

KOVÁCS HUNOR ÁDÁM
SZAKDOLGOZAT



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
MECHATRONIKA, OPTIKA ÉS GÉPÉSZETI INFORMATIKA TANSZÉK



SZAKDOLGOZATOK



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
MECHATRONIKA, OPTIKA ÉS GÉPÉSZETI INFORMATIKA TANSZÉK

KOVÁCS HUNOR ÁDÁM

SZAKDOLGOZAT

Szálastakarmány felszedő adapter szenzortechnikai
fejlesztése

Konzulens:

Vincze Bálint

Ügyvezető igazgató, HEVESGÉP Kft.

Témavezető:

Haba Tamás

PhD hallgató

Budapest, 2024.

Szerzői jog © Kovács Hunor Ádám, 2024.



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar

Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék
<https://mogi.bme.hu>

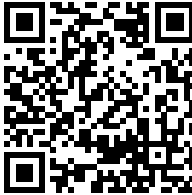
SZAKDOLGOZAT-FELADAT

NYILVÁNOS

AZONOSÍTÁS	Név: Kovács Hunor Ádám		Azonosító: 71604575360	
	Képzéskód:	2N-AM0	Specializáció kódja: 2N-AM0-BI-2017	Feladatkiírás azonosítója: GEMI:2025-1:2N-AM0:P953MO
	Szak:	Mechatronikai mérnöki alapszak (BSc)		
	Szakdolgozatot kiadó tanszék: Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék		Zárávizsgát szervező tanszék: Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék	
	Témavezető: Haba Tamás (78224838890), doktorandusz			

FELADAT	Cím	Szálastakarmány felszedő adapter szenzortechnikai fejlesztése Sensor technology development for a forage harvester's collection header
	Részletes feladatok	Tárja fel a mezőgazdasági gépeken használatos szenzortechnikai, adatfeldolgozási és visszajelzési megoldásokat! Válasszon a szálastakarmány felszedő adapteren alkalmazható fordulatszám meghatározására alkalmazható szenzort! Tervezzon az adapterhez és a szenzorhoz megfelelő adatfeldolgozó és visszajelző rendszert! Vizsgálja meg a tervezett mérőrendszer alkalmazási lehetőségeit üzembiztonsági és diagnosztikai feladatok esetén! Foglalja össze a kapott eredményeket magyar és angol nyelven.
	Hely	A szakdolgozat készítés helye: HEVESGÉP KFT. 3360 Heves, Munkácsy út 4. Konzulens: Vincze Bálint, Ügyvezető igazgató

ZÁRÓVIZSGA	1. záróvizsga tantárgy(csoport)	2. záróvizsga tantárgy(csoport)	3. záróvizsga tantárgy(csoport)
	ZVEGEMIBMIE Irányításelmélet	ZVEGEMIBMBM Biomechatronika	ZVEGEGTBMRO Robotok orvosi alkalmazásai

HITELESÍTÉS	Feladat kiadása: 2024. szeptember 2.		Beadási határidő: 2024. december 6.	
	Összeállította:		Ellenőrizte:	Jóváhagyta:
	Haba Tamás (78224838890) témavezető		Dr. Kiss Rita Mária s.k. tanszékvezető	Dr. Györke Gábor s.k. dékánhelyettes
	Alulírott, a feladatkiírás átvételével egyúttal kijelentem, hogy a Szakdolgozat-készítés c. tantárgy előkövetelményeit maradéktalanul teljesítettem. Tudomásul veszem, hogy jogosulatlan tantárgyfelvétel esetén a jelen feladatkiírás hatálytalan.			
 Kovács Hunor Ádám			

NYILATKOZATOK

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Kovács Hunor Ádám* (P953MO), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezü aláírásommal igazolom, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2024. december 2.

hallgató

Tartalomjegyzék

Előszó	xiii
Jelölések jegyzéke	xv
1. Bevezetés	1
1.1. Feladat bemutatása	1
1.2. Célkitűzések	2
1.3. Áttekintés	3
2. Szakirodalmi áttekintés	5
2.1. Szenzorok megoldásai	5
2.1.1. Mérendő mennyiségek	5
2.1.2. Elmozdulás mérés	5
2.1.2.1. Potenciométer	6
2.1.2.2. Kapacitív szenzorok	7
2.1.2.3. Induktív szenzorok	8
2.1.2.4. Optikai szenzorok	10
2.1.2.5. Ultrahang szenzorok	12
2.1.2.6. Radarok	13
2.1.3. Elfordulás mérés	13
2.1.3.1. Helikális potenciométer	14
2.1.3.2. Forgó Differenciál Transzformátor	14
2.1.3.3. Lemezes kialakítások	15
2.1.3.4. Rezolver	16
2.1.3.5. Szinkrótranszmitter	16

2.1.3.6.	Forgó Induktoszin	17
2.1.3.7.	Giroszkóp	17
2.1.4.	Szögsebesség mérése	19
2.1.4.1.	Digitális fordulatszám mérők	19
2.1.4.2.	Stroboszkópos mérőeszközök	20
2.1.4.3.	Analóg fordulatszám mérők	21
2.1.4.4.	Szögsebesség mérő giroszkópok	22
2.2.	Visszajelzés lehetőségei	23
2.3.	Szabályozás eszközei	23
2.3.1.	Programozási technikák	23
3.	Mérőrendszer fejlesztése	25
3.1.	Szenzorok	26
3.1.1.	Mérendő mennyiségek	26
3.1.2.	Elhelyezés	26
3.1.3.	Szennyeződések	26
3.1.4.	Szervizelhetőség	26
3.1.5.	Kábelezés	26
3.2.	Jelek	26
3.2.1.	Szenzorokból származó jelek	26
3.2.2.	Jelekből adat	26
3.3.	Szabályozás	26
3.3.1.	Szabályozás eszközei	26
3.3.2.	Adatok összehasonlítása	27
3.3.3.	Hibatűrő rendszer kialakítása	27
3.3.4.	Szennyeződés kizárása	27
3.4.	Visszajelzés	27
3.4.1.	Visszajelzés eszközei	27
3.4.2.	Human-Machine interface	27
3.4.3.	Kommunikáció	27

4. Összefoglalás	29
4.1. Alkalmazási lehetőségek	29
4.1.1. Feladat kivitelezésének lehetőségei	29
4.1.2. Üzembiztonsági megoldások	29
4.1.3. Diagnosztikai feladatok kivitelezése	29
Irodalomjegyzék	30
Summary	33
Függelék	35
Mellékletek	37
M.1.	37
M.2.	38

Előszó

~ ~ ~

Köszönetnyilvánítás

A köszönetnyilvánítás ide írható. Ez a sablon a Villamosmérnöki és Informatikai Kar Méreştechnika és Információs Rendszerek Tanszék szakdolgozat és diplomaterv sablonja alapján készült. Köszönöm készítőinek és karbantartóinak a munkájukat.

Budapest, 2024. december 2.

Kovács Hunor Ádám

Jelölések jegyzéke

A ++ a még bővítésre szoruló paragrafusokat jelzi.

1. fejezet

Bevezetés

A mezőgazdasági fejlesztésre napjainkban nagyobb szükség van mint valaha, hiszen a növekedő népesség ellátásához, – a mezőgazdasági területek növekedése nélkül – intenzívebb és produktívabb termelés szükséges. Az előrejelzések szerint több évtizedig a föld népessége növekedni fog [4], ezen felül a termőföld véges, a mezőgazdasági területek növelése és a korlátlan erdőirtás sem fenntartható [3]. Így a már mezőgazdasági termelésre alkalmazott területek termelékenységének növelése elengedhetetlen. Ehhez a sok tényezőes folyamathoz a gépgyártók és mérnökök a technológiai fejlesztés és integráció megvalósításával tudnak hozzájárulni. Ehhez jelen szakdolgozat célja a mezőgazdasági gépek biztonságát és akadálymentes működését fejleszteni, egy szabályozási rendszer fedélzeti integrálásával. Ezt a működési állapot visszajelzésével, a veszélyes folyamatok megelőzésével igyekszik megvalósítani. A dolgozat ezen rendszer kidolgozását, megtervezését, egyes eszközeinek kiválasztását és megfontolását tárgyalja.

1.1. Feladat bemutatása

A szakdolgozatom a szálatakarmány felszedő adapter szenzortechnikai fejlesztése címet kapta. A szálatakarmány felszedő adapter a mezőgazdaságban alkalmazott szerkezet, amely a silózoknak hajtja végre a szálatakarmány összegyűjtését. A silózók olyan mezőgazdasági gépek, amelyek a szálatakarmány (pl.: lucerna, széna) begyűjtését, összevágását és rövidre darabolását ("szecskázását") végzik, mely állat tápként lesz felhasználva. Az adapter a silózóhoz van csatlakoztatva, ezáltal a működtetést a silózó végzi. Innen érkezik az irányító jel, az elektromos feszültség, a hidraulikus energia és a forgatónyomaték. Az felszedőn több tengely is található, a legfontosabb a felszedő, melyen fogakkal történik a szálatakarmány gyűjtése, felette egy csiga helyezkedik el, mely az adapter szélességében tereli a takarmányt a középtengely felé, ahol is a begyűjtés történik. A csigánál található tengelyen helyezkedik el egy nyomatékhatóroló. A

nyomatékhatóról feladata, hogy a túlzott terheléstől megvédje a felszedő adaptert, így ha túl nagy nyomaték érkezik a silózó felől, a nyomatékhatóról szétkapcsol és a felszedő roncsolódása elkerülhető. A nyomatékhatóról szétkapcsolások a benne található tárcsák tapadási súrlódása megszűnik, így elkezdenek csúszni egymáson, amely a tárcsák felületének súrlódásához, hosszabb idő alatt roncsolódásához vezet. A nyomatékhatóról védelme érdekében van szükség egy visszajelző rendszerre, amely a nagy terhelés esetén jelzi az irányítóknak, hogy a nyomatékhatóról megcsúszott. Az én feladatom ezt a rendszert megtervezni, amely a tengelyek fordulatszámának figyelésével érzékelni tudja ha azok eltérnek a beérkező fordulatszámtól, majd a különbség fennmaradásával egy visszajelzést adjon a silózóban tartózkodó irányítónak. A visszajelzés történhet fény, hang vagy mindkettő formájában, a jelzőegységek lehetnek az adapter látható felületein, vagy akár az irányító fülkében is. Abban az esetben ha a fülkében egy kijelző elhelyezése és azzal való kommunikáció megoldható, a fordulatszámok aktuális értékei is megjelenítésre kerülhetnek.

