



SZAKDOLGOZAT

OE-KVK
2022.05.15.

Hallgató neve: **Malaczkó Cintia**

Hallgató törzskönyvi száma:
T003523/FI12904/K

Budapest, 2022



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Mikroelektronikai és Technológia Intézet

SZAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Malaczkó Cintia

Szakdolgozat száma: SZD22032912301415

Törzskönyvi száma: T003523/FI12904/K

Neptun kódja: XXXXXXXXXX

Szak: villamosmérnöki (magyar nyelven) (Budapest)

Specializáció: Mikroelektronika és technológia

Világítás és környezet modul

A dolgozat címe: Elektronikus áramkörök termikus modellje

A dolgozat címe angolul: Thermal modell of electronic circuits

A feladat részletezése: Gépjármű elektronikai rendszerek MOSFET-es áramköreinek a melegedését termikus modellekkel írják le. Az ezek alapján készült szoftver valós időben megbecsüli az áramköri egységek hőmérsékletét és szükség esetén beavatkozik. A Hallgató feladata az ilyen rendszerekben használt termikus becslő modell pontosságának és számításigényének vizsgálata és javaslattétel új modellre kellő pontosságot ad csökkentett számításigény mellett. A Hallgató ennek megfelelően a meglévő modelleket kellő mértékben ismertesse, végezzen méréseket és szimulációkat, és értékelje ki az eredményeket. Amennyiben talál olyan megoldást, ami a jelenlegi modellnél jobban megfelel az igényeknek, úgy annak implementálását is ismertesse a dolgozatában.

Intézményi konzulens neve: Horváth Márk

Külső konzulens neve: Mészáros András

Munkahelye: Thyssenkrupp Components Technology Hungary Kft.

A kiadott téma elévülési határideje: 2024. 06. 30.

Beadási határidő: 2022. 05. 15.

A szakdolgozat: Nem titkos.

Kiadva: Budapest, 2022. 03. 29.



[Handwritten signature]

Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom:

[Handwritten signature]
belső konzulens

[Handwritten signature]
külső konzulens



**Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Elektronikai és Kommunikációs Rendszerek Intézet
Mikroelektronikai és Technológia Tanszék**

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott hallgató kijelentem, hogy a szakdolgozat saját munkám eredménye, a felhasznált szakirodalmat és eszközöket azonosíthatóan közöltem. Az elkészült szakdolgozatban található eredményeket az egyetem és a feladatot kiíró intézmény saját céljára térítés nélkül felhasználhatja, a titkosításra vonatkozó esetleges megkötések mellett.

Budapest, 2022.5.12.


.....
hallgató aláírása

Tartalomjegyzék

1.	BEVEZETÉS.....	1
2.	SZERVÓ RENDSZEREK	2
2.1.	Sebességfüggő rásegítés (Servotronic)	2
2.2.	EPAS (Electric Power Assisted Steering, magyarul elektromos kormány szervó) rendszerek áttekintése	3
3.	A MEGOLDANDÓ PROBLÉMA MEGFOGALMAZÁSA.....	5
3.1.	Szabvány.....	6
3.2.	A szóba kerülhető hőmérő szenzorok.....	6
4.	A PROBLÉMA ELEMZÉSE, A SPECIFIKÁCIÓ KIDOLGOZÁSA	9
4.1.	Hőmérséklet mérése, meghatározása	9
4.2.	Foster modell	11
4.3.	Cauer modell	13
4.4.	Veszteségek számítása	15
5.	A MÉRÉSI MÓDSZER BEMUTATÁSA	21
5.1.	Az elrendezés és ez alapján a modell bemutatása.....	26
5.2.	Az új modell és elrendezés bemutatása.....	31
6.	ÖSSZEFOGLALÓ	35
7.	Abstract	36
8.	HIVATKOZÁSOK	37
9.	ÁBRAJEGYZÉK	38

1. BEVEZETÉS

A szakdolgozatomban ismertetem egy elektronikus áramkörök termikus becslésére szolgáló algoritmus célját és működését. Feladatom a szimulációban lévő algoritmus és a paraméterek megfelelő módosítása, hogy a mért értékeket a lehetőlegjobban megközelítse felülről. Az algoritmus a kormány szervó motor MOSFET-es vezérlőáramkörének a hőmérsékletét becsüli áram és hőmérséklet alapján. Ennek a becslésnek a célja, hogy a MOSFET-ek meghajtó áramát korlátozzuk a túlmelegedés elkerülésének érdekében.

A szakdolgozatban szó lesz a hőmérséklet becslők két féle számításáról, a Foster modellről és a Cauer modelleről, azon alkatrészekről, amelyek hőmérsékletének becslése fontos lehet, a mérési módszerekről, ami alapján paramétereket adunk a hő becslőknek, a hőbecslő felépítéséről illetve részletesebben kitérek majd a MOSFET-ek hő modelljére, egy általam ismert és használt mérési módszerre és egy konkrét példa által bemutatásra kerül ez a folyamat. Munkám során az áramköri változtatások miatt szükséges volt egy új modellt léterhozására.

2. SZERVÓ RENDSZEREK

2.1. Sebességfüggő rásegítés (Servotronic)

Kis sebességnél, a gépkocsival történő manőverezés megkönnyítésére a nagyobb rásegítés előnyös, mert komfortosabbá teszi a kormányzást, megkönnyíti a vezető munkáját. Nagy sebességnél viszont, például autópályán sokkal kisebb kell legyen a rásegítés. Ennek az oka az, hogy biztosítani kell a gépkocsi minél biztonságosabb, nyomtartó vezethetőségét.

– Hagyományos kormányművek

Ezek az úgynevezett alap kormány berendezés változatok, a vezető izomerejét használják a gépjármű irányítására. Van, amelyiket továbbfejlesztették, ezek a szervó kormányok már elektromosan működnek.

Ezen belül megkülönböztetjük az alábbi kormányműveket:

1. Csavarorsós kormánymű
2. Globoid-csigás kormánygép
3. Fogasléces kormánymű

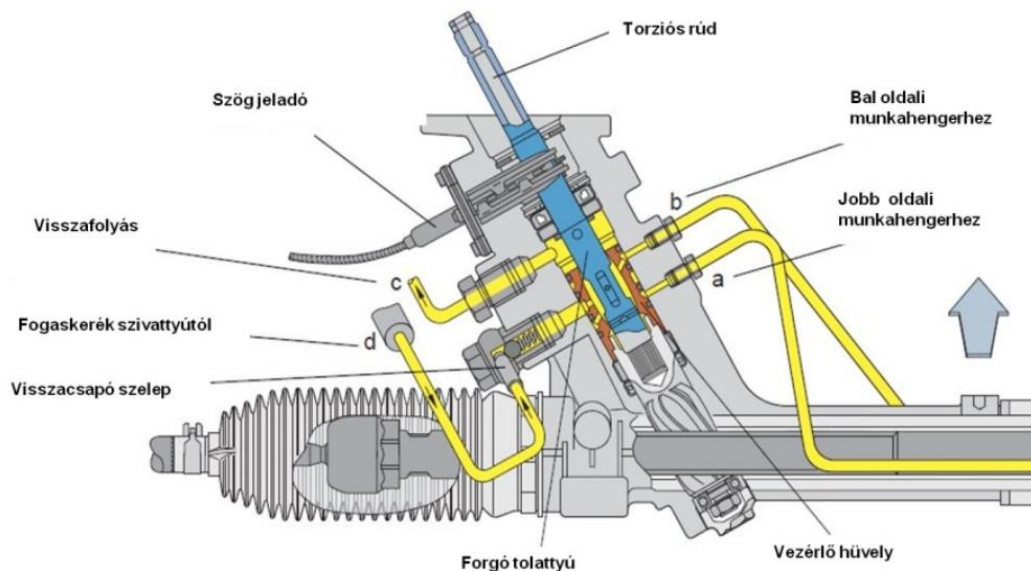
– Hidraulikus, pneumatikus rendszerek

A hidraulikus berendezés a kormányon kifejtett nyomatékkel arányosan segíti a vezetőt úgy, hogy a kormányzott kereken növeli az elfordító erőt ezáltal könnyebb eltekerni a kormányt a vezetőnek. A kezdeti időben elsősorban a haszongépjárműveknél alkalmazták, de nem sokkal később a személyjárművekbe is hidraulikus működésű szervokormányokat használtak, ezzel növelve a vezetési komfortot. [6]

2.2. EPAS (Electric Power Assisted Steering, magyarul elektromos kormány szervó) rendszerek áttekintése

- Elektrohidraulikus szervokormány (EPHS = Electrically Powered Hydraulic Steering)

A korszerű, elektronikával vezérelt villanymotoros hajtású servo-szivattyúknál megvalósítják az úgynevezett „stand by” üzemmódot. Ez a megoldás az energia megtakarítás és a káros anyag kibocsátás szempontjából is fontos. Amikor az elektronika azt érzékeli, hogy nem mozdul a kormánykerék és a gépkocsi álló helyzetben van a villanymotor az üzemi értéknél kisebb fordulatszámon fog működni. Ez az állapot addig tart, amíg a fenti üzemi jellemzők valamelyikében nem következik be változás. Az üzemállapot megváltozásának pillanatában bekövetkezik a szivattyú újraindítása normál üzemi fordulatszámon. Az ekkor megvalósuló térfogatáramot nem csak a motor fordulatszáma, hanem a szivattyú szállítási teljesítménye is befolyásolja. [6]



2-1 Elektrohidraulikus fogaslécés szervokormány [1.]

- EPAS (Electric Power Assisted Steering)

Ahogy nevéből is látjuk az EPAS rendszerek elektromosan vezérelt kormányzás rásegítést jelent. Tekintve, hogy ez teljesen elektromosan valósul meg nem úgy mint az előbbiekben említetteknél és biztonság kritikus rendszerről van szó, ezért számolnunk kell az elektromos áramkör alkatrészeinek melegedésével is illetve azok tűrésével.



2-2 A képen látható egy teljes EPAS rendszer kormányoszloppal, elektronikával [2.]

3. A MEGOLDANDÓ PROBLÉMA MEGFOGALMAZÁSA.

Az alkatrészek melegedése (motor közelsége, alkatrészek disszipációja) és mechanikai kialakítása miatt nem fér el annyi hőmérő szenzor amennyire szükség lenne, illetve egy hűtőborda vagy nagyobb hőelvezető eszköz implementálására nincs lehetőség, így költséghatékonyabb megoldás kevés szenzort és hőbecslőt használni. Hőelvezető pasztát ugyan használunk, de az nem tud annyi hőt elvezetni amennyit a kritikusan melegedő alkatrészek termelnek; hűtőborda hiányában a paszta nem tudja hova elvezetni a keletkező hőmérsékletet.

Ahhoz, hogy a követelményeknek megfeleljünk és megelőzzük az esetleges túlterhelést, károsodást, a kritikus komponensek így a MOSFET-ek hőmérsékleteit egyesével is ismernünk kell valós időben. Így kivédhető egy esetleges túlmelegedés aminek a következtében tönkremennének és így kiválaszthatjuk a lehető legolcsóbb MOSFET-et ami a célnak megfelel. A hőmérsékleti tűrés mellett természetesen fontos az alkatrészek ára is, hogy költséghatékonyan dolgozhassunk. A MOSFET disszipációja nagyban függ az alábbiától:

$I_{Drain}^2 \cdot R_{DSon}$	1.
------------------------------	----

az R_{DSon} pedig nagyban befolyásolja a FET árát.

