



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

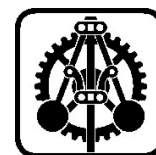
OTDK dolgozat



Segwayen egyensúlyozott inga tervezési és megvalósítási folyamata

Készítette: Budai Csaba Gépészeti modellezés MSc hallgató I. évfolyam

Konzulens: Dr. Insperger Tamás Egyetemi docens
Dr. Stépán Gábor Egyetemi tanár



Budapest, 2013. április 24-26.

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	2
Köszönetnyilvánítás	3
1. Bevezetés	4
2. Geometria tervezése ^[1]	5
2.1. Optimálási algoritmus	6
2.1.1. A teljes rendszer linearizált mozgásegyenlete és szabályozása	6
2.1.2. Routh-Hurwitz stabilitáskritérium feltételei	8
2.1.3. Az optimálási szoftver működése	10
2.1.4. Az optimálás eredménye	11
2.2. A beavatkozó szerv megválasztása ^[7]	12
2.2.1. Szervo erősítő használata	14
2.3. Hajtáslánc tervezése	15
2.3.1. Fogasszíj-tárcsa és fogasszíj választás	15
2.4. Megtervezett geometria	15
3. Mérőrendszer tervezése ^[1]	18
3.1. Szögelfordulás mérése	19
3.2. Szögsebesség mérése ^[4]	20
3.3. Gyorsulásérzékelő használata	22
3.4. A mérőkártya nyomtatott áramkör terve	23
3.5. A szükséges jelek meghatározása ^[5]	24
4. Elektronika tervezése	26
4.1. Mikroprocesszor választás ^[1]	27
4.2. A rendszer tápellátása	28
4.3. A DSP kiegészítő egységei ^{[3], [6]}	30
4.4. Perifériaelemek illesztése	32
4.4.1. LED bekötése	32
4.4.2. Memória modul használata ^{[2],[3]}	32
4.4.3. Memória kártya használata ^{[2],[3]}	33
4.4.4. BlueTooth modul bekötése ^{[2],[3]}	34
4.4.5. Szögjeladók illesztése	34
4.4.6. CAN modul illesztése	35
4.5. A vezérlőelektronika nyomtatott áramköri terve	36
5. Összefoglalás	37
6. Irodalomjegyzék	38
7. Melléklet	39

Köszönetnyilvánítás

A dolgozat az Oktatásért Közalapítvány Tehetséggondozói Alkuratóriumának támogatásával készült a NTP-OKA XXII kódszámú, „A felsőoktatási intézmények karain és tanszékein működő, tehetséggondozó műhelyek és a tudományos diákköri tevékenység keretében működő kutatóműhelyek támogatása” című pályázat keretén belül.

1. Bevezetés

A jelenlegi TDK munka az előző évben előadott "Kettős inverz inga egyensúlyozása" című TDK munka folytatása, amelyben a Segwayen egyensúlyozott inga mozgásegyenleteit írtuk fel, valamint a rendszerhez illesztett állapot szabályzás segítségével, a szabályozott rendszer stabilitási kritériumait vizsgáltuk mind analóg, mind pedig mintavételezett, időkéseleltetett rendszer esetén.

A jelenlegi munka során, figyelembe véve a korábbi számításokból kapott kritériumokat, egy kísérleti berendezés tervezésével és kivitelezésével foglalkozunk. Megtervezzük a szerkezet geometriáját, megválasztjuk a szabályozáshoz szükséges érzékelő és beavatkozó szerveket. Előállítjuk a mérhető jelekből a szabályozáshoz szükséges jeleket és megtervezzük az ehhez szükséges feldolgozó elektronikát.

A szabályozás során a bemenő jelek az egyensúlyozott rúd, a Segway és a kerekek szöghelyzetei és szögsebességei, a kimenő jel a motorról a kerékre ható nyomaték. A szöghelyzetek meghatározásához két szögjeladót használunk, egyet a kerekek és a Segway, egyet a Segway és az inga relatív szöghelyzetének a meghatározásához. A függőlegestől való eltérést a Segwayre és az ingára helyezett gyorsulásérzékelők segítségével határozzuk meg. Az egyensúlyozott rúd és a Segway szögsebességét giroszkóppal mérjük. A kerekek szögsebességét differenciálisan közelítjük az abszolút szögelfordulás jeléből.

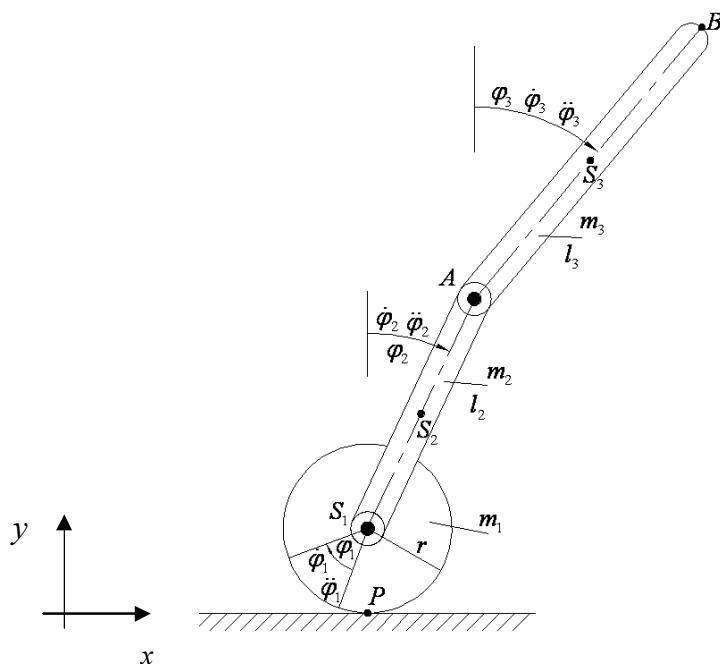
A geometria tervezéséhez a szabályozó stabilitási kritériumát figyelembe vevő optimalizáló szoftvert készítettünk, amely segítségével az egyes paraméterek (pl. kerékátmérő, hosszmeretek, tömegek, tehetetlenségi nyomatékok) előre becsülhetők. Így ezen adatok alapján kiválasztottuk a megfelelő alkatrész elemeket.

A bemenő jeleket egy Digital Signal Processor (DSP) segítségével dolgozzuk fel, mivel a korábbi számításokból nyilvánvaló volt, hogy a szabályozónak rövid mintavételezési idő alatt kell meghatározni az egyensúlyozáshoz szükséges motornyomatékot, mert szabályozó csak nagy mintavételezési frekvencia mellett képes stabilan egyensúlyozni az ingát. A DSP működéséhez szükséges áramkör tartalmazza a DSP tápellátását, az érzékelőkből érkező jelek illesztését a processzorhoz, valamint a szabályozáshoz felhasznált jelek tárolását és a tárolt jelek számítógéphez való továbbítását.

Az egyensúlyozandó inga és a Segway test méréséhez megépítettünk egy mérőelektronikát, amely tartalmazza a szükséges szenzorokat, valamint a mért jelek mikroprocesszorhoz illesztését a megfelelő jelszinten.

2. Geometria tervezése ^[1]

A korábbi munka során elkészítettük a rendszer mechanikai modelljét, amelyben paraméterként a szerkezet geometriájából adódóan a rendszert alkotó merev testek tömegei és hosszai szerepeltek. A mechanikai modell sematikus rajza az 1. ábrán látható.



1. ábra: A mechanikai modell sematikus rajza

Az ábrán m_1 , m_2 , m_3 a kerék, alsó inga és felső inga tömege, és r a kerék sugara l_2 és l_3 pedig az ingák hosszai, valamint φ_1 a kerék elfordulásának szögpozíciója, φ_2 a Segway testének a szögpozíciója és φ_3 az inga szöghelyzete a függőleges irányhoz képest.

Mint tudjuk, a szabályozási algoritmus megalkotásához elengedhetetlen a szerkezet mechanikai modelljének ismerete. Azt is tudjuk, hogy tetszőleges geometriai paraméter kombinációk közül nem minden esetben lehet megfelelő szabályozási paraméter összeállítást találni, tehát nem tudjuk minden esetben szabályozni a rendszert.

Tehát a szerkezet geometriájának tervezése során az egyik legfontosabb kritérium, hogy találjunk olyan geometriai paraméter értékeket, amelyhez megtalálhatóak a szabályozáshoz szükséges paraméterértékek.

Emellett figyelniük kell arra is, hogy a szabályozás hangolása során olyan szabályozó paraméter értékeket találjunk, hogy a szabályozáshoz szükséges beavatkozó nyomaték minél kisebb legyen, hiszen a kereskedelmi forgalomban megtalálható beavatkozó szervek közül nem mindegyik típus képes kiadni a szükséges nyomatékot.

Mindemellett fontos feltétel, hogy gyártható geometriát tervezzünk. A gyártáshoz fúrásra, marásra valamint esztergálásra van lehetőségünk, ezért a tervezés során figyelni kell, hogy a korábban felsorolt technológiákkal a szerkezet geometriáját kivitelezhessük.

2.1. Optimálási algoritmus

A lehetséges megoldások megkereséséhez célszerű egy optimálási algoritmust készíteni, amely kiszámolja számunkra a lehetséges paraméter összeállításokat. Az optimálási algoritmus megírásához szükségünk van a teljes rendszer linearizált mozgásegyenletére, valamint a teljes analóg lineáris rendszer szabályozására. Az optimálás során szükséges feltétel, hogy a választott paraméterek függvényében a rendszer stabilan működjön.

Az optimálási szoftvert Visual Studio 2010 fejlesztői környezetben hoztuk létre C# nyelven. Ahogy azt tudjuk, a numerikus szoftverek gyorsabban számolnak egyszerű műveletekből álló számításokat, mind a bonyolult függvényhívásokat. Ezért az optimáló szoftverben a stabilitás vizsgálat elvégzésére a korábbiakkal ellentétben, a numerikus sajátérték számítás helyett a teljes rendszerhez tartozó Routh-Hurwitz stabilitáskritérium feltételeit használjuk.

2.1.1. A teljes rendszer linearizált mozgásegyenlete és szabályozása

Röviden tekintsük át a szükséges korábbi számításokat. (Részletesen megtalálható Budai Csaba: Ingaegyensúlyozás Segwayen c. szakdolgozatban.)

A teljes rendszer linearizált mozgásegyenlete paraméteresen a következő:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\varphi}_1 \\ \ddot{\varphi}_2 \\ \ddot{\varphi}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -M_{12}s_{22} & -M_{13}s_{33} \\ 0 & -M_{22}s_{22} & -M_{23}s_{33} \\ 0 & -M_{23}s_{22} & -M_{33}s_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -M_{11} + M_{12} \\ -M_{12} + M_{22} \\ -M_{13} + M_{23} \end{bmatrix} \cdot M(t), \quad (2.2.1)$$

azaz:

$$\ddot{\mathbf{q}} = -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{S}\mathbf{q} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{b} \cdot M(t), \quad (2.2.2)$$

ahol $\mathbf{q}$ a rendszert jellemző általános koordináták vektora, $\mathbf{M}^{-1}$ a tömegmátrix inverze, $\mathbf{S}$ a merevségi mátrix, $M(t)$ a szabályozó nyomaték, valamint:

$$\mathbf{b}^T = [-1 \quad 1 \quad 0]. \quad (2.2.3)$$

Az (2.2.2) egyenletet Cauchy-féle normál alakra hozva megkapjuk a teljes lineáris rendszer állapotter-modelljét. Az állapotter-modell főegyenlete a következő:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{E} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{S} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{b} \end{bmatrix} \cdot M(t), \quad (2.2.4)$$

ahol $\mathbf{E}$ a 3×3 -as egységmátrix, valamint $\mathbf{x}$ a teljes rendszer állapotvektora:

$$\mathbf{x}^T = [\mathbf{q} \quad \dot{\mathbf{q}}]. \quad (2.2.5)$$

A következőkben legyen a rendszer-mátrix $\mathbf{A}$, bemeneti-mátrix pedig $\mathbf{B}$.

