A PID szabályozók szerepe és korlátai a drónirányításban

Kiss Barnabás*. Dr. Ballagi Áron**
Prof. Dr. Kuczmann Miklós***

**Zalaegerszegi Innovációs Park, Széchenyi István Egyetem, 9026 Győr, Egyetem tér 1., Magyarország, (Tel: +36 30 198 4846; e-mail: kiss.barnabas@ga.sze.hu).*
*** Automatizálási és Mechatronika Tanszék, Gépészmérnöki, Informatikai és Villamosmérnöki Kar, Széchenyi István Egyetem, 9026 Győr, Egyetem tér 1., Magyarország, (e-mail: ballagi@sze.hu).*
**** Teljesítményelektronika és Villamos Hajtások Tanszék, Audi Hungária Járműmérnöki Kar, Széchenyi István Egyetem, 9026 Győr, Egyetem tér 1., Magyarország, (e-mail:kuczmann@sze.hu).*

Absztrakt: A pilóta nélküli légi járművek (UAV-Unmanned Aerial Vehicle) irányításában a PID (Proporcionális-Integráló-Differenciáló) szabályozók alkalmazása továbbra is széles körben elterjedt, köszönhetően egyszerű felépítésüknek és könnyű hangolhatóságuknak. Ugyanakkor számos kutatás rámutat ezen szabályozók korlátaira, mint például a zavartűrés hiánya, a modellbizonytalanságokkal szembeni érzékenység és a korlátozott robusztusság. A jelen tanulmány célja a PID szabályozók UAV-kban való alkalmazásával kapcsolatos szakirodalom áttekintése, különös figyelmet fordítva a felmerülő hátrányokra, valamint az ezek kiküszöbölését célzó alternatív megoldások – például robusztus és prediktív szabályozók – bemutatására.

1. BEVEZETÉS

A pilóta nélküli légi járművek (UAV-Unmanned Aerial Vehicle) alkalmazása világszerte növekszik, többek között mezőgazdasági (pl. permetezés, területmegfigyelés) (Hussein és mtsai., 2021; Zaheer és mtsai., 2016; Hafeez és mtsai., 2023), közlekedési (pl. forgalomfigyelés, vezetői viselkedés elemzése) (Niu és mtsai., 2018; Khan és mtsai., 2017; Kiss és mtsai., 2024), valamint tengeri közlekedési területeken is hasznosítják őket (Kiss és mtsai., 2024; Gorobetz és mtsai., 2015). UAV-kat alkalmaznak az épületellenőrzésben, mentési műveletekben és infrastrukturális vizsgálatokban is (Hussein és mtsai., 2021; Seth és mtsai., 2023; Choi és mtsai., 2023). Az egyre bővülő alkalmazási körök miatt nő az igény az UAV-k autonóm működésére is, például területvédelmi célú alkalmazás során, drónfészkekből történő automatikus felszállással és behatolók azonosításával (Hoang, 2023; Stuhne és mtsai., 2023; Grlj és mtsai., 2022; Werber és mtsai., 2023; Dampage és mtsai., 2021).

Egyes tanulmányok autonóm előfutár drónok alkalmazását javasolják sürgősségi járművek előtt, amelyek képesek veszélyhelyzetek előrejelzésére és elkerülésére (Nagy és mtsai., 2021; Bauer és mtsai., 2023; Hiba és mtsai., 2022). Az autonóm rendszerek előnye, hogy csökkentik az emberi hibából eredő balesetek kockázatát, például a távpilóták fáradtsága vagy figyelmetlensége esetén (Rahmani és Weckman, 2023; Arrabito és mtsai., 2020). Ugyanakkor technikai hibák is gyakran okoznak baleseteket, Ausztráliában ezek aránya 60% (Ghasri és Maghrebi, 2021), míg Hangzhou városában a repülési adatok elemzése alapján a balesetek fő oka az alacsony akkumulátor-töltöttség és rendszerhibák voltak (Han és mtsai., 2022). Ezek alapján redundáns rendszerek alkalmazását javasolják. Az autonóm rendszerek fejlesztése multidiszciplináris tudást igényel (Bianchi és mtsai., 2023).

A szabályozástechnikai megoldások közül a PID (Proporcionális-Integráló-Differenciáló) szabályozók a legelterjedtebbek, alkalmazási arányuk az UAV-k esetében 90–97% (Ezhil és mtsai., 2022; Basil és Marhoon, 2023). Egyszerűségük és könnyű hangolhatóságuk miatt népszerűek, azonban számos tanulmány rámutat a hátrányaikra, amelyek például a zavartűrés hiánya, stabilitási problémák, alacsony robusztusság, valamint a modellbizonytalanságokra és környezeti zavarokra való érzékenység (Amertet és mtsai., 2024; Lee és Lee, 2023; Abdelmaksoud és mtsai., 2020; Sai és mtsai., 2023). Ezért napjainkban a kutatások egyre inkább a robusztusabb megoldások, például csúszó módú szabályozók (SMC-Sliding Mode Control) (Ahmed és mtsai., 2015), illetve modell prediktív szabályozók (MPC-Model Predictive Control) (Say és mtsai., 2021) irányába fordulnak, amelyek hatékonyabb irányítást kínálnak nemlineáris környezetben és zavaró tényezők mellett is.