3.1. Szabvány

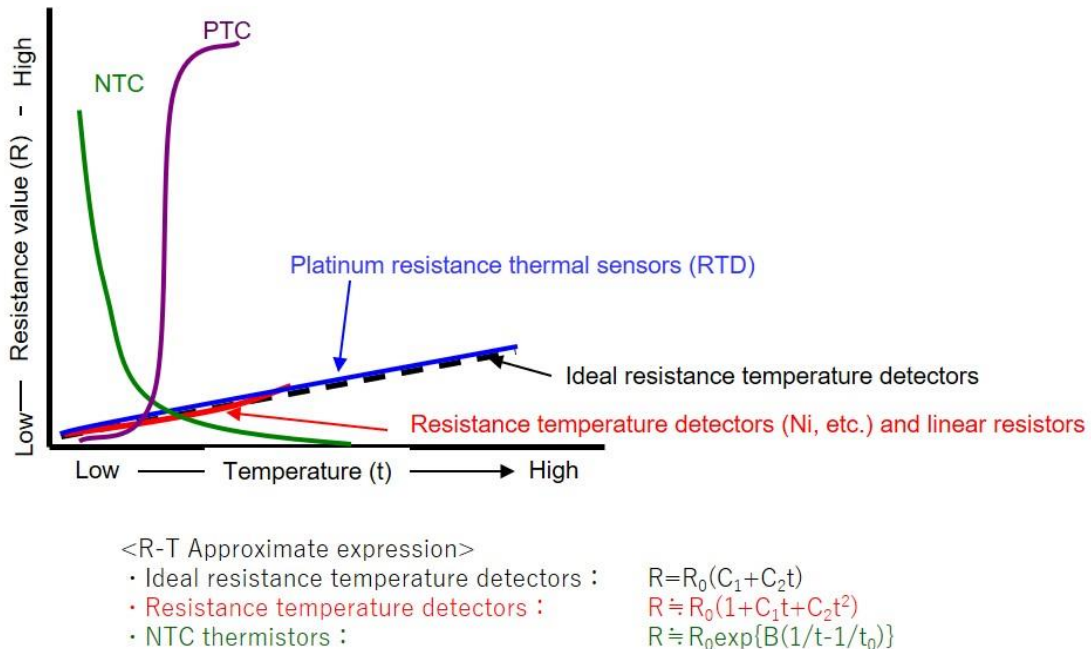
Az említett szabvány ami szerint dolgozunk azaz ASIL, ami az Automotive Safety Integrity Level rövidítése, vagyis autóiipari biztonsági integritási szintet jelenti. Ezt az ISO 26262-01 (2018.12) 3.6-ban rögzítettek szerint alkalmazzuk. A bemutatott rendszer megfelel az ASIL D szintjének. A kiosztott integritási szint a rendszer fejlesztése során követendő folyamatokhoz kapcsolódik – minél magasabb a szint, annál szigorúbbak és szigorúbbak ezek a folyamatok. Vegyük például a kódlefedettségi követelményeket. A kódlefedettség tesztelésének célja annak meghatározása, hogy a kódból mennyit alkalmaztak a követelményeken alapuló tesztesetek. Hatékony eszköz lehet minden olyan kód megkeresésére, amely nem követi a követelményeket vagy a tesztelés korlátait. Minél súlyosabb következményekkel jár a kód hibája, annál több bizonyítékra van szükségünk arra vonatkozóan, hogy a tesztesetek találhatnak potenciális problémákat a kódban.

Két különböző szett létezik, egy egység szinten, egy pedig architektúrális szinten. A technikák erősen ajánlottak vagy ajánlottak. A függetlenségnek nincs követelmény. Tehát bár a legmagasabb ASIL-nél továbbra is szükségünk van az MC/DC-re (Multiple Condition/Decision Coverage - Több feltétel/Döntés lefedettsége), az ennek elérésére vonatkozó követelmény más. A kódlefedettséget is több absztrakciós szinten kell alkalmazni. [5.]

3.2. A szóba kerülhető hőmérőszensorok

- NTC (negative temperature coefficient) termisztorok, melyekből felhasználásunktól függően tudunk válogatni ellenállás értéket, THT vagy SMD tokozásban is rendelkezésre állnak, mérési tartományuk -55°C – 300°C -ig terjed, választható anyagállandóval, különböző toleranciákkal és fogyasztású NTC-k közül választhatunk. A helyzet ezzel az, hogy külön helyet kell biztosítani neki a PCB-n, amin nem sok hely van illetve az ára miatt is problémás lehet, nem rakhatjuk vele tele a NYÁK-ot és az alkatrészekre se rakhatjuk.
- PTC (positive temperature coefficient) termisztorok. Eltérés az előzőhöz képest a karakterisztikájában van. Amíg az NTC ellenállása csökken hőmérséklet hatására addig a PTC ellenállása pedig nő hőmérséklet növekedés esetén.

- Platina hőellenállásnak szinte teljesen lineáris a karakterisztikája (nagy tartomány), körülbelül négy tizedes pontosságú, de cserébe nagyon drága.



3-1 NTC-PTC-Platina pontossága különböző hőmérsékleteken [3]

- GDU (Gate Driver Unit) típusokból is találhatunk olyat, amelyek képesek a hőmérséklet meghatározására. Az automotív iparban használt GDU-k szabvány szerint $-40^\circ\text{C} - 125^\circ\text{C}$ -ig garantáltan képesek többek között a hőmérséklet mérésére is. Bár erről pontos adatot nem ismerünk, de valószínűleg egy nyitóirányba áramgenerátorosan előfeszített PN átmenet nyitófeszültségét mérik, ami erősen hőfüggő.
- Hőelemek: Itt érdemes megemlíteni a Seebeck-effektust. A Seebeck effektust kihasználva a két fém közötti forrasztás segítségével a feszültség változás függvényében tudjuk megmondani mekkora hőmérséklet változás történt a referenciánkhöz képest. Két különböző fémből állnak, felhasználásunknak megfelelően választhatjuk ki. Hőmérsékleti tartományukban eltérőek típusuktól függően. Például a K-típusú szenzor mely az egyik leggyakoribb az iparban; Nikkel-Króm vagy Nikkel-Aluminium ötvözet, a hőmérsékleti tartománya pedig $-250^\circ\text{C} - 1100^\circ\text{C}$ -ig terjed, rövid ideig 1200°C -on is tud mérni. A K-típus

kiváltója lehet az N-típusú szenzor mely Nikkel-Króm-Szilícium vagy Nikkel-Szilícium ötvözetből készül és a K típusúnál stabilabban akár 1280°C-ig is tud mérni.

Típus	Összetétel	Érzékenység	Hőmérséklet tartomány
<u>B</u>	(+) Platinum - 30% Rhodium (-) Platinum - 6% Rhodium	5 - 10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	+250 - +1820 $^\circ\text{C}$
<u>E</u>	(+) Chromel (Ni-Cr) (-) Constantan (Cu-Ni)	40 - 80 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-270 - +1000 $^\circ\text{C}$
<u>J</u>	(+) Iron (-) Constantan (Cu-Ni)	50 - 60 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-210 - +1200 $^\circ\text{C}$
<u>K</u>	(+) Chromel (Ni-Cr) (-) Alumel (Ni-Al)	28 - 42 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-250 - +1300 $^\circ\text{C}$
<u>N</u>	(+) Nicrosil (Ni-Cr-Si) (-) Nisil (Ni-Si-Mg)	24 - 38 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-250 - +1300 $^\circ\text{C}$
<u>R</u>	(+) Platinum (-) Platinum - 13% Rhodium	8 - 14 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-50 - +1768 $^\circ\text{C}$
<u>S</u>	(+) Platinum (-) Platinum - 10% Rhodium	8 - 12 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-50 - +1768 $^\circ\text{C}$
<u>I</u>	(+) Copper (-) Constantan (Cu-Ni)	17 - 58 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-250 - +400 $^\circ\text{C}$

3-2 A hőelemek típusai [4.]

4. A PROBLÉMA ELEMZÉSE, A SPECIFIKÁCIÓ KIDOLGOZÁSA

A hely nem teszi lehetővé a rengeteg hőszensor alkalmazását és a költséghatékonyság miatt egy becslő sokkal praktikusabb és helytakarékosabb mint az extra alkatrészek halmozása hőmérséklet mérés céljából. Hűtésre ismert alkalmazhatóságok mint hűtőborda nem fér oda, a környezet annyira meleg, hogy nem lenne értelme, nem tudna hová hűlni. Aktív hűtéses hőszivattyú alkalmazása is olyan nagy helyet foglalna és még drága is lenne, hogy szintén lehetetlen a megvalósítása.

Van viszont két darab hőszensorunk a nyomtatott áramkörü panelünkön. Azért fontos, hogy legalább kettő legyen mert így az esetleges meghibásodást ki tudjuk szűrni, így látjuk hogyha az egyik jel esetleg nem megbízható, jelentősen elmozdít a másikkal képest. Ismerjük a fázis áramokat, a feszültségeket és a híd FET-ek és fázis FET-ek meghajtását ami alapján készíthetünk egy kellő pontossággal működő hőbecslőt.

4.1. Hőmérséklet mérése, meghatározása

Hőmérsékletet mérhetjük úgynevezett hőszensorokkal vagy becsülhetjük őket. A hőszensorok drágák, sok helyet is foglalnak, de szükségünk van a hőmérsékleti adatokra így logikus döntés, hogy valamilyen közelítő formulát, becslést implementálunk a szoftverbe, ami jó közelítéssel és kellő pontossággal tudja visszaadni nekünk a szükséges információkat, esetünkben a hőmérsékleti adatokat, amelyeket felhasználunk a rendszerünk túlmelegedés elleni védelmére.

Az EPAS rendszerekben több alkatrészezt illetve egységezt is használunk hőmérséklet becselőket például: tekercsekre, kondenzátorokra és MOSFET-ekre.

A modell kialakítása nagyban függ az alkatrészek elrendezésétől és a hűtés módjától is.

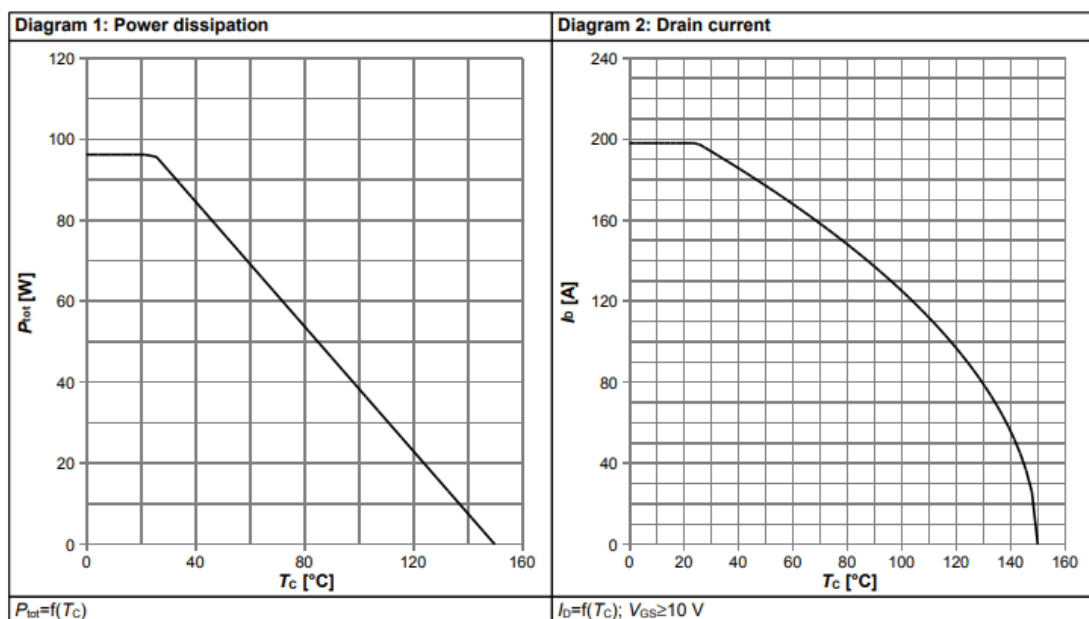
Mérési módszerek:

- Hőkamerával (ha lehet) felvétel készítése valamilyen terhelés közben ami alapján $\pm 2^{\circ}\text{C}$ eltéréssel és a modell segítségével meghatározhatjuk a paramétereket.

- Hőszenzorral: egy adatgyűjtő segítségével terhelés közben rögzítjük a hőmérsékleti adatokat. Néhány fok eltéréssel és az adatgyűjtő gyorsaságától függően adott mintavétellel lehetséges a paraméterek meghatározása a modellhez.

Minden esetben olyan terheléseket célszerű választanunk amivel a legjobban fel tudjuk melegíteni a MOSFET-eket, illetve kell legyen olyan terhelés is amellyel egyszerre csak egy MOSFET-et melegítünk, majd olyan amivel felváltva melegítjük a MOSFET-eket ezzel a legdurvább eseteket megvizsgálva a normál működés során tudunk jó hőbecslőt készíteni.

A feladat elvégzése során egy ehhez a típushoz (BSC014N04LS) hasonló teljesítmény MOSFET-et vizsgáltam amely az alábbi paraméterekkel rendelkezik:



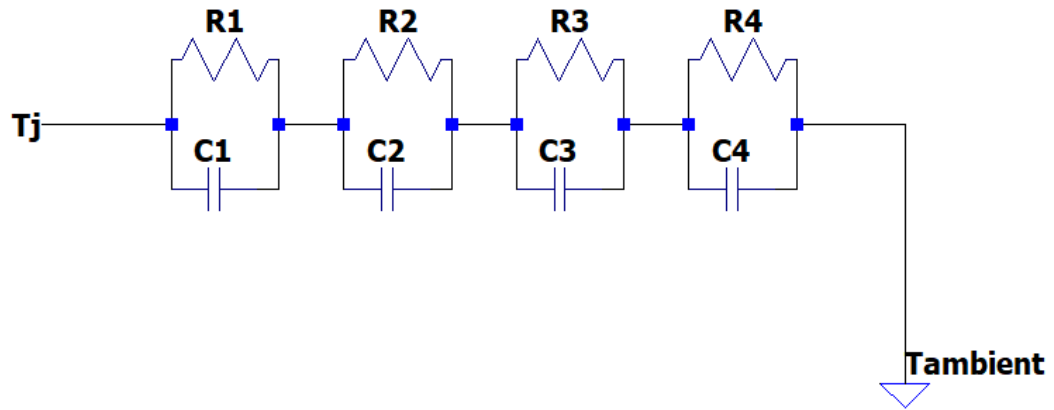
4-1 Hőmérséklet függvényében a FET-ek megengedett maximális teljesítménye és árama [8.]

