

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



AKKUMULÁTOROS KÉZI SZÚRÓFŰRÉSZEK
VÁGÓERŐ
MODELLEZÉSE, SZIMULÁCIÓJA,
ENERGIAFOGYASZTÁSÁNAK VIZSGÁLATA
PhD ÉRTEKEZÉS

Készítette

Apáti Sándor

okleveles gépészmérnök (MSc)

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

TÉMATERÜLET: GÉPEK ÉS SZERKEZETEK TERVEZÉSE

TÉMACSOPORT: SZERSZÁMGÉPEK TERVEZÉSE

A doktori iskola vezetője:

Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella

DSc, egyetemi tanár

Témacsoport vezető:

Dr. Hegedűs György

egyetemi docens

Témavezető:

Dr. Hegedűs György

egyetemi docens

Társtémavezető:

Dr. Hajdu Sándor

egyetemi docens

Miskolc

2025

Tartalomjegyzék

Témavezetői ajánlások	4
Jelölések és rövidítések jegyzéke	5
1. Bevezetés	8
2. Irodalmi áttekintés	10
2.1. A vágóerő mérése fűrészelés közben	11
2.2. A vágóerő számítási modellek ismertetése	12
2.3. A vágási folyamatok modellezése és optimalizálása	13
2.4. Faanyagok és egyéb anyagok vágási jellemzői	14
2.5. Szerszámkopás és vágási hatékonyság összefüggései	15
2.6. Rezgéscsökkentési és stabilitási stratégiák a vágási folyamatokban	17
2.7. Csúszómód-szabályozás alkalmazása vágási folyamatokban	18
2.8. Megfigyelő alapú csúszómód-szabályozás	21
2.9. Szimulált hűtés alkalmazása Scimscape modellezés esetén	24
2.10. Villamos jellemzők mérése	25
2.11. Az irodalmi áttekintés kritikai összegzése	25
3. Elektromechanikai modell bemutatása	27
4. Kísérleti mérések	30
4.1. Vágóerő mérése különböző anyagú munkadarabokon	35
4.2. A fajlagos vágóerő meghatározása	38
4.3. Árammérés a vágóerő teszt során	46
5. Szúrófűrészek akkumulátor üzemidejének előrejelzése lineáris vágóerő- modell használatával	48
5.1. Matlab/Simscape alkalmazása gépek dinamikus szimulációjához	49
5.2. A mért vágóerő előkészítése szimulációhoz	49
5.3. Simscape modell valós vágóerővel	50
5.4. Simscape modell lineáris vágóerő-közelítéssel	53
5.5. A lineáris csillapítási tényező meghatározása a vágóerő közelítésére	55
5.6. Az akkumulátor üzemidejének szimulációja Simscape modellek segítségével	55
5.7. Szimulációs eredmények	58
5.8. Numerikus számítások mért áramerősség esetében	60
5.9. Validáció az 50 másodperces intervallum alapján	62

6. A csúszómód-szabályozásának vizsgálata akkumulátoros szúrófűrészek nemlineáris modellezésében	63
6.1. A modellreferenciás csúszómód-szabályozás elméleti alapjai	63
6.2. Az elmélet alkalmazása a 6.1 szakasz alapján, a vizsgált akkumulátoros kézi szúrófűrészesetében	65
6.3. A csúszómód stabilitási feltételei	66
6.4. Szimulációs beállítások	68
6.4.1. Csúszómód szimulációja	71
6.4.2. A modell hitelesítése	75
6.4.3. Csúszómód szimuláció csökkentett rendű állapotfigyelővel	75
7. Összefoglalás	80
8. Summary	82
9. Új tudományos eredmények	84
Köszönetnyilvánítás	85
Irodalomjegyzék	86
A kutatási területhez kapcsolódó publikációk listája	96
A. melléklet	97
B. melléklet	98
C. melléklet	99
D. melléklet	100
E. melléklet	101

Témavezetői ajánlások

Dátum: 2025. március 13.

Témavezető: Dr. Hegedűs György

Társtémavezető: Dr. Hajdu Sándor

Az akkumulátoros kézi szűrőfűrészek energetikai vizsgálata és optimalizációja rendkívül fontos és releváns kutatási téma a fenntartható technológiai fejlesztések korában. A témaválasztás különösen figyelemre méltó, mivel a kézi szűrőfűrészek széles körben alkalmazott szerszámok a faiparban, építőiparban és más kapcsolódó iparágakban, ahol a hatékonyság, energiafogyasztás és stabilitás egyaránt alapvető elvárás. Az ipari alkalmazásokban és környezettudatos fejlesztésekben rejlő lehetőségek hangsúlyozzák a téma gyakorlati jelentőségét, míg a kutatásban alkalmazott tudományos megközelítések - például a nemlineáris modellezés, csúszómód-szabályozás és integrált mérési rendszerek - a témát a mérnöki tudományok élvonalába helyezik.

A kutatás célja az akkumulátoros kézi szűrőfűrészek működési dinamikájának pontos modellezése és szabályozása, amely a dinamikus vágóerők, energiafogyasztási hatékonyságára irányul. A kutatás kiemelt figyelmet fordít a lineáris és nemlineáris modellezési megközelítések összehasonlítására, valamint a különböző anyagtípusok (például fa, fém, kompozit) mechanikai tulajdonságainak beépítésére a dinamikus modellekbe. A fejlett mérőrendszerek alkalmazása, valamint a MATLAB és Simulink környezetben végzett szimulációk lehetővé teszik az energiafogyasztási mintázatok és a vágóerők részletes vizsgálatát, biztosítva a kutatás tudományos megalapozottságát.

Apáti Sándor okleveles gépészmérnök munkája kiváló példa a gyakorlati oldalról megközelített mérnöki kutatásra. Az eddig elvégzett munka során a jelölt bizonyította, hogy képes komplex rendszerek elemzésére, innovatív mérési és modellezési megoldások kidolgozására, valamint a szabályozási eljárások finomhangolására. A jelölt átgondolt megközelítése, kiemelendő a csúszómód-szabályozás alkalmazása terén, amely lehetővé teszi az energiahatékony működés mellett a rezgések minimalizálását és a szerszám stabilitásának javítását.

A kutatás további jelentősége, hogy a megoldott problémák nemcsak tudományos, hanem ipari szempontból is relevánsak. Az elért eredmények közvetlenül hozzájárulhatnak a szűrőfűrészek és hasonló elektromechanikai rendszerek fejlesztéséhez, különösen a fenntartható működést előtérbe helyező ipari alkalmazásokban. A kutatás által érintett problémák, például az energiafogyasztás csökkentése, a dinamikus stabilitás javítása és a rendszer élettartamának növelése, napjainkban rendkívül aktuálisak.

Apáti Sándor kutatói képességeit továbbá jól példázza az a képessége, hogy a komplex mérési és modellezési eredményeket világosan és rendszerezett módon képes bemutatni. A közösen végzett munka eredményeit jól példázza az itt bemutatott tudományos munka D1 és Q1 minősítésű rangos nemzetközi folyóiratokban megjelent cikkei.

Jelölések és rövidítések jegyzéke

Görög betűk

- α, β, γ - Matematikai kifejezésekben használt paraméterek
- β - Az akkumulátor belső nemlinearitását leíró paraméter
- $\delta\varphi_m$ - A motor szögelfordulásának virtuális változása
- $\Delta a_{42}, \Delta a_{44}$ - Nemlineáris tagok változásai
- $\dot{\omega}$ - Szögsebesség deriváltja
- $\dot{\varphi}_k$ - A vágókerék szögsebessége
- $\dot{\varphi}_m$ - A motor szögsebessége
- Γ - Szabályozási jel amplitúdója
- $\hat{u}_{deq}$ - Ekvivalens szabályozójel
- $\hat{\omega}$ - Megfigyelő szögsebessége (állapotbecslés)
- ω - Szögsebesség
- ω_k - A forgattyústengely szögsebessége
- φ_k - A vágókerék szögelfordulása
- φ_m - A motor szögelfordulása

Latin betűk

- $a_{42}(\varphi_m), a_{44}(\varphi_m), b_{42}(\varphi_m)$ - Nemlineáris modellezési paraméterek
- A_c - Forgácskeresztmetszet
- b - A motor belső csillapítási tényezője
- d_{ISE} - A négyzetes hibák integrálja (*Integral of Squared Errors*)
- d_m - A mechanizmus jellemző átmérője
- E - Az energiafogyasztás (Joule-ban mérve)
- e_k - Excentricitás
- F_c - Az erőmő cellán fellépő erő
- F_f - Az előfeszítő erő
- F_G - A gravitációs erő
- F_{gr} - A gördülési ellenállásból adódó erő

- F_{saw} - Mért vágóerő
- $F_{saw_{max}}$ - Maximális vágóerő
- F_v - Vágóerő
- F_y - A függőleges irányú erő
- f - Hálózati frekvencia
- i - Áram
- i_{mk} - A motor és a kulisszás hajtómű áttétele
- I_{ml} - A lineáris modell motor áramának időfüggvénye
- I_{mr} - A valós motor áramának időfüggvénye
- $I_{mért}$ - Az előtoló motor mérés során mért árama
- I_0 - Előtoló motor üresjáratú árama
- I_n - Előtoló motor névleges árama
- $\langle I \rangle$ - Az átlagáram
- J_k - A kulisszás kerék tehetetlenségi nyomatéka
- J_m - A motor tengelyének tehetetlenségi nyomatéka
- k_e - A motor elektromos állandója
- k_{Fc} - A lineáris vágóerő-modell csillapítási tényezője
- k_{mk} - Hajtóviszony szám, az áttétel reciproka ($k_{mk} = 1/i_{mk}$)
- K_T - Előtoló motor nyomatékállandója (torque constant)
- L_a - Az armatúra induktivitása
- m_a - Az alternáló mozgású tömeg
- M_n - Az előtoló motor névleges nyomatéka
- n - Az előtoló motor névleges fordulatszáma
- O_{2G} - Állapotmegfigyelő erősítési mátrix
- p - Menetemelkedés
- P - Előtoló motor névleges teljesítménye
- Q - Az akkumulátor kapacitása (Ah-ban mérve)
- q - Töltés
- $\dot{q}$ - Az áram (a töltés idő szerinti deriváltja)

- δq - A töltés virtuális változása
- R_a, R_b - Ellenállások
- s_{cf} - Forgácsvastagság az előtolás irányában
- s_{cl} - Forgácsvastagság az előtolásra merőlegesen
- SOC - Az akkumulátor töltöttségi állapota (*State of Charge*)
- $\sigma(t)$ - Csúszófelület
- T - Időtartam, például a szimulációs idő
- T_c - Szűrő időállandója
- T_e - Elektromos időállandó
- T_{err} - Hiba eliminációs időállandó
- T_m - Mechanikai időállandó
- U - Előtoló motor feszültsége
- U_0 - Kapocsfeszültség
- u_d - Diszkontinuus szabályozójel
- u_{deq} - Ekvivalens szabályozó jel
- v_{in} - Bemeneti feszültség
- V_{nom} - Az akkumulátor névleges feszültsége
- $x(t)$ - A fűrészlap helyzete
- x_1, x_2 - Állapotváltozók megkülönböztetése
- x_{err} - Állapotbecslési hiba
- ω_{max} - Maximális szögsebesség
- $\mathbf{A}_{11}, \mathbf{A}_{12}, \mathbf{A}_{21}, \mathbf{A}_{22}$ - Mátrix indexek
- $\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2$ - Mátrix indexek
- $\hat{x}, \hat{y}$ - Megfigyelt változók
- μ - Súrlódási tényező

1. Bevezetés

Az akkumulátoros kézi szűrőfűrészek energetikai vizsgálata kiemelt fontosságú napjaink ipari alkalmazásai és a környezettudatos műszaki fejlesztések szempontjából. Ezek az eszközök a faiparban, építőiparban, és számos további iparágban széles körben alkalmazott szerszámok, mivel alkalmasak különféle anyagok, mint például fa, fémek és műanyagok, precíz és rugalmas megmunkálására. Működésük során azonban jelentős energiavesztések jelentkezhetnek, elsősorban a dinamikus vágóerők, valamint a szerszám és az anyag közötti összetett, nemlineáris kölcsönhatások miatt. Ezek az energiavesztések nemcsak megnövelik az energiafogyasztást, hanem negatívan hatnak a vágás minőségére és jelentősen rövidíthetik az eszköz élettartamát is.

A fenntartható és gazdaságos működés érdekében kulcsfontosságú, hogy ezen problémák megoldását részletes kutatással és mérnöki innovációval támogassuk. Kutatásom fő motivációját ezek a gyakorlati kihívások jelentették, és célul tűztem ki, hogy integrált mérési, modellezési és szabályozási módszereket fejlesszek ki, amelyek segítségével pontosan elemezhető és optimalizálható a kézi szűrőfűrészek energiafogyasztása és dinamikus viselkedése.

A mérések során külön figyelmet szenteltem a különböző anyagok, például fa és műanyag vágóerejének összehasonlítására. Az anyagsűrűség, rugalmassági modulus és homogenitás különbségei jelentősen befolyásolják a vágóerő ingadozásait, amelyek modellezése és mérése alapvető fontosságú a megbízható eredmények érdekében. A kísérletek során fejlett mérőpadi rendszert alkalmaztam, amely pontos adatgyűjtést tett lehetővé, miközben minimalizálta a rendszer dinamikai hatásait.

A vágási folyamat során fellépő dinamikus erők nemcsak az eszköz energiafogyasztását növelhetik, hanem instabilitást és rezgéseket is okozhatnak, ami csökkenti a vágás minőségét és az eszköz élettartamát. Egy másik kihívás az energiafogyasztás csökkentése anélkül, hogy jelentős mértékben csökkenne a vágási sebesség és hatékonyság. A mérőrendszerem lehetővé teszi a vágóerők nyomon követését, míg a modellezési folyamat figyelembe veszi a nemlineáris tényezőket, például a vágóerő és a sebesség közötti kapcsolatot. Különös figyelmet fordítottam a vágási folyamat kulcsfontosságú paramétereire, beleértve a rezgéseket, a vágóerőt és az energiafogyasztást.

Az ilyen rendszerek lehetőséget nyújtanak a lineáris és nemlineáris modellek összehasonlítására, amelyeket optimalizációval és szimulációval finomhangoltam. Az optimalizált lineáris modellek lehetővé teszik a vágási folyamat energiafogyasztásának és stabilitásának egyszerűsített, mégis hatékony becslését. Az eredmények költséghatékony szimulációt tesznek lehetővé egy komplex rendszer esetében, amely megbízhatóan közelíti a valós vágóerőket. A kutatásom elsődleges célja az akkumulátoros kézi szűrőfűrészek energetikai és dinamikai tulajdonságainak feltárása, amelynek első lépése egy komplex, integrált mérési rendszer kidolgozása, amely képes valós időben, nagy pontossággal mérni a vágóerőket szűrőfűrészek esetében. Ennek érdekében olyan mérőrendszeri konfigurációt fejlesztettem

ki, amely jól reprodukálható méréseket biztosít, miközben minimalizálja a környezeti és rendszerből adódó zavaró hatásokat, például a rezgéseket és súrlódási veszteségeket. Ennek keretében mérem a különböző szerkezetű és keménységű anyagok, mint például fa (tölgy, akác), és műanyag (metamid) vágáshoz szükséges vágóerőket. A részletes vizsgálatok során arra törekszem, hogy pontosan leírjam és elemezzem az előtolási sebesség és a kulisszás mechanizmus szögsebességének hatását a vágási folyamat jellemzőire. A disszertációm fontos célkitűzése a lineáris és valós vágóerőt alkalmazó Simscape modellek kidolgozása, amelyekkel pontosan leírható a szűrőfűrészek vágási folyamata, valamint a lineáris és a valós vágóerő összehasonlítása. E modellek segítségével nemcsak a különböző vágási paraméterek hatásai elemezhetők precízen, hanem a rendszer energiafogyasztása is megbízhatóan előre jelezhető. Végül, kiemelt célként határoztam meg egy csúszómód-szabályozási módszer kifejlesztését.

Az akkumulátoros kézi szűrőfűrészekben használt DC motorok indításakor gyakran tapasztalható egy jelentős mértékű hirtelen áramlökés, amely rendkívül magas csúcsindító áramot eredményez. Ez a jelenség komoly problémákat okozhat mind a motor, mind az energiaellátó rendszer számára. A szűrőfűrész akkumulátorának szempontjából az ilyen nagy áramlökések különösen károsak, mivel nemcsak az akkumulátor biztonságos működését veszélyeztetik, hanem hosszú távon az élettartamát is jelentősen csökkenthetik. A motor esetében a nagy indítóáramok a tekercselések megnövekedett hőterhelését és mechanikai kopását eredményezhetik, ami idővel a szűrőfűrész motorjának teljesítményromlásához vagy akár meghibásodásához vezethet.

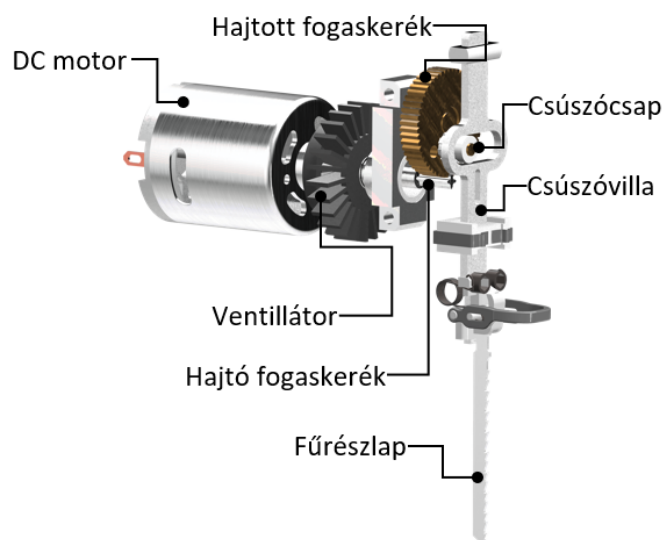
A modern akkumulátoros kézi szerszámgépek tervezése során egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek arra, hogy a mechanikai alkatrészeket korszerű, digitális vezérlőrendszerekkel egészítsék ki vagy helyettesítsék. A kézi szűrőfűrészeknél ez különösen fontos, mivel a precíz és egyenletes vágási teljesítmény érdekében a motor hajtásláncának optimalizálása elengedhetetlen. A fejlett szabályozórendszerek lehetővé teszik például a hajtóművek teljes kiküszöbölését, ami számos előnyt kínál: csökkenti a mozgó alkatrészek számát, minimalizálja a karbantartási igényt, és növeli a rendszer általános megbízhatóságát.

Ugyanakkor a hajtóművek elhagyása kihívásokat is felvet a szűrőfűrész működésében. Mivel a fűrészelési folyamat során a vágandó anyag változó ellenállást jelent a motor számára, ezek a terhelési ingadozások instabilitást vagy teljesítménycsökkenést okozhatnak. Ez különösen problémás lehet keményfa vagy rétegelt anyagok vágásakor, ahol a vágóerő folyamatosan változik. A dinamikus terhelési változások kezelése érdekében fejlett szabályozási technikák alkalmazása szükséges, amelyek biztosítják a motor stabil és megbízható működését.

Az egyik kiemelkedően hatékony módszer az ilyen problémák kezelésére a csúszómód-szabályozás (sliding mode control). Ez a szabályozási stratégia lehetővé teszi, hogy a szűrőfűrész motorja gyorsan és pontosan alkalmazkodjon az aktuális terhelési körülményekhez, így biztosítva a vágási folyamat folyamatos stabilitását. A csúszómód-szabályozás nemcsak a motor védelmét szolgálja a túlzott hő- és mechanikai terheléssel szemben, hanem javítja az energiahatékonyságot és hozzájárul az akkumulátor hosszabb üzemidejéhez is. Ezáltal a szűrőfűrész hatékonyabbá válik és hosszabb élettartammal rendelkezik, ami különösen fontos a professzionális és ipari felhasználásban.

2. Irodalmi áttekintés

Az akkumulátoros szűrőfűrészeket egyes szakirodalmak, dekopírfűrészként is említik, amelyek sokoldalúan alkalmazhatók különböző anyagok, mint a puha anyagok, műanyagok valamint acél vágására. Különösen a kézi szűrőfűrészek használata terjedt el, amelyek sík felületen megtámasztva egyenletesebb és pontosabb vágást biztosítanak, szemben a támasz nélküli kézi szerszámokkal.



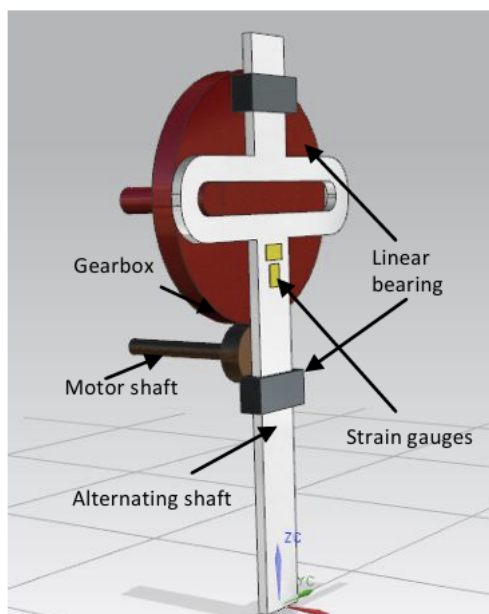
2.1. ábra. A kézi szűrőfűrészt működtető mechanizmus.

A 2.1 ábrán látható mechanika szemléletesen mutatja be, hogyan épül fel és működik egy kézi szűrőfűrész másnéven dekopírfűrész. A rendszer központi eleme az egyenáramú motor, amely az akkumulátoros kivitelű gépeknél általában 18-24 V körüli feszültséggel üzemel. A DC motor szögsebességét az elektronikus vezérlés szabályozza, így a vágási sebesség széles tartományban változtatható. A motor tengelyén található egy apró ventillátor, amely a motor hűtését segíti elő, továbbá gyakran a forgács kifújásában is szerepet játszik. A motorhoz közvetlenül illeszkedik a hajtó fogaskerék, amely a meghajtáshoz szükséges forgómozgást viszi át a nagyobb méretű hajtott fogaskerekre. Ezek a fogaskerek sok esetben ferdefogazásúak vagy kúpfogazásúak, hogy a tengelyek eltérő irányú elhelyezkedése mellett is hatékony legyen a nyomatékátvitel, illetve mérsékeljék a rezgéseket és a zajkibocsátást. A hajtott fogaskerékhez excentrikusan csatlakozik egy csúszócsap, amely a forgómozgást alternáló, lineáris mozgássá alakítja át a „Scotch yoke” mechanizmus segítségével. A csúszócsap körpályán történő elmozdulása periodikusan felfelé és lefelé mozgatja a kulisszaszerű csúszóvillát. A csúszóvilla végéhez kapcsolódik a fűrészlap

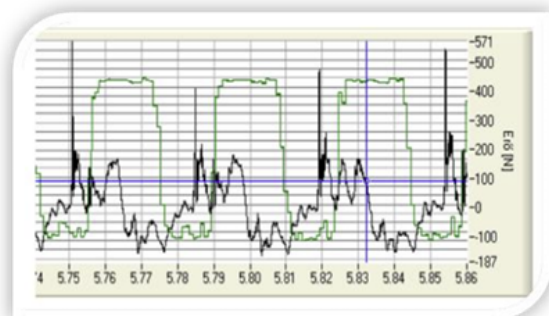
befogója, amely gyorsrögzítő mechanikával biztosítja a fűrészlap egyszerű cserélhetőségét. A szűrőfűrész kulcseleme tehát, hogy a motor forgómozgását a fogaskerek és az excentrikus csap segítségével lineáris fűrészlap-mozgássá alakítja. E mozgásnak köszönhetően a szerszám alkalmas egyenes, íves vagy akár bonyolult minták vágására is különböző anyagokban: faalapú anyagokban, fémekben (például lágyacélban vagy alumíniumban) és műanyagokban egyaránt. Mindehhez további stabilitást nyújt a gép talplemeze (a „talp”), amelyet a munkadarabon vezetve sokkal egyenletesebb és pontosabb vágási felület érhető el, mint egy kézi, támaszték nélküli fűrész esetében [1, 2].

2.1. A vágóerő mérése fűrészelés közben

A bemutatott 2.2a. ábra szemlélteti, hogyan kerülnek nyúlásmérő bélyegek a fűrészlapot mozgató kulisszás (alternáló) mechanizmusra, míg a 2.2b. ábrán megfigyelhető, milyen jelerősség- és deformációváltozás mérhető a vágóerő időbeli alakulása során [3].



(a) Nyúlásmérő bélyeg a kulisszás mechanizmuson.

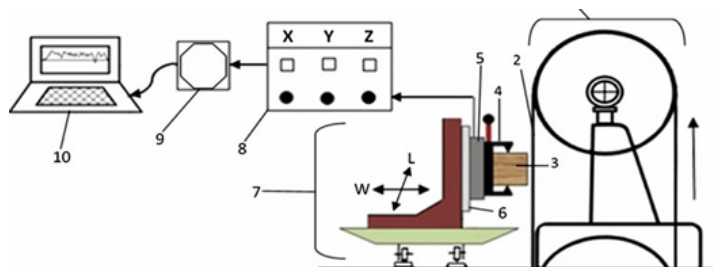


(b) Nyúlásmérő bélyeggel mért vágóerő

2.2. ábra. A munkadarabra és az erőmérő cellára ható erők [3].

A kulissza tengelyén keletkező húzó- és nyomó igénybevételt közvetlenül regisztráló mérés nagymértékben kiszűri a kézremegésből és a munkadarab rugalmas mozgásából adódó zavaró hatásokat, hiszen a szenzor nem a talplemez és az alapanyag közé kerül. A nyúlásmérők elhelyezésének módja és az elektronika azonban biztosítja, hogy a különböző irányú deformációk (vízszintes és függőleges) hatását elkülönítve lehessen értelmezni. A húzó- és nyomófázisban eltérő mértékben jelenik meg a tengelyen a horizontális és a vertikális deformáció, ami külön kihívást jelent a nyúlásmérők jelének megbízható kiértékelésénél, főként akkor, ha azok egyik része eredendően a hőmérséklet kompenzációját szolgálja. A mérés pontosságának javítása érdekében többek között a precíziós áramforrások alkalmazása és a részletesebb matematikai modellezés is kulcsfontosságú, hogy a teljes vágási ciklusban valós képet kapjunk a fűrész erőterheléseiről. A kinyert vágóerő-adatoknak

mind az élettartam-tesztek, mind pedig a fejlesztési folyamatok szempontjából kiemelt jelentősége van. Egy elektromágneses vagy permanens mágneses elvű lineáris fékrendszerrel ugyanis laboratóriumi körülmények között szimulálható a dekopírfűrész valós munkavégzése, ezáltal hosszan tartó tesztek alatt is megőrizhető a valós terhelési környezet[3]. Egy szalagfűrész vágási kísérlet célja volt, hogy a fa nedvességtartalma és a vágási irány miként befolyásolja a tölgy- és bükkfában fellépő vágóerőket.



2.3. ábra. Vágóerő mérőrendszer szalagfűrész esetében [4].

A vizsgálat során négy különböző vágási irányt és két nedvességtartalmi szintet hasonlítottak össze, miközben a vágási és előtolási sebességet állandó értéken tartották. Az 2.3. ábra bemutatja a mérési elrendezést, ahol piezoelektromos erőmérő cellával rögzítették a párhuzamos, normál és oldalirányú vágóerőket. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a fa nedvességtartalmának növekedése csökkenti a vágáshoz szükséges erőt, mivel a rostok közötti kötőerő ilyenkor kisebb. A legnagyobb vágóerő száraz tölgy esetén, míg a legalacsonyabb nedves bükkfánál jelentkezett. A vágás iránya szintén jelentős hatást gyakorolt a párhuzamos és normál erőkre, míg a laterális erő csak kisebb mértékű változást mutatott, ami az éles és szimmetrikus fűrészfogaknak tudható be. A tanulmány eredményei rávilágítanak arra, hogy a faipari feldolgozási műveletek optimalizálása szempontjából elengedhetetlen a faanyag tulajdonságainak - különösen a nedvességtartalomnak és a rostirányultságnak - pontos ismerete, mivel ezek közvetlen hatással vannak a szerszám terhelésére és az energiafelhasználásra [4].

2.2. A vágóerő számítási modellek ismertetése

Az [5] tanulmány egy mechanisztikus vágóerő-modell kidolgozását mutatja be a szalagfűrészelési folyamatra, amelynek célja, hogy pontosan előre jelezze a vágóerők alakulását a szerszám és a munkadarab geometriai viszonyainak, valamint a vágási paraméterek ismeretében. Mivel a szalagfűrészelés nem egy egyszerű egyélű, hanem több éllel történő forgácsolási művelet, a modellalkotás során külön figyelmet fordítanak a foggeometria (balra hajlított, egyenes, jobbra hajlított fogak), a forgácsvastagság és az anyag specifikus vágási nyomásának meghatározására. A specifikus vágási nyomást egy speciális egyélű vágási elrendezés segítségével határozták meg, amely analóg a marás során alkalmazott „fly-cutting” technikával. A modell háromirányú vágóerőt vesz figyelembe (normál, laterális és radiális), és ezek kiszámítását külön-külön elvégzi minden fogtípusra, majd az eredményeket összegezi a teljes vágási szakaszra. Az elméleti eredményeket kísérleti úton is validálták, mind az egyélű és mind a többélű vágás esetén, ahol a mért és szimulált vágóerő-értékek jó egyezést mutattak. A modell alkalmas arra, hogy adaptív vezérlésekhez szolgáljon alapul, például a fogásmélység vagy az előtolás szabályozására szalagfűrészek esetén, továbbá elősegítheti a szerszámkopás csökkentését és a vágási minőség javítását.

A dinamikus vágóerő-modell kidolgozását és validálását a [6] tanulmány ismerteti, amelyet a fémek szalagfűrészelési folyamatának pontosabb jellemzése érdekében hoztak létre. A modellépítés során figyelembe vették a szakaszos előtolás mozgását, az egyes fogak által leválasztott forgács vastagságának pillanatnyi változását, valamint a szalagfűrész több ismétlődő periodikus sajátosságát - így például az egyfogas ciklusokat, a fogsorozatok váltakozását és a teljes szalagkörforgást. Az elméleti modell nemcsak az egyes fogak, hanem a változó számú fűrészfogak egyidejű megmunkálását is képes leírni, így alkalmas a többfogú vágások szimulációjára is. A modell érvényességét laboratóriumi kísérletek során mért vágóerő-adatokkal vetették össze, különböző vágási sebességek és előtolások mellett. A kapott eredmények igazolták, hogy a szimulációk és a mérések közötti eltérés minimális - a jellemző frekvenciák hibája 0,06 Hz alatt maradt -, ami azt mutatja, hogy a modell megbízhatóan képes visszaadni a valóságos vágóerő-ingadozásokat. A szerzők kiemelik, hogy a vágóerő nagysága arányos a megmunkálásban részt vevő fogak számával, és hogy a háromféle ciklikus jelleg (egyfogas, fogsoros és teljes szalagpályás) minden vizsgált esetben kimutatható volt. A modell tehát hatékony eszköz lehet a szalagfűrészek működésének optimalizálásában, az előtolás és fogazat tervezésében, valamint a szerszámkopás és vibrációk elemzésében is.

2.3. A vágási folyamatok modellezése és optimalizálása

A faipari vágási folyamatok hatékonyságának növelésében a modern törésmechanikai modellek kulcsszerepet játszanak. Az ellipszis alakú fűrészpályák, lehetővé teszik a keskeny vágásszélességű technológiák alkalmazását, amelyek nemcsak növelik a vágási pontosságot, hanem optimalizálják a szerszám terhelését is. Ezek a fejlesztések szorosan összefüggnek a szerszámállapot-ellenőrzés és a fejlett mérési technológiák jelentőségével a vágási folyamatokban [7–9].

Az axiális vágási tesztek rávilágítottak arra, hogy a faanyagok törési szívóssága és nyírási szilárdsága meghatározó tényezők a precíziós vágási folyamatok modellezése és optimalizálása során [10]. Az újonnan kifejlesztett *FRACMOD* modell integrálja a törésmechanika, a képlékenység és a súrlódás elveit, pontosabb előrejelzéseket biztosítva a faanyagok mechanikai viselkedésére [11, 12]. A modell empirikus alapokon nyugszik, és képes kezelni a különböző fizikai jelenségeket, ezért dinamikus és időben változó elemzésekhez is alkalmas.

A vágási szimulációs modellek fejlesztése egy továbbfejlesztett anyagi konstitutív modell alkalmazásával történik. Egy módosított végeselem-alapú inverz módszer segítségével optimális Johnson-Cook (JC) paramétereket határoztak meg. Egy termomechanikai kapcsolt modellt fejlesztettek ki ABAQUS szoftverben, amelyet kísérleti vágóerő-mérésekkel validáltak, és az eredmények magas fokú egyezést mutattak [13, 14]. A kézi szűrőfűrész alkalmazása szintén releváns a precíziós vágások során, különösen az egyedi, bonyolult kontúrok kialakításában, ahol a vágási mechanizmusban a fűrészlap alternáló mozgása és az anyag törésmechanikai jellemzői szoros kapcsolatban állnak.

A faipari vágási technikák további fejlesztéséhez modellalapú megközelítést kell alkalmazni. Jelenleg jelentős hiány mutatkozik olyan pontos vágási modellekben, amelyek kifejezetten a faanyag összetett szerkezetéhez igazodnak. Egy fél-empirikus modell alkalmazásával egységes és reprodukálható mérési eljárás dolgozható ki a vágóerők meghatározására. Az így kapott modell képes a faanyagok vágási mechanizmusainak jellemzőit pontosan leírni, ezáltal megalapozva a megbízható előrejelzést és az optimalizált szerszámtervezést. [15, 16].

A fűrészelési folyamat egyik legfontosabb aspektusa a szerszámgeometria, a fafaj és a nedvességtartalom szerepe. Az anizotróp képlékenységi és a folytonos károsodásmélet alkalmazásával kvantitatív keretrendszer alakítható ki a fa vágási folyamatai során fellépő erők elemzésére. Keményfa deszkák és fatörzsek vágási folyamatainak szimulációjával igazolták, hogy a modell pontos előrejelzéseket nyújt a vágási erőkre és a károsodás mértékére [17, 18].

A vágási folyamat optimalizálására mechanisztikus modellek is léteznek akár csak szűrőfűrészek esetében is, amelyek a fűrészfog profilparamétereire - például a hátszög állítására - alapozva képesek előrejelzést adni az egyetlen fogra ható vágóerőről. A kísérleti és numerikus szimulációk igazolták, hogy ezeknek a paramétereknek a változtatása jelentősen befolyásolja a vágóerőt [19, 20].

A fa vágási ellenállásának meghatározására modern, törésmechanikai módszereket alkalmaznak, amelyek figyelembe veszik az elválasztási, plaszticitási és sűrűlátsági munkát. Az eredmények rávilágítottak arra, hogy a termikus módosítás csökkenti a fajlagos vágási ellenállást, és a mérethatás kisebb fogankénti előtolásnál is észrevehető [21, 22].

A forgácsolóerők előrejelzése és elemzése kulcsfontosságú a faipari és fémmegmunkálási eljárások során. A modellek pontosabbá tételével nemcsak a szerszámok kopását lehet csökkenteni, hanem a megmunkálási minőség is jelentősen javítható [23, 24]. A törésmechanikai modellek empirikus igazolása során kimutatták, hogy az elméleti előrejelzések és az ipari környezetben végzett kísérletek nagymértékben összhangban vannak, különösen az FM-CM modell esetében [25].

2.4. Faanyagok és egyéb anyagok vágási jellemzői

A különböző fafajták megmunkálásának hatékonyságát és a vágási folyamatok optimalizálását nagymértékben befolyásolják a faanyag mechanikai tulajdonságai. A tömörfa megmunkálása esetén, kiemelve a szerkezeti tulajdonságokat - például a sűrűség és a szálirány - hatással vannak a vágóerőkre és a felületi minőségre. Az eredmények hangsúlyozzák a szerszámválasztás és a vágási paraméterek optimalizálásának fontosságát [26]. Kísérleti és analitikus módszerekkel vizsgálták a bükk (*Fagus sylvatica*) és a nyír (*Betula pendula* Roth.) fafajok nyomószilárdsági tulajdonságait eltérő szálirányok mellett. A kutatás célja olyan egyszerű, de hatékony matematikai modellek kidolgozása volt, amelyek pontosan reprezentálják a faanyagok feszültség-deformáció viselkedését, miközben figyelembe veszik a mikromechanikai hatásokat is [27].

A faipari megmunkálás hatékonyságát növelő technológiák között kiemelt szerepet kapnak a különböző bevonatolási eljárások, amelyek meghosszabbítják a szerszámok élettartamát. A vágási folyamatok és a fa minősége közötti összefüggések feltárása elengedhetetlen az optimális megmunkálási paraméterek meghatározásához [28].

A lucfenyő vágási vizsgálata során összehasonlították kétféle fűrészlappal - szinterezett keményfém (SC) és gyorsacél (HSS) - teljesítményét. A kutatás az elméleti előrejelzéseket vetette össze a ténylegesen mért értékekkel, különös tekintettel a fűrészlappal kopásának vágóerőkre gyakorolt hatására. Az eredmények azt mutatják, hogy a vágási sebesség vagy az előtolási sebesség módosítása nem befolyásolja jelentősen a vágáshoz szükséges erőt. Az HSS fűrészlapok esetében a feszültségértékek 14 és 22 MPa között változtak, míg az SC fűrészlapoknál jelentős eltérés volt az elméleti (25 MPa) és a tényleges feszültségértékek (14 MPa) között. Az SC fűrészlapok elméleti vágóereje 76 és 94 N között alakult, míg a mért értékek 40 és 44 N között voltak [29].

A hőmérséklet, a nedvességtartalom és a vágási irány hatását vizsgálva a fagyasztott

lucfenyő fűrészelése során megállapították, hogy a hőmérséklet csökkenésével növekednek a vágóerők, különösen nedves és vizes fa esetén. Ezzel szemben a száraz és nedves fa alacsonyabb hőmérsékleteken jobb felületi minőséget eredményezett. A kutatás célja a fűrészelési műveletek energia- és erőforrás-hatékonyságának javítása volt [30].

A vágóerőt, a fajlagos vágási ellenállást és a töréssparamétereket különböző módosított bükkfa változatok (Bendywood, DMDHEU és Lignamon) esetében vizsgálva megállapították, hogy a fa módosítása egyes tulajdonságokat ronthat, különösen a törési szívósságot és a nyírási szilárdságot. Ezeket a tényezőket az anyag belső szerkezete és a sejtfal degradációja jobban befolyásolja, mint a fa sűrűsége [31].

Egy prediktív modell, amely a fa mechanikai tulajdonságaira összpontosít, nyolc fafajt értékelt négy nedvességszinten, különös figyelmet fordítva a vágási erőkre. A tanulmány megállapította, hogy a szilárdság és a szívósság jelentősen befolyásolja a vágási erőket, míg a rugalmas tulajdonságok kevésbé dominánsak. A kifejlesztett modellek kizárólag a mechanikai tulajdonságokra támaszkodnak, és nagy prediktív pontosságot mutatnak [32].

A kemencében szárított, zöld és fagyasztott fenyőléc fűrészelése során az előtolási sebesség jelentős hatással volt a vágási teljesítményre. A legnagyobb teljesítmény a fagyasztott fa esetében volt szükséges, míg a felület hullámossága a száraz fában volt a legkifejezettebb [33].

A faanyag forgácsolóerő-előrejelzésére empirikus modell készült, amely figyelembe veszi a fa sűrűségét, a nem vágott forgácsvastagságot, a szemcseszöveget és a szerszám csavarvonal-szögét [34]. A tangenciális és radiális forgácsolóerők összetett kölcsönhatásait elemezve különböző fafajok (Douglas fenyő, tölgy) megmunkálása során megállapították, hogy a jelenlegi modellek nem mindig írják le pontosan a valós folyamatokat [35].

A mozambiki fafajok esetében végzett vizsgálatok során a vágási paraméterek optimalizálására törekedtek, amelyhez piezoelektromos erőmérő cellát és válaszfelület-módszert alkalmaztak [36]. A válaszfelület-módszer olyan statisztikai eljárás, amely a bemeneti paraméterek (például a vágási sebesség vagy az előtolás) és a válaszváltozók (például a vágóerő) közötti összefüggések feltárására és matematikai modell kialakítására szolgál. A módszer segítségével meghatározható, hogy a vizsgált paraméterek mely beállításai eredményeznek minimális vágóerőt vagy optimális működési feltételeket. Az európai bükk és a lucfenyő összehasonlítása során a bükk jelentősen nagyobb vágási ellenállást mutatott, több mint kétszeres értékkel a vizsgált erőtartományban [37].

A *Pinus sylvestris* L. fa fűrészelési szimulációja során vizsgálták a fő (tangenciális) forgácsolóerő és a normál (radiális) forgácsolóerő közötti nemlineáris összefüggéseket, nyolc különböző megmunkálási paraméter hatását elemezve [38]. A kínai fenyő, mongol fenyő és mandzsúriai kőris esetében a vágási szög és a vágási vastagság növelése csökkentette a fő és merőleges forgácsolási erőket, míg a vágási sebesség hatása elhanyagolható volt [39]. Egy kutatás szerint a fa, mint megújuló erőforrás egyre növekvő szerepét hangsúlyozva rámutatott az anyagtulajdonságok változékonyságának csökkentésének szükségességére, amely kulcsfontosságú a hatékony szerszámfejlesztés és energiahatékonyság szempontjából [40].

2.5. Szerszámkopás és vágási hatékonyság összefüggései

A bimetál fűrészlapok kopási mechanizmusainak elemzése rámutatott arra, hogy a modern ipari technológiák - például a hőkezelések, felületkezelések és kopásfigyelő módszerek - kulcsfontosságú szerepet játszanak a kopás csökkentésében. Az ilyen innovatív megkö-

zelítések nemcsak a szerszámok élettartamát növelik, hanem javítják a vágási folyamatok hatékonyságát is. Ezen fejlesztések összhangban állnak a végeselemes feszültségelemzéssel, a törésmechanikai modellekkel és a precíziós szerszámok fejlesztésével, amelyek segítenek a vágási dinamikák pontosabb megértésében [41].

