

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



AKKUMULÁTOROS KÉZI SZÚRÓFŰRÉSZEK
VÁGÓERŐ
MODELLEZÉSE, SZIMULÁCIÓJA,
ENERGIAFOGYASZTÁSÁNAK VIZSGÁLATA

PhD ÉRTEKEZÉS
TÉZIS FÜZET

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

1. Bevezetés	3
2. Elektromechanikai modell bemutatása	4
3. Kísérleti mérések	5
3.1. A fajlagos vágóerő meghatározása	6
3.2. Árammérés a vágóerő teszt során	9
4. Szűrőfűrészek akkumulátor üzemidejének előrejelzése lineáris vágóerő- modell használatával	10
4.1. Simscape modell valós vágóerővel	10
4.2. Simscape modell lineáris vágóerő-közelítéssel	10
4.3. Az akkumulátor üzemidejének szimulációja Simscape modellek segítségével	11
4.4. Szimulációs eredmények	12
4.5. Validáció az 50 másodperces intervallum alapján	13
5. A csúszómód-szabályozás vizsgálata akkumulátoros szűrőfűrészek nem- lineáris modellezésében	15
5.1. Az elmélet alkalmazása a vizsgált akkumulátoros kézi szűrőfűrész esetében	15
5.2. Szimulációs beállítások	15
5.2.1. Csúszómód szimulációja	16
5.2.2. Csúszómód szimuláció csökkentett rendű állapotfigyelővel	16
6. Új tudományos eredmények	18
7. Fejlesztési lehetőségek	19
A kutatási területhez kapcsolódó publikációk listája	20
Irodalomjegyzék	21

1. Bevezetés

Az akkumulátoros kézi szűrőfűrészek energetikai és dinamikai vizsgálata kiemelt jelentőségű a modern ipari alkalmazások és a fenntartható fejlesztések szempontjából. E szerszámok precíz, rugalmas megmunkálást tesznek lehetővé különféle anyagokon (fa, fém, műanyag), ugyanakkor működésük során jelentős energiaveszteségek léphetnek fel, elsősorban a dinamikus vágóerők és a szerszám-anyag kölcsönhatások miatt. Ezek a veszteségek nemcsak az energiafogyasztást növelik, hanem rontják a vágási minőséget és csökkentik az eszköz élettartamát is.

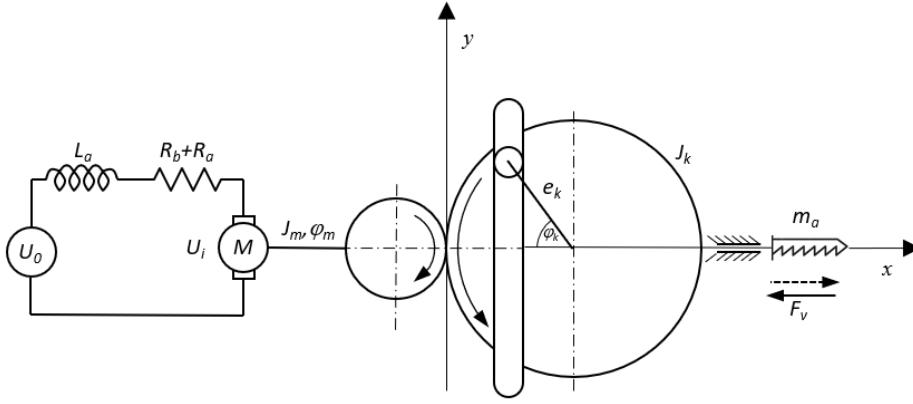
Kutatásom célja ezen problémák mérési, modellezési és szabályozási szempontú vizsgálata, különös tekintettel a vágóerők, a rezgések és az energiafogyasztás kapcsolatára. Ehhez saját fejlesztésű mérőpadi rendszert alkalmaztam, amely valós időben képes a vágóerők pontos mérésére és a rendszer dinamikai hatásainak minimalizálására. A mérések során különböző anyagok (tölgy, akác, alumínium, metamid) vágási viselkedését vizsgáltam, kiemelve az anyagtulajdonságok (sűrűség, rugalmasság) hatását.

A vágási folyamat során jelentkező erőingadozások és rezgések instabilitást okozhatnak, ezért célom olyan modellalapú megközelítés kialakítása volt, amely képes ezek pontos leírására. A kutatás során lineáris és nemlineáris vágóerő-modelleket dolgoztam ki Simscape környezetben, amelyek optimalizációval finomhangolva alkalmasak az energiafogyasztás előrejelzésére. A DC motorok indításakor tapasztalható magas áramcsúcsok további problémát jelentenek, mivel ezek rontják az akkumulátor élettartamát és a motor megbízhatóságát. A hajtóművek elhagyásával a szabályozás jelentősége megnő, hiszen a terhelési ingadozások közvetlenül a motorra hatnak, különösen keményfa vagy rétegelt anyagok esetében.

E kihívások kezelésére csúszómód-szabályozási módszert alkalmaztam, amely képes robusztusan kezelni a terhelési ingadozásokat és biztosítani a stabil működést. A csúszómód-szabályozás előnye, hogy hatékonyan csökkenti az indítási áramcsúcsokat, javítja az energiahatékonyságot, és meghosszabbítja az akkumulátor üzemidejét. Ezáltal a kézi szűrőfűrész megbízhatóbbá és hosszabb élettartamúvá válik, különösen ipari felhasználásban. A disszertáció célja tehát egy komplex, integrált mérési, modellezési és szabályozási módszertan kidolgozása, amely hozzájárul az akkumulátoros szűrőfűrészek energiahatékony és stabil működéséhez.