$R_{DS(on)max}$ értéke $1,4m\Omega$ ami jó kis érték. A diagrammról leolvashatjuk, mi az a hőmérséklet, amin még a MOSFET működését a megengedett maximális teljesítménnyel és maximális drain árammal garantálja a gyártó. Magasabb hőmérsékleten vissza kell vennünk a teljesítményből, hogy a maximum hőmérséklet ne haladja meg a megengedettet.

4.2. Foster modell

Modellünkben a villamos analógia felhasználásával dolgozunk. A hőkapacitás számértéke segítségével meghatározhatjuk, hogy az adott test hőmérséklete 1°C -kal való megemeléséhez mekkora hőmennyiség szükséges. A hőellenállásból származtathatjuk a hővezetést is, ami a hőellenállásunk reciproka. A disszipáció elektromos áramkörökben az adott elemek melegedését, vagyis hő formájában távozó teljesítményt jelenti. A hőáram az az áram, amely hatására az elektromos áramkörünk melegedni kezd, amivel terheltük az adott áramkörünket. A „hőfeszültség” pedig maga a hőmérséklet. Két féle modellt mutatok majd be a továbbiakban, amelyek hőellenállásokból és hőkapacitásokból állnak.

A Foster modell egy gyakran használt leírása a termikus modelleknek, de így ez csak egy olyan formula amelynek nincs közvetlen kapcsolata a fizikai megvalósítással. Ez a modell jóval bonyolultabb a Cauer modelltől ahogy az az alábbi egyenletrendszerből látható. Rengeteg osztást végzünk benne ami nagyban növeli a szoftver futási idejét és jóval több memória kapacitást igényel az egyenletrendszer kiszámítása. Bár a Foster modell pontosabb eredményeket adhat a fenti okok miatt a Cauer modell használata a célszerűbb számunkra. Ezt a fajta ábrázolást adatlapokon használják, az együtthatók könnyen kinyerhetők a modul mért hűtési görbéjéből. Ezen túlmenően elkészíthetők elemző számítások. [7.]



4-2 Foster modell negyedrendű megvalósítása [saját ábra]

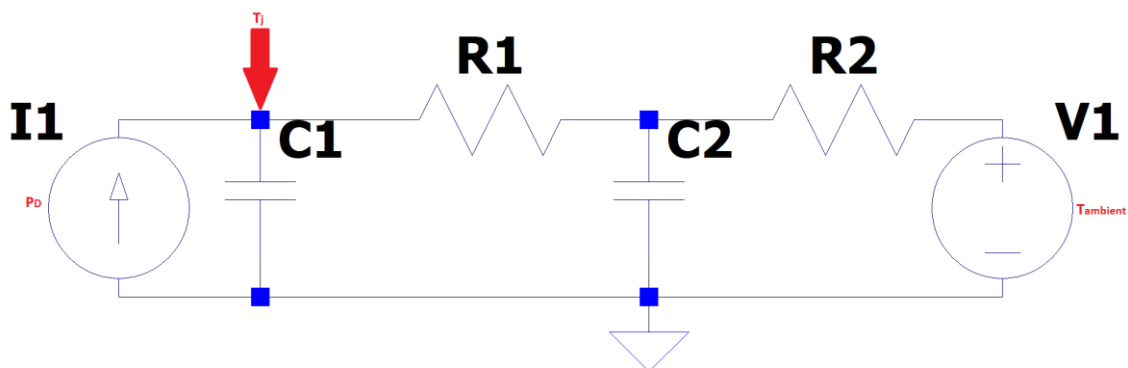
Az R_i és C_i átviteli függvénye megfelel a „hűlési görbének”, így az alábbi összefüggést írhatjuk fel, amellyel egy görbét tudunk majd illeszteni:

$T_j = T_{amb} + P_j \cdot \left(\frac{R_1}{1 + sR_1C_1} + \frac{R_2}{1 + sR_2C_2} + \frac{R_3}{1 + sR_3C_3} + \frac{R_4}{1 + sR_4C_4} \right)$	2.
--	----

4.3. Cauer modell

TE: Thermal estimator, magyarul termikus becslő.

Ha egy FET junction (mag) hőmérsékletét szeretnénk szemléltetni, a következő analógiát használhatjuk:



4-3 Cauer modell másodrendű megvalósítása

Ahol:

P_D : conduction loss, switching loss and diode dissipation, vagyis vezetési-, kapcsolási-veszteség és a body dióda disszipációja.

Maximum junction (mag) hőmérséklet: az a legmagasabb hőmérséklet amelyen még a tranzisztor képes a működésre.

$P_D \cong I_D^2 \cdot R_{DSon}$	3.
----------------------------------	----

T_J : junction temperature, vagyis a mag hőmérséklet

$T_{ambient}$: környezeti hőmérséklet

C_1 : junction thermal capacitor, félvezető termikus kapacitása

C_2 : case thermal capacitor, tokozás termikus kapacitása

R_1 : junction to case thermal resistance, félvezető és tokozás közötti termikus ellenállás

R_2 : junction to ambient thermal resistance, a tokozás és a környezet közötti termikus ellenállás

Ez a tipikus FET modell általánosságban használható; ehhez hasonlóan kondenzátorok és tekercsek hőmérsékletei is egyszerűen modellezhetők ilyen módon. Alacsonyabb fokszám esetén csökkenthetjük a futási időt, viszont cserébe pontatlanabb lesz a számításunk. Nagyobb fokszám esetén ugyan a pontosságot növelhetjük, de ezzel együtt a processzor futási ideje is megnő, tehát lassabban fogja tudni megbecsülni a hőmérsékletet illetve a processzornak nem ez az egyetlen feladata, több egyéb számítást is végez, ami a működéshez szükséges és ha az összes futási idő meghaladja a processzor kapacitását akkor a szoftver és az eszköz is használhatatlanná válik.

Hőmérséklet a villamos feszültségnek felel meg, a teljesítmény esetünkben a hőáramnak felel meg illetve a modellünkben hőkapacitást és hőellenállást használjuk még fel. A kondenzátor töltéstároló képességével modellezük az adott test hőtárolóképességét. Az R-C viszonyok határozzák meg a felfutási és lefutási meredekségeket.

A paraméterek inverz értékeivel számolunk ezzel is gyorsítva a szoftver futási idejét, így a szoftverünknek meg tudunk spórolni rengeteg osztást ezt az inverz ellenállások esetén G-vel fogom jelölni, mint vezetés azaz $1/R$. A hőmérsékletek számításánál is hasonlóan fogunk eljárni. Tehát jelen modellünk esetén a következőképpen alakulnak a disszipált teljesítmények:

$P_{R1} = (T_D - T_j) \cdot G_1$	4.
----------------------------------	----

$P_{R2} = (T_j - T_{amb}) \cdot G_2$	5.
--------------------------------------	----

$P_{C1} = P_D - P_{R1}$	6.
-------------------------	----

$P_{C2} = P_{R1} - P_{R2}$	7.
----------------------------	----

A hőmérsékletek az alábbiak alapján számíthatók jelen modellünkben :

$T_j [n] = T_j [n-1] + \frac{1}{C_2} t_s \cdot (P_{R1} - (T_j [n-1] - T_{amb} [n-1]) \cdot G_2)$	8.
--	----

$T_D [n] = T_D [n-1] + t_s \frac{1}{C_1} \cdot (P_D - (T_D [n-1] - T_j [n-1]) \cdot G_1)$	9.
---	----

A hőmérsékletet az idő függvényében változónak tekintjük ezért szükséges a fentebbi egyenletekben látható t_s mintavételi idő figyelembe vétele. Ez a mintavételi idő mutatja meg milyen időközönként frissíti a szoftver az aktuális információi alapján az adatokat. Ha ismerjük a kezdeti hőmérsékletet egy mérésből, például van egy szenzor valahol a MOSFET-ünk környékén amiből, a környezeti, azaz az ambiente hőmérsékletet meghatározzuk a korábbi hőmérsékletekből és a paramétereink alapján tudjuk becsülni az aktuális hőmérsékletet.

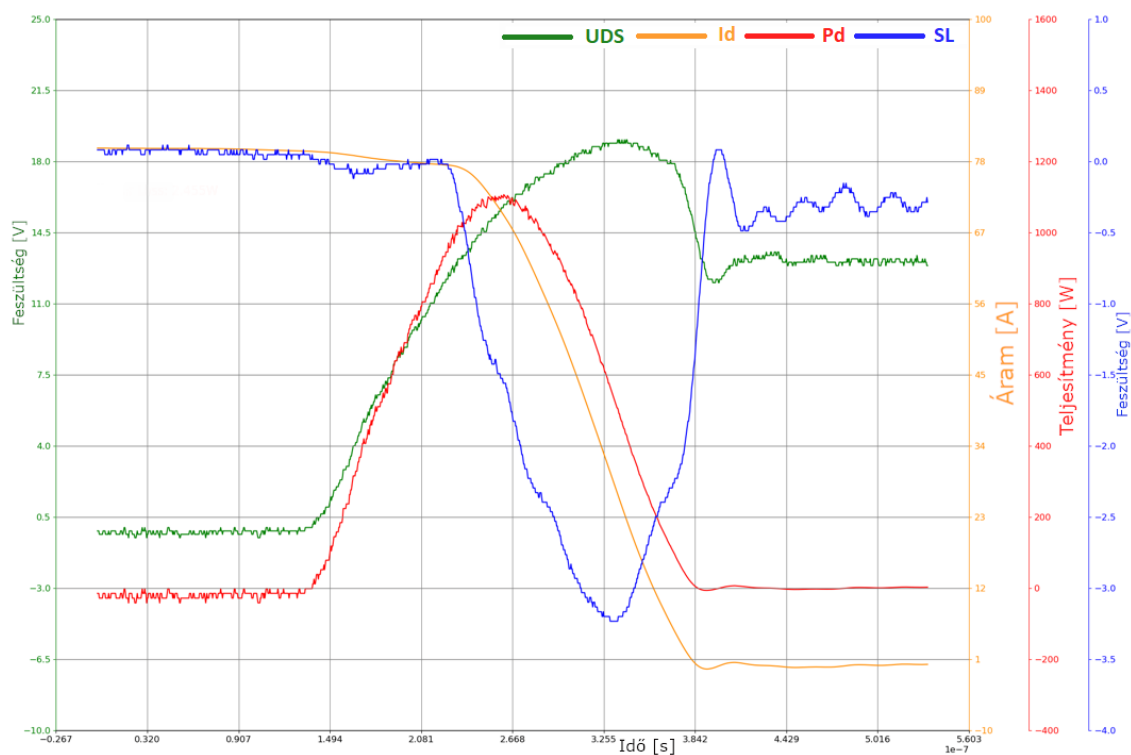
4.4. Veszteségek számítása

Kapcsolási veszteségek kiszámítása és a modellben való felhasználása a következőképpen alakul:

A MOSFET és a MOSFET body diódájának a kapcsolási veszteségei mérhetőek, melyekre görbe illesztés során paramétereket határozzunk meg, így azt beillesztve a modellünkbe ezzel is számolva pontosabb becslést tudunk készíteni.

A mérés során különböző áramokat folytatunk át a MOSFET-en és ezt több tápfeszültségen megismételjük. Az áram ismert, a táp feszültséget ismerjük, a drain-source feszültséget mérjük.

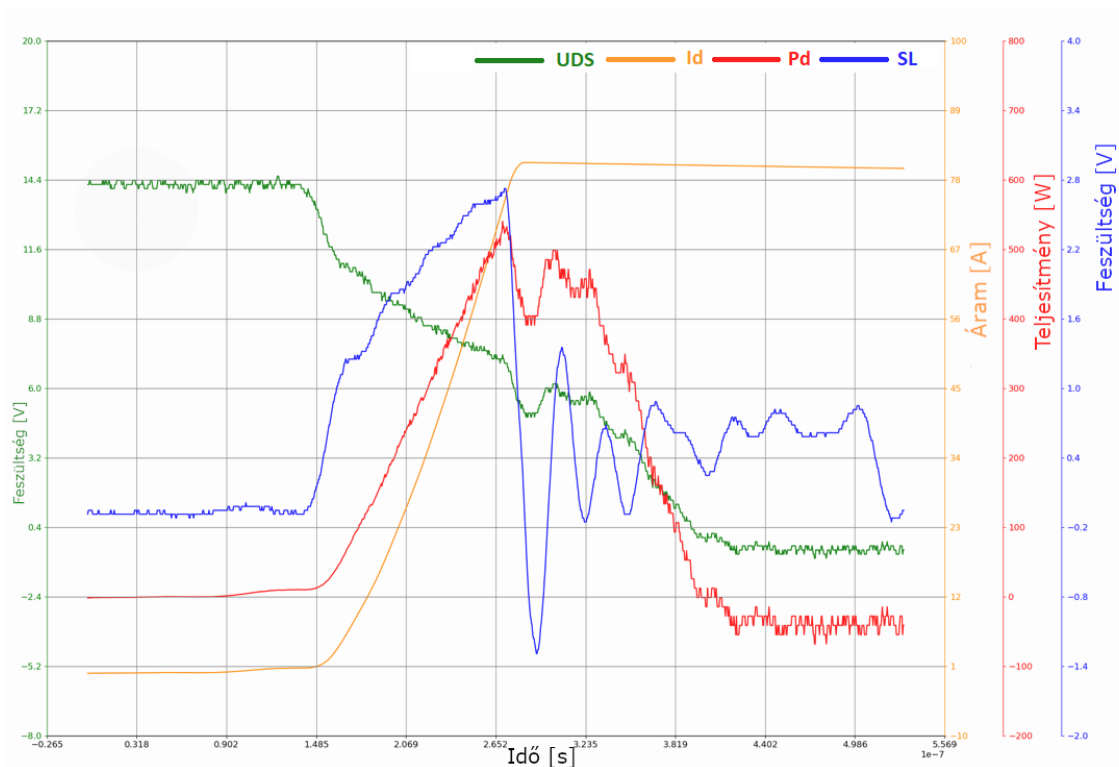
Egyforma MOSFET-ek esetén elég egy MOSFET párosra megcsinálni a mérést, így lesz egy eredményünk ki- és bekapcsolási veszteségre a high side (felső oldali) MOSFET-re és a low side (alsó oldali) MOSFET-re is.



