

# DC MOTOR POZÍCIÓSZABÁLYOZÓ RENDSZER FEJLESZTÉSE LABVIEW ALAPÚ FELHASZNÁLÓI FELÜLETTEL

---

## RAZVOJ SISTEMA ZA POZICIONU REGULACIJU DC MOTORA SA LABVIEW INTERFEJSOM

---

## DEVELOPMENT OF A DC MOTOR POSITION CONTROL SYSTEM WITH A LABVIEW-BASED USER INTERFACE

---

Hallgató

NAGY RICHÁRD  
25223020

Mentor

MR. PÓTH MIKLÓS

Szabadka, 2025

## **Absztrakt**

Ebben a munkában egy egyenáramú (DC) motor pozíciószabályozására alkalmas beágyazott platform fejlesztése és megvalósítása került bemutatásra. A rendszer alapját egy ESP32-S3 mikrovezérlő képezi, amely FreeRTOS valós idejű operációs rendszer alatt futtatja a szabályozási algoritmust. A motor meghajtásáról egy DRV8876 H-híd meghajtó IC gondoskodik, míg a pozíció-visszacsatolást egy 1024 PPR felbontású inkrementális enkóder biztosítja. A szabályozás magját egy diszkrét idejű PID algoritmus adja, amelyet mozgásprofil-generátor (trapéz- és S-görbe), elakadás-detektor, beállítás-érzékelő, lágy pozíciókorlát és drift-figyelő egészít ki. A platform USB CDC soros interfészen keresztül kommunikál a felügyeleti rendszerrel, lehetővé téve a célpozíció beállítását, a PID paraméterek valós idejű hangolását, valamint a motor állapotának folyamatos visszajelzését. A moduláris, rétegzett firmware-architektúra és a hardverabsztrakciós interfészek révén a rendszer alkalmas oktatási, kutatási és prototípus-fejlesztés célokra egyaránt, mivel lehetővé teszi különböző szabályozási stratégiák és paraméterek hatékony vizsgálatát valós hardverkörnyezetben.

### **Kulcsszavak:**

DC motor, PID szabályzó, pozíciószabályozás, ESP32-S3, DRV8876, beágyazott rendszer, FreeRTOS, mozgásprofil, kvadratúra enkóder

## Tartalom

Absztrakt.....	2
Tartalom .....	3
Jelmagyarázat.....	4
Köszönetnyilvánítás.....	5
1. Bevezető.....	6
2. DC Motor És Enkóder Működése.....	7
2.1. DC Motor Működése .....	7
2.2. H-Híd Kapcsolás .....	7
2.3. DC motor matematikai modellje .....	8
2.4. Enkóder Működése.....	11
3. PID Irányítás.....	15
3.1. PID felépítése.....	15
3.2. Valós PID irányítás .....	16

## Jelmagyarázat

Jel/Rövidítés	Értelmezés
DC	Egyenáramú motor (angolul: Direct Current motor)
PID	Proporcionális-Integráló-Deriváló szabályzó (angolul: Proportional-Integral-Derivative controller)
Fuzzy	Fuzzy logikán alapuló szabályzó (Fuzzy Logic Controller)
PPR	Impulzus per fordulat, az enkóder felbontása (Pulses Per Revolution)
PWM	Impulzusszélesség-moduláció, motorvezérlésre használt jel (Pulse Width Modulation)
H-híd	Motorirányváltó teljesítménykapcsolás (angolul: H-Bridge)

## **Köszönetnyilvánítás**

Szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik támogatásukkal hozzájárultak ennek a projektnek a megvalósításához. Külön köszönöm Mr. Póth Miklós-nak a szakmai útmutatást és a hasznos tanácsokat, amelyek nagyban segítettek a munkám fejlődését. Hálával tartozom a családomnak is, akik folyamatosan biztattak és biztosították a szükséges háttérrel a projekt elkészítéséhez. Támogatásuk nélkül ez a munka nem jöhetett volna létre.

## 1. Bevezető

A modern ipari automatizálás és robotika fejlődésével az irányítástechnikai rendszerek egyre fontosabb szerepet töltenek be a mérnöki gyakorlatban. A pontos pozicionálás, sebesség- és nyomatékszabályozás elengedhetetlen követelménye számos alkalmazásnak, legyen szó akár egy ipari robotkar mozgatásáról, egy CNC megmunkológép szerszámvezetéséről, vagy egy elektromos jármű hajtásláncának vezérléséről. Ezen feladatok megoldásában kulcsszerepet játszanak az egyenáramú (DC) motorok, amelyek egyszerű felépítésük, könnyen szabályozható jellemzőik és széles körű elérhetőségük miatt az ipar egyik leggyakrabban alkalmazott hajtástípusává váltak.

Az irányítástechnika területén számos szabályozási módszer áll rendelkezésre a kívánt rendszerviselkedés elérésére. A klasszikus megközelítések közül kiemelkedik a PID (Proporcionális-Integráló-Deriváló) szabályozó, amely matematikailag jól megalapozott, könnyen hangolható és robusztus működést biztosít. A PID szabályozók évtizedek óta bizonyítják hatékonyságukat az ipari környezetben, és ma is a legszélesebb körben alkalmazott visszacsatolt irányítási megoldásnak számítanak.

A szabályozó algoritmus hatékony működése azonban önmagában nem elegendő – annak valós hardveren történő megvalósítása és a teljes rendszer integrációja legalább olyan fontos mérnöki feladat. Egy beágyazott motor szabályzó platform tervezése és fejlesztése magában foglalja a megfelelő mikrovezérlő kiválasztását, a motorhajtó fokozat kialakítását, a visszacsatoló szenzor illesztését, a valós idejű szoftverarchitektúra megtervezését, valamint a felügyeleti kommunikáció megvalósítását. Ezek együttese határozza meg, hogy az elméleti szabályozási teljesítmény a gyakorlatban is realizálható-e.

Jelen projekt célja egy DC motor pozíciószabályozására alkalmas beágyazott platform tervezése és megvalósítása. A rendszer egy ESP32-S3 mikrovezérlőre épül, amely FreeRTOS valós idejű operációs rendszer alatt futtatja a diszkrét idejű PID szabályozó algoritmust. A motor meghajtásáról DRV8876 H-híd meghajtó IC gondoskodik, a pozíció-visszacsatolást pedig egy 1024 PPR felbontású inkrementális kvadrátúra enkóder biztosítja. A szabályozó algoritmust mozgásprofil-generátor, elakadás-detektor, beállítás-érzékelő és lágy pozíciókorlát egészíti ki, amelyek együttesen megbízható és biztonságos működést nyújtanak. A platform USB soros interfészen keresztül kommunikál a felügyeleti rendszerrel, lehetővé téve a célpozíció beállítását, a PID paraméterek valós idejű hangolását és a motor állapotának folyamatos megfigyelését.

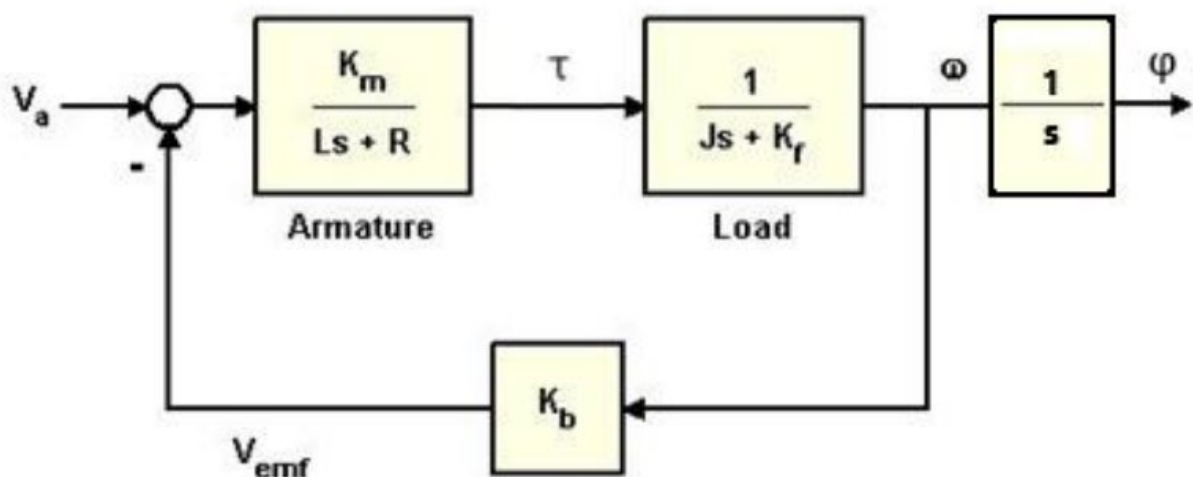
A kidolgozott rendszer oktatási és prototípus-fejlesztési célokat egyaránt szolgál. Moduláris felépítésének és hardverabsztrakciós rétegeinek köszönhetően alkalmas különböző szabályozási stratégiák és paraméterezések hatékony vizsgálatára és összehasonlítására valós hardverkörnyezetben, ami az elméleti ismeretek gyakorlati alkalmazásának mélyebb megértését segíti elő.