2. Elektromechanikai modell bemutatása

A szűrőfűrész működésének vizsgálatához olyan elektromechanikai modellt dolgoztam ki, amely egységesen kezeli a motor, a kulisszás mechanizmus és a vágási folyamat kölcsönhatásait. A cél a vágóerők, az energiafogyasztás és a dinamikai viselkedés pontos előrejelzése, valamint a szabályozási lehetőségek feltérképezése. A mozgásegyenletek levezetéséhez a



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

másodfajú Lagrange-egyenletet alkalmaztam, melynek általános formája:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, \quad (2.1)$$

ahol $q_1 = q(t)$ az elektromos töltés, $q_2 = \varphi_m(t)$ a motor tengelyének szöghelyzete. Behelyettesítve az elektromechanikai rendszer egyenletei:

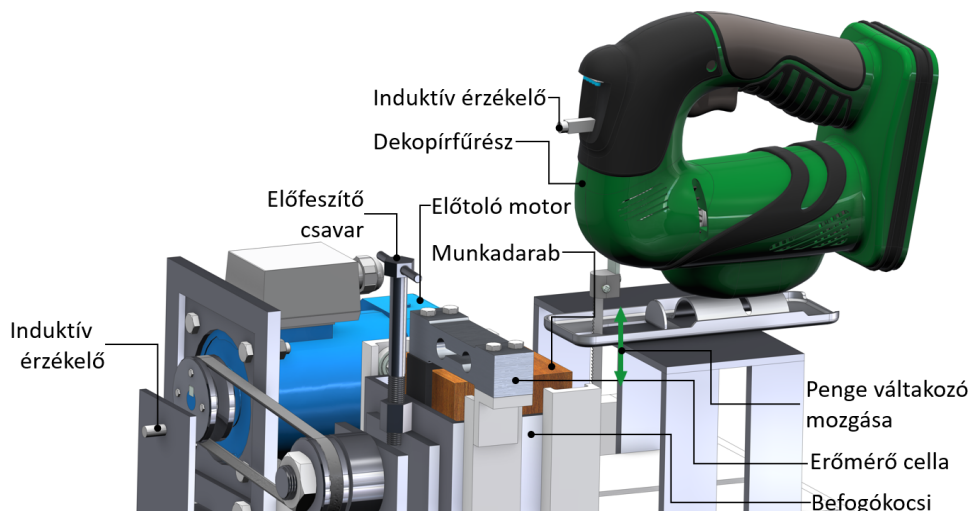
$$U_0 = L_a \ddot{q} + R_a \dot{q} + k_e \dot{\varphi}_m, \quad (2.2)$$

$$J_{eq}(\varphi_m) \ddot{\varphi}_m + \frac{1}{2} J'_{eq}(\varphi_m) \dot{\varphi}_m^2 = k_m \dot{q} - F_v e_k k_{mk} \sin(k_{mk} \varphi_m) - b \dot{\varphi}_m. \quad (2.3)$$

A nemlineáris karakterisztika miatt a rendszer numerikus megoldása adaptív lépésközű negyedrendű Runge–Kutta módszerrel történt. A modell részletes képet ad a vágási folyamat dinamikájáról, megalapozva a szabályozási és optimalizálási lépéseket.

3. Kísérleti mérések

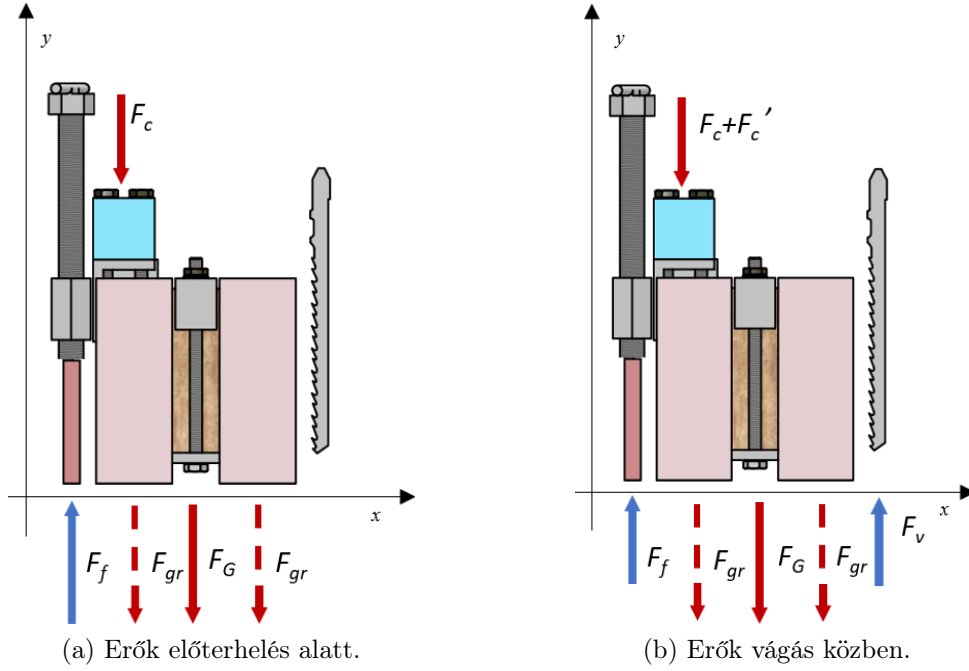
Az elektromos kézi szűrőfűrész vágóerejének mérése kihívást jelent. Az első feladatomban egy olyan mérőrendszer tervezése volt, amelyen a vágóerő mérés elvégezhető. A mérőberendezést úgy terveztem, hogy a különböző anyagok, például akácfa, alumínium és metamid megmunkálására is alkalmas legyen. Minden 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 3.1. ábrán látható. A rezgések minimalizálása érdekében a kocsi szerkezetét egy



3.1. ábra. A mérőrendszer felépítése [S4].

előfeszítő orsós tengellyel láttam el, amely előterhelő erőt (F_c) hoz létre az erőmérőcella és a befogókocsi között. A mérések előtt egy $80 \times 80 \times 80$ mm méretű munkadarabot rögzíték a kocsihoz úgy, hogy ha a munkadarab fa, akkor száliránya merőleges legyen az előtolásának irányára, így a vágás minden esetben merőleges a szálirányra, biztosítva az eredmények következtetességét [1, 2]. A munkadarab rögzítése után a kézi szűrőfűrész üzembe helyeztem, amely egy induktív érzékelővel van felszerelve és a kulisszas 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 szögsebességet 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 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.