A rendszer-mátrix paraméteresen a következő:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_1 & a_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_3 & a_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_5 & a_6 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.2.6)$$

ahol: $a_1 = -M_{12}s_{22}$, $a_2 = -M_{13}s_{33}$, $a_3 = -M_{22}s_{22}$, $a_4 = -M_{23}s_{33}$, $a_5 = -M_{23}s_{22}$, $a_6 = -M_{33}s_{33}$.

Paraméteres alakban a bemeneti mátrix:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}, \quad (2.2.7)$$

ahol: $b_1 = -M_{11} + M_{12}$, $b_2 = -M_{12} + M_{22}$, $b_3 = -M_{13} + M_{23}$.

A korábbi munka során megvizsgáltuk a Kálmán-féle rangfeltétel segítségével a teljes rendszer szabályozhatóságát. Mivel a rendszer állapot-irányítható, tehát a rendszer stabilizálható, állapot-szabályozás segítségével megterveztük a teljes analóg linearizált rendszer szabályozását. (Részletesen megtalálható Budai Csaba: Ingaegyensúlyozás Segwayen c. szakdolgozatban.)

Ha a kerék mozgását is szabályozni szeretnénk, akkor a szabályozó paraméterek vektora a következő lesz:

$$\mathbf{r}^T = [P_1 \ P_2 \ P_3 \ D_1 \ D_2 \ D_3]. \quad (2.2.8)$$

Így a kerékre kiadott nyomaték a következő:

$$M(t) = -(P_1\varphi_1 + P_2\varphi_2 + P_3\varphi_3 + D_1\dot{\varphi}_1 + D_2\dot{\varphi}_2 + D_3\dot{\varphi}_3). \quad (2.2.9)$$

Az analóg rendszer stabilitásának vizsgálatához képezzük $\mathbf{A}^*$ mátrixot, amely:

$$\mathbf{A}^* = \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{r}^T, \quad (2.2.10)$$

azaz:

$$\mathbf{A}^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -b_1P_1 & a_1 - b_1P_2 & a_2 - b_1P_3 & -b_1D_1 & -b_1D_2 & -b_1D_3 \\ -b_2P_1 & a_3 - b_2P_2 & a_4 - b_2P_3 & -b_2D_1 & -b_2D_2 & -b_2D_3 \\ -b_3P_1 & a_5 - b_3P_2 & a_6 - b_3P_3 & -b_3D_1 & -b_3D_2 & -b_3D_3 \end{bmatrix}, \quad (2.2.11)$$

ahol: $a_1 = -M_{12}s_{22}$, $a_2 = -M_{13}s_{33}$, $a_3 = -M_{22}s_{22}$, $a_4 = -M_{23}s_{33}$, $a_5 = -M_{23}s_{22}$, $a_6 = -M_{33}s_{33}$,
 $b_1 = -M_{11} + M_{12}$, $b_2 = -M_{12} + M_{22}$, $b_3 = -M_{13} + M_{23}$.

2.1.2. Routh-Hurwitz stabilitáskritérium feltételei

Számoljuk ki az $\mathbf{A}^*$ mátrix sajátértékét:

$$\det(\mathbf{A}^* - \lambda \cdot \mathbf{E}) = 0. \quad (2.2.12)$$

A stabilitás feltétele, az hogy a (2.2.12) egyenlet alapján számított minden λ sajátérték valós része legyen kisebb, mint zérus:

$$\operatorname{Re}\{\lambda\} < 0. \quad (2.2.13)$$

A stabilitásvizsgálat a Routh-Hurwitz stabilitáskritériummal végezhető el, miszerint a stabilitás szükséges, és elégséges feltétele, hogy a (2.2.12) egyenletből képzett karakterisztikus egyenlet együtthatói pozitívak legyenek. Emellett a karakterisztikus egyenlet együtthatóiból képzett Hurwitz-mátrix determinánsa, valamint minden főátló melletti al-determináns értéke is pozitív legyen.

A kapott karakterisztikus egyenlet a következő:

$$a_6\lambda^6 + a_5\lambda^5 + a_4\lambda^4 + a_3\lambda^3 + a_2\lambda^2 + a_1\lambda + a_0 = 0. \quad (2.2.14)$$

A stabilitás számítás egyik feltétele, hogy a karakterisztikus egyenlet együtthatói legyenek pozitívak:

$$a_i > 0, \text{ ahol } i = 0 \dots 6. \quad (2.2.15)$$

A (2.2.14) karakterisztikus egyenlet alapján a Hurwitz-mátrix a következő:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} a_5 & a_3 & a_1 & 0 & 0 & 0 \\ a_6 & a_4 & a_2 & a_0 & 0 & 0 \\ 0 & a_5 & a_3 & a_1 & 0 & 0 \\ 0 & a_6 & a_4 & a_2 & a_0 & 0 \\ 0 & 0 & a_5 & a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & a_6 & a_4 & a_2 & a_0 \end{bmatrix}. \quad (2.2.16)$$

Ha $a_5 > 0$ és $a_0 > 0$ feltétel teljesül, akkor belátható, hogy további feltételt csak a H_2 , H_3 , H_4 és H_5 Hurwitz-determináns ad, miszerint:

$$H_2 = a_5a_4 - a_6a_3 > 0, \quad (2.2.17)$$

$$H_3 = a_3H_2 - a_5^2a_2 + a_5a_6a_1 > 0, \quad (2.2.18)$$

$$H_4 = a_5 \left[a_4(a_3a_2 - a_4a_1) - a_5(a_2^2 - a_4a_0) + a_6(a_2a_1 - a_3a_0) \right] - a_6 \left[a_3(a_3a_2 - a_4a_1) - a_1(a_5a_2 - a_6a_1) \right] > 0, \quad (2.2.19)$$

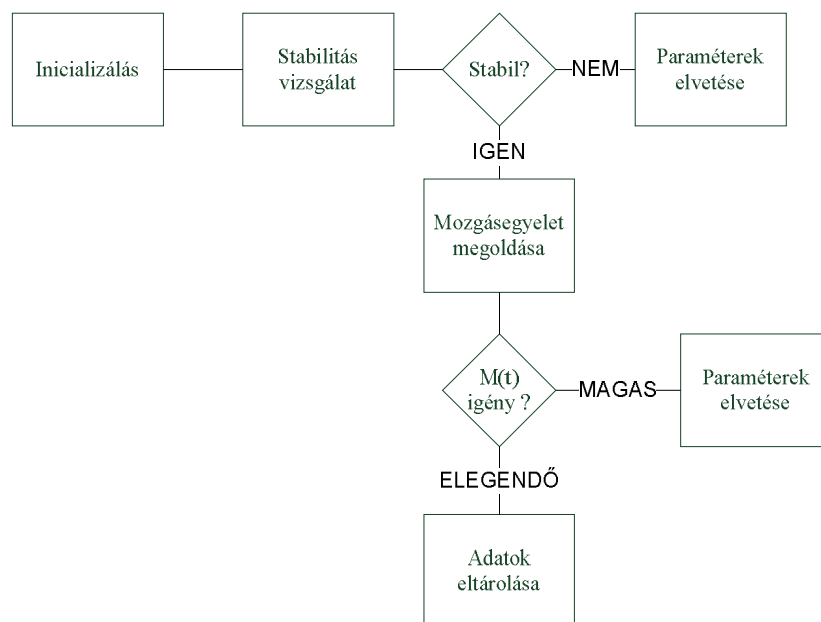
$$H_5 = a_1H_4 - a_0a_5a_4(a_3^2 - a_5a_1) + a_0a_5^2(a_2a_3 - a_5a_0) + a_0a_6a_3a_1^2 - a_0a_6a_5a_1a_3 > 0. \quad (2.2.20)$$

2.1.3. Az optimalizációs szoftver működése

Az optimalizálás feltételeként definiálnunk kell egy célfüggvényt, miszerint a beavatkozó szerv által kifejtett legnagyobb nyomaték egy előre definiált érték alá essen, ugyanis a beavatkozó szervek nem képesek tetszőlegesen nagy nyomatékokat kifejteni. Az optimalizást kimerítő kereséssel végezzük, melynek lényege, hogy beállított határok között megadott lépésköz mellett az összes lehetőséget kiszámoljuk. Az optimalizációs szoftver megjelenését a 2. ábrán láthatjuk.

2. ábra: Az optimalizáló szoftver megjelenítése

Az optimalizációs szoftver blokkdiagramját a 3. ábrán láthatjuk.



3. ábra: Az optimalizációs szoftver blokkdiagramja

Az optimalizálás során első lépésben megadjuk a futó paraméterek (tömegek, hosszok, valamint szabályozó paraméterek) intervallumát és a számításhoz szükséges lépésközöket. Ezáltal tudjuk, hogy mennyi lesz a szoftver által elvégzendő számítás összes lépésszáma.

Minden egyes geometriai paraméter összeállítás mellett a szoftver megvizsgálja, hogy melyek azok a szabályozó paraméterek a megadott intervallumból, amelyre a szabályozás stabil. A szabályozás stabilitásvizsgálatát a már korábban levezetett Routh-Hurwitz stabilitáskritérium alapján végezzük.

Ha a megadott paraméterek mellett a rendszer stabilis, akkor a szoftver numerikusan megoldja előre definiált kezdeti érték feltételek mellett a rendszer mozgásegyenletét közönséges negyedrendű Runge-Kutta módszer segítségével. A megoldott egyenlet alapján, ha megkívánt beavatkozó nyomaték a megadott kritikus nyomaték érték alatt található, akkor a paraméter-összeállítást a szoftver eltárolja egy szöveges állományba.

A számítási idő gyorsítása érdekében többszálásítjuk (multithreading) az optimáló szoftvert. Ahogy azt korábban említettem egy-egy összeállított geometriai paraméterkészlet mellett futtatjuk a szabályozási paramétereket. Így egy adott geometriai paraméterkészlet a szabályozási paraméter tartománnyal egy csomagot jelent. A szoftver a csomagok feldolgozását a processzormagok számának megfelelő szálkészlettel végzi.

Így kihasználva a számítógép erőforrásait az összes processzormag egyszerre (több szálon) tud számolni. Ezáltal lerövidítettük a számítási időt. Ezek mellett még oda kell figyelni arra is, hogy a magok a megfelelő sorrendben írjanak egymás után a szöveges fájlba, hogy ne veszítsünk adatot.

Az optimálási számításokat az 1. táblázatban található beállítások mellett végeztük el.

1. táblázat: Az optimáláshoz használt beállítások

Geometriai paraméter	Intervallum		Lépés	Szabályozó paraméter	Intervallum		Lépés
	min.	max.			min.	max.	
Kerék tömege [kg]	0,1	0,5	0,1	P_1 [Nm/rad]	-1	0	0,01
Segway tömege [kg]	1	5	0,5	D_1 [Nms/rad]	-1	0	0,01
Inga tömege [kg]	0,1	0,5	0,1	P_2 [Nm/rad]	-10	0	1
Kerék sugara [m]	0,01	0,1	0,01	D_2 [Nms/rad]	-10	0	1
Segway magassága [m]	0,1	0,5	0,05	P_3 [Nm/rad]	-40	0	1
Inga hossza [m]	0,1	0,5	0,05	D_3 [Nms/rad]	-40	0	1

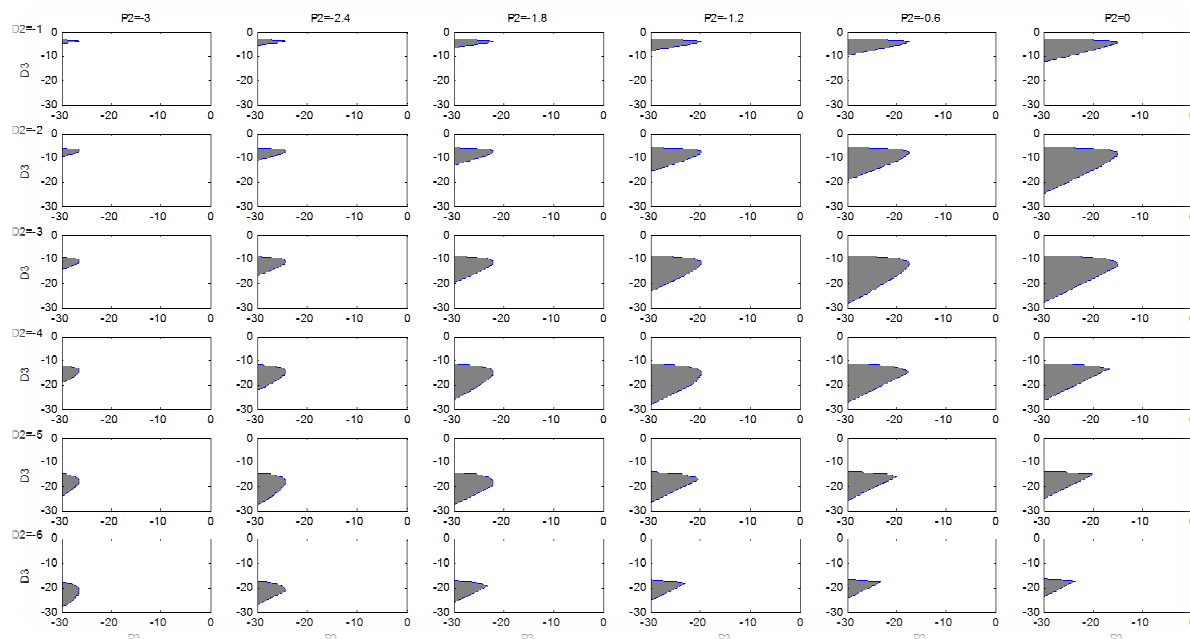
2.1.4. Az optimálás eredménye

Az optimálási algoritmus által számolt lehetséges összeállítás értékek közül a következő összeállítást választottuk. A választott paraméterek az 2. táblázatban megtalálhatóak.