## 2. DC Motor És Enkóder Működése

### 2.1 DC Motor Működése

Az egyenáramú (DC) motor az egyik legelterjedtebb villamos hajtás, amelyet egyszerű felépítése és könnyű szabályozhatósága miatt széles körben alkalmaznak ipari és fogyasztói berendezésekben. A DC motor működése az elektromágneses indukción alapul: a rotor és a stator mágneses terének kölcsönhatása hozza létre a forgómozgást. A forgórészen elhelyezett armatúratekercsekben folyó áram mágneses mezőt hoz létre, miközben a kommutátor folyamatosan megfordítja az áram irányát, így biztosítva a rotor folyamatos forgását.

A DC motorok fontos előnye, hogy sebességük és forgásirányuk egyszerűen szabályozható. A fordulatszám a motorra jutó átlagos feszültség módosításával állítható – gyakorlati megvalósításban ez pulzusszélesség-modulációval (PWM) történik. A forgásirány a tápfeszültség polaritásának megfordításával változtatható. A precíz vezérléshez motorvezérlő áramkörre van szükség, amely a motoráramot és a kapocsfeszültséget a kívánt üzemi paraméterekhez igazítja.



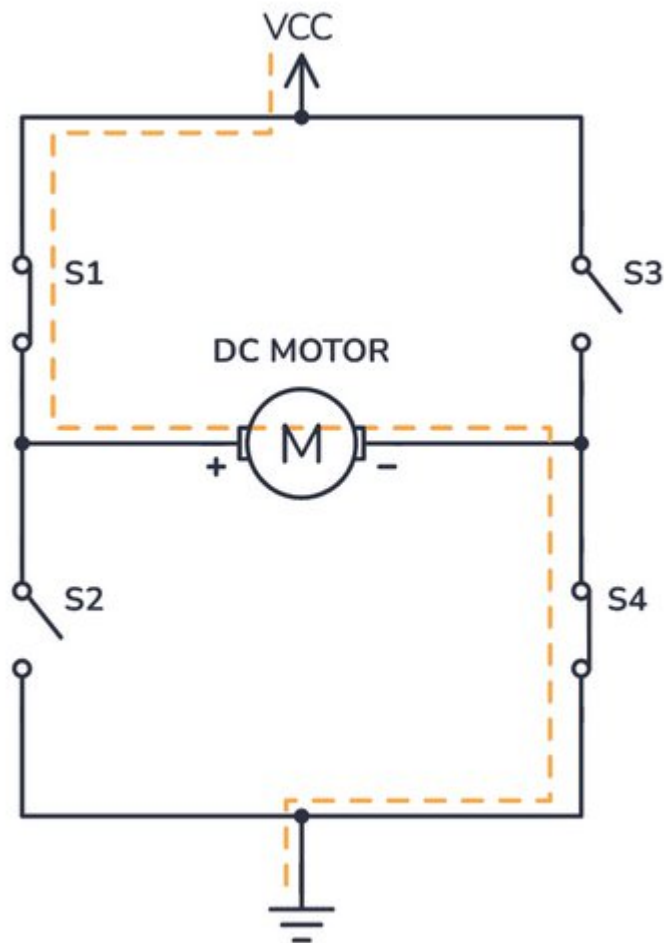
1. Ábra: DC Motor Általános Modellje

### 2.2 H-Híd Kapcsolás

A DC motorok irányításának egyik legelterjedtebb módja a H-híd (H-Bridge) áramkör. A kapcsolás négy félvezető elemből – általában tranzisztorokból vagy MOSFET-ekből – épül fel, amelyek H-alakú elrendezésben helyezkednek el. A H-híd működése az áramirány megfordításán alapul: a megfelelő két átlós kapcsoló bekapcsolásával a motoron átfolyó áram iránya megváltozik, így a forgásirány szabályozható.

Ha az egyik diagonális kapcsolópárt aktiváljuk, a motor az óramutató járásával megegyező irányba forog; a másik diagonális pár bekapcsolásával pedig az ellentétes irányba. A két felső vagy két alsó kapcsoló egyidejű bekapcsolása tilos, mert rövidzárat okozna a táp felé.

A motor fordulatszáma pulzusszélesség-modulációval (PWM) szabályozható: a kitöltési tényező módosításával az átlagos feszültség változik, így a motor sebessége finoman állítható.



2. Ábra: H-híd kapcsolás

### 2.3 DC motor matematikai modellje

A szimulációban a DC motor viselkedését differenciálegyenletekkel írjuk le, amelyek az elektromos és mechanikai alrendszert modellezzik.

$$H(s) = \frac{\Phi(s)}{V_{app}(s)} = \frac{K_m}{s[(Js + K_f)(Ls + R) + K_b K_m]}$$

$v_{app}(t)$  – kapocsfeszültség

$\tau(t)$  – forgató nyomaték.

$i(t)$  – a forgórész árama

$\omega(t)$  – A forgórész szögsebessége.

$L$  – a forgórész induktivitása

$K_f$  – súrlódási együttható.

$R$  – a forgórész ellenállása

$J$  – tehetetlenségi nyomaték

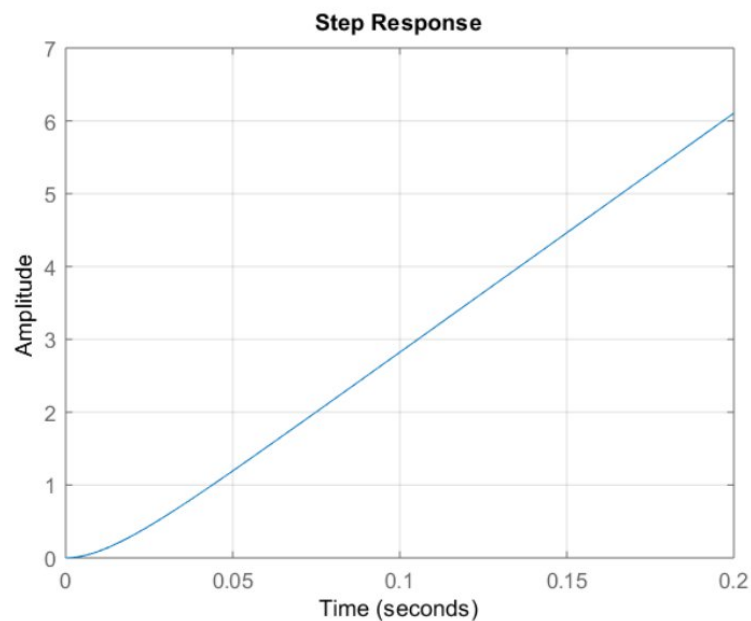
$K_b$  – elektromos állandó

$K_m$  – motorállandó



### Rendszer Matlab Szimulációja

```
s = tf('s');  
J=3.2E-6;  
Kf=3.5E-6;  
Km=0.03;  
Kb=Km;  
R=4; L=3E-6;  
H1 = tf(Km,[L R]);  
H2 = tf(1,[J Kf]);  
P_motor = Km/(s*((J*s+Kf)*(L*s+R)+Km*Kb));  
step(P_motor,0.2)  
grid;
```



