

Szabolcsi Róbert*

Humán operátorok tevékenységének matematikai modellezése

BEVEZETÉS, PROBLÉMAFELVETÉS

Az első gépek megjelenésével egyidejűleg felmerült annak szükségessége is, hogy az azokat kezelő, az egyes irányítási folyamatokban részt vevő embert, kezelőt, operátort írjuk le olyan matematikai modell segítségével, amely jól használható úgy a nyílt-, mint a zárt hatásláncú irányítási rendszerek tervezésénél, illetve vizsgálatánál. A tudományos kutatások e téren az 1950-es években gyorsultak fel, amikor már rendelkezésre álltak olyan érzékelők és adatgyűjtők, amelyek segítségével a regisztrált jeleket jól lehetett használni identifikációs célra.

E területen kiemelkedő helyet foglalt el a repülés, ahol a pilóták képzésében már 1929-ben elkezdődött a szimulátorok széles körű alkalmazása. Az első, meglehetősen kezdetleges szimulátorok még csak a pilótaképzés egyes fázisaiban segítettek a repülőoktatók munkáját, és a növendékek tanulási folyamatát.

Az 1950-es évektől már analóg, hibrid, majd digitális számítógépes rendszerekre épültek a szimulátorok, amelyek álló, vagy mozgó kabinjuk segítségével, egyre szofisztikáltabb látó rendszereket alkalmazva, nagyon élethű módon modellezték a repülőgép és a repülés egyes jellemzőit. E szimulátorok már nagy számban képesek a pilóták viselkedését jellemző mennyiségeket érzékelni, mérni, és identifikációs céllal archiválni.

A humán kezelők, operátorok tevékenységének matematikai leírása lehetővé teszi, hogy az „ember-gép” rendszerben ne csak a hardver elemekre támaszkodjunk, és erre korlátozzuk a rendszerek tervezését, hanem az „ember” részt is leírjuk, és adott esetben vegyük figyelembe az operátorok fizikai-mentális állapotát. Az irányítási rendszerekben tevékenykedő kezelők, operátorok alapvetően vizuális információt érzékelnek, és ezen információk alapján a korábban elsajátított és memorizált szabályrendszer alapján avatkoznak be a folyamatokba.

A folyamatosan fejlődő, modernizálódó haditechnikai eszközök és komplex haditechnikai rendszerek egyik sajátossága, hogy kezelőik egyre bonyolultabb irányítási feladatokat hajtanak végre, és ez – bármely fegyvernemről

legyen is szó – egyre magasabb szintű tudást és felkészültséget követel meg a kezelőktől.

A szerző célja, hogy bemutassa az operátorok, kezelők tevékenységének leírására szolgáló matematikai modelleket, valamint eme modellek segítségével igazolja az egyes operátorok fizikai-mentális állapotának megfelelő paraméterek hatását az általuk végzett tevékenységre. A matematikai modellek segítségével a szerző igazolja, hogy az egyes irányítási folyamatok vizsgálata során az operátorok modellezése lehetséges, és elengedhetetlenül szükséges.

TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK

A katonai repülés számos kihívása (pl. a földi célokra történő rácsapás, a levegő-levegő, illetve a levegő-föld osztályú rakéták célba juttatása, a légi lövészet, a zárt kötelékes repülés, a harci alakzatok tartása, a repülés bonyolult időjárás körülmények között stb.) arra inspirálta az [1] mű szerzőit, hogy a korábbi, már az 1940-es években elkezdett kísérletekre támaszkodva egzakt matematikai modellekkel írják le az operátorok tevékenységét, és viselkedését.

Ward [2] munkájában analóg számítógépeket használt az operátorok matematikai modellezésére. Áttörésként, és teljesen új megközelítésként foghatjuk fel a [3] munkát, ahol is a szerzők az operátort már a követő rendszer részeként vizsgálják, amelynek csak a modellje fontos, és elvonatkoztat a modell mögött álló személytől. E személet alapozta meg a jóval később bevezetett modellalapú rendszervizsgálatot és rendszertervezést.