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

A 3.2b. szerint 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 3.2a ábra az előterhelt mérőrendszer állapotát mutatja, amelyre az alábbi statikai egyenlet alkalmazható:

$$\sum F_y = 0 = F_f - F_c - F_G - F_{gr}. \quad (3.1)$$

A 3.2b ábrából alapján egy egyensúlyi egyenlet írható fel a fűrészelés során fellépő erőkre:

$$\sum F_y = 0 = F_f + F_v - (F_c + F'_c) - F_G - F_{gr}. \quad (3.2)$$

A (3.2) egyenlet alapján a vágóerő kifejezhető, figyelembe véve a (3.1) egyenlet statikai egyensúlyát is:

$$F_v = F'_c + F_{gr}. \quad (3.3)$$

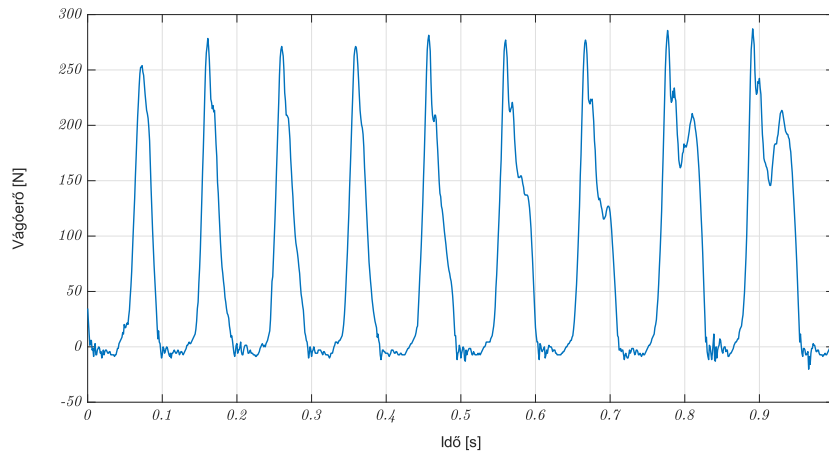
Látható, hogy az előfeszített állapotban nullázott mérőrendszerrel az erőmérő cella közvetlenül méri a vágóerőt. Ez annak köszönhető, hogy a cellán keletkező kiegészítő erő (F'_c) pontosan megegyezik a vágóerő (F_v) - (F_{gr}) nagyságával. Ez a mérési konfiguráció biztosítja, hogy a vágóerő mérése pontos és reprodukálható legyen a teljes fűrészelési folyamat során.

3.1. A fajlagos vágóerő meghatározása

A vágóerő mérések első lépéseként az úgynevezett közvetlen vágóerőt mértem, amelyet a vágási folyamat során az erőmérő cella rögzített. A 3.3 ábra bemutatja a tölgyfa mintán végzett mérések során kapott vágóerő-diagramot az alábbi mérési paraméterek mellett:

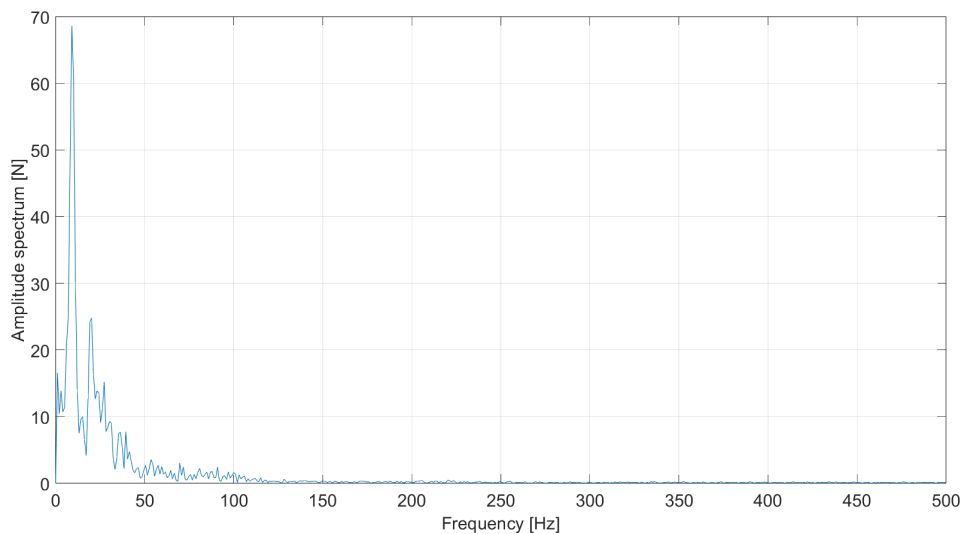
- kezdeti terhetetlen fordulatszám: 18.41 1/s,

- előtolási sebesség: 3.93 mm s^{-1} ,
- fűrészlap billenése: 1.5 mm .



3.3. ábra. Vágóerő-diagram tölgyfa munkadarabnál.

A 3.3. ábrán bemutatott vágóerő mérésével párhuzamosan, meghatároztam az előtolási erőt is, az előtoló motoráram mért értékéből. Az előtolásnál fellépő normál irányú erő értéke: $F = 18.3 \text{ N}$, amely legalább egy nagyságrenddel kisebb, mint a függőleges vágóerő értéke. A felhasználás során az előtoló erőt az operátor fejt ki. A 3.3. ábra mérési eredményeiből származó amplitúdóspektrum a 3.4. ábrán látható, amelyet a gyors Fourier-Transzformációval állítottam elő [3].



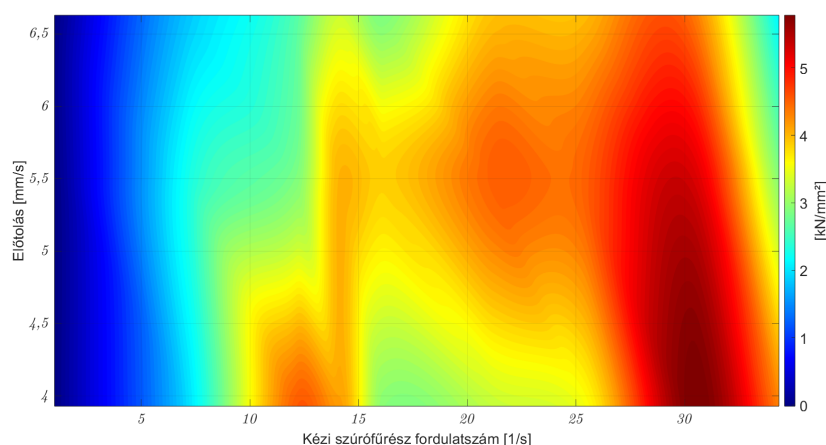
3.4. ábra. Tipikus vágóerő mérési amplitúdóspektruma tölgyfa mintánál.