1.2. Célkitűzések

A dolgozat célja, hogy bemutassa egy mezőgazdasági környezetben való rendszer kialakításának megfontolásait, valamint a tervezési folyamat megvalósítását. Ezen felül az elvárásoknak megfelelő rendszerre való javaslatot tegyen, amely egy termékként alkalmazhatóvá váljék a gyakorlatban is. A feladat során több olyan irányadó cél, elv mentén történt a tervezés, amely vagy felhasználói, környezeti igényeket elégít ki, vagy a fenntarthatóság, az életciklus növelését segíti.

- I. Környezettel, szennyeződésekkel való ellenálló képesség. A felszedő adapteren a két fő szennyező a por és az olaj, így olyan rendszert kell kialakítani, amely vagy szigetelve van kellő mértékben, vagy a szennyeződések nem károsítják a működését. Ez megköveteli az eszközök burkolatban, házban történő tárolását, a csatlakozók kellő szigetelését, illetve por- és olajmentes, vízálló eszközök használatát.
- II. Modularitás, cserélhetőség. A jelen kori gazdák egyik panasza a mezőgazdasági gépgyártók felé, a szerelhetőség jogának ("Right to repair") figyelmen kívül hagyása. Ez a gépek szétszedhetőségét, a felhasználó általi javítási lehetőségének csökkenését jelenti, ezáltal a gyártó szakszervizeiben való költséges, idő- és szállítási-igényes javításra kötelezi a gazdákat. A cél egy olyan rendszer kialakítása, amelynek minden alkatrésze cserélhető és hozzáférhető, így bármelyik elem meghibásodása során csak az szorul cserére. Ez a szenzorok csatlakozós, nem kábellel egybeépített változatában, a moduláris, egyszerűen szétköthető szabályozó eszközben, valamint, a vízálló csatlakozók szétszedhetőségében nyilvánul meg.

- III. Támogató tervezés csökkentése. A projekt tekintetében egyszerűsége, a mechanikai tervezés csökkentésére törekvés jellemző, a mechatronikai, rendszer tervezésének előnyben részesítése, valamint a felszedő adapter bonyolításának elkerülése végett. Ez az eszközök a meglévő geometriába való integrálásában, az adapter alkatrészeinek direkt mérésében, és a külön szigetelési és burkolási feladatok csökkentésében látható.
- IV. Biztonság. A biztonságosság mind a rendszer kitartó működésére, mind a környezetnek, üzemeltetőinek megóvására vonatkozik. A projekt során az elektromos berendezések szigetelésére és elzárására, valamint az eszközök külső hatásoktól védésére is hangsúly lett fektetve.

1.3. Áttekintés

A rendszernek 4 alapvető része van: érzékelés (szenzorok), szabályozás, visszajelzés és kommunikáció. Az érzékelés esetében bemutatásra kerül a különböző fordulatszám mérő mechanizmusok közötti különbség, az egyes mechanizmusok előnyei és hátrányai, valamint ezek alapján a célnak megfelelőek is kiderülnek. A szenzorok megvalósítása is tárgyalva lesz, a különböző rendszerekben alkalmazott szenzor kivitelezések, szabványok és megoldások. Ezen felül a szenzorok elhelyezkedése, kábelezése, a felszedő adapterre való alkalmazásuk is ábrázolva lesz. A szabályozás során az ipari eszközök lesznek bemutatva, amelyek a szenzorok adatfeldolgozására képesek, valamint programkódokat, irányítási feladatokat kivitelezni tudnak. Szó kerül a különböző megoldások alkalmazásainak lehetőségéről, egymáshoz képesti összehasonlításuk is megtörténik, az egyes szabályozó eszközökkel járó rendszerbeli változtatás, valamint a rendszer igényei szerinti szabályozó eszköz változása is feltérképezésre kerül. Végül a szabályozás eszközeinek elhelyezése, biztonságtechnikai megfontolásai és időállóságának kialakítása is bemutatásra kerül. A visszajelzés a rendszer mindennapokban érzékelhető része, ugyanis ez az emberrel való kommunikációjának a platformja. A jelzésnek több módszere áll rendelkezésre, melyek között a rendszer adottságai valamint a felhasználó igényei választanak. Az egyszerű fényjelzések, hangjelzésektől egészen a kijelzőkön megjelenő részletes információkig bemutatásra kerül, melyeknek milyen igényei vannak, illetve melyik praktikus jelen felhasználásunkban. A kommunikáció fogja össze a projektet, biztosítja az egyes részek közötti információáramlást. A kommunikációs protokollok, metódusok meghatározzák a rendszer többi részének minden elemét, a szenzorok feldolgozásának sebességétől, a szabályozó elem kiválasztásán át, a visszajelzés platformjáig. A rendszerünk egészének tervezése során bemutatásra kerül a kommunikáció módszereinek hangsúlya, lehetőségei, valamint a környezeti hatásokkal szemben való védelem kritikus szerepe is.

2. fejezet

Szakirodalmi áttekintés

2.1. Szenzorok megoldásai

A szenzorválasztás a tervezési folyamat egyik központi eleme. Meghatározza milyen technológiákkal, módszerekkel hajtjuk végre a méréseket, és ezáltal milyen kapacitású, programozású rendszert kell válasszunk. A szenzorokat érintő kutatómunka ezt a választási folyamatot segíti elő, hiszen az összes népszerű lehetőség tudatában lehet egy informált döntést hozni. ++

2.1.1. Mérendő mennyiségek

A feladatom során, a nyomatékhatároló csúszásának meghatározásához az azt megelőző és azutáni tengelyek fordulatszámának összehasonlítására van szükség. A harmadik fordulatszám-mérés a felszedő tengelyen történik meg, kifejezetten az operátor informálása céljából. Egy tengely fordulatszámának mérésére több megközelítés is létezik. Lehetséges a tengely elfordulásának közvetlen mérése, akár fordulatonként egyszer történő jeladás regisztrálása, vagy a tengely kerületén érzékelhető folyamatos változás. A fordulatszám más mért mennyiségekből is származtatható, például integrálás útján gyorsulásmérésből, vagy deriválással szögelfordulásból, azonban ezeknek a pontossága nem minden esetben megfelelő, valamint a számítási igénye is magasabb az ilyen módon származtatott jeleknek [8].

2.1.2. Elmozdulás mérés

Az elmozdulás egy tengely mentén való mozgást jelent. Ennek mérése általában egy adott tartományon belül alkalmazható, így folyamatos elmozdulás mérésére a szenzo-

rok nagy része nem alkalmas. A fordulatszám mérés esetén az elmozdulás szenzorok felhasználása általában a kerület mentén történő távolságbeli különbség érzékelésére valósul meg. Erre a kerület menti geometriát (pl. fogaskerekek), egy segédlemezzel kialakított változást, vagy akár egy felhelyezett jeladó (pl. mágnes) érzékelés is mérhető.

2.1.2.1. Potenciométer

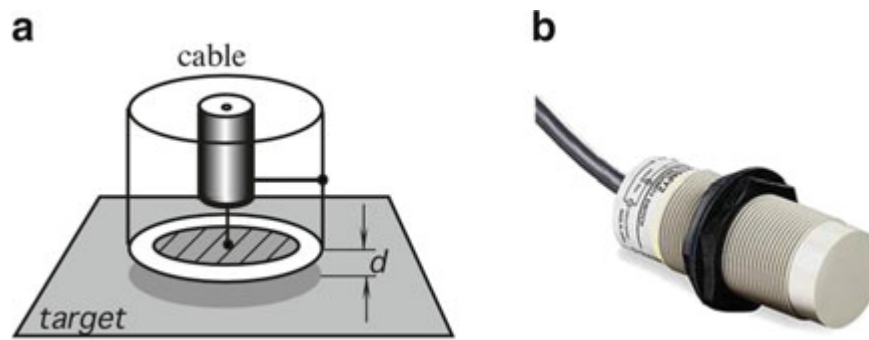
Az elmozdulás vagy pozíció érzékelésének alapvető szenzora a potenciométer, amely akár lineáris, akár elfordulás mérésére is alkalmas. A potenciométer működési mechanizmusa a vezetékek ellenállásán alapszik. Egy vezeték ellenállása lineárisan növekszik a hosszával, így a hosszának változása a rajta eső feszültségen keresztül mérhető. A hosszváltozás eléréséhez egy csúszka teremt kapcsolatot a vezetékkel, amelyen a vezeték végéhez képesti potenciált mérjük. A potenciál a 2.1 összefüggésből kapható meg, ahol E a tápfeszültség, d az elmozdulás, D pedig a teljes elmozdulás [2].