McRuer et al. a [4] összegző munkájukban egy laboratóriumi kísérleti projektet írtak le, amelynek során a korábbi, a humán pilóta tevékenységének leírására használt matematikai modelleket, valamint azok vizsgálatának eredményeit validálták és verifikálták. Megerősítették a gyakorlatban használatos matematikai modellek helyességét, és alkalmazhatóságát.

Az [5] műben a szerző már egy konkrét szabályozási rendszerben vizsgálja az operátorok tevékenységét. E mű

ÖSSZEFOGLALÁS: Az „ember-gép” kapcsolat – az ember aktív részvétele úgy a nyílt, mint a zárt hatásláncú irányítási folyamatokban egyaránt – megköveteli, hogy ismerjük az ember, az operátor tevékenységének matematikai leírását. A tanulmány a humán operátorok tevékenységének matematikai leírásával, valamint e tevékenységet leíró dinamikus modellek vizsgálatával, és számítógépes analízisével foglalkozik.

KULCSSZAVAK: ember-gép kapcsolat, humán operátor, matematikai modellezés, számítógépes modellezés, minőségvizsgálat

ABSTRACT: The 'man-machine' relationship, the active participation of the human both in open or in closed loop control systems requires knowledge of the human activity, the knowledge of the mathematical models of the human operator. The article deals both with mathematical modelling of the human operators' activity and with their computer-aided simulation.

KEY WORDS: 'man-machine' relationship, human operator, mathematical modelling, computer simulation, performance analysis

* Prof. dr. habil. Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, tart. mk. ezredes, egyetemi tanár.
ORCID: 0000-0002-2494-3746

eredményei nagyban segítették az Apollo-űrprogramban részt vevő űrhajósok kiválasztását, és földi felkészítését. A szerző részletesen vizsgálta a zárt szabályozási rendszerekben tevékenykedő operátorok jellemzőit, és azok esetleges változásának hatását az egyes irányítási feladatok végrehajtásának hatékonyságára.

Az operátorok tevékenységének egy-, illetve többváltozós követő rendszerekben történő vizsgálata is nagyon fontos, hiszen a humán pilóták tevékenységére ez tipikusan jellemző. A [6] irodalom összefoglaló műként bemutatja a pilóták korábban identifikált matematikai modelljeit, és megadja azok részletes irányítástechnikai vizsgálatát.

A pilóták viselkedését az automatikus repülésszabályozó rendszerekben a [7], a [8], a [9] és a [10] irodalmak mutatják be részletesen. E művek vizsgálják többek között, hogy a légi járművek irányítási rendszerében tevékenykedő pilóta hogyan változtatja meg a teljes irányítástechnikai rendszer viselkedését, a stabilitását, és az egyéb irányítástechnikai dinamikai jellemzőit.

A szerző [11] munkájában részletesen foglalkozott az egyik leginkább bonyolult jelenség, a pilóták tevékenységének holtidejével, és a holtidő lineáris approximációjával. A légi járművek műszerei és navigációs műszerrendszereit a [12] könyv taglalja részletesen.

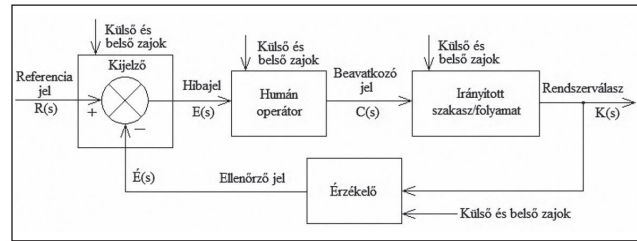
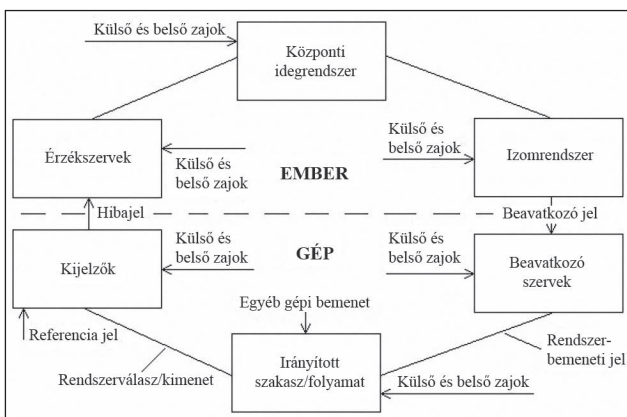
AZ „EMBER-GÉP” KAPCSOLAT

