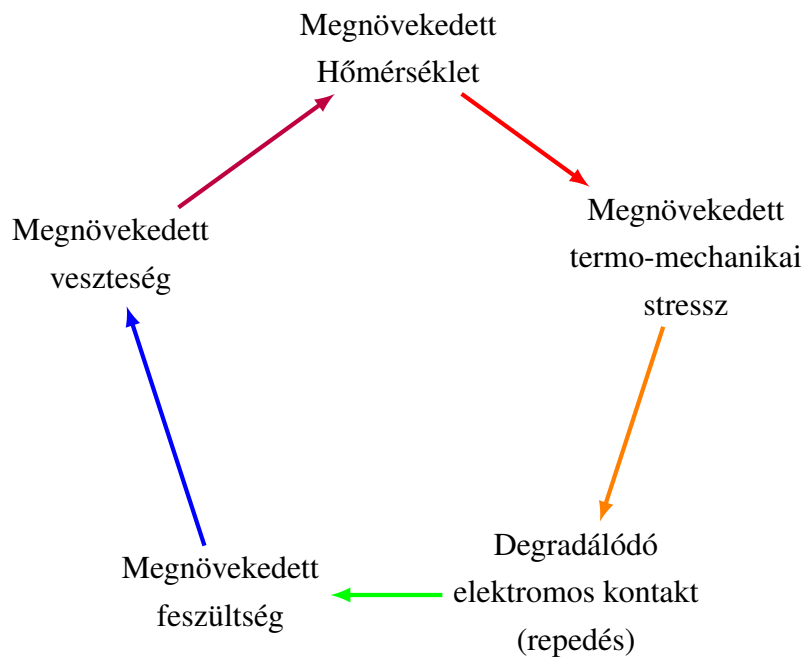
Bondhuzal fáradás: Az ismétlődő hőtágulás és összehúzódás a bondhuzalok anyagában repedéseket idézhet elő, különösen a huzalok hajlítási pontjainál vagy a rögzítési helyeknél (például a bond sarkánál). Ez idővel a huzalok leválásához, a kontaktus megszakadásához, és ezáltal az elektromos vezetőképesség romlásához vezet.

Forrasztási réteg degradáció: A forrasztási rétegek repedéseket képezhetnek vagy porózussá válhatnak, ami leváláshoz és megnövekedett hőellenálláshoz vezet; ezt a jelenséget gyakran forrasztási fáradásnak nevezik. Hasonlóan, a szinterelt réteg is degradálódhat, amely szintén befolyásolja a modul és hővezetési képességét.

Metallizációs réteg rekonstrukciója: Nagy áramok hatására alumínium szemcsék extrudálódnak a metallizációs rétegben, ami csökkenti a hatékony érintkezési felületet, növeli az elektromos ellenállást, és ezzel tovább gyorsítja a modul degradációját.



1.3. ábra. Tipikus meghibásodási helyek egy félvezető modulon. [2]



1.4. ábra. Meghibásodási folyamat vizualizálása

1.2.2. Élettartam modellek

Az én munkámban a PC_{sec} teszttel foglalkoztam, így az alábbiakban az ehhez kapcsolódó élettartam modelleket tekintem át.

Egy élettartam modell célja az, hogy összefüggést találjon az teszt során elért ciklusszámra a teszt egyéb paraméterei függvényében. A teszt adataira illesztjük az egyes modelleket, így illesztéssel kaphatjuk meg az egyes egyenletben található konstansok értékét. Azonban minél összetettebb modellt alkalmazunk, annál több konstans jelenik meg az egyenletekben, így annál több tesztre lenne szükség ahhoz, hogy a konstansok értékeit meghatározhassuk. Mivel a modellek komplexitása növeli a szükséges tesztek számát és a kiértékelés komplexitását, így egy egyszerűbb modell alkalmazása mellett döntöttünk.

A legegyszerűbb modell az ún. *Coffin-Manson modell*; eszerint a ciklusszám a hőmérséklet-ingadozástól hatványfüggvényével arányos:

$$(1.1) \quad N_f = A \cdot \Delta T_j^{-k_{cm}}$$

Ettől kissé összetettebb modell az ún. *Lesit-modell*; eszerint a ciklusszám a hőmérséklet-ingadozástól és a középhőmérséklettől függ (közep hőmérséklet a hőmérséklet-ingadozás minimális és maximális hőmérsékletének átlaga).

$$(1.2) \quad N_f = A \cdot \Delta T_j^a \cdot e^{\frac{E_a}{k_B \cdot T_{j,mean}}}$$

ahol:

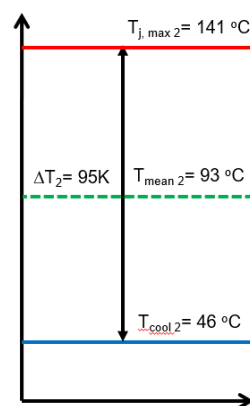
- Az első tag, ΔT_j^a , a **Coffin-Manson-tag**, az anyagok ciklikus termomechanikai terhelésen alapuló, kis ciklusszámú (LCF: Low-Cycle Fatigue) fáradását írja le.
- A második tag, $e^{\frac{E_a}{k_B \cdot T_{j,avg}}}$, az **Arrhenius-tag**, amely a hőmérséklettől függő aktiválási energiát és annak az abszolút hőmérsékletre gyakorolt exponenciális hatását írja le

A modell egyszerűsége miatt (csak két állandót használ: A és E_a), kevesebb kísérleti adat is elegendő ahhoz, hogy hatékony görbeillesztést lehessen végezni az élettartam meghatározásához.

A rövidített ciklusidejű tesztet úgy futtattam, hogy az általam választott középhőmérséklet meg egyezzen az eredeti teszt középhőmérsékletével. Ha a középhőmérsékletek állandók, akkor az Arrhenius-tag konstans értéket vesz fel, így elhagyható, mert nem befolyásolja a hőmérséklet-ingadozás miatti relatív élettartam-változást.

Ezen speciális beállításokkal a Lesit-modell a Coffin-Manson modellre egyszerűsíthető.

$$(1.3) \quad N_f = \underbrace{A \cdot \Delta T_j^a}_{\text{„Coffin-Manson tag”}} \cdot \underbrace{\exp\left(\frac{Q}{R \cdot T_m}\right)}_{\text{„Arrhenius tag”}}$$



1.5. ábra. A hőmérséklet ingadozás a PC_{sec} teszt során.

Az ún. *Bayerer-modell* egy összetettebb, több változós modell:

$$(1.4) \quad N_f = K \cdot \Delta T_j^{\beta_1} \cdot e^{\frac{\beta_2}{T_j}} \cdot t^{\beta_3} \cdot I^{\beta_4} \cdot U^{\beta_5} \cdot D^{\beta_6}$$

ahol:

- N_f : az élettartam ciklusok számában kifejezve,
- K : egy empirikus állandó, amely az anyagra és a körülményekre jellemző,
- $\Delta T_j^{\beta_1}$: a hőmérsékletingadozás, ahol β_1 egy empirikus kitevő,
- $e^{\frac{\beta_2}{T_j}}$: az Arrhenius-függvény, amely a hőmérsékletfüggő aktiválási energiát veszi figyelembe,
- t^{β_3} : az időhatás (t_{on} és t_{off} figyelembevétele), ahol β_3 az időre vonatkozó kitevő,
- I^{β_4} : az áramerősség, ahol β_4 az áramfüggést jelölő kitevő,
- U^{β_5} : a feszültség, ahol β_5 a feszültségfüggés kitevője,
- D^{β_6} : egyéb környezeti hatás vagy károsodás mértéke (például mechanikai terhelés vagy páratartalom), ahol β_6 a hozzá kapcsolódó kitevő.

Az ún. *Scheuermann-modell* egy még összetettebb, több paramétert használó élettartam-előrejelzési modell:

$$(1.5) \quad N_f(\Delta T_j, T_{j,min}, aT_{j,on}) = A \cdot \Delta T_j^\alpha \cdot a^{\beta_j} \cdot a^{\Delta T_j + \beta_1} \cdot \left(\frac{C + r_{on}}{C + 1} \right) \cdot \exp\left(\frac{E_a}{k_B \cdot T_{jm}} \right) \cdot f_{Diode}$$

ahol:

- N_f : az élettartam ciklusok számában kifejezve,
- A : egy kísérleti állandó,
- ΔT_j^α : a hőmérsékletingadozás, ahol α egy empirikus kitevő,
- a^{β_j} : egy skálázási tényező, amely egy adott áram- vagy teljesítményfüggő paraméterhez kapcsolódik, és β_j a hozzá tartozó kitevő,
- $a^{\Delta T_j + \beta_1}$: egy korrekciós tényező, amely a hőmérsékletingadozást és a β_1 empirikus kitevőt használja a finomhangoláshoz,
- $\frac{C + r_{on}}{C + 1}$: egy arányossági tényező, amely C és r_{on} specifikus paraméterek alapján módosítja az élettartamot (például kapacitás vagy ellenállás),

- $\exp\left(\frac{E_a}{k_B \cdot T_{jm}}\right)$: az Arrhenius-függvény, amely a hőmérséklettől függő aktiválási energiát veszi figyelembe. Itt E_a az aktiválási energia, k_B a Boltzmann-állandó, és T_{jm} az átlagos csomóponti hőmérséklet,
- f_{Diode} : egy további korrekciós tényező, amely a diódák működési jellemzői alapján módosítja az élettartam előrejelzését.

1.3. A félvezető modulok hőtani tulajdonságainak jellemzése

Ebben a részben megtalálhatók azok a hőtani fogalmak, amelyek elengedhetetlenek a dolgozat megértéséhez. Ezek gyakran speciális kifejezések, amelyek megkönnyítik az egyes komponensek hőterhelésének kényelmes kezelését.

1.3.1. Hőellenállás

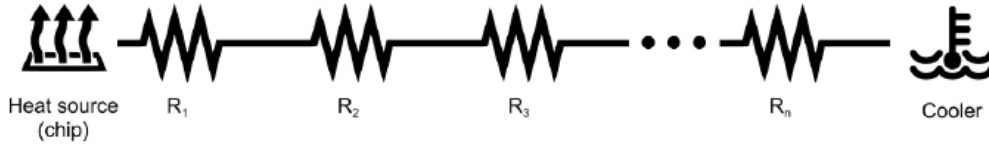
A hőellenállás (R_{th}) azt méri, hogy egy anyag milyen mértékben ellenáll a hőmérsékletváltozásnak, amikor külső hőáram hat rá. Úgy definiáljuk, mint két felület közötti hőmérséklet-különbség és a távolságuk aránya. Az egyenletben q az alkalmazott hőáramot jelöli W/m^2 -ben, T az egyik felület hőmérsékletét, T_{amb} pedig a környezeti hőmérsékletet, amely jellemzően a félvezető modulok hűtőközegének hőmérséklete. A P_v a félvezető modulok hőáramát jelöli, ami a chip által generált hővesztést tükrözi. Az R_{th} kifejezhető a hővezetőképesség (λ) és a hőút hossza (L) segítségével is. A hőellenállás függ a geometriai és anyagi tulajdonságoktól is.

$$(1.6) \quad R_{th} = \frac{\Delta T}{q} = \frac{T - T_{amb}}{q} = \frac{L}{\lambda \cdot A}$$

A hőellenállás hasonló az elektromos ellenálláshoz; ha több anyag különböző hőellenállással rendelkezik és egymás mellé vannak helyezve, a hőátadás ekvivalens hőellenállással írható le (hasonlóan az elektromos ellenálláshoz):

$$(1.7) \quad R_{th} = R_{th,1} + R_{th,2} + R_{th,3} + \dots + R_{th,N} = \sum_{i=1}^N R_{th,i}$$

Ebben az analógiában a feszültség a hőmérséklet-különbségnek felel meg, míg a töltés és az áram a hő változásának és a hő időbeli áramlásának felel meg. Egy félvezető modulban a hő a chip generálja, és a hűtő veszi el; közöttük több réteg található. Ez egy egydimenziós ábrázolásban látható a 1.6 ábrán. A félvezető modul részletes felépítése a 1.4.2 szakaszban kerül bemutatásra.



1.6. ábra. A félvezető modul rétegeinek ábrázolása [15]

A félvezető modulokra vonatkozóan,

1.3.2. Hővezetés

A hővezetés (C), amelyet W/m^2 -ben mérnek, azt mutatja meg, hogy egy anyag milyen sebességgel vezeti a hőt hővezetés útján. Ez a hőellenállás (R_{th}) inverze, és a 1.8 egyenlettel fejezhető ki. A hőellenálláshoz hasonlóan a hővezetés is az anyag geometriájától függ. A hővezetőképesség (λ) az 1.8 egyenletben egy anyagspecifikus tulajdonságot jelöl.

$$(1.8) \quad C = \frac{q}{\Delta T} = \frac{1}{R_{th}} = \frac{\lambda}{L}$$

1.3.3. Hőtároló képesség

A hőtároló képesség (C_{th}) egy tárgy azon képességét jelenti, hogy veszteség nélkül tároljon hő-energiát. Az 1.9 egyenletben definiált módon a C_{th} a rendszerhez hozzáadott hő (Q) és a hőmérsékletváltozás (T) közötti kapcsolatot fejezi ki. A tárgy tömege (m) és a fajhő (C_p) is szerepel az egyenletben. Minél nagyobb a hőtároló képesség, annál több energiát tud a rendszer tárolni egy adott hőmérséklet-változásra.

$$(1.9) \quad C_{th} = \frac{dQ}{dT} = m \cdot C_p$$

1.3.4. Hőimpedancia

A hőimpedancia (Z_{th}) egy rendszer átmeneti hűválaszát írja le, ami azt tükrözi, hogy mennyire ellenáll a hőnek az idő függvényében, hasonlóan a hőellenálláshoz. A 1.10 egyenlet a hőimpedanciát a hőmérséklet-különbség ($T(t) - T_{amb}$) és a hőáram (q) arányaként írja le.

$$(1.10) \quad Z_{th}(t) = \frac{\Delta T(t)}{q} = \frac{T(t) - T_{amb}}{q}$$

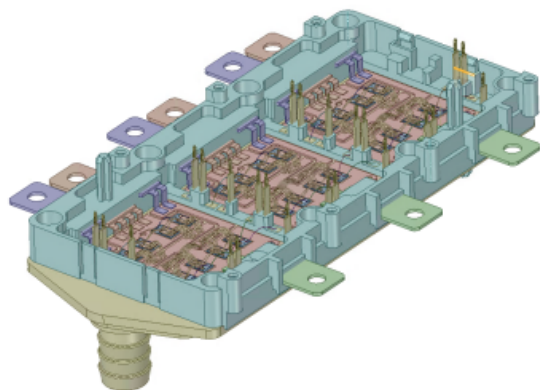
Ez az egyenlet a rendszer csomópontjának hűlési viselkedését írja le. Kezdetben a hőimpedancia közel nulla, ami azt jelzi, hogy nincs jelentős hőfelhalmozódás. Az idő múlásával a rendszer reagál az alkalmazott hőre, végül pedig az ábra ellaposodik, amikor eléri az egyensúlyi állapotot. A hőimpedancia végső értéke az egyensúlyi hőellenállást képviseli.