2. táblázat: A választott geometriai és szabályozó paraméterek

Geometriai paraméter	Nagyság	Dimenzió	Szabályozó paraméter	Nagyság	Dimenzió
Kerék tömege	0,2	kg	P_1	-0,01	Nm/rad
Segway tömege	3,5	kg	D_1	-0,01	Nms/rad
Inga tömege	0,4	kg	P_2	-1	Nm/rad
Kerék sugara	0,05	m	D_2	-4	Nms/rad
Segway magassága	0,25	m	P_3	-25	Nm/rad
Inga hossza	0,45	m	D_3	-20	Nms/rad

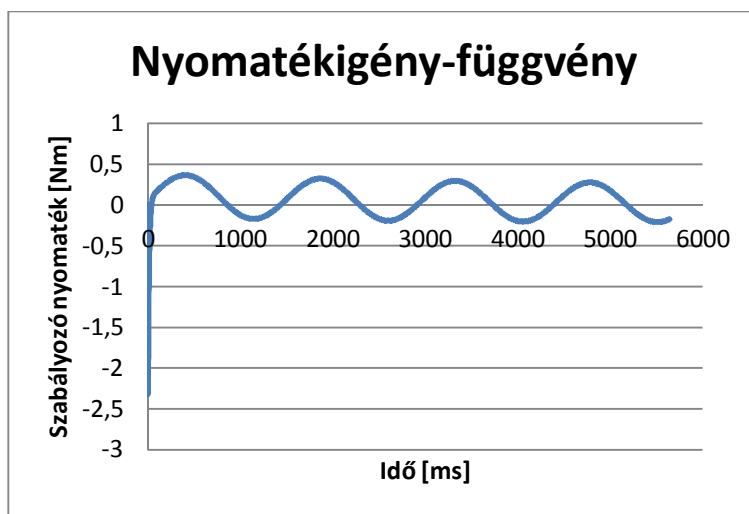
A korábbi munka során használt MatLab program segítségével, az $\mathbf{A}^*$ mátrix sajátértékeinek meghatározásával vizsgáljuk a rendszer stabilitását. Különböző P_1 , D_1 , P_2 , D_2 , P_3 , D_3 szabályozó paraméterek esetén a sajátértékek numerikusan meghatározhatók, és a stabilitási tulajdonságok szemléltethetők egy 4 dimenziós stabilitási diagramon. Az így kapott stabilitástérképet a 4. ábrán láthatjuk.



4. ábra: A teljes analóg rendszer stabilitás térképe $P_1 = -0,01$ és $D_1 = -0,01$ esetén

2.2. A beavatkozó szerv megválasztása ^[7]

Az optimalás során kapott paraméter értékek segítségével kirajzolhatjuk a szükséges beavatkozó nyomaték igény grafikonját. A nyomatékigény grafikon az 5. ábrán látható.



5. ábra: A nyomatékigény grafikonja

Ennek megfelelően egy olyan motorra van szükségünk, amelynek magas az indító nyomatéka, emellett pedig alacsonyabb a folyamatos nyomaték. A kereskedelmi forgalomban kapható motorok közül ezt az igényt a BLDC motorok elégítik ki.

A BLDC motorok kefenélküli egyenáramú, vagy más néven elektromos kommutációjú egyenáramú (ECDC) motorok. Ezek a motorok szinkron működésű, egyenáramú tápellátású (DC) villanymotorok, amelynek ellentétben a klasszikus kefés motorokkal a kommutációt elektronikus vezérléssel hozzuk létre.

Az ECDC motorban az elektromágnesek nem mozognak, helyettük az állandó mágnesek forognak. Fontos tulajdonságuk, hogy az ilyen típusú motorokban az áram és nyomaték, valamint a feszültség és fordulatszám egymással egyenesen arányos.

A választott motor Maxon EC-max 40, 70 W teljesítményű, BLDC motor. A választott motor főbb tulajdonságait a 3. táblázatban láthatjuk, a motor adatlapjának hivatkozását megtaláljuk a mellékletben.

3. táblázat: Maxon motor főbb tulajdonságai

Jellemző	Nagyság	Mértékegység
Indító nyomaték	466	mNm
Folyamatos nyomaték	85,1	mNm
Maximális hatékonyság	75	%

Mivel a szükséges nyomatékértéket még közvetlenül nem értük el a motor megadott nyomatékértékével, ezért áttételeznünk kell. Mivel a korábbi tapasztalatok azt mutatják, minél nagyobb lassító áttételt használunk a motor kotyogása érezhetően nagyobb, ezért a szükséges nyomaték elérését két lépésben állítjuk elő.

Első lépés, hogy a motor tengelyére rászereľünk egy bolygómuövet. A Maxon GP42C kerámia fogaskerekű bolygómuövet választottuk, amely segítségével 4,3:1 lassító áttételt érhetünk el. A bolygómu adatlapjának hivatkozását megtaláljuk a mellékletben.

A választott motort a felszerelt bolygómuével, valamint a motor tengelyvégeire szerelt szögjeladóval és a szükséges vezetékezéssel a 6. ábrán láthatjuk.



6. ábra: Maxon EC-max 40 BLDC motor (hajtóművel és szögjeladóval szerelve)

2.2.1. Szervo erősítő használata

A szervo erősítő egy speciális eszköz, amelynek segítségével vezérelni tudjuk a motort. A végfokozat a szabályozó rendszer által számított megkívánt mennyiséget (pozíció, sebesség vagy nyomaték) elektromos jel formájában elküldi az erősítőhöz. A szervo erősítő a jelet felerősíti és elektromos áramként tovább küldi a motor számára. A motor számára szükséges áram arányos a megkívánt mennyiséggel.

A motorra szerelt szenzorok jeleit visszacsatolva a szervo erősítőbe, az erősítő kiszámolja a megkívánt és jelenlegi állapot közötti különbséget, és beszabályozza a motort a megkívánt mennyiség értékére.

A motor mellé a Maxon EPOS P24/5 típusú szervo erősítőt választottuk. A választott erősítőt a 7. ábrán láthatjuk.



7. ábra: Maxon EPOS P24/5 szervo erősítő

A szabályozó és az erősítő közötti kommunikációra lehetőségünk van soros és CAN kommunikációra is. Később láthatjuk, hogy számunkra a CAN kommunikáció alkalmas, hiszen jóval nagyobb kommunikáció sebességet érhetünk el. A választott szervo erősítő adatlapjának hivatkozása a mellékletben található.

2.3. Hajtáslánc tervezése

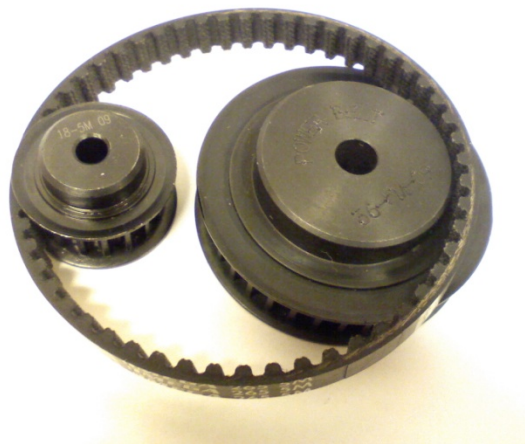
Ahogy korábban említettük a megkívánt nyomatékot két lépésben állítjuk elő. Az első lépés a motor tengelyére szerelt bolygóművel történik. A második lépésben pedig elő kell állítanunk a szükséges nyomatékot, valamint meg kell hajtani a szerkezetet. A tervezett rendszer egy beavatkozó szervvel rendelkezik, amelyet áttétel segítségével hozzákapcsolunk a kerékkel szerelt tengelyre. A hajtás megvalósítására a könnyebb gyártás illetve kivitelezés, valamint a kotyogás mértékének minél alacsonyabb értéken tartása érdekében szíjhajtást választunk.

2.3.1. Fogasszíj-tárcsa és fogasszíj választás

Az előzetes számítások szerint a szíjhajtásnak 2:1 lassító áttétellel kell rendelkezni, ezáltal elérjük a szükséges szabályozónyomaték igényt. Mivel a motorra szerelt (hajtó) kereket közelítőleg 2-3 Nm forgatónyomaték hajtja, a különféle katalógusok alapján a választott fogasszíj-tárcsa HTD-18-5M-09 típusú.

A tervezett 2:1 lassító áttételhez a hajtott keréknek a katalógus alapján a HTD 36-5M-09 típusú fogasszíj-tárcsát választunk.

A szabványos tárcsák mellé választunk egy szabványos fogas szíjat, amelyhez az előzetes számítások után 63,5 mm tengelytávolsággal számolva HTD 265-5M-09 típusú szabványos szíjat választunk. A választott alkatrészeket a 8. ábrán láthatjuk.



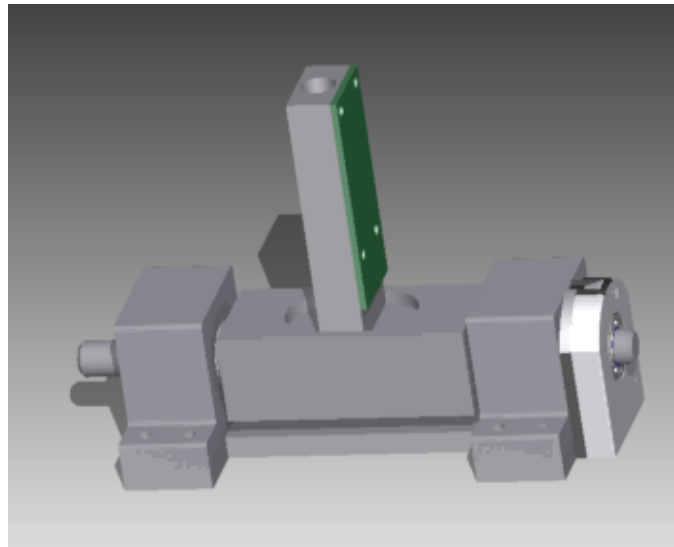
8. ábra: A választott fogasszíj-tárcsa és fogasszíj

2.4. Megtervezett geometria

A geometriát Autodesk Inventor 2012 Professional 3D-s tervező programban rajzoltuk. A tervezett geometria alapvetően alumínium négyszög, illetve kör keresztmetszetű rudakból, illetve alumínium lemezekből tevődik össze. Ezáltal a szerkezet tömege viszonylag alacsony, valamint könnyen megmunkálható.