Az „ember-gép” kapcsolat két alapvető formáját különböztetjük meg. Az egyik esetben a műszaki rendszer vagy az irányítási folyamat teljesen automatizált, és az ember, mint egy felsőbb szintű döntéshozó *off-line* tevékenykedik, vagyis kívül helyezkedik el a rendszeren. Az ember az általa gyűjtött információ, és a megtanult szabályrendszer törvényei alapján, szükség esetén leállítja az irányítási folyamatot.

A másik esetben az ember *in-line* az irányítási folyamat része. Az „ember-gép” kapcsolat elvi ábrája ebben az esetben az 1. ábrán látható.

Az 1. ábra alapján elmondható, hogy az „ember-gép” kapcsolat, és így maga az irányítási folyamat is valós fizikai környezetben valósul meg. Az irányítási folyamat ez eltérés elve alapján működik: a rendszerbe bevitt referenciajelet különbségképző szerv hasonlítja össze az irányított folyamat megfelelő állapotváltozóival. A kijelzőn megjelenített hibajelet az ember (operátor) a látórendszerével érzékeli, majd a megtanult szabályrendszer alapján úgy avatkozik be az irányítási folyamatba, hogy a hibajelet zérus értéket

1. ábra. Az „ember-gép” rendszer elvi vázlata (A szerző szerkesztése)



2. ábra. Nullindikátor elvi vázlata (A szerző szerkesztése)

vegyen fel. Az irányítási folyamat nagyon fontos jellemzője, hogy a folyamat valós fizikai környezetben zajlik, így módon, úgy az „ember”, mint a „gép” alrendszer külső és belső zajjal terhelt, amelyek rendszerint sztochasztikus (véletlen) additív zavarjelek.

Maga az irányítási folyamat lehet egy-, vagy többváltozós is. Az egyváltozós szabályozási rendszerben (pl. a jármű sebességének stabilizálása) az operátor (pl. járművezető) rendszerint egy bemeneti jelet hoz létre. Ilyen és hasonló esetekben az operátor nem kell, hogy megossza a figyelmét, és csak az egyetlen hibajel értékét megszüntetésére koncentrálhat. (2. ábra)

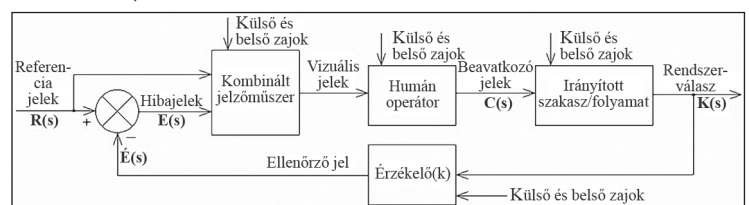
Többváltozós irányítási rendszerekben kettő, vagy több állapotváltozó változását is követnie és korigálnia kell az operátornak. Ilyen irányítási rendszer például a légi járművek félautomatikus leszállítása, amikor a repülőgép-vezető (hajózó) az ILS/MLS rendszer (Instrument Landing System/ Microwave Landing System – műszeres és mikrohullámú leszállítórendszer) két jelét (síklópálya egyenlő jelű zónájától mért szögeltérés, és az iránypálya egyenlő jelű zónájától mért eltérés), valamint a repülési sebességet, és a függőleges sebességet, valamint a repülési magasságot is irányítani kell.