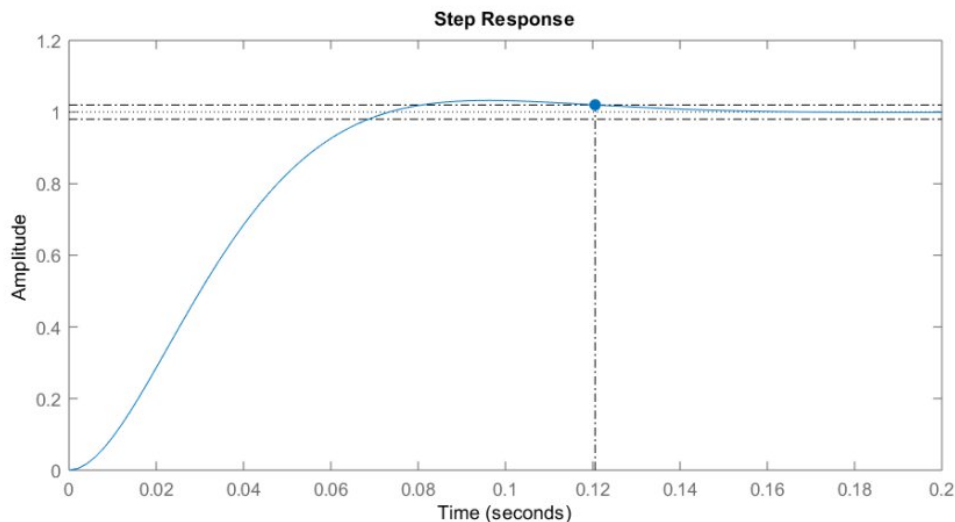
3 Ábra: DC motor rendszer szimulációja

Mivel a rendszer integráló jellegű, nem stabil, egységugrásra adott válasza egy folyamatosan növekvő értékű jel, mely összhangban van azzal, hogyha egy egyenáramú motorra egy fix feszültséget kapcsolunk, a tengely elfordulási szöge folyamatosan nőni fog.

### Mereven Vissza csatolt rendszer

```
sys_cl = feedback(P_motor,1)
```

```
step(sys_cl,0.2)
```



4. Ábra: DC motor vissza csatolt rendszer szimulációja

damp(sys_cl)			
Pole	Damping	Frequency (rad/seconds)	Time Constant (seconds)
-3.57e+01 + 3.27e+01i	7.37e-01	4.84e+01	2.80e-02
-3.57e+01 - 3.27e+01i	7.37e-01	4.84e+01	2.80e-02
-1.33e+06	1.00e+00	1.33e+06	7.50e-07

5. Ábra: Rendszer tulajdonságai

A zárt rendszer egy domináns komplex konjugált gyökpárral rendelkezik, melyek időállandója 28 ms, illetve egy nagyon gyors, nagyon kicsi (0.75 us) időállandójú valós gyökkel.

## 2.4 Enkóder Működése

A rotációs enkóder a tengely szögelfordulását digitális impulzusjelekké alakítja. Működése optikai vagy mágneses érzékelésen alapul: a forgó réselt (vagy mágnesesen jelölt) tárcsa elhaladásakor minden jelölés egy impulzust hoz létre. Az enkóder felbontását a PPR (pulses per revolution) érték adja meg. Egy 1000 PPR-es inkrementális enkóder  $0,36^\circ/\text{impulzus}$  szögfelbontást biztosít, amely négyszerezett számlálással (A és B csatorna fel- és lefutó élei) akár  $0,09^\circ$ -ra is finomítható.

A folytonos szög diszkrét impulzusokká történő alakítása kvantálási hibát eredményez, amely tipikusan  $\pm 0,5$  impulzusnyi. Az A és B fázisjelek  $90^\circ$ -os fázistolása lehetővé teszi a forgásirány meghatározását. Az enkóder jelei pozíció-visszacsatolásként szolgálnak, így zárt hurkú szabályozás valósítható meg.

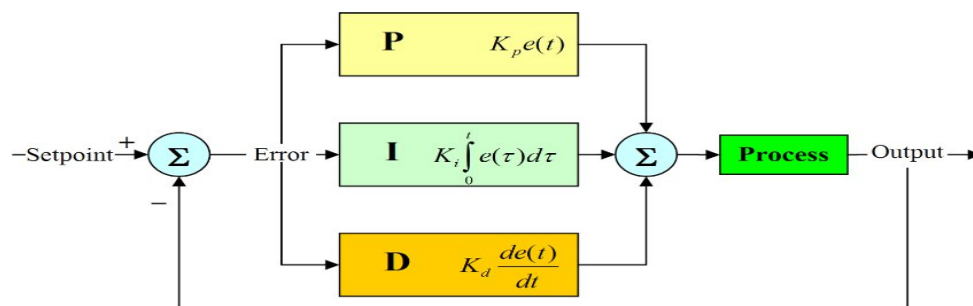


6. Ábra: DC Motor felszerelt enkóderrel

### 3. PID Irányítás

A PID (Proporcionális-Integráló-Deriváló) szabályozó az iparban az egyik legelterjedtebb visszacsatolt irányítási algoritmus. Egyszerű matematikai felépítése ellenére rendkívül hatékony eszköz a dinamikus rendszerek viselkedésének befolyásolására és stabilizálására. A DC motorok szabályozásában a PID algoritmust gyakran alkalmazzák a pozíció, a sebesség vagy a nyomaték pontos beállítására, mivel képes kompenzálni a rendszer hibáit, külső zavarásait és nemlinearitásait.

#### 3.1 PID felépítése



7 Ábra. – PID Szabályzó általános modelje

#### Proporcionális (P) tag:

A proporcionális tag a pillanatnyi hibával arányos beavatkozást hoz létre: minél nagyobb a hiba, annál nagyobb a kimeneti jel. A P tag gyors reakciót biztosít és javítja a rendszer dinamikáját, azonban önmagában nem képes a maradó hiba teljes megszüntetésére. Túl nagy erősítés esetén a szabályozott rendszer instabillá válhat, és oszcilláció léphet fel.

#### Integráló (I) tag:

Az integráló tag a hiba időbeli összegét veszi figyelembe. Fő szerepe a tartós, kis hibák (maradó hiba) eltüntetése, amelyeket a P tag nem képes önmagában kompenzálni. Hátránya, hogy túl nagy integráló erősség a rendszer lassúvá válását, túllendülést és akár instabilitást is okozhat.

#### Deriváló (D) tag:

A deriváló tag a hiba változási sebességére reagál, vagyis a hiba deriváltját használja a beavatkozás meghatározásához. A D tag kvázi „előrejelzi” a rendszer várható viselkedését, csökkenti a túllendülést és növeli a stabilitást. Ugyanakkor érzékeny a mérési zajra, ami hamis vagy ugráló derivált értékeket eredményezhet, ezért gyakran szűréssel együtt alkalmazzák.