A faanyagok vágásának optimalizálása érdekében végzett kutatások kimutatták, hogy az alacsonyabb vágási magasság és szélesség, valamint a fagyasztott fa használata jelentősen csökkenti a durva szilánkosodást és javítja a felület simaságát. Ezek az eredmények alapvető fontosságúak a precíziós vágási folyamatok optimalizálásában, tovább hangsúlyozva a fejlett mérési módszerek és a törésmechanikai modellek jelentőségét a szűrőfűrészek és más vágószerszámok alkalmazásában [42]. A kézi szűrőfűrészek esetében ezek a tényezők különösen relevánsak, mivel az eszköz dinamikai viselkedése jelentősen eltér a nagyobb ipari gépektől, így a pontos modellalkotás kulcsfontosságú a hatékonyság növelése szempontjából.

A vágószerszámok élessége jelentős hatással van a forgácsolási erőkre és a felületi minőségre. Egy hibrid végeselem-modellt alkalmazó szimuláció a radiáta fenyő (*Pinus radiata*), egy gyors növekedésű, puhafa kategóriába tartozó, ipari felhasználás szempontjából jelentős fenyőfaj forgácsolási folyamatát vizsgálva arra a következtetésre jutott, hogy a vágóélesség kritikusán befolyásolja a vágási dinamika alakulását. Figyelemre méltó átmenet következik be, amikor a vágóél sugara a farostok görbületi sugara alá esik. A kísérleti validálás kimutatta, hogy a vágóerők jelentősen csökkennek az élesség növekedésével, amíg el nem éri a küszöbértéket, majd stabilizálódnak [43].

Egy új módszertant mutattak be a fa mechanikai tulajdonságainak forgácsolóerők mérésével történő meghatározására. A törésmechanikán alapuló matematikai modell magában foglalja a törési szívósságot, az anyag plaszticitását és a súrlódást, figyelembe véve a vágóél sugarát is. Ez a megközelítés lehetővé teszi az energetikai hatások előrejelzését még vékony vágatlan forgácsok esetén is a nyírási síkszög meghatározásával. A módszertan segítségével a törési szívósság és a nyírási folyáshatár egyidejűleg meghatározható a forgácsoló erőkből, amely különösen fontos a forgó szerszámokkal, például körfűrészekkel végzett favágás során [44]. Bár a módszer elsősorban forgó szerszámokra készült, alkalmazható lehet a kézi szűrőfűrész vágási teljesítményének elemzésére is, különösen a dinamikus erőhatások és a szerszám kopásának vizsgálata során.

A forgácsolóerő-együtthatók, a szerszámgeometria és a szerszámkopás közötti kapcsolatokat részletesen vizsgálva kimutatták, hogy a megfelelő paraméterezés kulcsfontosságú a vágási teljesítmény optimalizálásában. Az alkalmazott modellek figyelembe veszik az élvonalbeli geometria és a forgácsolási feltételek változásait, amelyek kritikusak az aktív forgácsolóerők előrejelzéséhez. Az élvonalbeli szegmenshossz és a forgácsvastagság paramétereit integrálva meghatározható a súlypont szöghelyzete a ferde területen, ami javítja a forgácsolóerő-előrejelzések pontosságát a gyártási folyamatokban [45].

A favágási és szétbontási folyamatok kritikus szerepet játszanak az olyan termékek alkatrészeinek gyártásában, mint a bútorok. A szerszámok élettartamának növelése, az energiafelhasználás optimalizálása és a vágási minőség javítása érdekében a modern technológiák egyre nagyobb szerepet kapnak. A kortárs vágási módszerek geometriai és kinematikai aspektusainak vizsgálata segít megérteni, hogy a különböző anyagtulajdonságok és szerszámparaméterek hogyan befolyásolják a vágóerőket és az anyagkárosodást [46].

2.6. Rezgéscsökkentési és stabilitási stratégiák a vágási folyamatokban

A vágási folyamatok hatékonyságát és energiafelhasználását számos tényező befolyásolja, beleértve a vágási irányt, a vágási mélységet. Kutatások igazolták, hogy a nagyobb hátszög és a kisebb vágási mélység egyaránt csökkenti a vágóerőket, miközben javítja a felületi minőséget, elősegítve a vágási paraméterek optimalizálását [47]. A forgácsvastagság, keresztmetszeti típus és vágási sebesség analízise azt mutatta, hogy a nagyobb forgácsvastagság és előtolási sebesség növeli a vágóerőket és a felületi érdességet, míg a vágási sebesség főként a vágóerőkre hat [48].

A piezoelektromos dinamométerekkel végzett mérések kimutatták, hogy a vágási és előtolási sebesség növelése csökkenti a vágóerőket, különösen az elsődleges és normál erőkomponenseket, hangsúlyozva a mérési technológiák, például a nyúlásmérő bélyegek és törésmechanikai modellek szerepét [49]. A kisebb vágóélek által generált erők a teljes vágóerő akár 55-75 %-át is kitehetik, különösen szárított fa esetében, így az optimalizált vágási geometria jelentősen csökkentheti ezeket az erőket [50].

A fűrészek vágóerejének pillanatnyi változásait elemző kutatások szerint a vágási folyamat nem folyamatos, hanem szakaszos jellegű. Az optimális motorfordulatszám fenntartása javítja a vágási hatékonyságot, csökkenti az energiafogyasztást és a vibrációs instabilitásokat, hozzájárulva a vágási stratégiák finomhangolásához [51].

A nagy sebességű fűrészek dinamikai viselkedésének vizsgálata, különös figyelmet fordított a rezgések és a vágóerők közötti egyensúlyra. Az eredmények rávilágítottak a megfelelő fűrészhajtási stratégiák alkalmazásának fontosságára, amelyek hozzájárulhatnak a gépek stabilitásának és hatékonyságának javításához [52].

A szalagfűrész esetében a vágási folyamatok hatékonyságát és pontosságát számos tényező befolyásolja, beleértve a szerszámgeometriát, a terhelési körülményeket és a vágás során fellépő erőhatásokat. A szalagfűrész fogainak mikrogeometriáján végzett végeeselemzés kimutatta, hogy a terhelési körülmények jelentős szerepet játszanak a fogkopásban és a szerszám élettartamában. Ehhez szorosan kapcsolódik a szerszámdinamika, a pozicionálási hibák és a kopás vizsgálata, amelyek együttesen befolyásolják a vágási folyamat hatékonyságát és pontosságát. Ezen tényezők modellezése nemcsak a folyamat jobb megértését segíti elő, hanem lehetőséget ad a vágási paraméterek optimalizálására is, támogatva stabilabb és energiahatékonyabb megoldások fejlesztését. A vágási pontosság és az anyagfelhasználás hatékonyságának javításában az elhajlás csökkentése is kulcsszerepet játszik. Kutatások igazolták, hogy a fűrészlap anyaga, feszítése és a vágási sebesség közvetlen hatással van a lap oldalirányú elhajlására, ami a végső vágási minőséget is meghatározza. Emellett a különböző fafajták és nedvességtartalmak mellett végzett vágóerő-elemzések rávilágítottak arra, hogy a nedvességtartalom és a vágási irány jelentősen befolyásolják a vágóerőket, ezzel közvetlenül hatva a felületi minőségre és az energiafogyasztásra. A vágási folyamat rezgéseivel, sebességeivel és forgácsképződési mechanizmusaival kapcsolatos kutatások szintén megerősítették ezeket az összefüggéseket. A vágási stabilitás fenntartásához egyre nagyobb jelentőséggel bírnak az intelligens monitorozási megoldások. A valós idejű rezonanciafelismerési módszerek alkalmazása például új lehetőségeket nyitott meg a precíziós vágási folyamatok terén. Egy akusztikus jelfeldolgozási eljárás, amely a Fourier-transzformáció és a diszkriminancia-analízis kombinációját használja, 96 %-os felismerési arányt ért el, ami kiemeli az ilyen módszerek hatékonyságát a rezgések monitorozásában. Az ilyen fejlett diagnosztikai eljárások közvetlenül összekapcsolódnak a mechanikai modellek és dinamikai tényezők vizsgálatával, tovább erősítve a

stabil és hatékony vágási stratégiák jelentőségét. Továbbá rezgések és sebességek elemzésére szolgáló korszerű módszerek közül kiemelkedik a gyors Fourier-transzformáció (FFT) alkalmazása, amely lehetővé teszi a vágási folyamat rezgéseinek és sebességeinek pontos monitorozását [53].

A precíziós vágási technológiák fejlesztéséhez tehát elengedhetetlen a szerszámok kopásának, a rezgések hatásának és a vágási paraméterek finomhangolásának folyamatos vizsgálata. A modern mérési módszerek és modellek lehetőséget biztosítanak az optimalizálásra, ezáltal növelve a vágási folyamatok stabilitását, energiahatékonyságát és pontosságát [4, 54–57].

A mikromechanikai modellek alkalmazása a vágóerők előrejelzésére segíti az energiahatékonyság növelését és az anyagvesztés minimalizálását [58]. A forgácsképződési mechanizmusokat vizsgáló kutatások szerint a vágási irány és a növekedési gyűrű szélessége jelentősen befolyásolja a forgácsvastagságot és minőséget [59].

A változó sugárirányú hézagszögű fűrészfog oldalélek hatása is jelentős, a teljes vágóerő akár 16,9%-át is kitehetik, befolyásolva a vágási minőséget és hatékonyságot [60].

A körfűrészek feszültségeit és forgácsolási erőit végeelemes analízissel (VEM) vizsgálják, amely a hagyományos módszerekkel szemben pontosabb eredményeket nyújt [61]. A törésmechanika alkalmazása segíti a vágási ellenállás és energiafelhasználás modellezését, figyelembe véve a súrlódási együtthatót és a hátszöget [62]. A szalagfűrészelés új modellje a kezdeti feszültség hatását vizsgálja, amely befolyásolja a szükséges vágási erőt és a szalagfeszültség változásait [63]. Egy új dinamikus többfogú vágóerőmodell figyelembe veszi a változó fogosztás és az előtolás hatását a forgácsolóerő dinamikájára [64].

A fűrészelési folyamatok precizitásának és hatékonyságának javítása érdekében elengedhetetlen a vágási paraméterek folyamatos finomhangolása, a szerszámkopás és a rezgések hatásainak vizsgálata, valamint a fejlett modellezési és mérési módszerek alkalmazása. Az ipari gyakorlatba bevezetett prediktív modellek és online monitorozási technológiák hozzájárulnak a termelékenység növeléséhez és a megbízhatóság fokozásához [65, 66].

2.7. Csúszómód-szabályozás alkalmazása vágási folyamatokban

A fejlett szabályozási technikák, például a csúszómód-szabályozás (SMC), egyre elterjedtebbé váltak a vezérlőrendszerek bizonytalanságainak és zavarainak kezelése érdekében. Az SMC egy hatékony módszer a nemlineáris rendszerek szabályozására, köszönhetően rugalmasságának és stabilitásának. Az SMC elméleti alapjainak áttekintése kulcsfontosságú annak érdekében, hogy teljes mértékben kiaknázható legyen a benne rejlő potenciál. Az 1950-es és 1960-as években a Szovjetunióban kidolgozott változó szerkezetű rendszerek elmélete szolgált az SMC alapjául. Vadim I. Utkin [67] munkája tette lehetővé ennek az elméletnek a széles körű alkalmazását olyan területeken, mint a robotika [68], a szervohajtások [69], a repülés, valamint az utóbbi időben az indukciós motoros hajtások [70]. Ez a tulajdonság tette az SMC-t a modern vezérlőrendszerek egyik alapvető elemévé, különösen bonyolult, nemlineáris rendszerek esetében [71]. Az SMC alkalmazásának egyik legnagyobb kihívása a „csattogás” jelensége, amelyet a [72] által vizsgált vezérlőbemenet hirtelen változásai által okozott nagyfrekvenciás gerjesztést idéz elő.

Az SMC elméleti aspektusait, különösen a stabilitás követelményeit és a visszacsatolási dinamika szerepét a kívánt rendszerválaszok elérésében, korai alapozó kutatások határozták meg, mint például Sira-Ramirez munkája [73]. Ezekre az elméleti alapokra építve az SMC gyakorlati alkalmazását precíziós rendszerekben, például robotmanipulátorokban is vizsgálták. Az ilyen tanulmányok rámutattak arra, hogy a megbízható szabályzórend-

szerek kialakítása elengedhetetlen a pontos nyomon követés és az energiahatékonyság maximalizálása érdekében [74].

A közelmúlt fejlesztései révén az SMC alkalmazási területe jelentősen kibővült, különösen egyes műszaki problémák hatékony megoldásán keresztül. A diszkrét idejű csúszómód-szabályozási eljárások például bizonyítottan hatékonyak a "csattogás" csökkentésében, különösen digitális rendszerek esetében, ahol a szabályozási intervallumok pontos időzítése kulcsfontosságú [75]. Mechanikai rendszerekben, például fúroszerszámoknál, a helyzetkövetés és pozicionálás javítására az egyik leghatékonyabb módszer az állapotmegfigyelőket alkalmazó adaptív csúszómód-szabályozás. Ez jól mutatja, hogy az SMC képes alkalmazkodni a gyakorlati kihívásokhoz, miközben továbbra is precíz ellenőrzést biztosít [76].

Az SMC technikák fejlesztése elsősorban a bonyolult, nemlineáris rendszerek és változó dinamikai körülmények hatékony kezelésére összpontosít. Ezek a módszerek különösen hasznosak olyan alkalmazásokban, ahol az energiahatékonyság és az autonóm működés kiemelt szerepet kap. Az olyan új megközelítések, mint a fix idejű konvergenciával rendelkező csúszómód megfigyelők, jelentősen javították az állapotbecslés pontosságát és a rendszer gyors reakcióidejét, ami különösen előnyös a megbízhatóság és a hibadiagnosztika szempontjából [77, 78].

Az SMC hatékonysága számos területen bizonyított, az akkumulátoros, hordozható eszközök - például akkus szűrőfűrészek - szabályozásában eddig kevésbé vizsgálták. Az ilyen szerszámok sajátos kihívásokat jelentenek, például a nemlineáris és periodikus mechanikai mozgás, a hirtelen áramfelvételek, valamint az akkumulátoros működésből adódó korlátok miatt. Ezen kívül az SMC magas kapcsolási frekvenciája fokozhatja a "csattogás" jelenségét, ami korlátozhatja a gyakorlati alkalmazhatóságot. E kihívások kezelése elengedhetetlen az akkumulátoros szerszámok teljesítményének optimalizálásához, az energiahatékonyság növeléséhez és a működési megbízhatóság javításához.

Az SMC legújabb fejlesztései rámutatnak annak jelentőségére a nemlineáris dinamikai rendszerekben, valamint a modern mérnöki kihívások megoldásában. A tranziens teljesítmény javítására összpontosító kutatások igazolták a nemlineáris visszacsatolásvezérlő rendszerek hatékonyságát [79]. Az eredmények azt mutatják, hogy az SMC számos konfiguráció esetén képes fenntartani a pontosságot és a megbízhatóságot, így ígéretes megoldásként szolgál az akkumulátoros szűrőfűrészek sajátos kihívásaira. Jelen disszertáció egy része, ezt az ismeretanyagot egy új, kettős megfigyelős modell kifejlesztésével bővíti, amely kifejezetten a vezeték nélküli eszközök dinamikai sajátosságaihoz igazodik. Az új architektúra egy elsőrendű referenciamodellt kombinál egy alacsony rendű állapotter-megfigyelővel, amely hatékonyan kezeli a modellezési bizonytalanságokat, növeli a rendszer stabilitását és precíz állapotbecslést biztosít [80].

A kettős megfigyelős rendszer alkalmazása számos előnnyel jár, többek között a stabil fordulatszám-szabályozás, a minimális „csattogási” jelenség és az optimalizált energiafelhasználás terén. A kezdeti áramcsúcsok és terhelésváltozások hatásainak csökkentésével a javasolt megközelítés egyenletesebb és hatékonyabb működést biztosít, miközben hozzájárul az SMC elméleti és gyakorlati fejlődéséhez. Az SMC egyik legnagyobb kihívása, a nagyfrekvenciás kapcsolásból eredő „csattogás”, különösen problémás lehet a stabil és hatékony szabályozás szempontjából. Ezt a jelenséget a diszkrét idejű csúszómód-szabályozás jelentősen mérsékelheti, amely digitális rendszerekben különösen fontos szerepet játszik, hiszen lehetővé teszi a megfelelő szabályozási tartomány meghatározását és növeli a rendszer robusztusságát. A nemlineáris vezérlőrendszerekben ezek a fejlesztések már számos alkalmazásban megmutatták előnyeiket, például többrotoros UAV-ok stabi-

lizálásában. Az ilyen megoldások szemléltetik, hogy az SMC miként képes csökkenteni a kimaradásokat és növelni a rendszerek alkalmazkodóképességét dinamikus környezetekben, ezáltal megerősítve létjogosultságát a korszerű mérnöki alkalmazásokban [80].

Ezek a fejlesztések kulcsfontosságúak a nemlineáris vezérlőrendszerek kialakításában, különösen az akkumulátoros eszközök alkalmazásai során, ahol a megbízhatóság, a stabilitás és az energiahatékonyság kiemelt szerepet kap. Mindazonáltal az SMC számos területen sikeresen alkalmazható, hordozható, akkumulátorral működő berendezések, például vezeték nélküli szűrőfűrészek esetében egyedi kihívások merülnek fel. Az ilyen eszközök periodikus, nemlineáris mechanikai mozgása gyakran hirtelen áramcsúcsokat eredményez, amelyek negatívan befolyásolják az energiafelhasználást és az akkumulátor élettartamát. Emellett az SMC magas kapcsolási frekvenciája miatt különösen érzékeny ezeknek az eszközöknek a kis léptékű dinamikájára, ami fokozhatja a „csattogó” hatásokat.

Ezeknek a kihívásoknak a kezeléséhez egyre nagyobb igény mutatkozik olyan fejlett szabályozási technikák iránt, amelyek nemcsak a hordozható szerszámok teljesítményét és hatékonyságát növelik, hanem azok élettartamát is meghosszabbítják. Korábbi kutatások foglalkoztak a forgácsképződés dinamikájával a megmunkálási folyamatok során [81, 82], valamint a forgácsolóerők és a szerszámkopás vizsgálatával az erdészeti és faki-termelési alkalmazásokban [83–85]. Az optimalizálás azonban kevés figyelmet kapott. Az energiahatékonyság növelése, az áramkiugrások csökkentése és az egyenletes teljesítmény biztosítása változó terhelési viszonyok között továbbra is kevésbé kutatott terület. Ezt a hiányosságot igyekszik áthidalni a jelen tanulmány, amely csúszómód szabályozási technikák alkalmazásával törekszik az említett problémák megoldására, valamint az elektromos és mechanikai teljesítmény javítására.

Az SMC az évek során a teljesítményelektronika és a mozgásvezérlés egyik meghatározó elemévé vált, köszönhetően annak, hogy hatékonyan kezeli a nemlinearitásokat és a bizonytalanságokat [86, 87]. Mivel a csúszófelület kialakítása alapvetően befolyásolja a rendszer konvergencia-sebességét, az SMC egyik leglényegesebb aspektusának számít. A csúszófelület meredeksége meghatározó tényező a tartósság és a sebesség közötti optimális egyensúly megtalálásában. Ennek finomhangolására különböző megközelítéseket vizsgáltak, például a τ együttható állandó vagy időszakos módosítását [88]. Bizonyos problémák azonban továbbra is fennállnak, különösen a nagyfrekvenciás kapcsolás szabályozásával összefüggésben, amely rezonálhat a rendszer saját frekvenciájával, oszcillációkat idézve elő. A stabilitás és a megbízható működés biztosítása érdekében modellalapú zavarbecslőket is alkalmaztak, amelyek segítenek az ilyen ingadozások csökkentésében [89].

A csúszómód-szabályozást széles körben kutatták olyan területeken, mint a robotika és az indukciós motorok hajtásai, hordozható, akkumulátoros berendezésekben való alkalmazása még viszonylag kevésbé feltárt terület. Az akkumulátoros szűrőfűrészek és más hordozható szerszámok speciális kihívásokat jelentenek, amelyek célzott megoldásokat igényelnek, figyelembe véve az ilyen rendszerek egyedi korlátait és működési környezetét. Míg a nagyobb méretű, folyamatosan üzemelő ipari gépeknél a szabályozás kialakítása kevésbé problémás, a hordozható eszközök esetében speciális szabályozási stratégiákra van szükség az áramcsúcsok, a terhelés okozta kimaradások és az energiahatékonysági problémák minimalizálásához. E kihívásokra reagálva a jelen kutatás célja, hogy hidat képezzen a csúszó üzemmód szabályozás elméleti fejlődése és az akkumulátoros szerszámokban való gyakorlati alkalmazása között. A módszer célja az akkumulátoros szűrőfűrészek kezdeti áramcsúcsának csökkentése, miközben optimalizálja az energiafelhasználást és biztosítja a stabil működést.

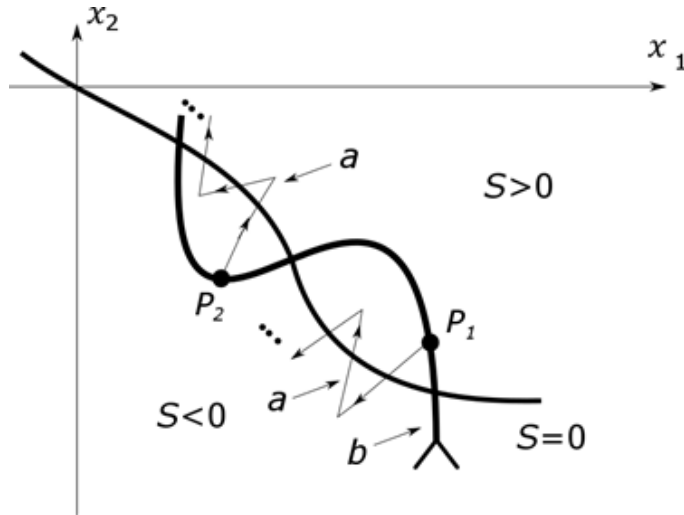
A javasolt kettős megfigyelős struktúra, amely egy elsőrendű referenciamodellt egy ala-

csony rendű állapotér-megfigyelővel kombinál, átfogó megoldást kínál a modellezetlen dinamika okozta kihívásokra. Ez a rendszer több szempontból is előnyös: csökkenti a szabályozás pontosságát befolyásoló zörgést, meghosszabbítja a gépalkatrészek élettartamát és növeli a vezérlőrendszer megbízhatóságát az állapotváltozók precíz nyomon követésével. A kettős megfigyelős architektúra további előnye, hogy folyamatosan változó terhelési körülmények között is pontos és stabil működést biztosít, valamint hatékony fordulatszám-szabályozást tesz lehetővé. Ezenkívül a csúszómód-szabályozására jellemző nem kívánt hatások mérséklésével javítja a szabályozás pontosságát, csökkenti a mechanikai kopást és maximalizálja az energiafelhasználást, így növelve az akkumulátor élettartamát és az akkumulátoros szerszámok hatékonyságát. Ezek a fejlesztések együttesen hozzájárulhatnak az akkumulátoros szűrőfűrészek megbízhatóbb és hatékonyabb működéséhez a valós alkalmazásokban is.

2.8. Megfigyelő alapú csúszómód-szabályozás

A csúszómód-szabályozás egyik legnagyobb kihívása abból fakad, hogy minden mérnöki modell bizonyos egyszerűsítéseken és közelítéseken alapul, amelyek elkerülhetetlenül eltérnek a valós fizikai rendszerek viselkedésétől. Ezek az egyszerűsítések nem minden esetben okoznak problémát, különösen folytonos szabályozási jelek alkalmazásakor, de csúszómód-szabályozás esetén a helytelenül modellezett dinamikák jelentősen megnövelhetik az instabilitás kockázatát. Különösen veszélyes helyzetek alakulhatnak ki, amikor a diszkontinuus szabályozási jel magas frekvenciás komponense rezonanciát idéz elő a rendszer elhanyagolt gyors dinamikájával, ami a rendszerben instabil oszcillációkat eredményezhet. Ez a jelenség alapvetően különbözik a véges kapcsolási frekvenciából eredő „csattogás” (chattering) jelenségtől, amely során a rendszer ugyan oszcillál, de stabilitása nem sérül.

A csúszómód-szabályozás alapját képező kapcsolási stratégia fő célja, hogy a rendszer, amint elhagyja a csúszó felületet, a lehető legrövidebb időn belül visszatérjen arra. Ennek érdekében a szabályozási pályának meg kell törnie a folytonosságot, lehetővé téve, hogy a rendszer viselkedése azonnal megváltozzon. Matematikailag ez azt jelenti, hogy egy differenciálegyenlettel leírt rendszer esetén a $\dot{x}_n(t)$ időderivált azonnali, diszkontinuus változásra képes, hogy a szabályozott pálya a csúszó felület felé forduljon. A 2.4 ábra segítségével részletezzük ezt a jelenséget. Tegyük fel, hogy a rendszer pályája a csúszó felületet elhagyva az P_1 pontban tartózkodik. Ezen a ponton a szabályozási jel azonnal megváltozik, azzal a céllal, hogy a pálya az a görbe mentén visszaforduljon, és a csúszó felülethez visszatérve ott oszcilláljon, egy stabil „csattogási” mintázatot követve. Azonban a valós rendszerekben előfordulhat, hogy az egyszerűsített modell nem vesz figyelembe bizonyos dinamikai komponenseket. Ezek a nem modellezett gyors dinamikák eltérítik a pályát, amely így az b görbe mentén halad tovább, ahelyett, hogy az a görbét követné. Ez azt eredményezi, hogy a pálya nem a várt módon stabilizálódik, hanem a P_2 pontban ellentétes irányban ismét eltér. Ez a folyamat idővel növekvő oszcillációkat idézhet elő, ami a rendszer instabilitásához vezethet [90]. Fontos hangsúlyozni, hogy ez a jelenség minőségileg eltér a véges kapcsolási frekvenciából eredő „csattogás” jelenségtől. A csattogás során a rendszer minden egyes kapcsolási ciklus után stabilan visszatér a csúszó felülethez, még akkor is, ha kisfrekvenciás oszcillációk lépnek fel. Ebben az esetben viszont, amint azt az a és b görbék közötti különbség is mutatja, az el nem modellezett dinamikák miatt a rendszer eltér a várt viselkedéstől, és nem stabilizálódik a csúszó felületen, hanem egyre nagyobb amplitúdójú oszcillációkat produkál.



2.4. ábra. A nem modellezett dinamikák hatása a kapcsolatban [S5].

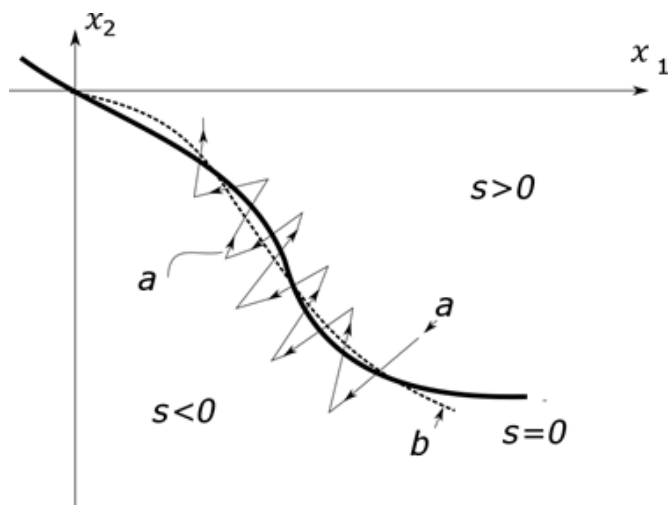
Ez a viselkedés különös figyelmet igényel a szabályozási stratégia tervezésekor, hogy az ilyen hibák hatása minimalizálható legyen. A jelenség lényege, hogy a nem modellezett dinamikák hatásai megjelenhetnek a csúszómód-szabályozás kapcsolási stratégiájában, amely így nem kívánt viselkedést idézhet elő. Az ilyen problémák kezelésére az egyik megoldás az, hogy biztosítsuk, hogy a rendszer átkapcsoljon a megfelelő időben, még mielőtt a pálya átlépné a csúszó felület másik oldalát. Ennek érdekében a szabályozott rendszer modelljét egyszerűsíteni kell, hogy a kapcsolási stratégia pontosabban igazodjon a valós rendszer dinamikájához. Ugyanakkor a tényleges rendszer fizikai szakasza adott, és nem mindig változtatható meg szabadon. Ezért elengedhetetlen egy állapotmegfigyelő kialakítása, amely figyelembe veszi az el nem modellezett dinamikákat és pontos állapotinformációt szolgáltat a szabályozó számára.

Az állapotmegfigyelő felépítése nemcsak a nem modellezett dinamikák kezelésében játszik szerepet, hanem azért is szükséges, mert a csúszómód-szabályozás alapvetően teljes állapot-visszacsatolást igényel. Gyakran előfordul azonban, hogy nem minden állapotváltozó mérhető közvetlenül a valós rendszerben, ezért a szabályozóhoz szükséges állapotok becslését egy megfigyelő segítségével kell elvégezni. Egy jól megtervezett állapotmegfigyelő lehetővé teszi a pontos becsléseket, és közvetett módon hozzájárulhat a szabályozás hatékonyságának javításához.

Egyes esetekben az állapotmegfigyelő nemcsak a nem mérhető állapotok becslésében segíthet, hanem a „csattogás” problémájának mérséklésében is szerepet játszhat. A csúszómód-szabályozás során a megfigyelő állapotpályája a kapcsolási stratégia hatására minden kapcsolásnál visszafordítható a csúszó felület felé. Ez azt eredményezi, hogy a csúszómód szabályozó nem közvetlenül a tényleges rendszer állapotpályáját kényszeríti a csúszó felületre, hanem a megfigyelő által becsült állapotpályát. Ez a megközelítés jelentősen csökkenti az el nem modellezett dinamikákból adódó problémákat, és javítja a rendszer stabilitását.

A 2.5 ábra szemlélteti ezt a koncepciót. Az ábrán az a görbe a megfigyelő által becsült állapotpályát reprezentálja, amely a szabályozási stratégiának megfelelően minden kapcsolás után visszafordul a csúszó felület felé. Ezzel szemben a tényleges rendszer állapotpályája, amelyet a nem modellezett dinamikák is befolyásolhatnak, nem jelenik meg

közvetlenül a szabályozóban, hanem közvetett módon, a megfigyelő pályáján keresztül befolyásolja a rendszert.

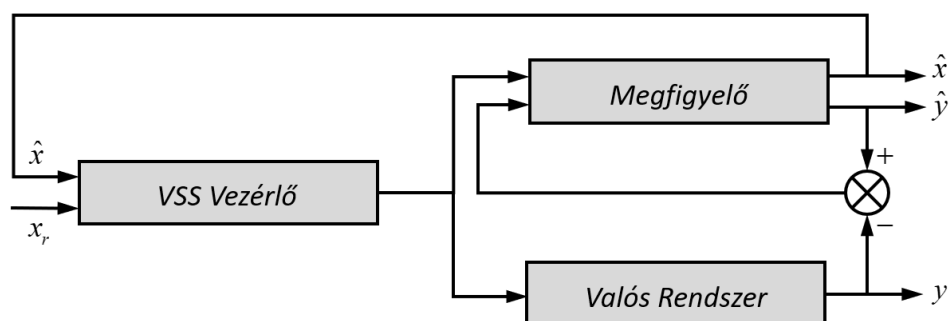


2.5. ábra. Az állapotpálya egy nem modellezett dinamikamentes megfigyelőre alapozott csúszómód szabályozónál [S5].

Ez az állapotmegfigyelő-alapú megközelítés jelentős előnyöket kínál, mivel csökkenti a nem modellezett dinamikák és a „csattogás” által okozott problémákat, miközben fenntartja a csúszómód-szabályozás gyors és pontos alkalmazkodási képességeit.

Ebben az esetben az állapotmegfigyelő egyfajta impulzusszélesség-modulációs egységként működik. A kapcsolási felületet és a szabályozási jelet a megfigyelt állapotváltozókból számítják, még akkor is, ha minden állapotváltozó mérhető [90]. Végül a megfigyelőt úgy kell megtervezni, hogy a tényleges és megfigyelt pályák kellően közel maradjanak egymáshoz; ekkor a tényleges pálya a csúszó felület közelébe kerül, ha nem is pontosan rá, ahogy azt a 2.5 ábra mutatja, ahol a b görbe a tényleges pályát reprezentálja.

A szabályozó struktúráját a 2.6 ábra mutatja. Ha a megfigyelő struktúrája és paraméterei ismertek, az Observer - VSS szabályozó kör ideális csúszómódot tud létrehozni (VSS = változó struktúrájú rendszerek).



2.6. ábra. A változó struktúrájú rendszer szabályozási struktúrája [S5].

Az egyszeres perturbációs elv alapján [91], a tényleges rendszer gyors dinamikája elhanyagolható a megfigyelő modellben. Így a megfigyelt állapotváltozók száma jelentősen

csökkenthető. A Luenberger-megfigyelőt leíró egyenletek:

$$\frac{d}{dt}\hat{x} = A_n\hat{x} + B_nu + O_{2Gn}(y - \hat{y}), \quad (2.1)$$

$$\hat{y} = C_n\hat{x} + D_nu, \quad (2.2)$$

ahol $\hat{x}$ az állapot becsült értéke, A_n , B_n , C_n , és D_n a nominális rendszer mátrixai, O_{2Gn} a redukált rendű állapotmegfigyelő erősítési mátrixa, y a kimeneti jel, $\hat{y}$ pedig a becsült kimeneti érték.

A n index a névleges értékeket jelöli. Az elhanyagolt gyors dinamikák átmeneti hatása miatt a tényleges rendszer és a megfigyelő kimenetei között aszimptotikusan csökkenő hiba lesz, de a nem modellezett dinamika nem okoz oszcillációt a mozgásban.

Az általános ökölszabály szerint az O_{2Gn} értékét úgy kell megválasztani, hogy az állapotmegfigyelő hibája olyan időállandóval csökkenjen, amely nagyságrendileg kisebb, mint a rendszer domináns időállandója. Ezért elsőbbséget élvez az előrejelzési hiba csökkenési időállandója az O_{2Gn} pontos értékével szemben:

$$\dot{x}_{err}(t) = (A_n - O_{2Gn}C_n)x_{err}(t). \quad (2.3)$$

2.9. Szimulált hűtés alkalmazása Scimscape modellezés esetén

A szimulált hűtés egy metaheurisztikus optimalizációs módszer, amelyet a kombinatorikus és folyamatos optimalizálási problémák globális minimumának elérésére terveztek. Az algoritmus a fizikai hűtési folyamat által inspirált, amelyben egy szilárd anyagot felmelegítenek, majd lassan lehűtenek, hogy elérjék a legkisebb energiaállapotot. Az optimalizáció során megengedett heurisztikus lépések időlegesen rontják a költségfüggvény értékét, lehetővé téve az algoritmus számára, hogy kilépjen a lokális minimumokból és megtalálja a globális optimumot [92, 93].

Ez a módszer rendkívül hatékony, mivel elkerüli a lokális optimumokat, és matematikailag megalapozott konvergenciát mutat megfelelő hűtési ütemezéssel. Sikerét számos alkalmazás bizonyítja, beleértve a kombinatorikus problémákat, mint például az Utazó Ügynök Probléma, és a folyamatos optimalizációs problémákat a statisztikában [93]. A Metropolis-kritérium, amely termodinamikai mechanizmusokon alapul, a potenciális megoldásokat a Boltzmann-eloszlás szerint választja ki [94].

Fejlesztések, mint például a *Termosztatisztikai Persistencia*, amely fokozatosan csökkenti az optimalizációs problémák keresési terét az 0-1 változók valószínűségi várható értékének becsülésével és bizonyos változók fixálásával az iterációk során, jelentős előnyöket kínálnak. Ezek a módosítások csökkentik a számítási költségeket, és gyorsabb konvergenciát tesznek lehetővé, különösen nagyméretű problémák esetén [94].

A párhuzamos számítási módszerek és a szimulált hűtés genetikai algoritmusokkal vagy tabu kereséssel történő kombinációjának hibrid megközelítései tovább javították az algoritmus hatékonyságát és alkalmazkodóképességét az adott problémaosztályokhoz [93, 94]. A hőmérsékleti paraméter beállításával az algoritmus csökkenti a keresési teret, és biztosítja a globális minimum körüli konvergenciát. A folyamat során a k_{Fc} paraméter iteratív módon módosul, minden lépésben újraszámítva a d_{ISE} értékét. Egy új paraméterértéket elfogadnak, ha csökkenti a d_{ISE} értékét, különben véletlenszerűen még elfogadható, hogy elkerülje a lokális minimumokat. Ahogy a hőmérséklet csökken, a véletlenszerű lépések kisebbek lesznek, javítva a keresést, amíg a folyamat egy optimális k_{Fc} értékre konvergál.

2.10. Villamos jellemzők mérése

Az áram időbeli változását elemzem a vágóerő teszt során. A mért és szimulált áramfelvétel alapján numerikus számításokat végzek az energiafogyasztásra és az akkumulátor teljesítményére vonatkozóan. A szakirodalom fejezetei átfogóan ismerteti a villamos jellemzők mérését, többek között árammérés elméletét, módszereit és az ehhez szükséges eszközöket. Részletesen tárgyalja az elektromechanikai mérőeszközöket, digitális műszereket, oszcilloszkópokat, valamint a különböző áramérzékelő transzducerek típusait, mint például a Hall-érzékelőket, Rogowski-tekerceket, optikai áramérzékelőket és söntöket. Ugyanakkor a leírás általános jellege miatt kevésbé tér ki speciális alkalmazásokra, például az akkumulátoros szerszámokban jelentkező kihívásokra [95].

2.11. Az irodalmi áttekintés kritikai összegzése

Az előzőekben ismertetett szakirodalmi források részletes bemutatása révén a vágási folyamatok és azok szabályozása, különösen az akkumulátoros kézi szűrőfűrészek esetében, sokoldalú áttekintést nyertünk a jelenlegi kutatási irányokról, modellekről és megközelítésekről. Ugyanakkor az áttekintett munkákban számos olyan hiányosság vagy korlát mutatkozik, amely további kutatások szükségességét indokolja, egyben rámutatva jelen dolgozat célkitűzéseinek relevanciájára.

Bár a bemutatott tanulmányok széles körben foglalkoztak a vágóerő mérésekkel és modellezéssel, azok többnyire nem tárgyalják kellő mélységgel a kézi szűrőfűrészek sajátos dinamikai jellegzetességeit. A jelenlegi kutatások túlnyomó része szalagfűrészekre, körfűrészekre vagy nagyobb ipari berendezésekre koncentrál, így az eredmények közvetlen adaptálhatósága hordozható eszközökre, például akkumulátoros kézi szűrőfűrészekre, csak korlátozott mértékben valósítható meg. Ebből kifolyólag szükség van olyan modellek és mérési eljárások kidolgozására, amelyek figyelembe veszik ezen kisebb, nagyfrekvenciás mechanikai rezgéseket és nemlineáris viselkedést produkáló eszközök egyedi tulajdonságait.

Az irodalom részletes áttekintése során azonosított további jelentős hiányosság, hogy a szakirodalmi forrásokban kevés figyelmet kap az akkumulátoros szűrőfűrészek energiafogyasztásának valós idejű előrejelzése és optimalizálása. Ezen belül is különösen hangsúlyos hiányként jelentkezik a vágóerők lineáris modelljeinek alkalmazása az akkumulátorüzemidő gyors és hatékony becslésére. Az irodalomban fellelhető modellek többsége elsősorban nemlineáris vagy komplex numerikus modelleken alapul, amelyek bár pontosak, számításigényük miatt korlátozottan alkalmasak valós idejű becslésekre. A disszertációban bemutatott lineáris csillapítási tényezőn alapuló modell jelentősége abban áll, hogy egyszerűsített, mégis megbízható alternatívát nyújt a valós idejű szimulációkra. Ezzel a módszerrel gyors és pontos becslés végezhető az akkumulátor várható üzemidejére, ami közvetlenül elősegíti a kézi szerszámok energiatakarékos működtetését és a felhasználói élmény javítását. Ez a megközelítés nemcsak az ipari gyakorlat számára releváns, hanem áthidal egy fontos rést az eddigi kutatásokban is, amelyet az irodalmi áttekintés nem tárgyal kellő mélységben.

Az áttekintett szakirodalmakban a csúszómód-szabályozás alkalmazása főként ipari robotok, villamos hajtások, vagy nagyobb teljesítményű rendszerek esetében került előtérbe, míg az akkumulátoros, kézi szerszámok terén eddig csak minimális figyelmet kapott. Ezáltal hiányzik egy átfogó elméleti és gyakorlati keretrendszer, amely ezen eszközök speciális, gyakran jelentős bizonytalanságokat és terhelésingadozásokat tartalmazó működésére op-

timalizált csúszómód-szabályozási technikát biztosítana. A csúszómód-szabályozás ugyan robusztussága miatt kedvező megoldást jelenthet ezekre a kihívásokra, mégis az irodalomban megfigyelhető „csattogás” jelenségének mérséklésére javasolt módszerek nem tárgyalják részletesen ezen szerszámok sajátos, akkumulátoros energiaellátásból és periodikus terhelésből fakadó nehézségeit. Ez a felismerés teszi aktuálissá egy olyan csúszómód-szabályozási modell kidolgozását, amely kifejezetten az akkumulátoros szűrőfűrészek nemlineáris, változó terhelésű viselkedéséhez igazodik, miközben minimalizálja a nem kívánt jelenségeket, különösen a „csattogást” és az instabil oszcillációkat.

Ezen kívül a vágóerő modellezési kutatások jellemzően nem térnek ki eléggé arra, hogy miként integrálhatók hatékonyan a szabályozási stratégiákba, különösen valós idejű alkalmazások esetében. Ezért fontos, hogy ne csupán a vágóerő mérésének és modellezésének elméleti alapjait dolgozzuk ki, hanem közvetlenül olyan szabályozási rendszerbe illeszthető megoldásokat találjunk, amelyek képesek azonnali, pontos és stabil visszacsatolást biztosítani a folyamat számára.