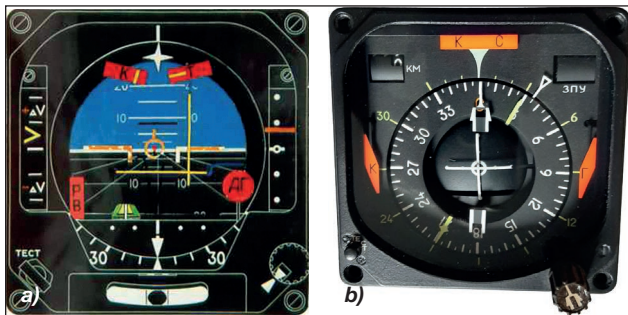
Könnyű belátni, hogy a többváltozós félautomatikus, vagy kézi irányítások esetén a 2. ábrán látható rendszer (nullindikátor) kijelzője által használt jelzőelemek (pl. száleresztek) új funkcióval is bírhatnak: utasítást adnak az operátornak, hogy a hibajel kiküszöbölése érdekében az egyes beavatkozó szerveket (a repülésben ezek a botkormány, a hajtóművezérlő kar, és a pedálok) hogyan működtessék. Félautomatikus irányítások esetén a repülésben ezek az utasítások az alábbiak lehetnek: 'botkormány hasra', 'botkormány hastól', 'botkormány jobbra', és 'botkormány balra'. E műveleteket mindaddig végzi az operátor, amíg a hibajelet meg nem szünteti (3. ábra).

A 3. ábrán jól látható, hogy az operátor (pl. gyártósori dolgozó, járművezető, hajózó, UAV-kezelő stb.) a kijelzőn láthatja úgy a jel kívánt referenciaértékét, mint a hibajel kiküszöböléséhez szükséges beavatkozás irányát és nagyságát.

A 4. ábrán néhány repülésben használt műszert mutatunk be. A 4.b ábrán egy vízszintes helyzetjelző (irányszögjelzőműszer) látható, amely egyben az ILS-rendszer jelzőműszere is. Az irány- és a síklópálya egyenlő jelű zónájának befogása után a jelzőműszeren a légi jármű pillanatnyi helyzetét a síklópályához képest szálereszt jelzi a hajózó

3. ábra. A félautomatikus irányítás elvi vázlata (A szerző szerkesztése)





4. ábra. Műhorizont a) és irányszög jelzőműszerek b) [13]

számára. A szátkereszt függőleges mutatója a sikló pályától jobbra, illetve balra elhelyezkedést jelzi, míg a szátkereszt vízszintes mutatója a sikló pályá alatti, vagy feletti elhelyezkedést jelzi.

A 4.a ábrán egy kombinált műhorizont jelzőműszer látható. Az ILS-alapú leszállások során kijelzik a repülőgép valós, pillanatnyi helyzetét a sikló pályához képest. A jelzőműszer jobb oldali, és alsó részén látható egy-egy skála jelzi, hogy a repülőgép hol helyezkedik el a sikló pályához képest (alatta, fölötté, tőle jobbra, tőle balra). A 4.a ábrán látható állapotban a légi jármű a megadott irány pályán közelíti meg a futópályát, azonban a sikló pályá egyenlő jelű zónája fölött helyezkedik el.

Félautomatikus, a „hajózó-ILS” rendszer által végrehajtott kézi vezérlésű leszállások során a szátkereszt mutatói jelzik a hajózó számára, hogy a légi jármű sikló pályán történő leszállításához a hajózónak milyen kormánybemene- teket kell létrehoznia.

A 4.a ábrán látható, és a sikló pályá felett elhelyezkedő légi jármű sikló pályára történő visszatérítése érdekében a szátkereszt vízszintes mutatója a „botkormány hastól” parancs végrehajtására utasítja a hajózót (3. ábra). Az iránypálya tekintetében, a leszállás során a légi jármű balra helyezkedik el az iránypálya egyenlő jelű zónájától, így a szátkereszt függőleges mutatója a „botkormány jobbra” utasítást jelzi a hajózó számára.