Az alábbi 3.3 ábra a korábban ismertetett módszerrel számított fajlagos vágóerő-diagramot mutatja tölgyfa mintadarab esetén. A diagramban 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 rendkívül magas értékeket a fa mintadarab inhomogén természete magyarázza. Ahogyan az [4] hivatkozás említi, a vágóerő az előtolási és a forgácsolási sebességtől függ. Ez arra utal, hogy alacsonyabb vágóerőnek kellene fellépnie nagyobb forgattyús sebesség mellett, ahogyan az [1], [5], [6] hivatkozások kifejtik, állítva, hogy a súrlódás által generált hő a

fűrészelés során lágyítja a rostokat a vágási környezetben, így megkönnyítve a vágást.

3.1. táblázat. Fajlagos vágóerők $[N/mm^2]$ különböző előtolási sebességeknél, a kezdeti és tényleges fordulatszámok mellett

Előtolás $[mm/s]$	Kezdeti fordulat $[1/s]$	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 fordulat $[1/s]$	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



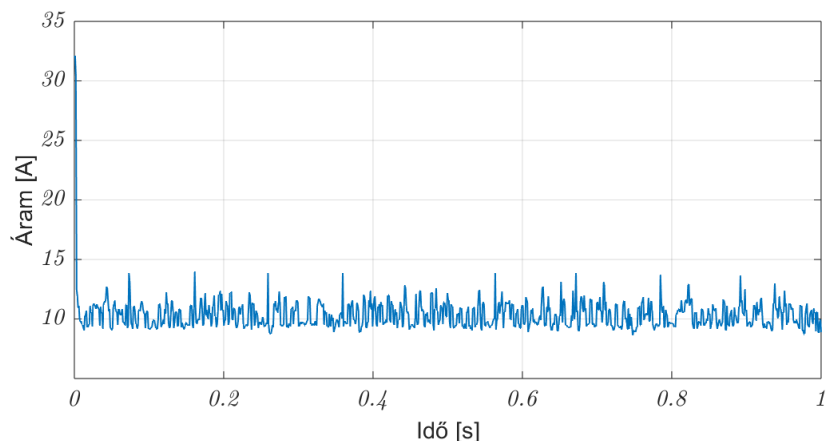
3.5. ábra. Fajlagos vágóerők a 3.1 táblázat adatai alapján.

Több mérésorozatot végeztem, amelyeket háromszor megismételtem különböző előtolási értékek és motorfordulatszámok mellett. A 3.1. táblázatban megadott mért értékek a 3.5. ábra felületdiagramján láthatók. Az is megfigyelhető, hogy a méréseket tölgyfa esetében és 13 különböző tényleges forgattyús sebességnél és 3 különböző előtolási sebességnél végeztem. Az ábra a kézi szűrőfűrész vágóerejének alakulását szemlélteti a működés közbeni forgattyú szögsebesség és az előtolás függvényében. A vízszintes tengely a szögsebességet $[s^{-1}]$, a függőleges tengely az előtolási sebességet $[mm s^{-1}]$ jelöli, míg a színtérkép a vágóerőt mutatja $[kN mm^{-2}]$ egységben. A diagram alapján megfigyelhető, hogy alacsony szögsebességnél ($4 - 10 s^{-1}$) a vágóerő alacsony marad, ami a vágás hatékonyságának csökkenésére és a szerszám „szagató” mozgására utal. A szögsebesség növelésével a vágóerő fokozatosan emelkedik, és egy erőcsúcs jelenik meg körülbelül $18 - 20 s^{-1}$ szögsebesség és $5 - 6 mm s^{-1}$ előtolás mellett. Az optimális működési zóna ezen a környéken, nagyjából $20 - 25 s^{-1}$ szögsebesség és $5,5 - 6 mm s^{-1}$ 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 $25 - 30 s^{-1}$ tartományban jelentkezik, amely ugyan gyorsabb vágást tesz lehetővé, de a szerszám alkatrészeire fokozottan terheli, csökkentve ezzel azok élettartamát. Az adatállomány alapján a szűrőfűrész működése optimalizálható úgy, hogy a szabályozás célzottan a meghatározott tartományban tartsa a szögsebességet és az előtolást. Ez segíthet olyan fejlesztésekben, mint például terhelésfüggő automatikus fordulatszám-szabályozás, illetve intelligens vezérlés kialakítása, amely a vágási ellenállás alapján adaptívan módosítja a működési paramétereket a hatékonyabb és hosszabb élettartamú működés érdekében. A mérések során azonosított anomáliák, például a vágóerő csúcsértékei és az időszakosan megjelenő negatív értékek, több tényező következményei,

amelyek a vágási folyamat komplex dinamikájához kapcsolódnak.

3.2. Árammérés a vágóerő teszt során

A vágóerő teszthez kapcsolódó árammérések eredményeit a 3.6. ábra mutatja. Az áramot Fluke 124B oszcilloszkóppal és lakatfogóval, a vágóerőt LabVIEW alapú rendszerrel mértem, a két idősor szinkronizálását utólagos posztprocesszálassal végeztem. A szink-



3.6. ábra. Vágóerő teszt során mért áram-idő diagram.

ronizálás referenciaidőpontját a vágás kezdetén megfigyelhető áram- és erőcsúcsok adták, a mintavételi frekvencia mindkét mérőeszköznél 1 kHz volt. Az áramgörbén egy kb. 32 A indulási csúcs figyelhető meg, majd az áram 8–14 A között stabilizálódik. Az ingadozások az anyag inhomogenitására, előtolási sebesség változásra és mechanikai visszarúgásokra vezethetők vissza. A feldolgozott adatok alapján meghatároztam az átlagáramot ($\langle I \rangle$), az energiafogyasztást (E) és a várható akkumulátor üzemidőt (T_{accu}). Az áram-idő diagram jól jellemzi a szúrófűrész terhelési viselkedését és a vágási folyamat dinamikus jellegét.