A jelen tanulmány célja, hogy áttekintést adjon a meglévő szakirodalom alapján a PID szabályozók UAV-kban való alkalmazásáról, különös tekintettel azok hátrányaira. Ennek érdekében olyan kutatásokat foglal össze, amelyek a PID szabályozók korlátaival és azok kiküszöbölésének lehetőségeivel foglalkoznak a drónirányítási rendszerekben.

2. A PID SZABÁLYOZÓ MŰKÖDÉSE ÉS ALAPELVEI UAV-RENDSZEREKBEN

A PID szabályozók a drónirányításban elsődlegesen a három tengely – hosszirányú billenés (pitch), keresztirányú billenés (roll) és elfordulás (yaw) – menti stabilizálásban, valamint a

magasságtartásban játszanak kulcsszerepet (Shi, 2024; Lopez-Sanchez és Moreno-Valenzuela, 2023). A szabályozás alapja a kívánt és aktuális érték közötti hiba, amelyet a P (proporcionális), I (integráló) és D (deriváló) tagok kombinációja alapján korrigál a rendszer. A P tag gyors reakciót biztosít, az I tag hosszú távon megszünteti az állandósult hibát, míg a D tag a jövőbeli változásokat előre jelezve csökkenti a túllövést és javítja a stabilitást (Shi, 2024). A PID szabályozó a szenzorok – jellemzően gyorsulásmérők, giroszkópok, barométerek és globális helymeghatározó rendszer (GPS-Global Positioning System) – adatai alapján számítja a szükséges motorfordulatszámokat, így valósítva meg a kívánt mozgás- és pozíciószabályozást (Ezhil és mtsai., 2022; Noordin és mtsai., 2023). A szabályozók architektúrája gyakran többhurokú, ahol a belső hurok (attitűd szabályozás) gyorsabb dinamikával működik, míg a külső hurok (pozíciószabályozás) lassabb, de pontosabb pályakövetést tesz lehetővé (Lopez-Sanchez és Moreno-Valenzuela, 2023). A klasszikus PID algoritmus egyszerűsége miatt különösen jól implementálható mikrokontrollereken, például Arduino-n vagy Pixhawk-on, és az alacsony számítási igénye miatt széles körben alkalmazzák kereskedelmi UAV-rendszerekben is (Lopez-Sanchez és Moreno-Valenzuela, 2023; Cetinsaya és mtsai., 2024).

3. A PID SZABÁLYOZÁS ELŐNYEI ÉS IPARI ALKALMAZHATÓSÁGA

A PID szabályozás egyik legnagyobb előnye a rendszertechnikai egyszerűség és az ebből fakadó gyors implementálhatóság, amely alkalmassá teszi a módszert többek között valós idejű drónirányítási feladatokban történő alkalmazásra (Shi, 2024; Lopez-Sanchez és Moreno-Valenzuela, 2023). A szabályozó algoritmusa könnyen érthető, programozható és kis számítási igényű, így alacsony teljesítményű mikrokontrollereken (Arduino UNO) is megbízhatóan működtethető (Ezhil és mtsai., 2022). Ennek következtében a PID mára az ipari szabályozások körülbelül 97%-ában megtalálható, beleértve az UAV-ok stabilizálási és pályakövetési rendszereit is (Ezhil és mtsai., 2022; Cetinsaya és mtsai., 2024).

A PID algoritmus alkalmazása általában kedvező árú és könnyen hozzáférhető hardverelemekkel, szenzorokkal is megvalósítható.
Ezhil és munkatársai (2022) például egy kefe nélküli egyenáramú (BLDC-Brushless DC) motorral, 30A-es elektronikus fordulatszám-szabályozóval, MPU6050 típusú érzékelőmodullal és Arduino UNO-val felépített UAV-prototípuson vizsgálták a klasszikus PID szabályozás hatékonyságát. A kísérleti rendszer képes volt a dőlésszög (roll/pitch) stabilizálására, és zavarás után 20 másodpercen belül újra egyensúlyba hozta a drónt. A stabilizáció hatékonysága kisebb zavaró hatás esetén 97%, míg nagyobb szélzavarás mellett 70–80% volt, amely eredmények jól mutatják a PID gyakorlati alkalmazhatóságát (Ezhil és mtsai., 2022).

A PID szabályozók további előnye, hogy könnyen kombinálhatók más, fejlettebb technikákkal – például fuzzy logikával vagy optimalizáló algoritmusokkal – így hibrid rendszerek alapját is képezhetik (Amertet és mtsai., 2024; Yoon és Doh, 2022). Bár a paraméterhangolásuk manuálisan időigényes lehet, a szabályozók egyszerűsége miatt az UAV-fejlesztés kezdeti szakaszában szinte minden esetben alapértelmezett irányítási megoldásként szolgálnak (Lopez-Sanchez és Moreno-Valenzuela, 2023).