#### Teljes PID egyenlet

A három tag összegzésével kapjuk a beavatkozójelet:

$$u_{PID}(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

**PID Átviteli függvénye:**

$$C_{PID}(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s = A_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = \frac{A_p}{T_i} \frac{T_i T_d s^2 + T_i s + 1}{s}$$

### 3.2 Valós PID irányítás

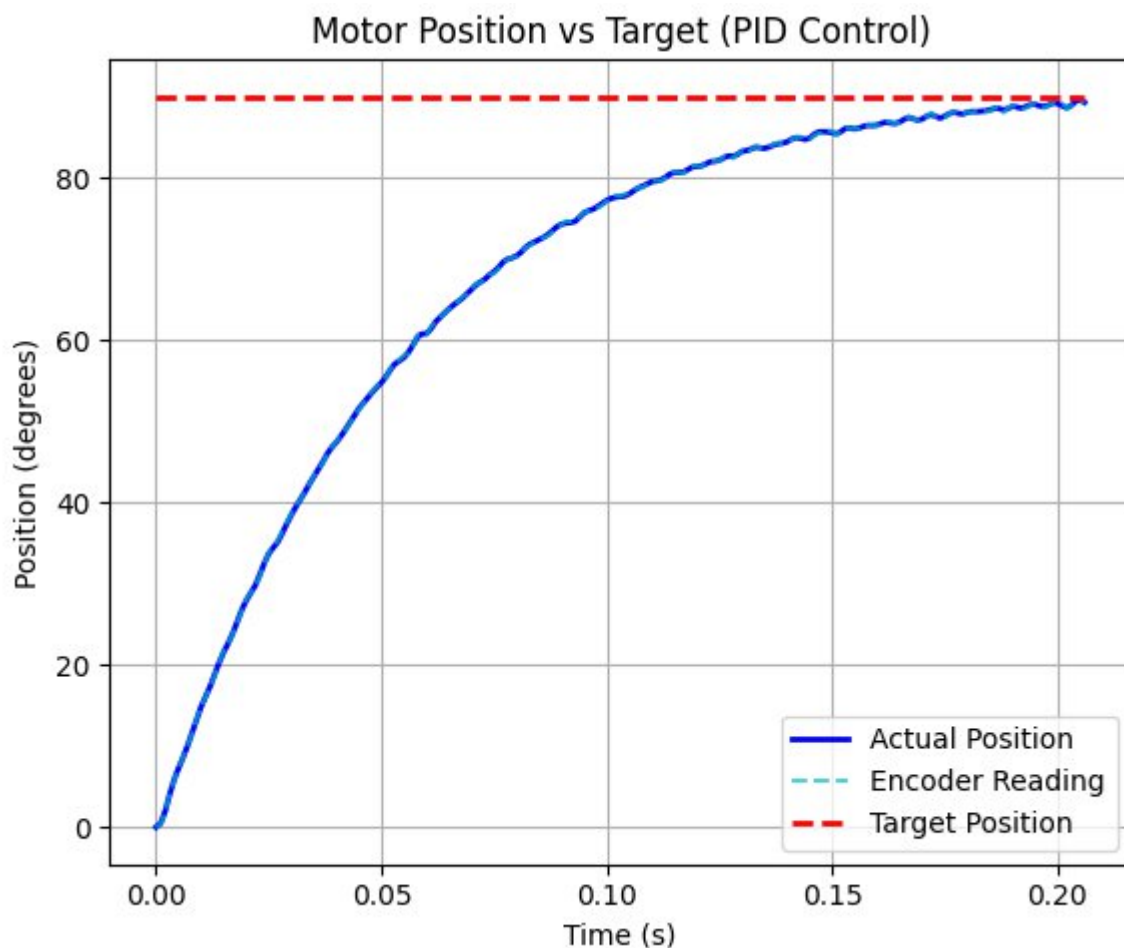
Az ideális PID szabályozó nem realizálható, a valós vagy közelítő PID szabályozóba egy plusz pólust kell beiktatnunk T időállandóval.

**Valós PID megvalósítás**

$$\hat{C}_{PID}(s) = A_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{Ts + 1} \right) = \frac{A_p}{T_i} \frac{T_i (T_d + T) s^2 + (T_i + T) s + 1}{s(Ts + 1)}$$

$$T = \frac{T_d}{N}$$

ahol N a pólusát helyezési arány.



8 Ábra. – PID Szabályzó ki menete aperiodikus jel esetén

## 4. Rendszer hardveres felépítése

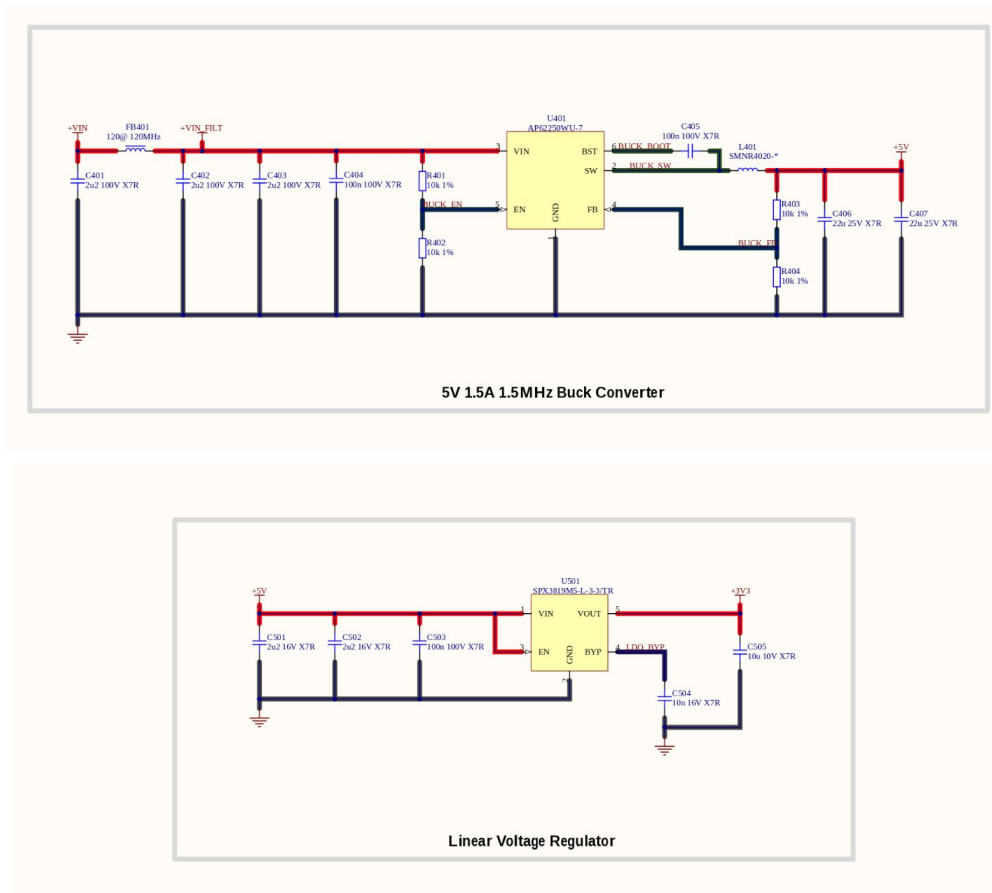
A rendszer hardverének tervezése Altium Designer környezetben történt. A PCB felépítése a következő főbb jellemzőkkel rendelkezik:

### 4.1 Tápellátás

A PCB 10–18V közötti bemeneti feszültséget fogad. A tápellátás kétlépcsős felépítésű: az első fokozatban egy Diodes Incorporated AP62250WU-7 szinkron buck konverter a bemeneti feszültségből 5V-ot állít elő, legfeljebb 1,5A terheléssel, 1,5 MHz-es kapcsolási frekvencia mellett. Az integrált szinkron kapcsolóelemekkülső diódát nem igényelnek, a magas kapcsolási frekvencia pedig kompakt szűrőelemek alkalmazását teszi lehetővé. Az IC TSOT-26 tokozásban kerül beépítésre. Az 5V-os sín táplálja a DRV8876 motorhajtó IC logikai részét és az USB interfészt.

A második fokozatban egy MaxLinear SPX3819M5-L-3-3 alacsony zajszintű LDO stabilizátor az 5V-os sínből 3,3V-os tápfeszültséget állít elő az ESP32-S3 mikrovezérlő és a 3,3V-os perifériák számára, maximálisan 500mA kimeneti árammal. Az LDO alacsony nyugalmi áramfelvétele (90  $\mu$ A) és SOT-23-5 tokozása kompakt elhelyezést biztosít.

A motorhajtás számára a bemeneti feszültség közvetlenül, a DRV8876 H-híd meghajtó IC-n keresztül kerül a motorra, amely maximálisan 3A terhelőáramot képes kezelni.