4-4 Kapcsolási veszteség kikapcsoláskor [saját ábra]

Az ábrán a következő jeleket láthatjuk a színükkel jelölve a skálájukat:

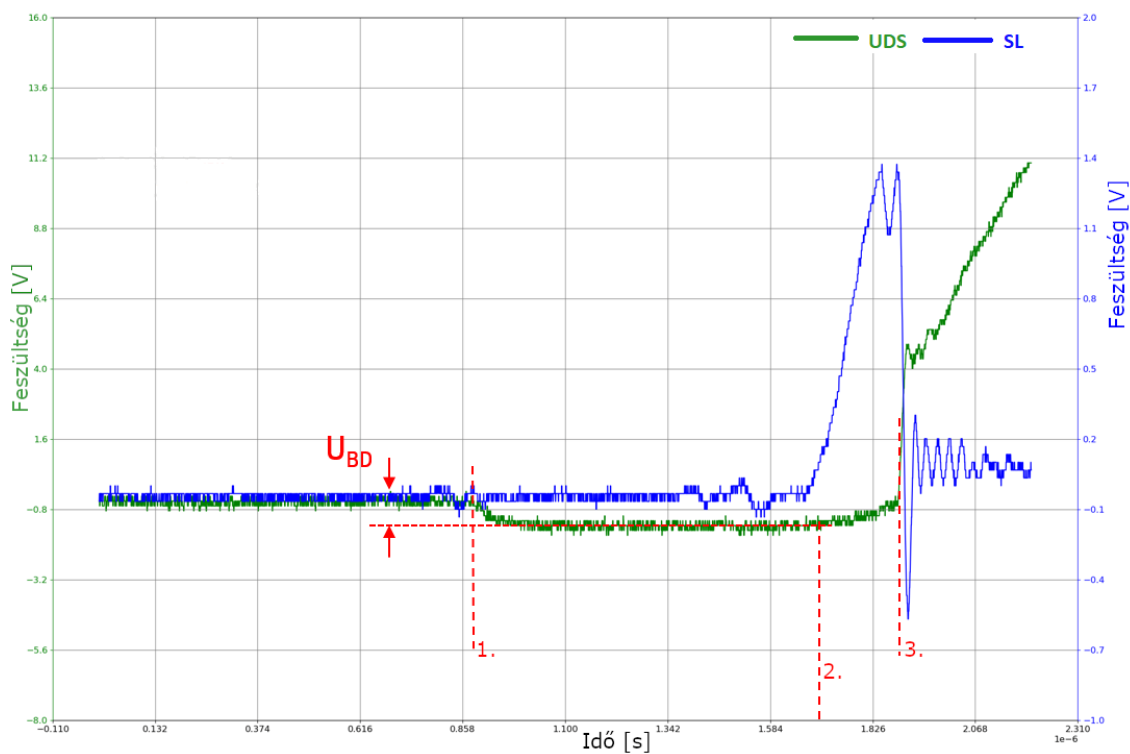
- **kék jel:** alsó oldali (low side) MOSFET feszültsége
- **zöld jel:** Drain-Source feszültsége
- **sárga jel:** Drain áram (a szkóp ábra zajossága miatt minimális szűrést alkalmaztunk, hogy jobban kivethető legyen)
- **piros jel:** a teljesítmény veszteség görbéje



4-5 Kapcsolási veszteség bekapcsoláskor [saját ábra]

Az ábrán a következő jeleket láthatjuk a színükkel jelölve a skálájukat:

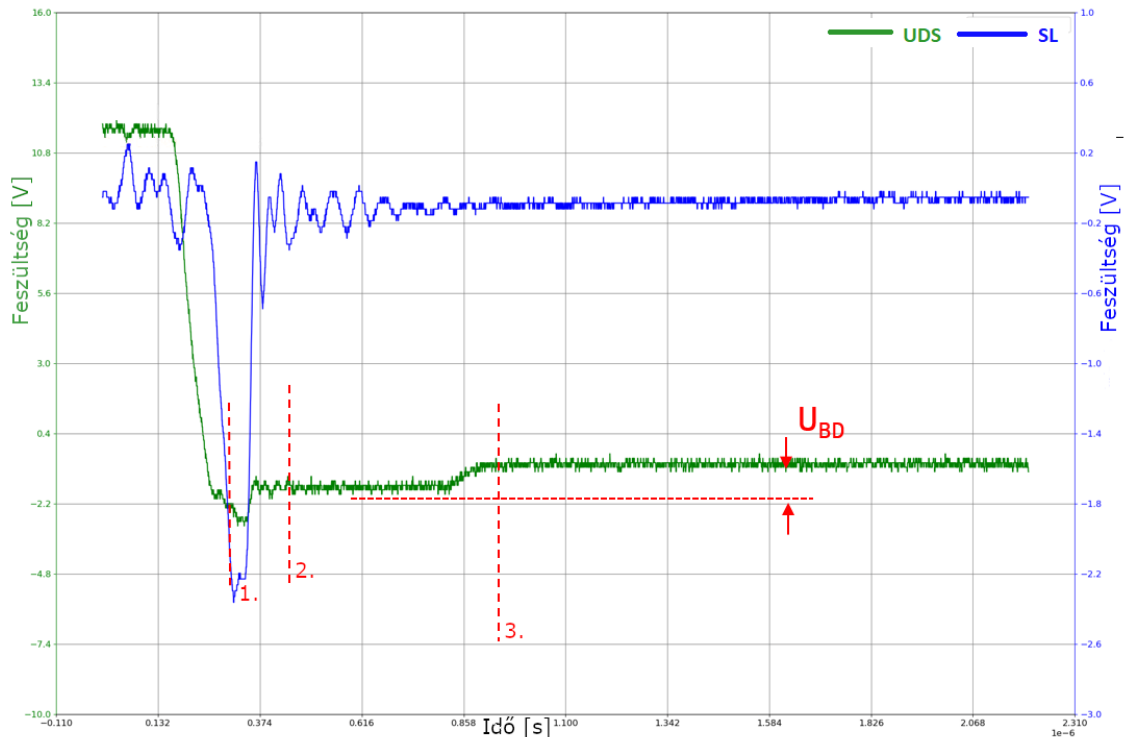
- **kék jel:** alsó oldali (low side) MOSFET feszültsége
- **zöld jel:** Drain-Source feszültsége
- **sárga jel:** Drain áram (a szkóp ábra zajossága miatt minimális szűrést alkalmaztunk, hogy jobban kivehető legyen)
- **piros jel:** a teljesítmény veszteség görbéje



4-6 Body diódás vezetés kikapcsoláskor [saját ábra]

Az ábrán a következő jeleket láthatjuk a színükkel jelölve a skálájukat:

- **kék jel:** alsó oldali (low side) MOSFET feszültsége
- **zöld jel:** Drain-Source feszültsége
- **pirossal jelölve:** a body dióda feszültsége „ U_{BD} ” jelöléssel (-0.827V); 1. számú szaggatott vonal a body dióda vezetésének kezdetét jelzi, 2. számú jelölés a body diódás vezetés végét jelöli; a 3. számú jelölésnél kezdődik az áram csökkenése



4-7 Body dióda vezetése bekapcsoláskor [saját ábra]

Az ábrán a következő jeleket láthatjuk a színükkel jelölve a skálájukat:

- **kék jel:** alsó oldali (low side) MOSFET feszültsége
- **zöld jel:** Drain-Source feszültsége
- **pirossal jelölve:** a body dióda feszültsége „ U_{BD} ” jelöléssel (-0.81V); 1. számú szaggatott vonal a body dióda vezetésének kezdetét jelzi, 2. számú jelölés a body diódás vezetés végét jelöli; 3. számú jelölésnél kezdődik az áram csökkenése

A mért és számolt értékeket felhasználva görbét illesztünk paraméterek segítségével minden feszültség és áram szinten. Például 80A tápáram és 14V tápfeszültségen tudjuk, hogy a 80A tápáram megfelel a drain áramunknak így az egyenletek a következőképpen alakulnak:

$P_{on} = (U_{Bat} - U_{corr}) \cdot I_D \cdot c_{lin} + I_D^2 \cdot c_{sq}$	10.
--	-----

ahol:

P_{on} : a bekapcsoláskor keletkező veszteség

U_{bat} : a tápáram amit rákapcsoltunk a MOSFET-ünkre

U_{corr} : a MOSFET nyitófeszültsége esetünkben 3.5V

I_D : a drain áram

C_{lin} : az áramhoz tartozó paraméter

C_{sq} : az áram négyzetéhez tartozó paraméter

Ebből az egyenletből két változót kell meghatároznunk: c_{lin} -t és c_{sq} -t. Ennek a két paraméternek a segítségével illeszthetünk görbét a mért eredményeinkre, ezzel meghatározva a bekapcsoláskor keletkezett veszteséget, angolul switching loss-t. A kikapcsolási tranzienszt hasonlóan határozhatjuk meg. A teljes veszteséget ezeket összeadva kaphatjuk meg.

A kapcsolási veszteséggel is számolva pontosabb eredményeket kaphatunk.

5. A MÉRÉSI MÓDSZER BEMUTATÁSA

A hőbecslő elkészítéséhez elengedhetetlen előzetes méréseket végezni. A veszteség mérése és számítása csak egy ezek közül, ezen kívül fontos, hogy a fentebb említett módszerrel a hőmérsékleteket is megvizsgáljuk különböző terhelések hatására illetve az elhelyezkedéseknek is fontos szerepe van, hogy tudjuk melyik komponenseink között lehet adott esetben hőkapcsolat, ezért a mérésemet hőkamerával végeztem, a terheléseket úgy választottam, hogy legyen köztük olyan amikor csak egy MOSFET-et hajtok maximális áramon, amikor váltva hajtom a MOSFET-eket illetve mikor többet is meghajtok egyszerre, így az egymás mellett lévő MOSFET-eknél látszik, ha esetleg hatással lennének egymásra.

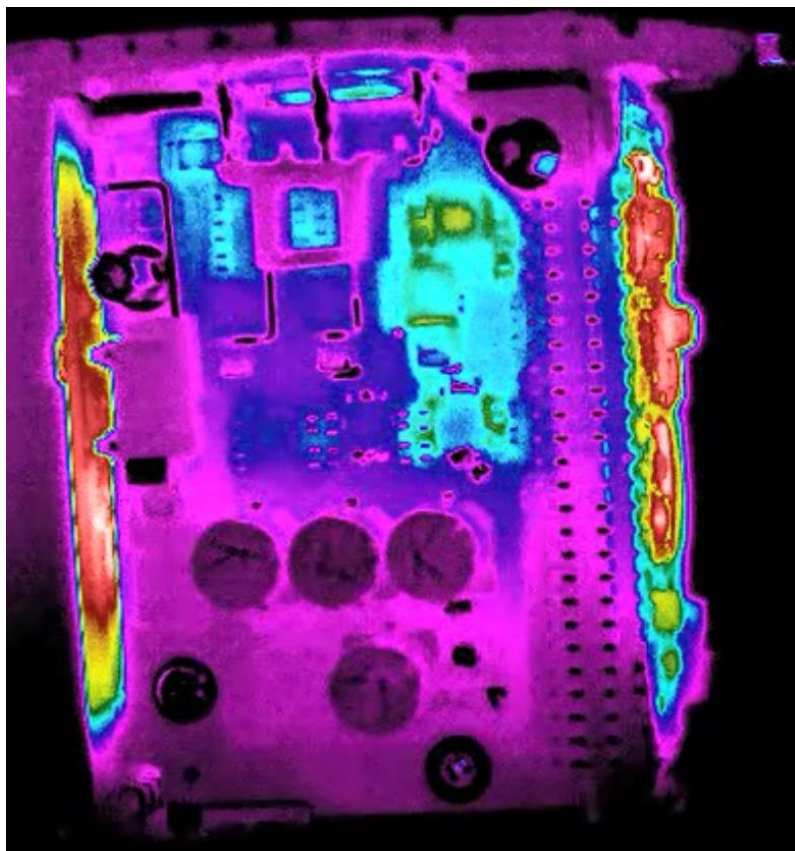
A mérés során rögzítjük a kamera képét amin látszik, hogy melyik MOSFET milyen meleg, melyek vannak egymásra hatással, rögzítjük az áramokat, feszültségeket és a szenzorunk által mért hőmérsékleteket. Ezekből az adatokból tudjuk meghatározni a lehető legpontosabb becslőhöz szükséges paramétereket.