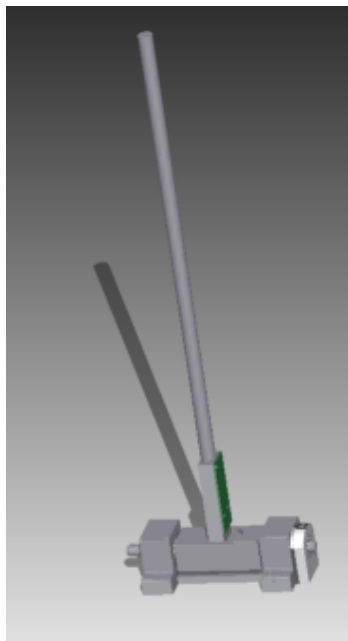
A szerkezet forgó alkatrészeinek csapágyazását X elrendezésű csapágyazással valósítjuk meg, melyhez SKF cég mélyhornyú golyós csapágyait választottunk. A tervezés során fontos kritérium, hogy lehetőség szerint szimmetrikus legyen a szerkezet, hogy a geometria tömegközéppontja a szimmetria tengelyre essen. A szerkezet alapvetően két fő részegységből tevődik össze az ingakonzolból és a Segway testből.

A megtervezett inga konzolt a mérőkártyát reprezentáló zöldes színű lemezzel, valamint a CUI INC AMT102 típusú szögjeladóval a 9. ábrán láthatjuk.



9. ábra: Szenzorokkal felszerelt ingatartó konzol

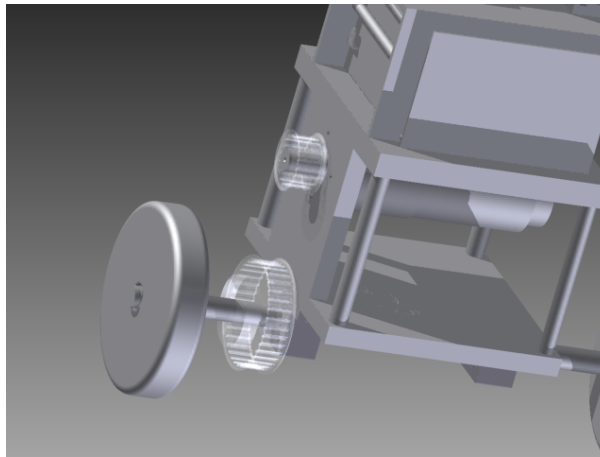
Magát az ingatartó konzolt az ingával együtt a 10. ábrán láthatjuk.



10. ábra: Ingával felszerelt tartókonzol

A szerkezet további részénél fontos feltétel, hogy minél kompaktabb szerkezetet készítsünk. A Segway testet úgy kell kialakítani, hogy lehetőség szerint a vezetékezés miatt a Segway testére szerelt mérőkártya, vezérlő elektronika, szervo erősítő, akkumulátor valamint a motor minél közelebb legyenek egymáshoz.

A hajtáslánc kialakításánál be kell tartanunk a két fogasszíj-tárcsa korábban számított tengelytávolságát betartása. Emellett a kerék tengelyét is be kell csapágyaznunk, melyre szintén X elrendezésű ágyazást használunk, mélyhornyú golyós csapágyak felhasználásával. A hajtáslánc kialakítása a 11. ábrán látható.



11. ábra: A hajtáslánc kialakítása

A tervezés elsődleges célja az volt, hogy a rendszer működéséhez szükséges alkatrészeket megfelelően el tudjuk helyezni a szerkezeten, valamint az optimalizációs számításokból kapott tömeg és hossz kritériumoknak eleget tegyünk. Ennek megfelelően a megtervezett geometria a 12. ábrán látható.



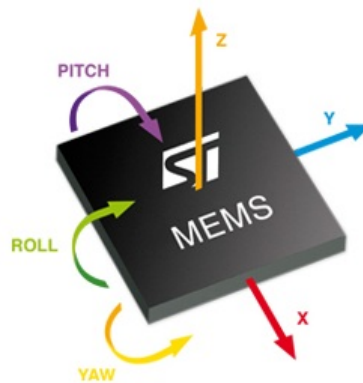
12. ábra: A megtervezett geometria

3. Mérőrendszer tervezése ^[1]

Az állapotszabályozás megvalósításához szükség van a rendszert alkotó merev testek szögpozíciójára, valamint szögsebességeire az abszolút függőleges irányhoz képest. A műszaki gyakorlatban a szükséges fizikai mennyiségeket olyan érzékelőkkel mérjük, amelyek az adott mennyiséggel arányos villamos jelet szolgáltatnak. A szögelfordulás mérésére alkalmasak az inkrementális szögjeladók, a szögsebesség mérésére pedig a giroszkópok. Az abszolút függőleges irány meghatározásához gyorsulásérzékelőt használunk.

A beágyazott rendszer tervezése során figyelni kell arra, hogy a mérőrendszer minél kisebb helyre felszerelhető legyen a kész szerkezeten, valamint törekedni kell arra, hogy az érzékelők kis mértékben befolyásolják a folyamatot. Ezért a mérőrendszer tervezése során egy olyan mérőkártyát készítünk, amelyen megtalálhatóak a szükséges mozgás érzékelők, valamint a hozzá tartozó elektronika.

A kereskedelmi forgalomban található szenzorok közül a legkisebb mérettel és tömeggel a MEMS szenzorok rendelkeznek. A MEMS mozgásérzékelők orientációja a 13. ábrán látható.



13. ábra: MEMS érzékelők orientációja

A mérőrendszerhez tartozó elektronika tervezése során számos alkatrész katalógus adatlapját használjuk fel, amelyeket megtalálhatunk a gyártók, vagy forgalmazók honlapján. A fontos alkatrész adatlapjainak hivatkozásait a mellékletben láthatjuk. A kapcsolási rajzok NI Multisim 11-ben, a nyáktervek pedig a NI Ultiboard 11-ben készültek.

3.1. Szögelfordulás mérése

A műszaki gyakorlatban a forgó tengelyek szögelfordulását inkrementális szögjeladókkal mérjük. Az inkrementális szögjeladó, vagy encoder egy olyan eszköz, amely a tengely elfordulását érzékelve az elfordulás szögével arányosan elektromos jelet generál.

A működési elv alapján több típust különböztetünk meg, a mérés alapulhat többek között optikai, mágneses vagy kapacitív mérési elven is.

A jeladókat a rendszer csuklópontjaiban tudjuk felszerelni. Az első csuklópont az egyensúlyozandó inga és a Segway között található, a második csuklópont a Segway és a kerék között található.

A szabályozandó inga és a Segway között elhelyezkedő csuklópontba CUI INC AMT102 típusú három csatornás inkrementális szögjeladót helyezünk. A választott jeladó könnyen szerelhető, moduláris felépítésű, több felfogatási ponttal rendelkezik, valamint több különböző tengelyátmérőre felszerelhető. A jeladó kapacitív mérési elven alapszik, valamint megválasztható az érzékelő pontossága is. A jeladó maximális felbontása 2048 ppr (az impulzusok száma körülfordulásonként), maximálisan 250 kHz mintavételezési frekvencia mellett. A választott szögjeladó a 14. ábrán látható.



14. ábra: CUI INC AMT102 típusú szögjeladó

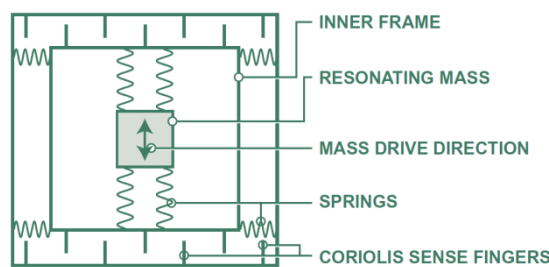
A kapacitív érzékelők alapvetően három fő részből állnak. A felső részen található a jelvevő egység, középen a forgórész, alul pedig a jeladó egység. A jeladó váltóáramú jelet sugároz, a jel modulálódik a forgás hatására. A forgórészen található szinuszos fémmintázat segítségével a moduláció előre meghatározható. Az így érkező modulált jelet a vevő egység négyszögjellé átalakítja.

A Segway teste és a kerék közötti szögelfordulást a motorra felhelyezett szögjeladóval mérjük. A választott szögjeladó a Maxon Encoder MR, három csatornás szögjeladója. A jeladó felbontása 1024 cpt (az impulzusok száma körülfordulásonként), 320 kHz mintavételezési frekvencia mellett.

A motorra szerelt szögjeladó működése mágneses ellenálláson alapszik, miszerint egy többpólusú mágnes található a motor tengelyén, amely szinuszosan változó feszültséget hoz létre a szenzorban, az így keletkezett jeleket négyszögjel formájában használhatjuk fel.

3.2. Szögsebesség mérése ^[4]

A szögsebesség mérésére a műszaki gyakorlatban giroszkópot használunk. A MEMS giroszkópok mechanikai modellje a 15. ábrán láthatjuk. A szögsebességmérő egy tömegből és egy rugóból álló lengőrendszerként modellezhető, amelyben a tömeget állandó sebességgel gerjesztjük. Mint tudjuk a szenzor forgása közben ébredő Coriolis-erő arányos a gerjesztés sebességével és a forgás szögsebességével, iránya pedig merőleges a gerjesztés irányára.



15. ábra: A giroszkóp mechanikai modellje

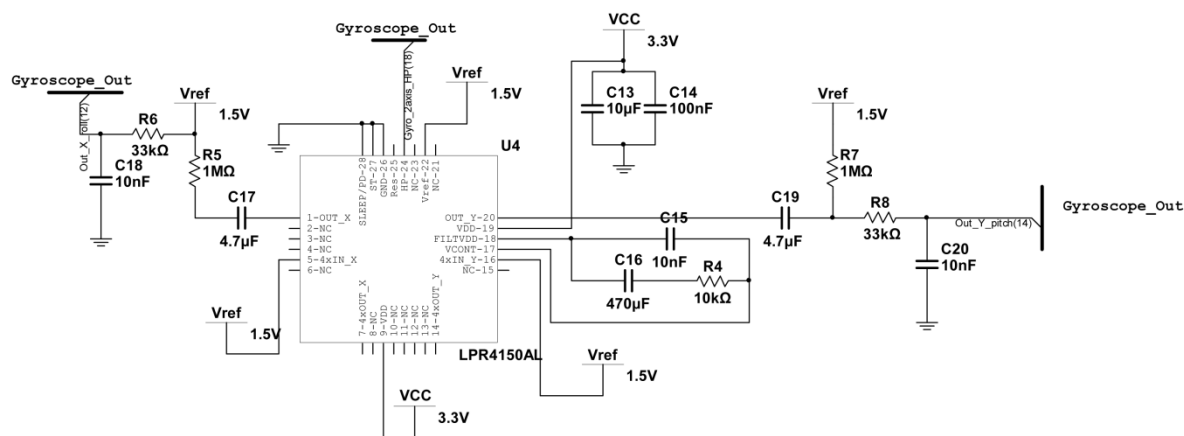
A forgás során ébredő Coriolis-erővel a külső-, és belsőkeret között található rugókon ébredő erő tart egyensúlyt. Lineáris rugókarakterisztikát feltételezve a fellépő rugóerő arányos a kondenzátor fegyverzeteinek elmozdulásával. Mivel a Coriolis-erő arányos a kondenzátor fegyverzeteinek elmozdulásával, ezért az így ébredő feszültség is arányos lesz a szögsebességgel.

Mind a Segway testére, mind pedig az egyensúlyozandó ingára felszerelünk egy-egy giroszkópot. Mint azt tudjuk, a szabályozás csak a tér egy dimenziója mentén történik, ezért elég lenne a mozgás síkjára merőleges szögsebesség-komponenst mérni.