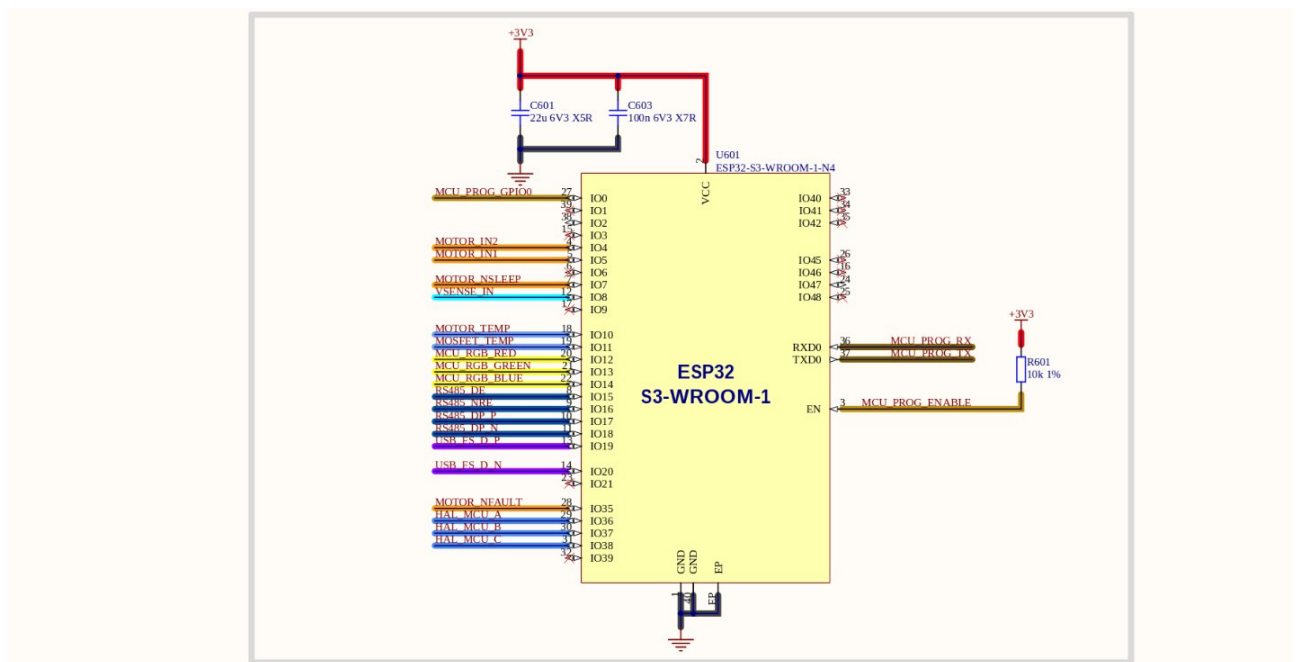
9 Ábra. – Elektronika tápellátására szolgáló áramkörök

## 4.1 Mikrovezérlő

A rendszer központi vezérlőegysége az Espressif ESP32-S3 rendszer-a-chipen (SoC) mikrovezérlő, amely két darab Xtensa LX7 processzormagot tartalmaz, legfeljebb 240 MHz-es órajelen. A chip 512 KB beépített SRAM-mal rendelkezik, valamint külső SPI flash és PSRAM memória illesztését is támogatja. A jelen alkalmazás szempontjából az ESP32-S3 az alábbi perifériáit használjuk ki:

- PCNT (Pulse Counter): hardveres impulzusszámláló modul, amely az enkóder A és B kvadrátúra jeleit külön beavatkozás nélkül, hardverszinten dolgozza fel. A modul önállóan képes a felfutó és lefutó élek számlálására, beépített zajszűrővel (glitch filter) rendelkezik, és a GPIO mátrixon keresztül tetszőleges lábra konfigurálható. Ez a megoldás a szoftveres megszakítás-alapú számlálással szemben pontos és CPU-terhelés nélküli pozícióérzékelést biztosít.
- LEDC (LED PWM Controller): nyolccsatornás, konfigurálható frekvenciájú és felbontású PWM generátor, amelyet a DRV8876 motorhajtó EN bemenetének vezérlésére használunk. A jelen rendszerben 20 kHz-es frekvencián, 10 bites felbontással működik, ami 1024 fokozatú sebességszabályozást tesz lehetővé.
- USB OTG: a chip beépített USB 2.0 Full-Speed transceiverrel rendelkezik, amely CDC-ACM (virtuális soros port) üzemmódban biztosítja a kommunikációt a felügyeleti rendszer felé, külső USB-UART átalakító IC nélkül.

A chip 3,3V-os tápfeszültségről működik, mélyszunyadási módban fogyasztása akár 7  $\mu$ A-re csökkenthető.



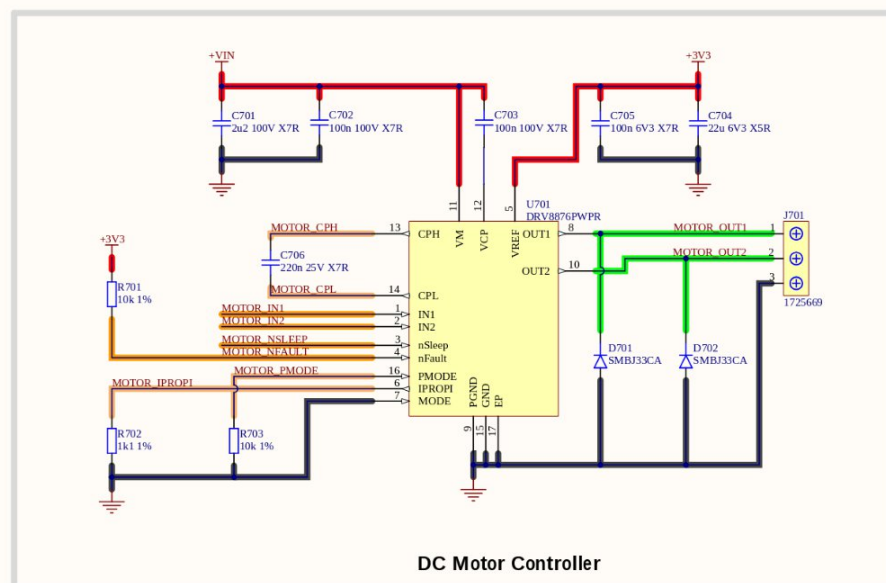
10 Ábra. – ESP32S3 Module Áramköre

## 4.2 DC motor irányítása

A rendszerben a DRV8876PWPR motorvezérlő IC-t használjuk, amely a PWM és PH pinjein keresztül vezérli a DC motor működését. Az IC egy teljes híd kapcsolású vezérlő, amely lehetővé teszi a motor sebességének és irányának finomhangolását.

- PWM vezérlés (EN pin): Az EN (Enable) pin a PWM jelet fogadja, amely szabályozza a motor sebességét. A PWM jelet a mikrokontroller generálja, és ezen keresztül szabályozható a motor sebessége az impulzusok szélességének változtatásával. Minél magasabb a PWM ciklus, annál nagyobb a feszültség átengedése a motorra, így nagyobb sebességet eredményez.
- Forgásirány (PH pin): A PH (Phase) pin a motor forgásirányát szabályozza. A PH pin magas vagy alacsony szintre állítása határozza meg, hogy a motor előre vagy hátra forog-e. Ha a PH pin magas, a motor előre, ha pedig alacsony, akkor hátra fog forogni. Így a vezérlő rendszer képes a motor forgásirányának dinamikus változtatására, miközben a PWM a sebességet szabályozza.

Ezen felül az IC beépített védelmi mechanizmusokkal is rendelkezik, így biztosítva a rendszer megbízható működését hosszú távon.