Ha már elkészült a kamerás felvétel, akkor abból tudunk egy hőtérképet készíteni. Vannak esetek, amikor nagy módosítások látszólag nem szükségesek, de a jobb eredmény és a pontosabb becslés érdekében apróbb módosításokat eszközölünk, például egy ilyen igen fontos lépés tud lenni az, amikor az elrendezés figyelembevételével és a hőkamerás felvételünk segítségével meghatározzuk a keresztcsatolásokat. Ezeket a keresztcsatolásokat ellenállásokkal szoktuk jelölni és hővezetésként számolunk velük. Olyan helyekre érdemes keresztcsatolásokat rakni ahol két alkatrész, esetünkben két MOSFET átfűti egymást. Ez azt jelenti, hogy amikor az egyik működésbe lép annak akkora a disszipációja, hogy a másikon is megjelenik a hőmennyiség egy része és arra felé vezetődik el. A modellünkben ennek az ellenállásnak az értéke és szükségessége függ attól, hogy mennyire látszik meg a másik MOSFET melege a mellette lévőkön. Például, ha azt látom, hogy szorosan egymás mellett lévő két MOSFET-em nagyon fűtik egymást akkor oda egy kis értékű hőellenállás, később a modellbe pedig nagy értékű hővezetés fog kerülni, de ha nem lennének egymásra hatással, akkor vagy

egy nagy értékű hőellenállás kerülne oda vagy ki is hagyhatjuk. Ha kihagyjuk, akkor annyiival kevesebb értéket kell figyelembe venni és számolni; ez pozitív lehet akkor, ha a processzor futási idején akarunk spórolni. Természetesen ez minimálisan ront a becslés pontosságán.

Az általam elvégzett méréshez alkalmazott kamera egy FLIR gyártmányú A655sc hőkamera. Az általam használt hőkamera spektrum tartománya 7.5-14 μ m, képfelbontása 640 x 480 pixel. Bár alacsony felbontású, de jó pontossági osztályba sorolható a felbontása ugyanis $\pm 2^\circ\text{C}$ vagy $\pm 2\%$ pontosságú a leolvasott értékhez képest. A hőmérsékleti tartomány -40 – 150 $^\circ\text{C}$ és 100 – 650 $^\circ\text{C}$ közöttiek, alkalmazáshoz állítható. Mi a -40 – 150 $^\circ\text{C}$ tartományt használjuk ugyanis szobahőről indulva tudunk felvételt készíteni az általunk termikusan méretezendő elektronikáról. Ennek technikai okai vannak, amikre nem térnék ki részletesen (többek között az is, hogy maga a hőkamera nem bírná ki magas hőmérsékleten ha esetleg klímakamrában szeretnénk mérni vele). Ugyan ez nem egy olcsó eszköz a K szenzorhoz képest, de a pontossága miatt és a fejlesztett eszközünk biztonság kritikussága miatt szükséges, hogy minél pontosabban tudjuk majd becsülni a későbbiekben a hőmérsékleteket, amelyhez elengedhetetlen a pontos mérés készítése. A mérés alapján illesztünk majd görbét és határozzuk meg a becslőnk paramétereit. A pozíciót és a fókuszt a mérés elején beállítjuk. A fókuszt később a kamera automatikusan is tudja állítani, pár percenként automatikusan be is kalibrálja magát.

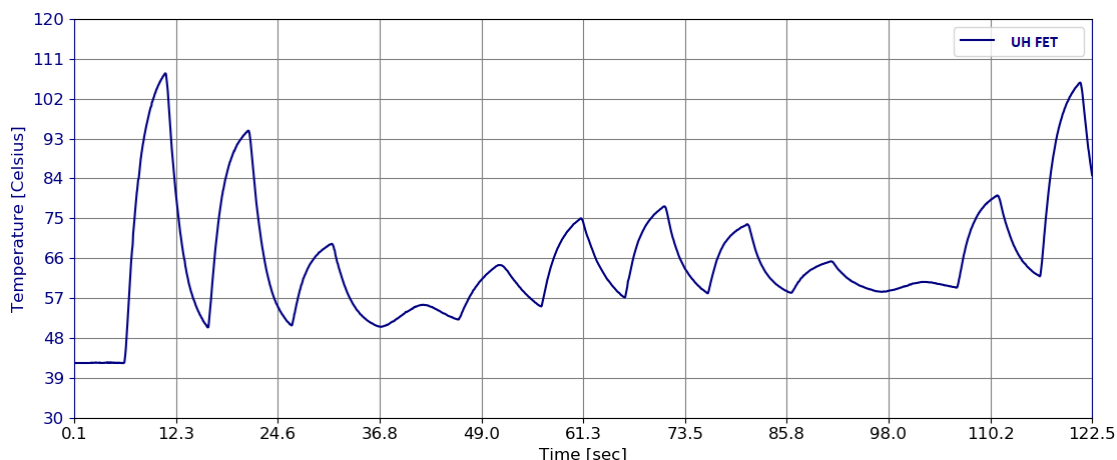
A kamerával készült videó minden egyes pixel hőmérsékletét tárolja, így a kis felbontás ellenére is nagyjából 1GiB/perc átlag méretű videó keletkezik. A kamera 50FPS-kel (frames per second – az a frekvencia amellyel az egymást követő képeket rögzíti a kamera) képes felvételt készíteni. Ebből a videóból nem csak a hőtérképet tudjuk elkészíteni, hanem ki tudjuk nyerni a hőmérsékleti adatokat, melyeket ezek után „.csv” formátumban mentünk el, hogy könnyebb legyen feldolgozni. Az adatok kinyerését úgy végezzük, hogy a felvételen megkeressük azt a pillanatot, amikor a legjobban látszanak a MOSFET-ek és ezekre kijelölünk munkaterületeket. A munkaterületeken a maximum hőmérsékletet fogjuk figyelembe venni minden időpillanatban.



5-1 A hőkamera által készített videóból egy részlet

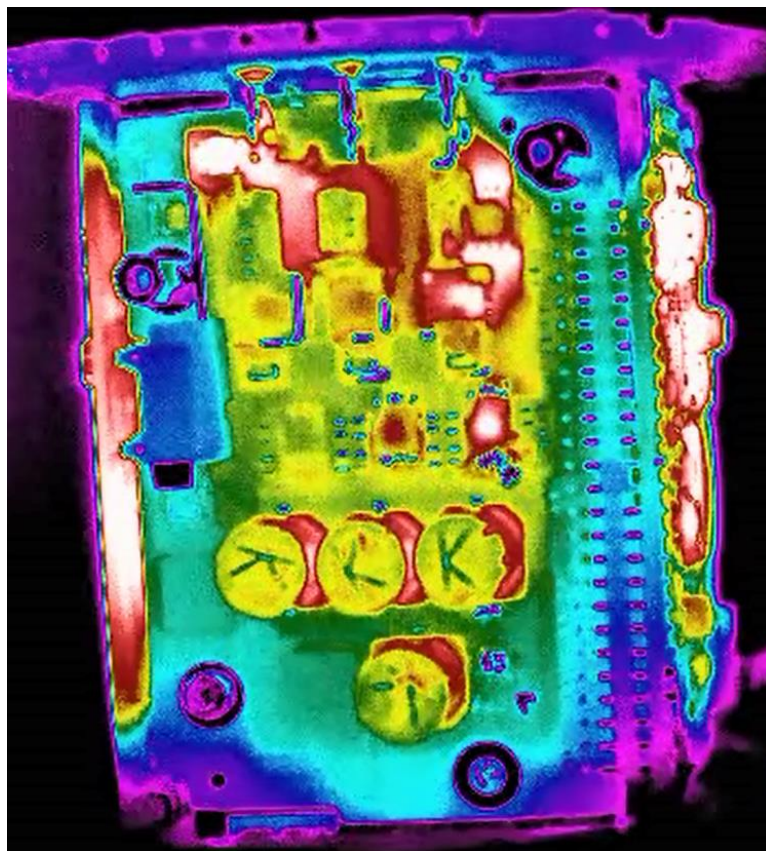
Az 5-1. képen még éppen csak elindított eszközt láthatunk, még nem melegedett be. Ezen még nem sok mindent látni, így a MOSFET-ek helyzetének meghatározása is nehézkes. Egy későbbi, melegebb pillanatot szoktunk választani a munkaterületek kijelöléséhez ahol jobban kirajzolódnak a MOSFET-ek. További előnye a kamerás mérésnek, hogy igénytől függően még a tervezési fázisban megfigyelhetjük a NYÁK (nyomtatott áramkör vagy angolul PCB; printed circuit board) közelében az alkatrészek lábánál mennyire jelentős a hőmérsékletnövekedés, ugyanis mint minden elemnek a NYÁK-nak is van egy maximális hőmérséklete, amit nem ajánlott átlépni, ha a hosszútávú működést szeretnénk garantálni; ezt a hőmérsékletet üvegesedési hőmérsékletnek hívjuk. Az üvegesedési hőmérséklet azt jelenti, hogy az anyag szilárdsága elkezd csökkenni, ha ezt elérjük a NYÁK-unk használhatatlanná válik.

Ebből kapunk majd minden egyes MOSFET-ünkre egy hőmérséklet görbét amelyre elkezdhetjük a becslónket illeszteni.



5-2 hőkamera által mért hőmérsékleti görbe [saját ábra]

A görbe illesztést python szkript segítségével végezzük, így nem nekünk kell minden ponton végig menni egyesével, hanem a szkript megkeresi a legoptimálisabb paramétereket nekünk, amikből kiindulhatunk. Természetesen a szkriptnek is szüksége van egy kiindulási pontra, hogy körülbelül milyen tartományban keressen, ha ezt rosszul adjuk meg könnyen a végtelenbe tud futni. Ha jól sikerült a becslő, akkor a kritikus szakaszokban ahol melegszik és eléri a csúcst akkor pár fokkal felülbecsül és a hűlést is jól leköveti. Itt fontos megjegyezni, hogy a hűlési időszak nem számít kritikusnak viszont a tapasztalatok azt mutatták, hogy túl sok fölösleges plusz folyamat a MOSFET-eken az ablaknyitási folyamat (így szerettük volna pontosabban mérni a maghőmérsékletet, nem tapasztaltunk jelentős eltérést és megállapíthatjuk, hogy a mérésünket mindenképpen meghamisítjuk azzal is valamelyest, ha ablakot nyitunk mert eltávolítunk egy jelentős hűtőfelületet, ha pedig a tokot mérjük az egyértelműen nem a maghőmérséklet) ezért a becslőnket úgy terveztem, hogy 10 °C –os maximális felül becslést engedtem meg és 5°C –os alul becslést, de alulbecsülni csak a hűlési szakaszban megengedett.

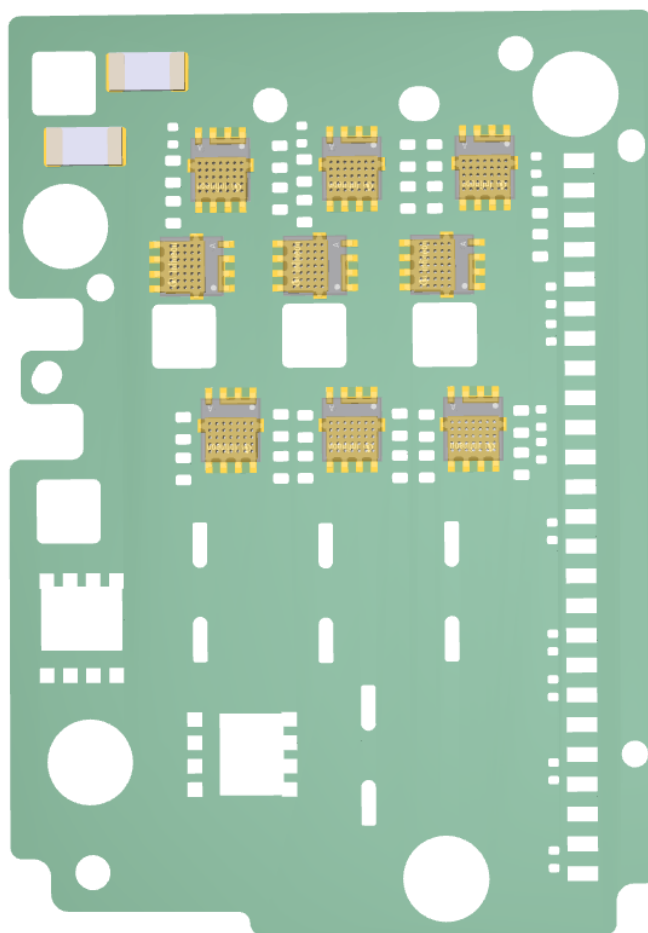


5-3 FET-ek helyzetének meghatározása a kamerás kép alapján [saját ábra]

A fentebbi ábrán a kék részek 25°C körüliek míg a piros-fehér részek amelyek a melegebb részeket jelölik azok 30 - 35°C körül vannak.