1.4. A teljesítményelektronika alapjai

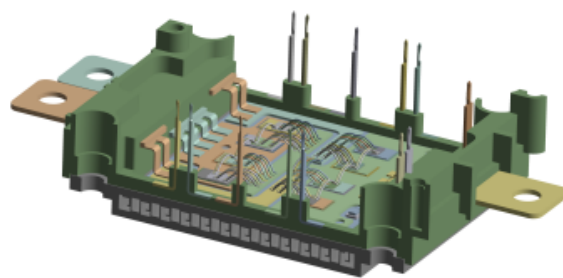
Ebben a részben a teljesítményelektronika alapjait foglaljuk össze.

1.4.1. A félvezető modulok működése

Az általam használt termék neve CSL (Compact Silicon Carbide Line). Ez egy háromfázisú AC áram átalakítására képes eszköz (DC áramból), ennek érdekében 3db egyfázisú átalakítót tartalmaz. Egy egyfázisú átalakítót B2 hídnak nevezünk, míg egy 3 fázisút B6 hídnak hívjuk. Egy ilyen 3 fázisú átalakító 6 switchet (kapcsolót) tartalmaz, és minden switch 4 chipet foglal magában. (A használat során a chippek szolgálnak az elsődleges hőforrásként). Azért, hogy a termék ne melegedjen túl, hűtőfolyadékkal áramoltatásával hűtésre is szükség van. A hűtő típusát tekintve 2 fő típus ismert: closed cooler és pinfines változat. Hűtőfolyadék szempontjából leginkább víz-glikol keveréket és szilikonolajat alkalmaznak a megfelelő fagyás és forráspontjuk, valamint a megfelelő hőátadási együttható (HTC - Heat Transfer Coefficient) értékeik miatt.



(a) A CSL félvezető modul B6 hídjá.



(b) A CSL félvezető modul egyik B2 hídjá.

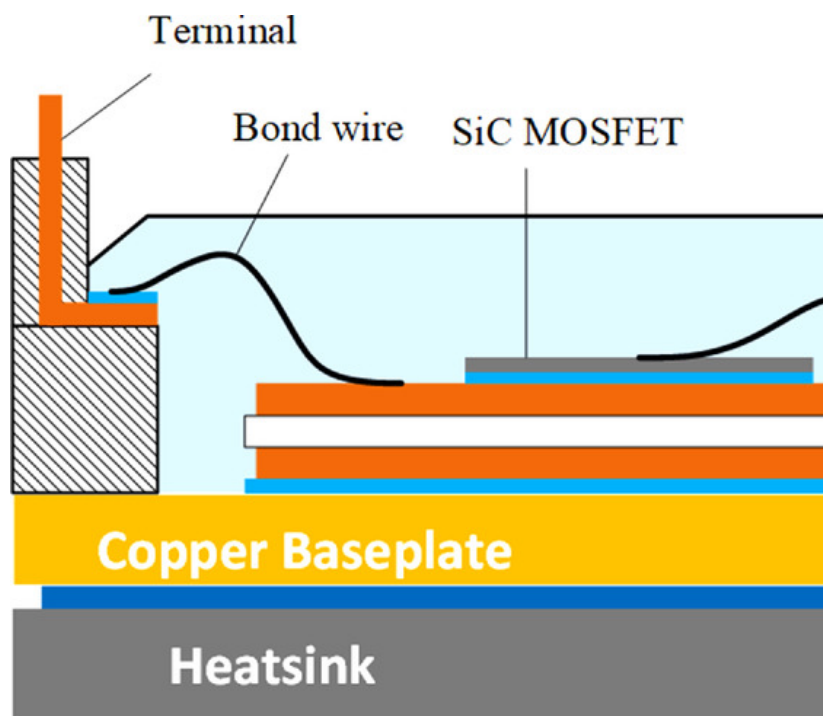
1.7. ábra. A CSL félvezető modul 3 db B2 hídból épül fel.¹

Az áram átalakítását a modulon belül a félvezető eszközök végzik mint a IGBT(Insulated gate bipolar transistor) vagy MOSFET (Metal-oxid-semiconductor field effect transistor). A félvezető modulok továbbá hozzájárulnak a feszültség szabályozásához a jármű elektromos rendszerében. Segítenek fenntartani a stabil feszültségszinteket, biztosítva az elektronikus alkatrészek megbízható és egyenletes működését.

1.4.2. A félvezető modulok felépítése

A félvezető modulok típustól függően eltérő felépítésűek lehetnek, azonban az eszenciális részek hasonlóak. Egy lehetséges, sematikus ábra látható a 1.8 ábrán.

¹Saját Ansys modell alapján.



1.8. ábra. Teljesítmény modul sematikus ábrája [5]

A modulok legtöbbször egy réz, esetleg alumínium hűtőre kerülnek, melyekhez valamilyen hőátadó réteg csatlakozik (ez lehet forrasztanyag, ragasztó vagy egyéb laminált réteg). Ennek a fő funkciója, hogy rögzítse a chipet és biztosítsa a hő megfelelő elvezetését a réz alaplap(copper baseplate) felé, amely közvetlen kapcsolatban áll a hűtőbordával (heatsink). A modul belsejében található chip működés közben hőt termelnek, ezt a hőt az alaplemez és a hűtő továbbítja a környezet felé.

1.5. ECPE Guidline AQG324

Az autógyártók felől általánosan elvárt követelmény az ún. ECPE Guidline AQG324 teljesítése. Ez a dokumentum részletesen szabályozza az elvégzendő élettartam tesztek: az egyes tesztek részletes leírását, használandó beállítási paraméterek értékeit tartalmazza.

Néhány fontosabb gondolat a szabványból:

- A be- és kikapcsolási időtartam (ciklusidő) szabályozását állandóan beállított időértékekkel (t_{on} , t_{off}) kell megvalósítani. Ezeket a teszt előtt úgy kell meghatározni, hogy elérjék a teszthez szükséges chip hőmérséklet-emelkedést, ΔT_{vj} -t.
- Ha a chip hőmérsékletváltozás ΔT_{vj} a teszt követelményekhez szükséges hőmérséklet-emelkedést nem éri el a megfelelő t_{on} és t_{off} paraméterek kiválasztásával, megengedett a chip hőmérsékletváltozás ΔT_{vj} hőmérséklet-emelkedésének befolyásolása a teljesítményfélvezető kapufeszültségének megfelelő módosításával. Ehhez a kapufeszültség változtatása csak a teljesítményfélvezető telítési tartományában megengedett, és azt a teszt elején egyszer be kell állítani.

- Minden egyéb szabályozási módszer, mint például a be- és kikapcsolási idő szabályozása a hűtőborda hőmérsékletének T_S vagy az alaplap hőmérsékletének T_C figyelésével, vagy állandó teljesítményvesztéssel P_L , nem megengedett.

1.5.1. A meghibásodási kritériumok

Azt, hogy PC_{sec} teszt esetén egy modult meghibásodottnak tekintünk ahhoz a következők közül kell valamelyiknek teljesülnie:

Paraméter	Eltérés a standard értéktől
Drain-source feszültség (U_{DS}) növekedése	+5%
Chip hőmérsékletváltozás dT_{vj} növekedése	+20%

1.2. táblázat. Élettartam végi teszt (EOL: End of life criteria) kritériumok PC_{sec}/PC_{min} -hez [10]

2. fejezet

A kutatás főbb lépéseinek áttekintése

Az eredményes munkához elengedhetetlen a megfelelő tervezés. Ezzel elkerülhetők a szükségtelen folyamatok, átláthatóbbá és letisztultabbá válnak az elvégzésre váró feladatok. Fontos tisztázni, hogy mit is szeretnénk vizsgálni, és milyen módszerekkel szeretnénk elérni azt. Emellett végig kell gondolni azt is, hogy mi a motivációnk, miért is csináljuk éppen az adott kutatást.

Ebben a fejezetben a feladatot fogjuk pontosan definiálni, a háttérben meghúzódó motiváció(ka)t áttekinteni. Ezután megpróbáljuk a feladatot apróbb lépésekre bontani, és azok sorrendjét megtervezni.

2.1. A feladat definiálása

A feladat annak vizsgálata, hogy a t_{on} csökkentésével (és ezzel együtt az áram növelésével) hogyan változik az egyes minták élettartama, valamint meghibásodási mechanizmusa a ha a hőmérséklet ingadozás változatlan marad a ciklusok során.

Az eredeti tesztben 3 másodperc alatt felfűtötték a mintát 44 fokról 139 fokra, majd 7 másodperc alatt visszahűtötték, majd a folyamat kezdődik előről. Egy ciklus így 10 másodpercig tart, ez folytatódik addig, amíg a minta valamelyik mérési paramétere el nem éri valamelyik [10]-ben rögzített eltérést.

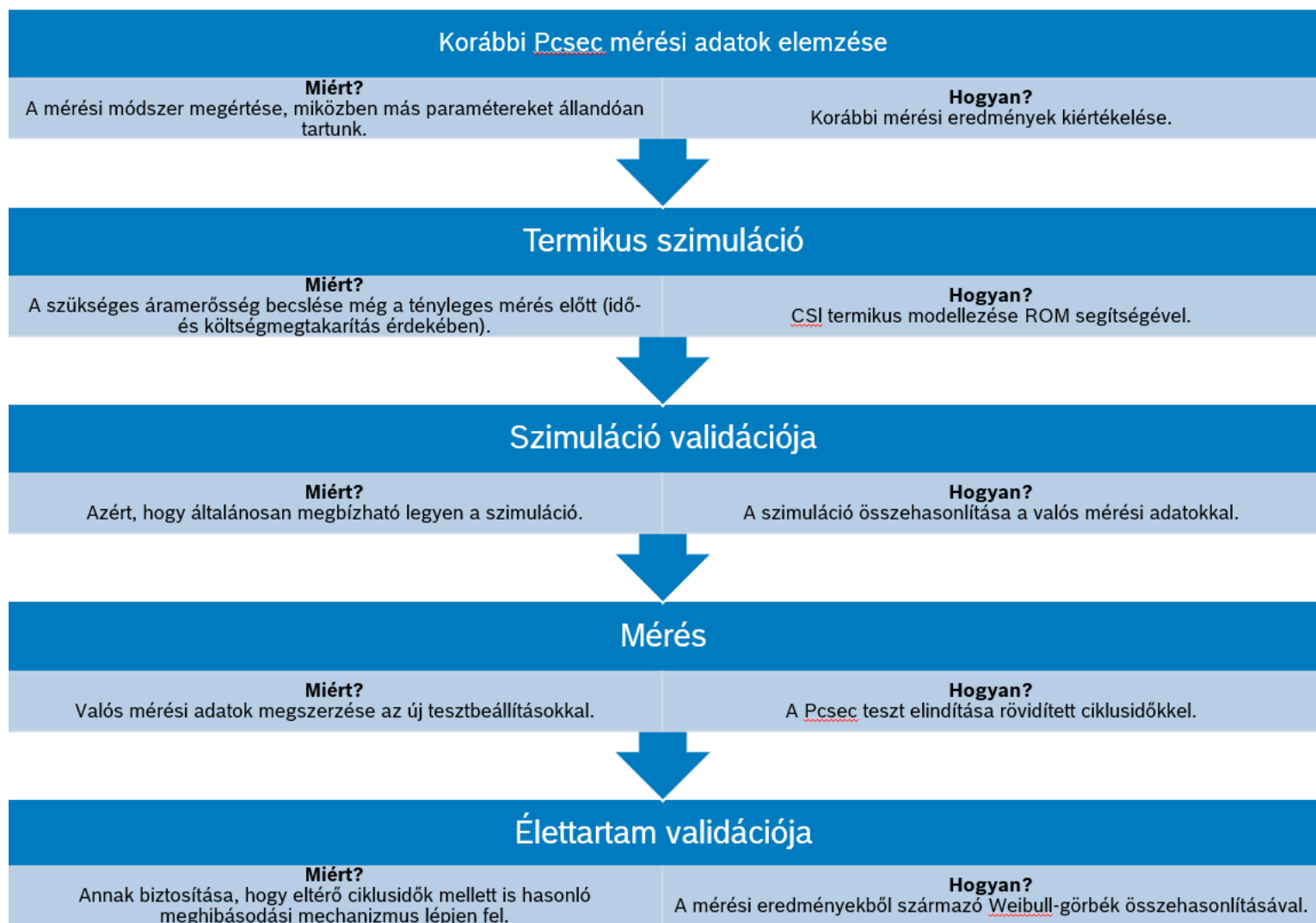
Érdekes lehet megvizsgálni, hogy lehetséges lenne e rövidebb ciklusidőkkel ($t_{on} = 1.5$ s, $t_{off} = 4$ s $t_{ciklus} = 5.5$ s) azonos hőmérséklet-ingadozást elérni. Hogyha a gyorsított öregedési tesztek ciklusidejeit még tovább tudnánk csökkenteni (anélkül, hogy a rövidített idők mellett nem változik meg a minták meghibásodási mechanizmusa), annak egyértelmű előnyei lennének: pénz és idő spórolása. A ciklusidő 45%-al csökkene, és ezzel arányosan a tesztelés költségei is jelentősen csökkennének.

Fontos végiggondolni, hogy milyen tényezők befolyásolhatják a rövidített teszt sikerét. Ezek közül az egyik az, hogy a mintán áthaladó nagyobb áram milyen destruktív hatással lesz az egyes vezetékekre és egyéb alkotórészekre. Ezen kívül kérdéses, hogy az APC (Active Power Cycle; ez a használt tesztberendezés a PC_{sec} tesztelésnél) berendezés képes-e egyáltalán a szükséges áramot kiadni. Ha ezek teljesülnek akkor is felmerül még, hogy nem változik-e meg a kapott hibamechanizmus: lehetséges, hogy a nagyobb áram más hibamódokat fog előhozni mint az eredeti teszt (pl

chip, bond, busbar,...)

2.2. A projekt megvalósításának lépései

A feladat elvégzéséhez szükséges allépéseket az alábbi folyamatábra mutatja be:



A kutatás során a CSL A minta pinfines változatával dolgoztam. Először megvizsgáltam az eredeti PC_{sec} mintával végzett tesztek beállításait és az azokból kapott eredményeket. Ezek alapján olyan tesztet állítottam össze, amely paramétereiben azonos az eredetivel, csupán a teszt t_{on} és t_{off} idejében tér el. Ezzel biztosítható, hogy kizárólag a ciklusidők befolyásolják a teszt eredményét.