11 Ábra. – DRV8876 Motor Áramköre



#### 4.1 Analóg mérőáramkörök és jelkondicionálás

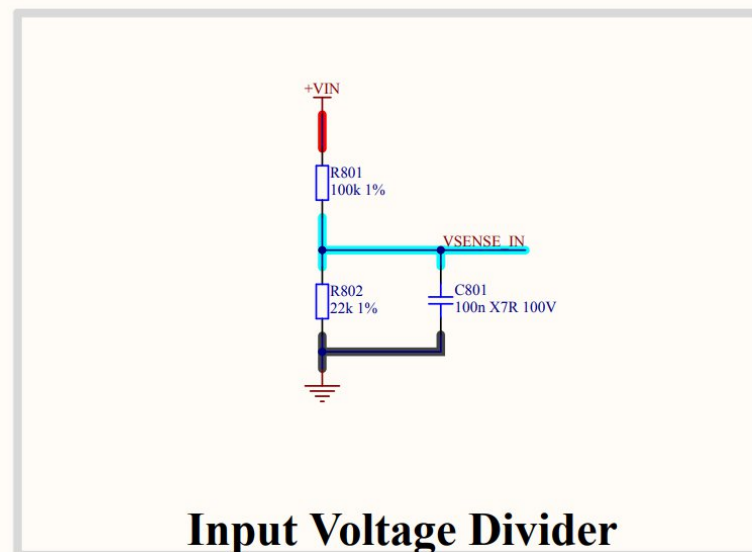
A hardver három analóg bemeneti csatornát tartalmaz, amelyek az ESP32-S3 beépített ADC-jére csatlakoznak. Mindhárom csatornán a jelkondicionálás célja a mérendő jel ADC-kompatibilis feszültségtartományba (0–3,3V) történő illesztése és a nagyfrekvenciás zaj kiszűrése.

##### Bemeneti tápfeszültség mérése

A 10–18V bemeneti tápfeszültség monitorozását egy rezisztív feszültségosztó valósítja meg. A felső ágba R801 = 100 kΩ, az alsó ágba R802 = 22 kΩ ellenállás található, az osztópont és a föld között pedig egy 100 nF kerámia kondenzátor biztosítja a nagyfrekvenciás zajszűrést.

$$V_{out} = V_{in} * \frac{R802}{R802 + R801}$$

10V-os bemenetnél 1,80V, a 18V-os bemenetnél 3,25V jelenik meg az ADC bemenetén, ami a teljes üzemi tartományban a 0–3,3V-os mérési sávon belül marad. A firmware az ismert osztási arány alapján visszaszámítja a valós bemeneti feszültséget.



12 Ábra. – Bementi feszültség mérése

### Hőmérsékletmérés NTC termisztorral

A rendszer hőmérsékletét egy 47 kΩ névleges ellenállású (25°C-on) NTC termisztor méri. Az NTC (R901) a bemeneti tápfeszültségre csatlakozik felső ágként, az alsó ágban egy R902 = 10 kΩ ellenállás található a föld felé, az osztópontot pedig 100 nF kondenzátor szűri. Az NTC ellenállása a hőmérséklet emelkedésével csökken, így az osztóponton megjelenő feszültség emelkedik.

$$V_{out} = V_{in} * \frac{R_{902}}{R_{901_{NTC}} + R_{902}}$$

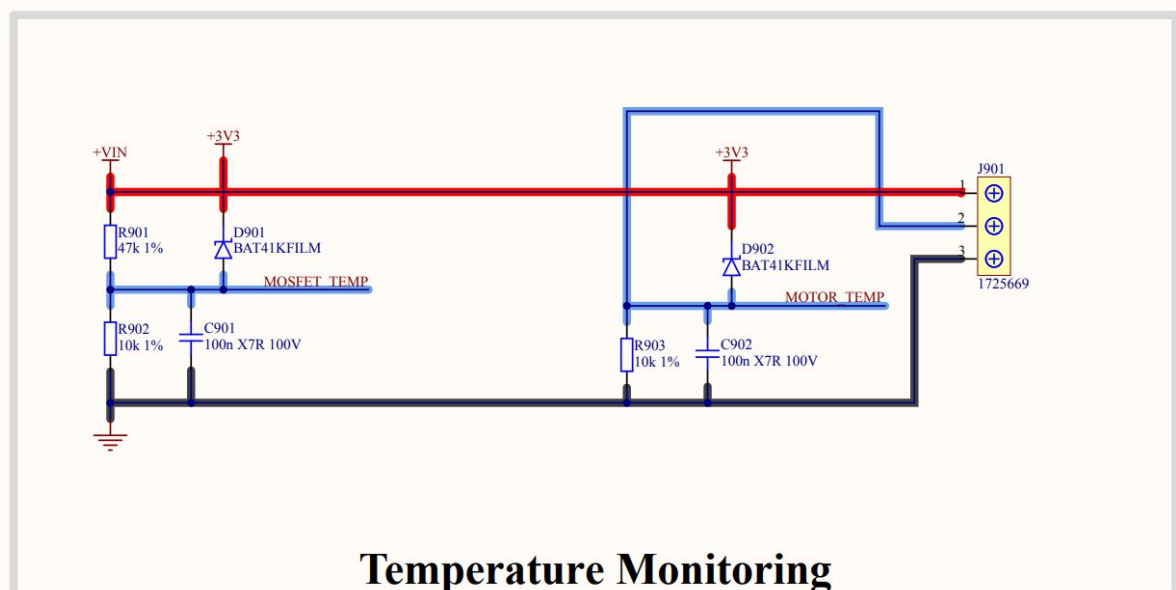
$$R_{NTC} = R_{902} * \left( \frac{V_{in}}{V_{out}} - 1 \right)$$

$$\frac{1}{T_k} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} * \ln \left( \frac{R_{NTC}}{R_0} \right)$$

$$T_{°C} = T_k - 273,15$$

- -  $T_k$  a keresett hőmérséklet Kelvinben
- -  $T_0 = 298,15$  K (25°C, a referencia-hőmérséklet)
- -  $R_0 = R_{901_{NTC}} = 47$  kΩ (az NTC névleges ellenállása 25°C-on)
- - B az NTC anyagállandója (az adatlapból olvasható ki, jellemzően 3000–4500 K közötti érték)
- -  $R_{NTC}$  a mért aktuális ellenállás

Magas hőmérsékleten az NTC ellenállása jelentősen lecsökkenhet, ami a bemeneti feszültségtől függően az ADC tűréshatárát meghaladó feszültséget eredményezne. Ennek megakadályozására egy BAT41KFILM Schottky dióda védi a bemenetet: anódja a mérőpontra, katódja a +3,3V-os sínre csatlakozik. Ha a jelszint meghaladja a 3,3V + a dióda nyitófeszültsége értéket, a dióda kinyit és a többletáramot a tápfeszültségre elvezeti, megvédve az ESP32-S3 ADC bemenetét a túlfeszültségtől.



13 Ábra. – Hőmérséklet mérésére szolgáló áramkör

#### 4.1 Pozíció Mérése

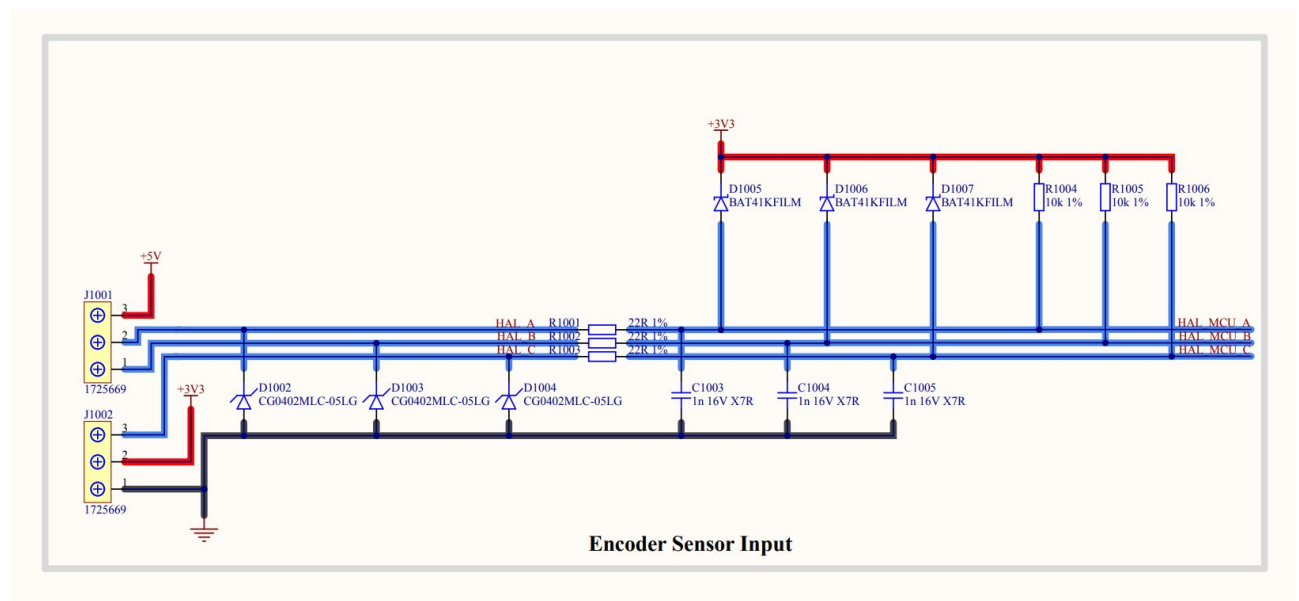
Az enkóder bemenete sorkapocson keresztül érhető el, és az A, B valamint az opcionális Z (index) csatorna fogadására alkalmas. A Z csatorna fordulatonként egyetlen impulzust ad, amely abszolút referenciapont-keresést (homing) tesz lehetővé, így a rendszer bekapcsolás után képes meghatározni a tengely kiindulási pozícióját.