4. Szűrőfűrészek akkumulátor üzemidejének előrejelzése lineáris vágóerőmodell használatával

A kézi szűrőfűrészek energiahatékonyságának és dinamikai stabilitásának javítása a nem-lineáris vágóerők, anyagtulajdonságok és rezgések miatt jelentős kihívást jelent. A vágási folyamat során fellépő dinamikus erők nemcsak az energiafogyasztást növelik, hanem instabilitást és rezgéseket is okozhatnak, rontva a vágási minőséget és csökkentve a gép élettartamát. A hagyományos modellek gyakran nem kezelik megfelelően ezeket a komplex tényezőket, így korlátozottan alkalmazhatók az akkumulátor üzemidejének pontos előrejelzésében. Kutatásomban ezért a lineáris vágóerőmodellre alapozott megközelítést alkalmaztam, amely egyszerűsége ellenére hatékony becslést ad a vágási folyamat energiaigényére és lehetővé teszi a működés optimalizálását az akkumulátor üzemidejének meghosszabbítása érdekében.

4.1. Simscape modell valós vágóerővel

A Simscape egy integrált szimulációs környezet, amely elektromechanikai rendszerek valósághű modellezését és elemzését teszi lehetővé. A platform támogatja az elektromos és mechanikai elemek közvetlen összekapcsolását, biztosítva a teljes rendszer dinamikájának pontos ábrázolását. A beépített könyvtárak motorokat, csillapítókat, rugókat, valamint elektromos alkatrészeket (ellenállás, induktivitás, kondenzátor) kínálnak, melyek paramétereizhetők a fizikai jellemzőik (pl. EMF, ellenállás, tehetetlenség, csillapítás) szerint. Az ilyen elemekkel a DC motorok terhelés alatti működése, valamint a mechanikai és elektromos kölcsönhatások hatékonyan vizsgálhatók [7]. A vágóerő-szögelfordulás függvény jól leírja a szűrőfűrész periodikus működését, és valósághű erőhatásokat biztosít a szimulációhoz [8]. A Simscape környezetben felépített modell integrálja a motor, a fogaskerék és a kulisszás mechanizmus dinamikáját. A DC motor forgómozgását a mechanizmus oszcilláló mozgássá alakítja, amely a fűrészlap előre-hátra irányú működését biztosítja. A vágóerő a szöghelyzetfüggő *1-D Lookup Table* alapján kerül meghatározásra, pontosan leképezve a dinamikus vágási folyamatot.

4.2. Simscape modell lineáris vágóerő-közelítéssel

A szűrőfűrész elektromechanikai rendszerét lineáris vágóerő-közelítéssel szimulálva, lehetővé válik a rendszer működési paramétereinek a gyorsabb számítása reális eredmények mellett. A modell alapját a DC motor, a fogaskerék és a kulisszás mechanizmus alkotja, amely a forgómozgást alternáló mozgássá alakítja. A vágóerő lineáris csillapító modellen

keresztül, a fűrészlapp sebességfüggvényében számított. A súrlódási és kapcsolási blokkok szabályozzák a csillapítás bekapcsolását a megfelelő szöghelyzet-tartományban. A rendszer áram- és szöghelyzet-érzékelői valós idejű adatokat szolgáltatnak az áramfelvételtől és a mechanikai állapotokról, lehetővé téve a vágási folyamat dinamikus viselkedésének elemzését.

4.3. Az akkumulátor üzemidejének szimulációja Simscape modellek segítségével

Az optimalizációs folyamat befejezése után további szimulációkat végeztem az optimális csillapítási tényező felhasználásával a kézi szűrőfűrészes akkumulátor üzemidejének becslésére. A rendszer energiaforrása egy akkumulátor, amelynek *Töltöttségi Állapot* angolul (SOC) rövidítéssel az akkumulátor állapotát folyamatosan figyelik a szimuláció során. Az akkumulátor áramát egy *DC-DC* átalakító szabályozza, amely biztosítja a *DC* motor számára a megfelelő feszültség- és áramellátást. Ez az átalakító kulcsfontosságú az energiahatékonysági számításokhoz. Az átalakító blokk segítségével a *DC* motor valós *PWM*-vezérelt bemeneti feszültsége is előállítható. Az akkumulátor viselkedését az *Akkumulátor* blokk modellezi, amely két szimulációs megközelítést tesz lehetővé. Ha az akkumulátor kapacitás paramétert *végtelenre* (*Akkumulátor Töltési Kapacitása: Végtelen*) állítjuk, a blokk az akkumulátort soros belső ellenállásként és állandó feszültségforrásként modellezi. Ez az egyszerűsített megközelítés ideális azokban az esetekben, amikor az akkumulátor töltöttségi állapotának változása nem kritikus. Ha az akkumulátor kapacitása végesként van definiálva (*Akkumulátor Töltési Kapacitása: 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:

$$V = V_{nom} \frac{SOC}{1 - \beta(1 - SOC)}, \quad (4.1)$$

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. 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. A rendszer több érzékelőt is tartalmaz, amelyek valós idejű adatokat szolgáltatnak a rendszer működéséről. Ezek közé tartozik az *Árammérő*, amely méri a motor áramfelvételét; 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 szimuláció feltételezése szerint a teljesen feltöltött akkumulátor 20%-os SOC szintre merül. Az akkumulátor üzemideje valós vágóerő modell alkalmazásával: $t_{br} = 963$ s.

Az akkumulátor üzemideje lineáris vágóerő modell alkalmazásával: $t_{br} = 927$ s.