Könnyű belátni, hogy a humán operátor viselkedése a „hajózó-ILS” rendszerben alapvető fontosságú, és az irányítási folyamat leírásához a humán operátor, a hajózó matematikai modellezése elengedhetetlenül szükséges.

A HUMÁN OPERÁTOR ÁLTALÁNOS MATEMATIKAI MODELLJE

Az irányítási rendszerekben tevékenykedő humán operátorok, kezelők tevékenységét az alábbi fontosabb jellemzők írják le [4] [5] [6]:

1. Reakcióidő (hoidtő): a humán operátor izomrendszere segítségével történő beavatkozása hoidtős. A hoidtő egy része az információ idegrendszeren történő végig haladására, egy része a retinán érzékelt információ feldolgozására, valamint az információ agykéregben történő feldolgozására vezethető vissza. A hoidtő főként az átmeneti függvényeken figyelhető meg.
2. Kisfrekvenciás tulajdonság: kísérletekkel igazolták, hogy az operátorok a kisfrekvenciás parancsjelek követése során a nagyfrekvenciás jeleket igyekeznek csillapítani.
3. Az operátor változó paraméterű: az operátor matematikai modelljének paraméterei idővel változnak. Ennek egyik oka, hogy az operátor paraméterei a folyamatos tanulás, és a tapasztalatok szerzése miatt rendre előnyűkre változnak, és folyamatosan javulnak. A másik

ok, hogy az operátor képes úgy a külső környezet, mint az irányítási folyamat jellemzőit és feltételeit érzékelni, és a saját paramétereit a megváltozott feltételekhez igazítani.

4. Predikciós képesség: a humán operátor a múltbéli tudására és tapasztalataira támaszkodva képes előre megbecsülni a cél várható viselkedését és mozgását. Ily módon a várható bemeneti jel extrapolációja a követési feladat megoldása során az operátor számára előre becsült bemenet követésének feladatává alakul. Ilyen predikciós kisfrekvenciás, becsült bemeneti jel lehet az állandó frekvenciájú harmonikus jel, vagy éppen az állandó frekvenciájú négyszögjel.
5. Nemlinearitás: egyes esetekben előfordulhat az operátor nemlineáris viselkedése. Más szóval, az operátor tevékenységében akár statikus (érzéketlenségi sáv, korlátozás), vagy dinamikus nemlineáris hatások (nemlineáris függvényekkel leírható tevékenységek) jelennek meg.
6. Determinisztikusság: bár a humán operátor viselkedése inkább véletlen, mint determinisztikus, tekintettel arra, hogy az általa valós környezetben végrehajtott ugyanazon követési feladat megoldásakor más és más módon hajtja végre a feladatát. Mindazonáltal, ezek a paraméterváltozások kis értékűek, ha az egyébként nem bonyolult követési feladat megoldására kellő idejű képzést kapott az operátor. Az operátor tevékenységének leírására használt determinisztikus modell alkalmazható a statisztikus (véletlen) értelemben vett minőség biztosítására is.
7. Szakaszos-szagotott tevékenység: kísérletekkel igazolt, hogy egyes követő irányítási rendszerekben az operátor tevékenysége szagotott, nem tekinthető folyamatosnak, hiszen adott követési feladatban csak akkor avatkozik be az egyes folyamatokba, ha a rendszerválasz nem egyezik meg a bemeneti referencia-jellel, egyébként várakozik a megjelenő hibajelre, és azt a legjobb tudása szerint szünteti meg.