$$V = E \frac{d}{D} \quad (2.1)$$

A potenciométeres szenzoroknak többféle megvalósítása is létezik. A legalapvetőbb lineáris vezeték elvén egy tekercset is lehetséges vezetékként használni, így valamivel pontosabb, nagyobb felbontású érzékelést eredményez. Léteznek potenciálmérés alapú nyomásmérő, valamint piezoelektromosságon alapuló deformáció mérésre alkalmas cellák [2]. Az elektromos potenciál alapú szenzorok széles felhasználásuk mellett rendelkeznek számos hátránnyal is:

- Mechanikai terhelés által súrlódás
- Fizikai érintkezés szüksége
- Korlátozott sebesség
- Veszteségek miatti hő termelődés
- Szennyeződések és kopásoknak való kitettség

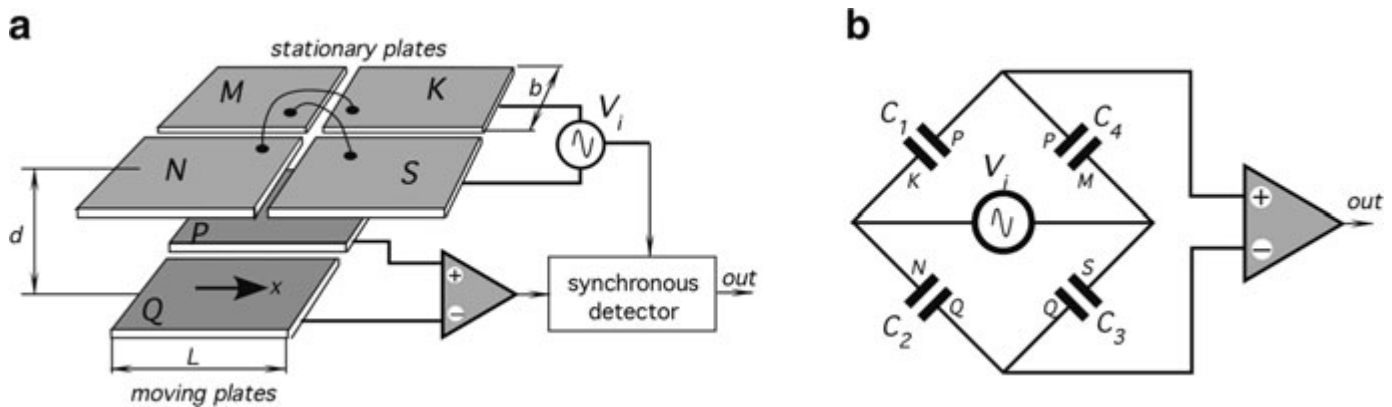
A fizikai kontaktus elkerülésére alkalmaznak mágneses elven működő potenciométereket. Ezeknél a szenzoroknál a csúszka egy ferromágneses bevonattal van ellátva, a vezeték alatt pedig egy mágneses réteg helyezkedik el, amelyet a csúszka vonzása összeérint a vezetékkel, így zárva az áramkört és feszültséget adva az eszközre.



2.1. ábra. Monopoláris, egylemezes kondenzátor vezető felületek távolság mérésére alkalmazva. (a) metszetként; (b) kívülről [2].

2.1.2.2. Kapacitív szenzorok

A kapacitív érzékelők elmozdulás és pozíció meghatározására is alkalmasak, a későbbiekben ismertetésre kerülő mágneses alapú szenzorokkal ellentétben bármilyen anyag jelenlétét képesek érzékelni. A kondenzátorok kapacitása fordítottan arányos a fegyverzetek közötti távolsággal, ami meglapozza a kapacitív szenzorok működését. A kapacitás változását a távolság változása vagy a fegyverzetek között található közeg változása okozhatja, amely a gyakorlatban elmozdulásmérésre alkalmas, a kapacitás változásának elektromos jellé alakításával. A kapacitív szenzoroknak több kialakítása is alkalmazható elmozdulásmérésre, valamint egy szenzorok részeként, ahol az elmozdulást egy erő, nyomás vagy hőmérséklet változásainak dekódolására alkalmazhatják. A monopoláris kapacitív érzékelő egy kondenzátor alkalmazására értendő, ahol két fegyverzet mozgása regisztrálódik. Az egyik fegyverzeten mérhető az elektromos jel, a másik fegyverzet azonban lehet például egy vezető felület is, mint ahogy a 2.1 ábrán látható szenzor kialakítása is mutatja. Ezek a szenzorok akár 40 kHz-es mérési frekvenciát is képesek produkálni, valamint nem vezető felületeken is működőképes, habár alacsonyabb pontossággal. Egy másik kialakítás a differenciál kapacitív érzékelő, amely során három fegyverzet két egyforma térrészt választ el. A középen elhelyezkedő lemez legkisebb mozgása során is megjelenik az így kialakult két kondenzátor kapacitásán, és egy változó jellel táplálva a pontos elmozdulás meghatározására is képes. Egy kapacitív hidat látunk a 2.2 ábrán. A szenzor két párhuzamosan elrendezett elektróda készletből állnak, konstans d távolsággal közöttük, melyek közül a négy lemezből álló készlet statikus, míg a két fegyverzet elmozdulhat. A négy lemez keresztbe van kötve, így kialakítva az úgynevezett Wheatstone-híd architektúrát, melynek előnye, hogy a mérés linearitását megtartja, valamint a zajok megjelenését is minimalizálja. A párhuzamos lemezek kapacitása arányos a vele szemben lévő fegyverzetek területével, így a két kondenzátor egymáshoz képesti kisebb elmozdulását vagy elfordulását is képes detektálni.



2.2. ábra. Párhuzamos lemezű kapacitív híd szenzorbeli elhelyezése (a) és áramköri rajz (b) [2].

2.1.2.3. Induktív szenzorok

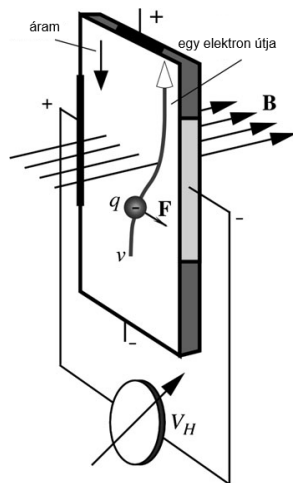
Induktív szenzorok azok, amelyek mágneses tereket tulajdonságait érzékelik, és így csak **mágnesezhető** anyagok detektálására alkalmasak. A rozsdamentes acél, alumínium, réz, műanyag, kerámia és fa anyagok áthatolhatóak a mágneses terek szempontjából, így ezekből az anyagokból készült rétegeken keresztül is érzékelhetőek a mágnesezett anyagok. Az induktív szenzorok ezáltal működnek zajos, szennyező (poros, olajos) környezetben is, valamint ezáltal az érzékelőkön a helyzetnek megfelelő anyagból készült burkolatokat lehet alkalmazni, amely veszélyesebb, korrozívabb helyzetekben is megengedi működésüket.

Több elv alapján és több kialakítással is érzékelhetjük a mágneses tereket.

- **Elektromágneses indukció.** Két tekercs között mágneses fluxus biztosít kapcsolatot, amelyhez kell az első (primer) tekercs változó áramú gerjesztése, mely így - fázisban - megjelenik a második (szekunder) tekercsen is (önindukció elve). Ezt a kapcsolatot tudják befolyásolni különböző ferromágneses anyagok, a fluxus utakban való mozgásuk során, ezáltal a fluxus módosításával. Ez a fluxusbeli változás mérhető feszültség változást eredményez a szekunder tekercsen. Ez adja a lineáris (és a forgó) változó differenciális transzformátor (LVDT - Linear Variable Differential Transformer) szenzorok alapjait, amelyek ferromágneses anyagok lineáris- vagy forgómozgását képesek érzékelni a két tekercs közötti mágneses térben. Ennek a kialakításnak számos előnye van, például az érintkezésmentes kialakítás, elhanyagolható hiszterézis, így kevés feszültségvesztés a működés során, alacsony kitérés zajoknak és interferenciáknak, robusztus kialakítás és infinitezimális felbontás lehetősége [2].
- **Örvényáramok.** Az örvényáramok két esetben jelennek meg: amikor egy vezető elmozdul egy elektromágneses térhez képest, vagy a mágneses tér változása következtében. Az örvénylő elektronok a vezető anyagban saját elektromágneses

mezőket indukálnak, amelyek az eredeti mágneses teret csökkentik. Ha erősebb a mágneses tér, vagy nagyobb a vezetőképessége az anyagnak, vagy gyorsabban változik a mágneses tér, akkor arányosan több örvényáram jön létre. Ezáltal olyan vezető anyagok elmozdulását is lehet érzékelni, amelyek nem mágnesesíthetők. Az ezen elven alapuló szenzorok két tekercset alkalmaznak, az egyik referenciaként szolgál, a másik pedig érzékeli a vezetőben létrejövő örvényáramokat, a mágneses ellenállás megnövekedéséből. A két tekercs összehasonlítása során a mágneses ellenállás különbségből adódik a vezető felület távolsága. Az örvényáramok azonban egy adott vastagságú anyagban számottevőek, így a vékony filmszerű illetve bevonattal ellátott anyagok detektálására nem alkalmasak az ilyen szenzorok. Hasonló elven az örvényáramszenzorok nem csak elmozdulás, de távolság és anyagvastagság meghatározására is alkalmasak. Az érzékelő tekercsek akár 2-3 mm-es átmérőtől 25 mm-ig terjedhetnek, így nagy mérési tartomány lefedésére képesek. A nem mágneses vezetők érzékelése miatt alkalmas olyan magas hőmérsékleten való érzékelésre, ahol az anyagok elvesztik mágneses tulajdonságukat (Curie hőmérséklet felett), valamint vezető folyadékok, így folyékony fémek is érzékelhetők az örvényáramszenzorokkal. További előnyei, hogy nincs fizikai kapcsolatra igény az detektáláshoz, így a terhelés mindig alacsony a szenzoron [2].