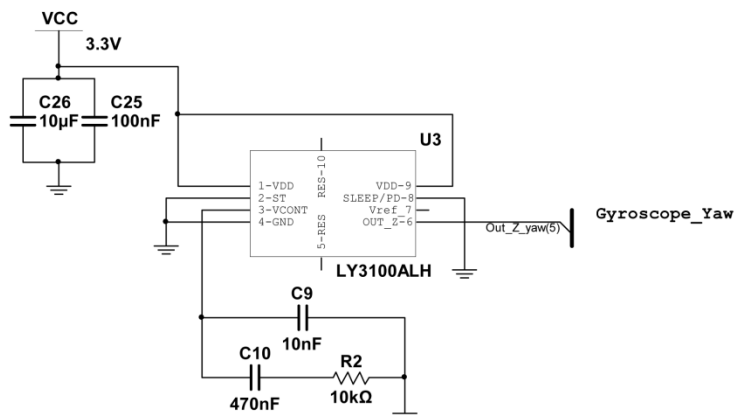
Azért használunk összességében három-tengelyű giroszkópot, mert az elektronika tervezése nem bonyolódik jelentősen, így a későbbi munka során esetleges problémák mérésére már rendelkezésre áll a megfelelő érzékelő.

A kereskedelmi forgalomban kapható érzékelők közül az ST LPR4150AL két-tengelyű analóg giroszkópot és az ST LY3100ALH egy-tengelyű analóg giroszkópot választottuk. A két-tengelyű giroszkóp az X- és Y-tengely körüli elfordulás sebességét ± 1500 [°/s] mérési tartományban tudja mérni, az egy-tengelyű érzékelő pedig a Z-tengely körüli elfordulás sebességét pedig ± 1000 [°/s] mérési tartományban.

A giroszkópokat a mérőkártyára helyezzük, az érzékelőkből érkező jeleket 10 pF-os kondenzátorokkal szűrjük, majd egy követő műveleti erősítő nem-invertáló alapkioscsoláson vezetjük a mérőkártya csatlakozójához. A két-tengelyű giroszkóp kapcsolását a 16. ábrán láthatjuk, az egytengelyű giroszkóp kapcsolását pedig a 17. ábrán.



16. ábra: A két-tengelyű giroszkóp érzékelő kapcsolása



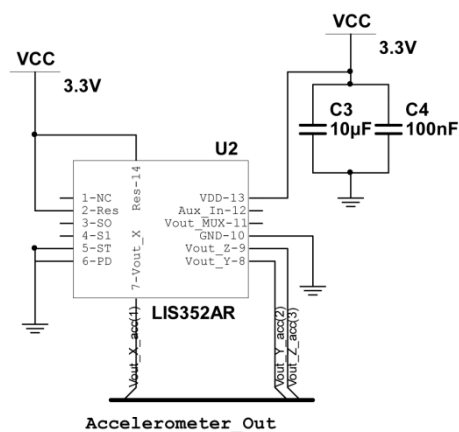
17. ábra: Az egytengelyű giroszkóp kapcsolása

3.3. Gyorsulásérzékelő használata

Hasonlóan a giroszkópokhoz, a gyorsulás érzékelőket is a Segway testére, valamint az egyensúlyozandó ingára szereljük fel. Ahogy azt tudjuk, a gyorsulásérzékelő nyugalmi helyzetben a gravitációs gyorsulással arányos feszültség jelet ad ki az egyik tengelye mentén, így tudjuk az abszolút függőleges irányt meghatározni.

A kereskedelmi forgalomban kapható érzékelők közül az ST LIS352AR kapacitív elvű három-tengelyű analóg gyorsulásérzékelőt választottuk, amely mind a három tengely mentén méri a gyorsulást $\pm 2g$ mérési tartományban.

A gyorsulásérzékelők szintén a mérőkártyára vannak szerelve, valamint az érzékelőből érkező analóg jeleket 10 pF-os kondenzátorokkal szűrjük, hasonlóan a giroszkópokhoz, majd egy követő műveleti erősítő nem-invertáló alapkiosoláson vezetjük a mérőkártya csatlakozójához. A három-tengelyű gyorsulásérzékelő kapcsolását a 18. ábrán láthatjuk.

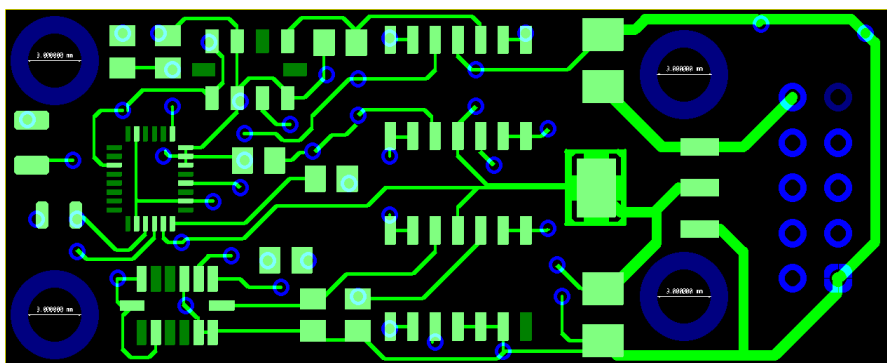


18. ábra: A három-tengelyű gyorsulásérzékelő kapcsolása

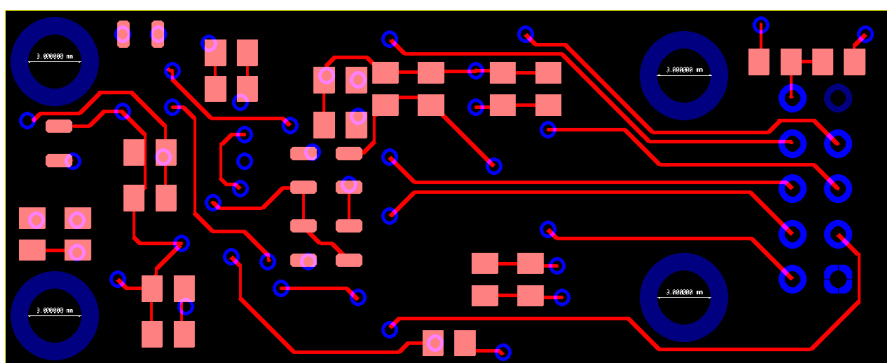
3.4. A mérőkártya nyomtatott áramkör terve

A tervezés során fontos kritérium, hogy a 8 mil-es (0,2 mm) legkisebb gyártható szigetelő távolságot, valamint a 10 mil-es (0,254 mm) legkisebb gyártható vezető vastagságot betartsuk mind a huzalozás, mind pedig az alkatrészecskék padjainak (footprint) létrehozásánál.

A mérőkártya felső oldala a 19. ábrán az alsó oldala pedig a 20. ábrán látható.



19. ábra: A mérőkártya felső oldala



20. ábra: A mérőkártya alsó oldala

3.5. A szükséges jelek meghatározása ^[5]

Mint ahogyan azt tudjuk a szabályozáshoz az abszolút függőlegestől való szögelfordulást és szögsebességet használjuk. A felhelyezett érzékelők segítségével közvetlenül mérhetjük a Segway test, valamint az egyensúlyozandó inga abszolút szögsebességét.

A kerék szögsebességét nem tudjuk tisztán mérni, a szükséges értéket a kerék szögpozíciójából differenciálisan közelítjük:

$$\dot{y}_1(t_j) = \frac{y_1(t_j) - y_1(t_{j-1})}{h}, \quad t \in [t_j; t_{j+1}], \quad (3.5.1)$$

ahol $\dot{y}_1(t_j)$ a becsült szögsebesség az aktuális időpillanatban, $y_1(t_j)$ a származtatott szögpozíció a gyorsulás érzékelő jelével korrigálva az aktuális időpillanatban, $y_1(t_{j-1})$ az aktuális időpillanathoz képest egy mintavételezési idővel korábbi időpillanatban mért értékekből származtatott, a gyorsulásérzékelő jelével korrigált abszolút szögpozíció, h pedig a mintavételezési idő.

A szabályozáshoz szükséges szögelfordulás meghatározása bonyolultabb, mivel a szögjeladók a rendszer csuklópontjaiban helyezkednek el, az így mért szögelfordulás értékek az összekapcsolódó merev testek relatív szögsebességei lesznek.

A szabályozáshoz szükséges pozíció jelek meghatározásához szükségünk van legalább az egyik merev test abszolút szögelfordulására. Az abszolút szögpozíció meghatározására használható a gyorsulásérzékelő. Mivel a gyorsulás érzékelő által mért jel a szögpozíció és a szöggyorsulás lineáris kombinációjaként tevődik össze:

$$y_a = C_1\varphi - C_2\ddot{\varphi}, \quad (3.5.2)$$

ahol y_a a gyorsulásérzékelő által mért feszültség jel, φ az inga abszolút szögelfordulása, $\ddot{\varphi}$ az inga szöggyorsulása, C_1 és C_2 pedig a gyorsulásérzékelő paramétereitől függő konstansok.

A kapacitív elvű MEMS gyorsulásérzékelők modellezhetőek egy tömegeből és egy rugóból álló lengő rendszerként. Mivel a MEMS gyorsulásérzékelők is az elmozdulással arányos feszültség jelet adnak, ezért a fenti hivatkozásban jelzett cikk eredményei használhatóak ezen probléma megoldására is.

Így a fent említett cikk szerint, ha a gyorsulás szenzorból kapott gyorsulás jelet közvetlenül visszacsatoljuk a szabályozáshoz szükséges szögpozíció jelként, akkor mivel mintavételes szabályozót használunk a rendszer stabilis viselkedést mutat, tehát a mintavételezés stabilizálja a rendszert. Így a szabályozáshoz szükséges szögsebesség és szögpozíció jelek előállíthatóak.

A felső inga szögsebességével arányos villamos jelet $(y_{g3} \sim \dot{\varphi}_3)$ és a Segway test szögsebességével arányos villamos jelet $(y_{g2} \sim \dot{\varphi}_2)$ közvetlenül mérhetjük a giroszkópokkal.

A kerék és a Segway test közötti relatív szögpozícióval arányos villamos jelet:

$$y_{e1} \sim (\varphi_2 - \varphi_1), \quad (3.5.3)$$

valamint a Segway test és az egyensúlyozandó inga közötti relatív szögpozíciót:

$$y_{e2} \sim (\varphi_3 - \varphi_2) \quad (3.5.4)$$

szögjeladókkal mérhetjük.

Felhasználva (3.5.2) összefüggést a (3.5.3) és (3.5.4) összefüggésekhez, megkapjuk a rendszert alkotó merev testek abszolút szögpozíció értékeivel arányos villamos jeleket $(y_1 \sim \varphi_1, y_2 \sim \varphi_2, y_3 \sim \varphi_3)$.

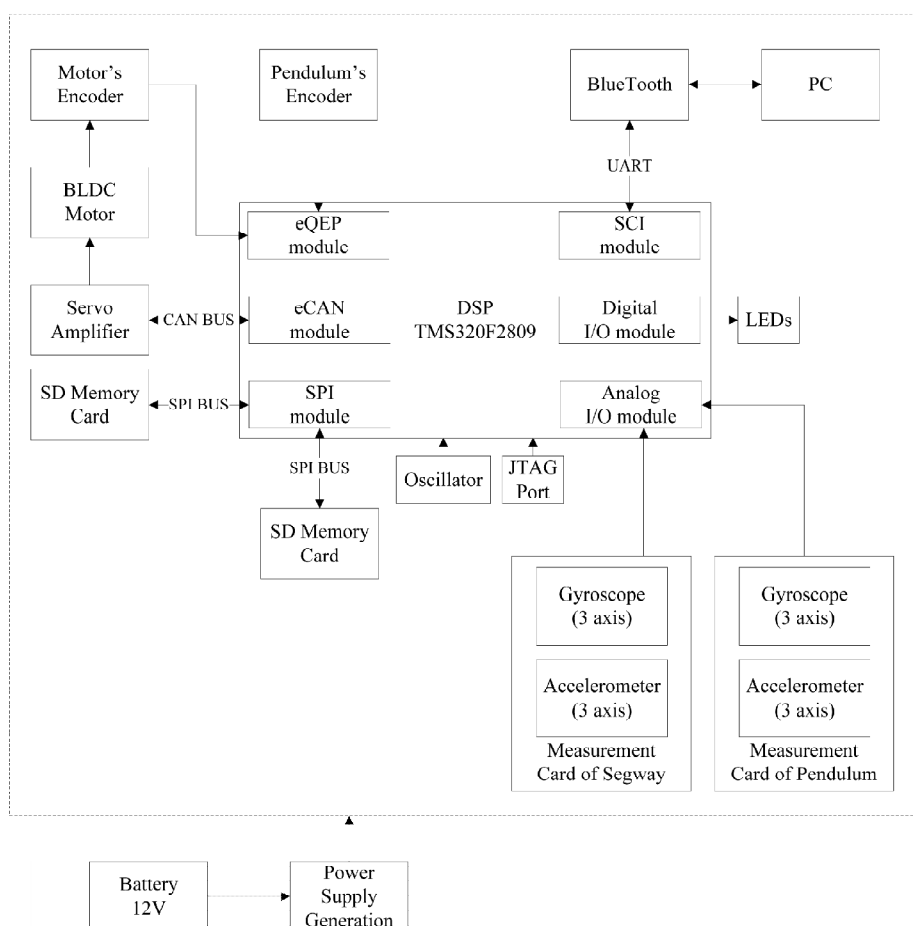
A (3.5.1) összefüggéshez most már ismerjük a szükséges szenzorjeleket, tehát számolhatjuk a kerék szögsebességét.