4. A KLASSZIKUS PID SZABÁLYOZÓK KORLÁTAI DRÓNIRÁNYÍTÁSBAN

Bár a PID szabályozás a drónirányítás egyik legismertebb és leggyakrabban alkalmazott módszere, jelentős korlátokkal rendelkezik, különösen a valós, turbulens és nemlineáris repülési környezetekben (Shi, 2024; Lopez-Sanchez és Moreno-Valenzuela, 2023). A drónok nemlineáris és egymással szorosan összefüggő (erősen csatolt) dinamikával rendelkeznek, ahol egy bemeneti változtatás több kimeneti jellemzőt is befolyásolhat egyszerre. Emellett a rendszer viselkedése időben is változik, amit a klasszikus lineáris PID szabályozók nem képesek pontosan lekövetni. Shi (2024) hangsúlyozza, hogy a PID nem alkalmas a változó terhelések, széllökések vagy gyors irányváltások okozta dinamikai hatások kompenzálására, különösen akkor, ha a rendszer nem rendelkezik megfelelő előrelátással vagy adaptív képességgel.

Tehát a zavarérzékenység is a PID egyik komoly gyengesége. Ezhil és munkatársai (2022) kísérleti eredményei szerint egy Arduino-alapú UAV-prototípus zavarás utáni stabilizálási ideje körülbelül 20 másodperc volt, kisebb zavarások mellett 97%-os stabilitási arányt mutatott, azonban nagyobb szélzavarás esetén ez csak 70–80%-ra csökkent. Ez jól példázza, hogy bár kiszámítható környezetben a PID hatékony lehet, valós külső hatásokkal szemben nem mindig elég robusztus.

A PID szabályzók paraméterhangolása is jelentős kihívást jelent, mivel a folyamat nemcsak időigényes, hanem instabil működéshez is vezethet, ha nem megfelelően történik. A Ki integráló erősítő tag hajlamos arra, hogy tartós hibajel esetén túlzott mértékben felhalmozza a szabályozási eltérést (ezt a jelenséget idegen szóval integral windup-nak nevezzük), amely zavarás után instabilitást vagy lassú visszatérést eredményezhet (Shi, 2024; Yoon és Doh, 2022). A hangolás referenciafüggősége szintén problémát jelenthet komplex UAV-műveletek során. Ma'arif és Setiawan (2021) egy integrál állapot-visszacsatolású (ISF-Integral State Feedback) és PID szabályozó teljesítményét hasonlították össze. Eredményeik szerint az ISF szabályozó 0,855 másodperc alatt érte el a kívánt értéket 0%-os túllövéssel, míg a PID több másodperccel lassabb válaszidőt, túllövést és ingadozó válaszkarakterisztikát mutatott.

A PID szabályozás nem adaptív jellege szintén komoly korlátot jelent. Mien és munkatársai (2024) tanulmányukban hat szabadságfokú kvadkopter stabilizálására alkalmaztak kaszkád PID-szerkezetet, mely szimulációs környezetben 20% alatti túllövéssel és közel nulla beállási hibával működött. Ugyanakkor megállapították, hogy a szabályozó kizárólag kisebb zavarások esetén biztosít megfelelő válaszidőt és

stabilitást, nagyobb zavarások hatására a PID-paraméterek újrahangolása szükséges. A szerzők ezért javasolják a jövőben intelligens vagy nemlineáris szabályozási módszerek alkalmazását a robusztusság növelése érdekében (Mien és mtsai., 2024).

Hasonló eredményeket mutatott Alrawi és munkatársai (2024) vizsgálata, amelyben a PID szabályozó 18%-os túllövést, 8 másodperces beállási időt, valamint 0.3 állandósult hibát produkált. Ezzel szemben a gyors kapcsolási logikát alkalmazó szabályozó (HSSC-High-Speed Switching Controller) túllövés nélkül, 1.1 másodperc alatt stabilizálta a rendszert. A tanulmány arra hívja fel a figyelmet, hogy a PID nem képes hatékonyan kezelni a gyorsan változó terhelési és környezeti zavarokat.

Lopez-Sanchez és Moreno-Valenzuela (2023) áttekintő tanulmánya szerint a fix paraméterekkel dolgozó PID rendszerek gyakran nem tudnak alkalmazkodni a repülés során bekövetkező változásokhoz. A szerzők szerint a PID csak bizonyos, zavarmentes körülmények között biztosít stabil működést, és nemlineáris vagy időben változó dinamikák esetén csak hibrid, adaptív vagy intelligens kiegészítéssel válik hosszú távon megbízható szabályozóvá.