Végül megállapítható, hogy bár a szakirodalmi áttekintésben bemutatott eredmények és technológiák értékes alapot jelentenek a kutatás számára, szükség van arra, hogy ezeket egy egységes, integrált keretrendszerben ötvözve vizsgáljuk. Ez lehetővé tenné a különállóan tárgyalt módszerek - mint a vágóerő-mérés, energiafogyasztás-optimalizálás és robusztus szabályozási technikák - összehangolt alkalmazását, így egy komplexebb, átfogó megoldás jöhet létre. Ennek révén pontosabb valós idejű előrejelzéseket kapnánk, javíthatnánk a rendszer stabilitását és energiahatékonyságát, miközben a felhasználói élményt is magasabb szintre emelhetnénk.

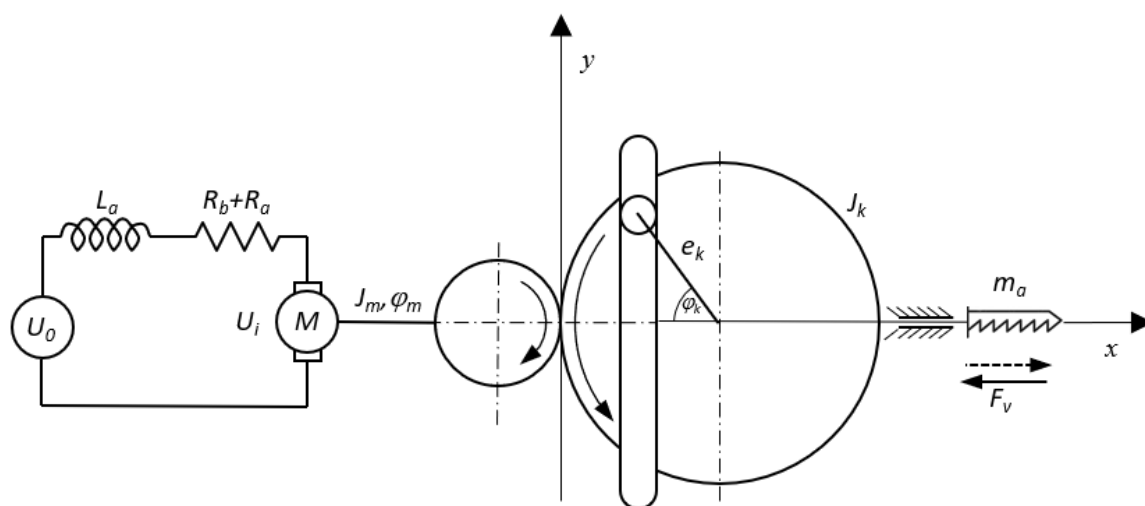
Az irodalomkutatást követően részletesen ismertetem a saját kísérleti méréseim során vizsgált anyagok jellemzőit, bemutatva a fajlagos vágóerő meghatározásának folyamatát, valamint a vágási műveletek során mért áramértékeket. Ezekre az eredményekre alapozva kialakítom az akkumulátoros kézi szűrőfűrészek elektromechanikai modelljét, különös figyelmet fordítva a Matlab/Simscape környezetben megvalósított valós, illetve lineáris vágóerő-modellek felépítésére és alkalmazására, kiemelten kezelve azok szerepét az akkumulátor-üzemidő hatékony és pontos előrejelzésében. A numerikus számítások és a szimulációk eredményeinek részletes elemzését követően, a csúszómód-szabályozás elméleti hátterére támaszkodva vizsgálom ennek a módszernek a hatékonyságát és gyakorlati alkalmazhatóságát az akkumulátoros kézi szűrőfűrészek nemlineáris modelljén. Végezetül a disszertációm záró részében összegzem a kutatás legfontosabb következtetéseit, hangsúlyozva az elért új tudományos eredményeket.

3. Elektromechanikai modell bemutatása

Az elektromechanikai modell célja a kézi szűrőfűrész mozgásának és dinamikai viselkedésének pontos leírása, amely lehetőséget biztosít a vágási folyamat során fellépő mechanikai és elektromos hatások elemzésére. Az elméleti alapok meghatározása és a szimulációk előkészítése során a modell alkalmas a különböző vágási körülmények vizsgálatára, a vágóerők hatásának elemzésére és a rendszer válaszáának előrejelzésére.

A modell felépítése négy fő komponensre épül. Az elektromos alrendszer az elektromos motor működését és szabályozását írja le, figyelembe véve a kapcsolófeszültséget, az áramot, az ellenállást, az induktivitást és a motor elektromágneses állandóit. A mechanikai alrendszer a motor tengelyének forgását és az excentermechanizmus közötti kapcsolatot modellezi, amely meghatározza a fűrészlap mozgását. A rendszer kinematikai és dinamikai egyenletei a fűrészlap mozgását és a mechanizmus nemlineáris dinamikai viselkedését írják le, beleértve az áttételi arányokat és az egyéb releváns hatásokat. A vágóerő modellezése kezdetben egy egyszerűsített, állandó erőt feltételező megközelítést alkalmazott, azonban a pontosabb eredmények érdekében dinamikus modellre van szükség, amely figyelembe veszi az anyagtulajdonságokat és a vágási paramétereket.

A modell kialakítása során a másodfajú Lagrange egyenlet alkalmazásával meghatározom a rendszer energiaviszonyait, és levezetem az elektromechanikai egyenleteket. A kapott differenciálegyenletek megoldása Runge-Kutta módszerrel történik, amely biztosítja a számítások pontosságát. A kézi szűrőfűrész elektromechanikai modellje a 3.1 ábrán látható.



3.1. ábra. Kézi szűrőfűrész elektromechanikai modellje [S4].

A fűrészlap x irányú elmozdulását az alábbi kinematikai egyenletekkel lehet leírni:

$$x(t) = e_k(1 - \cos \varphi_k(t)), \quad (3.1)$$

$$\varphi_k(t) = \omega_k t + \varphi_{k0}, \quad (3.2)$$

és

$$\varphi_m = i_{mk} \varphi_k \quad (3.3)$$

ahol $x(t)$ a fűrészlap helyzetét jelöli, e_k az excentricitás, $\varphi_k(t)$ a kulisszáskerék szöghelyzete, és φ_m a motor szöghelyzete. A (3.1) egyenlet az idő szerinti deriváltja a fűrészes sebességfüggvényét határozza meg:

$$\dot{x}(t) = e_k \dot{\varphi}_k(t) \sin(\varphi_k(t)). \quad (3.4)$$

A kísérleti mérések bemutatták, hogy a valóságban a vágóerők nem állandóak. Jelentős változásokat mutattak az üzemeltetés során, mint például az előtolási sebességek, a vágási sebességek és a különböző anyagtulajdonságok hatása. Ez az eltérés az egyszerűsített modell korlátaira mutatott rá, és egy fejlettebb, dinamikus megközelítés szükségességét jelezte, amely képes figyelembe venni a vágóerők időbeli változékonyságát.

Az ilyen fejlesztések alapot nyújtanak a kézi szűrőfűrészek teljesítményének további javításához és a fenntartható működés megvalósításához. A differenciálegyenletek leírásához a másodfajú Lagrange egyenletet alkalmaztam. A konzervatív tagokra vonatkozó Lagrange-függvény a következő:

$$L_f = T^* + W_m^* = \frac{1}{2} \underbrace{[J_m + J_k k_{mk}^2 + m_a e^2 k_{mk}^2 \sin(k_{mk} \varphi_m)]}_{J_{eq}(\varphi_m)} \dot{\varphi}_m^2 + \frac{1}{2} L_a \dot{q}^2, \quad (3.5)$$

és a nem konzervatív tagok által végzett virtuális munka növekménye:

$$\begin{aligned} \delta W_{nc} = & U_0 \delta q - R_a \dot{q} \delta q - k_e \dot{\varphi}_m \delta q + k_m \dot{q} \delta \varphi_m - \\ & - [F_v e k_{mk} \sin(k_{mk} \varphi_m)] \delta \varphi_m - b \dot{\varphi}_m \delta \varphi_m, \end{aligned} \quad (3.6)$$

ahol L_f a Lagrange-függvény, T^* a mechanizmus kiegészítő kinetikai energiája, W_m^* a tekercs kiegészítő mágneses energiája [96], J_m a motor tengelyének tehetetlenségi nyomatéka, J_k a kulisszas kerék tehetetlenségi nyomatéka, m_a a kulisszas mechanizmus váltakozó mozgású tömege, k_{mk} a hajtóviszony $\left(k_{mk} = \frac{1}{i_{mk}}\right)$, L_a a tekercs induktivitása, $\dot{q}$ a töltés idő szerinti deriváltja (azaz az áram), δW_{nc} a nem konzervatív tagok virtuális munkája, U_0 a kapocsfeszültség, δq a töltés virtuális változása, R_a az áramkör ellenállása, k_e a motor elektromos állandója, $\delta \varphi_m$ a szögelfordulás virtuális változása, F_v a vágóerő, és b a motor belső csillapítási tényezője.

A (3.5)-(3.6) alapján a Lagrange-egyenlet használható az elektromechanikai egyenletek levezetésére. A másodfajú Lagrange-egyenlet általános alakja:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, \quad (3.7)$$

ahol az általánosított koordináták közül $q_1 = q(t)$ az elektromos töltést jelöli, amelynek idő szerinti deriváltja az áram, azaz $\dot{q}(t) = i(t)$, míg $q_2 = \varphi_m(t)$ a motor tengelyének

szöghelyzetét adja meg. A megfelelő általánosított erők esetében az Q_1 a feszültségi mennyiségeket, az Q_2 pedig a nyomatékot reprezentálja. Az egyenletbe való behelyettesítés után kapjuk a következő egyenletet:

$$U_0 = L_a \ddot{q} + R_a \dot{q} + k_e \dot{\varphi}_m, \quad (3.8)$$

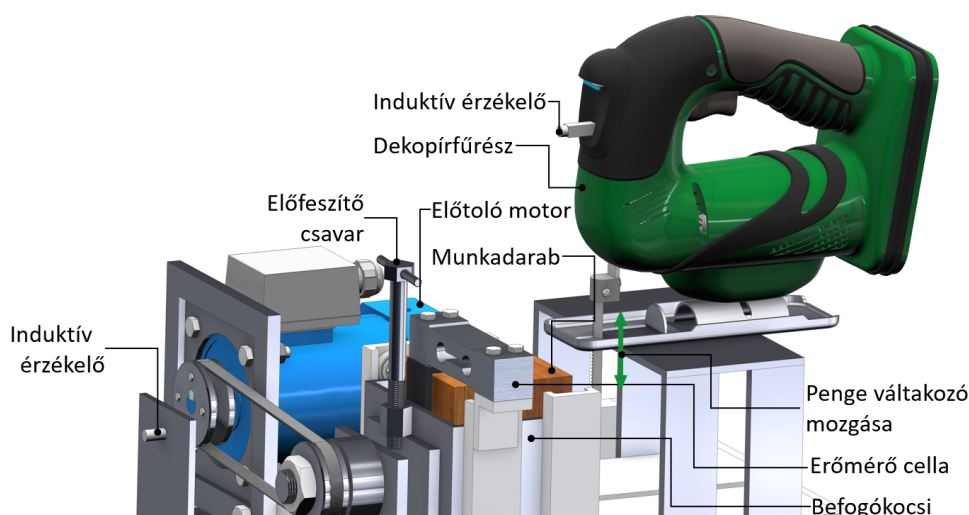
$$J_{eq}(\varphi_m) \ddot{\varphi}_m + \frac{1}{2} J'_{eq}(\varphi_m) \dot{\varphi}_m^2 = k_m \dot{q} - F_v e_k k_{mk} \sin(k_{mk} \varphi_m) - b \dot{\varphi}_m. \quad (3.9)$$

A kulisszás mechanizmus miatt a mechanikai egyenlet nemlineáris alakú, amely numerikusan megoldható a Runge-Kutta féle adaptív lépésközű negyedrendű numerikus módszerrel.

4. Kísérleti mérések

Az elektromos kézi szűrőfűrész vágóerejének mérése kihívást jelent. Az első feladatom egy olyan mérőrendszer tervezése volt, amelyen a vágóerő mérés el végezhető. A mérőberendezést úgy terveztem, hogy a különböző anyagok, például akácfa, és metamid megmunkálására is alkalmas legyen. Minden anyag esetében azonos kísérleti paramétereket alkalmaztam, beleértve az előtolási sebességet, a vágási sebességet, biztosítva a vizsgálatok konzisztenciáját. Ez az egységes megközelítés lehetővé tette a vágóerő viselkedésének közvetlen összehasonlítását az eltérő anyagok között.

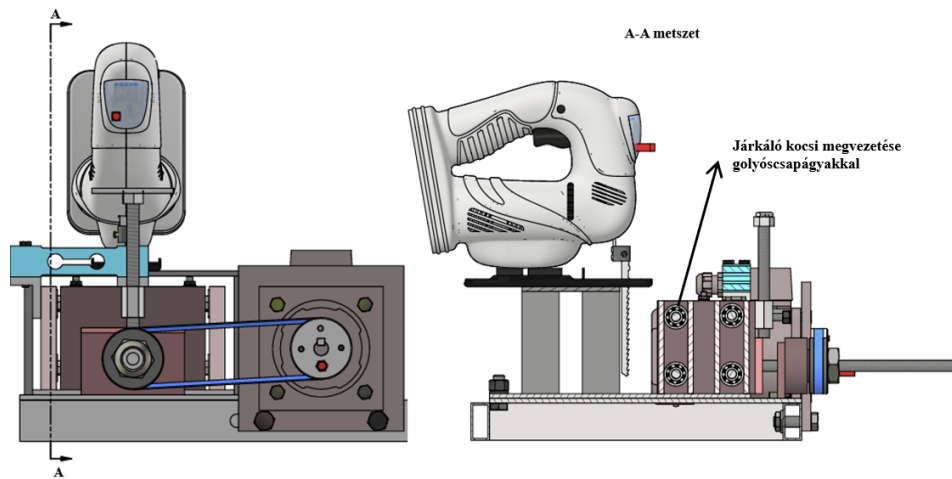
A mérőrendszer felépítése a 4.1. ábrán látható.



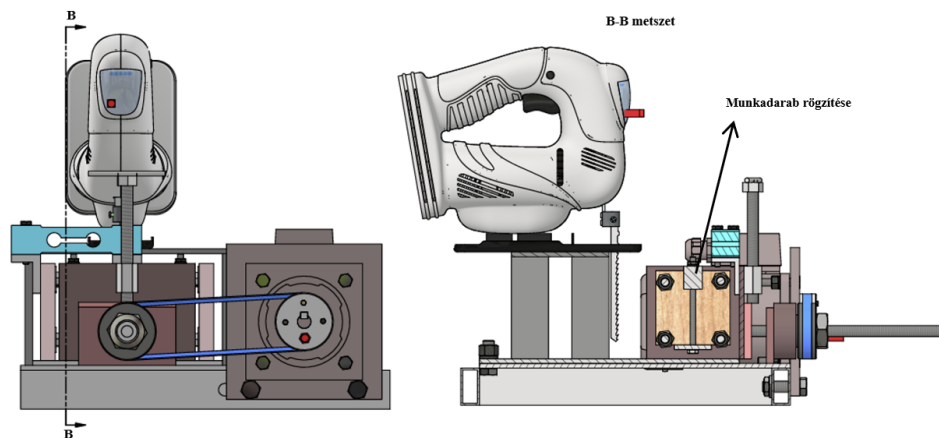
4.1. ábra. A mérőrendszer felépítése [S4].

A mérőpad működését az alábbiak szerint alakítottam ki: a munkadarabot egy gördülő-csapágyakkal alátámasztott kocsiban foglal helyet, amely a 4.2. ábra jobb oldali metszeten látható. A csapágyak görgős megvezetés szerepét töltik be. A gördülésnél fellépő F_{gr} erőt, amelyet a 4.4. ábra szemléltet szaggatott nyíllal, kilogramm skálával rendelkező digitális erőmérővel határoztam meg. A kocsi tömege egy tölgyfa munkadarabbal együtt $2,72kg$, a megmozdításnál fellépő érték $2,81kg$. Tehát a gördülési ellenállási erő $F_{gr} = (2,81N - 2,72N)9,81 = 0,88N$. A csapágyazásnak köszönhetően ez olyan kis érték a várható vágóerőhöz képest, hogy a továbbiakban elhanyagolom.

A csapágyak elrendezése garantálja, hogy a kocsi kizárólag függőleges irányban mozoghasson. A vágóerő a kocsiszerkezetet felfelé igyekszik elmozdítani, azonban ebben az irányban az erőmérő cella tart ellenállást, ezáltal kimeneti feszültség jelet ad, amely arányos a vágóerő nagyságával. A munkadarab befogása, a 4.3. ábra jobb oldalán a B-B metszeten látható.



4.2. ábra. A mérőrendszer oldalnézete és A-A metszete.



4.3. ábra. A mérőrendszer oldalnézete és B-B metszete.

A rezgések minimalizálása érdekében a kocsi szerkezetét egy előfeszítő orsós tengellyel láttam el amelynek pozicionális szerepe van, és előterhelő erőt (F_c) hoz létre az erőmérő-cella és a befogókocsi között. A mérések előtt egy $80 \times 80 \times 80$ mm méretű munkadarabot rögzíttek a kocsiba úgy, hogy ha a munkadarab fa, akkor száliránya merőleges legyen az előtolásának irányára, így a vágás minden esetben merőleges a szálirányra, biztosítva az eredmények következetességét [97, 98].

A munkadarab rögzítése után a kézi szűrőfűrészst üzembe helyeztem, amely egy induktív érzékelővel van felszerelve és a kulisszás mechanizmus felső holtpontját érzékeli és továbbítja jelet a mérőadatgyűjtőnek. Ez az érzékelő kizárólag az indítás során használt, a terheletlen motor kezdeti sebességének mérésére szolgál. A tényleges, terhelés alatti fordulatszámot Fourier-analízissel határoztam meg. Erre azért volt szükség, hogy később a mérőrendszer a fűrész szétszerelése, átalakítása nélkül is használható legyen.

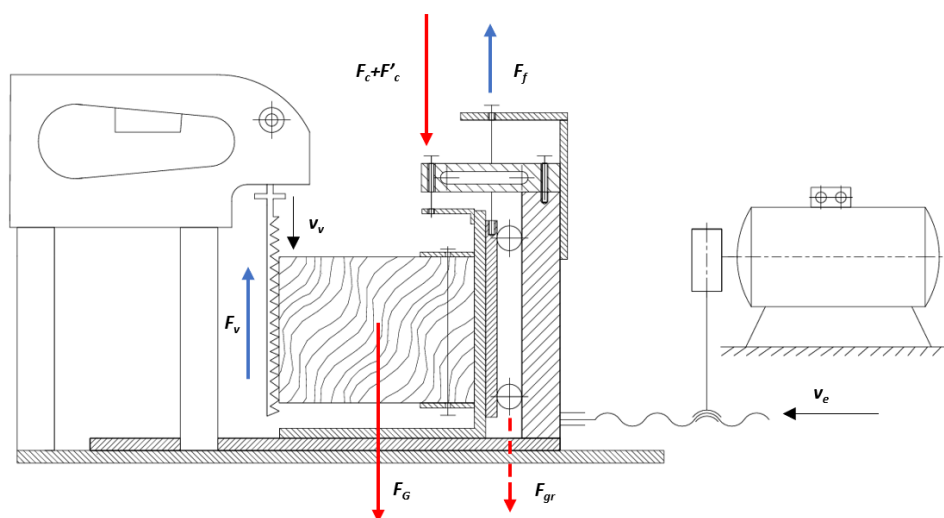
Az előtoló mozgást egy frekvenciaváltóval felszerelt háromfázisú motor biztosítja. Az induktív jeladó érzékeli a 6 mm átmérőjű, egyenlő távolságban elhelyezett csavarokat, amelyek a hajtómotor szíjtárcsáján egyenlő osztásban vannak elhelyezve, ezáltal pontosan meghatározható az előtoló motor fordulatszáma.

A méréseket a 4.1 táblázatban található specifikációkkal rendelkező szerszámmal végeztém.

4.1. táblázat. Szűrőfűrészlap műszaki adatai.

Felhasználási terület	Fa, PVC
Teljes hossz	132 mm
Munkahossz	100 mm
Fogak száma [db/inch]	6
Anyagminőség	HCS

A mérőberendezés elvi működésének megértését segíteni a 4.4. ábra vázlata, amely tartalmazza a fellépő erőket is.



4.4. ábra. A mérőrendszer elvi vázlata.

A fűrészelés közben a kocsi a vágóerő hatására felfelé mozdulna el. Ezt a mozgást az erőmérő cella akadályozza, amely reakcióerőként méri és rögzíti a vágóerőt. Ez a mérési konfiguráció pontos adatokat szolgáltat a vágási folyamat dinamikájáról.

A 4.5b. ábra szemlélteti, hogy a fűrészelés során több erő hat a rendszerre, köztük a vágóerő (F_v), a súlyerő (F_G), az előfeszítési erő (F_f), valamint az erőmérő cellára ható erők (F_c és F'_c). A 4.5a ábra az előterhelt mérőrendszer állapotát mutatja, amelyre az alábbi statikai egyenlet alkalmazható:

$$\sum F_y = 0 = F_f - F_c - F_G - F_{gr}. \quad (4.1)$$

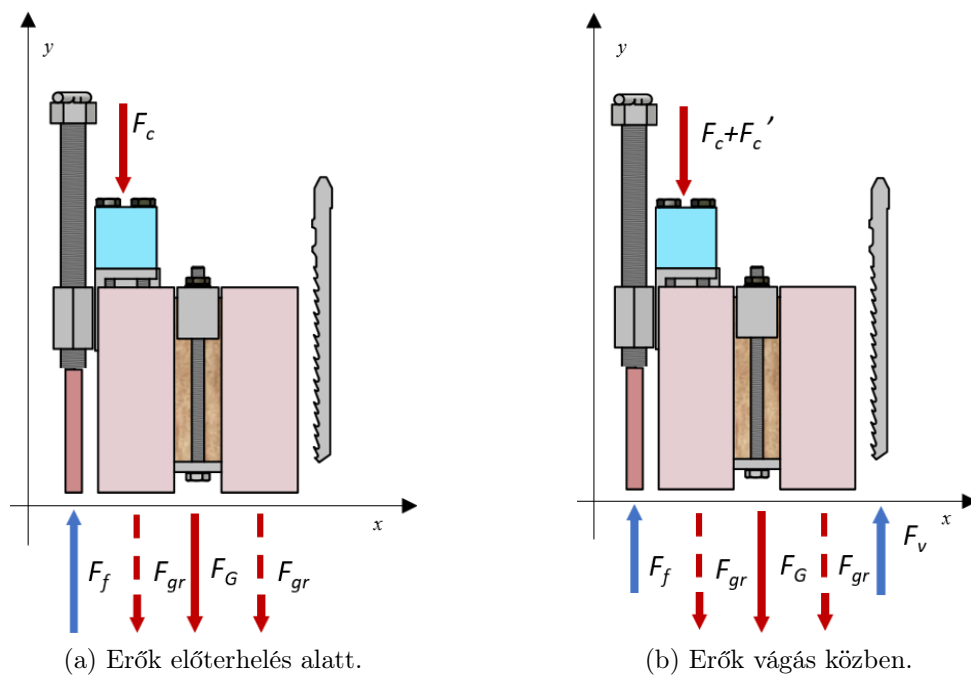
A 4.5b ábrából kiindulva egy egyensúlyi egyenlet írható fel a fűrészelés során fellépő erőkre:

$$\sum F_y = 0 = F_f + F_v - (F_c + F'_c) - F_G - F_{gr}. \quad (4.2)$$

A (4.2) egyenlet alapján a vágóerő kifejezhető, figyelembe véve a (4.1) egyenlet statikai egyensúlyát is:

$$F_v = F'_c + F_{gr}. \quad (4.3)$$

Látható, hogy az előfeszített állapotban nullázott mérőrendszer esetében az erőmérő cella közvetlenül méri a vágóerőt. Ez annak köszönhető, hogy a cellán keletkező kiegészítő erő



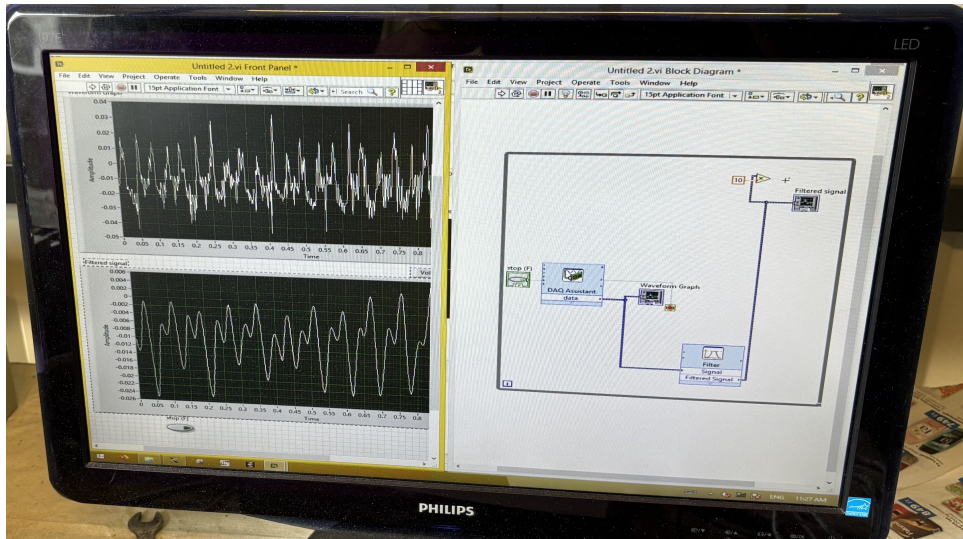
4.5. ábra. A munkadarabra és az erőmérő cellára ható erők [S4].

(F'_c) pontosan megegyezik a vágóerő (F_v) - (F_{gr}) nagyságával. Ez a mérési konfiguráció biztosítja, hogy a vágóerő mérése pontos és reprodukálható legyen a teljes fűrészelési folyamat során. A megépített mérőberendezés a 4.6. ábrán látható.



4.6. ábra. A megépített mérőberendezés.

A vágóerő mérése a National Instruments által fejlesztett a 4.7. ábrán látható LabVIEW szoftver segítségével történt.



4.7. ábra. LabVIEW szoftver alkalmazása vágóerőmérésre.

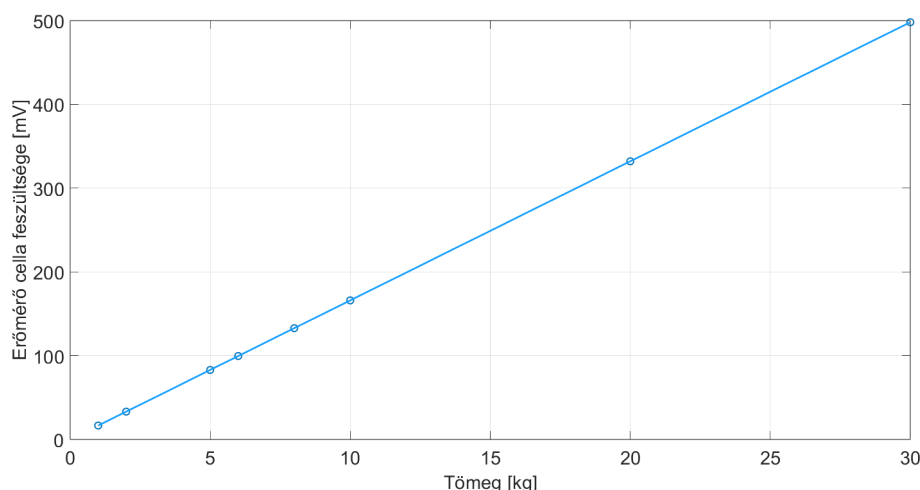
A program valós idejű adatgyűjtést tett lehetővé, amelyet később Excel táblázatba exportáltam további tárolás és részletes elemzés céljából. A LabVIEW szoftver mintavételi frekvenciáját 1 kHz értékre állítottam be, amely lehetővé tette, hogy minden másodpercen 1000 adatpontot rögzítsek. Ez a mintavételi frekvencia biztosította, hogy a mérések során rögzített adatok pontosan tükrözzék a vágási folyamat dinamikáját. Az adatok Excel-formátumba történő átalakítása megkönnyítette az adatkezelést, és lehetőséget adott az eredmények vizuális ábrázolására, valamint különböző statisztikai és dinamikai elemzések elvégzésére. A mérések megkezdése előtt az erőmérő cellát (SAUTER CP 30-2Y1) kalibráltam. A vágóerők mérésénél az erőmérő cella 16,65 mV/kg érzékenysége, lehetővé tette a dinamikus vágóerők részletes vizsgálatát. Ez az érzékenység és konzisztencia biztosította az erők finom változásainak rögzítését az oszcilláló mozgás során, amely elengedhetetlen a kísérleti eredmények pontosságának és megbízhatóságának garantálásához.

A kalibrálási folyamat során különböző hitelesített súlyokat helyeztem az erőmérő cellára, és az ezek által generált cellafeszültséget rögzítettem. A rögzített adatok összehasonlításra kerültek az erőmérő cella által mért értékekkel, hogy ellenőrizsem a mérési rendszer linearitását és pontosságát. Ez a lépés szükséges volt, hogy a mérőrendszer helyesen rögzítse a különböző nagyságú erőket, és hogy a vágóerők változásainak mérése az oszcilláló mozgás alatt megbízható és érvényes következtetések alapjául szolgáljon.

4.2. táblázat. Az erőmérő cella kalibrálása hiteles tömegekkel.

Sorszám	Tömeg [kg]	Feszültség [mV]
1.	1	16,6
2.	2	33,2
3.	5	83
4.	6	99,6
5.	8	132,8
6.	10	166
7.	20	332
8.	30	498

A 4.2 táblázat adatai alapján készített kalibrációs diagram 4.8 ábrán látható.



4.8. ábra. Az erőmérő cella kalibrációs diagramja.

Az erőmérő cella feszültségjele a súly növekedésével lineárisan növekszik, amint azt a 4.8 ábra szemlélteti. A vágóerő mérései az idő függvényében történtek az erőmérő cellával, kettő különböző anyagon: akácfa és metamid. A mérések célja az volt, hogy a továbbiakban egy matematikai modellt tudjunk felállítani az erő alakulására.

4.1. Vágóerő mérése különböző anyagú munkadarabokon

A vizsgálatok során három különböző anyag vágóerejét elemeztem: Metamid (PA6), akácfa és tölgyfa. Az elemzés célja annak megértése volt, hogy az anyagsűrűség, keménység és mechanikai tulajdonságok hogyan befolyásolják a vágóerőket és a megmunkálási dinamikát. Az anyagok tulajdonságait a 4.3 táblázat [99–101] foglalja össze, kiemelve a vágási folyamatok szempontjából releváns jellemzőket.

4.3. táblázat. Anyagtulajdonságok összehasonlítása.

Tulajdonság	Metamid (PA 6)	Akácfa	Tölgyfa
Sűrűség [g cm^{-3}]	1,15	0,72	0,75
Brinell-keménység [HB]	80	4	5,5
Rugalmassági modulus [GPa]	2,5	0,1	0,12
Szakítószilárdság [MPa]	50	80	90
Homogenitás	Homogén	Kevésbé homogén	Kevésbé homogén

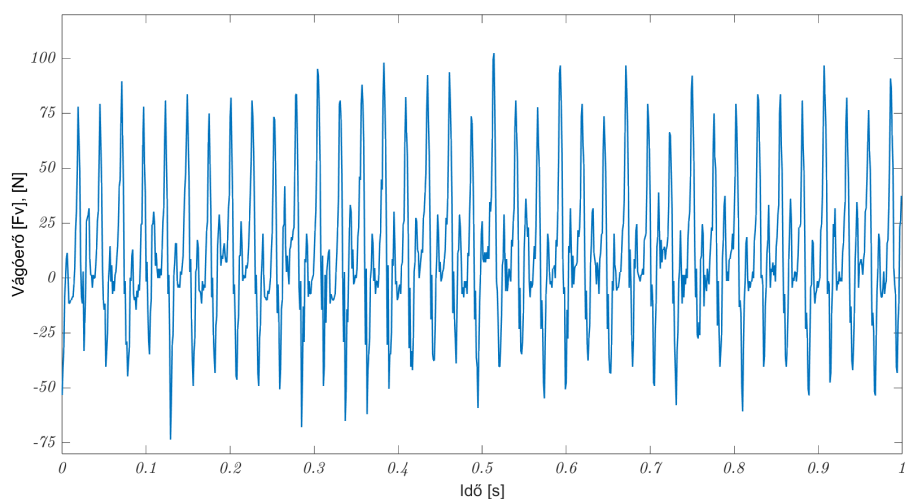
A táblázat részletesen bemutatja az elemzett anyagok legfontosabb tulajdonságait, amelyek kulcsfontosságúak a vágási folyamatok szempontjából. A Metamid (PA 6) homogén szerkezetű anyag, amely jellemzően egyenletes mechanikai és fizikai tulajdonságokkal rendelkezik. Ez a homogenitás csökkenti a vágóerő-ingadozások mértékét, és stabilabb megmunkálási feltételeket biztosít, de ezzel szemben az akácfa és a tölgyfa inhomogén szerkezetű, rostos felépítése és változó sűrűségeloszlása nagyobb vágóerő-ingadozásokhoz vezethet. Ez az inhomogenitás befolyásolja a vágási folyamat dinamikáját, és nagyobb kihívásokat jelent a precíziós megmunkálás során.

A mérési eredmények érvényességének biztosítása érdekében a szerszámkopás hatását a kísérletek során figyelembe vettem. Minden új mérési sorozatot - amely egy adott anyag-típushoz és paraméterkombinációhoz tartozott - új szűrőfűrészlappal kezdtem, hogy a vágóél állapota minden sorozat elején egységes legyen. Egy sorozat három ismétlésből állt, amely során a fűrészlap éltartósságát tapasztalati úton, vizuálisan ellenőriztem. Amennyiben a fogélek lekerekedése vagy deformációja észlelhető volt, illetve a fajlagos vágóerő értéke az ismétlések során számottevően, jellemzően több mint 20%-kal emelkedett, a szerszámot cseréltem. Ezzel a módszerrel kizártam a kopásból eredő jelentős mérési torzulásokat. Noha explicit szerszámkopás-modellezés nem készült, az elvégzett ellenőrzések biztosították a mérések megbízhatóságát, és a vágóerő-értékek összehasonlíthatóságát.

A Metamid (PA 6), amely egy mérnöki műanyag, alacsonyabb sűrűséggel és rugalmassági moduluszával kisebb vágóerőt igényel a megmunkáláshoz. A Metamid (PA 6) jó mechanikai ellenálló képessége és az alacsony súlya lehetőséget biztosít az energiahatékonyság növelésére a megmunkálási folyamatokban.

A faanyagokban a rostos szerkezet miatt a vágóerők változékonysága nagyobb lehet, ami kihívást jelenthet a vágási paraméterek pontos meghatározásában. Ugyanakkor ez a természetes inhomogenitás hozzájárul az anyag egyedi jellemzőihez, amelyeket a gyakorlatban ki lehet használni. Az adatok alapján optimalizálhatók a kézi szűrőfűrészek vágási paraméterei, például a sebesség és az előtolás, amelyek közvetlenül befolyásolják a megmunkálás hatékonyságát és a szerszám élettartamát.

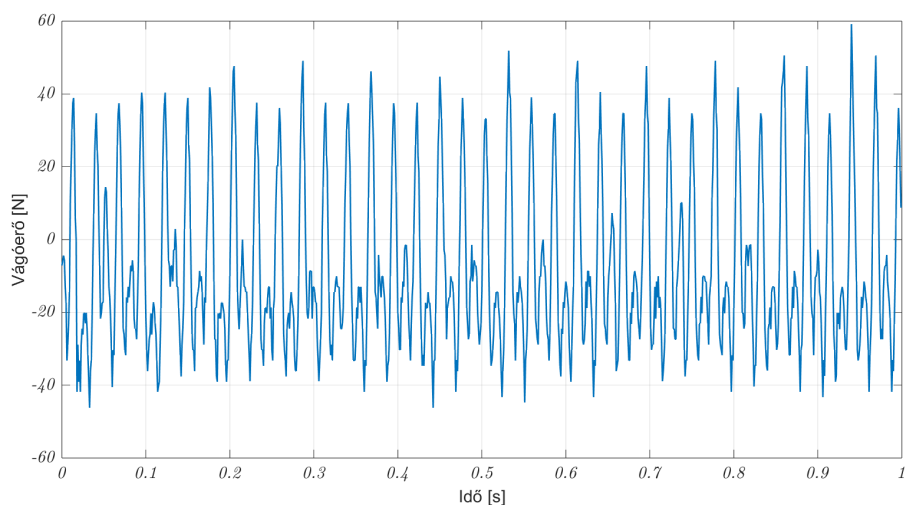
Az eredmények jelentős eltéréseket mutattak a vágóerő viselkedésében, amelyeket a 4.9 és 4.10 ábrák szemléltetnek. A magas erőamplitúdó elsősorban az akácfa sűrű és rostos szerkezetének köszönhető, amely inhomogén sűrűségeloszlást és változó mechanikai ellenállást eredményez. A Metamid (PA 6) ezzel szemben kisebb és stabilabb vágóerőt mutattak, amelyek maximum 60 N körüli értékekkel rendelkeztek. Ezek az eltérések a metamid homogén szerkezetének tulajdoníthatók, amely biztosítja az egyenletesebb megmunkálást. A 4.9. ábra az akácfa vágóerő-diagramját mutatja be.



4.9. ábra. Az akácfa munkadarab vágóerő-diagramja.

Az ábrán látható, hogy a vágóerő jelentős csúcsokat és ingadozásokat mutat, amelyek az anyag inhomogén tulajdonságait tükrözik. Az akácfa rostorientációja és sűrűségének változékonysága nagymértékben befolyásolja a vágóerő alakulását. Végül a 4.10. ábra a

Metamid (PA 6) munkadarab vágóerő-diagramját mutatja be.



4.10. ábra. A Metamid (PA 6) munkadarab vágóerő-diagramja.

A Metamid (PA 6) homogén szerkezete és konzisztens mechanikai tulajdonságai lehetővé teszik a stabil, kis ingadozású vágóerő kialakulását a teljes megmunkálási idő alatt. Az anyag nem tartalmaz jelentős belső sűrűségváltozásokat vagy zárványokat, így elkerülhetők a hirtelen erőcsúcsok. Ez javítja a mérési reprodukálhatóságot és növeli az energiahatékonyságot, mivel kevesebb visszahatás mellett történik az anyagleválasztás. E tulajdonságai miatt a Metamid különösen alkalmas precíziós megmunkálási feladatokra, ahol kiemelten fontos a stabil és kiszámítható vágási környezet.

A szúrófűrész működési paramétereinek pontos dokumentálása érdekében az alábbi 4.4 táblázat foglalja össze az egyes vizsgált anyagokra vonatkozóan a fordulatszám változását. A Fourier-analízis segítségével meghatározott terhelés alatti fordulatszámot az üresjáratú értékhez viszonyítottam, és százalékos csökkenésként is megadtam. Az előtolási sebességet minden esetben azonosan, $3,93 \text{ mm s}^{-1}$ értéken tartottam.

4.4. táblázat. A fordulatszám változása terhelés alatt különböző anyagok esetén.

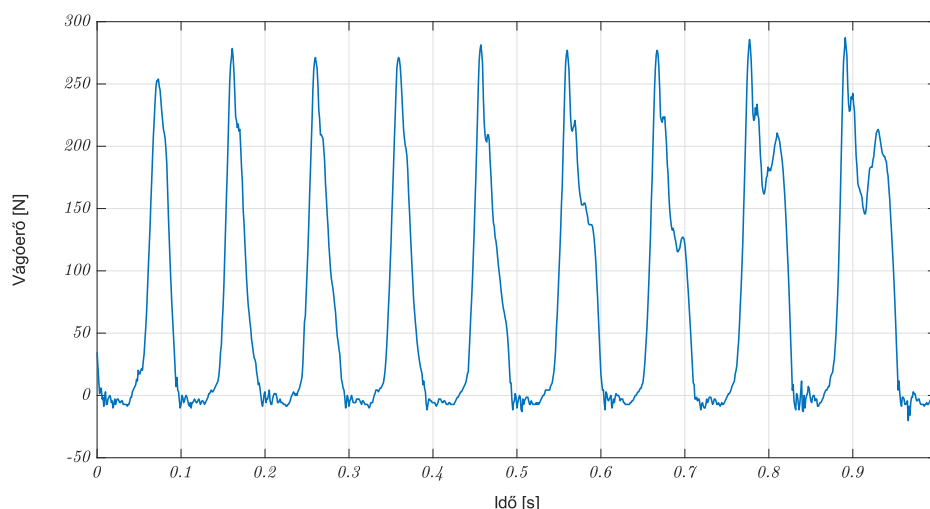
Anyag	Üresjáratú fordulatszám [1/s]	Tényleges fordulatszám [1/s]	Csökkenés [%]	Előtolás [mm s ⁻¹]
Akácfa	34,19	24,90	27,2	3,93
Tölgyfa	34,19	27,10	20,7	3,93
Metamid (PA 6)	34,19	30,20	11,7	3,93

Látható, hogy a különböző anyagok mechanikai ellenállása jelentős hatással van a szúrófűrész tényleges működési fordulatszámára. A negatív és tranziens vágóerőértékek a mérőrendszer rugalmas elemeiből és a fűrészlap hirtelen tehermentesüléséből adódó lengéshullámok, valamint az anyaggal fennmaradó mechanikai kontaktus reakcióerejéből származnak. Ezek a jelenségek nem mérési hibák, hanem a vágási folyamat és a mérőrendszer dinamikus kölcsönhatásának fizikai következményei.

4.2. A fajlagos vágóerő meghatározása

A vágóerő mérések első lépéseként az úgynevezett közvetlen vágóerőt mértem, amelyet a vágási folyamat során az erőmérő cella rögzített. A 4.11. ábra bemutatja a tölgyfa mintán végzett mérések során kapott vágóerő-diagramot az alábbi mérési paraméterek mellett:

- kezdeti terhetetlen fordulatszám: 18,41 1/s,
- előtolási sebesség: 3,93 mm s⁻¹,
- fűrészlap billenése: 1,5 mm.