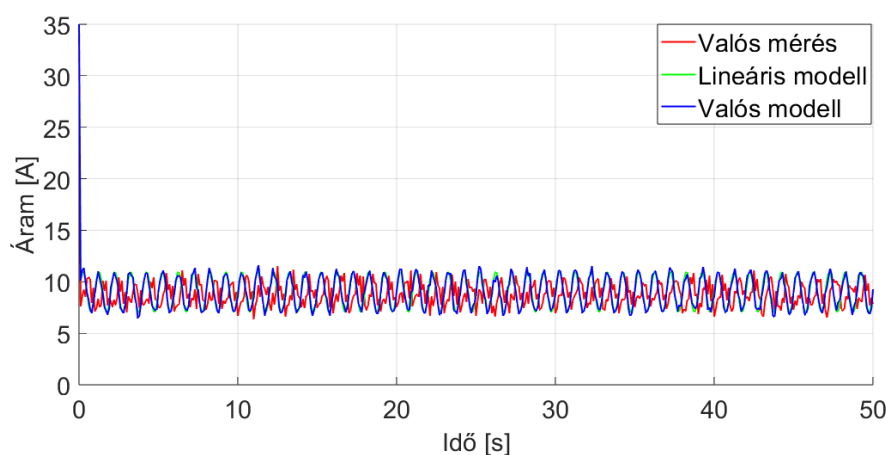
Relatív előrejelzési hiba:

$$e_r = \frac{t_{br} - t_{bl}}{t_{br}} = 0,037 = 3,7\% \quad (4.2)$$

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.

4.4. Szimulációs eredmények

A motor áramfelvétele és a vágóerő viselkedése valós és lineáris vágóerő modellek esetén került összehasonlításra. A 4.1. 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.



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

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.

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

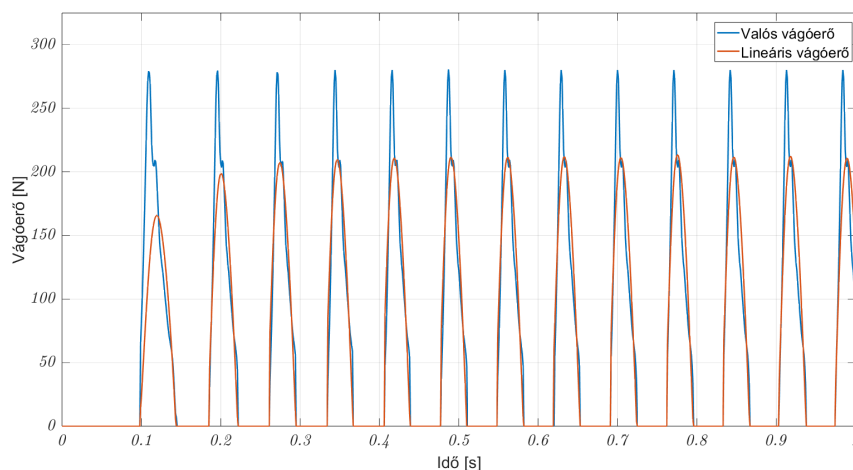
pontossággal képes visszaadni.

Az erőcsúcsoknál kisebb eltérések figyelhetők meg, de az általános egyezés jó, így a lineáris modell alkalmas üzemidő-becslésre és energiahatékonysági vizsgálatokra. Az akkumulátor üzemidejére vonatkozó relatív eltérés:

$$e_r = 0,037 = 3,7\%. \quad (4.3)$$

A Simscape-alapú modell pontosan írja le a vágási folyamat dinamikáját és az energiael látás viselkedését. Az optimalizált lineáris modell egyszerűsége mellett is alkalmas valós forgácsolási körülmények közelítésére, így megbízható alapot ad a hordozható kézi szűrő-fűrészek fejlesztéséhez.

4.2. 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.



4.2. 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 modellet ($F_{linear}(t)$) 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 üzemidejére valós körülményekhez hasonló feltételek mellett.

4.5. Validáció az 50 másodperces intervallum alapján

A szimulációs modell megbízhatóságának értékeléséhez az akkumulátor várható üzemidejének 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:

$$Q_{\text{hasznos}} = 9600 \text{ A s} \cdot 0,8 = 7000 \text{ A s}. \quad (4.4)$$

A várható üzemidő minden esetben az alábbi összefüggéssel számítható:

$$T = \frac{Q_{\text{hasznos}}}{\langle I \rangle}. \quad (4.5)$$

A különböző modellek esetében kapott üzemidők a következők:

$$T_{\text{mért}} = \frac{7200 \text{ A s}}{8,51 \text{ A}} \approx 846,0 \text{ s}, \quad (4.6)$$

$$T_{\text{lin}} = \frac{7200 \text{ A s}}{7,77 \text{ A}} \approx 926,96 \text{ s}, \quad (4.7)$$

$$T_{\text{nemlin}} = \frac{7200 \text{ A s}}{8,24 \text{ A}} \approx 873,8 \text{ s}. \quad (4.8)$$

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

$$\Delta_{\text{lin}} = \frac{926,96 \text{ s} - 846,0 \text{ s}}{846,0 \text{ s}} \cdot 100 \approx 9,6\% \quad (4.9)$$

A nemlineáris modell esetében:

$$\Delta_{\text{nemlin}} = \frac{873,8 \text{ s} - 846,0 \text{ s}}{846,0 \text{ s}} \cdot 100 \approx 3,3\% \quad (4.10)$$

A vizsgálatok eredményei azt mutatják, hogy a nemlineáris modell a valós mérésekhez szorosan illeszkedik, míg az egyszerűbb, optimalizált paraméterekkel rendelkező lineáris modell is jó közelítést nyújt. A 3,3%–9,6% közötti eltérések validálják mindkét modell alkalmazhatóságát az akkumulátor energiafogyasztásának szimulációjánál, ipari célú előrejelzések és tervezési folyamatok során.

5. A csúszómód-szabályozás vizsgálata akkumulátoros szűrőfűrészek nemlineáris modellezésében

Az akkumulátoros kézi szűrőfűrészek működése során a terhelés ingadozása és a vágási zavarok jelentősen befolyásolják a teljesítményt és az energiafelhasználást. A csúszómód-szabályozás (SMC) robusztus megoldást kínál ezekre a kihívásokra, mivel hatékonyan kezeli a zavarásokat és a paraméterváltozásokat. A megfigyelő időállandójának nagyobb választása lehetővé teszi az indítási áramcsúcsok csökkentését és a szabályozott fordulatszám-felvételt. Ez a stratégia stabil működést, kisebb áramterhelést és hosszabb akkumulátor-üzemidőt biztosít. A bemutatott elméleti háttér részben [9] és [10] munkáira épül, amelyek fontos kiindulópontot biztosítanak az említett szabályozási technika részletes elemzéséhez és alkalmazásához.