4. Elektronika tervezése

A robot vezérlőelektronikájának tervezése során számos kritériumot kell figyelembe vennünk, a legfontosabb, hogy nagy mintavételezési frekvenciájú processzort tudjunk választani, hogy megvalósítható legyen a szabályozás. A szabályozáshoz mérnünk kell a szögpozíció és szögsebesség értékeket, hogy tudjuk a szükséges mennyiségeket az állapotszabályozáshoz. Az érzékelő jeleit fogadnia kell a vezérlőelektronikának.

Szabályoznunk kell a beavatkozó szerv működését, ehhez szükségünk van egy szervó erősítőre, amelyet illesztünk kell a vezérlőelektronikához. Emellett a későbbi számításokhoz el kell tárolnunk a mért szenzor értékeket, majd a számítógépen történő feldolgozáshoz a megfelelő formátumra kell alakítanunk. A mentett értékeket el kell juttatnunk a számítógépre.

Az elektronika rendszertervét 21. ábrán láthatjuk.



21. ábra: Az elektronika blokkdiagramja

Az elektronika tervezése során számos alkatrész katalógus adatlapját használtuk fel, amelyek megtalálhatóak a gyártók, vagy forgalmazók honlapján. A fontos alkatrészek adatlapjainak hivatkozásai megtalálhatóak a mellékletben. A kapcsolási rajzok a NI Multisim 11-ben, a nyáktervek pedig a NI Ultiboard 11-ben készültek.

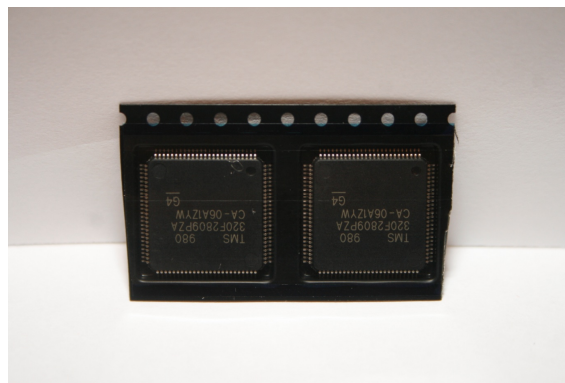
4.1. Mikroprocesszor választás ^[1]

A korábbi vizsgálatok során meghatároztuk a szabályozó kör kritikus mintavételezési idejét, amely hatására a rendszer már elveszíti a stabilitását, tehát nem találhatók megfelelő szabályozó paraméterek, amellyel szabályozni tudjuk a rendszert. Mint tudjuk, ahogy a szabályozás mintavételezési ideje egyre nagyobb, a stabil paraméterek száma egyre kevesebb, valamint azt is tudjuk, hogy ha kellően kicsi mintavételezési időt választunk, a kapott stabilitástérkép megegyezik az analóg rendszer stabilitástérképével.

Tehát a cél, hogy egy szabályozási ciklust a lehető legnagyobb frekvenciával valósítsunk meg. A korábbi számítások alapján 100 kHz-es mintavételezési frekvencia mellett a mintavételes rendszer stabilitási tulajdonságai megegyeznek az analóg rendszer stabilitási tulajdonságaival.

Tehát az első követelmény, hogy legalább 100 kHz mintavételezési frekvenciával kell rendelkezni a processzornak, mivel a processzor a szabályozás mellett a szabályozás során felhasznált szenzorjelek mentésével, valamint számítógéppel történő kommunikációval foglalkozik, ezért nagyobb órajelű processzort választunk.

Ilyen magas számítási teljesítményre a kereskedelmi forgalomban kapható mikroprocesszorok közül a Texas Instruments Inc. TMS320F2809 DSP-jét választottuk. A választott DSP üzemeltethető 100 MHz-es órajellel, 32 bites fix pontos számábrázolás mellett. A processzort kifejezetten valós idejű szabályozási folyamatokhoz ajánlják. A választott processzort a 22. ábrán láthatjuk.



22. ábra: TMS320F2809 DSP

A DSP-t tartalmazó elektronika tervezéséhez a gyártó biztosítja a szükséges adatlapokat, hardvertervezési segédleteket, valamint a külső periféria elemek illesztésének leírását.

4.2. A rendszer tápellátása

A tervezés során fontos kritérium, hogy kompakt rendszert tervezzünk, ezért a rendszer feszültségforrásként akkumulátort használunk. Az akkumulátor választása során figyelembe kell venni, hogy mekkora legnagyobb teljesítményigény a rendszerben, valamint milyen hosszú üzemidőt szeretnénk.

A motor 12 V tápfeszültséget igényel, és legalább 10 perces működést szeretnénk elérni, ezért a választott feszültségforrás egy UPS Power 12 V-os 4,2 Ah-ás ólomzselés akkumulátor. A választott akkumulátor a 23. ábrán látható.



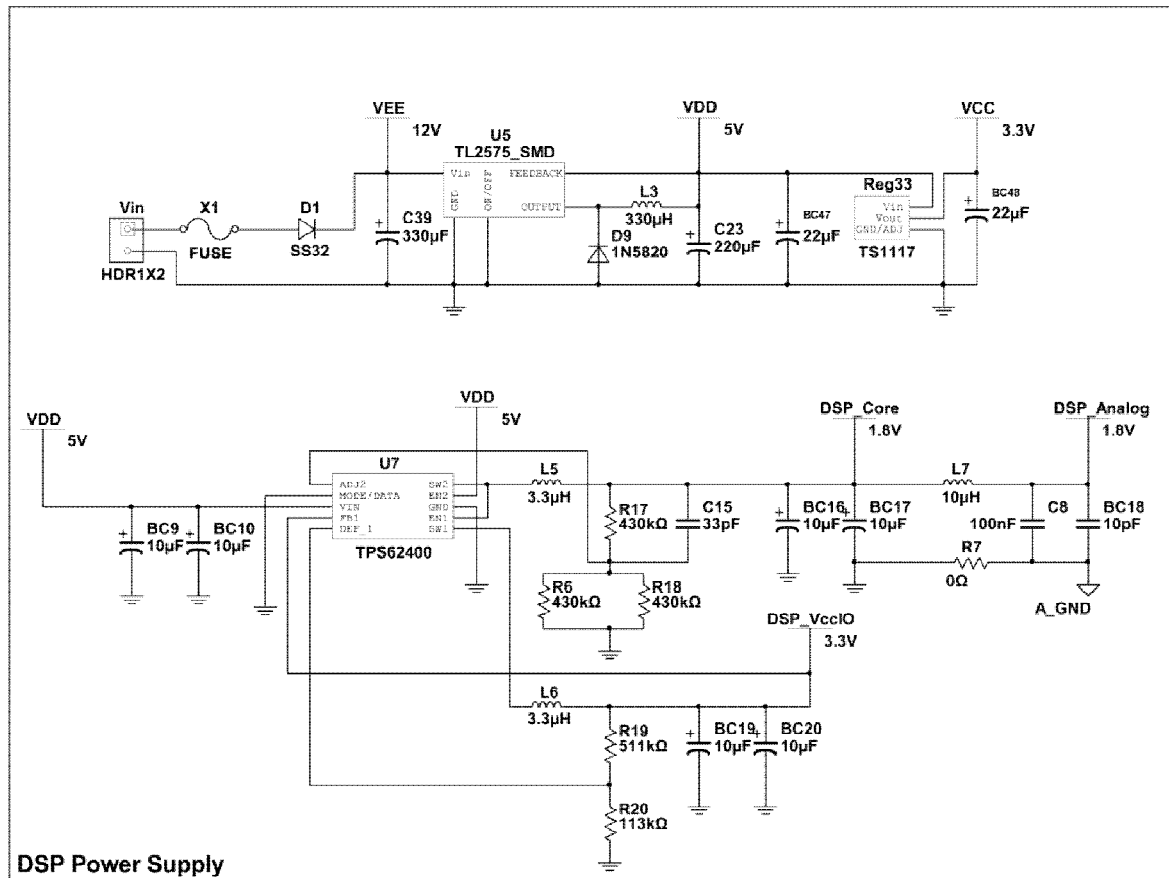
23. ábra: UPS Power BT4.2-12 akkumulátor

A további periféria elemek számára szükségünk van 5 V-os és 3,3 V-os tápfeszültségre egyaránt. Mindközül a DSP tápellátása a legbonyolultabb, a processzor adatlapjából tudjuk, hogy többféle feszültség szintű tápellátásra van szükség. Megkülönböztetünk 1,8 V-os magfeszültséget, 3,3 V-os digitális és analóg periféria tápfeszültséget is.

A DSP működéséhez stabil tápfeszültségre van szükség, ha a tápellátás nem egyenletes, a tápfeszültség ingadozása befolyásolja a processzorműködés sebességét és pontosságát. A szükséges feszültség értékeket speciális feszültség stabilizáló IC-kkel állítjuk el több lépésen keresztül.

Az akkumulátorból érkező feszültségből a TL2575 IC segítségével előállítunk stabil 5 V-os feszültséget. Az előállított 5 V-os feszültségből a TS1117 IC stabil 3,3 V feszültséget, valamint a TPS62400 IC segítségével a DSP 1,8 V-os magfeszültségét állítjuk elő.

A használt feszültségstabilizáló IC-k adatlapja tartalmazza az működéshez szükséges részletes kapcsolást. A DSP számára szükséges analóg magfeszültséget $10\ \mu\text{H}$ -s induktivitással leválasztjuk a digitális tápfeszültségről, valamint a digitális földről $0\ \Omega$ -os keresztül leválasztjuk az analóg földet. Az elektronikát rövidzár-védelem miatt $1,1\ \text{A}$ -os biztosítékkal, valamint az áramkört a fordított polaritás ellen az SS32 diódával védjük. A tápellátás kapcsolási rajza a 24. ábrán látható.

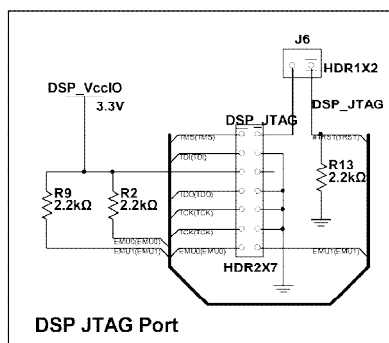


24. ábra: Tápfeszültség előállítás

The schematic diagram illustrates the TMS320F2808 evaluation board. The central component is the TMS320F2808 microcontroller, which is connected to various peripheral components and power supply rails. The power supply rails include DSP_VccIO (3.3V), DSP_VccIO (1.8V), DSP_Analog (1.8V), and DSP_VccIO (3.3V). Key components include: DSP_LED (Green LED), CAN (CAN0, CAN1), BlueTooth (UART, RX, TX), MeasurementCard_1 (ADCIN, ADINA003), MeasurementCard_2 (ADCIN, ADINB044), BC5 (2.2uF), BC4 (2.2uF), R1 (22k), DSP_OSC (10MHz), DSP_JTAG (JTAG pins), reset (push button), and various connectors (SD_card, SPI_FLASH, MISO, MOSI, CS, DQ). The diagram also shows the internal pin connections of the TMS320F2808, including GPIO pins, ADC channels, and peripheral interfaces.