Első lépésként termikus szimulációkat futtattam, amelyek célja a szükséges áram meghatározása volt, amely az adott hőmérsékletváltozáshoz tartozik. Ezáltal jelentős idő és költség takarítható meg, mivel így elkerülhetők azok a tesztek, amelyek valamilyen okból nem felelnek meg a követelményeknek (például túl nagy áramra lenne szükség, ami a minta károsodásához vezethet, vagy az APC nem képes előállítani a szükséges áramot).

A termikus szimulációk validálása következett. A kapott eredményeket ellenőrizni kell, hogy valóban fizikailag helyesek-e. Ennek módja, hogy a már lefutott teszt paramétereivel lefuttatjuk a szimulációt, és összehasonlítjuk az eredményeket a valós mérésekkel. Így a korábbi mérési adatok segítségével kalibrálhatjuk a szimulációt.

Ezt követően lefuttattam a PC_{sec} tesztet. A teszt során megadtam a berendezésnek a kívánt paramétereket, majd az első lépésben kimértem a szükséges áramot, amely a kívánt hőmérsékletváltozást eredményezi. Ezt követően a kimért áram beállításával elindítottam a tesztet, amely a minták meghibásodásáig futott.

A teszt lefutása után következett az adatok elemzése. Statisztikai módszerekkel meghatároztam a minta élettartam-valószínűségi görbéit. Az eredményeket összehasonlítva az eredeti teszt adataival megállapítható, hogy a gyorsított élettartam teszt hasonló élettartam-görbét eredményezett-e. Ezt követi a fizikai analízis, mely során számos vizsgálatot végzünk a meghibásodott mintákon:

- Pásztázó akusztikus mikroszkópiai vizsgálat
- Röntgenvizsgálat
- Chipecet borító gél eltávolítása és a chipecet vizuális vizsgálata mikroszkóppal
- elektromos mérések
- Kötési húzópróba
- Delamináció vizsgálata a chipecet környékén és az alaplap-forrasztás területén SEM segítségével

Ezen vizsgálatok segítségével pontos képet kaphatunk arról, hogy milyen okok húzódnak a termék meghibásodása mögött. A dolgozat megírásának pillanatában a fizikai analízis még folyamatban van.

3. fejezet

Hőterjedés szimulációja a minta design elemein

A mérések előtt fontos lépés a különböző szimulációk elkészítése. Ennek fő funkciója az, hogy már a mérések előtt képet kapjunk a mintára váró hőterhelésről. Ez két okból is kulcsfontosságú. Egyrészt a mérőberendezések óriási kihasználtsága miatt ne pazaroljuk az időt olyan mérésekre, melyek számunkra nem relevánsak. Másrészt mivel a tesztek egy része élettartam teszt (azaz a cél annak vizsgálata, hogy a termék mikor veszt el a funkcióját) így az ilyen tesztek visszafordíthatatlan károkat okoznak a termékben, így a rosszul beállított tesztek komoly anyagi károkat okozhatnak a teszteléssel foglalkozó cégek számára (egy teljesítmény modul ára több száz euró is lehet).

3.1. A hőtani szimulációk alapjai

Alapvetően a hőtani szimulációk során a hővezetési egyenletet oldjuk meg, ami egy másodrendű, lineáris, parciális differenciálegyenlet:

$$(3.1) \quad \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q$$

Ahol:

- ρ : anyag sűrűsége,
- c_p : fajhő állandó nyomáson,
- T : hőmérséklet függvénye térben és időben,
- k a hővezetési együttható,
- Q : hőforrás sűrűsége.

Ennek általános numerikus megoldási módszere a végeselem módszer (FEM: Finite Element Method). Ennek lényege, hogy a térfogatot ún. véges elemekre osztja fel, amelyek az egész geometriát lefedik. Ezután a parciális differenciálegyenletet a diszkrét formulává alakítja, és egy egyenletrendszert hoz létre, amelynek megoldása a hőmérséklet értékét adja a csomópontokban.

A szimuláció számítási igénye nagyban függ a használt csomópontok számától. Minél komplexebb a geometria, annál több elemre van szükség a szimulációhoz; az én esetemben egy félvezető modulnál tipikusan több százezer vagy akár több millió "node" szükséges a valóság számunkra elfogadható közelítéséhez.

3.2. Bevezetés a Reduced Order Modeling-be (ROM)

Reduced Order Modeling (ROM) egy olyan matematikai módszer, amely komplex rendszerek egyszerűsítésére szolgál, lehetővé téve a gyorsabb és kevesebb számítási kapacitást igénylő szimulációkat, miközben megőrzi a rendszer alapvető viselkedését. A ROM különösen hasznos nagy dimenziójú modellek esetében (például a termodinamikában), ahol a teljes modell megoldása óriási számítási erőforrást igényelne. A ROM technikák célja, hogy csökkentsék a rendszer állapotmér-etét, így gyorsabb szimulációkat tegyenek lehetővé, miközben elfogadható pontossági szintet biztosítanak.

3.2.1. A ROM rendszer modelljének dinamikája

A ROM dinamikus viselkedését differenciálegyenletek rendszerei írják le, amelyek a rendszer állapotváltozóinak időbeli alakulását mutatják be. A ROM dinamikájának általános formája a következő:

$$(3.2) \quad E\dot{\mathbf{x}} = A\mathbf{x} + B\mathbf{r}$$

$$(3.3) \quad \dot{\mathbf{x}} = E^{-1}A\mathbf{x} + E^{-1}B\mathbf{r}$$

$$(3.4) \quad \dot{\mathbf{x}} = A^*\mathbf{x} + B^*\mathbf{r}$$

Ahol:

- E : Az anyagi tulajdonságokat parametrizálja (pl. sűrűség)
- A : A termikus határfeltételeket parametrizálja
- B : Bemeneti mátrix, amely külső hatásokat tartalmaz (pl. teljesítményvesztés, külső hőmérséklet)

- C : Kimeneti mátrix
- $\mathbf{x}$: Állapotvektor, amely a rendszer belső változóit (pl. hőmérséklet) tartalmazza az egyes időpillanatokban
- $\mathbf{r}$: Bemeneti vektor, amely külső hatásokat reprezentál, például teljesítményforrásokat vagy környezeti hőmérsékletet

Az, hogy az egyes parametrizációs mátrixok hogyan változnak az egyes paraméterek függvényében, az alábbi egyenletek adják meg:

$$(3.5) \quad E = E_0 + \sum_p \Delta p E_p$$

$$(3.6) \quad A = A_0 + \sum_p \Delta p A_p$$

Itt Δp egy adott paraméter változása, amely befolyásolja a rendszer dinamikáját, E_0 és A_0 a rendszer kiinduló állapotát írják le, míg A_p és E_p az egyes paraméterekhez rendelt módosító mátrixok, amelyek azt mutatják meg, hogy hogyan változik E és A az adott paraméterek függvényében.

A rendszer kimeneteit az alábbi egyenlet adja meg:

$$(3.7) \quad \mathbf{y} = C\mathbf{x} + T_0$$

Itt $\mathbf{y}$ a kimeneti vektor, míg T_0 egy állandó, amely a rendszer egységes kezdeti hőmérsékletét jelöli. A $\mathbf{y}$ -ban találhatóak azok a pontok, ahol a hőmérséklet időbeli alakulását szeretnénk megismerni.

3.3. A port loss paraméter meghatározása

A szimulációban fontos modellezési paraméter az ún. port loss, mely azt írja le, hogy milyen a termikus kapcsolat a modul és a környezet között. Ennek a beállításával tudjuk szabályozni, hogy a környezet fűti vagy hűti az általunk körülhatárolt rendszert (azaz a modult), és milyen hőárammal (milyen hőcsere zajlik a busbar és a környezete között). Egyfajta "határként" szolgál a félvezető modul és a teljes inverter szintű rendszer között.

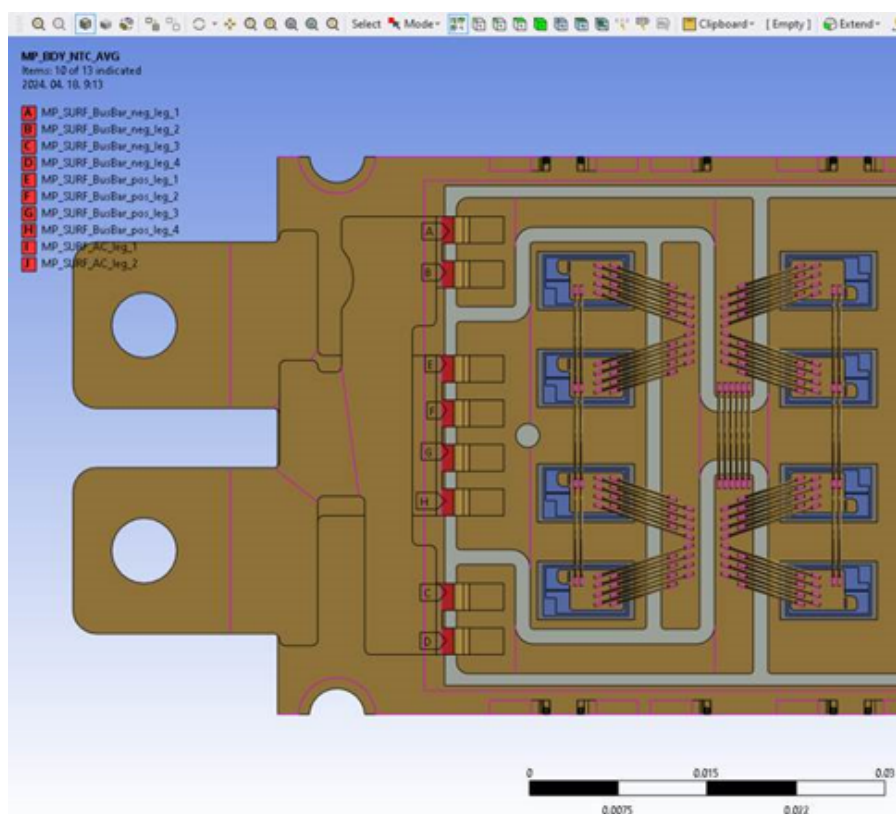
Erről általában kevés információnk van előzetesen, hiszen ez a gyakorlatban az alkalmazott teszt környezeti hatásaitól függ.

Ahhoz, hogy az általam használni kívánt mintához és teszthez megtudjam a port loss paraméter értékét hosszas tervezésre volt szükség.

3.3.1. A folyamat lépései

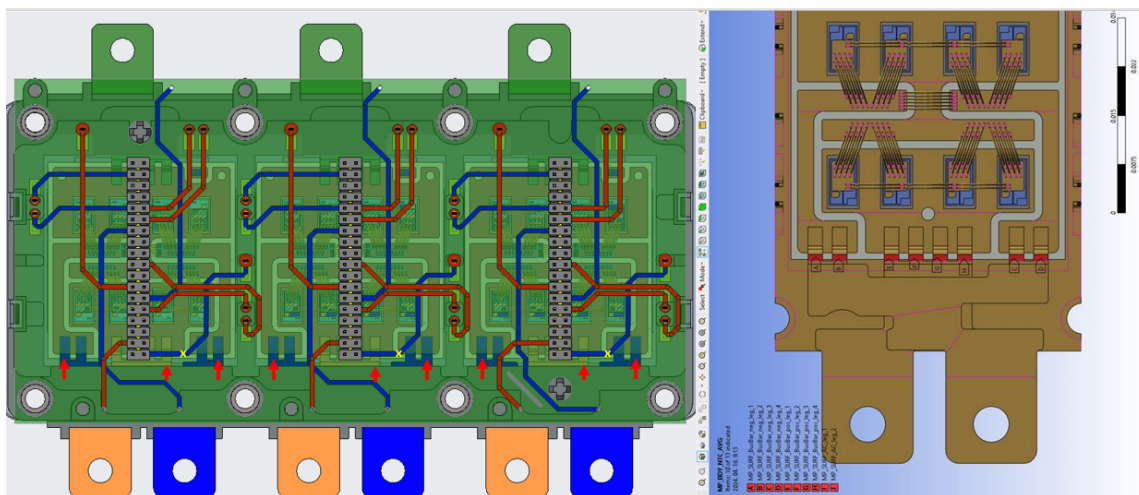
A busbar hőmérséklete képezi a mérés és a szimuláció összehasonlításának alapját, így ennek meghatározása kulcsfontosságú a kalibrációhoz. Ha a teszt során mérni tudjuk a busbar hőmérsékletét, akkor kalibrálhatjuk a port loss paramétert úgy, hogy a szimulációban megkeressük azt az értéket, amely a legjobban közelíti a mérési eredményeket, minimalizálva ezzel az eltérést a mérés és a szimuláció között.

A fő problémát az jelentette, hogy a szimulációnál használt ROM modell csak előre meghatározott pontokban képes hőmérsékletet számítani. Mivel a ROM modell előállítás időigényes és összetett folyamat, célszerű volt a méréseket azoknál a pontoknál végezni, ahol a meglévő modell hőmérsékletet tudott szolgáltatni. Sajnos a ROM modell a busbar "lábainál" (összesen 8 számítási pont van beleépítve a ROM modellbe a busbarokhoz modulonként, lásd (3.1)-es ábrán) volt képes meghatározni a hőmérsékletet, ami egyből felvetette azt a problémát, hogy hogyan lehetne a termék belsejében közvetlenül mérni a hőmérsékletet a mérés során.



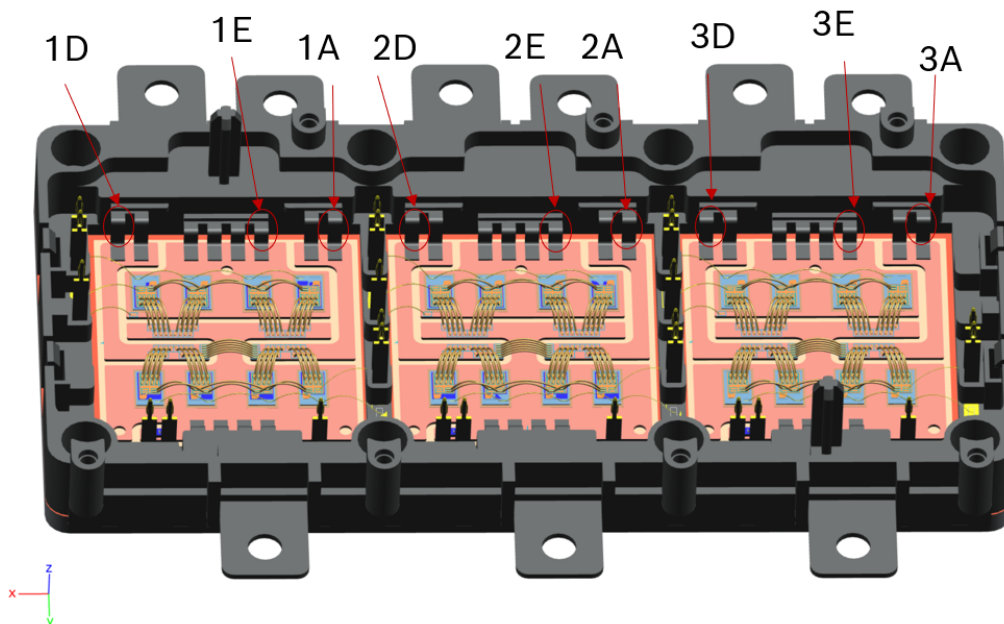
3.1. ábra. A ROM modell hőmérsékletszámítási pontjai a busbarokon. (A,B,C,D,E,F,G,H betűkkel jelölve)

Ahhoz, hogy a megfelelő pontokban tudjuk monitorozni a hőmérsékletet ki kellett fúrni a terméket felülről. A probléma csak azzal volt, hogy ha nem megfelelő helyen fúrjuk ki a terméket, akkor megsérthetjük az áramköröket (kékekkel és pirossal jelzett vonalak a (3.2)-es ábrán), ezzel megrongálva a terméket.