5.1. Az elmélet alkalmazása a vizsgált akkumulátoros kézi szűrőfűrész esetében

A szűrőfűrész nemlineáris elektromechanikai modellje az alábbi állapotter-formában írható fel:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q \\ i \\ \varphi_m \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_a+R_b}{L_a} & 0 & -\frac{k_e}{L_a} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{42}(\varphi_m) & 0 & a_{44}(\varphi_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ i \\ \varphi_m \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{42}(\varphi_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{in}(t) \\ F_{saw} \end{bmatrix}, \quad (5.1)$$

ahol $v_{in}(t)$ a motor bemeneti feszültsége, F_{saw} a vágási erő. A nemlineáris együtthatók a mechanikai rész paraméterfüggő dinamikáját írják le, különösen a kulisszás mechanizmus miatt. A motor dinamikájának egyszerűsítésére figyelembe vettük, hogy a mechanikai időállandó (T_m) nagyságrenddel nagyobb, mint az elektromos időállandó (T_e):

$$T_e = \frac{L_a}{R_a + R_b}, \quad T_m = \frac{(R_a + R_b)J_{eq}}{k_e k_m}, \quad J_{eq} = J_m + J_k k_{mk}^2. \quad (5.2)$$

Ez lehetővé teszi, hogy a megfigyelő a mechanikai alrendszerre redukálható legyen, elhanyagolva az elektromos dinamika hatását [9–14].

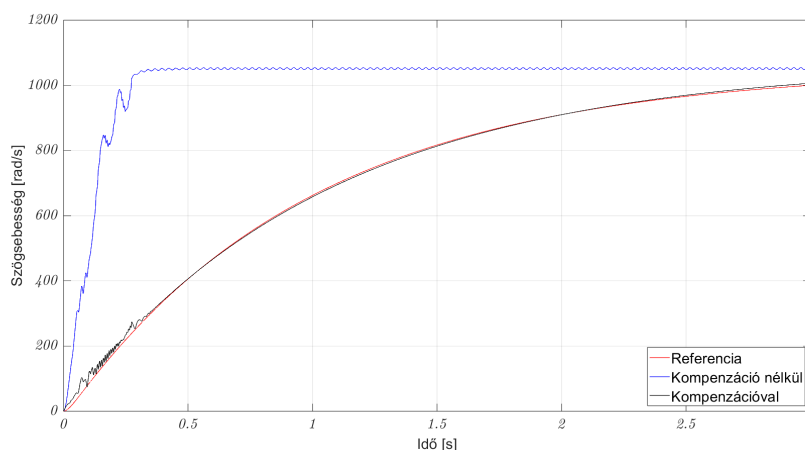
5.2. Szimulációs beállítások

A Simulink környezetben megvalósított szimulációs rendszer négy párhuzamosan futó részmodelltől áll, melyek a vizsgált szűrőfűrész különböző dinamikai aspektusait reprezentálják. Az első blokk egy másodrendű lineáris referencia modellt tartalmaz, amely

alapvető viszonyítási pontként szolgál. A második blokk a vágási folyamat részletes nemlineáris modellje kompenzáció nélkül, míg a harmadik blokk ugyanennek a nemlineáris modellnek a kompenzált változata, ahol egy elsőrendű referencia modell javítja a rendszer stabilitását és dinamikai válaszát. A nemlineáris modell a dinamikát befolyásoló nemlineáris paramétereket a kimeneti állapotok alapján számítja a rendszer. Ezek a paraméterek meghatározzák a motor és a mechanikai alrendszer nemlineáris viselkedését. A kompenzált modell egy elsőrendű referencia megfigyelőt alkalmaz, amely a motor szögsebességét becsli egy módosított átviteli függvény segítségével, skálázási tényező (factor) figyelembevételével.

5.2.1. Csúszómód szimulációja

A Simulink-alapú szimuláció során a szűrőfűrész működését 3 másodperces időtartamon, 10^{-6} másodperces integrálási lépéssel, Euler-módszerrel modelleztem. A csúszómód-szabályozás hatását a szögsebesség és áramfelvétel viselkedésén keresztül vizsgáltam. A 5.1. ábra szerint a kompenzálatlan modell gyorsan, áramcsúccsal éri el az üzemi fordulatszámot, míg a csúszómód-szabályozás lassabb sebességnövekedést, de jelentősen csökkentett áramcsúcsot eredményez. A kompenzált modell csúcsárama közel felére csökken a



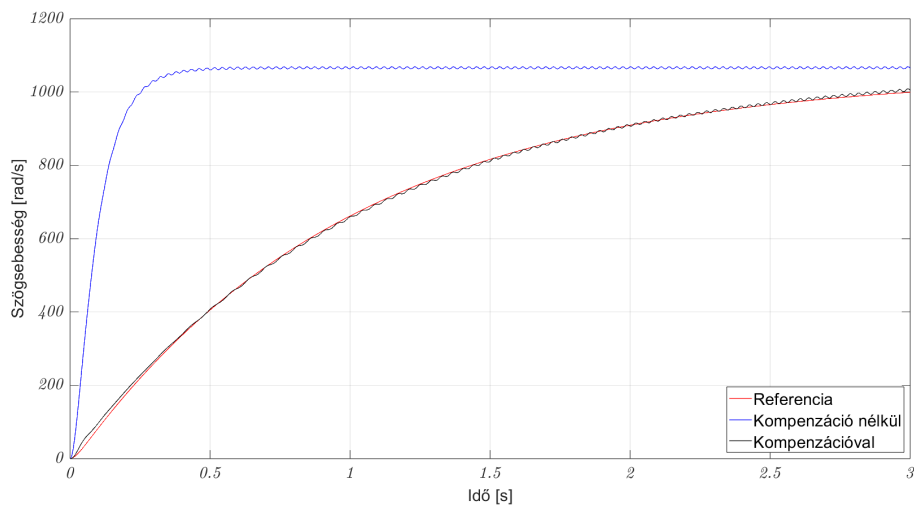
5.1. ábra. Szögsebesség-idő diagram.

kompenzálatlan modellhez képest, így csökkentve a motor tekercselésében fellépő hőterhelést és növelve az élettartamot. A szimuláció során az alulmodellezett dinamika hatásai is megfigyelhetők, amelyek eltéréseket okozhatnak a referencia modell és a valós rendszer viselkedése között, extrém esetben instabilitáshoz vezetve. A pontos állapotbecslés és a megfelelő skálázási tényező kritikus a stabil működés fenntartásához.