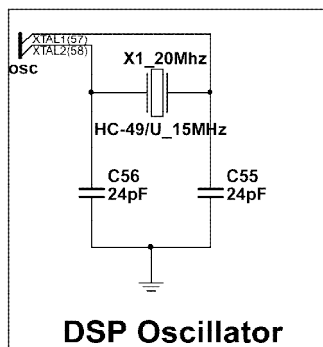
25. ábra: DSP bekötése

A DSP programozása szabványos csatlakozón történik, az un. JTAG csatlakozón keresztül, amelynek javasolt bekötése megtalálható az adatlapon. A JTAG port kapcsolása a 26. ábrán látható.



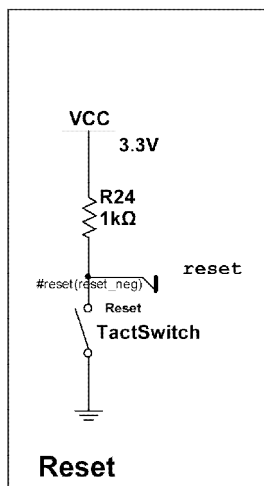
26. ábra: A JTAG csatlakozó bekötése

A DSP 100 MHz-es órajele egy 20 MHz-es külső kvarc oszcillátor és az ötszörös szorzótényezőjű frekvencia többszöröző (PLL – Phase-locked loop) szorzataként áll elő. A külső oszcillátor modul ajánlott bekötése szintén megtalálható a processzor adatlapjában, miszerint a 20 MHz-es kvarckristály csatlakozóit két 24 pF-os kondenzátor köti össze a digitális föld ponttal. Az külső oszcillátor modul bekötését a 27. ábrán láthatjuk.



27. ábra: A külső oszcillátor bekötése

A reset jel segítségével alapvetően a mikrokontroller alaphelyzetbe állítását érhetjük el. A reset jel hatására a program számláló regisztere (Program Counter) a program első utasítására mutat, alaphelyzetbe állnak a perifériák vezérlő és parancs regiszterei, valamint letiltódik az interrupt (megszakítás) fogadás. A reset jel előállításához szükséges kapcsolást a 28. ábrán láthatjuk.



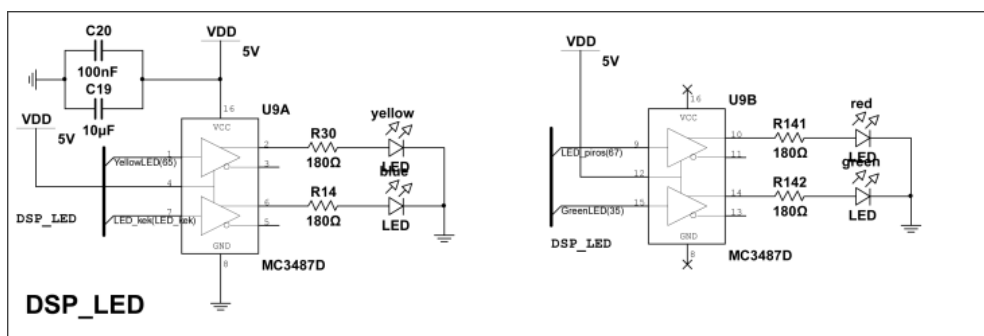
28. ábra: A reset jel előállítása

4.4. Perifériaelemek illesztése

Miután bekötöttük a processzort és a működéséhez szükséges alapelemeket, hozzáillesztjük a periféria elemeket a processzorhoz. Ellentétben a kevesebb számítási kapacitással rendelkező processzorokkal, a DSP minimális jelek és jelszintek mellett dolgozik. Mivel kis áramokkal dolgozik, ezért közvetlenül nem tudja kihajtani (nincs elegendő teljesítménye) a periféria elemeket, illesztenünk kell őket.

4.4.1. LED bekötése

A későbbi programozási folyamat során az esetleges hibák kereséséhez, javításához nagy segítséget nyújthat, ha LED-eket kötünk a DSP kimeneti lábaira. A LED-ek DSP-hez történő illesztését MC3487D vonalmeghajtó IC segítségével végezzük. Az ellenőrzéshez szolgáló LED-ek bekötését a 29. ábrán láthatjuk.



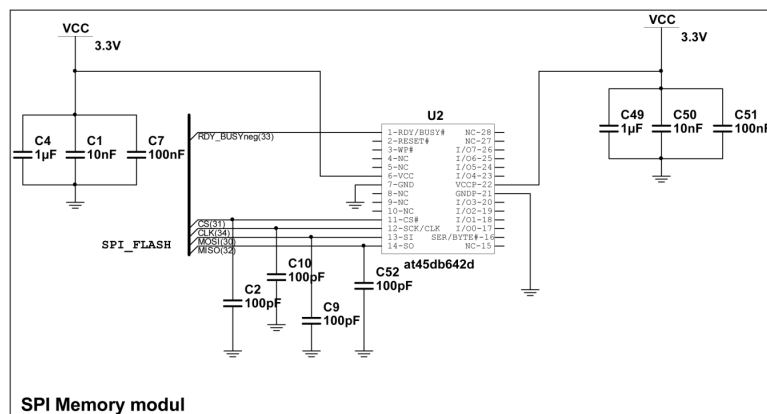
29. ábra: LED-ek illesztése

4.4.2. Memória modul használata ^{[2],[3]}

A rendszer későbbi vizsgálataihoz szükséges, hogy ismerjük a szabályozás során felhasznált szenzorjeleket, ezért a mért jeleket el kell tudnunk tárolni. A tárolásra egy AT45DB642D típusú 64 Mbit-es Atmel memória modult használunk, amely 66 MHz-es órajellel képes fogadni a processzortól a jeleket a processzor soros periféria buszon (SPI – Serial Peripheral Interface) keresztül. A processzor SPI moduljának leírását szintén megtaláljuk a DSP adatlapjai között.

Az SPI egy nagysebességű, szinkronműködésű soros kommunikációs eszköz, amelynek állítható az elküldendő adatmennyisége. Az SPI kommunikációt általában a DSP és egyéb periféria elemek közötti, vagy más mikrokontrollerrel folytatott kommunikációra használják.

A memória modul és a processzor közötti SPI kommunikáció használatához négy jelre van szükségünk az un. Master In Slave Out (MISO), Master Out Slave In (MOSI), órajel (CLK) valamint Chip Select, vagy Slave Select (CS) jelekre. A memória modul kapcsolási rajza a 30. ábrán látható.

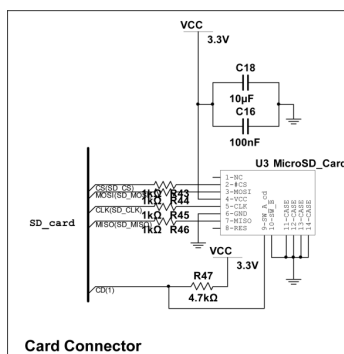


30. ábra: A memória modul bekötése

4.4.3. Memória kártya használata [2],[3]

A memóriamodul használata mellett használunk egy MicroSD kártyát is az adatmentésre. A memória modulra bináris számokként tároljuk el a mért adatokat, viszont a kiértékeléshez ez a formátum alkalmatlan. Ezért a későbbi munka megkönnyítése érdekében egy szabályozási folyamat végén a memóriából átmentjük az memóriakártyára a mért adatokat, már felhasználható formában. Ehhez átváltjuk a feszültségértékeket a vele arányos mért fizikai mennyiségre, és egy szöveges állományba eltároljuk. Mivel a memóriakártyának jóval nagyobb kapacitása van, mint a memória modulnak, ezért több szabályozási ciklus eredményeit is eltárolhatjuk.

A különféle memóriakártya típusok közül MicroSD kártyát választottunk, mivel az MicroSD kártyával szintén SPI buszon keresztül tud kommunikálni a DSP. A memóriakártya bekötését a 31. ábrán láthatjuk.



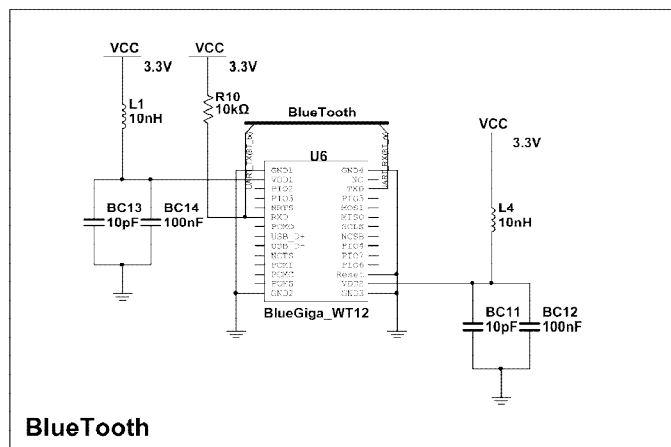
31. ábra: A MicroSD kártya csatlakoztatása

4.4.4. Bluetooth modul bekötése ^{[2],[3]}

A memóriákban tárolt adatokat a számítógépen dolgozzuk fel, értékeljük ki. A robot és a számítógép között szeretnénk vezeték nélküli kapcsolatot kialakítani, ezért választottuk a Bluetooth alapú folytatott kommunikációt. A kereskedelmi forgalomban kapható Bluetooth modulok közül a BlueGiga WT12 modult választottuk.

A Bluetooth modult SCI buszon keresztül tudjuk illeszteni a processzorhoz. A processzor SCI moduljának leírását szintén megtaláljuk a DSP adatlapjai között. Az SCI két vezetékből álló aszinkron működésű soros kommunikációs eszköz. Közismertebb nevén Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART). A UART kommunikáció támogatja a digitális adatátvitelt, általában számítógéppel, vagy más aszinkron működésű perifériák közötti kommunikációra használják.

A Bluetooth modul bekötésénél fontos odafigyelni arra, hogy a UART kommunikáció használatakor a processzor adó (transmitter) lábát a Bluetooth modul fogadó (receiver) lábához kell kötnünk, és fordítva. A Bluetooth modul 3,3 V-os tápellátását elláttuk egy magas frekvenciás zavarssűrű áramkörrel. A Bluetooth modul bekötését a 32. ábrán láthatjuk.

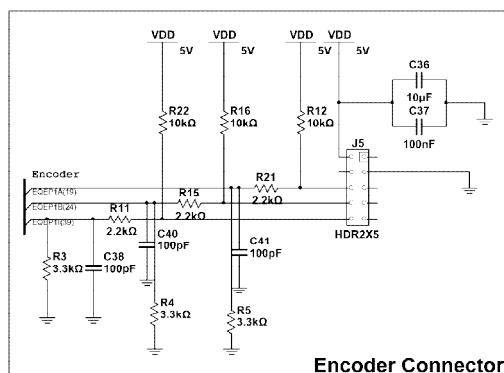


32. ábra: Bluetooth modul bekötése

4.4.5. Szögjeladók illesztése

Mivel a DSP nem képes fogadni az 5 V-os jeleket, ezért egy feszültségosztón keresztül a szögjeladó jeleit a DSP speciális négyszögjelek fogadására alkalmas moduljához (eQEP) kötjük. A jelvezetékeket 100 pF-os szűrőkondenzátorokkal látjuk el. Az elektronika tervezése során figyelembe vettük, hogy a nyitott kollektoros kimenetű jeladók jeleit is fogadni tudjuk.

Mivel a nyitott kollektoros kimeneten alapvetően alacsony logikai jelszint van, ezért egy 10 k Ω -os ellenálláson keresztül a szögjeladó jeleit felhúzzuk az 5 V-os tápfeszültségre, hogy előállíthassuk a magas jelszintet is. A szögjeladók illesztését a 33. ábrán láthatjuk.