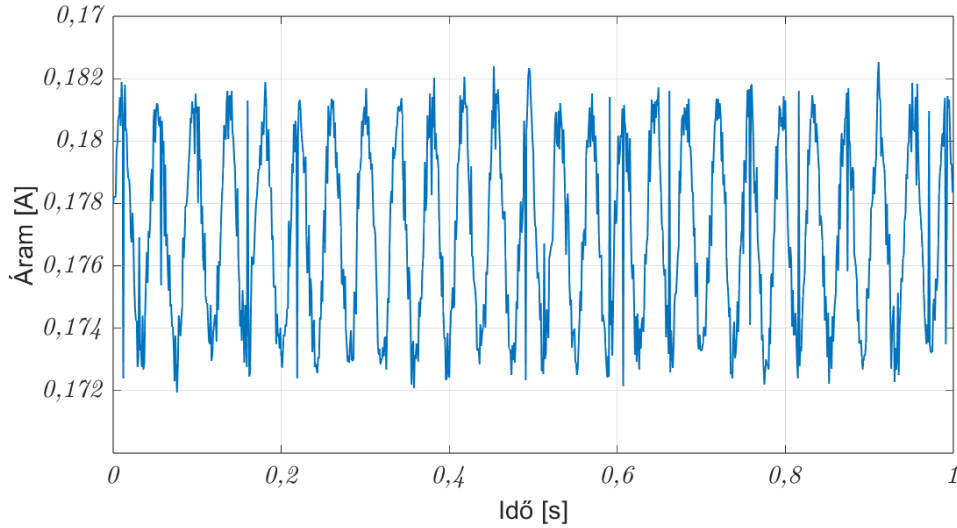
4.11. ábra. Vágóerő-diagram tölgyfa munkadarab.

A 4.11. ábrán bemutatott vágóerő méréssel párhuzamosan, meghatároztam az előtolási erőt is, az előtoló motoráram mért értékéből. A 4.12. ábrán látható az előtoló motor áramfelvétel diagramja. Az áramfelvételt a Fluke 124B műszerrel és a hozzátartozó áram lakatfogóval mértem és rögzítettem. Az előtolást biztosító motor típusa: Siemens 1LE1001-ODB23-4AA4. A 4.5. táblázat tartalmazza előtoló motor és a hozzátartozó kinematikai lánc adatait [102].

4.5. táblázat. A vágóerő számításához használt motor és mechanikai paraméterek.

Paraméter	Érték	Mértékegység
U	460	V
f	50	Hz
P	0,18	kW
I_n	0,60	A
n	1685	min ⁻¹
M_n	1,2	N m
$I_{\text{mért}}$	0,18	A
I_0	0,17	A
K_T	2,0	N m A ⁻¹
p_f	0,00175	m
d_m	0,010863	m
μ	0,15	–

A normál irányú vágóerő meghatározásához szükséges M tengelynyomaték számítása:



4.12. ábra. Az előtoló motor áram-idő diagramja.

$$M \approx M_n \cdot \frac{I_{\text{mért}} - I_0}{I_n - I_0}, \quad (4.4)$$

ahol $M_n = 1,2 \text{ N m}$ a névleges nyomaték, $I_n = 0,60 \text{ A}$ a névleges áram, $I_{\text{mért}} = 0,175 \text{ A}$ a mért áram, valamint $I_0 = 0,17 \text{ A}$ az üresjárási áram. A behelyettesítés eredménye:

$$M \approx 1,2 \cdot \frac{0,175 - 0,17}{0,60 - 0,17} = 1,2 \cdot \frac{0,005}{0,43} \approx 1,2 \cdot 0,01163 \approx 0,01396 \text{ N m} \quad (4.5)$$

Az előtolási erő számítása az orsóátmérő és hatásfok figyelembevételével:

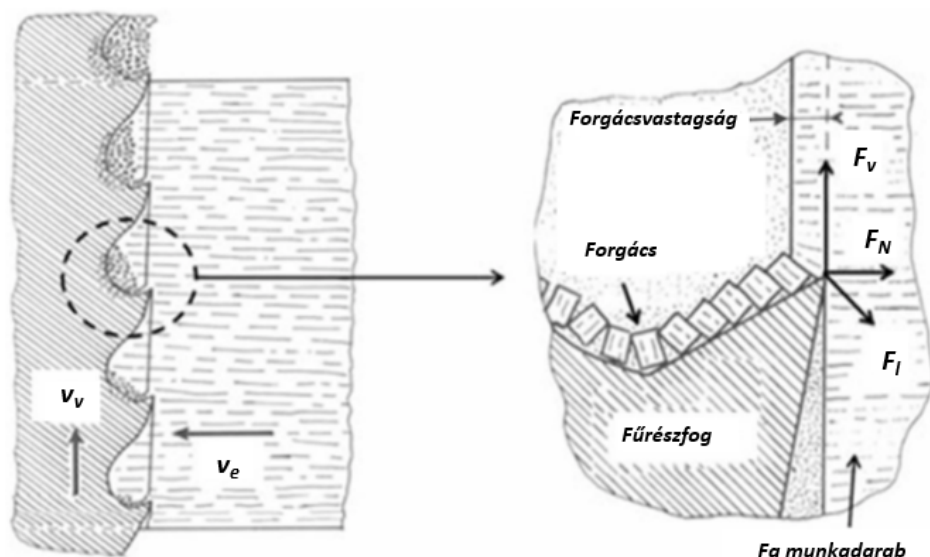
$$F = \frac{2 \cdot M}{d_m \cdot \mu}. \quad (4.6)$$

ahol $d_m = 0,010863 \text{ m}$ az trapézmenetes orsó közepes átmérője, valamint $\mu = 0,15$ a mechanikai hatásfok. A konkrét értékek behelyettesítésével:

$$F = \frac{2 \cdot 0,01396}{0,010863 \cdot 0,15} = \frac{0,02792}{0,00162945} \approx 17,13 \text{ N} \quad (4.7)$$

Az előtolásnál fellépő normál irányú erő értéke: $F = 17,13 \text{ N}$, amely legalább egy nagyságrenddel kisebb, mint a függőleges vágóerő értéke. A felhasználás során az előtoló erőt az operátor fejti ki.

A 4.13. ábra a forgácsleválasztást mutatja be fűrészelés közben. A különböző anyagokon végzett mérések összehasonlíthatósága érdekében szükséges volt meghatározni a forgács keresztmetszeti területére vonatkoztatott vágóerőt, amelyet fajlagos vágóerőnek nevezünk.



4.13. ábra. Forgácsleválasztás erőjátéka vágás közben [4].

A fajlagos vágóerő számítása érdekében minden méréshez meghatároztam az átlagos forgács keresztmetszeti területét, amely a vágási paraméterek és az anyag tulajdonságainak függvényében változott. Az előtolási sebesség, v_f , az alábbi matematikai összefüggések alapján számítható:

$$v_f = \frac{n_{fs}}{p_f}, \quad (4.8)$$

$$n_{fs} = \frac{n_{fm}}{i_f}, \quad (4.9)$$

ahol n_{fs} az előtoló orsó forgási sebessége, P_f az előtoló orsó menetemelkedése, n_{fm} az előtolást biztosító villanymotor forgási sebessége, i_f pedig az előtoló orsó és a villanymotor tengelye közötti áttétel arányát jelenti.

A kézi szűrőfűrész működési elve alapján a vágási folyamat két szakaszra osztható a vágásra és a tehermentesítésre. Ez a két szakasz együttesen alkotja a vágási folyamat teljes időtartamát, amely közvetlenül kapcsolódik a forgattyústengely mozgási periódusához. Egyetlen vágási szakasz t_c időtartama a kézi szűrőfűrész kinematikájából határozható meg, amely a forgattyústengely egy mozgási periódusának felével egyenlő:

$$t_c = \frac{2\pi}{2\omega_k} = \frac{\pi}{\dot{\varphi}_k}. \quad (4.10)$$

Ez az összefüggés lehetővé teszi a vágási szakasz pontos időtartamának kiszámítását, amely alapvető fontosságú a vágóerők részletes elemzése és a vágási folyamat dinamikájának megértése szempontjából. A fajlagos vágóerő meghatározása szükséges a különböző anyagok megmunkálási viselkedésének összehasonlításához. Ezen t_c időtartam alatt a fűrész mozgása az előtolási irányban mért forgácsvastagsággal egyenlő. Az előtolási irányban lévő forgácsvastagságot az alábbi összefüggés adja meg:

$$s_{cf} = v_f t_c. \quad (4.11)$$

A forgácsvastagság erre merőleges komponense a fűrészlap szélességével azonos, amelyet s_{cl} jelöl. Így az átlagos forgács keresztmetszet az alábbi egyenlet segítségével határozható

meg:

$$A_c = s_{cf} s_{cl}. \quad (4.12)$$

A fajlagos forgácsoló erő a következőképpen számítható:

$$k_c = \frac{F_v}{A_c} = \frac{F_v}{v_f t z}, \quad (4.13)$$

ahol k_c a fajlagos forgácsoló erőt jelöli [N/mm^2], F_v a vágóerőt [N], v_e az előtolási sebességet [mm/s], t a félperiódus idejét [s], míg z a fűrészlap szélességét [mm].

A (4.10) egyenletből egyértelműen látható, hogy a forgács keresztmetszetének kiszámításához szükséges a forgattyústengely forgási sebessége (ω_k). Ez az érték azonban a fűrészműködése közben nem állandó, mivel a terhelés változásával módosul. Ezt a problémát a mért vágóerő frekvenciaelemzésével oldottam meg, amely során a szakirodalmi feldolgozásban ismertetett gyors Fourier-transzformációt alkalmaztam. A Fourier-transzformáció általános matematikai definíciója a következő:

$$\hat{F}_c(f) = \int_{-\infty}^{\infty} F_c(t) e^{-i2\pi f t} dt, \quad (4.14)$$

ahol $\hat{F}_v(f)$ a vágóerő $F_v(t)$ folytonos időfüggvény frekvenciakomponenseit adja meg.

A vizsgálatok során azonban a vágóerő mintavételezett, diszkrét jelként áll rendelkezésre, nem pedig folytonos függvényként. A mintavételezés során alkalmazott mintavételi frekvencia $f_s = 1 \text{ kHz}$, amely 1 ms mintavételi időintervallumnak felel meg:

$$\Delta t = \frac{1}{f_s} = 1 \text{ ms}.$$

A teljes mérési időtartam $T = 1 \text{ s}$, így a mérési sorozat $N = 1000$ mintapontból áll. A diszkrét Fourier-transzformáció (DFT) az alábbi összefüggéssel számítható:

$$\hat{F}_v[k] = \sum_{j=0}^{N-1} F_v[j] e^{-jk \frac{2\pi}{N} i} \quad (4.15)$$

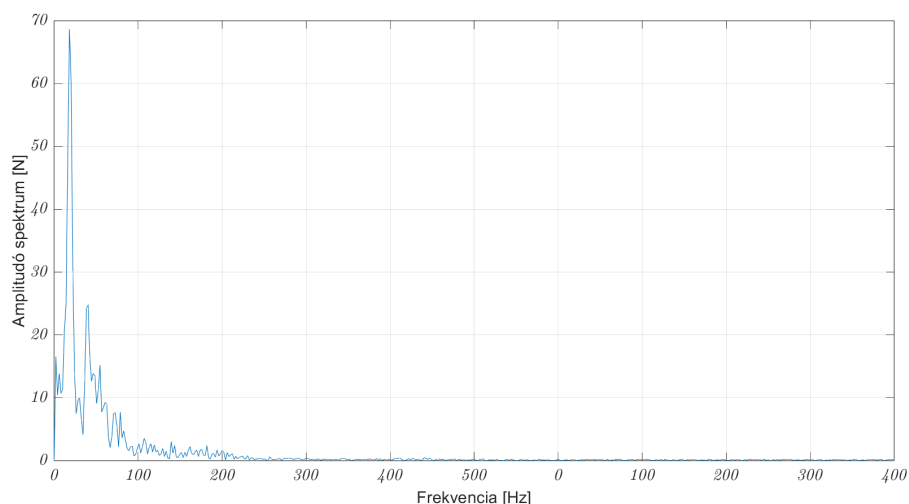
ahol k a frekvenciakomponensek indexét jelöli. Ez az egyenlet lehetővé teszi a mért vágóerő frekvenciaspektrumának kiszámítását, amely megmutatja a jel különböző frekvenciáinak amplitúdóját [53]. Az amplitúdóspektrum, amely a Fourier-transzformált vektor abszolút értékét adja meg, az alábbi képlettel számítható:

$$\hat{A}_c[k] = \frac{1}{N} \left| \hat{F}_c[k] \right|, \quad (4.16)$$

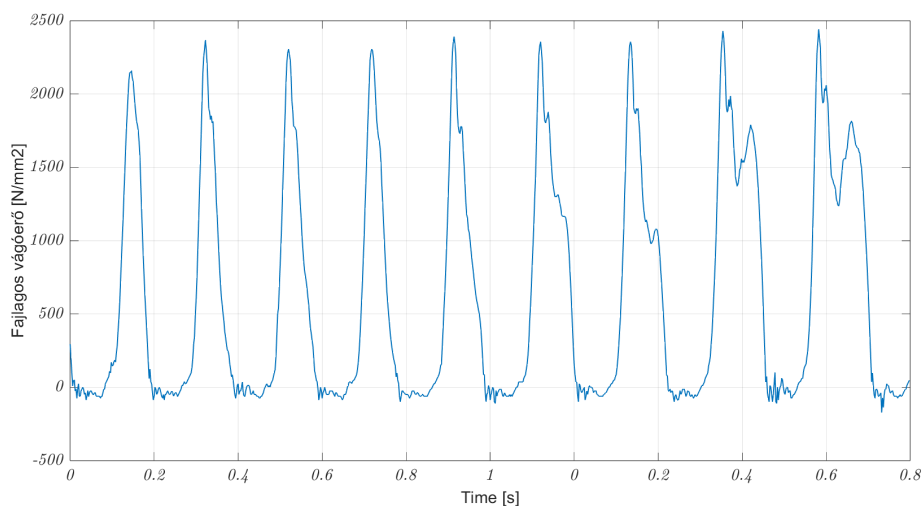
A 4.11. ábra mérési eredményeiből származó amplitúdóspektrum a 4.14. ábrán látható. A 4.14. ábrán a mérési eredmények frekvenciakomponensei jól elkülöníthetők, ami lehetővé teszi a forgattyústengely alaphfrekvenciájának (f_k) egyértelmű azonosítását. A spektrum legnagyobb amplitúdójú komponense az alaphfrekvenciához tartozik, amely alapján a forgattyústengely tényleges fordulatszáma a következő összefüggéssel számítható:

$$\dot{\varphi}_k = \omega_k = 2\pi f_k. \quad (4.17)$$

Ez az eljárás lehetőséget nyújt a kulisszás mechanizmus fordulatszámának pontos meghatározására a vágási folyamat során anélkül, hogy a fűrészmódosítására vagy szétszerelésére lenne szükség. Az így nyert adatokat a forgács keresztmetszetének kiszámítására használok fel, amely alapvető jelentőségű a fajlagos vágóerő pontos meghatározásához.



4.14. ábra. Tipikus vágóerő mérési amplitúdóspektruma tölgyfa mintánál.



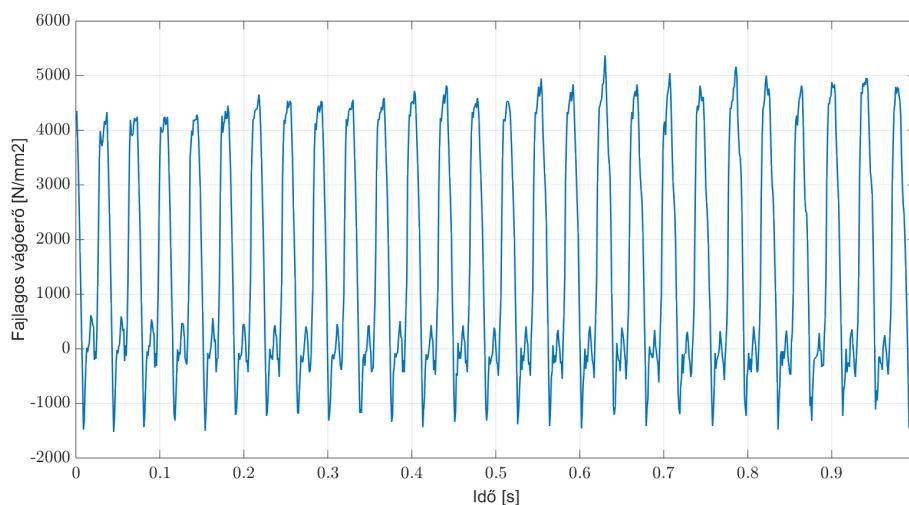
4.15. ábra. Fajlagos vágóerő-diagram tölgyfa mintánál, $n = 18.41 \text{ 1/s}$

Az alábbi 4.15 ábra a korábban ismertetett módszerrel számított fajlagos vágóerő-diagramot mutatja tölgyfa mintadarab esetén.

A fajlagos vágóerő-diagram alapján a forgács keresztmetszeti területére eső maximális vágóerő megközelítőleg 4300 N/mm^2 , amely a vágási szakaszok során közel állandó értéken marad. Ez az egyenletes terhelés arra utal, hogy a fűrészlap és a megmunkált anyag között a vágás aktív szakaszaiban folyamatos és stabil kölcsönhatás áll fenn. Ugyanakkor a diagram kezdeti részén megfigyelhető negatív értékek nem a tényleges vágóerőt tükrözik, hanem a mérőrendszer belső rugalmasságából, valamint az előterhelés hatására fellépő rugalmas deformációkból eredő átmeneti torzulások következményei, amelyek a mérési pontosság szempontjából figyelembe veendő sajátosságok. A 4.16. ábra az alábbi működési paraméterek mellett került ábrázolásra:

- kezdeti terheletlen fordulatszám: $36,82 \text{ 1/s}$,
- előtolási sebesség: $4,7 \text{ mm s}^{-1}$,

- fűrészlap billenése: 1,5 mm.



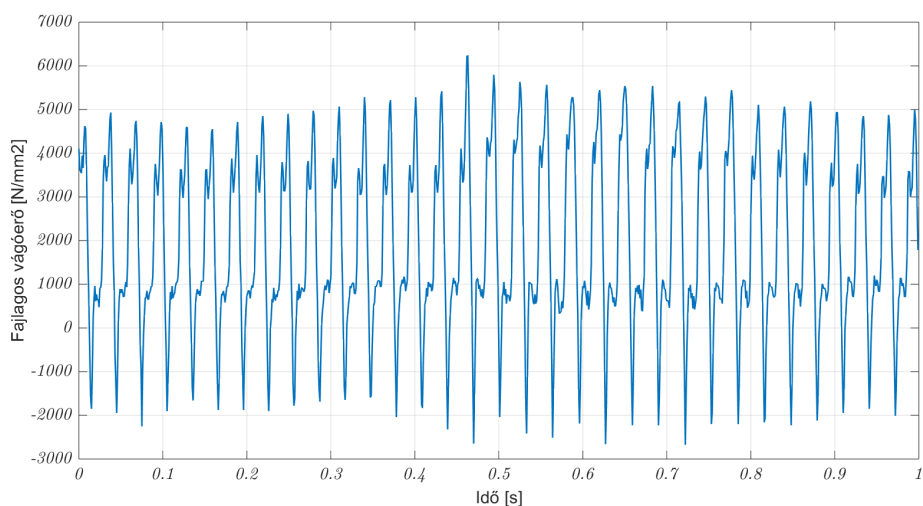
4.16. ábra. Fajlagos vágóerő tölgyfa mintánál $n = 36.82$ 1/s.

Látható, hogy ebben az esetben a mérés nagyobb forgattyús sebesség mellett történt. A grafikon enyhén növekvő csúcserőket mutat 4300 N/mm^2 -tól közel 5200 N/mm^2 -ig. Ezeket a rendkívül magas értékeket a fa mintadarab inhomogén természete magyarázza. Ahogyan az [4] hivatkozás említi, a vágóerő az előtolási sebességtől és a fűrészlap sebességétől függ. Ez arra utal, hogy alacsonyabb vágóerőnek kellene fellépnie nagyobb forgattyús sebesség mellett, ahogyan az [47], [50], [97] hivatkozások kifejtik, állítva, hogy a súrlódás által generált hő a fűrészelés során lágyítja a rostokat a vágási környezetben ezzel megkönnyítve a vágást. Ez a jelenség azonban nem volt ilyen egyértelműen megfigyelhető a tervezett eszköz és mérőrendszer által szolgáltatott mérések során. A 4.16 diagram első szakaszában nagyobb ingadozási tartomány figyelhető meg az előző diagramhoz képest, amely majdnem azonos értékeket tartalmaz. Ez azt jelzi, hogy a forgattyús sebesség növekedése felerősíti a rendszer rugalmassági hatásait és rezgéseit, ami nagyobb ingadozásokat eredményez. A 4.17 az alábbi működési paraméterek mellett került ábrázolásra:

- kezdeti terheletlen fordulatszám: $42,08 \text{ 1/s}$,
- előtolási sebesség: $4,7 \text{ mm s}^{-1}$,
- fűrészlap billenése: 1,5 mm.

A 4.17 ábra fajlagos vágóerő diagramja eltéréseket mutat az előző két diagramhoz képest, ami a mérési körülmények különbözőségéből adódik. Ebben az esetben a mérést nagyobb, $42,08 \text{ 1/s}$ kulisszás fordulatszámánál végeztem, amely hatással volt a vágási folyamat dinamikájára. A forgács keresztmetszeti területére eső vágóerő kezdeti értéke körülbelül 4800 N/mm^2 , azonban a mérések során rövid időre 6300 N/mm^2 értékek is megjelentek. Az ilyen nagy erőértékek nemcsak a vágási mechanizmus mozgásának stabilitását rontják, hanem növelhetik az energiafogyasztást és a fűrészlap terhelését is, ami hosszabb távon a szerszám élettartamának csökkenéséhez vezethet.

A negatív tartományban mért értékek szintén jelentősen eltérnek az előző ábrákhoz képest, és közel kétszeresére növekedtek. Ez a jelenség azzal magyarázható, hogy ilyen magas forgattyús sebességnél a fűrészlap már nem képes elegendő idő alatt eltávolodni



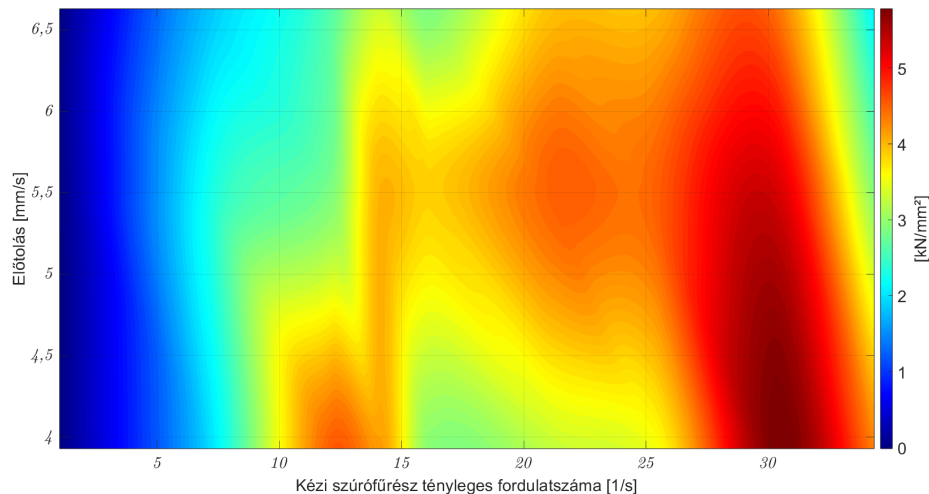
4.17. ábra. Fajlagos vágóerő $n = 42.08 \text{ 1/s}$.

a vágási felülettől a dőlési mechanizmus révén. Ez az elégtelen eltérés azt eredményezi, hogy a fűrészlap lefelé irányuló mozgása során is vágóerők keletkeznek, amelyek a mérési adatokban negatív értékeként jelennek meg.

Továbbá, a forgattyús sebesség növekedésével a fűrészlap oszcillációs mozgása intenzívebbé válik, ami fokozott kölcsönhatást eredményez az anyag rugalmas tulajdonságaival. Ennek következtében a fűrészlap lefelé mozgása közben az anyag rugalmassága visszahat a fűrészlapra, további negatív erőértékeket generálva. Ezek az anomáliák rávilágítanak arra, hogy a túlzott forgattyús sebesség kedvezőtlen hatással van a vágási folyamat egyenletességére és a mérési eredmények megbízhatóságára.

4.6. táblázat. Fajlagos vágóerők $[\text{N/mm}^2]$ különböző előtolási sebességeknél, a kezdeti és tényleges fordulatszámok mellett.

Előtolás [mm/s]	Kezdeti fordulát [1/s]	10,52	13,15	15,78	18,41	21,04	23,67	26,30	28,93	31,56	34,19	36,82	39,45	42,08
	Tényleges fordulát [1/s]	1,01	1,01	1,01	7,07	12,12	12,12	14,14	16,16	21,21	25,25	25,28	30,30	34,30
3,93		0	0	0	1952	6554	2560	2943	5735	3296	2605	4474	5824	4328
5,49		0	0	0	2270	2362	3435	3887	4054	4531	4426	4584	5333	2940
6,63		0	0	0	1834	2516	2801	2879	3341	3974	3602	4392	4443	2117



4.18. ábra. Fajlagos vágóerők a 4.6 táblázat adatai alapján.

Több méréssorozatot végeztem, amelyeket háromszor megismételtem különböző előtolási értékek és motor fordulatszámok mellett. Az átlagértékeket kiszámoltam, és azokat a 4.6. táblázat tartalmazza.

A 4.6. táblázatban megadott mérési értékek a 4.18. ábra felületdiagramján láthatók. Az is megfigyelhető, hogy a méréseket tölgyfa esetében és 13 különböző tényleges forgattyús fordulatszámánál és 3 különböző előtolási sebességnél végeztem. Az ábra a kézi szűrőfűrész vágóerejének alakulását szemlélteti a működés közbeni kulissza fordulatszám és az előtolás függvényében. A vízszintes tengely a fordulatszámot [1/s], a függőleges tengely az előtolási sebességet [mm/s] jelöli, míg a színtérkép a vágóerőt mutatja kN/mm^2 egységben. Az első 3 oszlopban található 0 N értékek mert akkora volt a terhelés a vágási fordulatszámhoz képest, hogy a kézi akkumulátoros fűrész megállt, így a mérést nem lehetett érdemben elvégezni. A kék szín alacsony, a vörös pedig magas vágóerőt jelez. A diagram alapján megfigyelhető, hogy alacsony fordulatszámnál (4-10 1/s) a vágóerő alacsony marad, ami a vágás hatékonyságának csökkenésére és a szerszám „szagató” mozgására utal. A fordulatszám növelésével a vágóerő fokozatosan emelkedik, és egy erőcsúcs jelenik meg körülbelül 18-20 1/s fordulatszám és 5-6 mm/s előtolás mellett. Az kedvező működési zóna ezen a környéken, nagyjából 20-25 1/s fordulatszám és 5,5-6 mm/s előtolás között helyezkedik el, ahol a vágóerő magas, de még nem éri el a kritikus szintet, így hatékony és stabil vágás érhető el.

A legnagyobb vágóerő a 25-30 1/s tartományban jelentkezik, amely ugyan gyorsabb vágást tesz lehetővé, de a szerszám alkatrészeire fokozott mechanikai terhelést ró, csökkentve ezzel azok élettartamát. Az adatállomány alapján a szűrőfűrész működése optimalizálható úgy, hogy a szabályozás célzottan a meghatározott optimális tartományban tartsa a szögsebességet és az előtolást. Ez segíthet olyan fejlesztésekben, mint például automatikus fordulatszám-szabályozás bevezetése terhelésfüggően, illetve intelligens vezérlés kialakítása, amely a vágási ellenállás alapján adaptívan módosítja a működési paramétereket a hatékonyabb és hosszabb élettartamú működés érdekében. Az üresjáráshoz képest 70,5 %-ra csökkent fordulatszám.

A szerszám mechanikai terhelését akkor tekintettem kritikusnak, amikor a mért fajlagos vágóerő, annak ingadozásai és csúcserkéi nemcsak meghaladták a gyártó által megadott

vagy a mérések során tapasztalt névleges értékeket, hanem az $5000 - 6300 \text{ N mm}^{-2}$ tartományban jelentkező oszcillációs csúcsokkal, hirtelen erőváltozásokkal, valamint a fűrészlap lefelé mozgása során kialakuló jelentős negatív vágóerő-komponensekkel együtt olyan rugalmassági hatásokat eredményeztek, amelyek alapján a kritikus terhelés a rendszer mechanikai válaszához, stabilitásához és a fűrészlap igénybevételének komplex összefüggéseihez is szorosan kapcsolódik.

A mérések során azonosított anomáliák, például a vágóerő csúcserőértékei és az időszakosan megjelenő negatív értékek, több tényező következményei, amelyek a vágási folyamat komplex dinamikájához kapcsolódnak és az alábbiakban ezeket a tényezőket részletesen ismertetem.

Az anyag inhomogenitása: a fa mintadarab heterogén belső szerkezete, amely változó sűrűséget és keménységet tartalmaz, közvetlenül befolyásolja a vágás során kifejtett ellenállást. A faanyag sűrűbb vagy csomósabb részei, mint például az évgyűrűk és csomók, magasabb vágóerőt eredményeznek, amelyek a fajlagos vágóerő-diagramon csúcserőértékek formájában jelentkeznek. Ezek az eltérések különösen tölgyfánál figyelhetők meg, ahol a sűrűségeloszlás jelentős változásokat mutat.

A mérőpad dinamikai hatásai: a mérőpad szerkezeti tulajdonságai, mint például a rugalmasság és a belső rezgések, további torzításokat okozhatnak a mért vágóerőben. A pad rugalmasságából fakadó elmozdulások, még előfeszítés mellett is, dinamikus hatásokat generálhatnak, amelyek a vágóerő ingadozásainak amplitúdóját növelik. Ezek az anomáliák különösen jelentős oszcillációs csúcsokat eredményezhetnek, amelyek mechanikai természetükből adódóan a mérési pontosság korlátozó tényezői lehetnek.

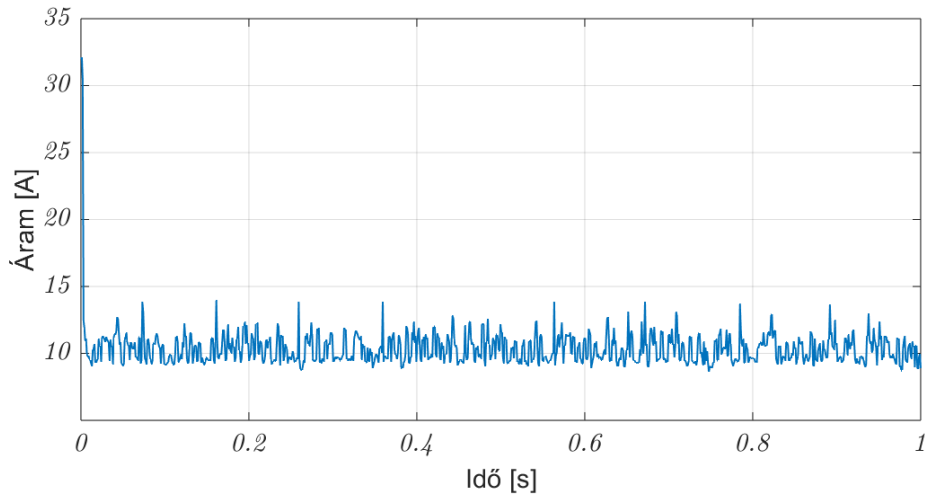
Negatív vágóerők: a időnként megfigyelt negatív vágóerő-értékek több mechanikai jelenség kombinációjára vezethetők vissza. Elsődlegesen a fűrészlap oszcilláló mozgása felelős ezért a jelenségért, különösen az alsó holtpont környékén, amikor a fűrészlap lefelé halad. Ebben az időszakban a fűrészlap az anyagra reakcióerőt fejt ki, amely a fa rugalmas deformációjával együtt negatív irányú erőként jelenik meg. Továbbá, ha a fűrészlap nem távolodik el teljesen a vágási felülettől, az anyag rugalmassága a fűrészlap mozgásával szemben dolgozik, és további negatív komponenseket ad a mért vágóerőhöz. A faanyagok inhomogén szerkezete, amely változó sűrűséggel és mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, következetesen magas csúcs- és negatív vágóerő-értékeket eredményezett.

4.3. Árammérés a vágóerő teszt során

A következő szakasz részletes elemzést nyújt a vágóerő teszt során kapott árammérési diagramról amely a 4.19 ábrán látható. A mérést egyidejűleg végeztem a 4.2 fejezet első bekezdésében található vágóerő méréssel. Mivel a két paramétert külön műszerrel mértem — a vágóerőt a LabVIEW alapú adatgyűjtő rendszerrel, az áramot pedig egy Fluke 124B típusú oszcilloszkóppal és hozzá tartozó lakatfogóval —, ezért az adatok időbeli összehangolását utólagos, posztprocesszálassal végeztem el.

A vágóerő és az áramidő diagramok időbeli összehangolása érdekében olyan jól azonosítható eseményeket kerestem, amelyek mindkét mérési adatsorban egyértelműen megjelennek. E célból a vágási folyamat kezdetén fellépő karakterisztikus indulási áramcsúcsokat használtam referenciajelként, mivel ezek mind az áram-, mind a vágóerő-görbén markánsan megfigyelhetők. Ezek a csúcsok alapján referenciaidőpontokat definiáltam, amelyekhez viszonyítva az adatállományokat időbeli összehangba hoztam.

A két idősor közötti pontos megfeleltetés kulcsa a mintavételezési frekvencia ismerete volt, amely mind a LabVIEW alapú vágóerő-adatgyűjtő rendszer, mind a Fluke 124B



4.19. ábra. A vágóerő teszt során mért áram-idő diagram.

oszilloszkóppal végzett árammérés esetén 1 kHz értékű volt. Ez 1 ms időfelbontást eredményezett, amely elegendő pontosságot biztosított a vágási események időbeli rekonstrukciójához. Az idősorok közötti interpolációs és szinkronizációs műveleteket Microsoft Excel és MATLAB környezetben végeztem el, ahol az adatokat a referenciaidőpontra igazítva, egységes időalapra vetítve integráltam.

Az így kialakított összehangolt adatbázis megbízható alapot szolgáltatott a szerszámterhelés átfogó elemzéséhez. Ennek keretében kiszámítottam a vágási ciklusra jellemző átlagos áramfelvételt ($\langle I \rangle$), az energiafelhasználást (E), valamint az akkumulátor várható üzemidejét (T_{accu}), figyelembe véve a dinamikus áramingadozásokat is, amelyek a terhelési profil változására utalnak.

A 4.19. ábra az áram időbeli alakulását mutatja be a vágóerő-méréssel párhuzamosan rögzítve, 1 kHz mintavételi frekvenciával. Az ábrán jól kivehető egy kezdeti, közel 32 A nagyságú indítási áramcsúcs, amely az elektromos motor bekapcsolásakor fellépő nagy átmeneti terhelés következménye. Ezt követően az áramfelvétel gyors stabilizálódása figyelhető meg, az értékek 8-14 A tartományban ingadoznak. Ez az ingadozás a szűrőfűrész dinamikus, impulzusszerű működéséből fakad, ahol a terhelés ciklikusan változik a fűrészlap oszcilláló mozgása következtében. Az áramdiagram jól tükrözi a mechanikai igénybevétel pillanatnyi változásait, lehetővé téve a terhelési viszonyok időfüggő vizsgálatát.

5. Szúrófűrészek akkumulátor üzemidejének előrejelzése lineáris vágóerőmodel használatával

A kézi szúrófűrész vágási folyamatának alapos elemzése számos kihívással járt, különösen az energiahatékonyság növelése, a dinamikai stabilitás fenntartása terén. A szerszám működése során jelentkező nemlineáris és dinamikus tényezők - például a vágóerők időbeli ingadozása, az eltérő keménységű anyagokkal való kölcsönhatások, valamint a rezgések - megnehezítik a folyamat teljesítményének vizsgálatát. A hagyományos modellezési megközelítések nem mindig tudják megfelelően kezelni ezeket a komplexitásokat, ami korlátozza a gép hatékonyságának javítását.

A vágási folyamat során fellépő dinamikus erők az egyik legnagyobb problémát jelentik. Ezek az erők nemcsak növelhetik az eszköz energiafogyasztását, hanem rezgéseket és instabilitást is okozhatnak, ami rontja a vágási minőséget és rövidíti az eszköz élettartamát. További kihívás az energiafogyasztás csökkentése, miközben a vágási sebesség és hatékonyság nem csökken jelentős mértékben.

Ezek a kihívások megoldása érdekében a disszertáció egy integrált mérési, modellezési és szabályozási rendszer fejlesztésére összpontosít, amely képes pontosan megjeleníteni a kézi szúrófűrész működésének dinamikáját, és lehetőséget nyújt a teljesítmény optimalizálására. A mérőrendszer lehetővé teszi a vágóerők precíz mérését és nyomon követését, míg a modellezés figyelembe veszi a nemlineáris tényezőket, például a vágóerő és a sebesség közötti összefüggéseket. Külön hangsúlyt kapnak a vágási folyamat kulcsparaméterei, mint például a rezgések, a vágóerő és az energiafogyasztás.

A tudományos értekezésben alkalmazott megközelítés a lineáris és nemlineáris modellek összehasonlításán alapul, amelyek optimalizációval és szimulációval finomhangolhatók. Az optimalizált lineáris modell egyszerű és hatékony eszközt nyújt a vágási folyamat energiafogyasztásának és stabilitásának előrejelzésére. Az így kapott eredmények költséghatékony szimulációkat tesznek lehetővé, amelyek pontosan közelítik a valós vágási dinamikát.

A javasolt megoldásaim a gyakorlatban is releváns problémákra fókuszál, mint például a rezgések csökkentése, az energiafogyasztás optimalizálása, valamint az eszköz stabilitásának és hatékonyságának javítása. A bemutatott modellezési és szimulációs módszer nemcsak kézi szúrófűrészekenél alkalmazható, hanem más, hasonló dinamikai jellemzőkkel rendelkező elektromechanikai rendszerek esetében is, ahol elengedhetetlen a pontos szimuláció és optimalizáció.

5.1. Matlab/Simscape alkalmazása gépek dinamikus szimulációjához

A Simscape egy fejlett szimulációs környezet, amely lehetőséget biztosít fizikai rendszerek, például elektromechanikai rendszerek valósághű modellezésére és elemzésére. Az elektromechanikai modellezés során a Simscape lehetővé teszi az elektromos és mechanikai elemek integrálását, ezáltal biztosítva a rendszer dinamikájának pontos megjelenítését.

Az elektromechanikai rendszerek modellezéséhez a Simscape beépített könyvtárai széles választékot kínálnak, többek között motorok, csillapítók, rugók és különféle elektromos elemek, például ellenállások, induktivitások és kondenzátorok használatára. Ezek az elemek paramétereizhetők a fizikai tulajdonságaik, például az elektromotoros erő (EMF), az ellenállás, a tehetetlenség és a csillapítás alapján. Az elektromos és mechanikai elemek speciális blokkok segítségével összekapcsolhatók, így például egy egyenáramú (DC) motor mechanikai terhelés alatti működése pontosan szimulálható [103].

A Simscape segítségével vizsgálhatók a rendszer válaszai, például az áramfelvétel, a feszültség, a sebesség és a nyomaték időbeli alakulása különféle terhelési feltételek mellett. Az optimalizációs lehetőségek révén, például szimulációval, a modell paraméterei finomhangolhatók, hogy azok pontosan megfeleljenek a valós viselkedésnek. A Simulinkkel való integráció lehetőséget biztosít a szabályozási algoritmusok és logikák beépítésére, így nemcsak a rendszer fizikai dinamikájának, hanem szabályozási stratégiáinak szimulációja is elvégezhető.

A Simscape modellek közvetlenül integrálhatók a Simulink környezettel, amely lehetővé teszi a fizikai modellek és a szabályozási logika kombinálását, ezzel tovább növelve a rendszerfejlesztés és tesztelés rugalmasságát [103].

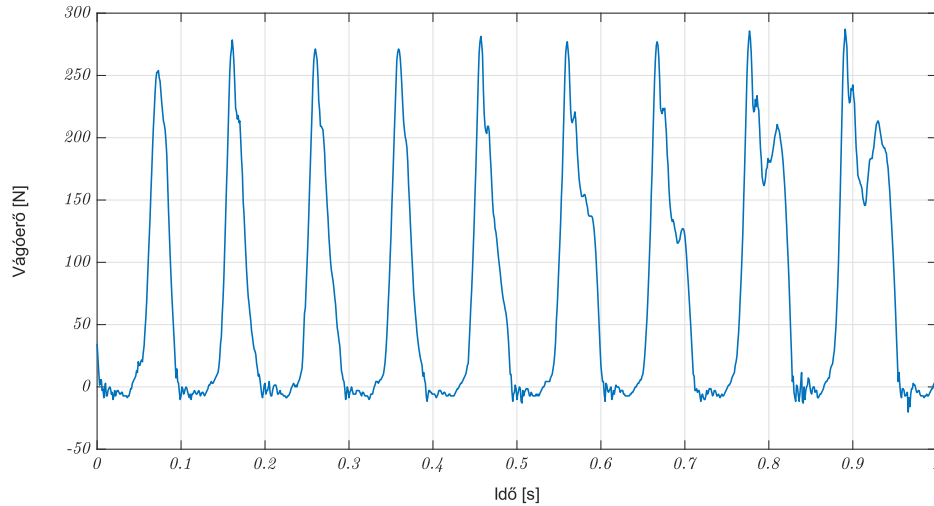
5.2. A mért vágóerő előkészítése szimulációhoz

A 5.1. ábrán a kézi szúrófűrészen végzett mérések alapján kapott vágóerő-idő diagram látható. A mérési paramétereket a 4.2. fejezet első bekezdése tartalmazza. Az itt bemutatott eredmények a szimulációs modell kidolgozásának kiindulópontját képezték. Ez a diagram a kézi szúrófűrész oszcilláló mozgása közben fellépő erőváltozásokat ábrázolja, szemléltetve a szerszám és a munkadarab közötti dinamikus kölcsönhatásokat [104].