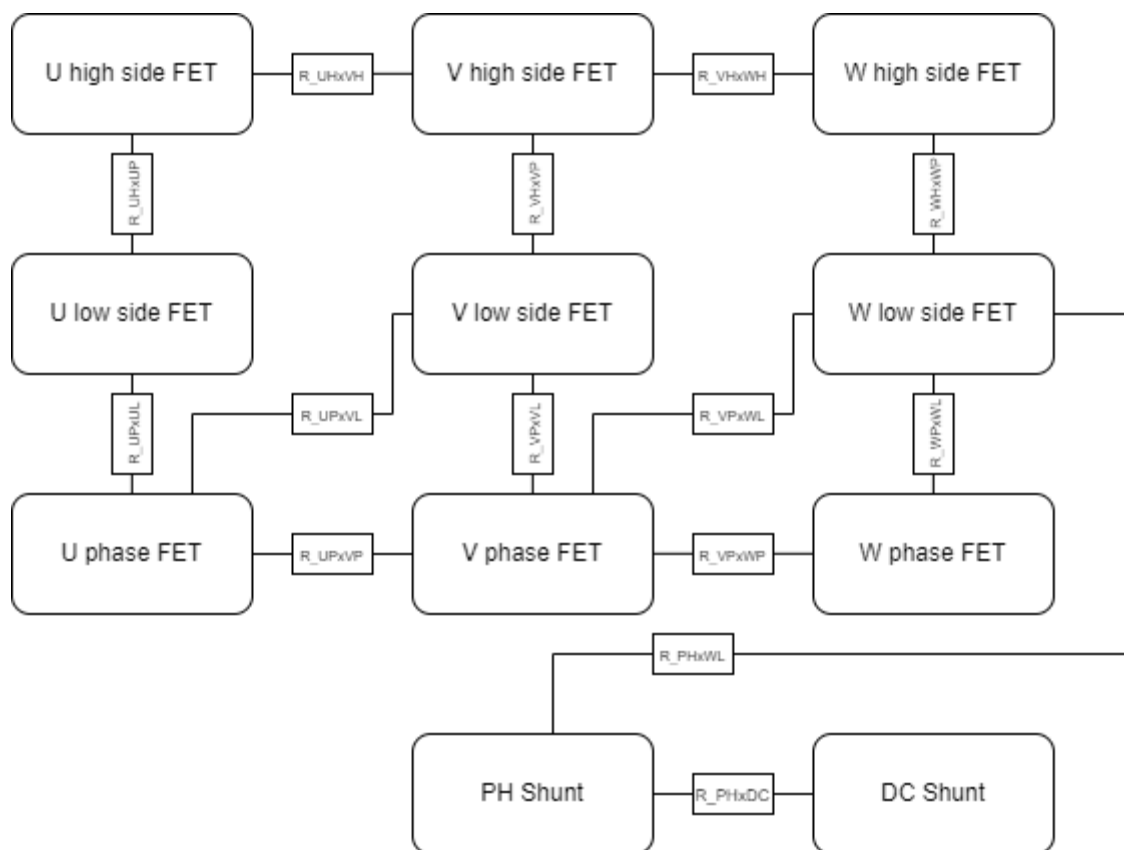
5.1. Az elrendezés és ez alapján a modell bemutatása

Ebben az alfejezetben bemutatásra kerül az eredeti modellünk és a becsült elemek fizikai elrendezése. Írásom során igyekszem a lehető legrészletesebben kitérni minden olyan pontra, amelyet figyelembe kell vennünk a tervezési és tesztelési fázis során, illetve a következő alfejezetben kitérek majd arra is, hogyan döntöttük el azt, hogy melyek a mindenképp szükséges változtatások egy új modell esetén.



5-4 A képen látható panelen a MOSFET-ek elhelyezkedését és a két sönt ellenállásunkat ábrázoltam. A fentről lefelé, jobbról balra haladva a következőket látjuk: bal felső sarokban a DC söntnek és a fázis söntnek nevezett ellenállásokat látjuk, azt a MOSFET-eknél a felső sorban a low-side MOSFET-eket látjuk, középen a fázis MOSFET-eket majd a high-side MOSFET-eket U, V, W sorrendben.

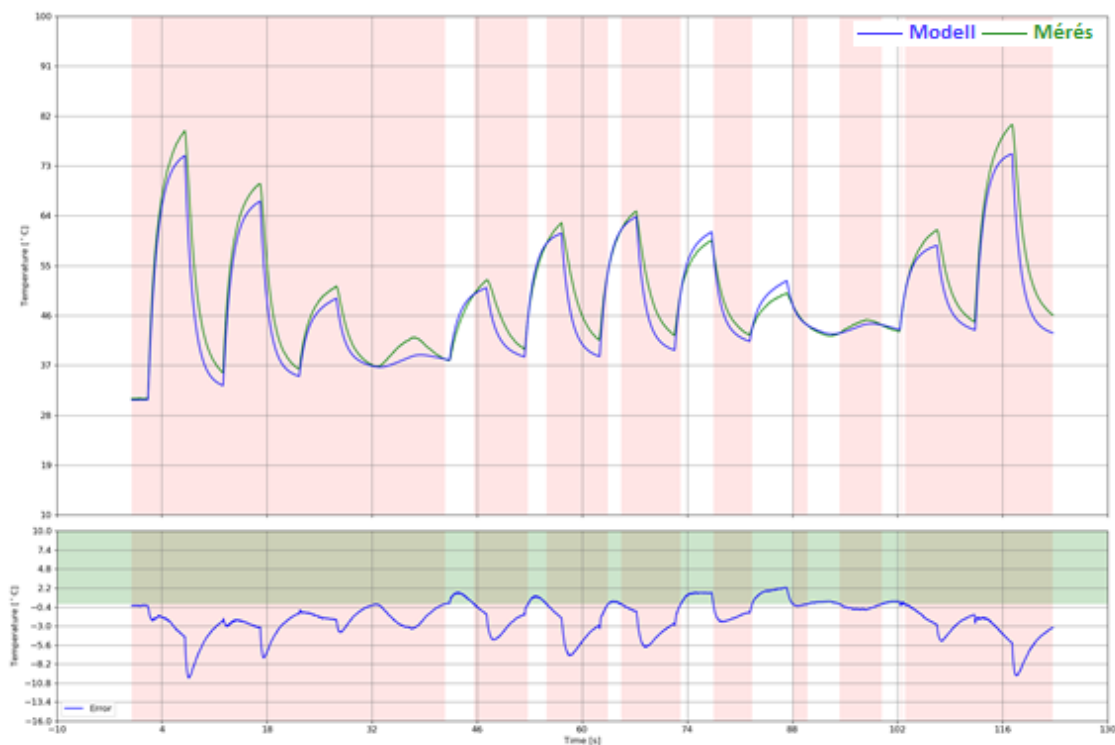
A fentebb látható ábrán, ahogy már említettem láthatjuk a MOSFET-ek elhelyezkedését, amelyhez készítettem egy blokkvázlat szerű rajzot is, később pedig bemutatom azt is, hogy a kamerán mit látunk pontosan. Ezeket összevetve tudjuk melyik MOSFET-ünk hol helyezkedik el. A videó alapján a keresztcsatolásokat is be tudjuk rajzolni. A következő képen bemutatom milyen keresztcsatolásokat használtunk az eredeti modellünkben.



5-5 Keresztcsatolások elhelyezkedése, első modell [saját ábra]

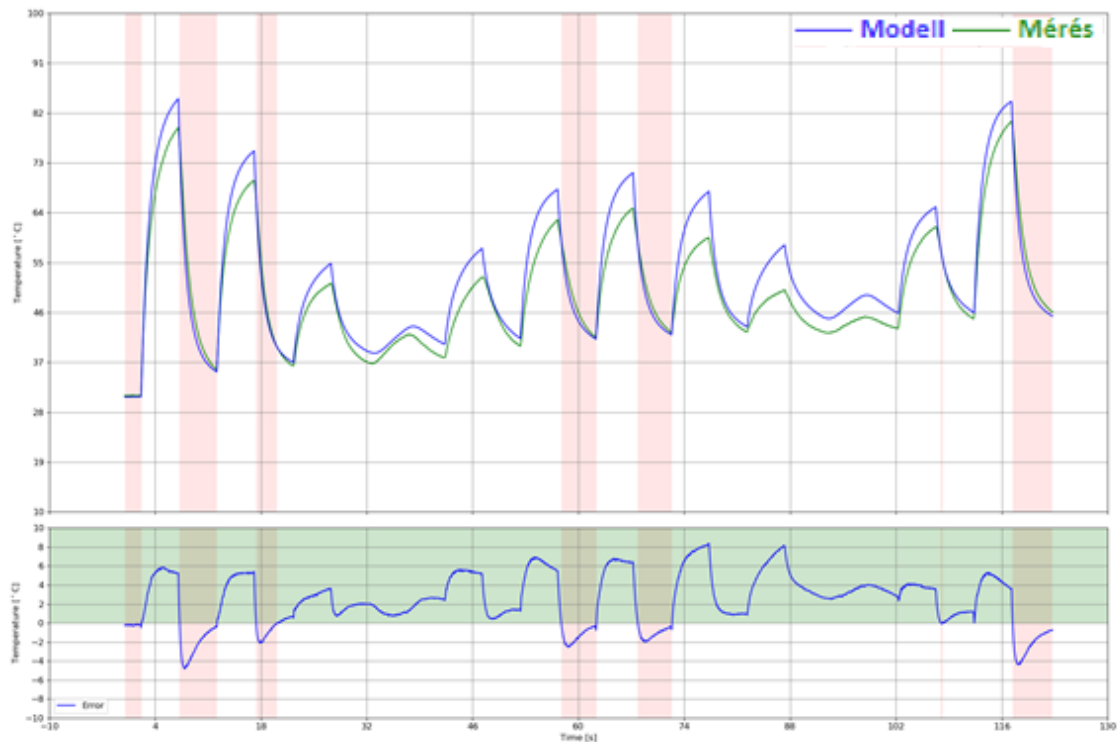
Ezen az ábrán látjuk behúzva az összes keresztcsatolást, amelyet az első modellünkben felhasználok a becselő készítéséhez. Minden MOSFET-hez és sönthöz tartozik egy rövidített név, közöttük az „x” jelöli, hogy keresztcsatolásról van szó, az elején az „R_” pedig, hogy ezt ellenállással jelöljük (a későbbiekben pedig vezetésekkkel számolunk). Csak azokra a helyekre kerültek be keresztcsatolások ahol elengedhetetlen a használatuk. Ezt úgy határoztuk meg, hogy az első görbe illesztés során kihagytunk minden keresztcsatolást és az így keletkezett görbéket vizsgáltuk. A kamera által mért hőmérsékleti adatokból készített görbéhez képest így láthattuk, hogy hol van többlet melegedés ahhoz képest, amit a mi becselőnk számolt; ezután megnéztük, hogy az adott

pillanatban mi melegíthette azt a MOSFET-et amelyet terheltünk. Hogy mekkora hőellenállásra van szükség az attól függ mennyire vannak hatással egymásra. Ha két MOSFET nagyon közel van egymáshoz, esetleg egy tracken vannak akkor nagy az esélye annak, hogy szoros hőkapcsolatba kerülnek, tehát ha az egyik terhelés hatására melegedni kezd annak a hőnek egy jó része a másik MOSFET-re is hatással lesz.