Çaska (2024) tanulmánya is megerősíti ezeket a megállapításokat. Tanulmányában a klasszikus PID és az optimalizált tört rendű PID szabályozót (FOPID-Fractional Order PID) hasonlította össze egy új, szimbolikus diszkrét szabályozási módszerrel (SDCS-Symbolic Discrete Controller Synthesis). Az eredmények szerint a PID-alapú szabályozók túllövéssel, hosszabb beállási idővel és állandósult hibával működtek, míg az SDCS pontosabb, gyorsabb és túllövésmentes irányítást biztosított a kvadkopter nemlineáris modelljén, rámutatva ezzel a PID szabályozók gyakorlati korlátaira komplex UAV-környezetben (Çaska, 2024).

5. ALTERNATÍV ÉS TOVÁBBFEJLESZTETT PID-ALAPÚ MEGKÖZELÍTÉSEK

A klasszikus PID szabályozók korlátainak kiküszöbölésére az elmúlt években számos továbbfejlesztett és alternatív PID-alapú megközelítés született, amelyek célja a robusztusság, alkalmazkodóképesség és szabályozási pontosság javítása dinamikusan változó UAV-környezetekben. Az egyik legelterjedtebb fejlesztési irány az önadaptív PID szabályozás, ahol a PID erősítési paraméterek (Kp, Ki, Kd) automatikusan változnak a szenzoradatok vagy környezeti zavarások függvényében (Shi, 2024; Noordin és mtsai., 2023). Ez lehetővé teszi, hogy a szabályozás valós időben reagáljon például a tömeg vagy szélerősség változásaira, csökkentve a túlkompenzáció és instabilitás esélyét.

A fuzzy logikával kombinált PID rendszerek szintén jelentős előrelépést jelentenek. Ezek a megoldások nem pontos matematikai modellekre, hanem szabályalapú következtetésre támaszkodnak, így jól kezelik a bizonytalan, változó vagy nehezen modellezhető környezeti és rendszerjellemzőket (Amertet és mtsai., 2024). Amertet és munkatársai mezőgazdasági UAV-alkalmazásban mutatták ki, hogy a fuzzy PID szabályozó átlagosan 11–44%-kal javította a magasság-, sebesség- és oldalirányú dőlés szabályozását a klasszikus PID-hez képest. A rendszer valós időben, online módosította a PID paramétereket fuzzy logikai szabályok alapján, így fokozott alkalmazkodóképességet mutatott zajos és zavaró környezetben.

Egy másik fejlesztési irány a már említett FOPID szabályozó, amely lehetővé teszi az integráló és deriváló műveletek tört rendű kiterjesztését. Ezáltal finomabb hangolás és nagyobb szabályozási rugalmasság érhető el nemlineáris UAV-rendszerekben (Rosmadi és mtsai., 2024). A Tello EDU típusú kvadrotoron végzett kísérletek szerint a FOPID minden zavarási forgatókönyv esetén stabilabb és gyorsabb visszatérést biztosított a célállapothoz, mint a klasszikus PID, például a propeller sérülése esetén is.

A mesterséges intelligencia és a gépi tanulás eszközei – például a hosszú-rövid távú memóriával rendelkező neurális hálózatok (LSTM-Long Short-Term Memory), genetikus algoritmusok (GA-Genetic Algorithm), Firefly algoritmus és részecske-raj alapú optimálás (PSO-Particle Swarm Optimization) – egyre gyakrabban jelennek meg a PID paraméterek optimalizálásában (Yoon és Doh, 2022; Tweh és mtsai., 2023; Da Fonseca és mtsai., 2024). Yoon és Doh (2022) például LSTM és NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II) segítségével optimalizálták a PID szabályozót, amelynek eredményeként a stabilizációs idő 64,99 másodpercről 1,99 másodpercre csökkent, azaz 96,9%-os javulást értek el. A tanuló algoritmus által optimalizált szabályozás nemcsak gyorsabb, hanem kisebb túllövéssel és nagyobb stabilitással működött.

Valós idejű megvalósítások terén Noordin és munkatársai (2023) egy adaptív PID (APID-Adaptive PID) és egy fuzzy kompenzátorral kiegészített (APIDFC-Adaptive PID with Fuzzy Compensator) rendszert valósítottak meg egy minidrónon. A valós repülési tesztek kimutatták, hogy ezek a fejlettebb szabályozók 2–4%-kal kevesebb energiát fogyasztottak, valamint a tömegváltozásra adott válaszban 45-46%-os javulást mutattak a klasszikus PID-hez képest.

Ezek a fejlettebb PID-alapú szabályozási módszerek számottevően hozzájárulnak a pilóta nélküli légi járművek stabilabb, pontosabb és megbízhatóbb működéséhez, különösen olyan helyzetekben, amikor a környezet nem állandó, vagy a manőverek nagy sebességű és precíz reakciót igényelnek. A jövőben várhatóan a PID nem önálló megoldásként, hanem hibrid, intelligens rendszerek részeként tölti be szerepét a fejlett UAV-irányításban.