A mérési adatok 1 s időtartamot ölelnek fel, amely alatt a kézi szúrófűrész több teljes oszcillációs ciklust végzett. A mért vágóerők az adott időpillanatban fennálló terhelési viszonyokat jelenítik meg, amelyek a szerszám fűrészlap mozgása és a munkadarab anyagának fizikai tulajdonságai közötti kölcsönhatásokból erednek.

A szimuláció során azonban nem elegendő az időfüggő vágóerő adatok használata; a vágóerő-idő függvényt vágóerő-szögelfordulás függvénné kell alakítani. Ez az átalakítás lehetővé teszi, hogy a vágóerőt a kézi szúrófűrész fűrészlapjának szöghelyzetével összefüggésben, periodikus függvényként ábrázoljuk. A periodikus reprezentáció pontosan tükrözi a kézi szúrófűrész előre- és hátrafelé irányuló mozgási ciklusait, és jelentősen hozzájárul a dinamikus kölcsönhatások valósághűbb modellezéséhez. A szögelfordulás alapú megközelítés nemcsak az időbeli változásokat veszi figyelembe, hanem integrálja a kulisszás mechanizmus által meghatározott mozgási kinematikát is, amely az oszcilláló mozgás fő mozgatórugója [6, 105].

A vágóerő-szögelfordulás függvény előállításához először ki kell választani a vágóerő-idő függvényből egy olyan teljes periódust, amely a kézi szúrófűrész egy teljes oszcillációs ciklusát reprezentálja. Ez a periódus tartalmazza a kulissza teljes mozgási tartományát,



5.1. ábra. Vágóerő az idő függvényében.

így az összes releváns dinamikus változás megfigyelhető. A periódus pontos azonosításához Fourier-elemzés alkalmazható, amely lehetővé teszi a mért vágóerő adatok periodikus összetevőinek feltárását és az oszcillációs jel domináns frekvenciájának meghatározását. A kiválasztott periódust a 0 és 2π közötti szögtartománynak rendelem, amely a kulissza szöghelyzetének egy teljes ciklusát fedi le. A vágóerő és a szöghelyzet közötti összefüggés a vágóerő-szögelfordulás függvényben kifejezhető, amelyben a vágóerőt $F(\varphi_k)$ jelöli, ahol φ_k a kulissza aktuális szöghelyzete.

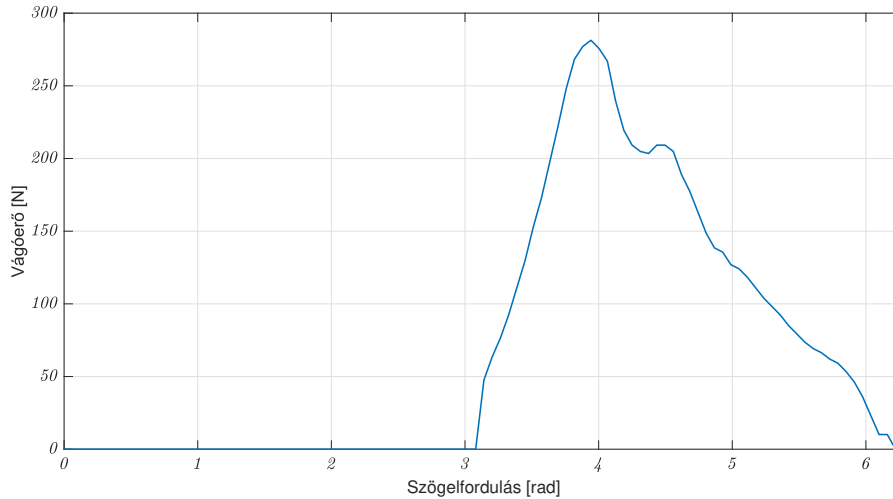
Ez a megközelítés lehetővé teszi a vágóerő pontos és periodikus leírását a kulissza szöghelyzetének függvényében. Az így kapott modell nemcsak a kézi szűrőfűrész működési dinamikáját mutatja, hanem biztosítja a szimulációs eredmények nagyfokú pontosságát és megbízhatóságát is. Az átalakítás révén a szöghelyzettel összefüggő dinamikus erőhatások integrált módon jelennek meg, amelyek elengedhetetlenek a vágási folyamat részletes elemzéséhez.

A kézi szűrőfűrész fűrészlapja, felfelé irányuló mozgása során végez vágást. Ezért a szögelfordulás $0 - \pi$ tartományában a vágóerőt nullának tekintjük. Bár az 5.1. ábrán látható, hogy ebben az intervallumban a dinamikus hatások miatt kis mértékű erők is megjelenhetnek, ezeket az adatfeldolgozás során elhanyagoljuk, és nullára állítjuk. Ez az egyszerűsítés segít csökkenteni a zajt, és pontosabb szimulációt tesz lehetővé.

5.3. Simscape modell valós vágóerővel

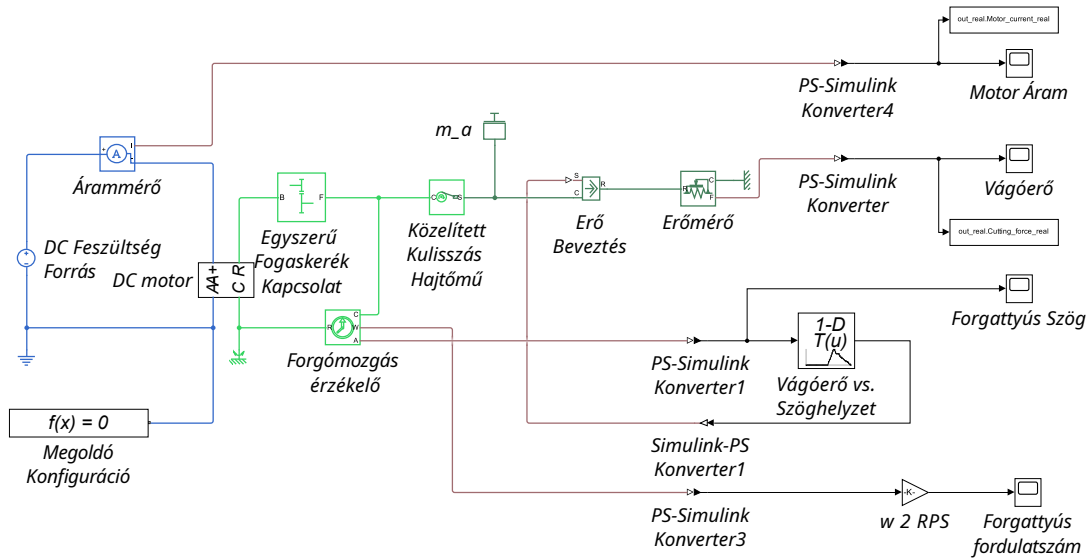
A feldolgozott vágóerő-szögelfordulás függvény pontosan visszaadja a kézi szűrőfűrész működésének periodikus jellegét, amelyet a 5.2. ábra szemléltet. Ez a reprezentáció lehetővé teszi, hogy a szimuláció során a valós erőhatások hűen megjelenjenek, ezáltal javítva a rendszer dinamikájának modellezését és növelve az elemzési eredmények megbízhatóságát.

Az 5.3. ábra a kézi szűrőfűrész elektromechanikai modelljét mutatja be, amelyet a Simscape környezetben hoztam létre a rendszer valósághű szimulációjának megvalósítása érdekében. A modell felépítése az "A" jelű mellékletben jól látható módon megtalálható. A modell különböző kapcsolatainak típusát színek jelölik, megkönnyítve a fizikai jelek és kölcsönhatások azonosítását. A kék vonalak az elektromos jeleket és az energiaáram-



5.2. ábra. Vágóerő a szögelfordulás függvényében

lást reprezentálják, a világoszöld vonalak a forgó mechanikai mozgást, míg a sötétzöld vonalak a translációs mechanikai hatásokat ábrázolják. A barna vonalak az általános Simscape adatáramlást, a fekete vonalak pedig az absztrakt Simulink adatáramlást jelképezik. Ezek a színkódok vizuális segítséget nyújtanak a különböző fizikai domének közötti kapcsolatok gyors felismeréséhez.



5.3. ábra. Simscape modell valós vágóerő alkalmazásával.

A modell központi eleme egy egyenáramú (DC) motor, amely az elektromos energiát forgómozgássá alakítja. Ez a forgómozgás egy fogaskerék-mechanizmuson keresztül továbbítódik egy kulisszás mechanizmushoz, amely az oszcilláló mozgás létrehozásáért felelős. Ez az oszcilláló mozgás biztosítja a fűrészlap ciklikus előre- és hátrahozását, amely alapvető a vágási folyamat működéséhez. A motor által generált mechanikai energia pontosan tükrözi a rendszer elektromos-mechanikai átalakításának dinamikáját.

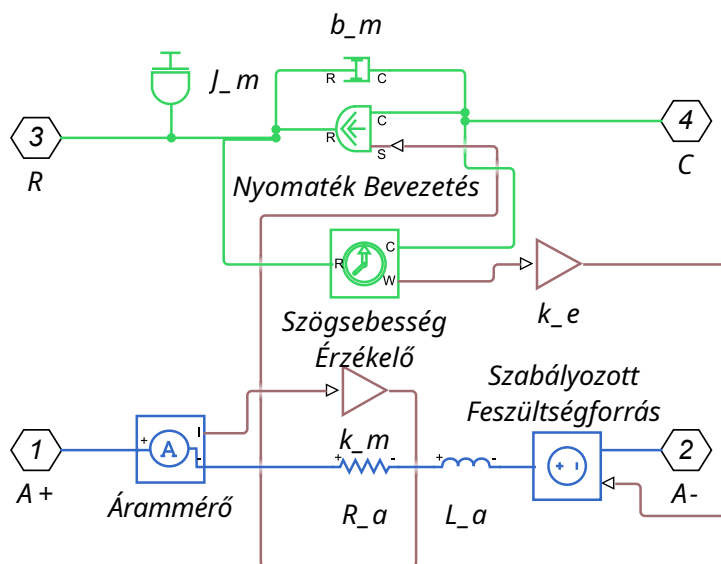
A modellben az alternáló tömeget az m_a blokk reprezentálja, amely a helyhez kötött környezethez kapcsolódik egy vágóerőt generáló elem, azaz a *Erő Bevezetés*, valamint

egy erőérzékelő segítségével. Az *Erő Bevezetés* blokk bemenetét egy *1-D Keresési Tábla* biztosítja (*Vágóerő vs. Szöghelyzet* blokk), amely a 5.2 alfejezetben ismertetett vágóerő-szöghelyzet függvényt tartalmazza. Ez a blokk a forgattyú aktuális szöghelyzetének függvényében számítja ki a pillanatnyi vágóerő értékét, lehetővé téve a vágási folyamat pontos dinamikus modellezését.

A modell a dinamikus viselkedés nyomon követéséhez különböző érzékelőket alkalmaz, mint például az áramérzékelő, ami méri a motor áramfelvételét, amely közvetlenül kapcsolódik a motor elektromos terheléséhez. A forgómozgás-érzékelő, amely figyelemmel kíséri a kulisszas mechanizmus szöghelyzetét és fordulatszámát, ezáltal nyomon követi a forgó mozgás dinamikáját. Az erőérzékelő a vágási folyamat során fellépő erőket méri, amelyek közvetlenül a szerszám és a munkadarab közötti kölcsönhatásból származnak. Ezek az érzékelők lehetővé teszik a modell működésének részletes megfigyelését és az összes releváns dinamika elemzését.

A modell átfogó struktúrája biztosítja, hogy a szimuláció tükrözze a rendszer fizikai folyamatait, beleértve az elektromos, mechanikai és dinamikus jellemzőket. A modell képes figyelembe venni a vágási művelet minden lényeges aspektusát, így például a dinamikus viselkedést, az energiahatékonyságot és a mechanikai stabilitást. Ez az integrált megközelítés nemcsak a vágási folyamat részleteit adja vissza pontosan, hanem lehetőséget nyújt a teljes rendszer viselkedésének optimalizálására és az energiafogyasztás csökkentésére is. A szimuláció futtatása során a beállított paraméterek - azaz a 10^{-6} s fix lépésköz és a Runge-Kutta alapú megoldó módszer - mellett a teljes futási idő 322,43 s volt.

Az 5.4 ábrán látható Simscape *DC* motor modell a kézi szűrőfűrészt hajtómotorját reprezentálja, amely alapvető fontosságú az elektromechanikai rendszer működésének szimulálásához. A modell pontos elektromos és mechanikai paraméterek konfigurációjára épül, hogy a valós motor viselkedését hűen visszaadja.



5.4. ábra. A DC motor blokkvázlata.

modellben a motor elektromos tulajdonságait az R_a ellenállási paraméter, az L_a induktivitás és az elektromotoros erő (*EMF*) határozza meg. Az *EMF* egyenesen arányos a motor szögsebességével, lehetővé téve a modell számára, hogy figyelembe vegye a feszültség és az áram változásait a különböző motorsebességek mellett. Ezt a hatást a modellben a *Szabályozott feszültségforrás* blokk hozza létre. A motor feszültségbemenete a Simscape

A mechanikai részben a motor tehetetlensége (J_m) és a csillapítás (b_m) is meghatározott, amelyek befolyásolják a motor válaszidejét és dinamikus viselkedését. A J_m tehetetlenségi blokk a motor forgó tehetetlenségi hatását írja le, míg a csillapítás b_m a mozgás közbeni energiaveszteségeket modellezi. Ezek a paraméterek biztosítják, hogy a motor valósághűen reagáljon a rendszerben fellépő terhelésváltozásokra. A *Nyomaték Bevezetés* blokk állítja elő a motor által generált armatúraáramtól függő nyomatékot.

Az 5.5 ábrán bemutatott modell a kézi szűrőfűrészt elektromechanikai rendszerének szimulációját mutatja be, amely különös hangsúlyt fektet a vágóerő lineáris közelítésén alapuló modellezésére. A modell felépítése az "B" jelű mellékletben jól látható módon megtalálható. A modell célja, hogy pontosan ábrázolja a fűrészelési folyamatot, miközben gyorsabb elemzést tesz lehetővé egyszerűsített számításokkal, amelyek mégis reális eredményeket adnak.



53

működésének szabályozására szolgálnak, normálerőt biztosítva a súrlódási blokkhoz a forgattyúszög megfelelő tartományában.

A rendszer kulcsfontosságú elemei közé tartozik egy áramérzékelő (*Árammérő*), amely méri a motor áramfogyasztását, valamint egy forgómozgás-érzékelő (*Forgómozgás Érzékelő*), amely a forgattyús mechanizmus forgómozgását, beleértve a szöghelyzetet és sebességet, követi. Ezek az érzékelők kritikus adatokat biztosítanak a vágási folyamat elemzéséhez, például a vágóerő, a motor energiafogyasztása és a dinamikus viselkedés.

A kimeneti jelek között szerepelnek a vágóerő és a motor áramfogyasztásának időbeli változásai, amelyeket adatelemzésre és vizualizációra alkalmas formátumokat (pl. Simulink-kompatibilis adatok) biztosítanak. A forgattyús mechanizmus szöghelyzete és sebessége szintén része a kimeneti információknak, tükrözve a mozgás és az erőhatások közötti pontos kapcsolatot.

Ez a modell alaposan elemzi a fűrészelési folyamat során fellépő dinamikus hatásokat, miközben hatékonyan csökkentti a számítási igényt lineáris közelítés révén. A modell nemcsak a mechanikai és elektromos komponenseket szimulálja, hanem lehetővé teszi az energiafogyasztás és a vágási hatékonyság precíz elemzését is. A szimuláció futtatása során a beállított paraméterek - azaz a 10^{-6} s fix lépésköz és a Runge-Kutta alapú megoldó módszer - mellett a teljes futási idő 268,58 s volt.

Rugalmasságának és optimalizációs képességeinek köszönhetően a modell ideális eszköz a kézi szűrőfűrész működésének elemzésére, különösen az energiahatékonyság, a vágási minőség és a rendszer stabilitásának javítása szempontjából. Ennek megfelelően nemcsak kutatási célokra, hanem ipari alkalmazásokhoz is releváns eredményeket nyújt. A kézi szűrőfűrész elektromechanikai modelljének szimulációs paramétereit az 5.1. táblázat tartalmazza.

5.1. táblázat. A mért és számított paraméterek összefoglalása

Bemeneti paraméterek	Azonosított érték	Mértékegység
R_a	0,176	Ω
R_b	0,0	Ω
L_a	3,21e-3	H
k_e	7,383e-3	V/(rad/s)
k_{mk}	6/56	-
J_m	24,1e-6	kgm^2
k_m	5,632e-3	Nm/A
J_k	24,0e-6	kgm^2
m_a	0,239	kg
e_k	0,010	m
b	3,4274e-6	Nms/rad
v_{in}	18	V

5.5. A lineáris csillapítási tényező meghatározása a vágóerő közelítésére

A lineáris vágóerő-modell paraméterét optimalizáción alapuló paraméter-azonosítással határoztam meg, amelynek célja egy olyan csillapítási tényező (k_{Fc}) meghatározása, amely minimalizálja a valós és a szimulált motor áramfüggvényei közötti eltérést. A valós motor áram-idő függvényét $I_{mr}(t)$, míg a lineáris modell áram-idő függvényét $I_{ml}(t)$ jelöli. A cél az, hogy minimalizáljuk az eltérést a két függvény között egy optimális k_{Fc} megtalálásával. A minimalizálandó költségfüggvény a négyzetes hibák integrálja (d_{ISE}), amely az áram-idő függvények közötti különbségek négyzetét integrálja az időtartományban:

$$d_{ISE} = \int_0^T (I_{mr}(t) - I_{ml}(t))^2 dt. \quad (5.1)$$

Ez a költségfüggvény biztosítja, hogy a lineáris modell áram-idő függvénye szorosan illeszkedjen a valós mérési adatokhoz. A (5.1) integrál egyenletben minden pillanatnyi eltérést négyzetre emelünk, nagyobb súlyt adva a nagyobb hibáknak, és jelentősen befolyásolva az optimalizációt.

A numerikus szimuláció során folyamatos idő t helyett diszkrét időpontokat használunk. Az integrált egy véges összegként közelítjük:

$$d_{ISE} \approx \sum_{n=1}^N (I_{mr}(n) - I_{ml}(n))^2. \quad (5.2)$$

Itt N a diszkrét időpontok száma, $I_{mr}(n)$ és $I_{ml}(n)$ a valós és szimulált motoráram értékei az t_n időpontban. A diszkrét d_{ISE} érték a teljes szimulációs időszakban az egyes időpontok különbségeit összegezve becsüli az összes eltérést. A cél ennek a költségfüggvénynek a minimalizálása az optimális k_{Fc} kiválasztásával, amely legjobban igazítja a lineáris modell motoráram-idő függvényét a valós mérési adatokhoz.

Az optimális k_{Fc} meghatározásához a szimulált hűtéses algoritmust használtam. Ez az eljárás biztosítja, hogy a lineáris modell a lehető legjobban illeszkedjen a valós mérési adatokhoz, így a vágóerő szimulációjához a legpontosabb becslést nyújtja.

Az 5.6. ábra bemutatja az optimális csillapítási tényező meghatározásának elvét egy blokkdiagram segítségével és az akkumulátor üzemidejének előrejelzését a valós és a lineáris vágóerő modellek esetében. Az azonosítási blokkvázlat két fő komponensből áll: a valós vágóerő modellből és a lineáris csillapítási tényező alapú vágóerő modellből. A két modell motoráram-idő függvényeit összehasonlítják, és a négyzetes hibák integrálja (ISE) méri az eltérést, amelyet minimalizálnak az optimális csillapítási tényező meghatározásához.

5.6. Az akkumulátor üzemidejének szimulációja Simscape modellek segítségével

Az optimalizációs folyamat befejezése után további szimulációkat végeztem az optimális csillapítási tényező felhasználásával a kézi szűrőfűrés akkumulátor üzemidejének becslésére. A szimulációkhoz használt modelleket az 5.7. és az 5.8. ábrák mutatják. Az előző modellek és az 5.3, valamint az 5.4 szakaszokban bemutatott modellek nagyon hasonlóak egymáshoz. Az egyetlen különbség a feszültségforrás modellezésében és a szimuláció leállításának feltételében rejlik.

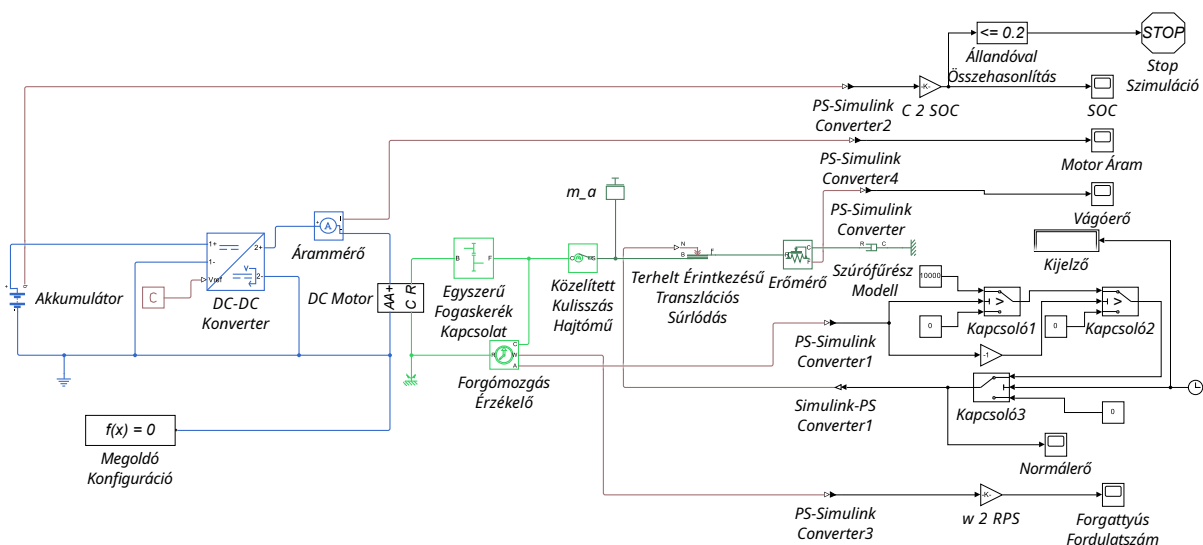
sa: Véges), a blokk az akkumulátort belső ellenállásként és a töltöttségi állapottól függő feszültségforrásként modellezi. Ebben az esetben a kimeneti feszültséget a következő egyenlet alapján számoltam:

$$V = V_{nom} \frac{SOC}{1 - \beta(1 - SOC)}, \quad (5.3)$$

ahol V_{nom} az akkumulátor névleges feszültsége, míg SOC az akkumulátor aktuális *State of Charge* állapotát jelöli, β pedig az akkumulátor belső nemlinearitását leíró paraméter. Ez az egyenlet pontosan modellezi, hogyan függ az akkumulátor kimeneti feszültsége nemcsak a névleges feszültségtől, hanem a töltöttségi állapottól is. Ahogy a töltöttségi szint csökken, a feszültség csökkenő tendenciát mutat, ami fontos az energiahatékony működés szempontjából. Ez a részletes akkumulátormodell lehetővé teszi, hogy a szimuláció valósághűen tükrözze egy valódi akkumulátor dinamikáját és viselkedését.

A modellek egyedülálló tulajdonsága, hogy figyelik az akkumulátor töltöttségi szintjét. A töltöttségi szint folyamatos figyelésével a modellek biztosítják, hogy a rendszer ne működjön, ha az akkumulátor kapacitása kritikus szint alá csökken. Ha az SOC egy előre meghatározott küszöbérték (ami 20%) alá esik, a modell automatikusan leállítja a szimulációt egy logikai blokk (*Állandóval Összehasonlítás*) és egy leállítási blokk (*Stop Szimuláció*) segítségével. Egy valós fűrészes esetében ennek a viselkedésnek a célja az akkumulátor károsodásának elkerülése és a biztonságos működés biztosítása. Ez a tulajdonság különösen fontos hordozható eszközöknél, ahol az energiahatékonyság és az akkumulátor élettartama kritikus szempontok.

Ezek a modellek különösen alkalmasak hordozható kézi szűrőfűrészek fejlesztésére, ahol az energiafogyasztás optimalizálása és a vágási minőség javítása kulcsfontosságú célok. Az energiafogyasztás akkumulátor töltöttségi állapotra gyakorolt hatásainak figyelembevételével a modell lehetővé teszi az akkumulátor élettartamának maximalizálását, miközben biztosítja a stabil és megbízható rendszer működést. Így a modell nemcsak kutatási célokra alkalmas, hanem ipari alkalmazásokban is rendkívül hasznos, hozzájárulva a modern kézi szűrőfűrészes-tervezés és -fejlesztés fejlődéséhez.



5.8. ábra. Az akkumulátor üzemidejének szimulációja lineáris vágóerő modellel.

A rendszer több érzékelőt is tartalmaz, amelyek valós idejű adatokat szolgáltatnak a rendszer működéséről. Ezek közé tartozik az *Árammérő*, amely méri a motor áramfelvételét.

telét; a *Erőmérő*, amely a vágás során fellépő erőket rögzíti; és az *SOC Monitor*, amely az akkumulátor töltöttségi állapotát követi nyomon, és kritikus szintek elérésekor leállítja a szimulációt. Logikai vezérlőelemek, mint például egy *Kapcsoló* blokk, biztosítják a rendszer megfelelő állapotkezelését. A *Kapcsoló* figyeli az *SOC*-t, és aktiválja a *Stop Szimuláció* blokkot, ha az *SOC* egy meghatározott küszöbérték alá csökken, megakadályozva az akkumulátor károsodását, miközben biztosítja a biztonságos működést.

A modell kimenetei közé tartozik az idő és a szöghelyzet függvényében változó vágóerő, a motor áramfelvétele, az *SOC*, valamint a forgattyús mechanizmus szöghelyzete és sebessége. Ezek a kimenetek valós időben vizualizálhatók vagy további elemzésre használhatók. Ez a modell pontosan szimulálja az akkumulátor üzemidejét és a valós vágóerő dinamikáját. Figyelembe véve az akkumulátor kapacitását és a vágási terhelést, lehetővé teszi az energiahatékonyság elemzését és optimalizálását. A valós vágási adatok és az integrált visszacsatolás különösen értékesé teszik ezt a modellt hordozható kézi szűrőfűrészek fejlesztéséhez, ahol az akkumulátor élettartamának növelése, az energiahatékonyság javítása és a vágási minőség optimalizálása alapvető fontosságú.

A szimuláció feltételezése szerint a teljesen feltöltött akkumulátor 20%-os *SOC* szintre merül:

Az akkumulátor üzemideje valós vágóerő modell alkalmazásával:

$$t_{br} = 963 \text{ s}$$

Az akkumulátor üzemideje lineáris vágóerő modell alkalmazásával:

$$t_{bl} = 927 \text{ s}$$

Relatív előrejelzési hiba:

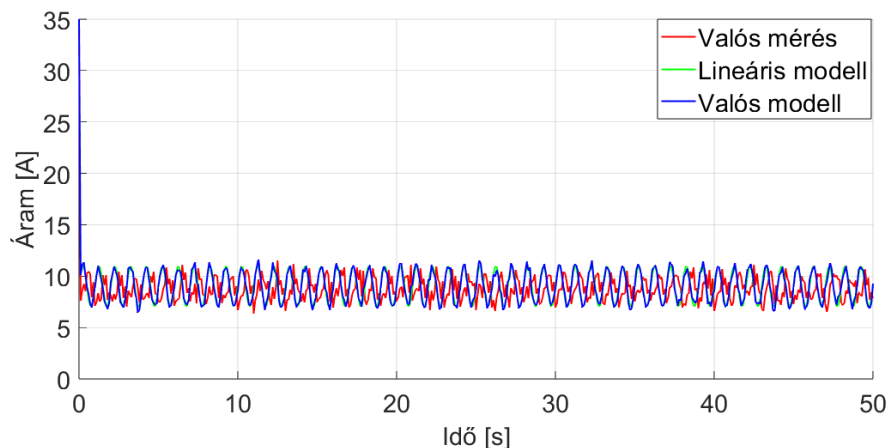
$$e_r = \frac{t_{br} - t_{bl}}{t_{br}} = 0.037 = 3.7\% \quad (5.4)$$

Ez a viszonylag kis hiba azt mutatja, hogy a lineáris vágóerő modell hatékonyan közelíti a valós modellt, és megbízható becsléseket nyújt az akkumulátor üzemidejére a valós forgatókönyvekhez hasonló körülmények között.

5.7. Szimulációs eredmények

A 5.9. ábrán látható az a motoráram-idő diagram, amely a valós mért adatok, a nemlineáris - valós vágóerőn alapuló - modell, valamint a lineáris csillapítási tényezővel közelített modell áramgörbéit ábrázolja egy 50 s-es időintervallumon keresztül. Ez az időtartam a teljes szimulációs periódus több mint öt százalékát fedi le, ezáltal megfelelő validációs alapot biztosít a modellalkotás megbízhatóságának és pontosságának értékeléséhez. A bemutatott összehasonlítás célja, hogy kísérletileg alátámassza a lineáris modell közelítésének érvényességét és gyakorlati alkalmazhatóságát.

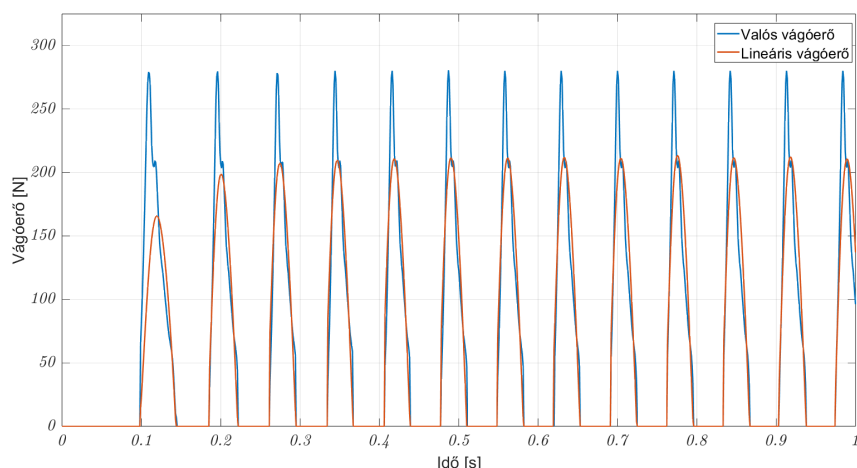
A görbék részletes vizsgálata alapján megállapítható, hogy a valós mért áram (piros görbe) és a nemlineáris, valós vágóerőn alapuló modell szimulációja (kék görbe) között szoros illeszkedés tapasztalható. A lineáris modell eredményei (zöld görbe) szintén jól közelítik a valós áramgörbét, különösen az időbeli lefutás, a periodikus szerkezet és az átlagos áramértékek tekintetében.



5.9. ábra. A motoráram összehasonlítása 50 másodperces időtartamon belül: valós mérés, valós vágóerő modell és lineáris modell.

A három áramgörbe időfüggvény szerinti lefutása jól követhető, a jelek fázisban maradnak, és a rezgésdinamikai sajátosságok jelentős mértékű egyezést mutatnak. Ez a koherencia megerősíti, hogy az optimalizált csillapítási tényezővel ellátott lineáris modell nemcsak az energiafogyasztás, hanem az aktuális motoráram időbeli alakulásának előrejelzésére is alkalmas, ezáltal a rendszer alapvető elektromechanikai dinamikáját megfelelő pontossággal képes visszaadni.

Az 5.10. ábra bemutatja a vágóerő időfüggését mind a valós, mind a lineáris modellek esetében. Ez az ábra kulcsfontosságú a tanulmány szempontjából, mivel kiemeli a két modell közötti különbségeket és hasonlóságokat, valamint értékeli a lineáris modell hatékonyságát a valós vágóerők közelítésében.



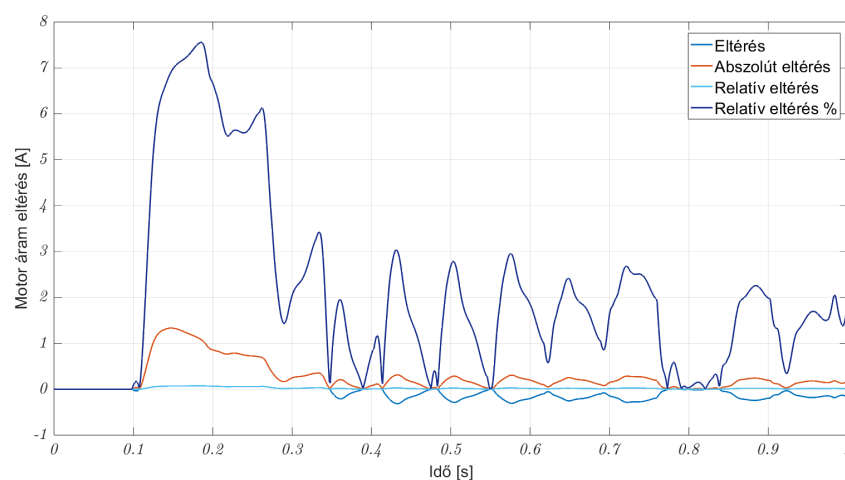
5.10. ábra. A vágóerő összehasonlítása valós és lineáris modellek esetében.

Az ábrán látható görbék a valós mért vágóerőt ($F_{real}(t)$), amelyet közvetlen mérések során rögzítettem a kézi szűrőfűrész működése közben, valamint a lineáris vágóerő modellt ($F_{linear}(t)$) ábrázolják. A lineáris modell paramétereit, különösen a csillapítási tényezőt, azonosítási folyamat során optimalizáltam, hogy minimalizáljam a valós és a szimulált vágóerők közötti eltéréseket. Az azonosítási blokkvázlat alapját képezi az optimalizációnak,

amely a *szimulált hűtés* algoritmusát alkalmazom a csillapítási tényező optimalizálására, biztosítva, hogy a lineáris modell szorosan kövesse a valós vágóerőt.

A vágóerő-idő diagram elemzése azt mutatja, hogy a lineáris modell közelíti a valós vágóerő viselkedését, bár néhány eltérés figyelhető meg, különösen az erőcsúcsoknál. Ezek az eltérések azonban elhanyagolhatók a modell egyszerűségéhez képest, és az általános egyezés erős, igazolva a lineáris modell alkalmazhatóságát reális szimulációkban. Az optimalizált lineáris modell hatékonyan írja le a vágási folyamat erőhatásait és dinamikáját, megbízható becslést nyújtva az akkumulátor üzemeidejére valós körülményekhez hasonló feltételek mellett.

Az 5.11. ábrán láthatóak a számított motoráram eltérések a valós és a lineáris forgácsoló erő között. A diagramon látható hogy az eltérések minimálisak, ami arra ad következtetést, hogy a lineáris modell jól reprezentálja valódi vágási folyamat erőhatásait.



5.11. ábra. A valós és lineáris motoráramok közötti eltérések.

Az elemzések és eredmények alapján a disszertációban bemutatott modell és szimulációs eredmények pontosan tükrözik a kézi szűrőfűrészek működésének lényeges dinamikai jellemzőit, és világosan ábrázolják a valós és lineáris modellek közötti kapcsolatot. A Simscape környezetben megvalósított elektromechanikai modell valós adatokat használ, és a vágási folyamatot a DC motor és a kulisszás mechanizmus alapvető működésén keresztül szimulálja. A Simscape modellezési környezet fizikai elemei, valamint a Simulinkkel való integráció részletes ábrázolást tesznek lehetővé mind az elektromos, mind a mechanikai tulajdonságokról, növelve a realizmust.

Az azonosítási blokkvázlat és az optimalizálási folyamat során alkalmazott szimulált hűtés algoritmus hatékonyságát a motoráram- és a vágóerő-idő függvények elegendően pontos közelítései bizonyítják. A blokkvázlat logikája biztosítja, hogy a lineáris modell szorosan illeszkedjen a valós viselkedéshez, minimalizálva a mért és a szimulált értékek közötti eltéréseket. A lineáris csillapítási tényező optimalizálása olyan lineáris modellt eredményez, jól közelíti a vágóerő viselkedését, amely a valós mérésekhez képest 3,7%-os relatív hibával.

5.8. Numerikus számítások mért áramerősség esetében

A 4.19. ábrán látható mérés alapján elvégeztem a számításokat, amelyek az akkumulátor üzemeidejének változásához a szükségesek. Összehasonlítást végeztem a lineáris modellel

is, hogy kiemeljék a valós mérések és a szimulált előrejelzések közötti különbségeket.

Átlagáram számítása: Az átlagáramot az időtartomány feletti integrálással számítjuk:

$$\langle I \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt. \quad (5.5)$$

A numerikus integrálás eredménye:

$$\int_0^T I(t) dt = 8,215 \text{ As}, \quad T = 1 \text{ s}. \quad (5.6)$$

Ezért az átlagáram:

$$\langle I \rangle = \frac{8,215 \text{ As}}{1 \text{ s}} = 8,215 \text{ A}. \quad (5.7)$$

Energiafogyasztás számítása: az energiafogyasztást az akkumulátor feszültsége ($V = 18 \text{ V}$) és az áram integrálja alapján határozzuk meg:

$$E = V \cdot \int_0^T I(t) dt, \quad (5.8)$$

$$E = 18 \text{ V} \cdot 8,215 \text{ As} = 147,87 \text{ J}. \quad (5.9)$$

Akkumulátor üzemideje: az akkumulátor várható üzemideje (T_{accu}) az akkumulátor kapacitása ($Q = 2.5 \text{ Ah}$) alapján kerül kiszámításra, figyelembe véve, hogy a szimuláció során az akkumulátor töltöttsége 100%-ról 20%-ra csökken. ($Q = 2.5 \text{ Ah}$):

$$T_{\text{accu}} = \frac{Q}{\langle I \rangle} \cdot 60 \cdot 0.8 = \frac{2.5 \text{ Ah}}{8,215 \text{ A}} \cdot 60 \cdot 0.8 \cdot 60 = 876,44 \text{ s}. \quad (5.10)$$

Az akkumulátor árammérése egy Fluke 124B műszerrel történt, amely a mérések során 8,21 A RMS értéket mutatott. Tehát a mért eredményem 876,44s a szimuláció pedig 941s, aminek az eltérése a modellezés során történő elhanyagolásokból adódik.

A motoráram-idő és a vágóerő-idő diagramok elemzése azt mutatja, hogy a lineáris modell közelítése gyakorlati, gyorsan futtatható alternatívát kínál a valós rendszer komplexitásával szemben. Egyszerűsége ellenére az optimalizált lineáris modell elfogadható pontossággal képes becsülni az akkumulátor üzemidejét és a vágási folyamat dinamikus erőhatásait, lehetővé téve megbízható előrejelzéseket.

Az eredmények arra utalnak, hogy a bemutatott modellek, az optimalizálási folyamat és a Simscape-alapú szimulációk hatékony eszközt biztosítanak az elektromechanikai rendszerek pontos, de számításigényben hatékony közelítésére. Az itt alkalmazott módszertan nem korlátozódik a kézi szűrőfűrészekre, hanem kiterjeszthető más, ciklikus erőhatásokkal jellemezhető rendszerekre is, ahol a pontos szimuláció és a teljesítménybecslés kritikus fontosságú. a kísérletileg meghatározott üzemidőre (876,44s) vonatkoztatva a valós vágóerő modell esetében 9,9% (963 s); míg a linearizált vágóerő modell esetében 5,8% (927s) a relatív eltérés.

5.9. Validáció az 50 másodperces intervallum alapján

A szimulációs modell megbízhatóságának értékeléséhez az akkumulátor várható üzemiidejének meghatározását nemcsak a teljes vizsgálati időszakra, hanem a valós mérésekkel összevethető 50 másodperces szakaszra is elvégeztem. Ez az időtartam reprezentatív a rendszer terhelési viszonyaira, valamint a motoráram és vágóerő periodikus lefutására nézve, így megfelelő validációs alapot nyújt a modellalkotás pontosságának értékeléséhez. A mérések és szimulációk alapján az alábbi átlagos áramértékeket határoztam meg:

- valós mért adat alapján:

$$\langle I_{\text{mért}} \rangle = 8,51 \text{ A},$$

- lineáris modell alapján (illesztett):

$$\langle I_{\text{lin}} \rangle = 7,77 \text{ A},$$

- nemlineáris modell alapján:

$$\langle I_{\text{nemlin}} \rangle = 8,24 \text{ A}.$$

Az akkumulátor kapacitása $Q = 2,5 \text{ Ah}$, ami 9000 As -nak felel meg. A szimuláció során az energiatartalék 100%-ról 20%-ra csökken, tehát a hasznosítható töltés:

$$Q_{\text{hasznos}} = 9000 \cdot 0,8 = 7200 \text{ As}. \quad (5.11)$$

A várható üzemidő minden esetben az alábbi összefüggéssel számítható:

$$T = \frac{Q_{\text{hasznos}}}{\langle I \rangle}. \quad (5.12)$$

A különböző modellek esetében kapott üzemidők a következők:

$$T_{\text{mért}} = \frac{7200 \text{ As}}{8,51 \text{ A}} \approx 846,0 \text{ s}, \quad (5.13)$$

$$T_{\text{lin}} = \frac{7200 \text{ As}}{7,77 \text{ A}} \approx 926,96 \text{ s}, \quad (5.14)$$

$$T_{\text{nemlin}} = \frac{7200 \text{ As}}{8,24 \text{ A}} \approx 873,8 \text{ s}. \quad (5.15)$$

A lineáris modell esetében a relatív eltérés a valós mért értékhez képest:

$$\Delta_{\text{lin}} = \frac{926,96 \text{ s} - 846,0 \text{ s}}{846,0 \text{ s}} \cdot 100 \approx 9,6\%. \quad (5.16)$$

A nemlineáris modell esetében:

$$\Delta_{\text{nemlin}} = \frac{873,8 \text{ s} - 846,0 \text{ s}}{846,0 \text{ s}} \cdot 100 \approx 3,3\%. \quad (5.17)$$

A vizsgálatok alapján a nemlineáris modell jól illeszkedik a valós mérésekhez, míg az optimalizált lineáris modell is megfelelő közelítést ad. A 3,3%-9,6% közötti eltérések alátámasztják mindkét modell alkalmazhatóságát az akkumulátor energiafogyasztásának szimulációjára ipari célú előrejelzésekben és tervezésben. A biztonsági becslés alapján az 50 másodperces szimulációk során a nemlineáris modell legalább 21 másodpercig, a lineáris modell pedig legalább 16 másodpercig futott, így a teljes validálás számítási ideje meghaladta a 120 másodpercet.