- **Hall-effektus.** A Hall-effektus szenzorok lényegében a mágneses terek nagyságát képesek mérni. A szenzorban egy vezető anyagból készült lemez merőlegesen áll a mágneses térre, ahogy azt a 2.3 ábra is szemlélteti. Ha a vezetőben áram folyik, az elektronokra a mágneses mező oldalirányú erőt fejt ki (Lorentz-erő), ezáltal a lemezben töltésmegoszlás jön létre, amely a két szélén Hall-feszültségként mérhető [1]. A Hall érzékelős pozíciómérés során egy mágneses mezőt biztosítunk a szenzorban, amelynek a nagysága változik egy ferromágneses test jelenlétében. A szenzortól való távolság pedig, az így indukált mágneses tér módosulásából eredő feszültség változásból következik [6].
- **Induktoszin** A lineáris induktoszin (angol: linear inductosyn) egy precíziós eszköz, amelyet szerszámgépek irányításánál alkalmaznak, a 2,5 μm pontossága miatt. A szenzor két mágnesesen kapcsolt, levegővel elválasztott alkatrészről áll, egy sínről és egy csúszkából, melyeknek elrendezését az 2.4 ábrán láthatjuk. A sín a mérés tengelyének mentén van elhelyezve, a csúszka pedig a mozgó eszközön, szerszámon. A sín felületén – amely több méter is lehet –, üveg alapba egy fém szál van elhelyezve négyzethullám alakban, amely szinuszos feszültséggel van gerjesztve. A csúszkában található tekercsekben feszültség indukálódik, amely egy négyzethullámon belül pozicionálja a csúszkát (nagyjából 2 mm). Mivel ez az egy



2.3. ábra. Hall-effektus szenzor működési elve [6].

hullámhossznyi mérési tartomány igen csekély, a lineáris induktoszin általában egy másodlagos kevésbé pontos távolságmérővel van párosítva [8].

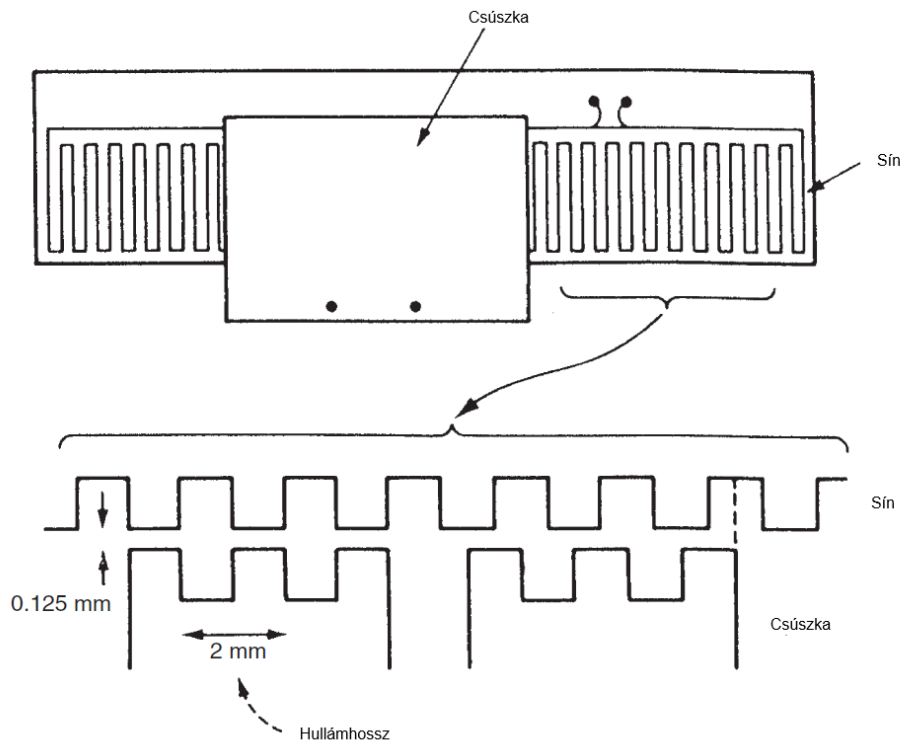
Összességében a mágneses szenzorok előnye, hogy nagy felbontással és megbízhatósággal dolgoznak, valamint nincs szükségük mechanikai kapcsolatra a mérés véghezviteléhez. Azonban nagyrészt csak mágneses anyagok detektálására képesek (némelyik vezetőkön is működik), és a mérési távolságuk általában limitált.

2.1.2.4. Optikai szenzorok

A pozíció és elmozdulás mérésére alkalmas optikai szenzorok általában legalább 3 komponensből állnak: egy fényforrás, fényérzékelő és a fényt irányító eszközök, mint a lencsék, tükrök és optikai szálak. Az optikai érzékelők előnyei az egyszerűségük, a relatív nagy mérési tartományuk, valamint a terhelés és érintés-mentes mérés. Ezen felül a mágneses és elektrosztatikus zajok nem befolyásolják működésüket, így az erre érzékeny környezetekben is remekül alkalmazhatóak [2].

Az optikai szenzorok különböző kialakításuk szerint néhány fő kategóriába sorolhatók.

- *Optikai híd.* A korábban említett Wheatstone-híd elrendezés alkalmazható akár a fotodetektorokra is. Egy detektor minden negyedében egy fényérzékelő, a híd elrendezésnek megfelelően bekötve, ezáltal a negyedek közötti fényerősség különbség jelenik meg feszültségkülönbségként. A jel felhasználása pozíció meghatározásához egy olyan optikai rendszer kialakítása szükséges, ahol az elmozdulás következtében a megjelenő fénysugarakat a negyedek egyikére irányítják.
- *Polarizáció.* A polarizált fényről akkor lehet beszélni, ha a fotonok azonos irányba álló mágneses és elektromos terekkel rendelkeznek, amelyet egy polarizáló szűrővel lehet létrehozni. Ha visszaverődik egy polarizált fény, általában a fémes



2.4. ábra. Lineáris induktoszín sematikus rajza [8].

felületekről azonos irányban teszi, nem fémes anyagoknál pedig megváltozhat a polarizáció iránya. Így bizonyos anyagok kizárását vagy mérését lehetővé teszi a polarizációs filterek alkalmazása a fényforrás után (kimenet) és a detektor előtt (bemenet).

- *Fabry-Pérot interferométer.* Ennek a szenzornak a működéséhez egy Fabry-Pérot optikai üregre van szükség. Az üreg két szemközti oldalát tükrök borítják egymástól L távolságra. Az üregbe bevilágítva egy ismert fényforrással, a fotonok visszaverődnek mindkét tükrő felületéről, így eltárolva a fényt. Bizonyos frekvenciák azonban ki tudnak jutni az üregből, amit a két tükrő távolsága határoz meg [2]. A kitérő fény frekvenciájának mérésével lehetséges meghatározni a két tükrő távolságát, így nagy felbontású elmozdulásmérést végezve, mely főleg nyomás és hőmérséklet változás detektálására alkalmas.
- *Rácsérzékelő.* A fényforrások intenzitásának beállítását el lehet végezni két rács átfedésének állításával. Az egyik rács a jel 50%-át kitakarja, ezzel tökéletes átfedésben a második szűrő nem módosít ezen, azonban az elmozdulásával fordítottan arányos a maradék intenzitás. Az elmozdulás nagy tartományon is mérhető ismétlődő intenzitásváltozásokkal, azonban nagy haszna van tárcsák forgómozgásának mérésénél, amely a későbbi szekciókban lesz tárgyalva [2].

- *Lineáris optikai szenzor.* Az infravörös tartomány közeli frekvenciákkal való mérés akár rövid vagy hosszú távú optikai mérésre is alkalmazható. Az infravörös LED (fény kibocsátó dióda) ismert szélességű impulzust bocsát ki, így az intenzitása ismert. A kibocsátott fényre merőlegesen, a LED-től adott távolságra elhelyezkedő detektor a fény intenzitás felhasználásával egy áramerősség kimenettel biztosítja a távolság háromszögelésének lehetőségét [2]. Az infravörös fény népszerű alkalmazása kis távolságoknál közelségérzékelőkben jellemző. Egy bizonyos távolságon belül a detektorba érkező visszavert fény intenzitása átlépi a határértéket, így a fototranzisztor vezető állapotba kerül és jelet ad [7].

Az optikai szenzorok hátránya, hogy fizikai szennyeződésekre, és a fényt továbbító közeg sűrűségére érzékenyek lehetnek. Ennek kiküszöbölésére alkalmazhatóak az optikai szálak, amelyek a detektor és a fényforrás között egy tökéletes visszaverő környezetet biztosítanak, azonban ezek használata limitálhatja az optikai szenzorok alapvetően széleskörű alkalmazási lehetőségeit.