6. ÖSSZEHASONLÍTÁS EGYÉB SZABÁLYOZÁSI MÓDSZEREKKEL

A PID szabályozók megbízhatóságuk és egyszerű implementációjuk ellenére nem minden esetben biztosítanak megfelelő teljesítményt, különösen nemlineáris és dinamikusan változó UAV-környezetben. Ahogy az a 4. fejezetben részletesen bemutatásra került, a PID-szabályozás érzékenyen reagál a zavarásokra, nehezen hangolható, és korlátozott alkalmazkodóképességgel bír.

A 4. fejezetben már röviden bemutatásra került Ma'arif és Setiawan (2021) munkája, amelyben a hagyományos PID és ISF szabályozó teljesítményét vizsgálták egy DC motor szögsebességének szabályozásán keresztül. Az ISF szabályozó 0% túllövést, gyorsabb válaszidőt (0,855 s) és stabilabb karakterisztikát biztosított, míg a PID teljesítménye eltérő referenciaértékek mellett nem volt egyenletes, és érzékenyen reagált a kis bemeneti változásokra is. Az ISF előnye, hogy minden állapotváltozót figyelembe vesz, így teljesebb képet nyújt a rendszer belső dinamikájáról.

Amint az a 4. fejezetben is említésre került, Alrawi és munkatársai (2024) egy klasszikus PID és egy HSSC összehasonlítását végezték el UAV-környezetben. A PID szabályozó bár gyors kezdeti válaszidőt mutatott (0,6 s), jelentős túllövést (18%), hosszú beállási időt (8 s) és állandósult hibát (0,3) produkált. Ezzel szemben a HSSC túllövés nélküli, gyors (1,1 s) és pontos szabályozást biztosított, amely jól reagált külső zavarásokra és terhelésváltozásra. Az eredmények alapján a HSSC energihatékonyabb és robusztusabb, mint a PID.

Több tanulmány rámutatott arra is, hogy a PID szabályozók nem érik el a kívánt teljesítményt olyan fejlettebb módszerekkel szemben, mint a Lineáris Kvadratikus szabályozó (LQ-Linear Quadratic), az MPC, az SMC vagy a mesterséges intelligencián alapuló szabályozók. Ezek közül több (például az MPC és a mesterséges intelligencia alapú módszerek) képes előre jelezni a rendszer jövőbeli állapotait, illetve komplex célfüggvények egyidejű optimalizálására is alkalmasak. Ezen megközelítések robusztusabban reagálnak a változó környezeti feltételekre, nagyobb pontosságot, stabilitást és energiahatékonyságot biztosítva a dinamikus UAV-irányításban (Cetinsaya és mtsai., 2024; Yoon és Doh, 2022).

Cetinsaya és munkatársai (2024) átfogó áttekintő tanulmánya szerint a kereskedelmi UAV-rendszerek többsége továbbra is klasszikus PID szabályozót alkalmaz, azonban egyre erőteljesebb trend figyelhető meg az intelligens, adaptív és hibrid szabályozási rendszerek térnyerésére. A PID szabályozóval kapcsolatos kutatások száma csökkenő tendenciát mutat, míg a fuzzy logika, neurális hálózatok, megerősítéses tanulás és rajintelligencia alapú módszerek egyre inkább előtérbe kerülnek. A tanulmány szerint a jövő szabályozási megközelítései egyre inkább az alkalmazkodás, predikció és energiahatékonyság szempontjaira épülnek.

A fenti eredményeket alátámasztja a 4. fejezetben említett Çaska (2024) tanulmánya is, amelyben a klasszikus PID és optimalizált FOPID szabályozókat vetette össze SDCS módszerrel. A különféle mozgásirányokra vonatkozó kísérletekben az SDCS minden esetben rövidebb beállási időt (pl. 1,4 s), nulla túllövést és állandósult hiba mentes működést biztosított, míg a legjobb FOPID megoldások is túllövést (pl. 0,965%) és több másodperces stabilizálási időt (pl. 2,374 s) produkáltak. Az eredmények rávilágítanak arra, hogy a PID-alapú szabályozások – még optimalizálva is – elmaradnak a fejlettebb szabályozási megközelítésektől a kvadkopterek nemlineáris dinamikájának kezelésében (Çaska, 2024).

Összességében az irodalom alapján egyértelmű, hogy a PID szabályozók önmagukban nem minden esetben kielégítőek a komplex UAV-rendszerekhez. Bár egyszerűségük miatt kiváló kiindulópontot képeznek, a magasabb szintű teljesítmény és robusztusság eléréséhez elengedhetetlen azok kombinálása fejlettebb szabályozási stratégiákkal.

7.KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JÖVŐBELI IRÁNYOK

Ahogy azt a korábbi fejezetek is részletesen bemutatták, a PID szabályozók napjainkban is meghatározó szerepet töltenek be az UAV-rendszerek irányításában, különösen az egyszerűségük, gyors implementálhatóságuk és ipari elterjedtségük miatt (Lopez-Sanchez és Moreno-Valenzuela, 2023; Cetinsaya és mtsai., 2024). Ugyanakkor az elmúlt évek kutatásai világossá tették, hogy a klasszikus PID megközelítés önmagában nem elegendő a modern, zavarokkal teli és dinamikus repülési környezetekhez (Shi, 2024; Alrawi és mtsai., 2024).