6. A csúszómód-szabályozásának vizsgálata akkumulátoros szűrőfűrészek nemlineáris modellezésében

Az akkumulátoros kézi szűrőfűrészek dinamikus működésük és változó terhelési viszonyaik miatt jelentős kihívásokkal állnak szemben a szabályozástechnika szempontjából. A vágási folyamat során fellépő külső zavarok - például az anyag keménységének változása, a vágási sebesség ingadozása és a motor terhelésének dinamikus változásai - befolyásolják a motor teljesítményét és energiafelhasználását. Az ilyen rendszerek optimális működéséhez egy robusztus, adaptív szabályozási módszer szükséges, amely képes kompenzálni a változó terhelési feltételeket, biztosítva a hatékony és stabil működést.

A csúszómód-szabályozás (Sliding Mode Control, SMC) egy hatékony, nemlineáris szabályozástechnika, amely kiváló robusztussággal rendelkezik a külső zavarásokkal és a paraméterváltozásokkal szemben. Ennek köszönhetően a szűrőfűrész működése stabilizálható, az áramfelvétel optimalizálható, oly módon, hogy az úgynevezett megfigyelőnek, egy nagyságrenddel nagyobb időállandót választunk, mint a szabályozandó gép időállandója. Ez teszi lehetővé, hogy a szabályozandó gép az üzemi szögsebességét az indításnál lassabban veszi fel, így elkerülhető a nagyon magas indítási áramcsúcs.

6.1. A modellreferenciás csúszómód-szabályozás elméleti alapjai

A problémák hatékony megoldása érdekében a modellreferenciás csúszómód-szabályozás alkalmazása javasolt, továbbá ez a megközelítés a csúszómód-szabályozás alapelveire épül, amely biztosítja a dinamikus rendszerek gyors és pontos alkalmazkodását a változó terhelési körülményekhez, miközben stabil működést és megbízhatóságot garantál.

A szakasz célja, hogy bemutassa a disszertáció szempontjából releváns elméleti alapokat, amelyek nélkülözhetetlenek a modellreferenciás csúszómód-szabályozás megértéséhez. A bemutatott elméleti háttér részben [106] és [107] munkáira épül, amelyek fontos kiindulópontot biztosítanak az említett szabályozási technika részletes elemzéséhez és alkalmazásához.

Ezen elméleti alapok tárgyalása során bemutatásra kerülnek a modellreferencia szabályozási koncepciók, amelyek lehetővé teszik a referencia modellhez való szisztematikus alkalmazkodást, valamint a csúszómód-szabályozás azon tulajdonságai, amelyek előnyt biztosítanak a dinamikus rendszerek stabilitásának és teljesítményének javításában. A modellreferenciás szabályozás megközelítés különösen hatékony, mivel képes minimalizálni a terhelési zavarok hatását és biztosítani a rendszer megbízható működését.

Az ismertetett elméleti háttér tehát kulcsfontosságú szerepet játszik az értekezésben bemutatott szabályozási technika megértésében és annak hatékony alkalmazásában.

Tegyük fel, hogy van egy részben perturbált rendszer:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} + \Delta \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} + \Delta \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 + \Delta \mathbf{B}_2 \end{bmatrix} \mathbf{u}, \quad (6.1)$$

ahol $\mathbf{x}_1 \in \mathbb{R}^{n_1}$ az érintetlen állapotváltozók vektora, $\mathbf{x}_2 \in \mathbb{R}^{n_2}$ pedig a perturbált állapotváltozók vektora. A perturbált állapotváltozóhoz egy úgynevezett másodrendű referenciamodell figyelőt építünk, amelynek paraméterei: $\mathbf{A}_{11} \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_1}$, $\mathbf{A}_{22} \in \mathbb{R}^{n_2 \times n_2}$, $\mathbf{A}_{12} \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_2}$, $\mathbf{A}_{21} \in \mathbb{R}^{n_2 \times n_1}$, $\mathbf{B}_1 \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_2}$, $\mathbf{B}_2 \in \mathbb{R}^{n_2 \times n_2}$, és $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^{n_2}$ [108, 109].

$$\frac{d}{dt} [\hat{\mathbf{x}}_2] = [\mathbf{A}_{21} \quad \mathbf{A}_{22}] \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \hat{\mathbf{x}}_2 \end{bmatrix} + [\mathbf{B}_2] (\mathbf{u} + \mathbf{u}_d), \quad (6.2)$$

ahol $\mathbf{u}_d$ a diszkontinuus szabályozási jel. A cél, hogy $\mathbf{x}_2$ egyenlő legyen $\hat{\mathbf{x}}_2$ -vel, ezért meghatározzuk a

$$\mathbf{x}_{2e} = \mathbf{x}_2 - \hat{\mathbf{x}}_2 \quad (6.3)$$

hibajelet.

Egy skalár változóvektort $\mathbf{s}(x_{2e})$ választunk (ahol $\mathbf{s} \in \mathbb{R}^{n_2}$), úgy, hogy a $\mathbf{x}_{2e}$ vektor minden eleme esetén $s_i(t)^2$ pozitív definit Lyapunov-függvény legyen, ahol $s_i(t) = 0$ azt jelenti, hogy $x_{2e_i} = 0$.

Ha $s_i(t) > 0$, akkor $s_i(t)$ csökkenjen, azaz $\dot{s}_i(t) < 0$. Ezzel szemben, ha $s_i(t) < 0$, akkor $s_i(t)$ növekedjen, azaz $\dot{s}_i(t) > 0$. Ezeket az elvárásokat összegezve az

$$\dot{s}_i(t)s_i(t) < 0 \quad (6.4)$$

feltételt kapjuk. A hibajelet $u_{d,i}$ által befolyásoljuk. Kimutatható, hogy bizonyos további feltételek mellett egy egyszerű relé-intervenció biztosíthatja, hogy a (6.4) feltétel teljesüljön:

$$u_{d,i}(t) = \Gamma_i \text{sign}(s_i(t)), \text{ ahol } \Gamma_i > 0. \quad (6.5)$$

Minél nagyobb Γ_i értéke, annál nagyobb az a tartomány, amelyben a megfigyelőhöz tartozó szabályozási törvény biztosítja a csúszómód létezését. Alternatívaként a (6.5) egy PWM jellel értelmezhető, amelynek átlagos ekvivalens jele $u_{deq}(t)$ fenntartja $s_i(t) = 0$ állapotát. Feltételezhetjük, hogy $u_{d,i}(t)$ lassan változik; ezért egyszerű aluláteresztő szűrővel közelíthető:

$$T_c^3 \hat{u}_{deq}^{(3)} + 3T_c^2 \hat{u}_{deq}^{(2)} + 3T_c \hat{u}_{deq}^{(1)} + \hat{u}_{deq} = u_{d,i}(t). \quad (6.6)$$

Itt a $\hat{\cdot}$ a változón azt jelenti, hogy közelítő értékről van szó, a $^{(i)}$ az i -edik idő szerinti deriváltat jelzi, és T_c a szűrő határfrekvenciáját jellemzi. Ha ezt az algoritmust számítógépes vezérlővel valósítják meg, a jelen szakaszban leírt összes egyenletet diszkrét időben kell implementálni. Γ_i értéke tovább csökkenthető a szabályozási törvény alkalmazásával a (6.5).

$$u_{d,i}(t) = \hat{u}_{deq,i}(t) + \Gamma_i \text{sign}(s_i(t)), \text{ ahol } \Gamma_i > 0 \quad (6.7)$$

Ennek részletei meghaladják a disszertáció kereteit. További [106, 107, 110–112] forrásokban, matematikailag szigorú elméleti leírás pedig a [113–117] munkában található.

6.2. Az elmélet alkalmazása a 6.1 szakasz alapján, a vizsgált akkumulátoros kézi szúrófűrész esetében

Esetünkben az (6.1) egyenlet a szúrófűrész elektromechanikai modelljének specifikus formáját ölti, amely az alábbiak szerint írható fel:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q \\ i \\ \varphi_m \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_a+R_b}{L_a} & 0 & -\frac{k_e}{L_a} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{42}(\varphi_m) & 0 & a_{44}(\varphi_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ i \\ \varphi_m \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{42}(\varphi_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{in}(t) \\ F_{saw} \end{bmatrix}, \quad (6.8)$$

$$a_{42}(\varphi_m) = \frac{k_m}{J_m + J_k k_{mk}^2 + m_a e_k^2 k_{mk}^2 \sin^2(k_{mk} \varphi_m)},$$

$$a_{44}(\varphi_m) = -\frac{b + 0.5(m_a e_k^2 k_{mk}^3 \sin(2k_{mk}(\varphi_m))\omega}{J_m + J_k k_{mk}^2 + m_a e_k^2 k_{mk}^2 \sin^2(k_{mk} \varphi_m)},$$

$$b_{42}(\varphi_m) = \frac{-k_{mk} e_k \sin(k_{mk} \varphi_m)}{J_m + J_k k_{mk}^2 + m_a e_k^2 k_{mk}^2 \sin^2(k_{mk} \varphi_m)}.$$

Ebben az egyenletben $v_{in}(t)$ a motor bemeneti feszültségét jelenti, amelyet a továbbiakban konstans terminálfeszültség, U_0 , helyett változóként kezelünk. Az F_{saw} a fűrészelési folyamat során mért külső erő, amely zavaró hatásként jelenik meg a rendszerben.

Nyilvánvaló, hogy a zavart állapotváltozó ω , a hajtás szögsebessége. Az ilyen zavarok hatékony kezeléséhez az (6.2) egyenlet alapján csökkentett rendű zavarészlelőt kell tervezni. Ez a megközelítés az elektromos időállandó, T_e , elhanyagolásával válik lehetővé, ami lehetővé teszi, hogy a megfigyelés kizárólag a mechanikai alrendszerre, azaz a mechanikai almodellre összpontosítson.

Az elektromos és mechanikai időállandók az alábbiak szerint definiálhatók a 3.1. ábrán bemutatott paraméterek alapján:

$$T_e = \frac{L_a}{(R_a + R_b)}, \quad (6.9)$$

$$T_m = \frac{(R_a + R_b)J_{eq}}{k_e k_m}, \quad (6.10)$$

ahol J_{eq} a rendszer redukált tehetetlenségi nyomatéka, amely így definiálható:

$$J_{eq} = J_m + J_k k_{mk}^2. \quad (6.11)$$

Az időállandók kritikus szerepet játszanak a rendszer dinamikus jellemzőinek meghatározásában, és közvetlenül megjelennek a hajtás szögsebessége és a terminálfeszültség közötti átviteli függvényben:

$$\frac{\hat{\omega}(s)}{v_{in}(s)} = \frac{\frac{k_m}{J_{eq} L_a}}{s^2 + \frac{R_a+R_b}{L_a} s + \frac{k_e k_m}{L_a J_{eq}}} = \frac{\frac{1}{k_e}}{\frac{L_a J_{eq}}{k_e k_m} s^2 + \frac{(R_a+R_b)J_{eq}}{k_e k_m} s + 1}. \quad (6.12)$$

ahol az s a Laplace változó. A névleges motorparaméterek alapján a mechanikai időállandó, T_m , nagyságrendileg nagyobb, mint az elektromos időállandó, T_e , amit a 6.1. táblázat is bemutat. A fenti időállandók közelítő értékek, és nem pontosan egyeznek meg

a valós rendszerek időállandóival, a különbség elhanyagolható, amennyiben T_m jelentősen nagyobb, mint T_e .

Az állapot-meghatározás során az $\hat{B}_m$ becslése alapján az elsőrendű referencia modell differenciálegyenlete az alábbi alakot ölti:

$$\frac{d\hat{\omega}}{dt} = -\frac{\hat{\omega}}{\hat{T}_m} + \hat{B}_m v_{in}. \quad (6.13)$$

A szimuláció során használt átviteli függvény formája a következőképpen módosul a megfigyelőnél:

$$\frac{\omega}{v_{in}} = \frac{1/k_e}{\text{factor}T_ms + 1}. \quad (6.14)$$

ahol a $\text{factor}T_m$ a megfigyelő indőállandója.

A sebességmodellezési hiba, amely az állapottérbeli szabályozás alapvető eleme, az alábbi módon definiálható:

$$\sigma(t) = \omega(t) - \hat{\omega}(t). \quad (6.15)$$

Mivel a vizsgált hajtás egynegyed-kvadránsos üzemmódban működik, a motorra nem alkalmazható negatív feszültség. Ezért az alábbi módosított szabályozási egyenletet alkalmazzuk:

$$u_d(t) = \hat{u}_{deq} + \frac{1}{2}\Gamma + \frac{1}{2}\Gamma \text{sign}(\sigma(x)), \text{ ahol } \Gamma > 0. \quad (6.16)$$

A Γ a csúszómód-szabályozásban alkalmazott kapcsolófeszültség. Ez határozza meg a kapcsolási tartományt, azaz azt a küszöbértéket, amelyen túl a relévezérlés aktívan működésbe lép. A Γ értékét úgy kell megválasztani, hogy biztosítsa a rendszer stabilitását a Ljapunov-feltétel szerint. Ha Γ túl alacsony, a rendszer nem képes legyőzni a zavart, ha túl nagy, remegési hatás nőhet.

Ebben az egyenletben $\hat{u}_{deq}$ egy (6.6) egyenlet biztosította szűrő által előállított ekvivalens szabályozási jel. Amennyiben a rendszer csúszásómódban működik, $\sigma(t) = 0$, ami azt is jelenti, hogy $\dot{\sigma}(t) = 0$. Az ekvivalens vezérlőjel becslése a $\dot{\omega}$ és $\hat{\omega}$ differenciálegyenletek paraméterkülönbségeinek figyelembevételével történik. Ezen túlmenően figyelembe vehetünk további külső zavaró tényezőket, például $d(t)$, ha azok megfelelnek bizonyos kritériumoknak. Az ilyen típusú zavarok kezelését részletesen tárgyalják a mérnöki megközelítést alkalmazó [106], valamint a matematikai megközelítést részletező [113] hivatkozások.

6.3. A csúszómód stabilitási feltételei

A stabilitási feltétel szigorú igazolásához egy Ljapunov-függvényt definiálunk a csúszófelülethez $\sigma(t)$:

$$V(\sigma) = \frac{1}{2}\sigma^2(t), \quad (6.17)$$

ahol $V(\sigma)$ pozitív definit, mivel $V(\sigma) > 0$ minden $\sigma(t) \neq 0$ esetén, és $V(\sigma) = 0$, ha $\sigma(t) = 0$. Ez teljesíti a Ljapunov-függvény követelményeit. A Ljapunov-függvény idő szerinti deriváltja:

$$\dot{V}(\sigma) = \sigma(t)\dot{\sigma}(t). \quad (6.18)$$

A Ljapunov-függvény deriváltjának negatív definit volta ($\dot{V}(\sigma) < 0$) biztosítja, hogy a rendszer trajektóriái a csúszófelület felé tartanak ($\sigma(t) = 0$), így garantálva a stabilitást minden körülmények között. Ez ekvivalens a következő feltétellel:

$$\sigma(t)\dot{\sigma}(t) < 0, \quad (6.19)$$

amely biztosítja, hogy a rendszer trajektóriái konvergálnak a csúszófelületre ($\sigma(t) = 0$). Ez biztosítja, hogy a rendszer mindig visszatérjen a csúszófelületre és ott maradjon. Ha $\sigma(t) > 0$, akkor $\dot{\sigma}(t) < 0$, és fordítva. Az alábbiakban bemutatom, hogyan biztosítható ez a feltétel a dekopírőrész modelljére. Ebben az esetben a csúszófelület az aktuális szögsebesség és a referencia szögsebesség közötti különbséggént van definiálva az (6.15) egyenlet szerint. A $\dot{\sigma}(t)$ becslhető:

$$\dot{\sigma}(t) = \dot{\omega}(t) - \dot{\hat{\omega}}(t). \quad (6.20)$$

A (6.14) egyenlet alapján a $\hat{\omega}(t)$ egyenlete ismert. A rendszer dinamikáját az elektromos és motor tulajdonságok figyelembevételével az alábbi egyenletek írják le. Az (6.8) egyenletben a 4×4 rendszer mátrix rangja csupán 2, ami azt jelenti, hogy az állapotváltozók q és φ_m elhagyhatók. Mivel $T_e \ll T_m$, az áram (i) is kiküszöbölhető azzal, hogy $L_a = 0$ -t választunk, így az áram kifejezhető:

$$i = \frac{1}{R_a + R_b} (v_{in} + u_{d,eq}) - \frac{k_e \omega}{R_a + R_b}. \quad (6.21)$$

A nemlineáris együtthatókat egy állandó és egy növekményi részre bontjuk, a növekményeket pedig az alábbiak szerint fejezzük ki:

$$\Delta a_{42} = a_{42}(\varphi_m) - a_{42}, \quad (6.22)$$

$$\Delta a_{44} = a_{44}(\varphi_m) - a_{44}. \quad (6.23)$$

A mátrix egyenlet (6.8) negyedik skalár differenciálegyenlete a (6.22) és (6.23) figyelembevételével:

$$\dot{\omega} = (a_{42} + \Delta a_{42})i + (a_{44} + \Delta a_{44})\omega + 0v_{in} + b_{42}F_{saw}. \quad (6.24)$$

Az (6.22)-(6.21) egyenletek és (6.14) egyenlet behelyettesítése az (6.20) egyenletbe:

$$\dot{\sigma} = \frac{\Delta a_{42}}{R_a + R_b} (v_{in}(t) + u_{d,eq}) + \left(-\frac{\Delta a_{42} k_e}{R_a + R_b} + \Delta a_{44} \right) \omega + b_{42} F_{saw}. \quad (6.25)$$

Az (6.16) egyenlet meghatározza a szabályozó kapcsolási stratégiáját a csúszófelület s előjelétől függően. Az (6.16, 6.19) egyenletek alapján az alábbi egyenlőtlenség adódik:

$$\sigma(t) \left[\frac{\Delta a_{42}}{R_a + R_b} \left(v_{in}(t) - \frac{1}{2}\Gamma - \frac{1}{2}\Gamma \text{sign}(\sigma) \right) + \left(-\frac{\Delta a_{42}k_e}{R_a + R_b} + \Delta a_{44} \right) \omega + b_{42}F_{saw} \right] < 0. \quad (6.26)$$

A paraméterek felső becslésével meghatározható a Γ értékére vonatkozó feltétel:

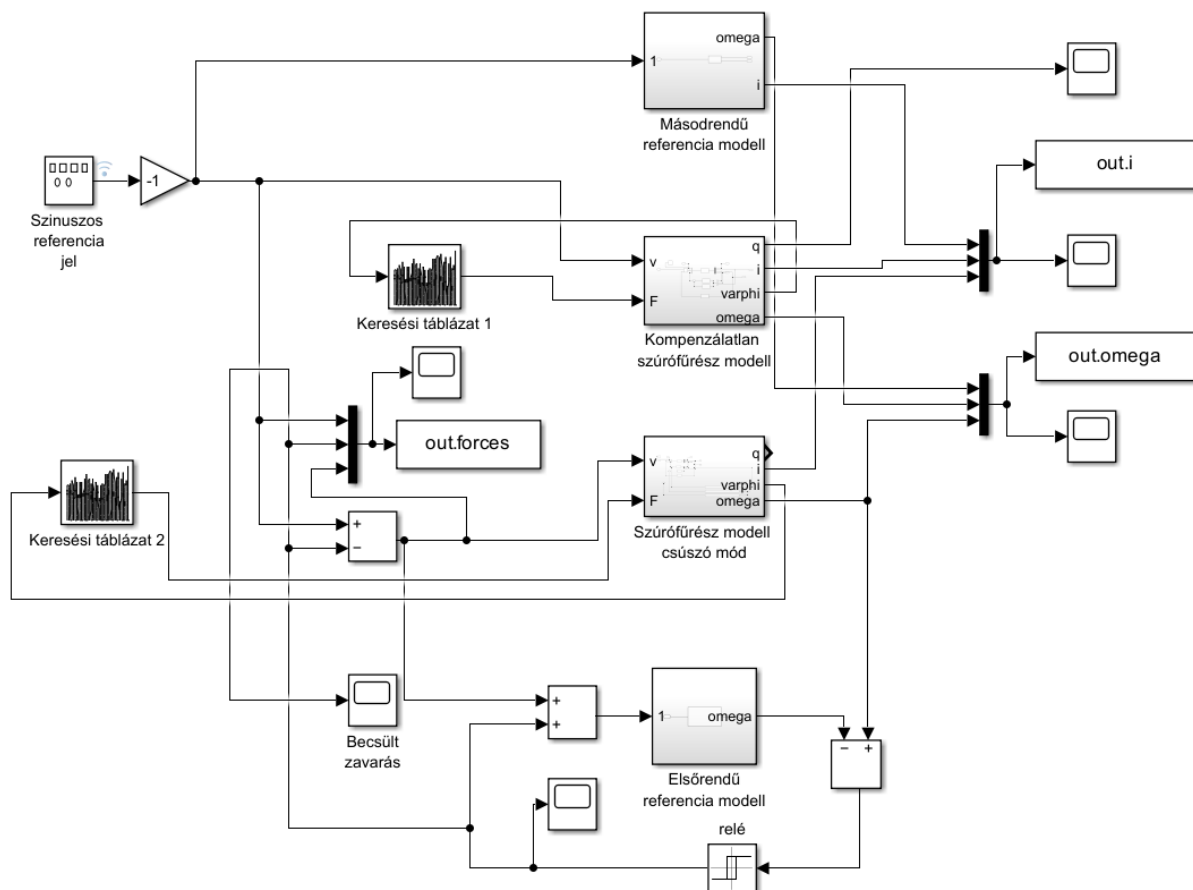
$$\Gamma > -v_{in}(t) + k_e \omega - \frac{\Delta a_{44}(R_a + R_b)}{\Delta a_{42}} \omega - \frac{(R_a + R_b)}{\Delta a_{42}} b_{42} F_{saw}. \quad (6.27)$$

A számítások alapján: $\Gamma > 11.758$. Ebből látható, hogy a nagyobb fordulatszám növeli a Γ értékét. A feltétel teljesítésével a csúszómód szabályozó kompenzálja az a_{42} , a_{44} és b_{42} változásait, valamint a külső zavarásokat (F_{saw}), biztosítva a Ljapunov-feltétel teljesülését ($\dot{V}(\sigma) < 0$).

Ez az elemzés megmutatja, hogy a szabályozó képes kezelni a rendszer nemlineáris és időben változó természetét, biztosítva a stabilitást minden működési körülmény között.

6.4. Szimulációs beállítások

A Simulink környezetben megvalósított szimulációs program négy, egymással párhuzamosan futó részmodellből épül fel. Mindegyik modell a vizsgált rendszer egy-egy különálló dinamikai aspektusát reprezentálja. A szimuláció teljes felépítése a 6.1. ábrán látható



6.1. ábra. A rendszer szimulációjának folyamatábrája.

Az első blokk egy másodrendű lineáris referencia modellt tartalmaz, amely semmilyen külső kompenzációval nem rendelkezik, és függetlenül fut a többi bloktól, szerkezetét és felépítését a 6.2. ábra szemlélteti. Ez a blokk szolgál alapvető viszonyítási pontként, azaz referencia viselkedést biztosít a további vizsgálatokhoz.

A blokkdiagram második egysége a vágási folyamat részletes nemlineáris modelljét tartalmazza, amely ugyancsak kompenzáció nélküli, önállóan futó modellként működik.

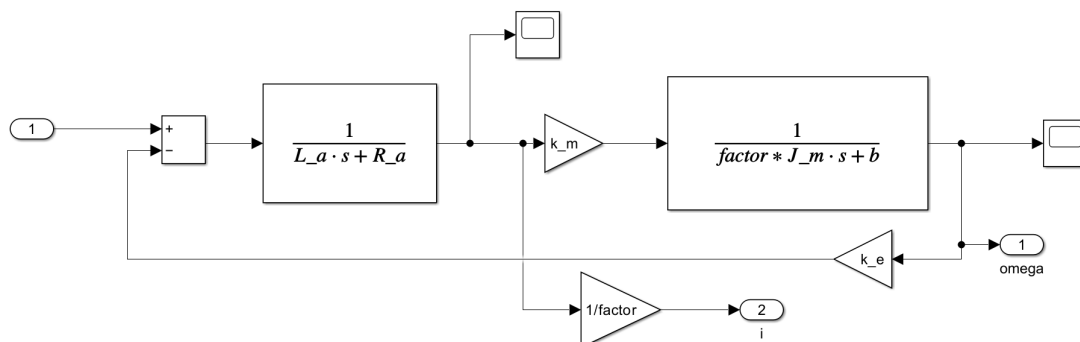
A lineáris modell valóban jó közelítést és gyors számítási lehetőséget biztosít, azonban nem képes teljes mértékben visszaadni a kézi szűrőfűrész működésének valós dinamikai jellegzetességeit, különösen azokat a nemlineáris hatásokat, amelyek például a kulisszás hajtásmechanizmusból vagy a vágási folyamatból származnak. Ezek a nemlineáris jelenségek jelentősen befolyásolják a motor dinamikus viselkedését, az áramfelvételt, valamint a szögsebességet a vágási folyamat során.

A csúszómód-szabályozás egyik fő előnye éppen abban rejlik, hogy robusztus módon képes kezelni a rendszerben fellépő nemlineáris hatásokat és paraméterváltozásokat. Ezért a szabályozó teljesítményének reális értékeléséhez elengedhetetlen volt a valódi nemlineáris modell alkalmazása. Csak így lehetett hitelesen vizsgálni, hogy a szabályozó valóban

képes-e kezelni a szűrőfűrészek működésében fellépő dinamikai változásokat, beleértve a motor terhelési viszonyainak, illetve a vágási erők változásainak hatásait.

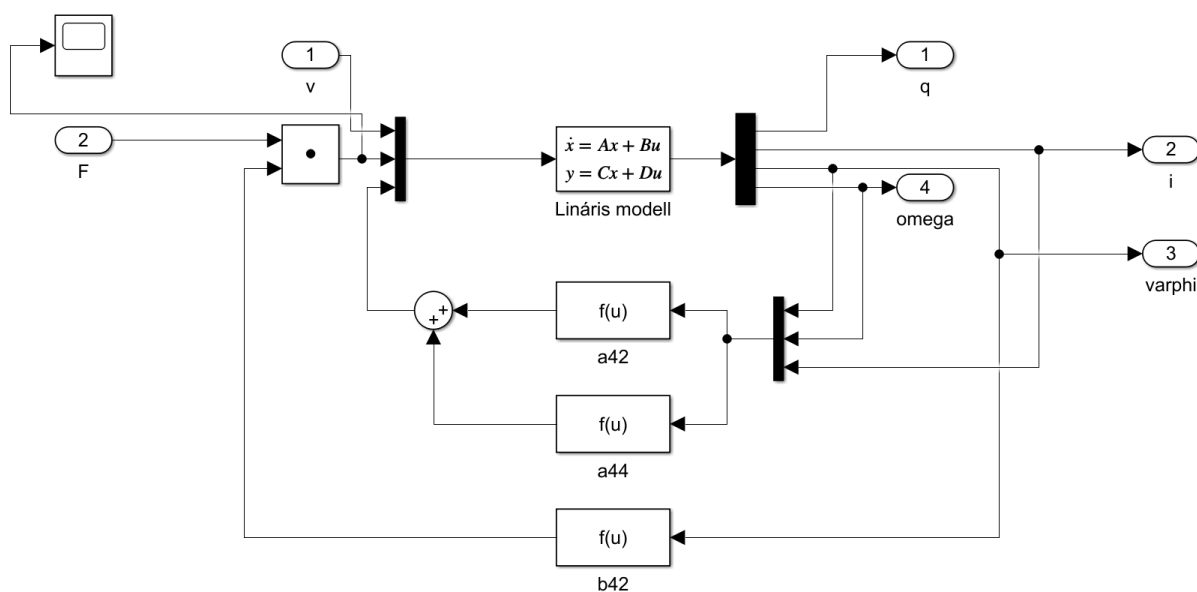
A harmadik blokk szerkezetileg megegyezik a másodikkal, tehát szintén a vágási folyamat nemlineáris dinamikáját szimulálja, azonban jelentős különbség, hogy ebben az esetben egy negyedik blokk által megvalósított egyszerűsített, elsőrendű referencia modell szolgál kompenzációként. A kompenzáció célja a rendszer stabilitásának javítása és dinamikai viselkedésének kedvezőbb irányba történő befolyásolása.

A négy modell együttes futtatása lehetőséget nyújt a rendszer különböző működési jellemzőinek összehasonlítására, a kompenzáció hatásának elemzésére, valamint a lineáris és nemlineáris modellek közötti eltérések vizsgálatára. Az alábbiakban a blokkok tartalmát részletesen bemutatom.



6.2. ábra. Másodrendű lineáris referencia modell.

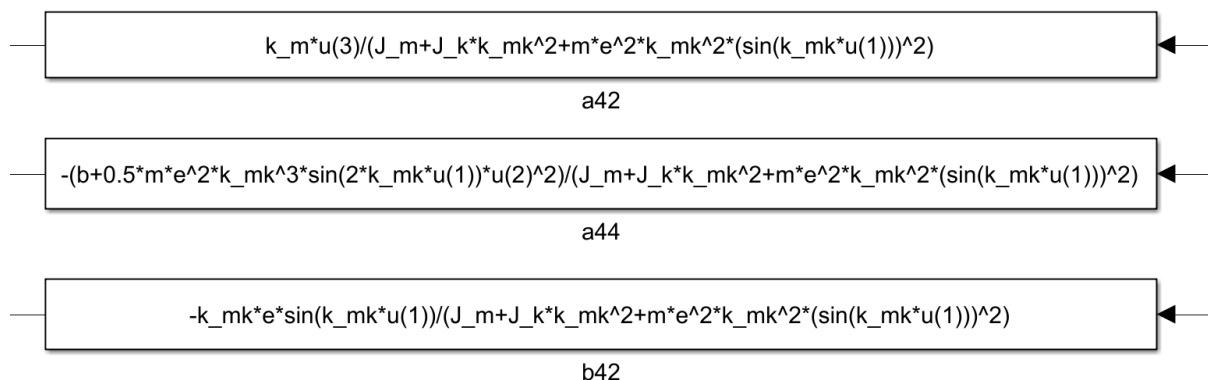
A nemlineáris vágási modell, amely kompenzáció nélkül működik, a 6.3. ábrán látható. Ez a blokk a rendszer belső szerkezetét tükrözi, amelyben a bemeneti jelek, például a motor feszültsége (v_{in}) és a vágási erő (F_{saw}), hatást gyakorolnak a kimeneti változókra. A kimeneti változók között szerepel a helyzet (q), az áram (i), a szögelfordulás (φ) és a szögsebesség (ω).



6.3. ábra. Kompenzálatlan nemlineáris vágási modell blokkdiagramja.

Ez a blokk több visszacsatolási hurkot tartalmaz, amelyek a nemlineáris dinamikai paramétereket, például a_{42} , a_{44} és b_{42} értékeket számítják ki a kimeneti változók alapján. Ezek a paraméterek nemlineáris tagként funkcionálnak, és alapvetően meghatározzák a rendszer dinamikus viselkedését. Az $f(u)$ blokkok kiszámítják ezeket a paramétereket, figyelembe véve a rendszer mechanikai és elektromos jellemzőit. Az a_{42} és a_{44} blokkok a motor állapotváltozóinak modellezésében játszanak szerepet, míg a b_{42} blokk a külső fűrészlapon ható erőket veszi figyelembe.

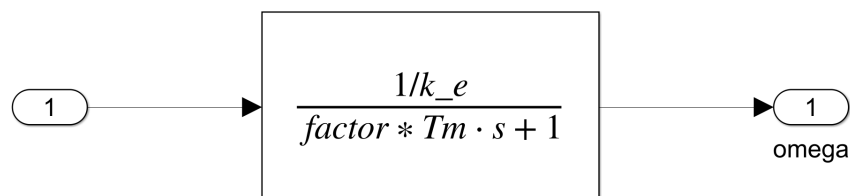
Az a_{42} , a_{44} és b_{42} blokkok működését és tartalmát részletesen a 6.4. ábra mutatja.



6.4. ábra. Az a_{42} , a_{44} és b_{42} blokkok tartalma részletesen.

A kompenzált nemlineáris modell működése megegyezik a kompenzálatlan nemlineáris modellel, azonban egy egyszerűsített elsőrendű referencia modell támogatja.

Ez a referencia modell, amely a 6.5. ábrán látható, becsli a motor szögsebességét ($\hat{\omega}$) egy módosított átviteli függvény segítségével.



6.5. ábra. Egyszerűsített elsőrendű referencia modell.

A referencia modell átviteli függvénye figyelembe veszi a motor elektromos állandóját (k_e), a mechanikai időállandót (T_m), valamint egy „factor” paramétert, amely az időállandó skálázására szolgál. Ez a skálázási tényező lehetővé teszi a megfigyelő válaszsebességének beállítását, hogy a modell alkalmazkodjon a szabályozási követelményekhez. Például lassabb skálázás esetén a megfigyelő simábban reagál, míg gyorsabb skálázás esetén érzékenyebben követi a rendszer dinamikus változásait. Ez különösen hasznos, ha eltérő dinamikai válaszokra van szükség a rendszer különböző üzemállapotai során.

Összességében a Simulink szimulációs rendszer négy párhuzamos modellje részletes betekintést nyújt a kézi szűrőfűrészes rendszer működésébe, lehetővé téve a nemlineáris dinamika, a kompenzáció hatásainak, valamint a referencia modellek viselkedésének összehasonlítását. Ezek az elemzések alapvető fontosságúak a rendszer teljesítményének optimalizálásához és stabil működésének biztosításához.

A kézi szúrófűrész elektromechanikai modelljének szimulációjához használt paraméterek alapvető szerepet játszanak a rendszer viselkedésének pontos meghatározásában és a szimuláció eredményeinek érvényességében. Ezek a paraméterek tartalmazzák mind az elektromos, mind a mechanikai jellemzőket, amelyek a motor és a fűrészelési folyamat dinamikáját befolyásolják. Az alábbi 6.1. táblázat összefoglalja a szimuláció során alkalmazott kulcsfontosságú paramétereket. A paraméterek egy része mérésből származik (például R_a , L_a , k_e), másik részüket mérés és számítás alapján határoztam meg (például J_m , J_k , m_a , b). Az olyan paramétereket, mint a Δa_{42} , Δa_{44} és Δb_{42} , a modellfüggvények numerikus kiértékelése és a változótartomány szerinti differenciálás alapján becsültem. A csúszómód-szabályozáshoz használt konstansokat (például Γ vagy O_{2G}) iteratív szimulációval, stabilitási és teljesítménykritériumok alapján választottam.

6.1. táblázat. A csúszómód szimulációnál mért és számított paraméterek összefoglalása.

Bemeneti paraméterek	Azonosított	Mértékegység
R_a	0,176	Ω
R_b	0,0	Ω
L_a	3,21e-3	H
k_e	7,383e-3	V s rad ⁻¹
k_{mk}	6/56	-
J_m	24,1e-6	kg m ²
k_m	5,632e-3	N m A ⁻¹
J_k	24,0e-6	kg m ²
m_a	0,239	kg
e_k	0,010	m
b	3,4274e-6	N m s rad ⁻¹
v_{in}	18	V
Γ	17	V
T_c	0.01	s
T_m	0,1043	s
T_e	0,0182	s
$\hat{T}_m$	1,043	s
$\hat{B}_m$	135,4433	rad V ⁻¹ s ⁻¹
$factor$	10	-
O_{2G}	0,1	s ⁻¹
T_{err}	0,03	s
Δa_{42}	207,3	A ⁻¹ s ⁻²
Δa_{44}	-0,605	s ⁻¹
Δb_{42}	-0,605	kg ⁻¹ m
$F_{saw_{max}}$	400	N
ω_{max}	2445	rad s ⁻¹

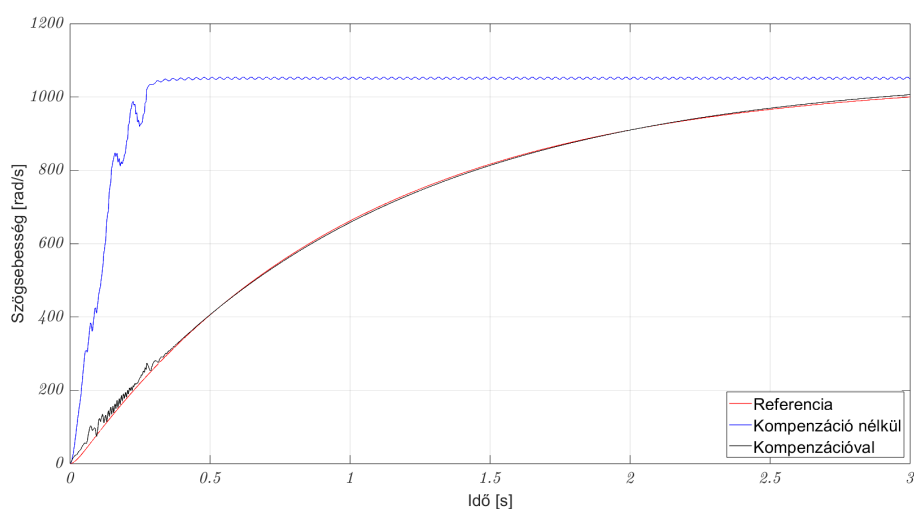
6.4.1. Csúszómód szimulációja

A szimulációs program a kézi szúrófűrész működését egy 3 másodperces időtartamon keresztül modellezi, amely során a rendszer dinamikájának részletes elemzésére kerül sor. A három másodperces szimulációs időtartam elegendő volt a rendszer dinamikai válaszá-
nak megfigyeléséhez, mivel az indítási szakasz, a stabil állapot elérése, valamint a relé kapcsolási viselkedése mind ebbe az időtartamba esik. A rendszer közel 1 másodperc alatt eléri a kvázi-stacionárius állapotot, ezt követően az áram és szögsebesség értékek már csak kis mértékben változnak. A fennmaradó időben a csúszómód-szabályozás stabi-

lizációs hatásai vizsgálhatók. Hosszabb szimuláció nem adott volna újabb, a szabályozó működését befolyásoló információt, viszont növelte volna a számítási időt.

A szimuláció során a differenciálegyenletek integrálása rendkívül kis, 10^{-6} másodperces időlépéssel történik, biztosítva a számítások nagy pontosságát és megbízhatóságát. Az integrálás az Euler-módszer segítségével valósul meg, amely egy egyszerű és stabil numerikus megoldási eljárás az ilyen típusú problémák esetében.

A szögsebességeket a 6.6. ábra szemlélteti. A kompenzálatlan nemlineáris modell körülbelül 0,25 másodperc alatt éri el az üzemi szögsebességet. A csúszó kompenzációval modellezett folyamat jelentősen hosszabb idő alatt éri el az üzemi szögsebességet. A csúszó modellnek köszönhetően a kompenzált modell szögsebesség-függvénye közelít a referencia modellhez. Az áram lassú növekedése jelentősen kisebb áramfelvételt tesz lehetővé a kézi szűrőfűrész számára az indítás során.

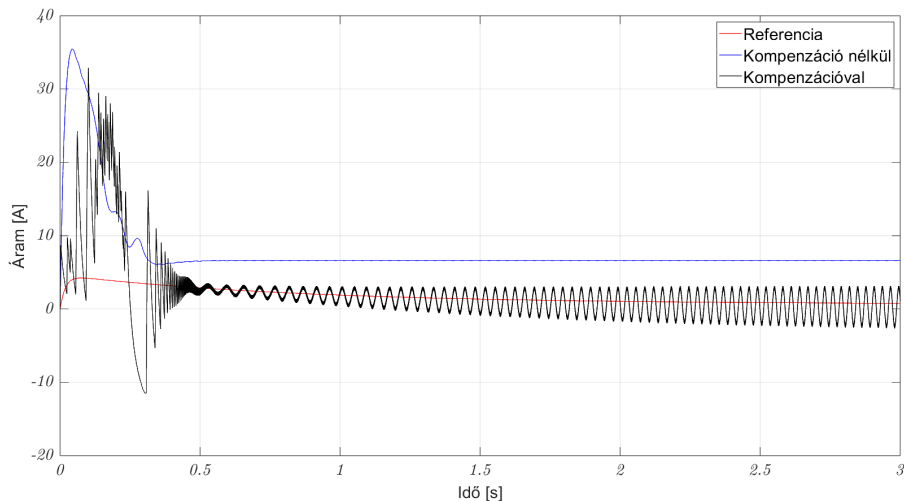


6.6. ábra. Szögsebesség-idő diagram.

A 6.7. ábra a három modell által mért áramfelvételek alakulását szemlélteti. Az ábrán jól látható, hogy a három modell eltérő dinamikai viselkedése teljesen különböző görbék eredményez. A kompenzált modell áramfelvételének csúcsértéke alacsonyabb, mint a kompenzálatlan nemlineáris modellé, ami a csúszómód-szabályozás hatékonyságát tükrözi. Pontosabban, a kompenzált modell csúcsárama körülbelül a fele a kompenzálatlan nemlineáris modell által mért csúcsértéknek.

A kompenzált modell kialakításának fő célja az indítási folyamat során fellépő áramcsúcs csökkentése volt. Ez a célkitűzés azt a kompromisszumot követelte meg, hogy a motor sebességnövekedésének üteme lassabb legyen az indítási szakaszban. Az áramcsúcs csökkentése azonban jelentős előnyökkel jár, különösen az elektromos motor élettartamának meghosszabbítása szempontjából. A kisebb áramcsúcsok minimalizálják a motor tekercseléseiben fellépő hőmérséklet-emelkedést, ezáltal csökkentik a túlmelegedés kockázatát és a hő okozta károsodás lehetőségét.