2.1.2.5. Ultrahang szenzorok

Az ultrahangos energiával rendelkező szenzorok a távolság- és sebességmérésben is nagy népszerűségnek örvendenek, a egyszerű kialakításuk és költséghatékonyságuk miatt. Az ultrahang szenzorok az emberi hallás felett, 20 kHz körüli mechanikai akusztikus hullámok kibocsátásán és érzékelésén keresztül működnek. Ezek felhasználása során lehetséges transzmissziós vagy visszaverődéses rendszerek kialakítása is. Visszaverődő hullámok a sebességmérés területén használatosak, mivel a mozgó tárgyak a visszaverődő jelek hullámhosszát módosítják – távolodva hosszabbítják, közeledve pedig rövidítik (Doppler effektus) – [2]. Mivel ezek a jelek terjedési sebességei jóval alacsonyabbak mint a korábban említett elektromágneses sugarak, a mérésük is egyszerűbben és költségtakarékosabban megoldható. Az 2.2 egyenletben látható a távolságmérés számítása, az említett t idő, a hullám adott közegbeli terjedési sebessége, valamint a Θ visszaverődési szög függvényében. Amennyiben a Θ jeladó és -vevő közötti visszaverődési szög elhanyagolhatóan kicsi (tart a 0-hoz), az egyenletben szereplő $\cos \Theta \approx 1$ lesz, így a távolság valójában csak a sebesség és idő függvényeként jelenik meg.

$$L_0 = \frac{vt \cos \Theta}{2} \quad (2.2)$$

A mechanikai hullámok képesek a gáz, folyadék vagy szilárd halmazállapotú közvetítő közegekben is terjedni, azonban a terjedési sebességük a közeg sűrűségétől függ, amely különböző közegek detektálására ad alapot (például víz magasságának mérése). Az elektromágneses hullámokkal ellentétben, fizikai mozgás során lehetséges mecha-

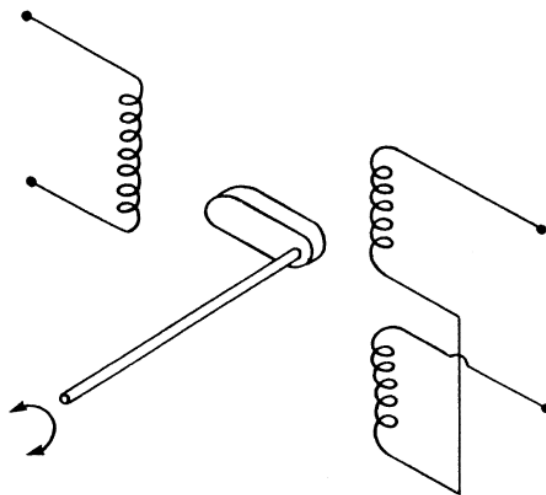
nikai hullámokat generálni. Az ultrahang esetében ez piezoelektromos kerámiákkal valósítható meg, amelyek elektromos gerjesztés hatására méretüket változtatják. A piezoelektromos hatás visszafelé is működik, így a fizikai erőhatás mozgására elektromos jeleket generálnak a kerámiák, amelyek így az érzékelési feladatot is képesek ellátni [2]. Az ultrahangos szenzor előnye, hogy megfizethető, egyszerű kialakítású, nincs szüksége fizikai kapcsolatra és a legkülönbözőbb anyagokon keresztül is alkalmazható. Azonban a mérési frekvenciája korlátozott a jel oda-vissza terjedésére, valamint a közeg tulajdonságai – hőmérséklete, páratartalma – merőben befolyásolják a mérés menetét.

2.1.2.6. *Radarok*

A radar technológiák közül a kis távolságok mérésére a mikrohullám-impulzus radar alkalmazható. Ez a technológia fehér zaj emittálását végzi rövid impulzusokban. Mind-egyik kibocsátott zaj adott ideig tart, azonban a kibocsátás ideje véletlenszerű. Ezt a magas frekvenciás rádióhullámokat egy antenna továbbítja a levegőben, majd érzékeli a visszaérkező impulzusokat. A tárgyról visszaverődő zaj csomagok között eltelt időt felismeri az azt kibocsátott szenzor, így a kibocsátás és érzékelés között eltelt időből lehet a távolságot számolni. Mivel számítható, hogy milyen intervallumban kell visszaérkezzenek a rádióhullám-impulzusok, a mikrohullám-impulzus radar alacsony energiafogyasztással operál. További előnye, hogy a kibocsátott fehér zaj detektálása és megzavarása közel lehetetlen. A véletlenszerű impulzus eloszlásnak köszönhetően az interferencia esélye is nagyon kevés, valamint a radar közel 10,000 impulzus átlagolását végzi, így egy interferencia hatástalan lesz a végső jel előállításában.

2.1.3. *Elfordulás mérés*

Az elfordulás egy tengely körüli mozgás, amely az elmozduláshoz hasonlóan általában véges szögben mérhető egy folytonos szenzorral. Az elfordulás mérésére azonban lehetséges **végtelenhez tartó mérési eljárásokat** kialakítani, akár az elmozdulás mérésnél említett technológiák felhasználásával is. Az elfordulás regisztrálása egy integrálással, vagy ekvivalens művelettel szögsebesség, vagyis fordulatszám méréssé alakítható, a kérdés valójában a pontosság és energiahatékonyság az így kialakított szenzoroknál. A következőkben bemutatásra kerülnek a legelterjedtebb szögelfordulás mérésére alkalmas technológiák és módszerek.



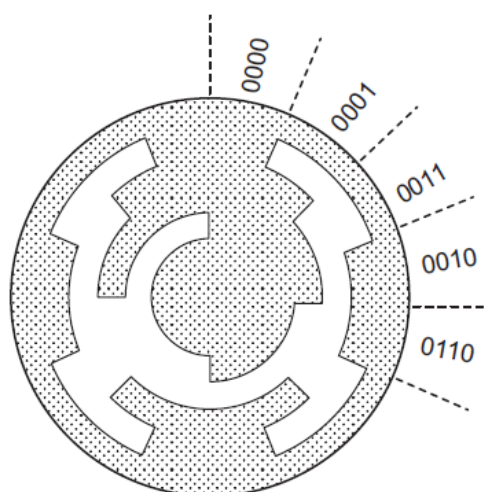
2.5. ábra. Forgó változó differenciál transzformátor elvi rajza [5].

2.1.3.1. Helikális potenciométer

A 2.1.2.1 szekcióban említett ellenállás alapú elmozdulásmérés analógiája a spirális vagy helikális potenciométer. A szenzor működési elve megegyezik a korábbival, azonban egy kör kialakításban, így a lemez és a kapcsok is ezt a mozgást tükrözik. Az elfordulást lehetséges $0-360^\circ$ között mérni egy kör kerületén, vagy akár annak egy részletén is, azonban ha 360° fölötti mérésre van szükség egy spirális szalagot szokás alkalmazni, amelyek akár 60 fordulatot is képesek mérni [5]. A mechanikai rendszerekben fellelhető áttételek – fogaskerékrendszer, szíjhajtás, csigahajtás – a spirális potenciométereknél is alkalmazhatóak, a mérési tartomány, vagy akár pontosság megsokszorozására, ezáltal a szenzor teljesítményét jelentősen megnövelve. Az elmozdulás méréséhez alkalmas szenzorhoz hasonlóan, a potenciométer lineáris karakterisztikájú, vagyis lineárisan arányos az elfordulás az ellenállás mértékével, azonban a szennyeződéseknek és a fizikai kopásoknak szintén nagy kitettség jellemzi.

2.1.3.2. Forgó Differenciál Transzformátor

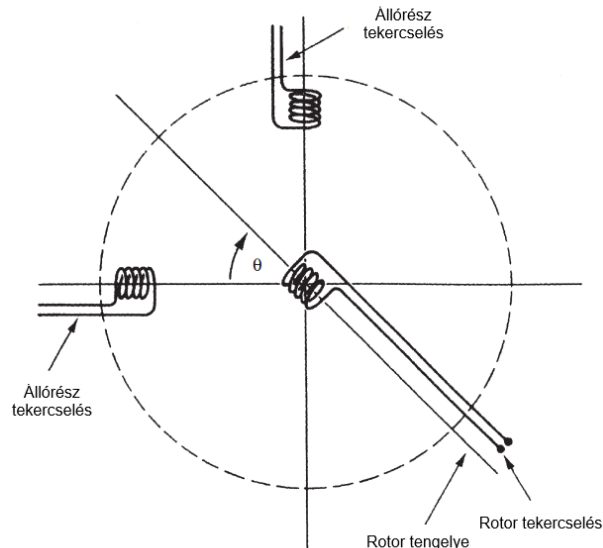
Az 2.1.2.3 fejezetben említett forgó változó differenciális transzformátor (RVDT - Rotational Variable Differential Transformer), a lineáris változatától csak abban különbözik, hogy a két tekercs közötti kapcsolatot a mag forgása módosítja, nem a lineáris mozgása, ahogy ezt a 2.5 vázlat is ábrázolja. Az induktív szenzorok, így az RVDT élettartama is hosszú, kevés kopás és szennyeződés lép fel, azonban szükség van a tengely megfelelő alkatrészének mérésére, esetleg annak kialakítására.



2.6. ábra. Gray kód megvalósítása tárcsán [5].