Az enkóder bemenetei ESD védelmi diódákkal vannak ellátva, amelyek az elektrosztatikus kisülésekből eredő feszültségtűskéket elvezetik, megvédve az ESP32-S3 GPIO bemeneteit a károsodástól. Ez különösen fontos, mivel az enkóder jelvezetékei a külső sorkapocson keresztül csatlakoznak, így ki vannak téve a környezeti elektrosztatikus hatásoknak.

Az áramkör 3,3V-os és 5V-os jelszintű enkóderek fogadására egyaránt alkalmas. A jelszint-illesztést – az NTC mérőáramkörhöz hasonlóan – BAT41KFILM Schottky diódák biztosítják: anódjuk a jelvezetékre, katódjuk a +3,3V-os sínre csatlakozik. 5V-os enkóder használata esetén a dióda a 3,3V +  $V_f$  szint felett kinyit, és a többletfeszültséget a 3,3V-os tápra vezeti el, így az ESP32-S3 bemenete nem kap káros túlfeszültséget. 3,3V-os enkóder esetén a dióda zárt állapotban marad, és nem befolyásolja a jelet.

A bemeneti vonalakon gyenge felhúzó (pull-up) ellenállások találhatók a 3,3V-os sín felé. Ezek biztosítják, hogy nyitott drain (open-drain) kimenetű enkóderek esetén is stabil logikai szint alakuljon ki a jelvezetéseken. Az ilyen típusú enkóderek kimenete csak föld felé húz, a magas szintet a felhúzó ellenállás állítja elő.

Minden csatornán egy  $R = 22\ \Omega$  soros ellenállás és egy 100 nF föld felé kapcsolt kondenzátor RC aluláteresztő szűrőt alkot, amelynek vágási frekvenciája körülbelül 72,3 kHz. Ez a szűrő a nagyfrekvenciás zajt és az élek körüli csengést (ringing) csillapítja, miközben az enkóder hasznos jelét még magas fordulatszámon is veszteségmentesen átengedi. A kis értékű soros ellenállás az ESD védődiódákkal és Schottky feszültségkorlátozó diódákkal együttműködve áramkorlátozó szerepet is betölt.



14 Ábra. – Enkóder szenzor elektronika

#### 4.1 RS485 interfész

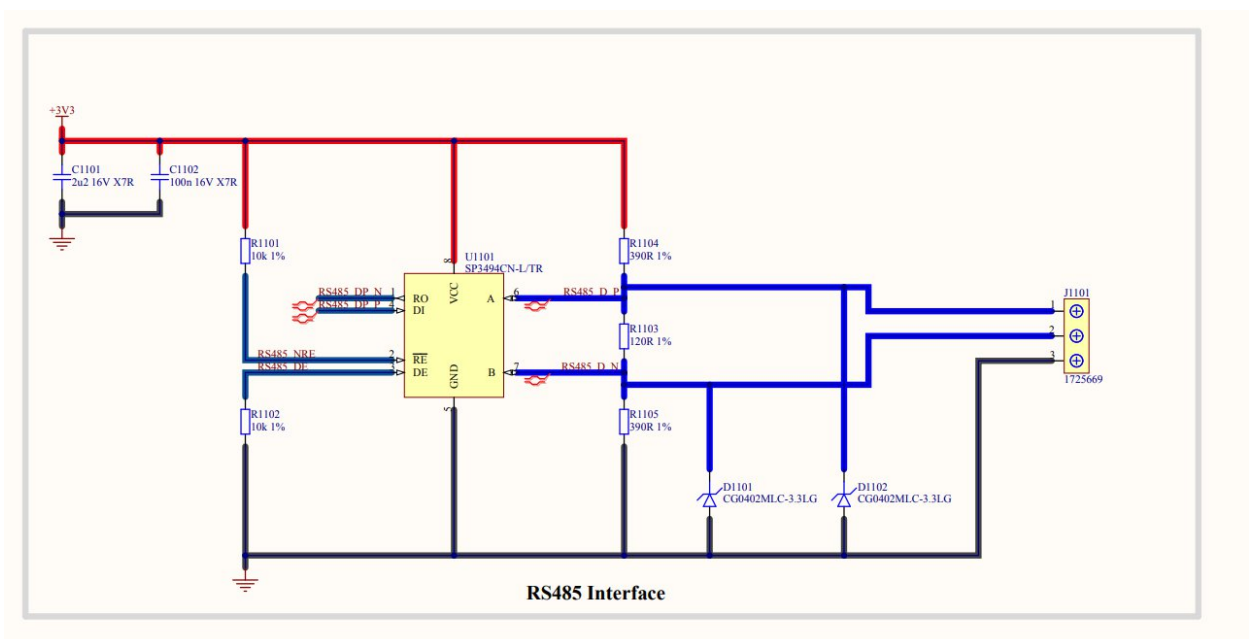
RS-485 félvezeték (half-duplex) kommunikációs interfészt is tartalmaz, amely ipari környezetben elterjedt, zajálló differenciális soros kommunikációt biztosít. Az interfész lehetővé teszi a motorvezérlő integrálását többeszközös buszrendszerekbe, ahol akár 256 csomópont is elhelyezhető egyetlen vezetékpáron.

Az átalakítást egy SIT3485EESA RS-485/RS-422 half-duplex transceiver végzi SOIC-8 tokozásban. Az IC 3V–5,5V tápfeszültség-tartományban működik, legfeljebb 12 Mbps adatátviteli sebességet támogat, és beépített  $\pm 15$  kV ESD védelemmel rendelkezik. Az alacsony, 750  $\mu$ A nyugalmi áramfelvétel energiahatékony működést biztosít.

A transceiver UART oldala az ESP32-S3 egyik UART perifériájára csatlakozik. Az adásirány-vezérlő lábak alapállapota úgy van konfigurálva, hogy a DE (Driver Enable) láb lehúzó ellenállással alacsony szinten, az NRE (Receiver Enable, aktív alacsony) láb pedig felhúzó ellenállással magas szinten áll. Ezzel az IC alapállapotban sem adás, sem vétel módban nem aktív – mindkét funkciót a firmware-nek explicit módon kell engedélyeznie a kommunikáció megkezdésekor, ami megakadályozza a busz nem kívánt meghajtását inicializálás előtt.