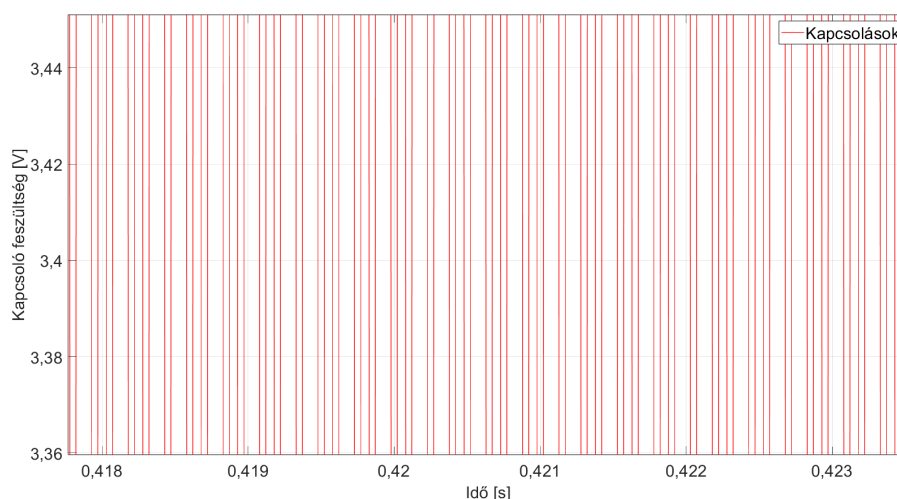
Ezen túlmenően a szimuláció során számított áramfelvétel instabilitása is megfigyelhető, ami a rendszer és az elsőrendű referencia modell eltérő dinamikájának következménye. Ez az instabilitás abból fakad, hogy a nemlineáris modell és a referencia modell különböző módon reagál a dinamikai változásokra, különösen a motor sebességének és a terhelési feltételek változásának hatására.



6.7. ábra. Áram-idő diagram.

Az áramfelvétel csökkentése nemcsak az elektromos motor védelmét szolgálja, hanem a rendszer általános megbízhatóságát is javítja. A csúszómód-szabályozás egy hatékony módszer az indítási áramcsúcsok mérséklésére, miközben figyelembe veszi a sebesség lassabb növekedésének következményeit. Ez a megközelítés hozzájárul a kézi szűrőfűrész motorjának hosszabb távú működési stabilitásához és megbízhatóságához.

A 6.8. ábra a relé kapcsolási folyamatát szemlélteti, amely a csúszómód-szabályozás megvalósításához nélkülözhetetlen. A relé működésének kulcsszerepe van abban, hogy a szabályozási rendszer gyorsan reagáljon a dinamikai változásokra, és a rendszer állapotát folyamatosan a csúszó felület közelében tartsa.



6.8. ábra. Omega-idő diagram.

A kapcsolási folyamat kezdetén, az indítási szakaszban a relé kapcsolási frekvenciája viszonylag alacsony, mivel a rendszernek elegendő időt kell hagyni az állapotok stabilizálására. Ez lehetővé teszi, hogy az állapotváltozók lassan közelítsenek a csúszó felülethez, minimalizálva a rendszer kezdeti instabilitását.

Az idő előrehaladtával a kapcsolási frekvencia fokozatosan növekszik. Körülbelül egy másodperc elteltével a relé kapcsolási frekvenciája eléri a 3 kHz-et, amely már elegendően gyors ahhoz, hogy a rendszer pontosan kövesse a csúszó felületet és fenntartsa a csúszómód működés stabilitását. Ez a magas kapcsolási frekvencia elengedhetetlen a rendszer zavarérzékenységének csökkentéséhez, mivel biztosítja, hogy a szabályozási jel gyorsan alkalmazkodjon a rendszer dinamikai változásaihoz.

A gyakorlatban a 3 kHz-es kapcsolási frekvencia a modern teljesítményszabályozó elektronikákban gond nélkül megvalósítható. A mai technológia lehetővé teszi, hogy ilyen magas frekvenciák mellett is hatékonyan működjenek a relék és a vezérlőrendszerek, biztosítva a stabil működést és a szükséges szabályozási pontosságot. Ez a kapcsolási stratégia kulcsszerepet játszik a csúszómód-szabályozás gyakorlati alkalmazásában, különösen olyan rendszerek esetében, ahol gyors dinamikai válaszokra és precíz szabályozásra van szükség.

Az elsőrendű referencia modell alkalmazása során a szimulációs környezetben az alulmodellezett dinamika jelentős problémákat okozhat, amelyek akár instabilitáshoz is vezethetnek, és a szimulációs folyamat „elszállását” eredményezhetik. Az alulmodellezett dinamika olyan komponensekre és hatásokra utal, amelyeket a rendszer matematikai modellje nem képes teljes mértékben leírni vagy figyelembe venni. Ezek a figyelmen kívül hagyott elemek tipikusan a nemlineáris viselkedésből, magasabb frekvenciájú dinamikákból vagy olyan paraméterekből erednek, amelyek csak kisebb mértékben befolyásolják a rendszer működését. Bár egyenként ezek a hatások kismértékűek, idővel összeadódhatnak, és jelentős eltéréseket okozhatnak a szimulált és a tényleges rendszer viselkedése között.

A csúszómód-szabályozás során az elsőrendű referencia modell alapvető feladata, hogy megbecsülje a rendszer kulcsfontosságú változóit, például a motor szögsebességét és áramfelvételét. Az alulmodellezett dinamika hatására azonban ezek a becslések idővel pontatlanná válhatnak. Az eltérések kezdetben aprók, ám ahogy a nem figyelembe vett dinamikai komponensek hatása kumulálódik, a referencia modell egyre nagyobb mértékben eltér a valós rendszer viselkedésétől. Ez különösen a dinamikai jellemzők, például az áram-idő és szögsebesség-idő függvények esetében válik kritikus problémává.

Az alulmodellezett dinamika okozta eltérések további problémákat idézhetnek elő a szimulációs folyamatban. A csúszómód-szabályozás ugyan hatékonyan csökkenti az indítási áramcsúcsokat és hozzájárul a motor élettartamának növeléséhez, azonban az alulmodellezett dinamika következményeként instabilitás alakulhat ki. Az eltérések növekedésével a megfigyelési rendszer egyre kevésbé képes pontosan követni a valós rendszer állapotait, ami oszcillációkhoz vagy hirtelen, váratlan ingadozásokhoz vezethet. Ezek az ingadozások különösen kritikusak lehetnek, amikor a becsült és tényleges állapotok közötti eltérés meghalad egy bizonyos küszöbértéket, amely után a szimuláció már nem képes fenntartani a stabil működést.

Amikor az alulmodellezett dinamika dominálni kezd, a megfigyelési alapú szimuláció eredményei egyre inkább eltérnek a várt stabil viselkedéstől. Ahelyett, hogy egyenletes áram- vagy szögsebesség-profil kapnánk, a rendszer hajlamos oszcillációkra vagy gyors változásokra. Ezek az instabil állapotok végül a szimuláció teljes összeomlásához vezethetnek, mivel az eltérések exponenciálisan növekednek, és a modell már nem képes megbízhatóan reprezentálni a valós rendszer viselkedését. Ezért különösen fontos, hogy a szimulációs környezet tervezése során megfelelően kezeljük az alulmodellezett dinamika hatásait, például fejlettebb megfigyelő modellek vagy kompenzációs stratégiák alkalmazásával.

6.4.2. A modell hitelesítése

Elméleti alapok validálása: A modell alapjául szolgáló dinamikai egyenletek származtatása fizikai törvényeken (Newton-törvények, elektromos és mechanikai analógiák) alapult, amelyek konzisztens keretet biztosítottak a rendszer viselkedésének leírására. A csúszómód-szabályozás stabilitási vizsgálatát Ljapunov-elmélettel igazoltam, amely bizonyítja, hogy a modell elméleti értelemben stabil működést eredményez.

Szimulációs validáció: A modell Simulink környezetben történő megvalósítása során több, párhuzamosan futó modell összehasonlítását végeztem el: lineáris referencia modell, nemlineáris modell kompenzáció nélkül, illetve kompenzált modellek különböző megfigyelőkkel. A szimulációs eredmények (pl. 6.11, 6.12, 6.13) jól mutatták a rendszer viselkedésének következetes változását, és alátámasztották a modell dinamikai tulajdonságait, például az indítási áramcsúcsok csökkenését, a stabil szögsebesség-elérését, valamint az oszcillációk elnyomását.

Robusztusság vizsgálata: A modell viselkedését változó paraméterek (pl. F_{saw} , ω , Δa_{42}) mellett is teszteltem, a Γ stabilitási feltétel ellenőrzésével. A szabályozó így bizonyítottan képes kezelni a rendszer zavarait és nemlinearitását.

Összességében a modell hitelesítését a fizikai alapokon nyugvó struktúra, a szimulációs eredmények és a mérési adatokkal való egyezés együttesen biztosította.

6.4.3. Csúszómód szimuláció csökkentett rendű állapotfigyelővel

A 6.9. ábra a szimulációs modell felépítését mutatja, amely tartalmazza a csökkentett rendű állapotfigyelőt. Ennek az állapotfigyelőnek a bevezetése lehetővé teszi, hogy a rendszer kétrétegű megfigyelési megközelítéssel működjön. Ez a megközelítés jelentősen javítja a szimuláció stabilitását, miközben optimalizálja a rendszer teljesítményét.

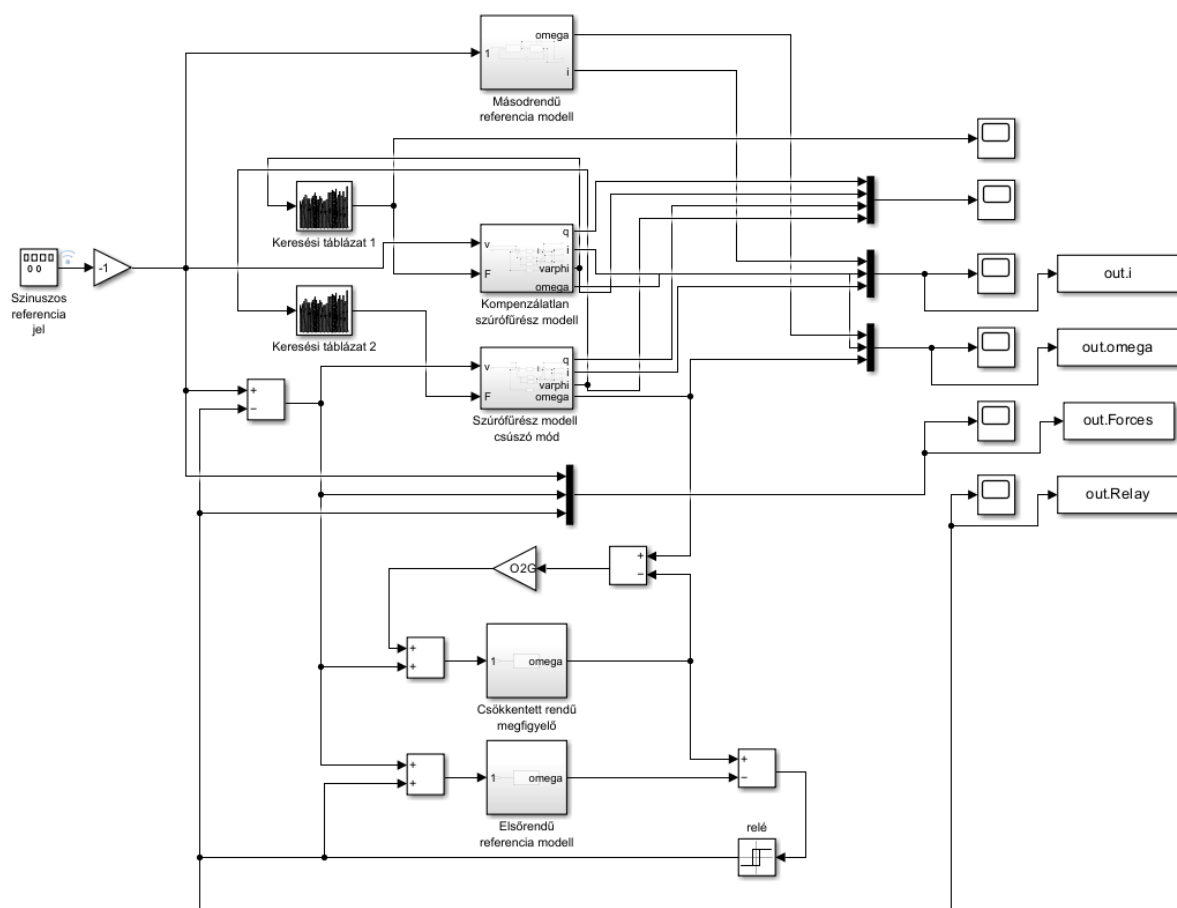
A csökkentett rendű állapotfigyelő célja, hogy a szimuláció során csak a legfontosabb, meghatározó állapotváltozókra összpontosítson, miközben elhanyagolja azokat a dinamikai komponenseket, amelyek csak minimális hatással vannak a rendszer működésére. Ez az egyszerűsítés gyorsabb és hatékonyabb számításokat tesz lehetővé, miközben biztosítja, hogy a rendszer lényeges dinamikai jellemzői pontosan modellezve legyenek.

A kétrétegű megfigyelési stratégia előnye, hogy a rendszer dinamikáját különböző szinteken követi. Az első réteg az alapvető állapotváltozókat figyeli, például a motor szögsebességét és az áramfelvételt, amelyek közvetlenül befolyásolják a rendszer szabályozását. A második réteg finomabb részletekre, például az alulmodellezett dinamika hatásaira és a nemlineáris komponensek becslésére összpontosít. Ez a kettős megközelítés biztosítja, hogy a rendszer minden lényeges szempontját figyelembe vegyünk, miközben megőrizzük a szimuláció egyszerűségét és hatékonyságát.

Ez a felépítés különösen fontos a csúszómód-szabályozásban, amely megköveteli a pontos állapotvisszacsatolást. Az állapotfigyelő által nyújtott információk biztosítják, hogy a vezérlőrendszer időben reagáljon a változásokra, ezáltal növelve a rendszer stabilitását, csökkentve az instabilitás kockázatát, és javítva a szimulációs modell megbízhatóságát.

A csökkentett rendű állapotfigyelő integrálása a szimulációs modellbe lehetővé teszi, hogy a szabályozás folyamatosan alkalmazkodjon a rendszer aktuális állapotaihoz. Ez a megközelítés különösen hatékony az olyan rendszerek esetében, mint a kézi szűrőfűrészes modellje, ahol a dinamikai változások gyorsak és az állapotváltozók folyamatos nyomon követése kritikus fontosságú.

A csökkentett rendű állapotfigyelő az elsőrendű referencia modellel szorosan együttműködve működik, hogy pontosabb becslést nyújtson a rendszer aktuális állapotairól. Ez



6.9. ábra. Rendszerblokkvázlat csökkentett rendű állapotfigyelővel.

különösen fontos olyan esetekben, amikor a rendszer dinamikájában jelentkező bizonyos összetevőket a modell nem képes teljes mértékben leképezni, azaz alulmodellezett dinamika lép fel. Az alulmodellezett dinamika olyan nemlineáris vagy magasabb frekvenciájú hatásokat foglal magában, amelyek figyelmen kívül hagyása jelentős eltérésekhez vezethet a szimuláció során. A csökkentett rendű állapotfigyelő célja, hogy minimalizálja a megfigyelt és a valós rendszer viselkedése közötti eltéréseket. Ez különösen a csúszómód-szabályozásban bír nagy jelentőséggel, ahol a magas frekvenciájú kapcsolási folyamat oszcillációkat eredményezhet, amelyek a rendszer stabilitását veszélyeztethetik. Az állapotfigyelő által nyújtott pontosabb becslések lehetővé teszik, hogy a szabályozás jobban alkalmazkodjon a dinamikai változásokhoz, ezáltal csökkentve az oszcillációkat és stabilabb működést biztosítva.

Az elsőrendű referencia modell és a csökkentett rendű állapotfigyelő integrált működése lehetővé teszi, hogy a rendszer pontosabban kövesse a megadott referenciaértékeket. Az állapotfigyelő a rendszer állapotváltozóinak becslése során figyelembe veszi azokat a dinamikai komponenseket, amelyeket a referencia modell önmagában nem tud kezelni. Ezáltal mérsékli az alulmodellezett dinamika negatív hatásait, például a becslések és a tényleges állapotok közötti eltéréseket.

Az így kialakított rendszer eredményeként a csúszómód-szabályozás nemcsak stabilabbá válik, hanem a működése is simább lesz, minimalizálva a gyors változásokat és oszcillációkat. Ez különösen fontos a gyakorlati alkalmazásokban, ahol a rendszer stabilitása és a zökkenőmentes működés alapvető követelmény. A csökkentett rendű állapotfigyelő tehát

nemcsak a szabályozási pontosságot növeli, hanem a rendszer általános megbízhatóságát és energiahatékonyságát is javítja.

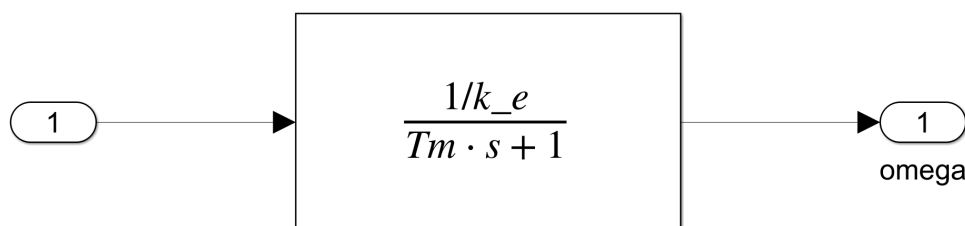
Az eliminációs hibaidőállandó (2.3) egyenlet alapján számítható ki:

$$\dot{\omega} - \dot{\hat{\omega}} = \left(-\frac{1}{T_m} - O_{2G}\right)(\omega - \hat{\omega}). \quad (6.28)$$

A hiba eliminációs időállandója:

$$T_{err} = -\frac{1}{-\frac{1}{T_m} - O_{2G}} = 0.03s. \quad (6.29)$$

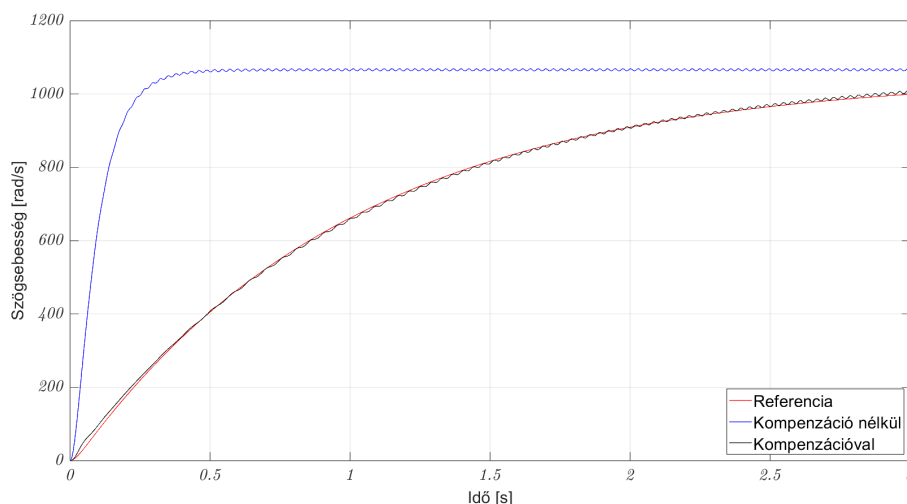
A 6.10. ábra a csökkentett rendű állapotfigyelő tartalmát mutatja.



6.10. ábra. Csökkentett rendű állapotfigyelő.

Ez az állapotfigyelő közvetlenül becsli a motor szögsebességét további időállandó-módosítások nélkül, így alapot nyújt a becslésekhez. Az elsőrendű referencia modellel együtt ez a konfiguráció kettős rétegű állapotbecslést tesz lehetővé, amely kompenzálja a dinamikai változásokat, növeli a stabilitást és javítja a szabályozás megbízhatóságát.

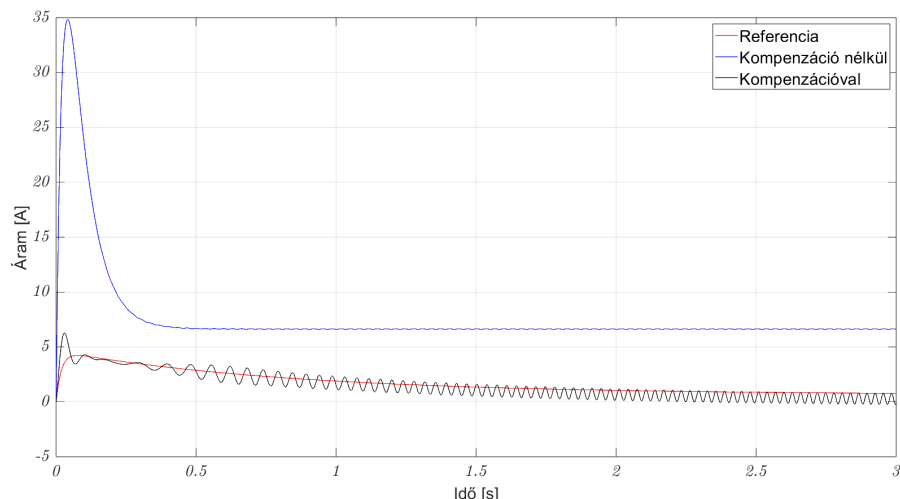
A 6.11. ábra a szögsebesség-idő diagramon három különböző szabályozási stratégiát szemléltet. A harmadik stratégia, amelyben csökkentett rendű állapotfigyelő lett alkalmazva, stabil és hatékony rendszerműködést eredményez.



6.11. ábra. Szögsebesség-idő diagram csökkentett rendű állapotfigyelővel

Az eredmények egyértelműen mutatják, hogy a csökkentett rendű állapotfigyelő hozzáadása javítja a rendszer szögsebesség-válaszát, közelebb hozva azt a referenciaértékhez.

Ez a konfiguráció növeli a dinamikai stabilitást, lehetővé téve, hogy a szögsebesség gyorsabban érje el a kívánt értéket, miközben csökkenti az oszcilláció amplitúdóját. Ezáltal hozzájárul az energiahatékonysághoz, és csökkenti a csúszómód-szabályozás gyakori remegési effektust.



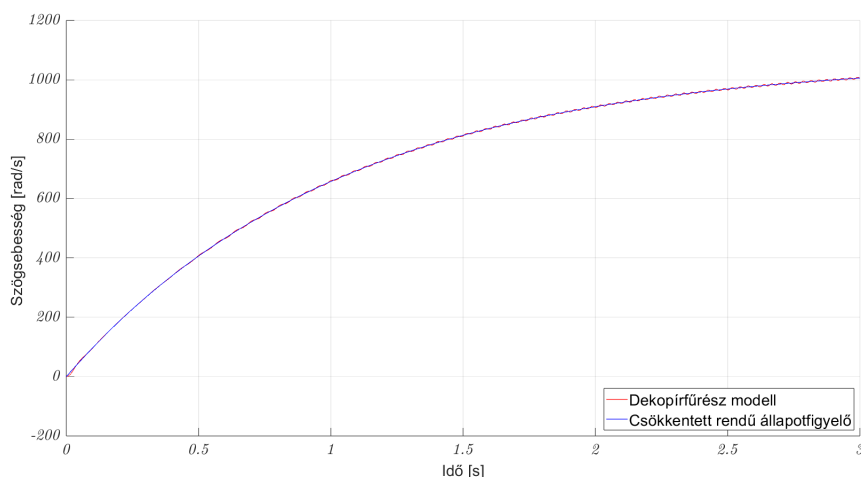
6.12. ábra. Áram-idő diagram csökkentett rendű állapotfigyelővel.

A 6.12. ábrán látható áram-idő diagram jól szemlélteti a csökkentett rendű állapotfigyelő hatását a rendszer áramstabilitására. Az ábrán megfigyelhető, hogy a kompenzálatlan rendszer kezdeti szakaszában jelentős ingadozások tapasztalhatók az áramválaszban. Ezek az ingadozások több szempontból is hátrányosan befolyásolják a rendszer működését. Egyrészt csökkentik a szabályozás pontosságát, mivel a rendszer nem képes pontosan követni a kívánt referenciaértékeket. Másrészt az ilyen ingadozások numerikus instabilitást eredményezhetnek, amely a szimulációs folyamat „elszállását” okozhatja. A kompenzálatlan rendszer ingadozásai nemcsak a szimulációt érintik, hanem a valós alkalmazások során is jelentős problémákat okozhatnak. Az ilyen ingadozások növelik a motor és a hajtáslánc komponenseire ható mechanikai és elektromos terhelést, ami hosszabb távon károsíthatja ezeket az elemeket. Ez a túlzott terhelés csökkentheti a rendszer megbízhatóságát, növeli a karbantartási igényt, és rövidítheti a rendszer élettartamát.

A csökkentett rendű állapotfigyelő integrálása jelentős előnyöket nyújt a rendszer működésében. Az állapotfigyelő alapvető szerepe, hogy stabilizálja az áramválaszt azáltal, hogy csökkenti az ingadozásokat és egyenletesebb, simább áramgörbét biztosít. Ez a stabilizáció lehetővé teszi, hogy a rendszer pontosabban kövesse a referenciaáramot, minimalizálva az eltéréseket és javítva a szabályozás pontosságát. A simább áramválasz nemcsak a szabályozási hibákat csökkenti, hanem mérsékli az oszcillációkra való hajlamot is, amely kulcsfontosságú a stabil működés szempontjából.

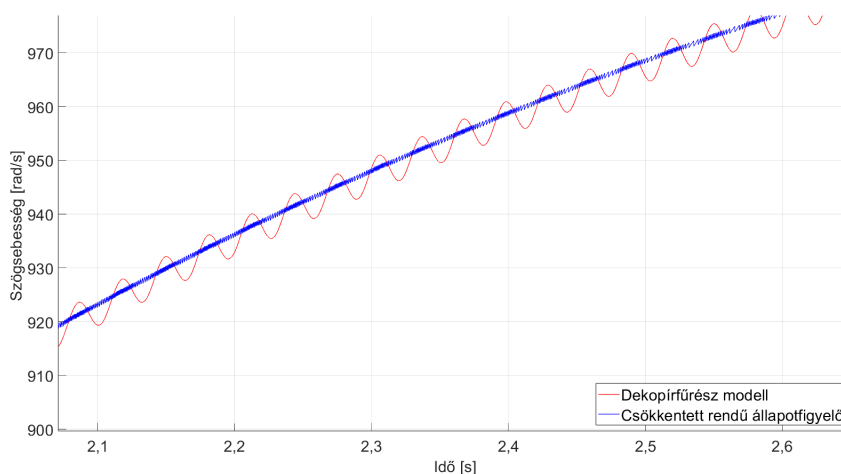
A 6.13 ábra a kézi szűrőfűrész modelljének (piros vonal) és a csökkentett rendű állapotfigyelő által becsült szögsebesség-idő függvényeket (kék vonal) szemlélteti.

Az ábrán látható, hogy a csökkentett rendű állapotfigyelő által generált görbe viszonylag sima és folyamatos, míg a kézi szűrőfűrész modell szögsebesség-görbéje jelentős oszcillációkat mutat, amelyek az állapotfigyelő görbéje körül helyezkednek el. Ez az oszcillációs viselkedés a kézi szűrőfűrész kulisszacúszka-mechanizmusából ered, amely nemlineáris dinamikát generál a rendszerben.



6.13. ábra. A kimeneti jelek különbségei.

A rendszer viselkedésének további részleteit a 6.14 ábra szemlélteti, amely a 6.13 ábrán bemutatott jelek nagyított részletét mutatja.



6.14. ábra. A kimeneti jelek különbségei - nagyított részlet.

A nagyított ábrán jól látható, hogy a csökkentett rendű állapotfigyelő képes hatékonyan kiszűrni a kézi szűrőfűrész modelljének oszcillációs komponenseit. Ennek eredményeként az állapotfigyelő által becsült görbe mentes a magas frekvenciájú ingadozásoktól, amelyek a nemlineáris mechanikai hatásokból származnak. Ez a jelenség azért fontos, mert a csúszómód-szabályozás rendszerint magas frekvenciájú dinamikát generálhat, különösen alulmodellezett rendszerek esetében, ahol a nemlineáris összetevők dominálnak.

A csökkentett rendű állapotfigyelő egyik fő előnye, hogy hatékonyan csökkenti a magas frekvenciájú oszcillációkat, amelyek a nemlineáris dinamikából vagy alulmodellezett rendszerkomponensekből eredhetnek. Ezáltal javul a szabályozás pontossága és a rendszer stabilitása.

7. Összefoglalás

A disszertáció célkitűzése az volt, hogy átfogó képet adjon az akkumulátoros kézi szűrőfűrészek működéséről, különös tekintettel a vágási folyamat során fellépő dinamikai jelenségek pontos modellezésére, mérésére és szabályozására. Ennek megvalósításához először egy részletes elektromechanikai modell került kidolgozásra, amely egyesíti a villamos és mechanikai alrendszerek viselkedésének leírását. A modell alapját a Lagrange-egyenlet jelentette, amely a rendszer energiaviszonyainak figyelembevételével tette lehetővé a nemlineáris viselkedés matematikai megfogalmazását. A kapott egyenletek a motor tengelyének szög helyzetére és az elektromos áram változására vonatkoznak, és lehetőséget adnak a szűrőfűrész működésének részletes előrejelzésére különböző vágási körülmények között.

A modell pontosságának validálásához egy egyedileg kifejlesztett mérőrendszer került alkalmazásra, amely lehetővé tette a vágóerő valós idejű, nem invazív mérését. Ennek során az eszköz szerkezetének módosítása nélkül sikerült hiteles méréseket végezni, ami ipari szempontból is jelentős előnyt jelent. A rendszer kulcseleme egy erőmérő cella volt, amit gördülőcsapágyas vezetéssel és induktív érzékelőkkel egészítettek ki. A mérési adatok feldolgozása LabVIEW környezetben történt, 1 kHz-es mintavételezéssel, amely kellően magas időbeli felbontást biztosított a vágás során fellépő erőingadozások pontos nyomon követéséhez.

A különböző anyagokon végzett vizsgálatok alapján egyértelművé vált, hogy az anyag-szerkezet homogenitása jelentős hatással van a vágóerő stabilitására. A metamid anyag viszonylag kiszámítható és sima vágási karakterisztikát mutattak, addig a faanyagok - különösen a tölgy és az akác - jelentős ingadozásokat okoztak a vágóerő-idő görbékben. Ezek az eredmények megerősítették a nemlineáris dinamika jelenlétét, és alátámasztották a szabályozási stratégia finomhangolásának szükségességét. A mérések kiegészültek a forgácsolási keresztmetszet számításával, amely az előtolási sebesség, a fűrészlap szélessége és a kulisszás tengely fordulatszáma alapján történt. A fordulatszám meghatározásához Fourier-analízist használtam, így az eredmények nemcsak részletes, hanem frekvenciatartományban is értelmezhető információt nyújtottak.

Az így kapott adatok alapján egy optimalizált, lineáris vágóerőmodellt dolgoztam ki, amely a valóságos vágóerő-idő karakterisztikát közelítette, miközben jelentősen csökkentette a szimuláció számítási igényét. A modellbe integrált csillapítási tényezőt egy szimulált hűtéses algoritmussal optimalizáltam, amely a szimulált és a mért áram-idő görbék közötti eltérések négyzetes hibáját minimalizálta. Az így kapott modell csupán 3,7%-os eltéréssel közelítette a valós rendszert, így nemcsak kutatási célokra bizonyult hasznosnak, hanem ipari környezetben is megbízható előrejelzéseket tesz lehetővé, különösen az akkumulátor üzemidő szimulációja során.

A disszertáció második nagy fókuszterülete a nemlineáris csúszómód-szabályozás alkalmazása, amely különösen jól használható olyan dinamikus rendszerekben, mint az akku-

mulátoros kézi szűrőfűrés. A módszer egyik legnagyobb előnye a robusztusság, amely lehetővé teszi, hogy a vezérlés ellenálljon a külső zavarásoknak és a paraméterváltozásoknak. Az SMC alkalmazása során a szabályozó egyenlet egy szakaszos relé logikára épült, amely gyors átmeneti választ és stabil működést biztosított. A Simulink környezetben megvalósított modell négy különböző szimulációs konfigurációt alkalmazott, köztük egy kompenzálatlan nemlineáris modellt, valamint egy elsőrendű referenciamodellt és egy csökkentett rendű állapotfigyelőt is tartalmazó változatot. Az eredmények egyértelműen rámutattak arra, hogy a csúszómód-kompenzáció jelentősen csökkenti az indítási áramcsúcsokat, ami hosszabb motorélettartamot és jobb energiahatékonyságot eredményez. A csökkentett rendű állapotfigyelő bevezetése tovább növelte a rendszer stabilitását, mivel lehetővé tette a kritikus dinamikai állapotok pontosabb becslését anélkül, hogy a nem releváns vagy nagyfrekvenciás hatások instabilitást okoztak volna. Az állapotfigyelő és a referencia modell együttműködése biztosította, hogy a rendszer a kívánt referenciaértékeket követni tudja, miközben csökken a becslések és a valós állapotok közötti eltérés. Ez a konfiguráció a szögsebesség és az áram stabilitását is javította, így nemcsak a numerikus szimuláció vált stabilabbá, hanem a valós rendszerben fellépő mechanikai és elektromos igénybevétel is mérséklődött.

A kutatásom során alkalmazott kettős megfigyelési stratégia - az elsőrendű referencia modell és a csökkentett rendű állapotfigyelő kombinációja - kulcsfontosságúnak bizonyult a chattering hatás csökkentésében, amely különösen káros lehet a mechanikai alkatrészekre nézve. A stabilizált áramgörbék és szögsebesség-idő profilok alapján igazolható, hogy a megfigyelők megfelelően szűrik ki az alulmodellezett dinamika hatásait, és hozzájárulnak a szabályozási hiba mérsékléséhez. Ennek eredményeként a rendszer működése nemcsak stabilabbá, hanem kiszámíthatóbbá is vált, ami elengedhetetlen követelmény ipari alkalmazások esetén.

Összegzésképpen megállapítható, hogy a disszertációban bemutatott modellezési és szabályozási módszerek hozzájárulnak az akkumulátoros kézi szűrőfűrészek fejlettebb vizsgálatához és fejlesztéséhez. Az elektromechanikai modell precízen követi a valós rendszer viselkedését, a mérőrendszer lehetővé teszi a vágási folyamat valós idejű és pontos mérését, míg a csúszómód-szabályozás és a hozzá kapcsolt megfigyelési struktúrák révén a rendszer energiahatékonyabbá és stabilabbá válik. Mindezek alapján kijelenthető, hogy az itt ismertetett megközelítés nemcsak a kézi szűrőfűrészek, hanem más ciklikusan terhelt rendszerek esetében is eredményesen alkalmazható, így a jövőben alapot adhat intelligens vezérlési rendszerek és fejlett szabályozási stratégiák továbbfejlesztéséhez is.

8. Summary

The objective of this dissertation was to provide a comprehensive overview of the operation of battery-powered handheld jigsaws, with a particular focus on the accurate modeling, measurement, and control of dynamic phenomena arising during the cutting process. To achieve this goal, a detailed electromechanical model was developed, integrating the behaviors of both the electrical and mechanical subsystems. The foundation of the model was based on the Lagrangian formalism, which enabled the mathematical formulation of nonlinear behavior by considering the system's energy relations. The resulting equations describe the angular position of the motor shaft and the variation of electric current, allowing for a detailed prediction of the jigsaw's behavior under different cutting conditions. To validate the accuracy of the model, a custom-developed measurement system was applied, enabling real-time, non-invasive measurement of the cutting force. These measurements were performed without modifying the structure of the tool, which represents a significant advantage from an industrial perspective. The core component of the system was a load cell, supported by roller bearings and complemented by inductive sensors. The measurement data were processed in a LabVIEW environment at a sampling rate of 1 kHz, which provided sufficient temporal resolution for accurately tracking the force fluctuations during the cutting process.

Based on experiments conducted with various materials, it became clear that the homogeneity of the material structure significantly influences the stability of the cutting force. While aluminum and Metamid materials showed relatively predictable and smooth cutting characteristics, wood materials - especially oak and acacia - caused considerable fluctuations in the cutting force over time. These results confirmed the presence of nonlinear dynamics and supported the necessity of refining the control strategy. The measurements were complemented by calculations of the chip cross-section, determined based on the feed rate, blade width, and crankshaft angular velocity. The angular velocity was identified using Fourier analysis, thereby providing detailed and frequency-domain interpretable information.

Based on the acquired data, an optimized linear cutting force model was developed, which approximated the real cutting force-time characteristics while significantly reducing the computational demand of the simulation. The damping coefficient integrated into the model was optimized using a simulated annealing algorithm, minimizing the squared error between the simulated and measured current-time curves. The resulting model approximated the real system with a 3.7% deviation, proving useful not only for research purposes but also for providing reliable predictions in industrial environments, especially in the context of battery runtime simulations.

The second major focus area of the dissertation was the application of nonlinear sliding mode control (SMC), which is particularly well-suited for dynamic systems such as battery-powered handheld jigsaws. One of the key advantages of this method is its

robustness, enabling the control system to withstand external disturbances and parameter variations. In the SMC approach, the control equation was based on a discontinuous relay logic, providing fast transient response and stable operation. The Simulink-based model implemented four different simulation configurations, including an uncompensated nonlinear model, a first-order reference model, and a version incorporating a reduced-order state observer. The results clearly demonstrated that sliding mode compensation significantly reduces startup current peaks, contributing to increased motor lifespan and improved energy efficiency.

The introduction of a reduced-order state observer further enhanced the system's stability by enabling more accurate estimation of critical dynamic states, without being affected by irrelevant or high-frequency effects that might otherwise cause instability. The cooperation of the observer and the reference model ensured that the system could accurately follow the desired reference values while reducing the discrepancy between estimated and actual system states. This configuration improved the stability of both the angular velocity and current, resulting not only in more robust numerical simulations but also in lower mechanical and electrical stress on the actual physical system.

The dual-observer strategy employed in this research - combining a first-order reference model with a reduced-order state observer - proved essential in mitigating the chattering effect, which can be particularly harmful to mechanical components. Based on the stabilized current waveforms and angular velocity-time profiles, it can be concluded that the observers effectively filtered out the effects of under-modeled dynamics and contributed to reducing the control error. As a result, the system operation became not only more stable but also more predictable, which is a critical requirement for industrial applications.

In conclusion, the modeling and control methods presented in this dissertation contribute to the advanced investigation and development of battery-powered handheld jigsaws. The electromechanical model accurately reflects the behavior of the real system, the measurement system enables real-time and precise monitoring of the cutting process, and the sliding mode control strategy, supported by a robust observer structure, enhances the system's energy efficiency and stability. Based on these findings, it can be stated that the presented approach is not only applicable to handheld jigsaws but can also be effectively extended to other systems characterized by cyclic loading, thus laying the groundwork for the future development of intelligent control systems and advanced control strategies.

9. Új tudományos eredmények

- T1. Egy új mérőrendszert terveztem, valamint Fourier-transzformációs elemzést alkalmazó mérési módszert dolgoztam ki a kézi szűrőfűrész vágóerejének valós idejű meghatározására, mely képes feltárni a kulisszás mechanizmus szögsebessége és az előtolási sebesség vágóerőre gyakorolt hatását [S4].
- T2. A kifejlesztett mérőrendszerrel végzett mérések alapján megállapítottam, hogy a fajlagos forgácsolóerő a szűrőfűrész tényleges fordulatszámaival arányosan növekszik. Tölgyfa esetén a vágás szempontjából kedvező működési tartomány azonosítható a $n = 20\text{--}25\text{ s}^{-1}$ fordulatszám és a $v_f = 5\text{--}6\text{ mm s}^{-1}$ előtolási sebesség között, ahol a fajlagos vágóerő értéke 4000 N mm^{-2} és 5200 N mm^{-2} közé esik. Az eredmények megalapozzák a fordulatszám terhelésfüggő szabályozásának és az adaptív vezérlés alkalmazásának lehetőségét [S4].
- T3. A szűrőfűrész vágási folyamatát egy mért vágóerőn alapuló nemlineáris, valamint egy optimalizált csillapítási tényezővel rendelkező lineáris modellel írtam le. A modellek érvényességét egy 50 másodperces, a teljes szimulációs idő több mint 5%-át lefedő mérési szakaszon végzett validációval vizsgáltam. A motoráram alapján számított referencia üzemidő 846 s volt, míg a nemlineáris modell 873,8 s, a lineáris modell pedig 926,96 s eredményt adott. A valós vágóerőt használó nemlineáris modell 3,3 %-os, míg a lineáris modell 9,6 %-os relatív hibát eredményezett, ami azt mutatja, hogy az egyszerűsített modell is megfelelő pontossággal képes előre jelezni az akkumulátor várható üzemidejét [S5].
- T4. Nemlineáris állapotter egyenlettel leírható és a vágási erő miatt sztochasztikus zavarójellel terhelt szűrőfűrészhez egy nem folytonos visszacsatolású, csúszómód alapú, csökkentett rendű, modell referenciás robusztus szabályozót terveztem. Bizonyítottam a rendszer stabilitását és a jobb oldalon nem folytonos differenciálegyenletek elméletét segítségül hívva megoldottam a rendszernek a csökkentett fokszámú differenciálegyenletét ideális esetet feltételezve [S6].
- T5. A T4 tézisben bemutatott szabályozó egy valóságos környezetben a nemmodellezett dinamika miatt olyan lengéseket produkál, ami az eszköz károsodását okozza. Az ilyen lengések kialakulásának elkerülésére a csökkentett rendű modellhez egy csökkentett rendű megfigyelőt terveztem, amely a számítógép memóriájában fut, így ott az ideális csúszómód megvalósul, amit lengések nélkül tudunk numerikusan közelíteni [S6].

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném kifejezni hálámat és köszönetemet mindazoknak, akik támogatták munkámat és hozzájárultak kutatásom sikeréhez.