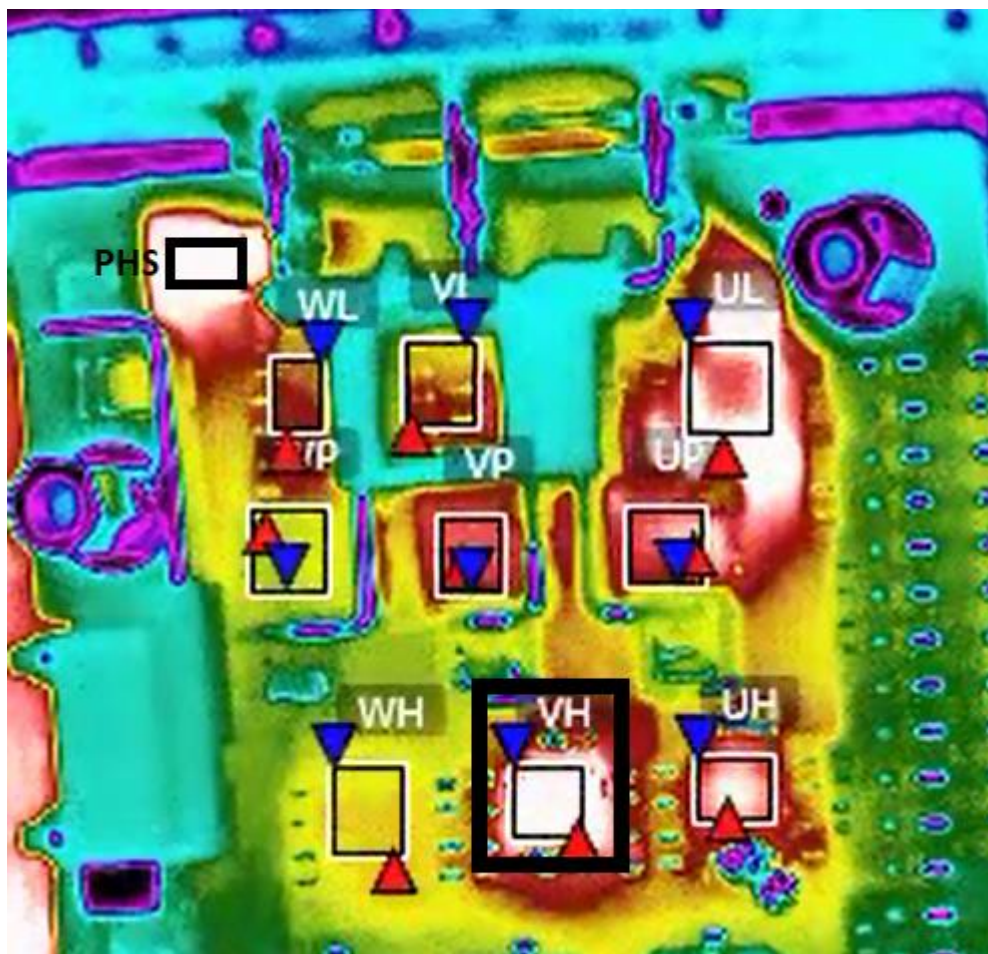
5-6 A python szkript által generált kép; a zöld görbe a mért hőmérsékletet mutatja, a kék görbe a modellem által számolt hőmérséklet az idő függvényében; az alsó kék görbe pedig a kettő különbségét mutatja [saját ábra]

A fentebbi ábrán, ahol az egyik fázisunk high side MOSFET-jét emeltem ki (késsel modellünk által becsült hőmérsékletet, zölddel a kamera által mért hőmérsékletet láthatjuk illetve alatta egy hiba függvény ami 0-10°C között nézi az eltérést) jól látszik, hogy még nem tökéletesek a paramétereink; még valamelyik alkatrészszel hőkapcsolatban lehet, ugyanis látunk olyan plusz melegedéseket amiket a modellünk nem tartalmaz illetve további paraméter hangolás szükséges vagy új tartományt kell megadnunk mert nagyon alábecsül a becslőnk ami túlmelegedéshez vezethet. Az elkészült videót felhasználva meg tudjuk állapítani, hogy melyik alkatrészünk melegíti még ezt a MOSFET-et és tudjuk javítani a becslő pontosságát egy keresztcsatolás behúzásával.



5-7 Egy használható formája már a becslőnek itt látszik hogy már nem becsül alul, minden keresztcsatolást megtaláltunk; zölddel a mérés hőmérséklet görbáját késsel a modell hőmérséklet görbáját láthatjuk, az alsó ábrában pedig a kettő különbsége látható, akárcsak az előző ábránkon (5-5-ös ábra) [saját ábra]

5-6 ábránkon látszódik, hogy megfelelő paraméterezéssel elérhetjük a kívánt pontosságú becslőt. Jelen ábrán a lényeg az volt, hogy a csúcsok, ahol a legmelegebbet mértük 4-5 °C-os felülbecsléssel rendelkezzenek, míg a hűlési időszakban az sem gond, ha 5°C-kal alá becsülünk, ott kisebb az esélye annak, hogy elmelegedik, illetve jól követi a melegedési és hűlési dinamikát, ami szintén nagyon fontos.



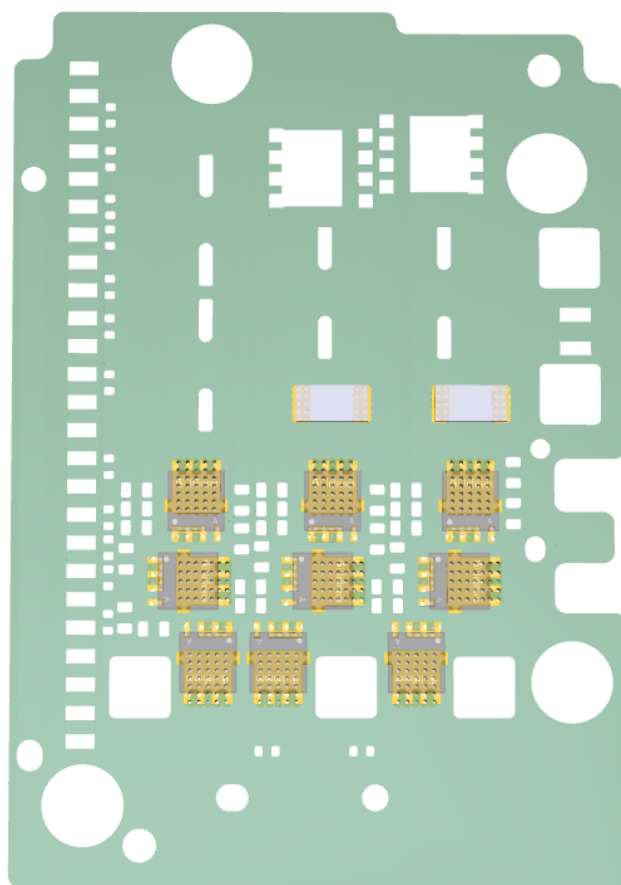
5-8 Ezen az ábrán az alsó sor középső MOSFET-jét nézzük (vastag fekete kerettel jelölve), jól látszik hogyan melegszik a 'V' fázisunk high side MOSFET-je a speciális terhelésünk hatására.

A piros-fehér területek a legmelegebbek (itt körülbelül 40°C-osak), a hidegebb területek körülötte a kékes-zöldes részek körülbelül 30°C-osak. [saját ábra]

A fentebbi 5-8 ábrán a fehér terület még csak 40°C fok körüli, míg a környezete 25-30°C. Nagyobb vagy hosszabb ideig kifejtett terhelés hatására elérhetjük a 25-30°C-os hőmérsékletváltozást is. Ezért is fontos, hogy mind jellegében mind dinamikájában képes legyen a becslónk lekövetni a melegedést. Fentebbi ábránkon azt is megfigyelhetjük, hogy a bal felső sarokban 'PHS' jelöléssel ellátott fázis söntünk is melegszik. Ennek az az oka, hogy az összes bejövő áram (jelenleg ez 60A körüli érték) a fázis söntön keresztül folyik.

5.2. Az új modell és elrendezés bemutatása

Ebben az alfejezetben bemutatásra kerül az új modellünk és a becsült elemek fizikai elrendezése. Mint azt már korábban is említettem a fizikai elrendezés nagyban befolyásolja, hogy melyik alkatrész melyiket fűtheti, amelyek közelebb vannak egymáshoz azok valószínűleg jobban átadják egymásnak a disszipált hőmérsékletet.

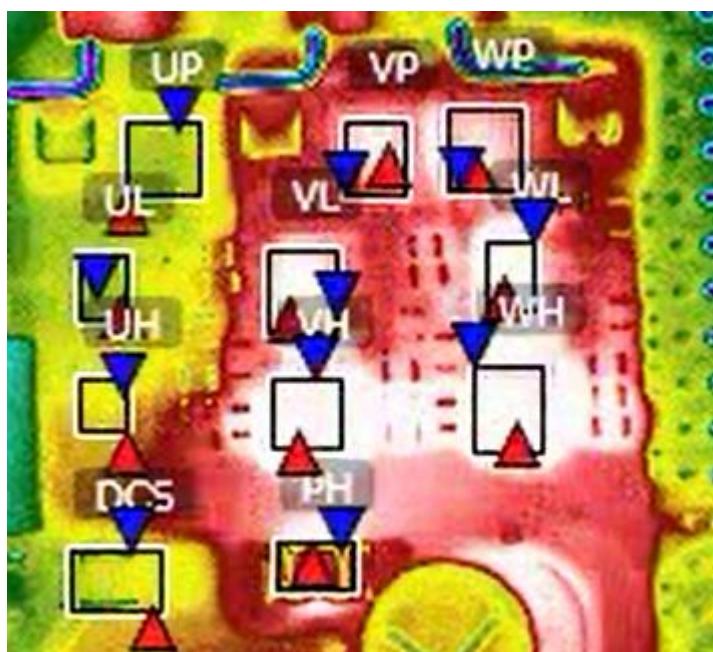


5-9 A fentebbi képen láthatjuk az új fizikai elrendezését az alkatrészeknek.

Fentről lefelé haladva: A fázis és a DC söntünk, high-side MOSFET-ek, low-side MOSFET-ek és a fázis MOSFET-ek W, V és U sorrendben jobbról balra nézve. Az alább látható képen pedig a modell a szükséges keresztcsatolásokkal együtt látható, amelybe beletartozik a fázis és DC söntök modellje is, ugyanis az elhelyezkedésük miatt beleszólnak a MOSFET-ek melegedésébe.

Az ábrákból jól látszanak a jelentős módosítások: U és V fázisok helyet cseréltek, a fázis MOSFET-ek középről alulra kerültek a csatlakozók mellé, a sönt ellenállásaink be

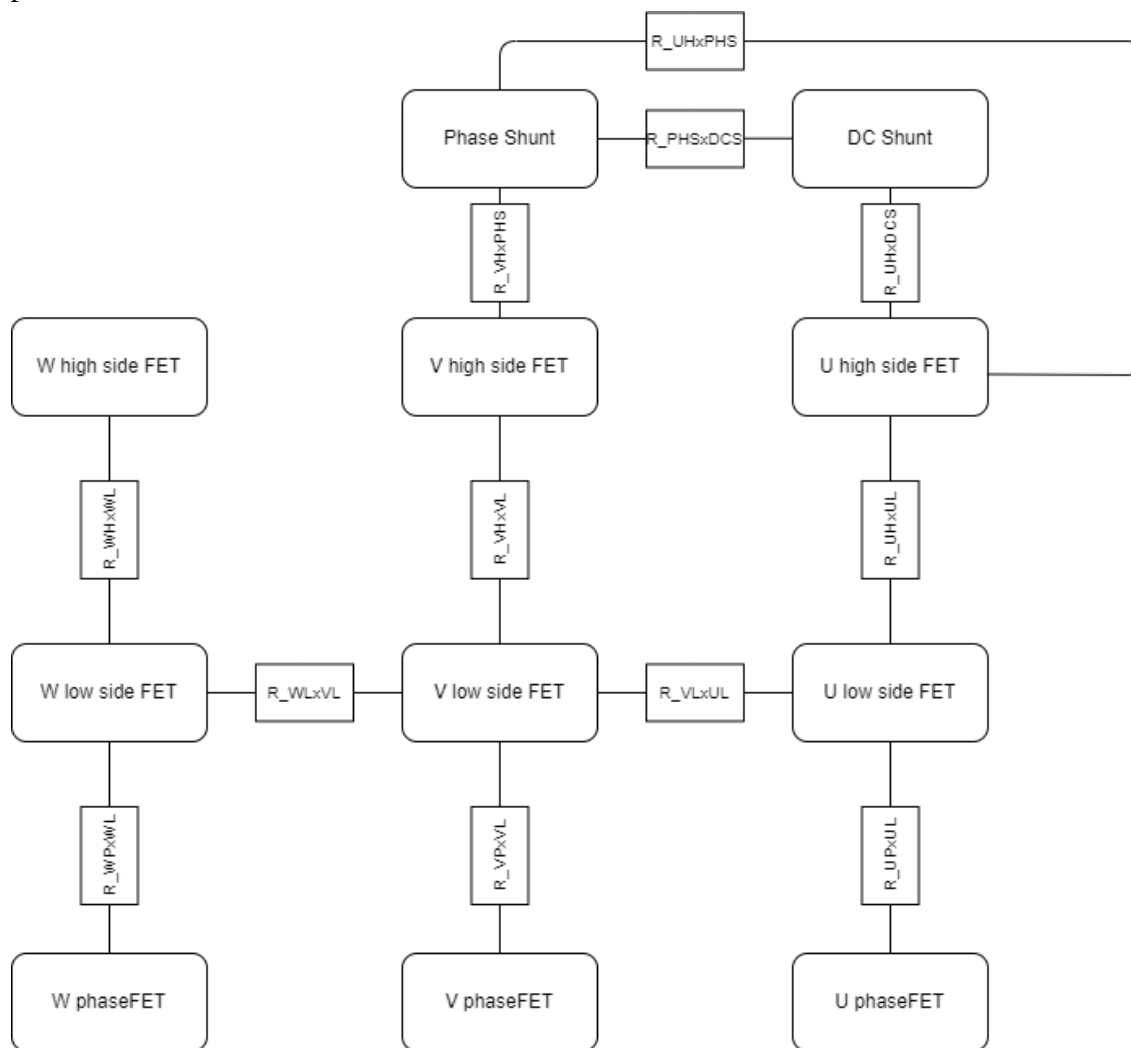
kerültek a NYÁK közepére. Új mérésekre volt szükség ahhoz, hogy megállapíthassuk mennyire és miket változtassunk meg a modellen. A MOSFET-ek ugyanazok a típusok maradtak ezért a kiindulási alapunk megvan; vagyis a két tárolós MOSFET modelleket fel tudjuk használni illetve a veszteségek az első méréseinkből ismertek voltak így ezeket a paramétereket is újra fel lehet használni. Lényegében az új keresztcsatolások megállapítása következett. Új kamerás felvételek készültek az új mintáról és a felvételek alapján elkezdhetjük összenézni melyik alkatrész mikor melegszik terhelés hatására és mikor fordul elő azaz eset, hogy csak egy a közelében lévő másik alkatrész melegíti.