Több tanulmány hangsúlyozza, hogy a jövő hatékony UAV-irányítása hibrid rendszerekben rejlik, ahol a PID szabályozást fuzzy logikával, gépi tanulással vagy prediktív algoritmusokkal kombinálják (Amertet és mtsai., 2024; Yoon és Doh, 2022). A jövőbeli kutatások egyik kulcsterülete az állapotbecslés integrálása, például Kálmán-szűrőkkel vagy neurális hálózatokkal, valamint a többcélú szabályozás – például pozíció, energiahatékonyság és stabilitás egyidejű optimalizálása (Ma'arif és Setiawan, 2021; Rosmadi és mtsai., 2024).

Összességében a PID továbbra is hasznos alapot jelent a UAV-irányításban, de a jövőben várhatóan intelligens, önalkalmazkodó és hibrid formában tölti be legjobban szerepét a komplex UAV-környezetekben (Cetinsaya és mtsai., 2024).

8.KONKLÚZIÓ

Az irodalmi áttekintés alapján jól látható, hogy a PID szabályozók továbbra is széles körben alkalmazott és megbízható eszközei a drónirányításnak, különösen az egyszerűség, az alacsony számítási igény és a gyors implementálhatóság miatt. Ugyanakkor a vizsgált tanulmányok egyértelműen rámutatnak arra, hogy a klasszikus PID szabályozás nem képes megfelelően kezelni a nemlineáris UAV-dinamikát, a zavarérzékenységet és a változó környezeti feltételeket. A fejlettebb megközelítések – mint például az önhangoló PID, fuzzy-PID, FOPID vagy gépi tanulással optimalizált szabályozók – jelentős előrelépést kínálnak a robusztusság, stabilitás és válaszidő tekintetében.

A szerzők a PID szabályozás korlátainak gyakorlati megértése és kiküszöbölése érdekében egy kvadkopter magasságszabályozására alkalmas drón prototípus modell fejlesztésén dolgoznak. A rendszer célja, hogy tesztkörnyezetet biztosítson a klasszikus PID, az erősítésütemezett PID (GS-PID-Gain-Scheduled PID), az MPC szabályozó, valamint a H-végtelen (H∞-H-infinity) szabályozó gyakorlati összehasonlítására. A vizsgálatok fő fókuszpontjai a robusztusság, stabilitás és teljesítmény, különös tekintettel arra, hogy az egyes szabályozók mely

mértékben biztosítanak pontos szabályozást alacsonyabb energiafogyasztás mellett. A kutatás célja olyan szabályozási megoldás azonosítása, amely nemcsak elméletben, hanem valós körülmények között is megfelel a modern UAV-rendszerekkel szemben támasztott követelményeknek.

HIVATKOZÁSOK

Abdelmaksoud, S.I.; Mailah, M.; Abdallah, A.M. (2020). Control strategies and novel techniques for autonomous rotorcraft unmanned aerial vehicles: A review. *IEEE Access,* **8**, 195142195169. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3031326

Ahmed, A.H.; Ouda, A.N.; Kamel, A.M.; Elhalwagy, Y.Z. (2015). Design and analysis of quadcopter classical controller. In: *Proceedings of the International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology (ASAT-16)*, Cairo, Egypt, 26–28 May 2015 (pp. 1–17). The Military Technical College. DOI: 10.21608/asat.2015.23032

Alrawi, A.A.A.; GRAOVAC, S.; Al Mashhadany, Y.; Algburi, S. (2024). Comprehensive Evaluation of Drone Control Systems—PID vs. High-Speed Switching Controllers. In: *2024 21st International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)* (pp. 444–450). IEEE. DOI: 10.1109/SSD61670.2024.10548942

Amertet, S.; Gebresenbet, G.; Alwan, H.M. (2024). Modeling of unmanned aerial vehicles for smart agriculture systems using hybrid fuzzy PID controllers. *Applied Sciences*, **14(8)**, 3458. DOI: 10.3390/app14083458

Arrabito, G.R.; Hou, M.; Banbury, S.; Martin, B.C.; Ahmad, F.; Fang, S. (2020). A review of human factors research performed from 2014 to 2017 in support of the Royal Canadian Air Force remotely piloted aircraft system project. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, **9(1)**, 1–20. DOI: 10.1139/juvs-2020-0012

Basil, N.; Marhoon, H.M. (2023). Towards evaluation of the PID criteria-based UAVs observation and tracking head within resizable selection by COA algorithm. *Results in Control and Optimization*, **12**, 100279. DOI: 10.1016/j.rico.2023.100279

Bauer, P.; Hiba, A.; Nagy, M.; Simonyi, E.; Kuna, G.I.; Kisari, Á.; Zarándy, Á. (2023). Encounter Risk Evaluation with a Forerunner UAV. *Remote Sensing*, **15(6)**, 1512. DOI: 10.3390/rs15061512