Elsősorban szeretném megemlíteni Dr. Szilágyi Attila Tanár Urat, aki első témavezetőként bevezetett a kutatási témámba, és alapvető útmutatásaival segített elindulni ezen az úton. Sajnos az élet tragikus fordulata miatt együttműködésünk mindössze egy félévig tartott, de a tőle kapott inspiráció és iránymutatás máig meghatározó része munkámnak. Külön köszönetemet fejezem ki Dr. Hegedűs Györgynek, aki Dr. Szilágyi Attila Tanár Úr halála után vette át témavezetésemet. Az ő szakmai támogatása, valamint az a képessége, hogy még jobban rávezetett a kutatásom lényegi kérdéseire, nélkülözhetetlen volt doktori tanulmányaim során.

Hálával tartozom Dr. Hajdu Sándor társtémavezetőmnek is, aki bevezetett a dinamika azon területeibe, amelyek jelentős mértékben hozzájárultak ahhoz, hogy kutatásom során eredményeket érhessek el. Szakmai tudása és útmutatása jelentősen gazdagította a munkámat.

Köszönetemet fejezem ki továbbá Dr. Korondi Péter Professzor Úrnak, aki a kutatásomat teljes mértékben támogatta, és egy új elektronikai terület bevezetésével tette lehetővé, hogy a munkám során új tudományos eredmények születhessenek. Az általa biztosított szakmai támogatás és inspiráció meghatározó volt a kutatásom szempontjából.

Nem utolsósorban hálás vagyok Dr. Szabó Tamás Tanár Úrnak, aki hihetetlen odaadással és türelemmel kísérte végig kutatásomat. Ő volt az, aki bármely napszakban - legyen az reggel, napközben vagy akár este kilenc órákor - rendelkezésemre állt, hogy segítsen a kísérleteimben, a problémák megértésében, valamint disszertációm megírásában. Az ő támogatása nélkül a munka nem valósulhatott volna meg ilyen formában.

Szeretném kifejezni köszönetemet édesapámnak és keresztapámnak is, akik szakértelmükkel és gyakorlati tanácsaikkal segítették a mérések gyakorlati megvalósítását. Hálával tartozom édesanyámnak, aki türelmével és gondoskodásával vigyázott kisfiamra, hogy én zavartalanul végezhessem a tudományos munkát.

Végezetül, de nem utolsósorban, szeretnék köszönetet mondani kisfiamnak, Zalánnak, aki türelmével és megértésével hozzájárult ahhoz, hogy ezt a munkát elvégezhessem, még akkor is, amikor nem tudtam annyi időt tölteni vele, mint amennyit szerettem volna.

Hálás vagyok mindazoknak, akik bármilyen formában segítették és támogatták tudományos munkám elkészültét. Az ő támogatásuk és biztatásuk nélkül ez az eredmény nem valósulhatott volna meg.

Irodalomjegyzék

- [1] M. Rizal, J. A. Ghani, . Husni, . Husaini, Design and construction of a strain gauge-based dynamometer for a 3-axis cutting force measurement in turning process, *Journal of Mechanical Engineering and Sciences* 12 (4) (2018) 4072–4087. doi:10.15282/jmes.12.4.2018.07.0353.
- [2] S. Apáti, G. Hegedűs, Investigation and simulation of a scotch yoke mechanism, *Multidiszciplináris Tudományok* 11 (5) (2021) 144–152. doi:doi.org/10.35925/j.multi.2023.2.13.
- [3] L. Kazup, A. Varadine Szarka, Cutting force measurement of electrical jigsaw by strain gauges, *Journal of Physics: Conference Series* 772 (2016) 012030. doi:10.1088/1742-6596/772/1/012030.
- [4] P. Moradpour, K. Doosthoseini, F. Scholz, A. Tarmian, Cutting forces in bandsaw processing of oak and beech wood as affected by wood moisture content and cutting directions, *European Journal of Wood and Wood Products* 71 (6) (2013) 747–754. doi:10.1007/s00107-013-0734-z.
- [5] T. J. Ko, H. S. Kim, Mechanistic cutting force model in band sawing, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 39 (8) (1999) 1185–1197. doi:10.1016/s0890-6955(98)00087-x.
- [6] J. Ni, L. Li, M. S. H. Al-Furjan, J. Xu, X. Yang, Establishment and verification of a dynamic cutting force model for metal bandsawing, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 90 (2016) 2703–2712. doi:10.1007/s00170-016-9568-2.
- [7] K. A. Orlowski, B. Palubicki, Recent progress in research on the cutting processes of wood. a review cost action e35 2004–2008: Wood machining – micromechanics and fracture, *hfsg* 63 (2) (2008) 181–185. doi:10.1515/hf.2009.015.
- [8] K. A. Orlowski, T. Ochrymiuk, A. Atkins, D. Chuchala, Application of fracture mechanics for energetic effects predictions while wood sawing, *Wood Science and Technology* 47 (5) (2013) 949–963. doi:10.1007/s00226-013-0551-x.
- [9] V. Nasir, J. Cool, A review on wood machining: characterization, optimization, and monitoring of the sawing process, *Wood Material Science and Engineering* 15 (1) (2020) 1–16. doi:10.1080/17480272.2018.1465465.
- [10] L. Hlásková, Z. Kopecký, A. Solař, Z. Patočka, Cutting test as source of fracture toughness and shear yield strength for axial-perpendicular model of wood cutting, *Wood and Fiber Science* 51 (1) (2019) 58–68. doi:10.22382/wfs-2019-006.

- [11] K. Orłowski, T. Ochrymiuk, L. Hlaskova, D. Chuchala, Z. Kopecky, Revisiting the estimation of cutting power with different energetic methods while sawing soft and hard woods on the circular sawing machine: a central european case, *Wood Science and Technology* 54 (2) (2020) 457–477. doi:10.1007/S00226-020-01162-9.
- [12] K. Orłowski, T. Ochrymiuk, The original method of cutting power forecasting while wood sawing, *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. Forestry and Wood Technology* 75 (2011).
- [13] X. Xu, Research on cutting force based on thermal-mechanical coupling precision modeling, *Scientific Journal of Technology* 4 (5) (2022) 25–31. doi:10.54691/sjt.v4i5.754.
- [14] R. Marchal, F. Mothe, L.-E. Denaud, B. Thibaut, L. Bleron, Cutting forces in wood machining – basics and applications in industrial processes. a review cost action e35 2004–2008: Wood machining – micromechanics and fracture, *Holzforschung* 63 (2) (2009) 157–167. doi:10.1515/HF.2009.014.
- [15] T. Krenke, S. Frybort, U. Müller, Cutting force analysis of a linear cutting process of spruce., *Wood Material Science and Engineering* 13 (5) (2018) 279–285. doi:10.1080/17480272.2017.1324916.
- [16] A. Naylor, P. Hackney, A review of wood machining literature with a special focus on sawing, *Bioresources* 8 (2) (2013) 3122–3135. doi:10.15376/BIORES.8.2.3122-3135.
- [17] M. Khelifa, A. Khennane, Numerical analysis of the cutting forces in timber, *Journal of Engineering Mechanics-asce* 140 (3) (2014) 523–530. doi:10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000671.
- [18] Y. Luo, Y. Ren, Y. Ren, Z. Zhou, X. Huang, T. Song, Prediction of single-tooth sawing force based on tooth profile parameters, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 86 (1) (2016) 641–650. doi:10.1007/S00170-015-8201-0.
- [19] K. Kiran, M. C. Kayacan, Cutting force modeling and accurate measurement in milling of flexible workpieces, *Mechanical Systems and Signal Processing* 133 (2019) 106284–. doi:10.1016/J.YMSSP.2019.106284.
- [20] S. Yuan, Q. Li, X. Gao, W. An, L. Wang, Unveiling the cutting force of multiphase fibers and particle reinforced polymer matrix composites based on multiphase microstructure: An experimental and theoretical study, *Composites Part A-applied Science and Manufacturing* (2024). doi:10.1016/j.compositesa.2024.108199.
- [21] K. Orłowski, T. Ochrymiuk, A. G. Atkins, Specific cutting resistance while sawing of wood - the size effect., *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. Forestry and Wood Technology* 72 (72) (2010) 103–107.
- [22] K. Orłowski, T. Ochrymiuk, M. Lackowski, Empirical verification in industrial conditions of fracture mechanics models of cutting power prediction, *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. Forestry and Wood Technology* (85) (2014) 162–167.

- [23] Z. Han, H. Jin, H. Fu, Cutting force prediction models of metal machining processes: A review, 2015, pp. 323–328. doi:10.1109/ICEDIF.2015.7280216.
- [24] Z. Lai, H. Huang, Z. Hu, X. J. Liao, Dynamic model and machining mechanism of wire sawing, *Journal of Materials Processing Technology* 311 (2022) 117820–117820. doi:10.1016/j.jmatprotec.2022.117820.
- [25] K. Orłowski, T. Ochrymiuk, The prediction method of the shear angle in the cutting zone during wood sawing, *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. Forestry and Wood Technology* 72 (72) (2010) 99–102.
- [26] A. Aguilera, P. Martin, Machining qualification of solid wood of *fagus sylvatica* l. and *picea excelsa* l.: Cutting forces, power requirements and surface roughness, *European Journal of Wood and Wood Products* (2001). doi:10.1007/s001070100243.
- [27] H. Al-musawi, P. Matz, M. Jakob, P. Halbauer, T. Krenke, U. Müller, Stress-strain behaviour of wood in compression: Experimental and analytical investigations, *Results in Engineering* 24 (2024) 103616. doi:10.1016/j.rineng.2024.103616.
- [28] B. O. M. Axelsson, A. S. Lundberg, J. A. Grönlund, Studies of the main cutting force at and near a cutting edge, *Holz als Roh- und Werkstoff* 51 (1) (1993) 43–48. doi:10.1007/bf02615376.
- [29] J. Krilek, J. Melichercik, T. Kuvik, J. Kováč, A. Gendek, M. Aniszewska, J. Mareček, Analysis of cutting forces in cross-sawing of wood: A study of sintered carbide and high-speed steel blades, *Forests* (2023). doi:10.3390/f14071395.
- [30] P. McDonald, Investigation of cutting force and surface quality in frozen wood sawing under varying influencing factors to improve the energy- and resource efficiency of sawing processes, Springer eBooks, 2023, pp. 166–174. doi:10.1007/978-3-031-28839-5_19.
- [31] L. Hlásková, Z. Kopecký, V. Novák, Influence of wood modification on cutting force, specific cutting resistance and fracture parameters during the sawing process using circular sawing machine, *European Journal of Wood and Wood Products* 78 (6) (2020) 1173–1182. doi:10.1007/S00107-020-01581-2.
- [32] A. Naylor, P. Hackney, N. Perera, E. Clahr, A predictive model for the cutting force in wood machining developed using mechanical properties, *Bioresources* 7 (3) (2012) 2883–2894. doi:10.15376/BIORES.7.3.2883-2894.
- [33] V. Nasir, J. Cool, Cutting power and surface quality in sawing kiln-dried, green, and frozen hem-fir wood, *Wood Science and Technology* 55 (2) (2021) 505–519. doi:10.1007/S00226-020-01259-1.
- [34] R. Curti, B. Marcon, L. Denaud, M. Togni, R. Furferi, G. Goli, Generalized cutting force model for peripheral milling of wood, based on the effect of density, uncut chip cross section, grain orientation and tool helix angle, *European Journal of Wood and Wood Products* 79 (3) (2021) 667–678. doi:10.1007/S00107-021-01667-5.

- [35] B. Porankiewicz, G. Goli, Cutting forces by oak and douglas fir machining, *Maderas-ciencia Y Tecnologia* 16 (2) (2014) 199–216. doi:10.4067/S0718-221X2014005000016.
- [36] L. Cristovao, O. Broman, A. Grönlund, M. Ekevad, R. Siteo, Main cutting force models for two species of tropical wood, *Wood Material Science and Engineering* 7 (3) (2012) 143–149. doi:10.1080/17480272.2012.662996.
- [37] P. Pichler, M. Leitner, F. Grün, C. Guster, Evaluation of wood material models for the numerical assessment of cutting forces in chipping processes, *Wood Science and Technology* 52 (1) (2018) 281–294. doi:10.1007/S00226-017-0962-1.
- [38] B. Porankiewicz, B. Axelsson, A. Grönlund, B. Marklund, Main and normal cutting forces by machining wood of *pinus sylvestris*, *Bioresources* 6 (4) (2011) 3687–3713. doi:10.15376/BIORES.6.4.3687-3713.
- [39] Z. Jie, Influence of cutting parameters on cutting forces in wood sawing, *China Wood Industry* (2011).
- [40] N. Nagesh, Evaluation of material properties of spruce wood samples to improve the development process for more sustainable sawing processes, Springer eBooks, 2023, pp. 249–257. doi:10.1007/978-3-031-28839-5_28.
- [41] J. Fu, G. Liu, B. Chen, Y. Jia, J. Wu, Overview of the development of wear in bi-metal band saw blades, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 128 (11–12) (2023) 4735–4748. doi:10.1007/s00170-023-12039-z.
- [42] R. E. Hernández, A. M. Llavé, A. Koubaa, Effects of cutting parameters on cutting forces and surface quality of black spruce cants, *European Journal of Wood and Wood Products* 72 (1) (2013) 107–116. doi:10.1007/s00107-013-0762-8.
- [43] A. J. Caughley, M. King, Modelling the collapse of wood cells during the cutting process, *European Journal of Wood and Wood Products* 61 (6) (2003) 403–408. doi:10.1007/S00107-003-0417-2.
- [44] J. Sandak, K. Orłowski, T. Ochrymiuk, A. Sandak, M. Riggio, An alternative way of determining mechanical properties of wood by measuring cutting forces, in: *Proceedings of the International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures, SHATIS'15*, 2015.
- [45] P. Kolar, P. Fojtu, T. L. Schmitz, On cutting force coefficient model with respect to tool geometry and tool wear, *Procedia Manufacturing* 1 (2015) 708–720. doi:10.1016/J.PROMFG.2015.09.020.
- [46] I. N. Savvaidis, Cutting and disintegration of wood and wood-based materials, Springer handbooks (2023) 595–677doi:10.1007/978-3-030-81315-4_12.
- [47] P. Moradpour, F. Scholz, K. Doosthoseini, A. Tarmian, Measurement of Wood Cutting Forces during Bandsawing Using Piezoelectric Dynamometer, *Drvna industrija* 67 (1) (2016) 79–84. doi:10.5552/drind.2016.1433.

- [48] M. Piernik, G. Pinkowski, A. Krauss, Effect of chip thickness, wood cross-sections, and cutting speed on surface roughness and cutting power during up-milling of beech wood, *BioResources* 18 (4) (2023) 6784–6801. doi:10.15376/biores.18.4.6784-6801.
- [49] I. Ucun, Investigation of effect on lateral displacement and forces of cutting mode in sawability of metal profile using cutting disc, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering* 36 (1) (2012) 23–35. doi:10.1139/tcsme-2012-0003.
- [50] V. Meulenberg, M. Ekevad, M. Svensson, O. Broman, Minor cutting edge force contribution in wood bandsawing, *Journal of Wood Science* 68 (1) (Mar. 2022). doi:10.1186/s10086-022-02023-8.
- [51] A. Maciak, M. Kubuška, T. Moskalik, Instantaneous cutting force variability in chainsaws, *Forests* 9 (10) (2018) 660. doi:10.3390/f9100660.
- [52] M. B. G. Jun, X. Liu, R. E. DeVor, S. G. Kapoor, Investigation of the dynamics of microend milling—part i: Model development, *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 128 (4) (2006) 893–900. doi:10.1115/1.2193546.
- [53] U. Oberst, The Fast Fourier Transform, *SIAM Journal on Control and Optimization* 46 (2) (2007) 496–540. doi:10.1137/060658242.
- [54] C. Andersson, Bandsawing. part iii: stress analysis of saw tooth microgeometry, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 41 (2) (2001) 255–263. doi:10.1016/s0890-6955(00)00066-3.
- [55] C. Andersson, M. Andersson, J.-E. Ståhl, Bandsawing. part i: cutting force model including effects of positional errors, tool dynamics and wear, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 41 (2) (2001) 227–236. doi:10.1016/s0890-6955(00)00064-x.
- [56] Z. Zhu, D. Buck, M. Ekevad, B. Marklund, X. Guo, P. Cao, N. Zhu, Cutting forces and chip formation revisited based on orthogonal cutting of scots pine, *Holz-forschung* 73 (2) (2018) 131–138. doi:10.1515/hf-2018-0037.
- [57] T. Thaler, P. Potočník, P. Mužič, I. Bric, R. Bric, E. Govekar, Chatter Recognition in Band Sawing Based on Feature Extraction and Discriminant Analysis, Springer Berlin Heidelberg, 2012, p. 607–615. doi:10.1007/978-3-642-28768-8_63.
- [58] R. Marchal, et al., Micromechanical force prediction in industrial cutting, *Holz-forschung* 63 (2008) 127–135.
- [59] Potocnik, Band sawing process dynamics: Feature extraction methods, *Journal of Process Optimization* 23 (2012) 345–360.
- [60] W. Li, Z. Zhang, B. Luo, Effects of sawtooth side edges with different radial clearance angles on the cutting force in wood sawing, *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik* 49 (12) (2018) 1468–1475. doi:10.1002/MAWE.201800074.
- [61] H. Ioras, T. Nicholls, M. C. Perkins, U. V. Münz, A. Larmann, A review for cutting forces and stresses in circular saws, *European Journal of Wood and Wood Products* 60 (1) (2002) 55–59. doi:10.1007/S001070100220.

- [62] L. Javorek, T. G. Masaryka, K. Orłowski, J. Lalik, D. Chuchala, Modelling of cutting by means of fracture mechanics (2013).
- [63] L. Li-hu, Mechanical modeling for cutting progress of band sawing machine, Journal of Zhejiang University of Technology (2013).
- [64] J. Ni, L. Li, M. S. H. Al-Furjan, J. Xu, X. Yang, Establishment and verification of a dynamic cutting force model for metal bandsawing, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 90 (9) (2017) 2703–2712. doi:10.1007/S00170-016-9568-2.
- [65] K. Orłowski, D. Chuchala, M. Szczepański, W. Migda, W. Wojnicz, J. Sandak, Lateral forces determine dimensional accuracy of the narrow-kerf sawing of wood, Dental science reports 12 (1) (2022). doi:10.1038/s41598-021-04129-3.
- [66] M. Bariska, Z. Börösök, Z. Kantó, D. Czimondor, Z. Pásztory, Forces acting on saw teeth during timber processing - a practical approach, Bioresources 11 (4) (2016) 9811–9822. doi:10.15376/BIORES.11.4.9811-9822.
- [67] V. Utkin, Variable Structure Control Optimization, Springer-Verlag, 1992. doi:10.1007/978-3-642-84379-2.
- [68] F. Harashima, T. Ueshiba, H. Hashimoto, Sliding Mode Control for Robotic Manipulators, 2nd Eur. Conf. On Power Electronics, Grenoble Proc. (1987) 251–256.
- [69] H. H., K. Maruyama, F. Harashima, Microprocessor based robot manipulator control with sliding, IEEE Trans. On Industrial Electronics 34 (1) (1987) 11–18. doi:10.1109/TSMC.1978.4309907.
- [70] A. Sabanovics, D. B. Izosimov, Application of sliding modes to induction motor, IEEE Trans. On Industrial Appl. 17 (1) (1981) 4149.
- [71] İhsan Ömür Bucak, An in-depth analysis of sliding mode control and its application to robotics, in: C. Voloşencu, S. Küçük, J. Guerrero, O. Valero (Eds.), Automation and Control, IntechOpen, Rijeka, 2020, Ch. 8. doi:10.5772/intechopen.93027.
- [72] T. Lee, K. Nguyen, R. Patel, Chattering Suppression Methods in Sliding Mode Control Systems, International Journal of Robust Control 15 (3) (2019) 100–115. doi:10.00000/AAA.15.3.0010.
- [73] H. Sira-Ramirez, On the Dynamical Sliding Mode Control of Nonlinear Systems, International Journal of Control 57 (5) (1993) 1039–1061. doi:10.1080/00207179308934429.
- [74] S. Islam, X. P. Liu, Robust Sliding Mode Control for Robot Manipulators, IEEE Transactions on Industrial Electronics 58 (6) (2011) 2444–2456. doi:10.1109/TIE.2010.2062472.
- [75] M. Garcia, L. Chen, S.-h. Kim, Chattering-Free Discrete-Time Sliding Mode Control, Discrete-Time Systems Journal 20 (2) (2020) 50–65. doi:10.00000/AAA.20.2.0050.

- [76] T. Liu, L. Hu, Observer-Based Adaptive Sliding Mode Compensation Position-Tracking Control for Drilling Tool Attitude Adjustment, *Journal of Advanced Mechanical Systems* 14 (3) (2020) 231–245. doi:10.1016/j.jamsys.2020.03.008.
- [77] C. Hernandez, M. Zhao, S. Lee, Fixed-Time-Convergent Sliding Mode Control with Sliding Mode Observer for PMSM Speed Regulation, *Electrical Drives and Control* 28 (5) (2022) 450–470. doi:10.00000/AAA.28.5.0450.
- [78] T.-h. Kim, L. Garcia, E. Taylor, Joint Fault Diagnosis of IGBT and Current Sensor in LLC Resonant Converter Module Based on Reduced Order Interval Sliding Mode Observer, *Journal of Power Electronics* 30 (6) (2023) 500–520. doi:10.00000/AAA.30.6.0500.
- [79] Y. Wang, et al., Nonlinear enhanced coupled feedback control for bridge crane systems, *Nonlinear Dynamics* 112 (1) (2023) 169–185. doi:10.1007/s11071-023-08881-1.
- [80] M. Johnson, X. Wang, F. Ahmad, Disturbance Robust Attitude Stabilization of Multirotors with Control Moment Gyros, *Aerospace Control Journal* 25 (4) (2021) 300–320. doi:10.00000/AAA.25.4.0300.
- [81] A. Naylor, P. Hackney, A Review of Wood Machining Literature with a Special Focus on Sawing, *BioResources* 8 (2) (2013). doi:10.15376/biores.8.2.3122-3135.
- [82] J. G. Williams, Y. Patel, Fundamentals of cutting, *Interface Focus* 6 (3) (2016) 20150108. doi:10.1098/rsfs.2015.0108.
- [83] R. Marchal, F. Mothe, L.-E. Denaud, B. Thibaut, L. Bleron, Cutting forces in wood machining – basics and applications in industrial processes. a review cost action e35 2004–2008: Wood machining – micromechanics and fracture, *hfsg* 63 (2) (2008) 157–167. doi:10.1515/hf.2009.014.
- [84] J. Tian, S. Hutton, Cutting-induced vibration in circular saws, *Journal of Sound and Vibration* 242 (5) (2001) 907–922. doi:10.1006/jsvi.2000.3397.
- [85] A. Mohammadpanah, S. G. Hutton, Dynamics behavior of a guided spline spinning disk, subjected to conservative in-plane edge loads, analytical and experimental investigation, *Journal of Vibration and Acoustics* 138 (4) (May 2016). doi:10.1115/1.4033456.
- [86] P. Korondi, C. Budai, H. Hashimoto, F. Harashima, Tensor product model transformation based sliding mode design for lpv systems, in: Xinghuo Yu, Mehmet Önder Efe (editors) *Recent Advances in Sliding Modes: From Control to Intelligent Mechatronics*, Springer-Verlag, Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London, 2015, pp. 277–298. doi:10.1007/978-3-319-18290-2_14.
- [87] J. Kiss, P. Szemes, P. Aradi, Sliding mode control of a servo system in labview: Comparing different control methods, *INTERNATIONAL REVIEW OF APPLIED SCIENCES AND ENGINEERING* 12 (2) (2021) 201–210. doi:10.1556/1848.2021.00250.

- [88] O. Kaynak, F. Harashima, H. Hashimoto, Variable structure systems theory applied to sub-time optimal position control with an invariant trajectory, *IEEJ Transactions on Power and Energy* 104 (9) (1984) 610–614.
- [89] P. Korondi, H. Hashimoto, V. Utkin, Discrete sliding mode control of two mass system, in: 1995 Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol. 1, IEEE, 1995, pp. 338–343. doi:10.1109/ISIE.1995.497019.
- [90] P. Korondi, V. Utkin, H. Hashimoto, Direct torsion control of flexible shaft in an observer-based discrete-time sliding mode, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 45 (2) (1998) 291–296. doi:10.1109/41.681228.
- [91] A.-I. Borlea, R.-E. Precup, R.-C. Roman, Discrete-time model-based sliding mode controllers for tower crane systems, *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering* 21 (1) (2023) 001–020. doi:https://doi.org/10.22190/FUME230125009B.
- [92] E. Aarts, J. Korst, *Simulated Annealing and Boltzmann Machines: A Stochastic Approach to Combinatorial Optimization and Neural Computing*, Wiley, 1989.
- [93] D. Henderson, S. H. Jacobson, A. W. Johnson, *The theory and practice of simulated annealing*, Springer 12 (2006) 1–22.
- [94] P. Chardaire, J. L. Lutton, A. Sutter, Thermostistical persistency: A powerful improving concept for simulated annealing algorithms, *European Journal of Operational Research* 86 (3) (1995) 565–579.
- [95] P. H. Sydenham, R. Thorn, *Handbook of Measuring System Design*, Wiley, 2005. doi:10.1002/0471497398.
- [96] A. Preumont, *Mechatronics: Dynamics of Electromechanical and Piezoelectric Systems*, Springer, Dordrecht, Netherlands, 2006. doi:10.1007/1-4020-4696-0.
- [97] A. Naylor, P. Hackney, E. Clahr, Machining of wood using a rip tooth: Effects of work-piece variations on cutting mechanics, in: *Conference: 20th International Wood Machining*, 2011, p. 10.
- [98] R. Pfeiffer, R. Collet, L. E. Denaud, G. Fromentin, Analysis of chip formation mechanisms and modelling of slabber process, *Wood Science and Technology* 49 (1) (2014) 41–58. doi:10.1007/s00226-014-0680-x.
- [99] J. E. Hatch, *Aluminium Alloys: The Physical and Mechanical Properties*, ASM International, 1984.
- [100] M. Sándor, *Faanyagismeret, Szaktudás Kiadó Ház*, Budapest, 2020, digitális kiadás, 469 oldal.
- [101] J. E. Mark (Ed.), *Polymer Data Handbook*, Oxford University Press, 1999.
- [102] S. AG, 1le1001-0bb32-2ka4 asynchronous motor – technical data, letöltve: 2025. április 5. (2024).

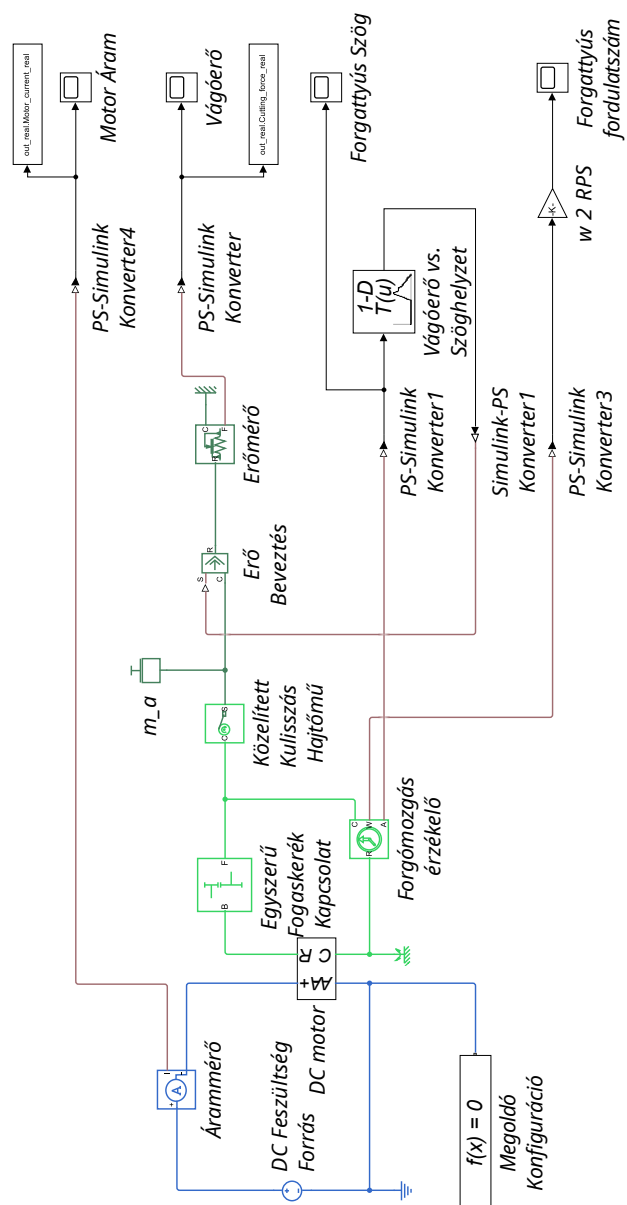
- [103] N. Vorkapic, N. Slavkovic, B. Kokotovic, S. Zivanovic, Z. Dimic, Implementation of a cutting forces model through virtual simulation of machining process, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 135 (2024) 3085–3099. doi:10.1007/s00170-024-14681-7.
- [104] B. Zhang, C. Zhao, B. Wen, Dynamic cutting force measurement test and prediction of time series model for machine tools, *Journal of Northeastern University (Natural Science)* 40 (4) (2019) 521–526. doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2019.04.013.
- [105] K. Kecik, K. Ciecieląg, The effect of cutting parameters on defect detection based on recurrence analysis of cutting force signals obtained from gfrp composite milling, *Measurement* 239 (2025) 115406. doi:10.1016/j.measurement.2024.115406.
- [106] K. . H. H. Korondi, P ; Young, Discrete-time sliding mode based feedback compensation for motion control, in: *Proceedings. 1996 IEEE International Workshop on Variable Structure Systems.-VSS'96-*, IEEE, 1996, pp. 127–131. doi:10.1109/VSS.1996.578577.
- [107] N. Fink, G. Zenan, P. Szemes, P. Korondi, Comparison of direct and inverse model-based disturbance observer for a servo drive system, *Acta Polytechnica Hungarica* 20 (4) (2023). doi:10.12700/APH.20.4.2023.4.12.
- [108] A. Filippov, Application of the Theory of Differential Equations with Discontinuous Right-Hand Sides to Non-Linear Problems in Automatic Control, in: *1st IFAC Congr., Moscow, Russia, 1960*, pp. 923–925. doi:10.1016/S1474-6670(17)70216-9.
- [109] A. Filippov, Differential Equations with Discontinuous Right-Hand Side, *Ann. Math Soc. Transl* 42 (1964) 199–231. doi:10.1007/978-94-015-7793-9.
- [110] Z. Guo, P. Korondi, P. T. Szemes, Bond-graph-based approach to teach pid and sliding mode control in mechatronics, *Machines* 11 (10) (2023) 959. doi:10.3390/machines11100959.
- [111] C. Peris, M. Norton, S. Y. Khoo, Variations in finite-time multi-surface sliding mode control for multirotor unmanned aerial vehicle payload delivery with pendulum swinging effects, *Machines* 11 (9) (2023) 899. doi:10.3390/machines11090899.
- [112] Y. Zhang, H. Lu, M. Li, X. Liu, Speed regulation and optimization of sensorless system of permanent magnet synchronous motor, *Machines* 11 (6) (2023) 656. doi:10.3390/machines11060656.
- [113] P. Korondi, N. Fink, R. Mikuska, P. T. Szemes, C. Kézi, I. Kocsis, On the mathematical background of sliding mode-based friction compensation of a micro-telemanipulation system, *Mathematics* 12 (20) (2024) 3182. doi:10.3390/math12203182.
- [114] N. Ando, P. Korondi, H. Hashimoto, Development of micromanipulator and haptic interface for networked micromanipulation, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 6 (4) (2001) 417–427.
- [115] S. Suzuki, Y. Pan, K. Furuta, S. Hatakeyama, Invariant sliding sector for variable structure control, *Asian Journal of Control* 7 (2) (2005) 124–134.

- [116] P. Korondi, Tensor product model transformation-based sliding surface design, *Acta Polytechnica Hungarica* 3 (4) (2006) 23–36.
- [117] P. Korondi, C. Budai, H. Hashimoto, F. Harashima, Tensor product model transformation based sliding mode design for lpv systems, in: X. Yu, M. Önder Efe (Eds.), *Recent Advances in Sliding Modes: From Control to Intelligent Mechatronics*, Springer Netherlands, 2015, pp. 277–298.

A kutatási területhez kapcsolódó publikációk listája

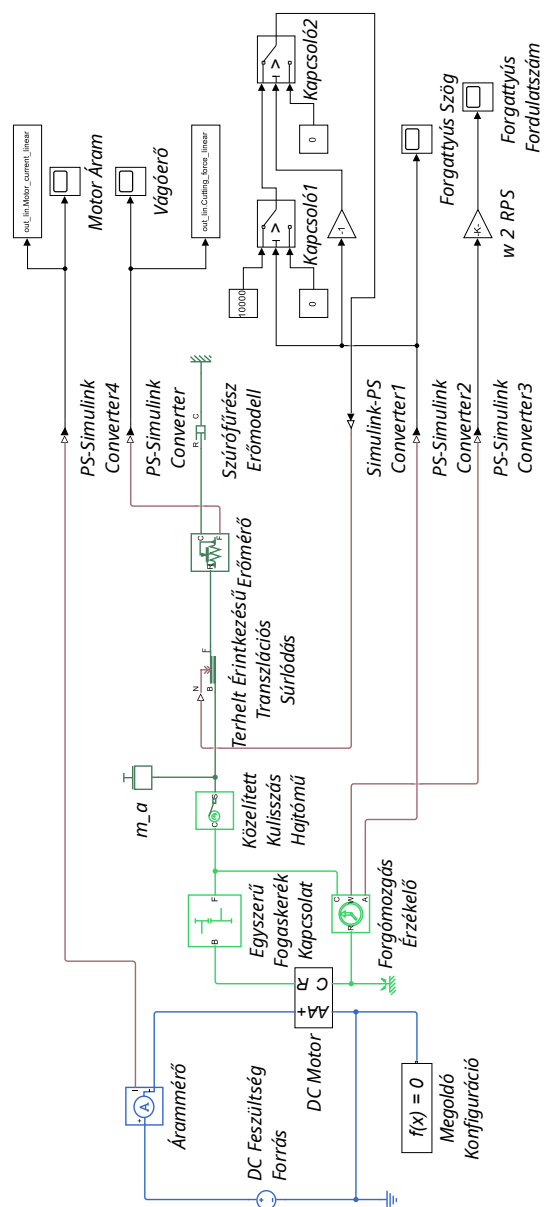
- [S1] Apáti, Sándor; Hegedűs, György. "Investigation and Simulation of a Scotch Yoke Mechanism." *Multidiszciplináris Tudományok*, 13(2), pp. 144-152, 2023.
DOI: 10.35925/j.multi.2023.2.13.t
- [S2] Apáti, Sándor; Hegedűs, György. "Szűrőfűrész vizsgáló próbapad koncepcionális tervezése." *GÉP*, 74(4), pp. 13-16, 2023.
- [S3] Apáti, Sándor; Hegedűs, György. "Electromechanical Model of Jigsaw." *Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Technologies (ICAT'23)*, pp. 100-104, 2023.
DOI: 10.58190/icat.2023.24.
- [S4] Apáti, Sándor; Hegedűs, György; Hajdu, Sándor. "Semi-in-situ cutting force measurement of a jigsaw." *Results in Engineering*, 25, 104114, 2025.
DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104114.
- [S5] Apáti, Sándor; Hajdu, Sándor; Hegedűs, György. "Simscape alkalmazása vágóerő modellezésére." In: Hegedűs, György; Rónai, László (szerk.) *Fiatal kutatók eredményei a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézetében - 2024*, Miskolc-Egyetemváros, Magyarország: Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet, 2024, pp. 68-75.
- [S6] Apáti, Sándor; Hegedűs, György; Hajdu, Sándor; Korondi, Péter. "Investigation of Sliding Mode Control in the Nonlinear Modeling of Cordless Jigsaws." *Sensors*, 25(2), 456, 2025.
DOI: 10.3390/s25020456.

A. melléklet



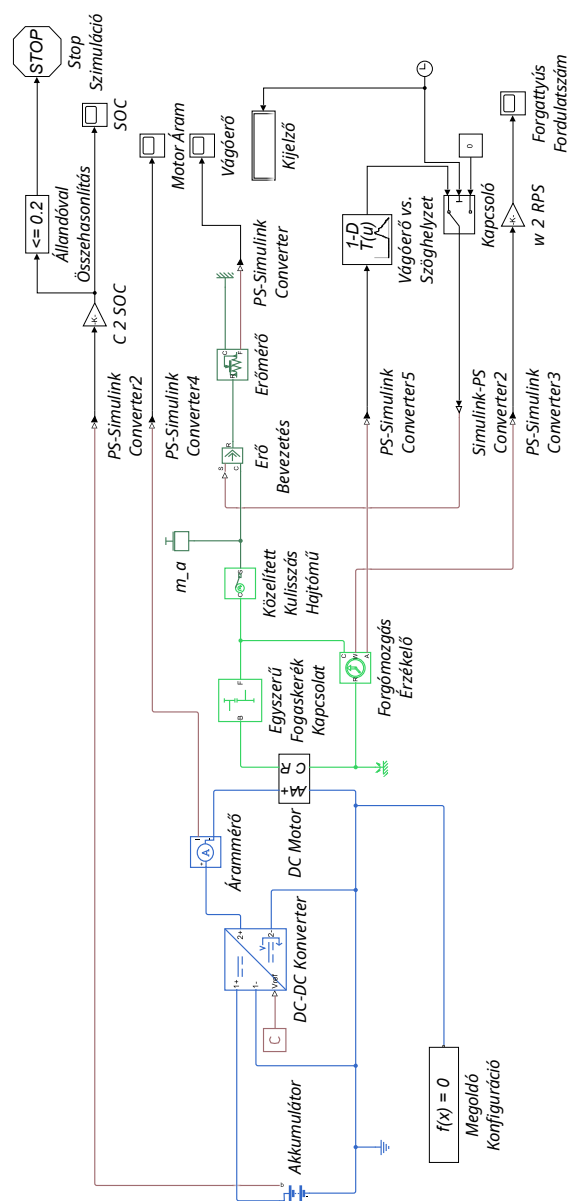
A.1. ábra. Simscape modell valós vágóerő alkalmazásával.

B. melléklet



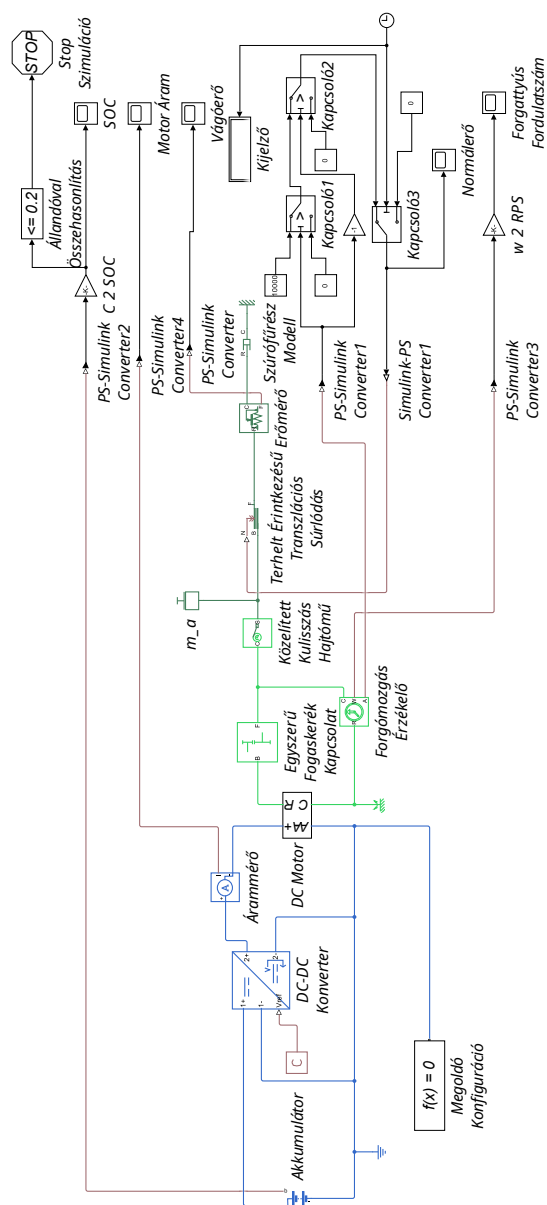
B.1. ábra. Simscape modell lineáris vágóerő modell alkalmazásával

C. melléklet



C.1. ábra. Az akkumulátor üzemidejének szimulációja valós vágóerő modellel.

D. melléklet



D.1. ábra. Az akkumulátor üzemidejének szimulációja lineáris vágóerő modellel.

E. melléklet

A csúszómód szimulációs Matlab kódja:

```
R = 0.176;           % [ohm] A motor belső ellenállása
R_b = 0.00;          % [ohm] Az akkumulátor belső ellenállása
L = 3.21e-3;         % [H] A motor induktivitása
L_r = 0;             % [H] Egyéb (reziduális) induktivitás
k_e = 7.383e-3;      % Elektromotoros állandó (feszültség/fordulat)
k_mk = 6/56;         % Áttételi arány
J_m = 24.1e-6;       % [kg*m^2] A motor tengelyének tehetetlenségi
    nyomatéka
k_m = 5.632e-3;      % [Nm/A] A motor állandója (nyomaték/áram)
J_k = 24.0e-6;       % [kg*m^2] Lendkerék tehetetlenségi nyomatéka
m = 0.239;          % [kg] A reciprok mozgást végző mechanizmus tö
    mege
e = 0.010;           % Excentrikusság (a mechanizmus geometriájában
    használt paraméter)
b = 3.4274e-6;       % Belső mechanikai csillapítási tényező
v_in = 18;           % [V] Akkumulátor feszültsége (tápfeszültség)
Ts = 0.12;           % Szimuláció időlépése
Tc = 1;              % Időállandó a modellben
gamma = 17;          % [V] Kapcsolási feszültség
factor = 10;         % Referenciajel követésének intenzitása
O2G = 0.1;           % Második állapotfigyelő omega erősítése
```