A differenciális A és B jelvezetékek a következő áramköri elemekkel vannak ellátva:

- 120  $\Omega$  lezáró ellenállás (termináció): az A és B vonalak között elhelyezett ellenállás a busz jellemző impedanciájához illeszti a végpontot, csökkentve a jelvisszaverődéseket. Hosszabb vezetékhozz és magasabb adatsebesség esetén a termináció elengedhetetlen a megbízható kommunikációhoz.
- 390  $\Omega$  felhúzó és lehúzó ellenállások (bias): az A vonalra a tápfeszültségre kapcsolt 390  $\Omega$  felhúzó, a B vonalra a föld felé kapcsolt 390  $\Omega$  lehúzó ellenállás biztosítja, hogy a busz üresjáratú állapotában (amikor egyetlen adó sem aktív) a differenciális feszültség meghatározott, érvényes logikai szinten maradjon. Ez megakadályozza a hamis adatvételt és a busz lebegő állapotát.
- ESD védelem: a csatlakozónál ESD védelmi elemek találhatók, amelyek a külső kábelezésen érkező elektrosztatikus impulzusokat a transceiver beépített védelmén túl további védelmi szintet biztosítva elvezetik.

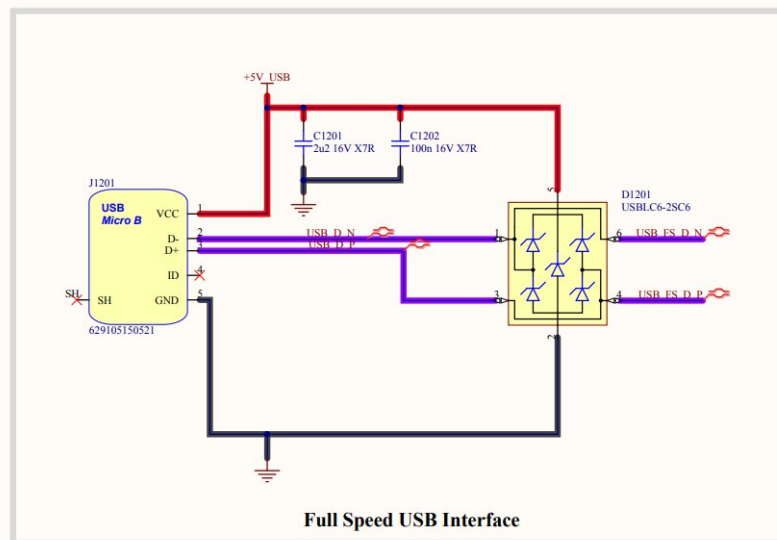


15 Ábra. – R485 interfész

#### 4.1 Számítógép és mikrovezérlő csatlakozása és programozó interfész

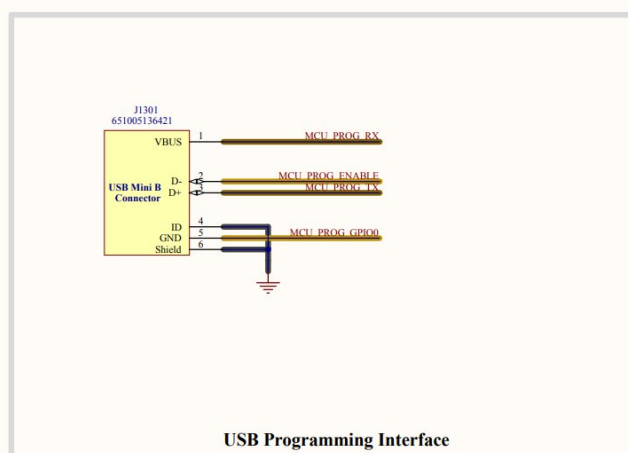
A PC és az ESP32-S3 MCU közötti összeköttetést egy Micro USB csatlakozó biztosítja, USB 2.0 Full Speed (12 Mbps) üzemmódban. Az USB szabvány szerinti D+ és D- differenciális jelvezetékek 90  $\Omega$  differenciális impedanciával kerültek kialakításra a nyomtatott áramköri hordozón. Az impedanciaértéket a PCB rétegfelépítése, a dielektrikum tulajdonságai és a vezetéksáv geometriája alapján számítottuk ki, biztosítva a jelintegritást és az USB specifikációnak való megfelelést a teljes jelúton.

Az USB csatlakozó és az ESP32-S3 közé egy USBLC6-2SC6 ESD védelmi IC került beépítésre. Az IC a D+ és D- vonalakat védi a csatlakozón keresztül érkező elektrosztatikus kisülésektől, kiegészítve az MCU saját belső védelmét. Az USBLC6-2SC6 alacsony parazita kapacitásának köszönhetően a jelintegritást nem rontja, miközben az IEC 61000-4-2 szabvány szerinti ESD védelmet nyújt a buszvezetéseken.



16 Ábra. – USB Interfész

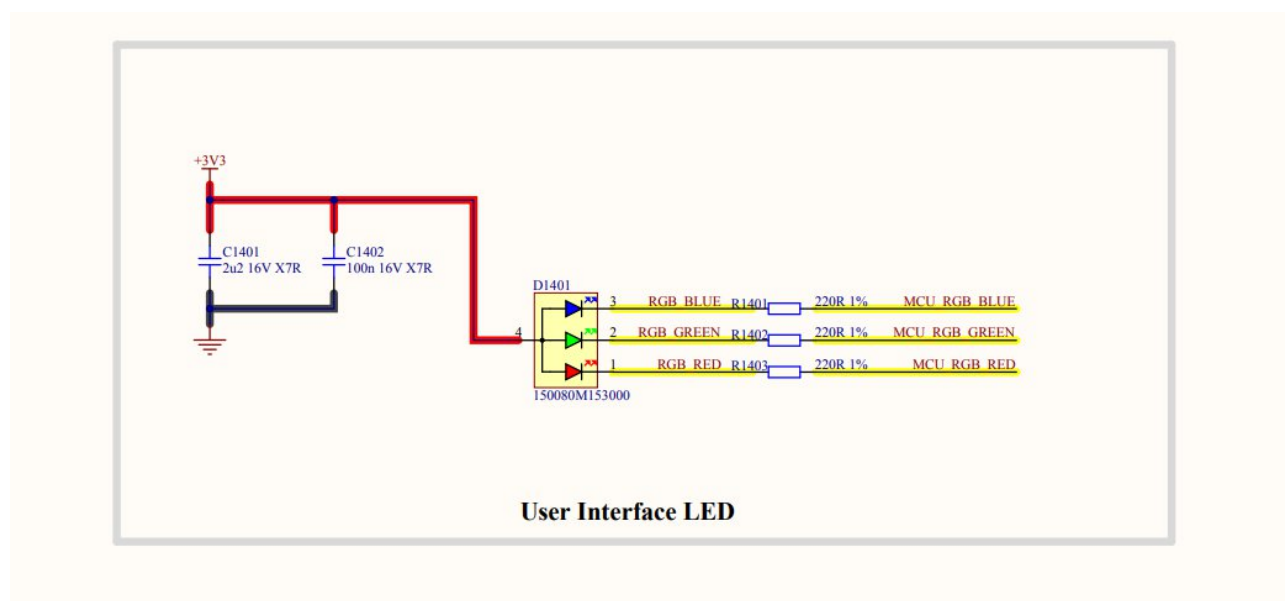
A eszköz egy saját fejlesztésű, FTDI chipen alapuló programozó áramkört is felhasznál, amely egy Mini USB-B csatlakozón keresztül érhető el. Ez az interfész biztosítja az ESP32-S3 soros programozását és debug kommunikációját a fejlesztői számítógép felől, a fő USB porttól függetlenül.



17 Ábra. – Programozó csatlakozás

## 4.1 RGB Led

Az áramkör egy közös anódos RGB LED-et tartalmaz állapotjelzés céljából. A LED három színcsatornáját (piros, zöld, kék) az ESP32-S3 három független LEDC PWM timer csatornája vezérli, lehetővé téve az egyes színtelepek fényerejének önálló, szoftveres szabályozását és tetszőleges színkeverést. Az egyes színcsatornákon egy-egy áramkorlátozó ellenállás biztosítja a LED névleges üzemi áramát és védi mind a LED-et, mind az MCU GPIO kimeneteit a túláramtól.



18 Ábra. – Állapot visszajelző led

#### **4.1 Nyomtatott áramkör**

A nyomtatott áramköri hordozó 4 rétegű felépítéssel készült, az alábbi rétegsorrenddel (stackup):