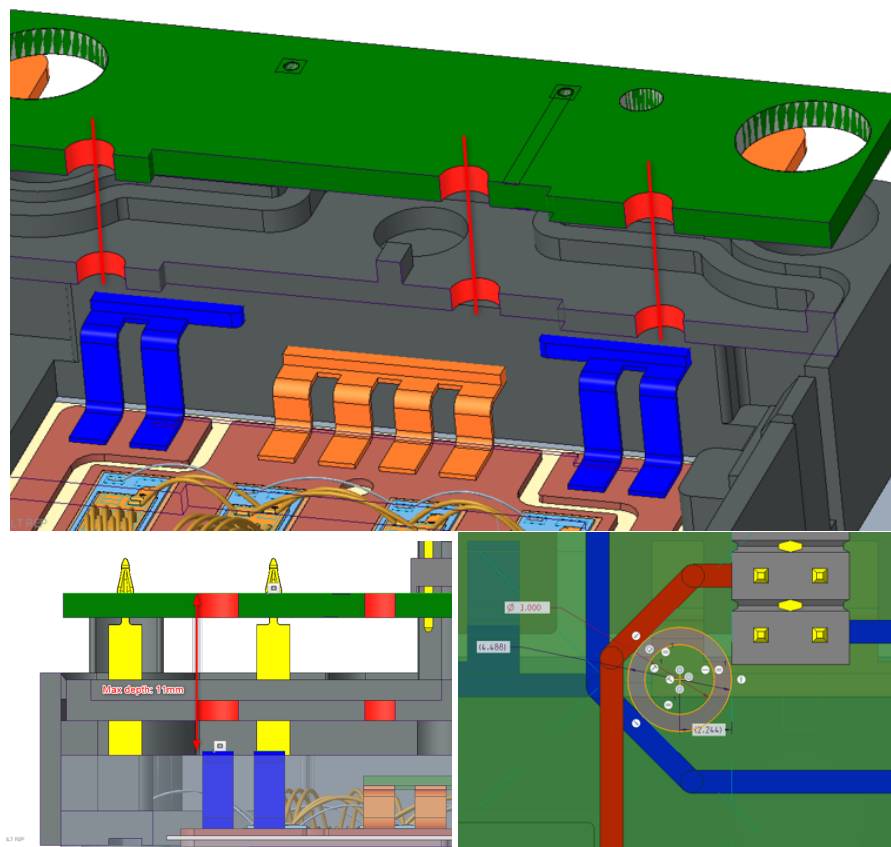


3.2. ábra. Az áramköri vezeték elhelyezkedése.

Végül a 8 számítási pontból csak 3-nál volt lehetséges (modulonként) úgy kifúrni a mintát, hogy ne sérüljön meg egyik áramköri elem sem.

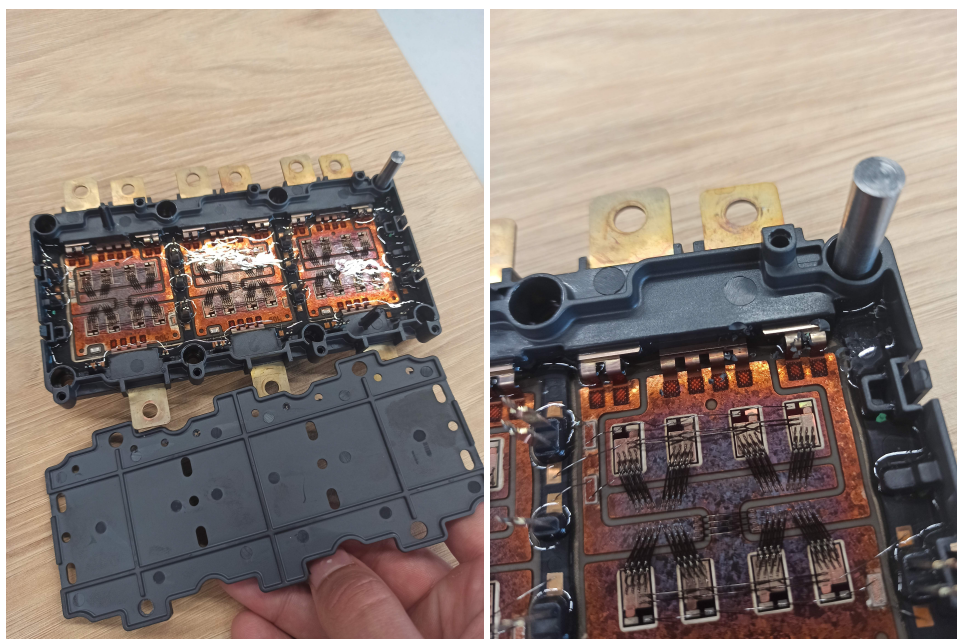


3.3. ábra. A fúrási pontok elhelyezkedése. Az eredeti 8 szimulációs pontból csak 3-nál lehetett biztonsággal kifúrni a terméket.



3.4. ábra. A fúrás tervezeti rajzai.

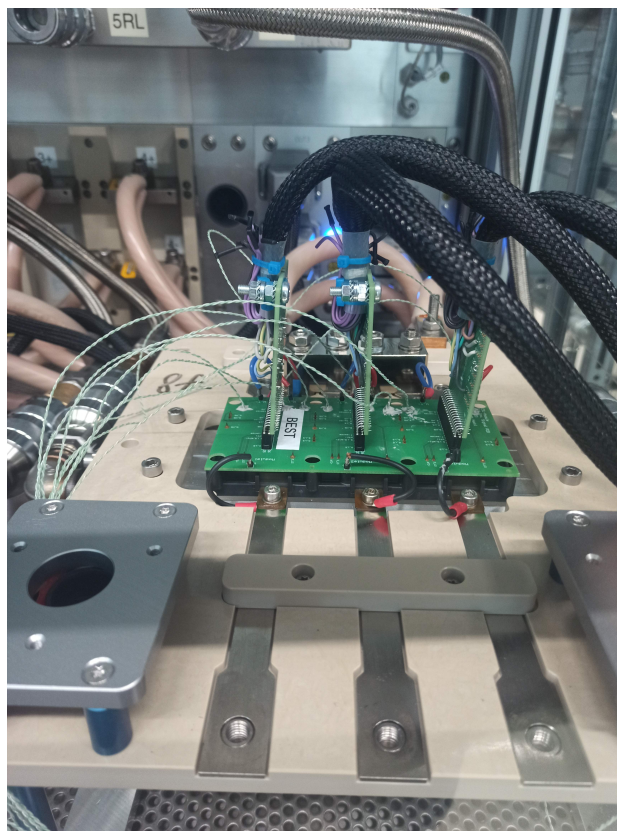
Mivel ennél a 3 pontnál is fennállt annak a veszélye, hogy a fúrás pontatlansága miatt megsérül valamilyen alkatrész, ezért először egy már meghibásodott, rossz mintán próbáltuk ki a fúrási terveket (lásd (3.5)).



3.5. ábra. A próbafúrásra használt rossz minta.

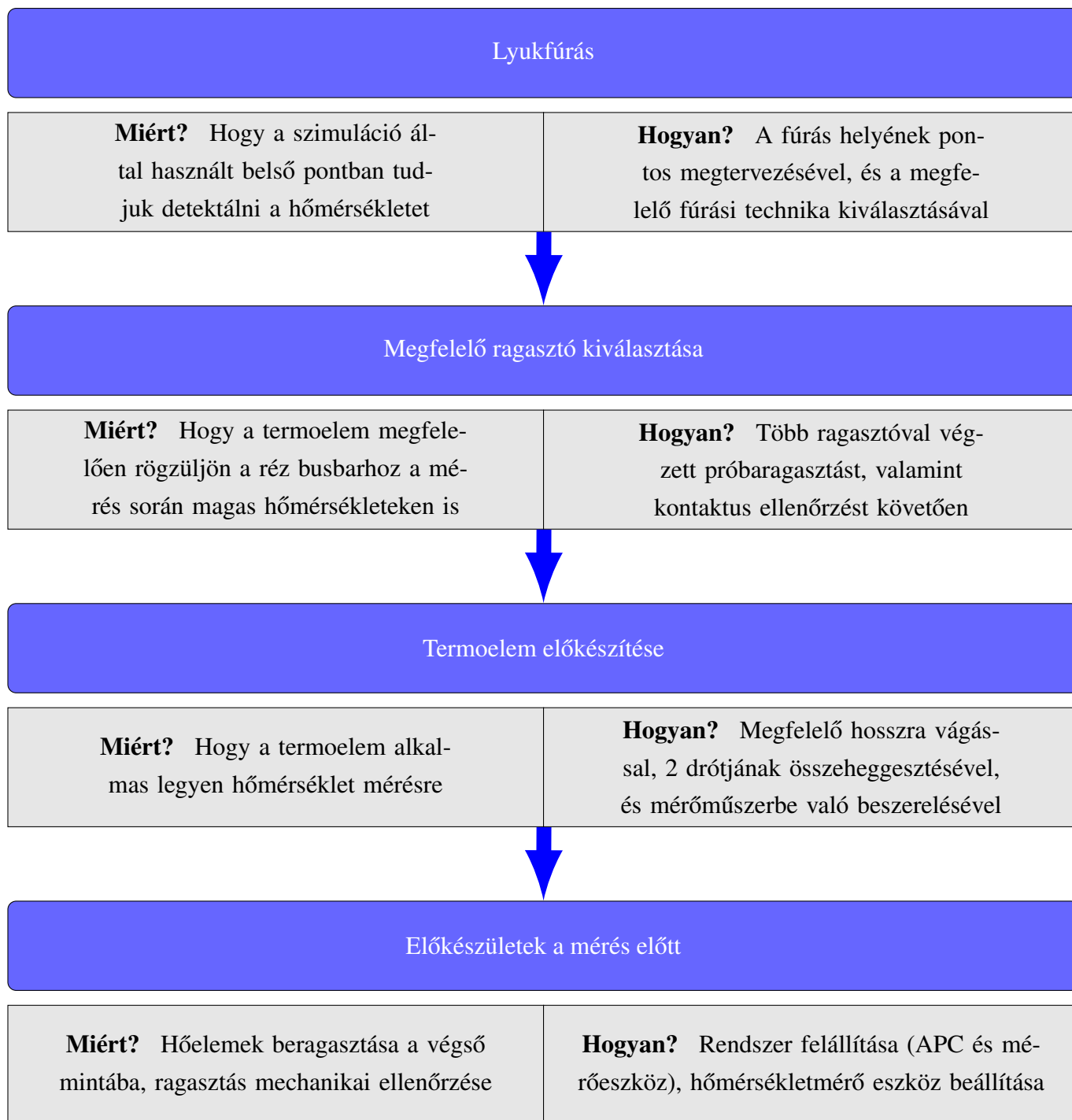
A nem funkcionális mintán jól sikerültek a fúrások, így következett a ragasztó tesztelése. A ragasztáshoz hosszú kísérletezés után végül a Loctite EA 9497-es ragasztója bizonyult a legjobb választásnak, az egyes ragasztóval végzett tesztelés után ez biztosította a megfelelő ragasztást a termoelem és a busbar között.

Ezt követte az "éles" termék kifűrése, majd az egyes termoelemek előkészítése. Ez összesen 9 (3 mérési pont 3 modulhoz) darab drót méretre vágását, ponthegeztését, majd beragasztását foglalta magában. Sajnos a beragasztás nem sikerült túl jól, valószínűleg a száradás alatt elmozdulhatott a termoelem a busbartól (24 óra a ragasztó száradási ideje). Ennek következtében a 9 mérési pont közül csak 3-nál tudtam kimérni az elektromos kontaktust. Ez okozhat némi eltérést a későbbi hőmérsékletméréseknél (a használt ragasztó jó hővezető, de a termikus tehetetlensége miatt kis időre van szüksége amíg "leköveti" a busbar hőmérsékletét, ezzel offsetet okozva a mért hőmérsékletben).



3.6. ábra. Az éles minta az előkészített és beszerelt termoelemmel a mérés közben.

A ponthegeztés elvégzése után az egyes termoelemeket még egyenként ellenőriztem, hogy a hegeztésem megfelelően sikerült-e és így a hőmérsékletet helyesen mérjük-e. Az busbar hőmérsékletmérés egyes lépéseit az alábbi folyamatábra mutatja be:

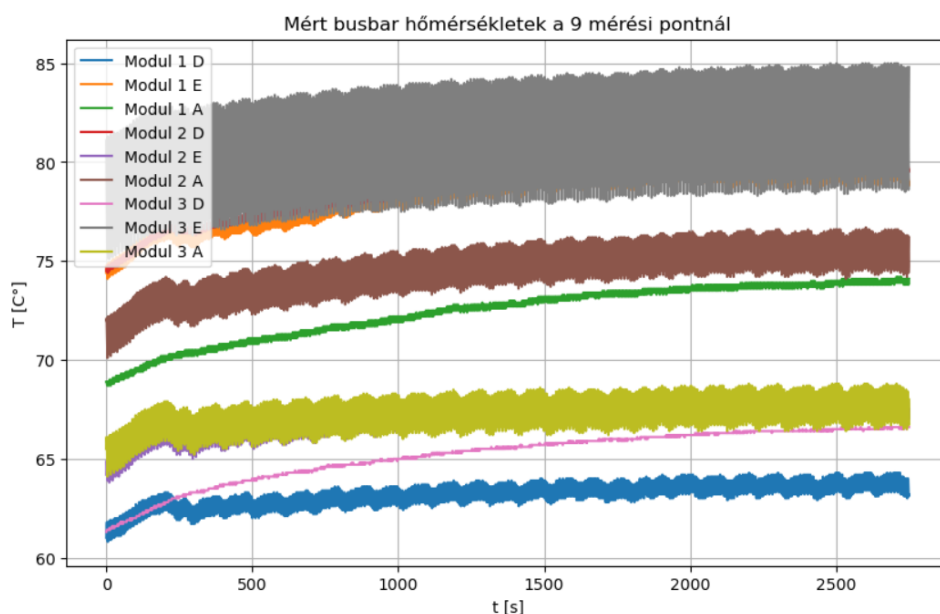


3.7. ábra. A port loss paraméter meghatározásának folyamatábrája.