2.1.3.3. Lemezes kialakítások

A forgás mérésére kialakíthatóak tárcsák, amelyek egy bizonyos jelet tartalmaznak a forgás során. Ezek lehetnek inkrementális kialakításúak, amelyek bizonyos szögelfordulásonként jelet adnak, illetve kódoltak, ahol a kör kerülete mentén kódok elrendezéséből egyértelműsíthető a lemez pozíciója. A technológiák nyújtotta lehetőségekre a **legoptimálisabb** kódolási forma a bináris kód, amely 0 és 1 karakterek sorának ábrázolásával kódol különböző egységeket (amelyeket számoknak szokás dekódolni). Jellemző megoldás a Gray kód, amelynek előnye, hogy a kör kerületére felírva két szomszédos körcikk között csak egy helyi-értéken módosul a mintázat, ahogy ezt a 2.6 ábra is illusztrálja. A kódok olvasása történhet optikai úton, ahol egy adott szélességen a logikai 1-et kódolja az érzékelés, a logika 0-át pedig, ha nincs jel. Az optikai megoldások lehetnek egyutas, illetve reflexiós szenzorok, amelyeknél áteresztő és takaró, illetve reflektív és elnyelő sávok kódolják a lemez pozícióját [5]. Az érintkezés alapú elektromos elvű lemezes szenzor vezető és szigetelő szegmensek detektálásán keresztül működik. A lemez egyik oldalán egy alacsony feszültség táplálja, a másik oldalon adott sávokhoz tartozó szénkefék tartoznak, így olvasva külön az egyes cellákat. Az outputok az egyes sávokon olvasott feszültségek alapján magas illetve alacsony között változnak. A mágneses megoldás érintkezésmentes, szennyeződéseknél ellenálló és szélsőséges környezetben is alkalmazható. A lemez hátoldalán tórusz alakú állandó mágnesek helyezkednek el minden olvasandó sáv helyén, ezáltal nagy pontosságot engednek meg. A tárcsán mágnesesen vezető és nem vezető cellákon megy keresztül, vagy áll meg a mágneses fluxus, amelyet a túloldalon található apró tekercsek érzékelnek, ahol szintén magas és alacsony feszültség kódolja a jeleket. A különböző technológiák széleskörű alkalmazásokat tesznek



2.7. ábra. Egy tekercses rezolver elvi sematikus ábrája [5].

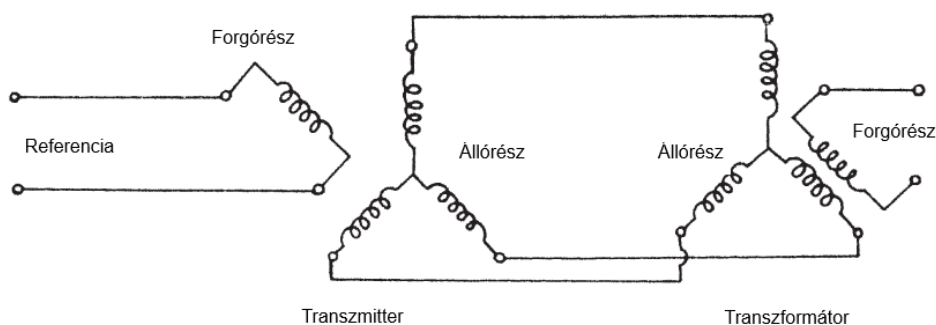
lehetővé, azonban a tárcsás kialakítás limitálja a beszerelhetőséget, valamint a költséget is megnövelik a különböző alkatrészek.

2.1.3.4. Rezolver

A rezolver (angol: Resolver) felépítésre hasonlít egy AC motoréhoz. Két fő alkatrésze egy állórész (sztátor), amelyhez két tekercs tartozik, valamint egy forgórész (rotor), amelyhez tartozhat egy vagy két tekercs is. A szerkezet átmérője általában a 10 és 100 mm között helyezkedik el, amelynek a 0,1%-át képes felbontásban elérni. A két alkatrész forgása indukción alapul, a kialakításának sematikus rajzát a 2.7 ábra mutatja. A két álló tekercs merőleges egymásra, a rotoron található (szinuszosan gerjesztett) tekercselés pozíciója függvényében változik a sztátor tekercseken olvasható kimeneti feszültség.

2.1.3.5. Szinkrótranszmitter

A rezolverhez hasonló elven működik a szinkrótranszmitter (angol: Synchro), vagy rövidebben szinkró. Felépítésében az állórész három tekercse különbözteti meg őket, a rotornak szintén egy vagy két tekercselése bevett a gyakorlatban. A tekercsek a kör kerületén egyenlően elosztva, 120° -t zárnak be egymással, ez az aszimmetrikus tekercselés a felbontás megnövekedését eredményezi, ami 0,5%-ot jelent. A szinkró egymagában képes elfordulást mérni, de egy gyakrabban alkalmazásában párban használják, a 2.8 ábrán látható kapcsolásban, nemcsak pontosabb elfordulásmérést eredményez, de akár érintkezésmentes adatátvitelre is képes. Ennek a szerkezetnek a neve Selsyn-transzmitter,



2.8. ábra. A Selsyn-transzmitter elrendezése [5].

amelyben a két rész elnevezése szinkrótranszmitter és szinkrótranszformátor. A transzformátor álló rotorján adott bemeneti feszültség által indukált mágneses tér, az összekapcsolt sztátorokon keresztül megjelenik a transzmitter rotorján, ahol ugyanazt a szinuszos feszültséget tudjuk mérni, egy fáziseltolással, amely egyenlő a két rotor közötti szöggel. Így alkalmazható információátvitelre a Selsyn, akár nagyobb távolságokon keresztül is.

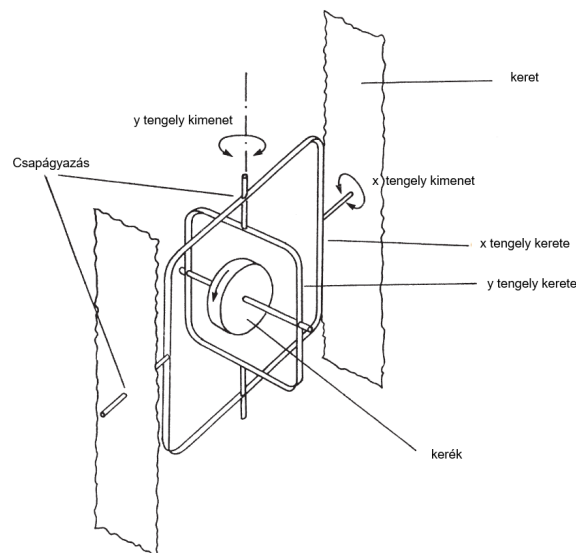
2.1.3.6. Forgó Induktoszin

Az elfordulásmérésre alkalmazható induktoszin a lineáris változatához (2.1.2.3 szekció) hasonló elven, eltérő kialakítással működik. A szenzor egy rotor és egy sztátor oldali tárcsából áll, amelyeken két négyzethullám alakú szál megy végig a felületükön. A tárcsák átmérője általában 75 és 300 mm közé esik, és 0.05 szögperc felbontással rendelkezik, azonban a lineáris induktoszinhez hasonlóan a mérési tartománya rendkívül rövid, így egy segédmérőeszközhöz van szüksége a működéshez.

2.1.3.7. Giroszkóp

A giroszkópok a szögelfordulás valamint a szögsebesség mérésére is egyformán alkalmasak, megvalósításuk lehetséges mechanikus és optikai úton is, azonban itt az elfordulás mérésére alkalmas szenzorok lesznek tárgyalva, a szögsebességet mérő giroszkópok egy későbbi fejezetben kerülnek ismertetésre.

A *mechanikai* giroszkóp fő alkatrésze egy motorral meghajtott nagy impulzusmomentummal rendelkező kerék, amely a forgástengelyt a perdületének köszönhetően állandó helyen tartja, így referenciaként tud működni. A szenzor külső szerkezete van hozzáerősítve a mérendő testhez, a kimenet pedig a rögzített keret a kerék forgástengelyének hajlásszögének mértéke lesz. A szögelfordulás mérésére kétféle kialakítás létezik, a szabad- és integráló giroszkóp (angol: free, rate-integrating/integratin gyroscope). A szabadon mozgó mechanizmus közvetlen elfordulás mérésére képes, két merőleges



2.9. ábra. A szabadon mozgó giroszkóp kialakításának sematikus rajza [5].

tengelyen, amely két tekercsel ellátott keret alkalmazásán keresztül történik. A szerkezet sematikus ábráján láthatjuk ezt a kialakítást (2.9 ábra). A kerék forgatómotorja csúszógyűrűn keresztül kap áramot, valamint a csapágyazás is itt történik. A szabad kialakítás 10° -os tartományban működik jó pontossággal a tekercsek kiterjedése miatt, azonban a szenzor újraindításával más tartományban is mérhetünk pontosan a kerék forgásának beállása után. Másik hátrány az idővel fellépő szögeltolódás (precesszió), amely akár $0,5^\circ$ mérési hibát is eredményezhet, mivel ez a pontatlanság sok alkalmazást kizár, az integráló giroszkóp nagyobb népszerűségnek örvend. A kialakítás elvi felépítése hasonló, azonban csak egy tengely elfordulását méri, így csak egy kerettel és tekercsel rendelkezik. A szögsebességből történő integrálással a precesszió áthidalható, így pontosabb eredményt ad hosszabb távon mint a közvetlen szögelfordulást mérő mechanizmus [5].

Az *optikai* giroszkópok közül az elfordulásmérésre kialakított szerkezet gyűrűs lézer giroszkópnak nevezik. Egy üveg-kerámia háromszög alakú kamrában hélium-neon gáz elegye van, amelyben egy anód két katóddal generál két ellenkező irányú lézersugarat, amelyek a háromszög sarkaiban található három tükör szabályoz. A szerkezet bármekkora forgása során a lézersugarak útjának hossza megváltozik, így a két sugár fáziseltolódását okozva (Sagnac-effektus), amelynek mérésével kiszámítható az elfordulás szöge. A lézeres giroszkóp ezért lényegesen pontosabb, a kialakítása kompaktabb, mint a hasonló költségű mechanikus giroszkópok [5].