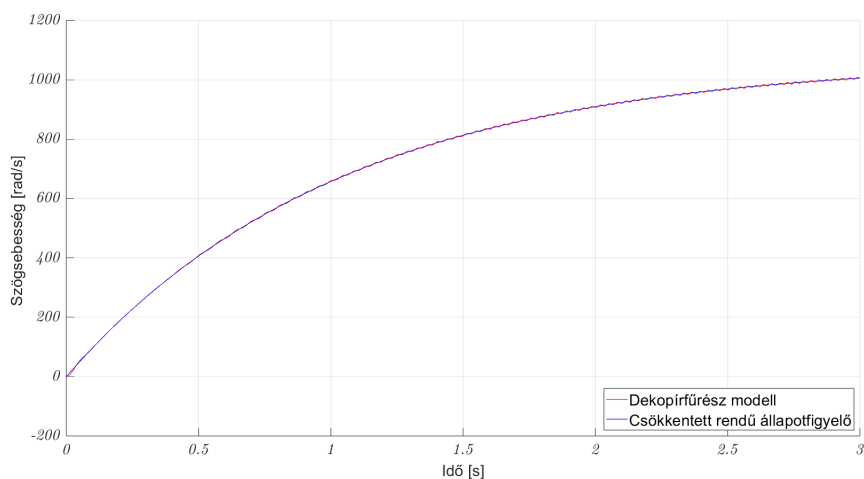
5.2.2. Csúszómód szimuláció csökkentett rendű állapotfigyelővel

A csökkentett rendű állapotfigyelő kétrétegű megfigyelési stratégiát alkalmaz. Az első réteg a főbb állapotváltozók (pl. szögsebesség, áram) becslését végzi, míg a második a nemlineáris és alulmodellezett dinamika hatásait kompenzálja. A megfigyelő célja, hogy stabil és pontos becslést adjon a rendszer állapotairól, miközben csökkenti a magas frekvenciájú oszcillációkat és a becslési hibát. A szimuláció eredményei szerint a csökkentett rendű megfigyelő alkalmazása jelentősen javítja a szögsebesség-választ (5.2. ábra), csökkenti az áramcsúcsot és az ingadozásokat. A kimeneti jelek összehasonlítását a 5.3 ábra

mutatja, ahol a becsült szögsebesség (kék) jól követi a nemlineáris modell szögsebességét (piros), jelentősen csökkentve az oszcillációkat. Összefoglalva, a csökkentett rendű



5.2. ábra. Szögsebesség-idő diagram csökkentett rendű állapotfigyelővel.



5.3. ábra. A becsült és a valós szögsebesség közötti eltérés.

állapotfigyelő alkalmazása csökkenti az áram- és szög-sebesség-oszcillációkat, javítja a szabályozási pontosságot és növeli a rendszer stabilitását. A megfigyelő különösen hatékony az alulmodellezett dinamika és a nemlineáris mechanikai hatások kompenzálásában, ezzel hozzájárulva a hosszabb élettartamhoz és energiahatékony működéshez.

6. 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 állapottér 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].

7. Fejlesztési lehetőségek

A disszertációban bemutatott mérőrendszer, modellezési módszertan és szabályozási koncepció kiindulópontként szolgál a kézi szűrőfűrészek működésének mélyebb megértéséhez és optimalizálásához. A jövőbeni fejlesztések több irányban is előmozdíthatják a rendszer pontosságának, megbízhatóságának és általánosíthatóságának növelését.

A mérőrendszer továbbfejlesztése szempontjából kiemelten fontos a dinamikai tulajdonságok javítása. A kísérleti eredmények azt mutatták, hogy a rendszerben előforduló negatív vágóerők és oszcillációk részben a pad és az erőmérő egység rugalmas deformációiból erednek. Ennek mérséklésére célszerű lenne a konstrukció merevítése, valamint a rugalmassági és lengési jellemzők kísérleti úton történő azonosítása, modellbe illesztése és kompenzálása. Egy pontosabban kalibrált és csillapított rendszer hozzájárulhat a vágóerő-ingadozások valós fizikai hátterének megbízhatóbb feltárásához.

A szerszámkopás hatása jelenleg tapasztalati úton került becslésre, azonban a kopás objektív nyomon követéséhez a jövőben érzékelőkkel támogatott automatikus elhasználódás-monitorozás bevezetése lenne célszerű. A kopás előrejelzése például a vágóerő vagy a motoráram frekvenciaelemzésével, prediktív módszerekkel történhetne, amely a karbantartások időzítését és a mérési konzisztenciát is javítaná.

A modell oldalán indokolt a fajlagos vágóerő számításának további pontosítása több anyagra vonatkozóan. A jelenlegi vizsgálatok tölgyfára adnak részletes térképdiagramot, azonban a Metamid (PA6) és az akácfa esetén is szükséges a szögsebesség- és előtolás-függő tartományok feltérképezése. Ez lehetővé tenné az anyagspecifikus optimalizálást, és választ adhatna arra a bírálói kérdésre, hogy milyen mértékben befolyásolja az anyag típusa a motor szögsebesség-csökkenését.

A szabályozási oldalon a csúszómód-szabályozás továbbfejlesztése adaptív vagy gépi tanulás-alapú algoritmusok irányába vihető el. Az intelligens vezérlés képes lehet a működési paramétereket a vágási ellenállás és az energiafogyasztás alapján valós időben optimalizálni, meghosszabbítva ezzel az akkumulátor üzemidejét és a szerszám élettartamát.

Összességében a mérőrendszer fizikai és szoftveres fejlesztése, az anyagvizsgálatok kiterjesztése és az automatizált kiértékelés bevezetése révén olyan komplex, adaptív és megbízható rendszer valósítható meg, amely a kézi szűrőfűrészek ipari alkalmazásait is támogatni képes.

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.
- [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.

Irodalomjegyzék

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] U. Oberst, The Fast Fourier Transform, *SIAM Journal on Control and Optimization* 46 (2) (2007) 496–540. doi:10.1137/060658242.
- [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] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.

- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.