3.3.2. A busbar hőmérsékletmérés eredményei

A termoelemek beszerelése után megkezdődhetett a mérés a mintával. Elindítottam egy PC_{sec} tesztet több, mint egy órán keresztül, közben rögzítve az egyes mérési pontok hőmérsékletadatait.

Az egyes mérési pontokban kapott hőmérséklet-idő diagrammok:



3.8. ábra. A mért busbar hőmérsékletek. (Az egyes elnevezések jelentése a (3.3)-as ábrán látható.)

Jól látszik, hogy a hőmérséklet 60-80 C° között alakul az összes mérési pont esetében. Az is megfigyelhető, hogy az egyes mérési pontoknál meglehetősen stabil a hőmérséklet (1-3 fokot ingadozik), míg másoknál nagyobb, ciklikus ingadozások láthatóak. Ennek több oka is lehet, de a legnagyobb ok valószínűleg a ragasztás nem megfelelő minősége. Szerencsére ez a port loss paraméter beállítását nem befolyásolja, az ingadozó hőmérsékleteknek egyszerűen vehetjük az átlagos értékét. (Ezt azért tehetjük meg, mivel feltételezzük, hogyha az adott pontnál jó lett volna a kontakt, ott is kis ingadozásokat látnánk. A busbar nagy termikus diffúziós együtthatója (termikus tehetetlensége) miatt nem követi le a PC_{sec} teszt gyors felmelegedéseit és lehűléseit, így a fémesen csatlakozó termoelemek nem mérnek olyan nagy hőmérsékletkilengéseket.) Mivel a busbar nincs aktívan hűtve (mint a chipék és a hűtőbordák) így lassabban hűl vissza, ezáltal a hőmérséklet-ingadozás kisebb mértékű mint a chipék esetében (jelen esetben ott 95K-es).

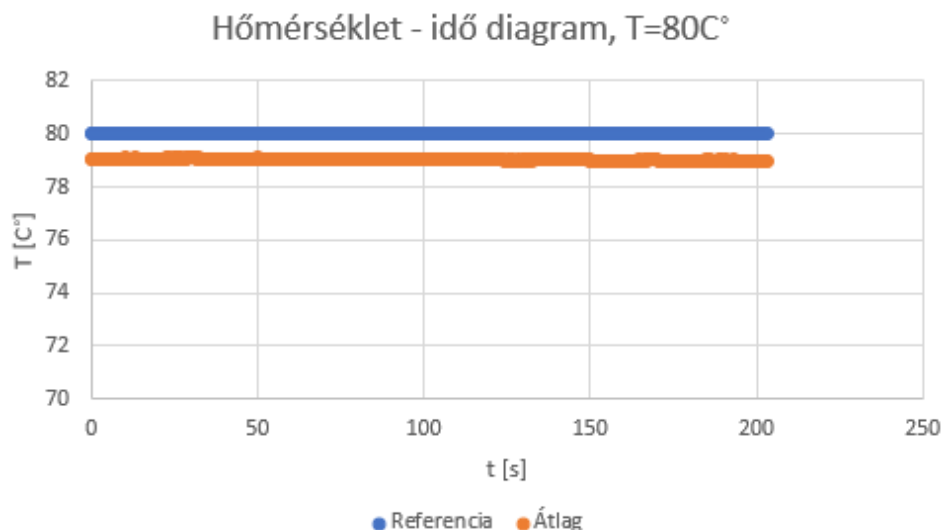
Annak érdekében, hogy megbizonyosodjak arról, hogy a termoelemek valóban jól mérnek 80 fok körül, ezért beraktam a mintát egy hőkamrába 3 órára (azért ilyen sokáig, hogy biztosan felvegye a környezet hőmérsékletét). Ezután megnéztem, hogy milyen hőmérsékletet mértek a termoelemek (kb 1-2 percen keresztül). Ezt az alábbi táblázat tartalmazza:

Minta mérési pontja	1 D	1 E	1 A	2 D	2 E	2 A	3 D	3 E	3 A	Összesített
Átlag [C°]	78.60	78.78	78.84	79.02	79.14	79.21	79.21	79.29	79.30	79.04
σ [C°]	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.24
Offset [C°]	1.40	1.22	1.16	0.98	0.86	0.79	0.79	0.71	0.70	0.96

3.1. táblázat. A hőkamrás termoelem validáció eredménye.

Jól látható, hogy a termoelemek 1 fokon belül megegyeznek a hőkamra hőmérsékletével, ami azt mutatja, hogy a termoelemek megfelelően működnek a hőmérséklet mérésére. Sajnos ez a mérés

nem használható annak ellenőrzésére, hogy a ragasztás minősége milyen hatással van a hőátadásra, a jövőben érdemes lehet ezt alaposabban megvizsgálni.



3.9. ábra. A termoelemek hőkamrás validációja (az összes pontra átlagolva).

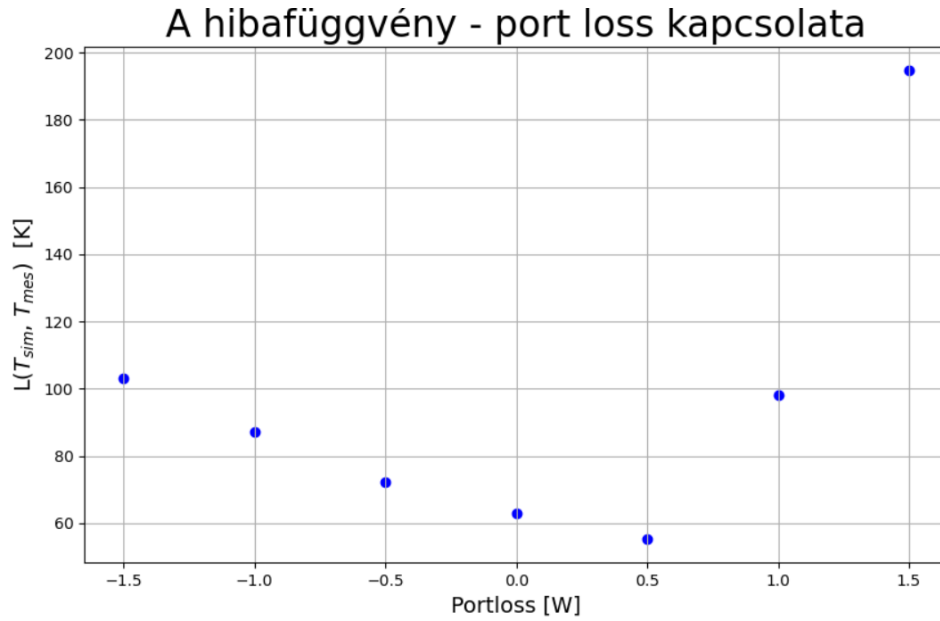
3.4. Az ideális port loss paraméter beállítása

A mérések elvégzése után a következő lépés a szimuláció futtatása volt, különböző port loss paraméterek alkalmazásával. A különböző port loss értékek mellett elemeztem, hogy a szimuláció által szolgáltatott busbar hőmérsékletek hogyan viszonyulnak a mérési eredményekhez. E vizsgálat során az egyes mérési pontoknál meghatároztam a szimulált és a mért hőmérsékletek közötti különbségeket, majd ezeket összegeztem, így kialakítva a hibafüggvényt:

$$(3.8) \quad L(T_{\text{sim}}, T_{\text{mes}}) = \sum_{i=1}^9 |T_{\text{mes},i} - T_{\text{sim},i}|$$

Itt T_{mes} a busbarok mért hőmérséklet értékeit, T_{sim} a busbarok szimulált hőmérsékleteit jelöli. Ezen kívül i a mérési pontokat indexeli (például $i = 1$ az 1D, $i = 2$ az 1E mérési pontot jelenti).

A hibafüggvény azt fejezi ki, hogy mennyire tér el a szimuláció az általunk mért, "valós" értékektől; célom a port loss paraméter igazítása, hogy a szimuláció eredményei minél pontosabban illeszkedjenek a mérésekhez. Az iterációk során azt a port loss értéket keresem, amely mellett a hibafüggvény értéke minimálisra csökken, így érve el a legjobb illeszkedést a szimuláció és a mérés között.



3.10. ábra. A hibafüggvény és a port loss paraméter kapcsolata.

Ezekből azt állapíthatjuk meg, hogy $p = 0.5 \text{ W}$ az ideális választás.

Ez az előzetesen várt értéknél kisebb, ami valószínűleg a ragasztásnál kialakuló nem megfelelő hőkontaktusoknak tulajdonítható.

3.5. A szimulációs paraméterek beállítása

A szimuláció feladata az, hogy egy adott terhelési profilra megmondjuk, hogy a minta hőmérséklete hogyan változik az időben. Ehhez mindenképp szükség van a termék pontos geometriájára, valamint az őt alkotó alkatrészek hőtani tulajdonságaira. Ezen kívül ismernünk kell a terhelési profil minden paraméterét.

Egy adott geometriájú termék esetén a hőmérséklet időbeli változása 7 változó függvénye:

$$T = T(F, t_{on}, t_{off}, Q_{cool}, T_0, I_L, n, k, t)$$

ahol:

- F : folyadék típusa ($F = \text{SilOil}, \text{WG}^1$)
- t_{on} : bekapcsolási idő [s]
- t_{off} : kikapcsolási idő [s]
- Q_{cool} : hűtőfolyadék áramlási sebessége [ℓ/min]
- T_0 : hűtőfolyadék kezdeti hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$]

¹WG a víz-glikol (Water glycol) keverék, SilOil pedig a szilikonolaj rövidítése.

- I_L : terhelési áram [A]
- n : időlépések száma
- k : ciklusok száma

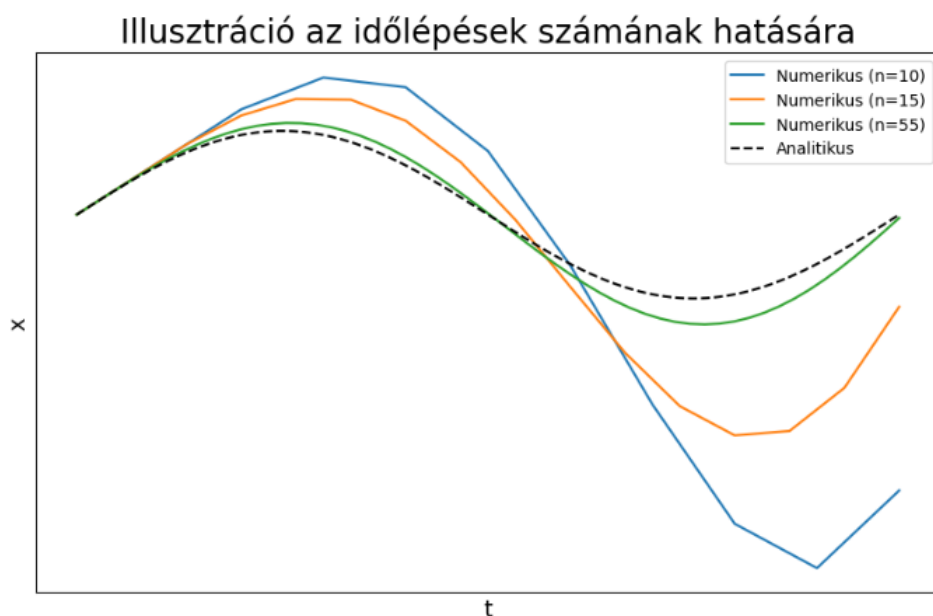
Ahhoz, hogy a kívánt eredményt kapjunk fontos ezeknek a megfelelő beállítása.

3.5.1. Időlépések számának beállítása

A szimuláció pontossága jelentősen függ attól, hogy az egyes időintervallumokat (jelen esetben a t_{on} és t_{off} időket) hány lépésre bontjuk fel. Bár a felmelegedési szakasz több lépésre bontása általában pontosabb eredményeket ad, a túl kicsi időlépések is hibákat okozhatnak. Ez különösen igaz nagy hőmérséklet-gradiensek közelében, ahol a túl finom időbontás a hőterjedés "átugrását" eredményezheti, amit thermal undershoot jelenségnek nevezünk. A probléma nemcsak végeselemes modellekben, hanem ROM szimulációknál is jelentkezhet, ha az időlépés és az elemméret aránya nem megfelelő.

Ezzel párhuzamosan azonban folyamatosan nő a futási idő is: minél nagyobb időlépés számot használunk, annál tovább tart lefuttatni a kódot. Mivel egy termék termikus szimulációjánál rengetegszer kell lefuttatni a kódot, így egy szimuláció futási ideje is kulcsfontosságú. Ezek alapján olyan időlépés számot kell találni, ami megfelelő pontosság mellett elfogadható futási időt biztosít.

A (3.11)-es ábrán egy egyszerű harmonikus oszcillátor numerikus megoldását láthatjuk. Látható, hogy az időlépések számának növekedésével egyre közelebb kerülünk az analitikus megoldáshoz:



3.11. ábra. Illusztráció az időlépések számának hatásához a harmonikus oszcillátor kitérés-idő összefüggése esetében. Látható, hogy ahogy nő a lépések száma a numerikus megoldásban, úgy közeledünk az analitikus megoldáshoz.

Elsőként megvizsgáltam, hogy hogy alakul a maximális hőmérséklet az egyes időlépések esetén.

Paraméter	F	t_{on}	t_{off}	Q_{cool}	T_0	I_L	k
Érték	SilOil	1.5 s	4 s	8 l/min	44 °C	300 A	10

3.2. táblázat. Használt paraméterek az időlépések számának vizsgálatánál.

A (3.12)-as grafikonon jól látszik, hogy a hőmérséklet exponenciálisan beáll egy megadott értékre, amit egy függvényillesztéssel megkaphatunk.

$$(3.9) \quad T_{\text{átlag max}}(n) = a \cdot \exp(b \cdot n) + c$$

A szimulált ciklusok során minden egyes ciklus végén elérünk egy maximális hőmérsékletet. Ezeknek a maximális hőmérsékleteknek vizsgáltam az átlagát a teljes szimuláció (10 ciklus) alatt. A (3.9)-es egyenletben $T_{\text{átlag max}}(n)$ a maximális hőmérsékletek átlagát jelöli az időlépések számának függvényében (a szimulációval vizsgált 10 ciklus során).