Bianchi, D.; Di Gennaro, S.; Di Ferdinando, M.; Acosta Lùa, C. (2023). Robust control of UAV with disturbances and uncertainty estimation. *Machines*, **11(3)**, 352. DOI: 10.3390/machines11030352

Çaşka, S. (2024). The Performance of Symbolic Limited Optimal Discrete Controller Synthesis in the Control and Path Planning of the Quadcopter. *Applied Sciences*, **14(16)**, 7168. DOI: 10.3390/app14167168

Cetinsaya, B.; Reiners, D.; Cruz-Neira, C. (2024). From PID to swarms: A decade of advancements in drone control and path planning—A systematic review (2013–2023). *Swarm and Evolutionary Computation*, **89**, 101626. DOI: 10.1016/j.swevo.2024.101626

Choi, H.W.; Kim, H.J.; Kim, S.K.; Na, W.S. (2023). An overview of drone applications in the construction industry. *Drones*, **7(8)**, 515. DOI: 10.3390/drones7080515

Da Fonseca, J.E.D.N.; Valente, L.C.L.; de Oliveira Evald, P.J.D. (2024). Optimizing PID Controllers of Drone-based Wind Turbine Inspection Systems using the African Vulture Algorithm. *In: 2024 16th Seminar on Power Electronics and Control (SEPOC)* (pp. 1–6). IEEE. DOI: 10.1109/SEPOC63090.2024.10747459

Dampage, U.; Thajudeen, R.; Jasenthuliyana, S.; Jayawardena, J. (2021). Automated virtual elephant fence based on detection, alarming, and coordinated redirection of wild elephants. *Environmental Monitoring and Assessment*, **193**, 1–14. DOI: 10.1007/s10661-021-09024-y

Ezhil, V.S.; Sriram, B.R.; Vijay, R.C.; Yeshwant, S.; Sabareesh, R.K.; Dakkshesh, G.; Raffik, R. (2022). Investigation on PID controller usage on Unmanned Aerial Vehicle for stability control. *Materials Today: Proceedings,* **66**, 1313–1318. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.05.134

Ghasri, M.; Maghrebi, M. (2021). Factors affecting unmanned aerial vehicles' safety: A post-occurrence exploratory data analysis of drones' accidents and incidents in Australia. *Safety Science*, **139**, 105273. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105273

Gorobetz, M.; Strupka, G.; Levchenkov, A. (2015). Algorithm for optimal energy consumption of UAV in maritime anti-collision tasks. In: *Proceedings of the 2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Latvia, 14–16 October 2015 (pp. 1–4). IEEE. DOI: 10.1109/RTUCON.2015.7343154

Grlj, C.G.; Krznar, N.; Pranjić, M. (2022). A decade of UAV docking stations: A brief overview of mobile and fixed landing platforms. *Drones*, **6(1)**, 17. DOI: 10.3390/drones6010017

Hafeez, A.; Husain, M.A.; Singh, S.P.; Chauhan, A.; Khan, M.T.; Kumar, N.; Soni, S.K. (2023). Implementation of drone technology for farm monitoring & pesticide spraying: A review. *Information Processing in Agriculture*, **10(2)**, 192–203. DOI: 10.1016/j.inpa.2022.02.002

Han, P.; Yang, X.; Zhao, Y.; Guan, X.; Wang, S. (2022). Quantitative ground risk assessment for urban logistical unmanned aerial vehicle (UAV) based on Bayesian network. *Sustainability*, **14(9)**, 5733. DOI: 10.3390/su14095733

Hiba, A.; Bauer, P.; Nagy, M.; Simonyi, E.; Kisari, A.; Kuna, G.I.; Drotar, I. (2022). Software-in-the-loop simulation of the forerunner UAV system. *IFAC-PapersOnLine*, **55(14)**, 139–144. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.07.596

Hoang, M.L. (2023). Smart Drone Surveillance System Based on AI and on IoT Communication in Case of Intrusion and Fire Accident. *Drones*, **7(12)**, 694. DOI: 10.3390/drones7120694

Hussein, M.; Nouacer, R.; Corradi, F.; Ouhammou, Y.; Villar, E.; Tieri, C.; Castiñeira, R. (2021). Key technologies for

safe and autonomous drones. *Microprocessors and Microsystems*, **87**. DOI: 10.1016/j.micpro.2021.104348

Khan, M.A.; Ectors, W.; Bellemans, T.; Janssens, D.; Wets, G. (2017). UAV-based traffic analysis: A universal guiding framework based on literature survey. *Transportation Research Procedia*, **22**, 541–550. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.03.043

Kiss, B.; Ballagi, Á.; Kuczmann, M. (2024). Overview Study of the Applications of Unmanned Aerial Vehicles in the Transportation Sector. *Engineering Proceedings*, **79(1)**, 11. DOI: 10.3390/engproc2024079011