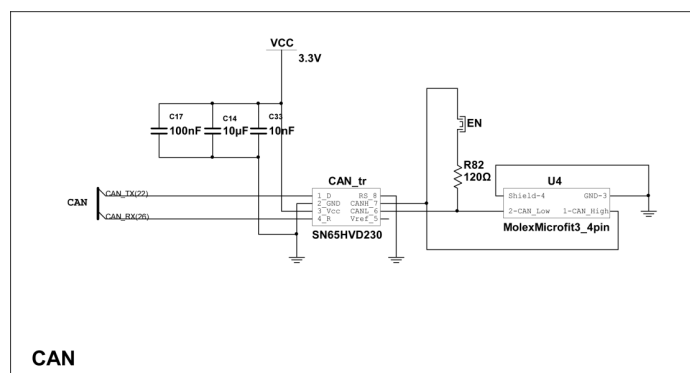
33. ábra: A szögjeladók illesztése

4.4.6. CAN modul illesztése

A tervezett rendszerben a mikroprocesszor és a szervo erősítő közötti kommunikációra CAN buszt használunk. A CAN kommunikáció megvalósítására a DSP eCAN moduljához bekötünk egy SN65HVD230 CAN adó-vevő IC-t. A CAN adó-vevő IC segítségével differenciális jelalakokkal küldjük és fogadjuk a jeleket a szervo erősítő és a processzor között. A CAN kommunikáció sebessége elérheti akár az 1 Mbps sebességet.

A CAN (Controller Area Network) busz rendszert azért fejlesztették ki, hogy a járműveken belüli adatkommunikációt könnyebbé és gyorsabbá tegyék. A CAN busz rendszer lényege, hogy a jeladók egy vezetékpárra vannak felfűzve. A CAN busz rendszer vezérlőelektronika nélküli csomag alapú, prioritásos kommunikáció, ahol mindegyik hálózati eszköznek saját, egyedi címe van. Így elérték azt, hogy minimális adatátviteli sebesség mellett valós idejű (real-time) kommunikációt valósítsunk meg a rendszer működtetéséhez.

A CAN kommunikáció bekötése a 34. ábrán látható.

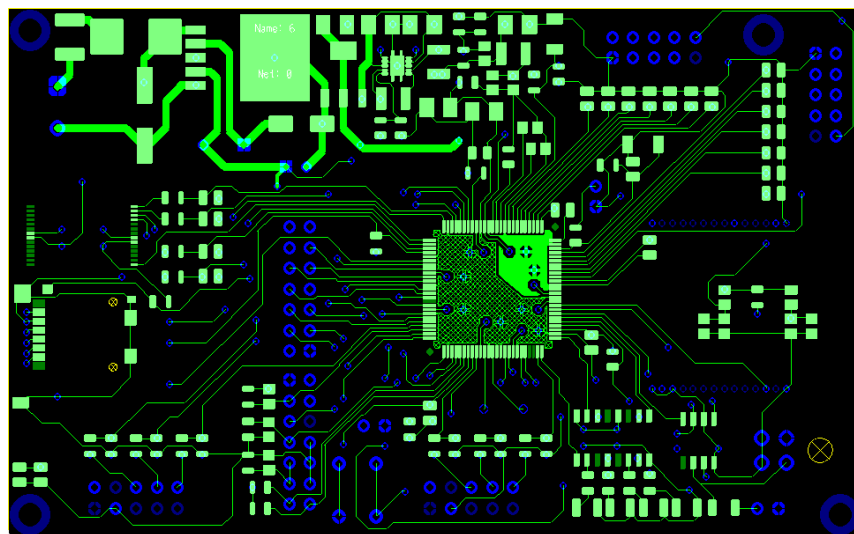


34. ábra: CAN modul illesztése

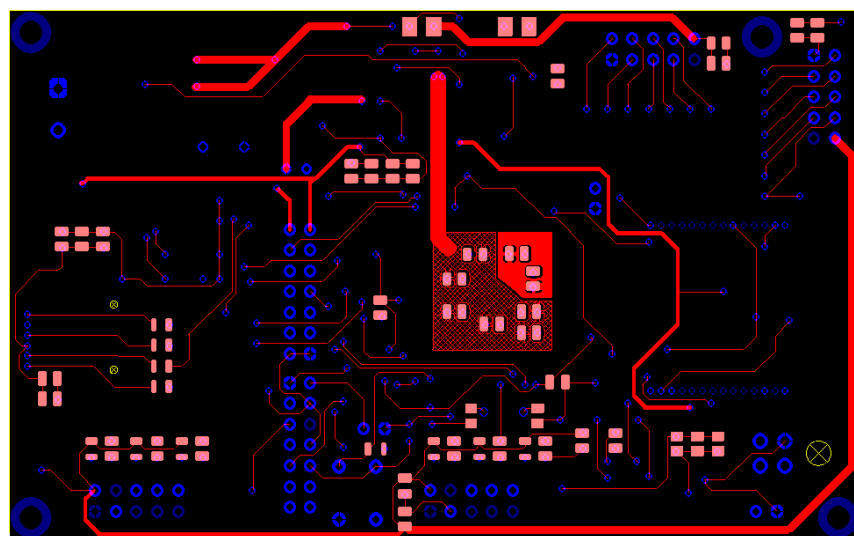
4.5. A vezérlőelektronika nyomtatott áramköri terve

A vezérlőelektronika nyomtatott áramkörét (nyák) két oldalra terveztük. Hasonlóan a mérőkártya áramkörének tervezéséhez, itt is fontos követelmények a már korábban leírtak. (ld. 3.4. fejezet) Emellett szükséges kialakítani a processzor alá a felső nyákoldalra a digitális földfóliát az analóg földfólia sarokkal, valamint a nyák alsó oldalára a magfeszültség fóliát az analóg feszültség sarokkal. Ezzel egyfajta kondenzátor jelleget adva a processzor alatti nyákrésznek, hogy lehetőség szerint zavarmentes, stabil működést biztosítsunk a processzornak.

A vezérlő elektronika felső oldala a 35. ábrán az alsó oldala pedig a 36. ábrán látható.



35. ábra: A vezérlő elektronika felső oldala



36. ábra: A vezérlőelektronika alsó oldala

5. Összefoglalás

A TDK munka során megalkottuk a rendszer linearizált mozgásegyenleteihez analóg esetben az állapot-szabályozást, majd ennek stabilitás vizsgálata során kialakítottuk a teljes rendszerhez tartozó Routh-Hurwitz stabilitási kritériumot.

A stabilitási kritérium felhasználásával megalkottunk egy optimalizáló szoftvert, amely segítségével megtalálhatjuk a megfelelő geometriai összeállítást, amelyet szabályozni tudunk, valamint a szabályozáshoz szükséges nyomaték megadott kritikus nyomaték érték alatt van.

A szabályozó nyomatékigényének megfelelően megválasztottuk a megfelelő beavatkozó szervet, a motorhoz szükséges szervo erősítőt, valamint a szükséges nyomatékigény előállításához megválasztottuk a szükséges áttételezést és kialakítottuk a hajtásláncot.

A megtalált geometriai paramétereknek megfelelően megterveztük a szerkezet geometriáját. A geometria tervezése során kialakítottuk a helyet minden egyes szükséges alkatrésznek, amelyre a működéshez szükségünk van.

Ezek után megterveztük a szükséges mérőrendszert, valamint megválasztottuk az érzékelőket, amelynek segítségével közvetlenül mérni tudjuk, vagy származtathatjuk a szabályozáshoz szükséges szögelfordulás és szögsebesség jeleket. A mérés során használt mozgásérzékelők működéséhez megterveztünk egy mérőkártyát, amely gondoskodik az érzékelők működéséről és a jelek feldolgozó elektronikához való illesztéséről. Valamint elkészítettük a megtervezett mérőkártya kapcsolási rajza alapján a mérőkártya nyáktervét is.

Megterveztük a vezérlőelektronikát, amely tartalmazza a szabályozáshoz szükséges DSP mikroprocesszort, a működéshez szükséges feszültség szintek előállítását. Kialakítottuk az érzékelőkből érkező jelek illesztését a processzorhoz, valamint a mért jelek eltárolásának lehetőségét. A tervezett elektronika tartalmazza a motorhoz kapcsolt szervo erősítővel folytatott kommunikációhoz szükséges eszközöket, valamint a számítógéppel történő kommunikáció lehetőségét.

A TDK munka során megterveztük Segwayen egyensúlyozott inga megvalósításához szükséges geometriai, elektronikai és mérés technikai elemeket. A további munka során megépítjük a szerkezetet, valamint megalkotjuk a szabályozáshoz, adatmentéshez és a különféle kommunikációkhoz szükséges programot.

A megépített szerkezet lesz a mérőrendszer, melynek segítségével az elméleti számításokat ellenőrizni tudjuk. Emellett tovább folytatjuk a modellezést, kiegészítve az eddigi modellt például az érzékelők, illetve a motor modelljével.

6. Irodalomjegyzék

- [1] *Budai Csaba*: Ingaegyensúlyozás Segwayen, szakdolgozat
Budapest, 2010
- [2] *Halas János Zsolt*: Mikrovezérlők alkalmazása, előadás jegyzet
Budapest, 2009/2010 őszi félév
- [3] *Benesóczky Zoltán*: Mikrokontrollerek alkalmazástechnikája, előadás jegyzet
Budapest, 2007
- [4] *J. Geen, D. Krakauer*: New iMEMS[®] Angular-Rate-Sensing Gyroscope
ADI Micromachined Products Division, 2003
- [5] *T. Insperger, R. Wohlfart, J. Turi, G. Stépán*: Balancing using accelerometers and equations with advanced arguments
IFAC-TDS Prága, 2010, No. FP-IT-302
- [6] *Tajti Ferenc*: Öt szabadságfokú humanoid robotkar tervezése és vezérlése, TDK dolgozat
Budapest, 2010
- [7] *Meleg Tamás Koppány*: Marógép mechatronikai tervezése, szakdolgozat
Budapest, 2011

7. Melléklet

A vezérlőelektronika és a mérőkártya tervezésénél felhasznált fontos alkatrészek listája, valamint hozzájuk tartozó katalógus adatlapok hivatkozásai.

- TMS320F2809:
 - Data Manual:
<http://www.ti.com/lit/ds/sprs230m/sprs230m.pdf>
 - Hardware Design Guidelines:
http://www.newark.thinkhost.com/brands/promos/leading_edge/spraas1a.pdf
 - SPI modul:
<http://www.ti.com/lit/ug/spru059e/spru059e.pdf>
 - SCI modul:
<http://www.ti.com/lit/ug/spru051d/spru051d.pdf>
 - eCAN modul:
<http://www.ti.com/lit/ug/spru074f/spru074f.pdf>
 - eQEP modul:
<http://www.ti.com/lit/ug/spru790d/spru790d.pdf>
- TL2575:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl2575hv-adj.pdf>
- TS1117:
<http://www.watterott.net/webradio/TS1117.pdf>
- TPS62400:
<http://www.ti.com/lit/ds/slvs681e/slvs681e.pdf>
- AT45DB642D:
http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc3542.pdf
- WT12:
<http://www.softelectronics.ru/docs/bt/WT12.pdf>
- SN65HVD230:
<http://www.ti.com/lit/ds/slos346k/slos346k.pdf>
- CUI INC AMT 102:
<http://www.amtencoder.com/LinkClick.aspx?fileticket=Jat4EDtyVjw%3d&tabid=215>
- LIS352AR:
http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00259979.pdf

- LY3100ALH:
http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00254115.pdf
- LPR4150AL:
http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00254134.pdf
- MC3487D:
http://ronja.twibright.com/datasheets/line_receivers_driver/mc3487.pdf
- Maxon EC-max 40:
http://www.maxonmotorusa.com/downloads/EC_max_Prospekt_e.pdf
- Maxon Gear GP42C:
http://www.maxonmotorusa.com/downloads/EC_max_Prospekt_e.pdf
- Maxon Encoder MR:
http://www.maxonmotorusa.com/downloads/EC_max_Prospekt_e.pdf
- Maxon Epos P24/5:
http://test.maxonmotor.com/docsx/Download/Product/Pdf/323232_EPOS_P_Hardware_Reference_E.PDF