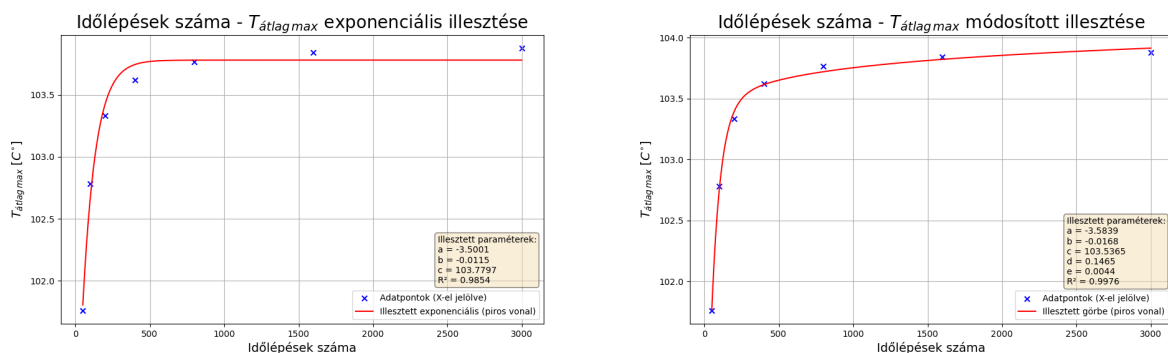
Látszik azonban, hogy nagy időlépéseknél nem teljesen írja le megfelelően az hőmérsékletet a modell (úgy tűnik, mintha kissé divergálna). Ennek oka a már feljebb taglalt "thermal undershoot".

A nagy időlépés számokhoz tartozó divergenciát úgy írhatjuk le, ha egy logaritmikus tagot hozzáadunk az exponenciális függvényhez:

$$(3.10) \quad T_{\text{átlag max}}(n) = \underbrace{a \cdot \exp(b \cdot n) + c}_{\text{exponenciális tag}} + \underbrace{d \cdot \ln(e \cdot n)}_{\text{logaritmikus tag}}$$

A (3.12)-es ábrán látható, hogy az így kapott illesztés sokkal jobban leírja a nagyobb értékeket is.

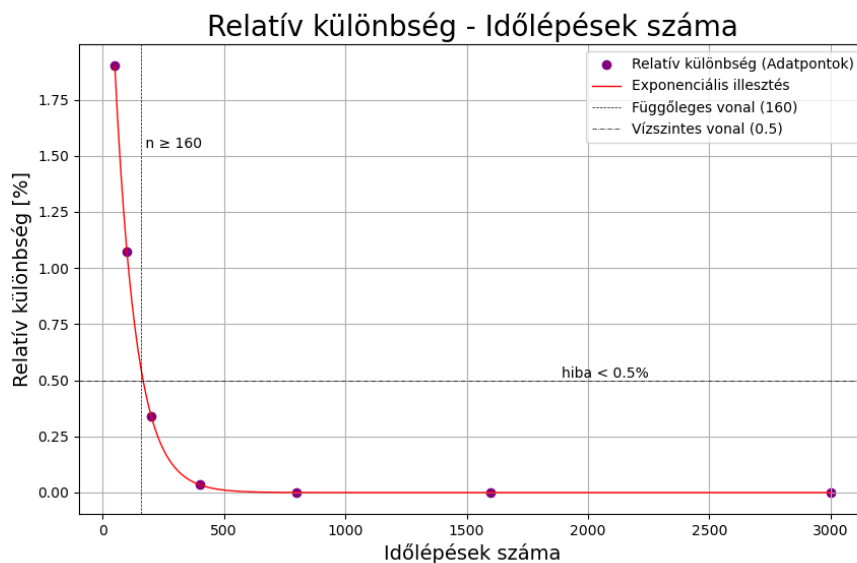
Az illesztett exponenciális függvényből megkaphatjuk a hőmérséklet egyensúlyi értékét



3.12. ábra. A $T_{\text{átlag max}}$ változása az időlépések számának függvényében az illesztett exponenciális (balra) és az exponenciális+logaritmikus függvényvel (jobbra).

Az illesztett exponenciális függvényből megkaphatjuk a tökéletes idő felbontáshoz ($n \rightarrow \infty$) tartozó hőmérsékletet (ezzel a megközelítéssel kikerülhetjük a nagy időlépés számú tagok divergens

hatását). Ehhez képest meg tudjuk határozni, hogy az egyes pontoknak mekkora a relatív különbsége. Ezt a (3.13)-es ábra szemlélteti.

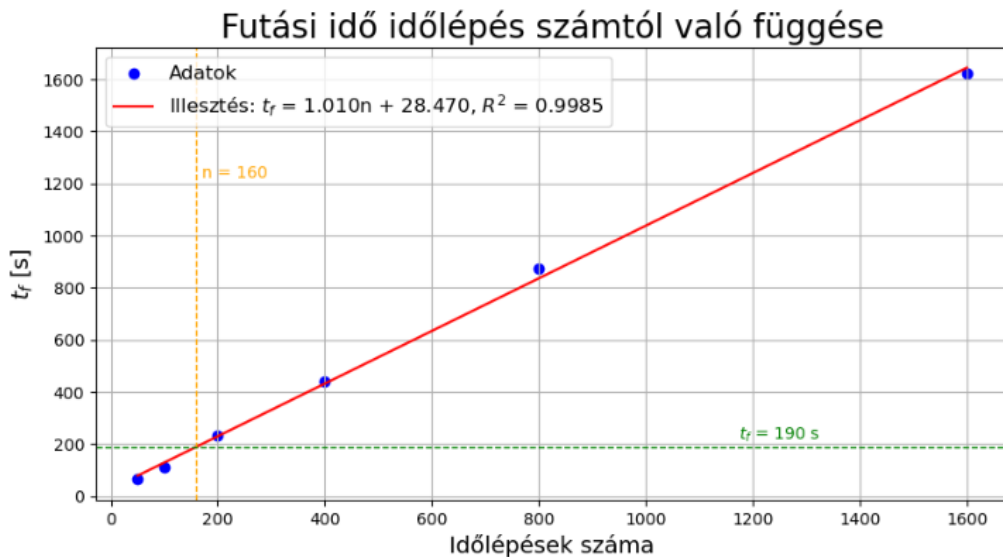


3.13. ábra. Relatív különbség - Időlépések száma diagram.

Mivel az időlépések számán kívül számos egyéb hatás okozhat eltérést a szimulációs eredményben, ezért célszerű minden olyan hibahatást minimalizálni, amit könnyedén megtehetünk. Ebből az okból kifolyólag egy meglehetősen szigorú, legfeljebb 0.5 %-os relatív különbséget szerettem volna elérni.

Az illesztésből meghatározható, hogy ehhez $n \geq 160$ időlépésre van szükség.

Egy másik fontos aspektus az időlépések számának kiválasztásánál a futási idő. Hiába érünk el nagy pontosságot, ha közben a futási idő irreálisan megnövekszik. Végül azért választottam az $n = 160$ -as időlépés számot, mivel ebben az esetben kb 3 perc alatt lefut még a szimuláció.



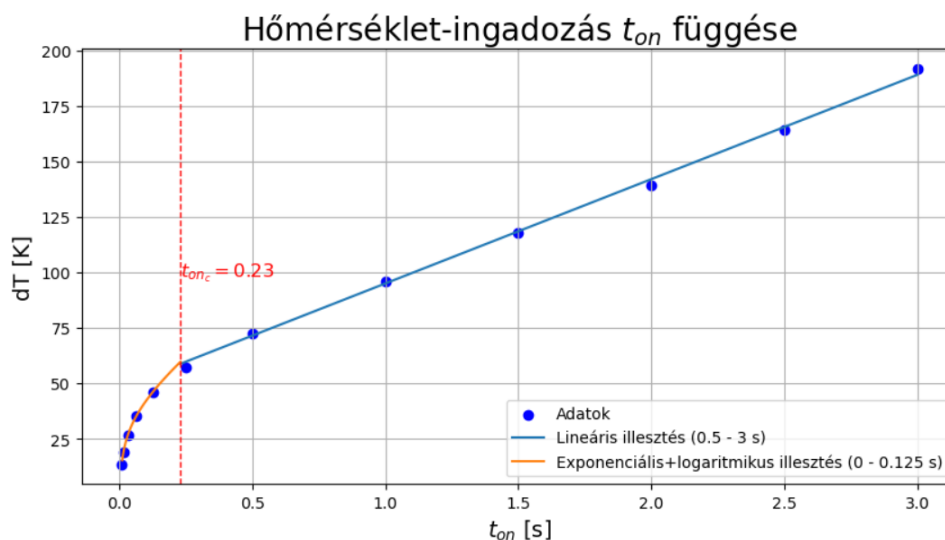
3.14. ábra. Futási idő az időlépések számának függvényében. Látható, hogy a futási idő arányos az időlépések számával.

3.6. A termikus szimuláció eredményei

3.6.1. A t_{on} paraméter elvi határának vizsgálata

A szimulációhoz szükséges paraméterek, és geometriai adatok beállítása után megkezdődhetett a szimulációk futtatása. Első körben arra voltam kíváncsi, hogy hogyan befolyásolja a bekapcsolási t_{on} idő az elért hőmérséklet-ingadozást adott áram esetén. Felmerülhet a kérdés, hogy amennyiben sikerül megbizonyosodni arról, hogy valóban alkalmazható hasonló eredménnyel a $t_{on}=1.5$ s-os bekapcsolási idő, akkor elméletileg lehetséges-e ezt még tovább csökkenteni. Adott bekapcsolási idők fellett lineáris az összefüggés a bekapcsolási idő és az elért hőmérséklet különbség között. Azonban a hő terjedéséhez időre van szükség az áram bekapcsolása után, így egy ponton túl csökkentve t_{on} időtartamot az elért hőmérséklet-ingadozás meredeken csökkenni kezd. Ha megtaláljuk ennek a görbének az inflexiós pontját, akkor meg tudjuk mondani, hogy mennyi időre van szükség ahhoz, hogy az általunk vizsgálni kívánt hőmérséklet eloszlás kialakuljon. Ennyi időre legalább szükségünk van ahhoz, hogy fennáljon a lehetősége annak, hogy a meghibásodási módok megegyeznek az eredeti teszttel. Ezt a (3.15)-es ábrán láthatjuk.

Ezzel meg lehet vizsgálni, hogy van-e jól látható különbség az általunk alkalmazni kívánt $t_{on} = 1.5$ s és az eddig alkalmazott $t_{on} = 3$ s között.



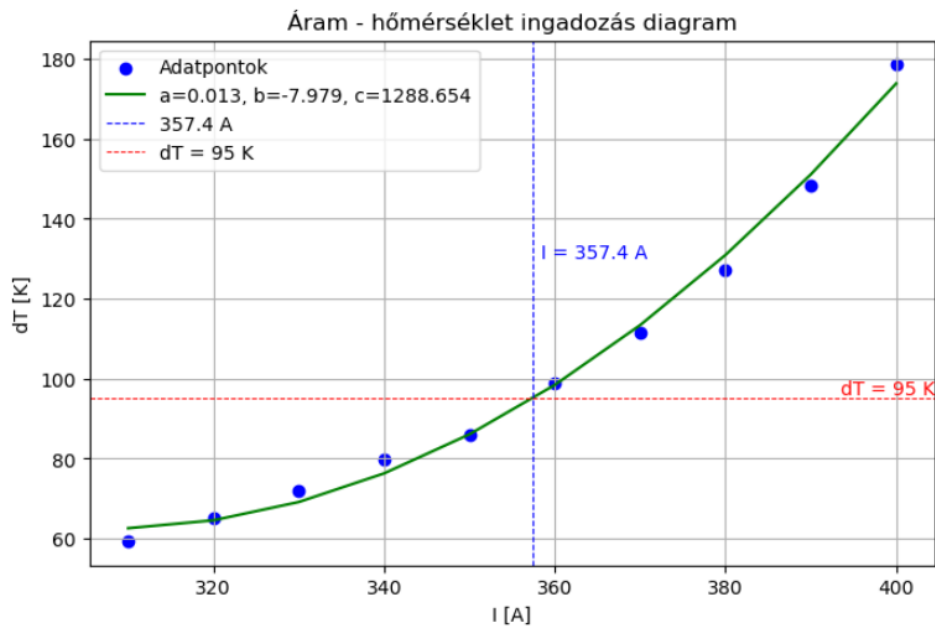
3.15. ábra. A hőmérséklet-ingadozás bekapcsolási időtől való függése. Jól megfigyelhető a kezdeti tranziens szakasz.

Az ábra tranziens szakaszára egy exponenciális és egy logaritmus tag összegét illesztettem, az ezt követő szakaszra pedig egy egyenest. A két illesztés metszéspontja adta meg az inflexiós pontot, ami a kritikus bekapcsolási idő: $t_{on,c} \approx 0.23$ s

Azt mondhatjuk ez alapján, hogy elméletileg van lehetőség tovább csökkenteni a bekapcsolási időt (a hőterjedés szempontjából). Fontos kiemelni, hogy ahhoz, hogy megbizonyosodjunk róla, hogy egy adott bekapcsolási idő valóban használható-e, a teszt elvégzése elengedhetetlen, hiszen csak így kaphatunk képet az adott beállítások mellett fellépő hibamódokról.

3.6.2. Az áram és a hőmérséklet-ingadozás kapcsolata

Végül arra voltam kíváncsi, hogy milyen áramra van szükség ahhoz, hogy elérjük a teszt során használni kívánt $dT = 95$ K-es hőmérséklet ingadozást. Ehhez különböző áramokra megnéztem, hogy milyen hőmérsékletingadozást érek el, majd a kapott adatokra parabolát illesztve megkapható a szükséges áramérték.



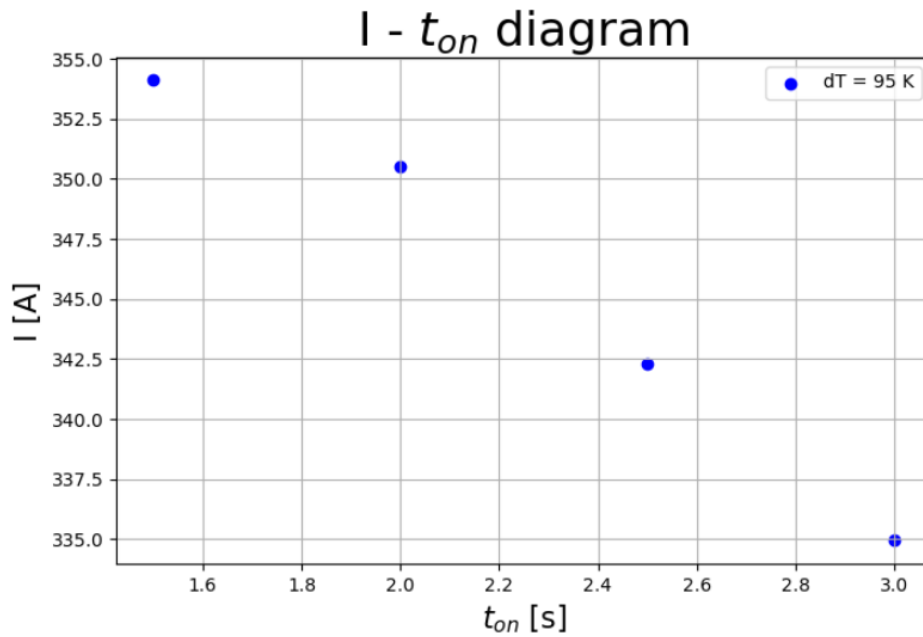
3.16. ábra. Az egyes áramok esetén elért hőmérséklet ingadozás. Egy parabola illesztéssel a $dT=95K$ -hez szükséges áram meghatározható.