2.1.4. Szögsebesség mérése

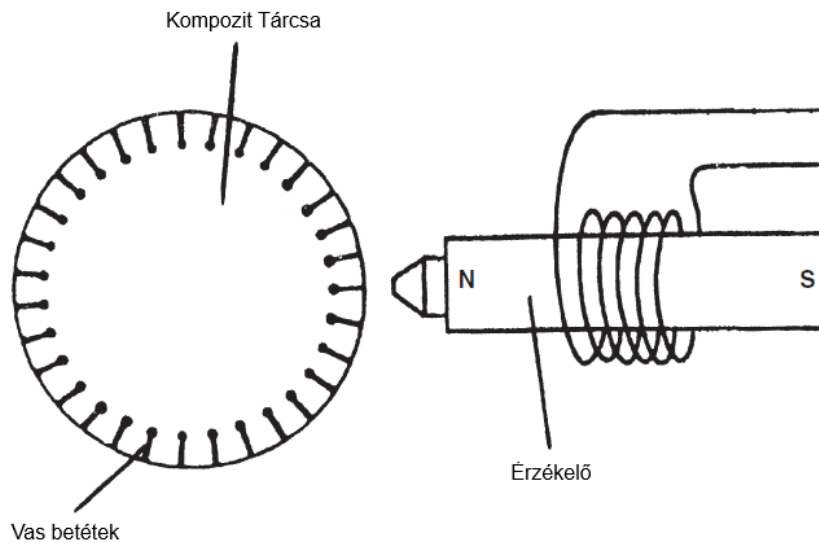
A szögsebesség vagy fordulatszám mérés a közvetlen megoldás az eredeti alkalmazáshoz, a fordulatszámok összehasonlításához. Előfordulnak a 2.1.2 és 2.1.3 fejezetekben bemutatott, lineáris illetve forgó mozgás mérését alkalmazó, vagy továbbfejlesztő technológiák, valamint kizárólag sebességmérésre alkalmas szenzorok [5].

2.1.4.1. Digitális fordulatszám mérők

A digitális fordulatszám mérők, avagy tachométerek általában kontaktus nélkül működnek, és jelzőket érzékelnek, amik egy forgó palástfelületen vagy tárcsán egyenlően vannak elosztva, amely a mérés felbontását adja. Változatos típusú érzékelési elv alapján mérnek, és jelzőnként egy elektronikus impulzust továbbítanak egy számlálónak. A fordulatszámot a jelek száma és egy időegység hányadosaként adják, így valójában átlag sebességet mérnek.

Az *optikai* fordulatszám mérőkben az optikai impulzusokat kétféle módszerrel lehet generálni, a tárcsás elfordulásmérőkhöz hasonlóan. Az első elrendezésben a tárcsákon egymástól egyforma szögtávolságra ablakok helyezkednek el, amelyek magasságában a tárcsa egyik oldalán egy fényforrás, másikon egy szenzor található. A második elrendezésben a szenzor és a fényforrás azonos oldalon helyezkedik el, az ablakok helyett pedig reflektív sávok vannak a tárcsa felületén. A fényforrások általában lézerek vagy LED-ek, míg a detektorok feladatát fotodiódák vagy fototranzisztorok látják el. Az optikai fordulatszám mérők pontosságukban elől járóak, azonban a szennyeződéseknek való kitettségük miatt sok esetben nem alkalmazhatóak [5].

Az *induktív* fordulatszám mérők, más néven változó reluktanciájú sebességérzékelők (variable reluctance velocity transducer) egy széles körben főleg a járműiparban használt digitális szenzorok. Az érzékelő egy pólusainál elhegyesedő állandó mágnes köré erősített tekercs. A pólusok előtt elmozduló ferromágneses testek a mágneses tér megváltoztatásával a tekercsben feszültség indukálódik, ami a szenzor kimeneteként szolgál. Egyszerűbb kialakításokban egy ferromágneses fogaskerék elmozduló fogai közeledésének és távolodásának hatására változik a mágneses fluxus, a változás sebessége pedig arányos lesz az indukált feszültség amplitúdójával. A kimenet ezáltal pozitív és negatív impulzusokból áll, a jel frekvenciája pedig megfeleltethető a fogaskerék szögsebességével [6]. Egy bonyolultabb kialakítást látunk a 2.10 ábrán, ahol egy kompozit tárcsába a kerületen egyenlő távolságban vas rudak vannak behelyezve. Ahogy a vas betétek a mágnes felé mozognak növekszik a mágneses fluxus, távolodásukban pedig csökken, a mérés pedig a fogaskerékhez hasonlóan zajlik. A legnagyobb mérhető fordulatszám nagyjából 10 000 [rpm], az impulzusok adott vastagsága miatt, amely túl nagy sebesség



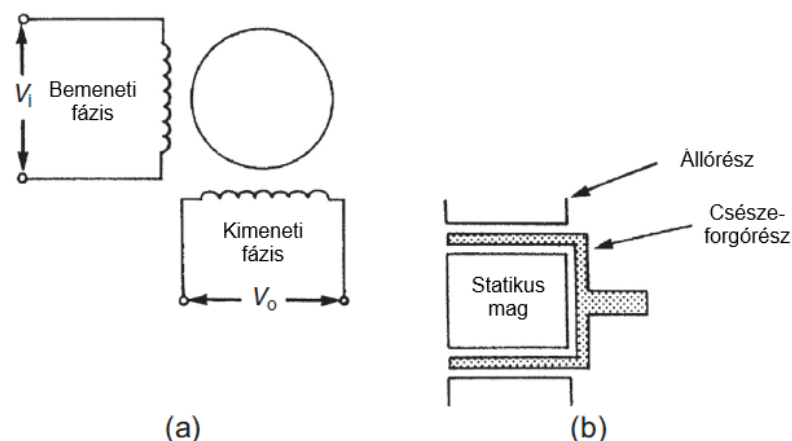
2.10. ábra. Változó reluktanciájú sebességérzékelő elvi rajza [5].

esetén az impulzusok egybefolyását eredményezi. Az optikai úton való mérésnek itt előnye van, mivel az impulzusok vékonyabbak, így magasabb fordulatszámok mérésére is alkalmas, a fogaskerék mérése pedig csak alacsonyabb fordulatszámokat enged meg a produkált jelek életlensége végett.

A *mágneses* fordulatszám mérők egy Hall-effektus szenzort alkalmaznak, amelynek működése a 2.1.2.3 szekcióban bemutatásra került. A mérőeszköz egy fogaskerék vagy hasonló fogazott tárcsa mérésére alkalmas, amely egy állandó mágnessel zár közre egy Hall-effektus szenzort. Amikor egy fog áthalad a szenzor előtt a teljes mágneses tér keresztül megy a szenzoron, azonban ha a fog közeledésével eltereli a mágneses tér egy részét, így annak hatása csökkenni fog. Ezáltal a szenzor a forgás sebességével arányos frekvenciájú feszültséget fog kimenetére adni.

2.1.4.2. Stroboszkópos mérőeszközök

A stroboszkópos szögsebesség mérés elgondolása hasonló a digitális szenzorokéhoz, azonban az impulzusok elektromosan gerjesztett fények, amelyek a kerületen időközönként ismétlődő elemekről visszaverődve adnak jelet. Ezek az elemek lehetnek természetesen előforduló geometriák, mint a fogaskerék fogai, vagy mesterségesen előállított tulajdonságok, például fekete és fehér színű sávok az eszköz felületen. A stroboszkóp frekvenciája változtatható, így azt szinkronizálni lehet a megjelenő jelek frekvenciájával. Ha a két frekvencia megegyezik, a felületen megvilágított elem megjelenésében állónak tűnik. A megfelelő frekvencia megtalálásához azonban a harmonikusok kizárása szükséges, amit az eredeti frekvencia többszöröseinek vizsgálatával lehet megtenni, így a **legnagyobb** mérhető harmonikust megtalálva. Ennek a szenzornak gyakori kialakítása a



2.11. ábra. Váltóáramú tachométer: (a) tekercsek elrendezése; (b) Álló és forgórész sematikus ábrája [5].

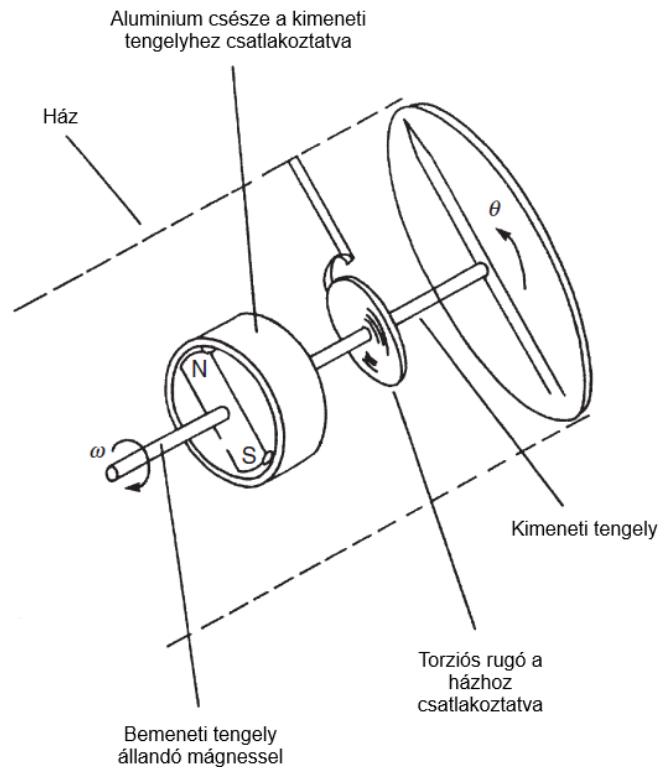
kézben hordozható kivitel, ugyanis a stroboszkóp precíz pozicionálására nincs szükség. A stroboszkópos fordulatszám-mérők mérési tartománya $110 - 150\,000 [1/perc]$, és $\pm 1\%$ hibával operál [5].