Lee, H.W.; Lee, C.S. (2023). Research on logistics of intelligent unmanned aerial vehicle integration system. *Journal of Industrial Information Integration*, **36**, 100534. DOI: 10.1016/j.jii.2023.100534

Lopez-Sanchez, I.; Moreno-Valenzuela, J. (2023). PID control of quadrotor UAVs: A survey. *Annual Reviews in Control*, **56**, 100900. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2023.100900

Ma'arif, A., & Setiawan, N.R. (2021). Control of DC motor using integral state feedback and comparison with PID: simulation and arduino implementation. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, **2(5)**, 456–461. DOI: 10.18196/jrc.25122

Mien, T. L., Tu, T. N., & Van An, V. (2024). Cascade PID Control for Altitude and Angular Position Stabilization of 6-DOF UAV Quadcopter. *International Journal of Robotics & Control Systems*, **4(2)**. DOI: 10.31763/ijrcs.v4i2.1410

Nagy, M.; Bauer, P.; Hiba, A.; Gáti, A.; Drotár, I.; Lattes, B.; Kisari, Á. (2021). The Forerunner UAV Concept for the Increased Safety of First Responders. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems – VEHITS*, Online, 28–30 April 2021. DOI: 10.5220/0010408203620369

Niu, H.; Gonzalez-Prelcic, N.; Heath, R.W. (2018). A UAV-based traffic monitoring system—invited paper. In: *Proceedings of the 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Porto, Portugal, 3–6 June 2018 (pp. 1–5). IEEE. DOI: 10.1109/VTCSpring.2018.8417546

Noordin, A.; Mohd Basri, M.A.; Mohamed, Z. (2023). Real-time implementation of an adaptive PID controller for the quadrotor MAV embedded flight control system. *Aerospace*, **10(1)**, 59. DOI: 10.3390/aerospace10010059

Rahmani, H.; Weckman, G.R. (2023). Working under the Shadow of Drones: Investigating Occupational Safety Hazards among Commercial Drone Pilots. *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, **12(1–2)**, 55–67. DOI: 10.1080/24725838.2023.2251009

Rosmadi, N.H.B.; Bingi, K.; Devan, P.A.M.; Korah, R.; Kumar, G.; Prusty, B.R.; Omar, M. (2024). Fractional-Order Control Algorithm for Tello EDU Quadrotor Drone Safe Landing during Disturbance on Propeller. *Drones*, **8(10)**, 566. DOI: 10.3390/drones8100566

Sai, S.; Garg, A.; Jhawar, K.; Chamola, V.; Sikdar, B. (2023). A comprehensive survey on artificial intelligence for unmanned aerial vehicles. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*. DOI: 10.1109/OJVT.2023.3316181

Say, M.F.Q.; Sybingco, E.; Bandala, A.A.; Vicerra, R.R.P.; Chua, A.Y. (2021). A genetic algorithm approach to PID tuning of a quadcopter UAV model. In: *Proceedings of the 2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, Iwaki, Japan, 11–14 January 2021 (pp. 675–678). IEEE. DOI: 10.1109/IEEECONF49454.2021.9382697

Seth, A.; James, A.; Kuantama, E.; Mukhopadhyay, S.; Han, R. (2023). Drone high-rise aerial delivery with vertical grid screening. *Drones*, **7(5)**, 300. DOI: 10.3390/drones7050300

Shi, M. (2024). Application of PID Control Technology in Unmanned Aerial Vehicles. *Applied and Computational Engineering*, **96**, 24–30. DOI: 10.54254/2755-2721/96/20241327

Stuhne, D.; Vasiljević, G.; Bogdan, S.; Kovačić, Z. (2023). Design and Validation of a Wireless Drone Docking Station. In: *Proceedings of the 2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Warsaw, Poland, 6–9 June 2023 (pp. 652–657). IEEE. DOI: 10.1109/ICUAS57906.2023.10156589

Tweh, A.; Ataro, E.; Nyakoe, G. (2023). A novel congestion control scheme using firefly algorithm optimized fuzzy-pid controller in wireless sensor network. *International Journal of Electrical and Electronics Research*, **11(1)**, 44–53. DOI: 10.37391/ijeer.110107

Werber, Y.; Hareli, G.; Yinon, O.; Sapir, N.; Yovel, Y. (2023). Drone-mounted audio-visual deterrence of bats: implications for reducing aerial wildlife mortality by wind turbines. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, **9(3)**, 404–419. DOI: 10.1002/rse2.316

Yoon, J.; Doh, J. (2022). Optimal PID control for hovering stabilization of quadcopter using long short term memory. *Advanced Engineering Informatics,* **53**, 101679. DOI: 10.1016/j.aei.2022.101679

Zaheer, Z.; Usmani, A.; Khan, E.; Qadeer, M.A. (2016). Aerial surveillance system using UAV. *In: Proceedings of the 2016 Thirteenth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN),* Hyderabad, India, 21–23 July 2016 (pp. 1–7). IEEE. DOI: 10.1109/WOCN.2016.7759885