Az illesztésből a $dT = 95K$ -hez $I = 357.4$ A-nek adódott.

3.7. A szimuláció validációja

Egy szimulációs eredményt csak akkor tekinthetünk megfelelőnek, ha azt validáltuk, és bizonyítottuk, hogy a modell a valóságot elfogadható pontossággal közelíti. A szimulációk nem minden tényezőt tudnak pontosan modellezni, ezért fontos, hogy az eredményeket valós mérési adatokkal vessük össze. A validáció biztosítja, hogy a modell figyelembe vegye az ismeretlen tényezők hatását, amennyire lehetséges.

Sajnos a fentebb bemutatott szimuláció jócskán alábecsülte a szükséges áramértékeket. Ezt onnan tudhatjuk, hogy a korábbi, hosszabb t_{on} felmelegedési idő alkalmazásával is nagyobb áramra volt szükség a teszt során ugyanazon 95 K-s hőmérséklet ingadozás eléréséhez, mint amit a rövidebb idő alatti felmelegedéséhez meghatároztam a szimulációból. Ennek több oka is lehet: A termékeket ebben az esetben külső céggel gyártatták, így az általuk alkalmazott anyagok pontos fizikai állandói nem voltak ismertek. Még kis eltérések is, például a sűrűségben, fajhőben vagy hővezetési tényezőben, jelentős eltéréseket okozhatnak az eredményekben. Másrészt a termék gyártása során az összeszerelési technológiák is okozhatnak eltérést (pl az egy rétegek közötti forrasztanyagban belesülhetnek apró légbuborékok, amelyek szintén okozhatnak eltérést). Mivel a vizsgált termékek még csak A minta fázisban voltak, ahol elsősorban a koncepció működőképességének igazolása a cél, az optimalizáció és a gyártási minőség még kisebb prioritást élvezett. Ennek következtében az egyes minták között jelentős szórás is előfordulhatott. Mivel azonban az A mintákkal már hagyományos PC_{sec} tesztek lefutottak, így ismert, hogy ott milyen áramértékeket alkalmaztak. (Az



3.17. ábra. A $dT = 95$ K-hez szükséges terhelőáram bekapcsolási idő függése.

autóipari fejlesztés A-, B-, C-, és ritkán D-mintafázisokból áll, ahol az A-minta a kezdeti prototípus, a C-minta pedig már sorozatgyártásra kész terméket jelent.)

A terhelőáram és a t_{on} kapcsolata adott hőmérséklet ingadozásra

Érdekes megvizsgálni, hogy az egyes t_{on} felmelegedési időkhöz mekkora áram szükséges ahhoz, hogy $dT = 95$ K-es hőmérséklet ingadozást érzünk el.

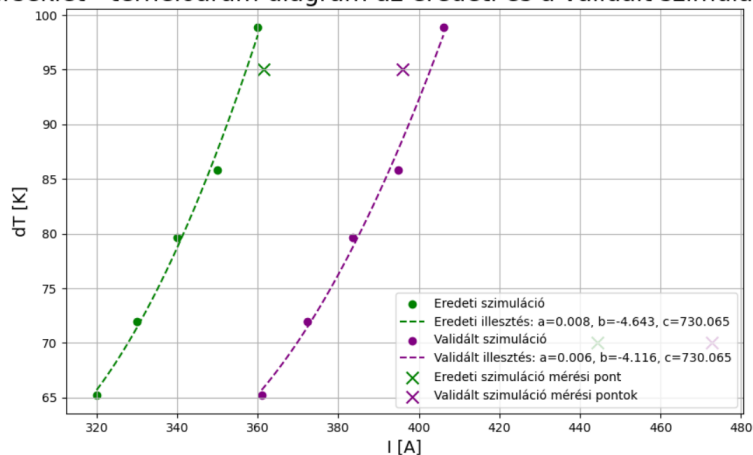
Ehhez külön-külön elvégezve a (3.6)-os fejezetben leírt folyamatot az egyes t_{on} időkre meghatározhatjuk a szükséges terhelőáramot az egyes esetekben.

Fontos megjegyezni, hogy a gyártási és anyagi paraméterek pontatlansága a bekapcsolási idő - áram közötti összefüggés jellegét nem befolyásolja, csak az áramértékek nagyságát. Mivel azonban egy korábbi, $t_{on} = 3$ s-os mérés terhelőáram értékeit ismerjük, így ezek alapján meg lehet határozni az áltam használni kívánt $t_{on} = 1.5$ s-os esetben várható áramértéket is.

$$(3.11) \quad \frac{I_{sim,t_{on}=1.5}}{I_{sim,t_{on}=3}} = \frac{I_{pre,t_{on}=1.5}}{I_{mes,t_{on}=3}}$$

Ahol I_{sim} a szimulációból származó áramértéket, I_{mes} a mérés során kimért áramértéket, míg I_{pre} a validációval illesztett áramértéket jelöli. Ezek alapján $I_{pre,t_{on}=1.5}$ kifejezhető.

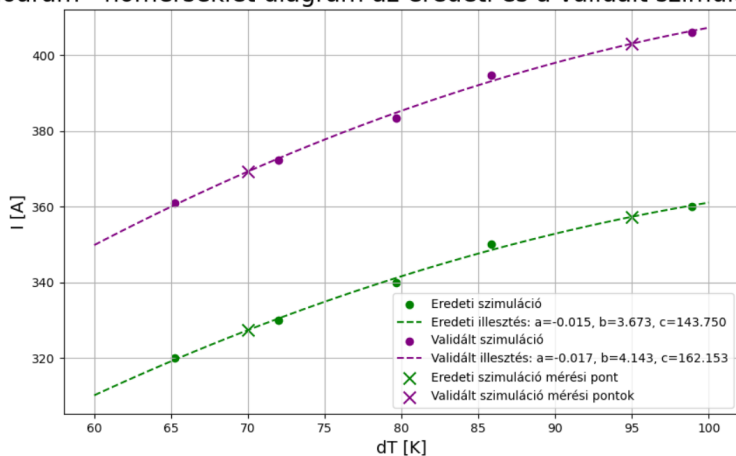
Hőmérséklet - terhelőáram diagram az eredeti és a validált szimuláció esetén



3.18. ábra. Hőmérséklet - terhelőáram diagram az eredeti és az illesztett szimuláció esetében.

Talán beszédesebb, ha azt nézzük meg, hogy mekkora áramra van szükség egy adott hőmérséklet ingadozás eléréséhez.

Terhelőáram - hőmérséklet diagram az eredeti és a validált szimuláció esetén



3.19. ábra. Terhelőáram - hőmérséklet diagram az eredeti és az illesztett szimuláció esetében.

A (3.11)-es egyenletből:

$$(3.12) \quad I_{pre, ton=1.5} = 378 \cdot \frac{357.4}{335.1} = 403.2A$$

Ez az érték - mint később kiderült - már kevesebb, mint 0.3%-os eltéréssel megközelíti a használandó terhelőáram nagyságát. Mivel ez az áram biztonságos a modulok számára, és az APC (Active Power Cyler - mérőberendezés neve) is képes ekkora áramot létrehozni, így kijelenthető, hogy a szimulációs eredmények alapján a teszt futtatása lehetséges.

4. fejezet

A CSL félvezető modulok tesztelése

A mérés során PC_{sec} tesztet futtattam 2 mintán. A mérés elindításához néhány paramétert kell megadni: a hűtőfolyadék típusát, hőmérsékletét és térfogatáramát, valamint a t_{on} , t_{off} időket és a ΔT hőmérsékletkülönbséget. Az általam használt és a korábbi (hagyományos) teszt beállításait az alábbi táblázat tartalmazza:

Paraméterek	Eredeti, $t_{on} = 3\text{ s}$	Általam használt, $t_{on} = 1.5\text{ s}$
Hűtőfolyadék típusa	Szilikonolaj	Szilikonolaj
t_{on} [s]	3	1.5
t_{off} [s]	7	4
Q_{cool} [ℓ/min]	8	8
T_0 [$^{\circ}\text{C}$]	46	46
I_L [A]	378	TBD ¹
ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	95	95

4.1. táblázat. A mérési paraméterek beállításai az eredeti és a rövidített PC_{sec} tesztek során.

Az ún. "end of life" teszt elindítása előtt azonban először a gép kalibrációját, és teszt összeállítását szükséges elvégezni. A félvezető modult egy tesztinverterbe kell először szerelni (a modulok az autóban is inverterben találhatók), majd a tesztinverterbe szükséges bekötni és csatlakoztatni az áram ki- és bevezetéseit, valamint a hűtőfolyadék ki- és bevezetését is.

4.1. A szükséges terhelőáram kimérése

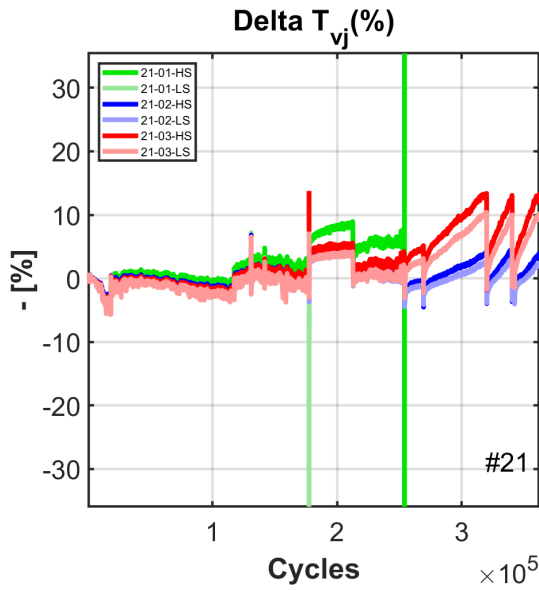
A teszt elindítása előtt még nem ismert a szükséges terhelőáram ahhoz, hogy létrehozzuk a kívánt hőmérséklet-ingadozást. Ugyan a szimulációkból képet kaphatunk a szükséges áramról, de a való értékét mindenképp ki kell mérnünk. Ennek érdekében a teszt elindításakor beállítjuk a teszt paramétereit a (4.1)-es táblázatnak megfelelően, majd addig állítgatjuk a terhelőáram értékét, amíg

¹TBD (To Be Determined) - Később kerül kimérésre.

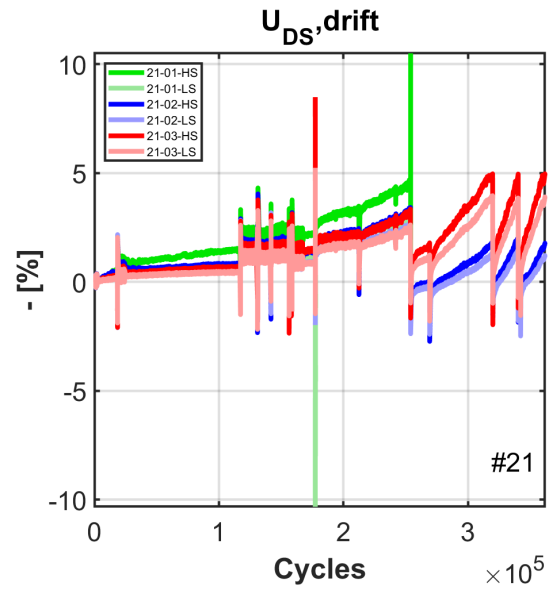
meg nem találjuk azt az értéket, amellet a hőmérséklet-ingadozás 95K lesz. Ez ebben az esetben $I_L = 402A$ -nek bizonyult.

4.2. Az élettartam teszt futtatása

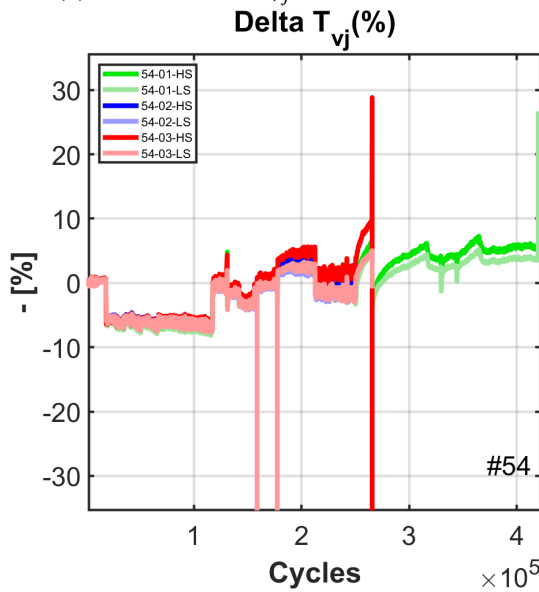
Az áram kimérését követően elkezdődhetett az élettartam teszt. Az AQG guideline -nak megfelelően az élettartam-teszt során nem szabad változtatni egyik paramétert sem (pl. az áram értékét nem szabad megváltoztatni akkor sem, ha a fix áram által okozott hőmérséklet-ingadozás megváltozik a teszt során). A tesztberendezés számos adatot rögzít, melyek közül nekünk 2 különösen fontos az (1.5) feltételei miatt. Ezeknek a ciklusok során való alakulása a két minta esetében:



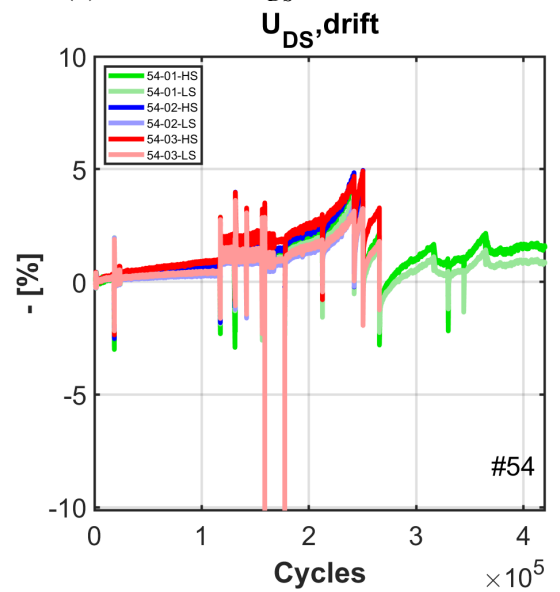
(a) 21-es minta ΔT_{vj} relatív változása.



(b) 21-es minta U_{DS} relatív változása.



(c) 54-es minta ΔT_{vj} relatív változása.