5-10 Ezen az ábrán terhelés hatására melegednek a MOSFET-ek (jobb oldali két oszlop MOSFET-jei, V, W jelölésű fázisok) [saját ábra]

Az új paraméterek meghatározása hasonlóképpen zajlott az előzőekhez, a görbe illesztési módszer felhasználásával. Kezdeti paramétereknek használjuk kiindulásként az előző modellhez tartozó paramétereket, a keresztcsatolások figyelembevétele nélkül. Az így kapott görbét és a videót együttesen vizsgálva minden MOSFET-re egyesével szükséges végig próbálgatni, hogy ha beillesztünk egy keresztcsatolást az mit fog eredményezni. Ha javított rajta és a vele csatolásban lévő MOSFET-nek a becsült hőmérsékletén sem rontott, akkor benne hagyhatjuk illetve a későbbiekben eldönthető az is, hogy mennyire van nagy szükségünk arra a keresztcsatolásra. A szkriptnek egy

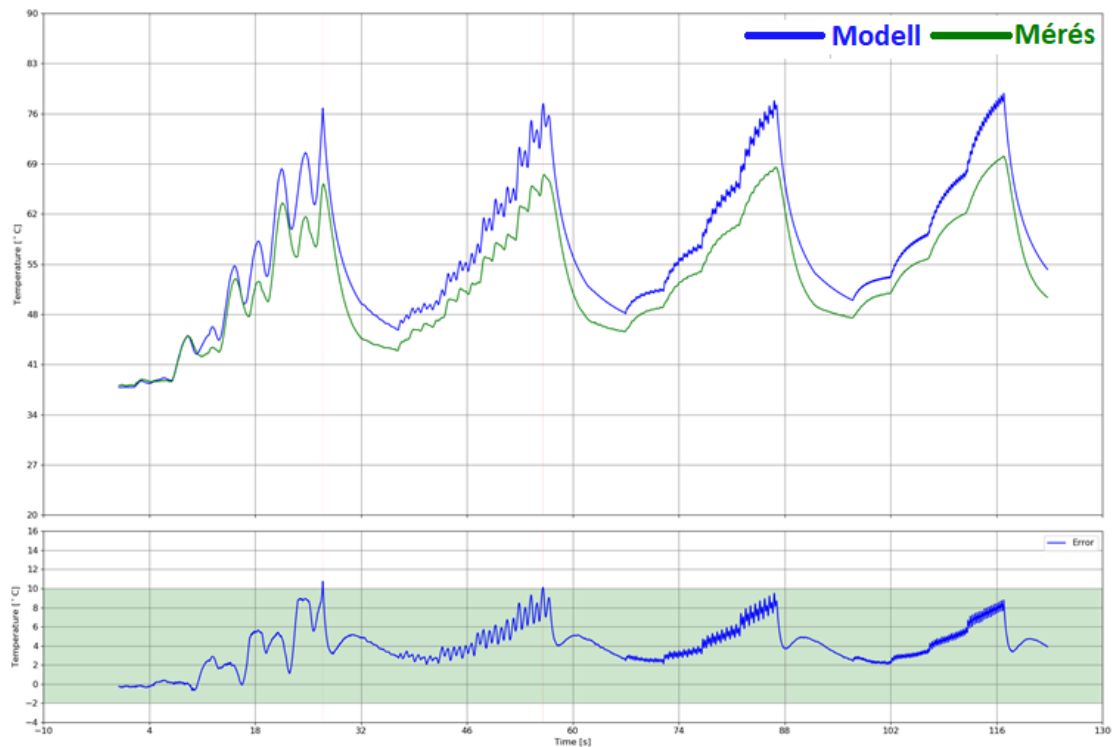
intervallumra van szüksége, ami alapján képes optimalizálni az eddigi eredményeinket. Amelyik MOSFET-nek sikerült a megfelelőnek tűnő paramétereket megadni és az optimalizáló sem talált jobbat azt beállíthatjuk állandó értéknek. Ha az optimalizáló szkript a lehető legjobb paraméter szettet előkészítette akkor még kézzel is állíthatunk a paramétereken.



5-11 Ezen az ábrán látható, hogy a modellben melyik alkatrész melyikkel van hőtani kapcsolatban. Itt csak a legszükségesebb keresztcsatolásokat raktam bele, így is rengeteg egyenletet kell majd a szoftverünknek kiszámolni. [saját ábra]

Amikor az identifikáció (mérések és számítások során a paraméterek és algoritmusok meghatározása) megtörtént ezek az adatok a szoftverbe implementálásra kerültek és amint megkaptuk elkezdhetjük a validációt, amely azt jelenti, hogy összehasonlító

méréseket végzünk különböző, a vevő által előírt terhelésekre. Ezeknek a méréseknek már a hőkamera csak ellenőrző jelleggel volt a része; a kamerás méréssel tudjuk összehasonlítani a szoftver által számolt értékeket. Az összehasonlítás után, ha szükséges további paraméter módosítást végzünk, majd újabb validációt végzünk a friss paraméter szettel.



5-12 Az új modellel és paraméter szettel készült hőmérsékletet ábrázoló görbék [saját ábra]

6. ÖSSZEFOGLALÓ

A dolgozatom megírása során részletesen ismertettem az autóiparban használatos MOSFET-ek hőmérsékletének becslési módszereit, ezáltal részletesen megismertem a hőmérsékleti módszereket és azok alkalmazásait. A szervó rendszerek fejezetben kitértem a szervó rendszerek átfogó ismertetésére. A megoldandó problémát a vonatkozó szabványok és a lehetőségeinkhez mérten megvizsgáltam, majd megoldásokat kerestem. Kutatásaim során a hőmérsékletmérési módszereket vizsgáltam részletesen. Két féle becslésre használt módszer közül választottam a számunkra optimálisabb módszert. Végig vezettem a szükséges előkészületekhez tartozó lépéseket. Megvizsgáltam a nyomtatott áramkörü panelon lévő MOSFET-ek elhelyezkedését. A MOSFET-ek pozíciójától függően megalkottam a modell blokkvázlatát. Ismertettem a szükséges számítási módszereket, majd bemutattam a mérési módszert két féle elrendezésen keresztül. Második elrendezéshez megalkottam az új modellt a kiszabott szempontok szerint. A paraméterezés után elvégeztem a szükséges validációkat. Az általam tervezett modellel és az általam meghatározott paraméterekkel működő szoftverek sorozatgyártásban lévő elektromos vezérlőegységeken futnak.

7. Abstract

During the writing of my dissertation I described in detail the temperature estimation methods of MOSFETs used in the automotive industry, thus I got to know in detail the temperature methods and their applications. In the chapter on servo systems, I have covered a comprehensive description of servo systems. I examined the problem to be solved according to the relevant standards and our possibilities, and then I looked for solutions. In the course of my research, I examined the temperature measurement methods in detail. I chose the more optimal method for us from two methods used for estimation. I went through the steps to make the necessary preparations. I examined the location of the MOSFETs on the printed circuit board. Depending on the position of the MOSFETs, I created a block diagram of the model. I described the necessary calculation methods and then presented the measurement method through two different model. For the second model, I created the new model according to the prescribed criteria. After parameterization, I performed the necessary validations. The software that works with the model I designed and the parameters I define runs on mass-produced electrical control units.

8. HIVATKOZÁSOK

1. 6.20. ábra Elektrohidraulikus fogasléces szervokormány.
https://mogi.bme.hu/TAMOP/futomu_rendszerek_mechatronikaja/ch06.html
2. https://www.autozone.com/suspension-steering-tire-and-wheel/rack-pinion/p/endurance-rack-pinion-64624e/1129088_0_0
3. Temperature characteristics of resistance thermal sensor
https://www.hk.koaglobal.com/sitecore/content/KOA_Global/japan/Home/product/library/sensor/basic
4. Géczy Attila (2017.12.06.), Szenzorok alkalmazásokban – termikus érzékelők és alkalmazásaik,
https://www.ett.bme.hu/download/szenzorok_termikus_upgrade
5. <https://www.rapitasystems.com/blog/whats-difference-between-sil-and-dal-how-does-it-affect-my-code-coverage>
6. https://mogi.bme.hu/TAMOP/kozuti_jarmurendszerek_szerkezettana/ch11.html
7. Infineon Technologies (2020 április 14., V1.2), Transient thermal measurements and thermal equivalent circuit models, https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Thermal_equivalent_circuit_models-ApplicationNotes-v01_02-EN.pdf?fileId=db3a30431a5c32f2011aa65358394dd2
8. Infineon Technologies (2020 május 15., V2.7), BSC014N04LS MOSFET OptiMOSTM Power-MOSFET,40V ,<https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/n-channel/bsc014n04ls/>

9. ÁBRAJEGYZÉK

2-1 Elektrohidraulikus fogasléces szervokormány [1.].....	3
2-2 A képen látható egy teljes EPAS rendszer kormányoszloppal, elektronikával [2.].....	4
3-1 NTC-PTC-Platina pontossága különböző hőmérsékleteken [3]	7
3-2 A hőelemek típusai [4.].....	8
4-1 Hőmérséklet függvényében a FET-ek teljesítménye és árama [8.].....	10
4-2 Foster modell negyedrendű megvalósítása [saját ábra]	12
4-3 Cauer modell másodrendű megvalósítása	13
4-4 Kapcsolási veszteség kikapcsoláskor [saját ábra].....	16
4-5 Kapcsolási veszteség bekapcsoláskor [saját ábra]	17
4-6 Body diódás vezetés kikapcsoláskor [saját ábra]	18
4-7 Body dióda vezetése bekapcsoláskor [saját ábra].....	19
5-1 A hőkamera által készített videóból egy részlet.....	23
5-2 hőkamera által mért hőmérsékleti görbe [saját ábra]	24
5-3 FET-ek helyzetének meghatározása a kamerás kép alapján [saját ábra]	25
5-4 A képen látható panelen a MOSFET-ek elhelyezkedését és a két sönt ellenállásunkat ábrázoltam. A fentről lefelé, jobbról balra haladva a következőket látjuk: bal felső sarokban a DC söntnek és a fázis söntnek nevezett ellenállásokat látjuk, azt a MOSFET-eknél a felső sorban a low-side MOSFET-eket látjuk, középen a fázis MOSFET-eket majd a high-side MOSFET-eket U, V, W sorrendben.....	26
5-5 Keresztcsatolások elhelyezkedése, első modell [saját ábra].....	27
5-6 A python szkript által generált kép; a zöld görbe a mért hőmérsékletet mutatja, a kék görbe a modellem által számolt hőmérséklet az idő függvényében; az alsó kék görbe pedig a kettő különbségét mutatja [saját ábra].....	28
5-7 Egy használható formája már a becslőnek itt látszik hogy már nem becsül alul, minden keresztcsatolást megtaláltunk; zölddel a mérés hőmérséklet görbáját kékkel a modell hőmérséklet görbáját láthatjuk, az alsó ábrában pedig a kettő különbsége látható, akárcsak az előző ábránkon (5-5-ös ábra) [saját ábra]	29
5-8 Ezen az ábrán az alsó sor középső MOSFET-jét nézzük (vastag fekete kerettel jelölve), jól látszik hogyan melegszik a 'V' fázisunk high side MOSFET-je a speciális terhelésünk hatására. A piros-fehér területek a legmelegebbek (itt körülbelül 40°C-osak), a hidegebb területek körülötte a kékes-zöldes részek körülbelül 30°C-osak. [saját ábra].....	30
5-9 A fentebbi képen láthatjuk az új fizikai elrendezését az alkatrészeknek.	31
5-10 Ezen az ábrán terhelés hatására melegednek a MOSFET-ek (jobb oldali két oszlop MOSFET-jei, V, W jelölésű fázisok) [saját ábra]	32
5-11 Ezen az ábrán látható, hogy a modellben melyik alkatrész melyikkel van hőtani kapcsolatban. Itt csak a legszükségesebb keresztcsatolásokat raktam bele, így is rengeteg egyenletet kell majd a szoftverünknek kiszámolni. [saját ábra]	33
5-12 Az új modellel és paraméter szettel készült hőmérsékletet ábrázoló görbék [saját ábra] ...	34