2.1.4.3. Analóg fordulatszám-mérők

Általánosságban az analóg fordulatszám-mérők kevésbé pontosak mint digitális változataik, azonban sok alkalmazásra teljes mértékben megfelelnek.

A DC - egyenáramú tachométer a forgás sebességéhez nagyjából illeszkedő feszültségkimenetet produkál. A felépítése hasonlít az egyenáramú generátoréhoz, egy statikus állandó mágnes keretből és egy tekercselt csúszógyűrűn keresztül táplált forgórészből áll. A generátorral ellentétben a mérési pontosságra helyezkedik a hangsúly, így például a rotor súlyának csökkentése miatt egy üreges üvegszál adja a tekercs belsejét. A kimeneti feszültség nagyjából minden $1\,000 [rpm]$ változásnál $5 [V]$ feszültségkülönbséget ad le (a forgás iránya a feszültség előjeléből látszik), így nagyjából $0 - 6000 [rpm]$ egy tipikus mérési tartomány. A szenzor problémája, hogy arra alkalmas esetekben megjelenhet váltóáramú bűgőfeszültség (az egyenáram váltóáram szerű feszültség ingadozása) a kimeneti jelen, aminek amplitúdója nagyjából feszültségérték 2% -át teszi ki.

A AC - váltakozó áramú fordulatszám-mérők hasonlóan az egyenáramú megfelelőjének a szögsebességgel arányos feszültségkimenetet generálnak. A kialakításuk egy kétfázisú indukciós motorra hasonlít, két sztátor tekercssel és általában egy úgynevezett csésze-forgórészszel, amelyet a 2.11 ábra mutat be. Az állórész egyik tekercsét váltóáram táplálja, a kimenetet pedig a másik mérőleges tekercsben indukált feszültség lesz. A rotor állásakor ez a feszültség zérus, és a fordulatszám növekedésével arányosan fog a feszültség amplitúdója is növekedni. A forgásirány változása a kimeneti feszültség



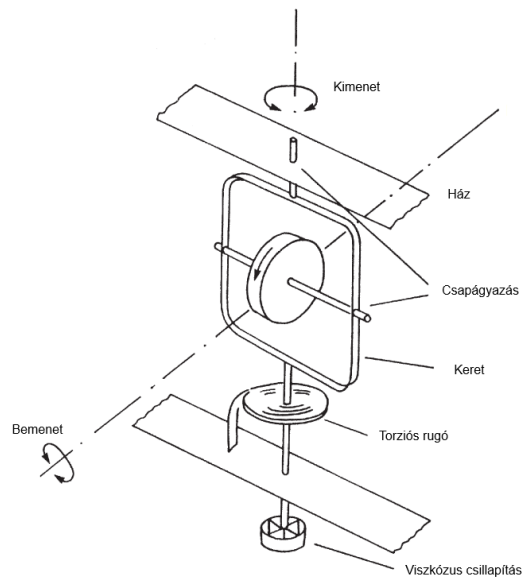
2.12. ábra. Örvényáramos fordulatszámérő elvi rajza [5].

180°-os fáziseltolódásából lehet látni, így mind a kimenet fázisa, mind az amplitúdója is fontos a mérés szempontjából. Általában a mérési tartomány $0 - 4000 [rpm]$, a mérési hiba pedig a teljes skála $\pm 0,05\%$ -át teszi ki. Léteznek költséghatékonyabb, kalickás rotoros kialakítású szenzorok is, azonban ezeknél a mérési hiba $\pm 0,25\%$ körül mozog.

Az úgynevezett csészeforgórészes, vagy örvényáram fordulatszámérők esetén, egy központi orsón elhelyezett állandó mágnes egy nem mágnesezhető csésze borítja, amely egy elektromosan vezető hengerpalástból áll, ahogy a 2.12 ábra mutatja. Az orsó forgásával a csészében örvényáramok keletkeznek, amelyek az állandó mágnes által indukált mágneses térrel kölcsönhatásba lépve nyomatékot generálnak. Ez a forgatónyomaték addig forgatja az orsót, ameddig a rajta található torziós rugó nyomatékával kiegyenlítődnek. A nyomatékkiegyenlítődés állapotában a csésze szögelfordulása arányos az orsó és a mágnes fordulatszámaival, így ez adja a szenzor kimenetét. Általában a mérési hiba $\pm 0,5\%$ körül mozog, a mérési tartomány pedig $15\,000 [rpm]$ is lehet [5].

2.1.4.4. Szögsebesség mérő giroszkópok

A sebességérzékelő giroszkóp (angol: rate gyroscope) közel azonos felépítéssel rendelkezik, mint a 2.1.3.7 fejezetben tárgyalt integráló giroszkóp, azzal a különbséggel hogy egy torziós rugóval egészül ki, ezzel limitálva a keret forgómozgását, ahogy a 2.13



2.13. ábra. A sebességérzékelő giroszkóp sematikus ábrája [5].

ábra is mutatja. A szenzor abszolút szögsebességet mér, gyakran jelek stabilizálására alkalmazzák navigációs rendszerekben.

2.2. Visszajelzés lehetőségei

2.3. Szabályozás eszközei

feszültség regisztrálása

2.3.1. Programozási technikák

3. fejezet

Mérőrendszer fejlesztése

3.1. Szenzorok

3.1.1. *Mérendő mennyiségek*

3.1.2. *Elhelyezés*

3.1.3. *Szennyeződések*

3.1.4. *Szervizelhetőség*

3.1.5. *Kábelezés*

3.2. Jelek

3.2.1. *Szenzorokból származó jelek*

3.2.2. *Jelekből adat*

3.3. Szabályozás

3.3.1. *Szabályozás eszközei*

A 3.1 táblázat tartalmazza a programozható relék közül a megfelelő feszültséggel operálókát.

	Schneider Electric Zelio Logic	IDEC SmartRelay	Siemens LOGO!	Eaton Easy
Modellszám	SR2B121JD	FL1F-B12RCE	6ED1052-2MD08-0BA2	EASY-E4-UC-12RCX1
Feszültség	12V	12/24V	12/24V	12/24V
Bemenetek	4 DI + 4 AI	4 DI + 2 AI	4 DI + 4 DI/AI	4 DI + 4 DI/AI
Kimenetek	4 DO	8 DO	4 DO	4 DO
Számítási frekvencia	1 kHz	5 kHz	5 kHz	5 kHz
Kommunikáció	N/A	N/A	Modbus TCP	MODBUS TCP/IP
Program felület	ZelioSoft 2 (LD, FBD)	WingLGC (LD, FBD)	LOGO! Soft Comfort (LD, FBD)	EASYSOFT-SWLIC/easySoft7 (EDP, LD, FBD, ST)
Internet csatlakozó	Nincs	Ethernet RJ45	Ethernet RJ45	Ethernet RJ45
SD memory	Nincs	MicroSD	MicroSD	Nincs
Méret	90x68x10	90x71.5x58	90x71.5x58	90x72x58
Költség	75 000	69 000	58 000	72 000

3.1. táblázat. Programozható relék összehasonlítása

3.3.2. Adatok összehasonlítása

3.3.3. Hibatűrő rendszer kialakítása

3.3.4. Szennyeződés kizárása

3.4. Visszajelzés

3.4.1. Visszajelzés eszközei

3.4.2. Human-Machine interface

3.4.3. Kommunikáció

4. fejezet

Összefoglalás

4.1. Alkalmazási lehetőségek

4.1.1. Feladat kivitelezésének lehetőségei

4.1.2. Üzembiztonsági megoldások

4.1.3. Diagnosztikai feladatok kivitelezése

Budapest, 2024. december 2.

Kovács Hunor Ádám

Irodalomjegyzék

- [1] Jacob Fraden: *Physical Principles of Sensing*. 2016, Springer International Publishing, 69–154. p. ISBN 9783319193038.
- [2] Jacob Fraden: *Presence, Displacement, and Level*. 2016, Springer International Publishing, 335–377. p. ISBN 9783319193038.
- [3] Deborah Lawrence – Karen Vandekar: Effects of tropical deforestation on climate and agriculture. *Nature Climate Change*, 5. évf. (2014. december) 1. sz., 27–36. p. ISSN 1758-6798.
- [4] Wolfgang Lutz – Samir KC: Dimensions of global population projections: what do we know about future population trends and structures? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365. évf. (2010. szeptember) 1554. sz., 2779–2791. p. ISSN 1471-2970.
- [5] Alan S. Morris – Reza Langari: *Rotational Motion Transducers*. 2016, Elsevier, 599–632. p. ISBN 9780128008843.
- [6] Alan S. Morris – Reza Langari: *Sensor Technologies*. 2016, Elsevier, 375–405. p. ISBN 9780128008843.
- [7] Alan S. Morris – Reza Langari: *Summary of Other Measurements*. 2016, Elsevier, 633–672. p. ISBN 9780128008843.
- [8] Alan S. Morris – Reza Langari: *Translational Motion, Vibration, and Shock Measurement*. 2016, Elsevier, 565–598. p. ISBN 9780128008843.

Summary

Keywords *mechatronika, szabályozástechnika, szálaskormány, szenzor, mezőgazdaság*

Függelék

Mellékletek

M.1.

M.2.