(d) 54-es minta U_{DS} relatív változása.

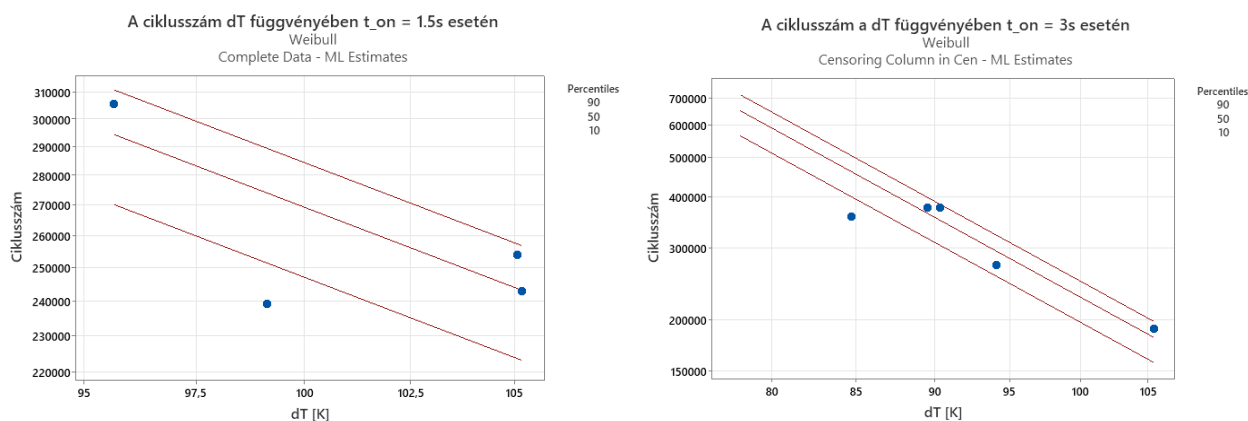
4.1. ábra. Az egyes minták ΔT_{vj} és U_{DS} relatív változásai a ciklusszám függvényében. Az (1.5) szerint 5%-os feszültségváltozás, vagy 20%-os hőmérséklet-ingadozás változás esetén tekintünk egy modult meghibásodottnak.

5. fejezet

A teszteredmények elemzése

A tesztek lefutását követően kezdődik a munka leglényegesebb része: a kapott eredmények kielemezése és a meghibásodási mechanizmusok meghatározása. A tesztek 2 mintával futtattam, így összesen 6 modul élettartamának vizsgálatát végezhettem el külön-külön. A dolgozatom megírásának pillanatában a tesztek még folyamatban vannak, mivel a 6 modulból egyelőre csak 4 érte el az élettartam végét meghatározó kritériumokat (EoL kritériumokat). Az itt olvasható elemzések ezekre a modulokra vonatkoznak.

Első lépésként megvizsgáltam, hogy mi az összefüggés az elért ciklusszám és az átlagos hőmérséklet-ingadozás között.



5.1. ábra. A ciklusszám a dT függvényében az általam használt $t_{on}=1.5s$ -os esetben és az eredeti, $t_{on}=3s$ -os esetben. Minél nagyobb a hőmérsékletkülönbség, annál kevesebb ciklus elég a meghibásodáshoz.

Céлом az, hogy meghatározzam a (1.2)-es egyenletben szereplő paramétereit. Mivel csak egy tesztet futtattam, így komplexebb modell illesztése nem volt lehetséges. Ehhez több, eltérő paraméterekkel beállított élettartamtesztre lenne szükség.

Ezután illesztéssel meghatározhatom a Coffin-Manson tag hőmérsékleti kitevőjét, amely a gyorsítási faktor is egyben.

Standard					80,0% Normál CI	
Prediktor	Együttható	Hiba	Z	P	Alsó	Felső
Intercept	34,3011	1,26709	27,07	0,000	32,6773	35,9250
DT(átlag)(K)	-4,77169	0,287501	-16,60	0,000	-5,14014	-4,40324
Alak	6,88601	1,86744	4,86	0,000	4,86440	9,74779

5.1. táblázat. A Coffin-Manson modell illesztési paraméterei. CI a konfidenciaintervallumot jelöli.

Az illesztést és az elemzést a Minitab szoftverrel végeztem, amely a Coffin-Manson modellt az alábbi módon definiálja:

$$N_f \propto \Delta T_j^{-k_{CM}}.$$

Az ellentétes előjelű együttható definiálásból fakadóan a k_{CM} együttható értéke 4.77.

Az egyes modulok esetén kiszámolhatjuk a valós hőmérséklet-ingadozást (az egyes modulok hőmérséklet-ingadozása eltérhet a nominális 95K-es értéktől), majd a Coffin-Manson-törvény k_{CM} együtthatójával "levetítve" a 95K-es -re megkapjuk, hogy hány ciklust bírtak volna, ha éppen 95K-es ingadozáson mennek keresztül:

$$(5.1) \quad N_f(95K) = N_{f(obs)} \cdot \left(\frac{dT_{avg}}{95K} \right)^{k_{CM}}$$

Ezek után elkészíthetjük az élettartam görbét, mely megmutatja, hogy egy adott ciklusig mekkora valószínűséggel hibásodott meg a modul. Ehhez a mérési pontokra egy weibull-eloszlást illeszthetünk.

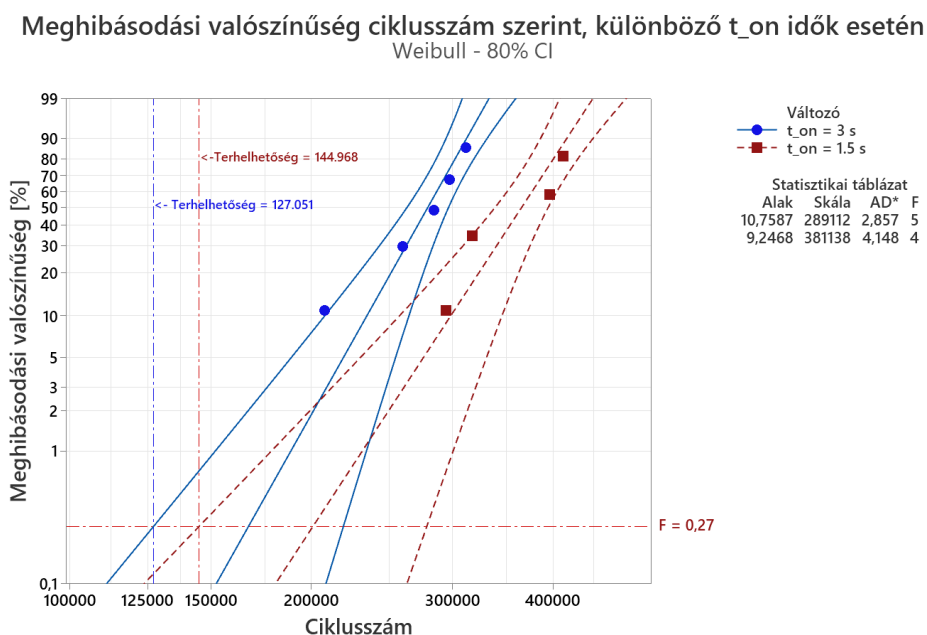
A Weibull-eloszlás képlete a ciklusszám (N) függvényében a következő:

$$F(N) = 1 - e^{-\left(\frac{N}{\eta}\right)^\beta}$$

ahol:

- $F(N)$: Az adott ciklusszámig (N) a meghibásodás valószínűsége (eloszlásfüggvény).
- η : Az eloszlás skála paramétere, amely meghatározza az élettartam középpontját (gyakran a 63.2%-os meghibásodási valószínűséghez tartozó ciklusszám). Nagyobb η érték esetén a jellemző élettartam hosszabb, azaz a teszt körülményei mellett az elemek tovább tartanak, mielőtt 63,2%-uk meghibásodik és eléri az élettartam vége (End of Life, EoL) kritériumokat, feltéve, hogy a hibakép nem változik.
- β : Az alakparaméter, amely az eloszlás meredekségét és a meghibásodási mechanizmus jellegét írja le. Egy alacsonyabb β érték a meghibásodási arány fokozatosabb növekedését jelzi, ami azt jelenti, hogy a hibák szélesebb időtartamra oszlanak el. Ezzel szemben a magasabb β érték koncentráltabb meghibásodási mintázatot eredményez.

- N : A ciklusszám.



5.2. ábra. A valószínűségi eloszlásra illesztett weibull-eloszlások az egyes t_{on} idők esetén.

A 80%-os konfidencia (kétoldalú) egy Weibull-görbére azt jelenti, hogy az adott élettartam-paraméter vagy meghibásodási idő valódi értéke az esetek 80%-ában a becsült intervallumon belül található.

Az $F = 0.27$ a vevői elvárását jelöli; azt mutatja meg, hogy 1 millió termékből 2700 milyen terhelésnél hibásodik meg. Mivel egy konzervatívabb becslést szeretnénk adni, és figyelembe kívánjuk venni a Weibull-görbe illesztésének bizonytalanságát, ezért a 80%-os konfidenciaintervallum alsó határát használjuk a valószínűségi érték meghatározására.

Látható, hogy a 2 különböző t_{on} idejű mérés során hasonló weibull-görbéket kapunk (az alak faktorok meglehetősen közeli értékek.) Az alak faktor leírja a meghibásodási arány természetét az idő múlásával és gyakran specifikus meghibásodási módokhoz köthető.

Ezek alapján (az alakfaktorok hasonlósága miatt) arra számítottak, hogy a fizikai hibamódok is hasonlóak legyenek. Ezt a fizikai analízis során fogjuk tudni igazolni.

6. fejezet

Az elért eredmények és a munkám összefoglalása

Kutatásom során a CSL típusú félvezető modulok élettartamának vizsgálatával foglalkoztam, különös tekintettel a gyorsított élettartam tesztek hatékonyságára és megbízhatóságára. A cél az volt, hogy csökkentsük a tesztek során használt felmelegedési és hűtési időket (és ezáltal a ciklus időtartamát), és vizsgáljuk, hogy ez milyen módon változtatja a kapott hibamódokat.

Termikus szimuláció és validáció

A szimulációs részben először a port loss paraméter beállítását végeztem el, amely fontos a paraméter a félvezető modul és a környezete közötti hőcsere leírásában. A szimuláció pontossága érdekében alapos elemzést végeztem az időlépések számának (n) meghatározására, így biztosítva az optimális pontosságot és a számítási idő hatékonyságát. Emellett meghatároztam a felmelegedési idő t_{on} elméleti alsó határát, amely szükséges ahhoz, hogy a hő egyenletesen terjedjen el a modulon belül. Végül, szimulációval meghatároztam a 95K-es hőmérséklet-ingadozáshoz szükséges áram értékét, ami 403 A-nak adódott.

Élettartam tesztelés és mérés

A mérési rész során a tesztberendezést először kalibráltam, majd lefuttattam az élettartam tesztet a rövidített ciklusidővel, amely során a hőmérséklet-ingadozást 95 K értéken tartottam. A kimért terhelőáram értéke 402 A volt, ami igazolta a szimuláció során kapott eredményeket. Az élettartam teszt addig tart, amíg vagy a drain-source feszültség értéket nem változik 5%-al, vagy a csomóponti hőmérséklet-ingadozása nem változik 20%-al.

Az eredmények elemzése

Az élettartam teszt adatainak kielemezése során a Lesit-modell speciális eseteként kapott Coffin-Manson modellt alkalmaztam az élettartam és a hőmérséklet-ingadozás összefüggésének modellezésére. Az illesztés segítségével meghatároztam a modellhez tartozó hőmérsékleti kitevőt, amely alap-

ján elkészítettem az élettartam-görbéket. Ezeket a görbéket összehasonlítottam a korábbi, hosszabb felmelegedési időkkel végzett tesztek görbéivel, és megállapítottam, hogy a görbék hasonló lefutásúak, ami előrevetíti, hogy a rövidebb tesztek eredményei hasonlóképpen reprezentálják a modul öregedését.

További lépések

A következő lépés a fizikai analízis elvégzése (többek között ultrahangos mikroszkópia, röntgenvizsgálat, vizuális elemzés és elektromos mérések) a már meghibásodott modulokon, hogy részletesen megállapíthassam a meghibásodási mechanizmusokat. Emellett az élettartam tesztet folytatom a másik két modul esetében, hogy azok is meghibásodásig futhassanak, és így még teljesebb képet kaphassak az alkalmazott módszer megbízhatóságáról.

Irodalomjegyzék

- [1] Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, and David P. DeWitt (2011) *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Wiley, Hoboken, NJ, 7th ed. boken, NJ
- [2] M. Thoben and M. Tüllmann, *ECPE Tutorial: Testing Automotive Power Modules according to the ECPE Guideline AQG 324 - Lifetime Testing I (PC Principles)*, Fachhochschule Dortmund and Infineon Technologies AG, October 21, 2021.
- [3] Yunus A. Cengel (2006) *Heat Transfer: A Practical Approach*, McGraw-Hill, New York, 2nd ed.
- [4] Erlangen (2016) *Thermal Engineering of Power Electronic Systems, Part I-II*, ECPE Tutorial.
- [5] Wiley and The Institution of Engineering and Technology, *IET Power Electronics*, Online ISSN: 1755-4543, Print ISSN: 1755-4535, Disciplines: General & introductory electrical & electronics engineering.
- [6] Alhussein Albarbar & Canras Batunlu (2018) *Thermal Analysis of Power Electronic Devices Used in Renewable Energy Systems*.
- [7] Infineon. *Transient thermal measurements and thermal equivalent circuit models*. Itt elérhető.
- [8] Infineon. *Thermal resistance: Theory and Practice*. Itt elérhető.
- [9] Infineon. *PC and TC Diagrams*. Itt elérhető.
- [10] AQG324. *AQG324 Document*. Itt elérhető.
- [11] Yevgeniy Temko, Philipp Mueller, and Anne Bedacht (2023) *Easy to Use and Compact: A Family of SiC Power Modules for Automotive Traction Inverters*
- [12] M. Held, P. Jacob, G. Nicoletti, P. Scacco and M. H. Poech, "Fast power cycling test of IGBT modules in traction application," in Proc. of the 2nd PEDS, pp. 425-430, 1997.
- [13] R. Bayerer, T. Herrmann, J. Lutz, T. Licht, J. De Doncker, "Model for Power Cycling Lifetime of IGBT Modules – Various Factors Influencing Lifetime", in *5th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS)*, 2008.

- [14] U. Scheuermann, R. Schmidt, "A New Lifetime Model for Advanced Power Modules with Sintered Chips and Optimized Al Wire Bonds", in *PCIM Europe*, 2013.
- [15] Márton Géczi, *Thermal Validation of Power Modules: Practical Guidelines to Conduct Validation Activities*, ETH Zürich, 2022.
- [16] Sándor Ádám, *Autóipari inverterek félvezető moduljainak termikus és mechanikus szimulációja*, 2023.