A fenti megfontolások alapján, valamint számos és sokrétű laboratóriumi és orvosi kísérlet eredményeként a humán operátor (dolgozó, kezelő, gépjárművezető, UAV-kezelő, hajózó stb.) alábbi átviteli függvényét szokás használni az irányítási rendszerek vizsgálata során [1] [3] [4] [5; 29. o.] [6] [7]:

$$Y(s) = \frac{X_{ki}(s)}{X_{be}(s)} = K \frac{1 + \sigma s T_L}{(1 + s T_I)(1 + s T_N)(s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2)} e^{-s\tau} \quad (1)$$

ahol:

$X_{be}(s)$ az operátor kisfrekvenciás bemeneti vizsgálójele;
 $X_{ki}(s)$ az operátor kimeneti (válasz) jele;
 K az operátor jelátvitelének állítható erősítése;
 τ a hoidtő;

$\frac{1}{(1 + s T_N)(s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2)}$ a neuromuszkuláris rendszer dinamikája;

$(1 + \sigma s T_L)$ az operátor predikciós képességét leíró modell;

$\frac{1}{(1 + s T_I)}$ a bemeneti jelkövetésének időkésése,

$\frac{1 + \sigma s T_L}{(1 + s T_I)}$ a jelkiegyenlítés (hibajel nullázása) szolgáló tag,

míg a teljes dinamikus modell a σ skalár segítségével hangozható.

1. táblázat. A humán operátor paraméterei (A szerző szerkesztése)

Bemeneti vizsgálójel	T_p [s]	T_L [s]	T_N [s]	σ	K
Lassan változó	0,103	13,5	0,05	0,0076	52,5
Közepes sebességű	0,37	5,0	0,143	0,074	11,0
Gyorsan változó	0,62	3,7	0,143	0,167	2,0

A gyakorlatban a neuromuszkuláris rendszer modelljében a másodrendű dinamikát egységnyi erősítéssel közelítik, így az (1) egyenlet most az alábbi alakot veszi fel:

$$Y(s) = \frac{X_{ki}(s)}{X_{be}(s)} = K \frac{1 + \sigma s T_L}{(1 + s T_I)(1 + s T_N)} e^{-s\tau} \quad (2)$$

A humán operátor (légijármű-vezetők) (2) egyenlettel adott modelljének együtthatóit az 1. táblázat foglalja össze [1; 83. o.] [4; 37. o.]:

Az 1. táblázatban közölt adatokat több hajózó személyes részvételével, repülő-szimulátoros kísérletek során állapították meg. Könnyen belátható, hogy az irányítási rendszerekben a kiváló pszicho-fizikai állapottal rendelkező hajózők matematikai modellje közvetlenül nem használható, csak a (2) matematikai modell paramétereinek megfelelő megváltoztatása után.

Ha a (2) matematikai modellt egy kezdő UAV-operátor viselkedésének leírására használjuk, akkor az UAV irányításának tanulása kezdeti fázisában, tudás és tapasztalat hiányában, az operátor predikációs képességével nem számolhatunk, vagyis $1 + \sigma s T_L \cong 1$. Másodsor, a neuromuszkuláris rendszer viselkedését jellemző T_N időállandó is lényeges mértékben megnövekedhet, ha a követendő jel sebessége gyorsul. (1. táblázat)

Hasonlóképpen, egy átlagos mentális és fizikai képességgel rendelkező, hobbicélú UAV operátorának beavatkozási holtideje akár a $\tau = (0,3 \div 0,7)$ s tartományon is felvehet t értéket. A zárt irányítási rendszerekben a holtidő lényegesen befolyásolja a stabilitási viszonyokat, és kritikus értéke mellett a stabilitás határára juttathatja a zárt szabályozási rendszert, sőt, akár destabilizálhatja is azt.

A katonai célú UAV-k D3 (Dirty-Dull-Dangerous – koszos, unalmas, veszélyes) alkalmazásai esetén előfordulhat, hogy a kezelők kiválasztása és képzése során nem a minőségi, és nem a szakmai elvárások, hanem mennyiségi követelmények uralkodnak annak érdekében, hogy a katonai egységek és alegységek megfelelő számú UAV-flottát legyenek képesek üzemeltetni.

Ebben az esetben sokszor EC (Extra Cheap), a kereskedelmi forgalomban is kapható, nem kifejezetten katonai célja kifejlesztett UAV-eket alkalmaznak, így azok esetleges meghibásodása vagy elvesztése esetén, elfogadható anyagi veszteségek mellett, gyorsan pótolhatók.

A UAV-operátorok nem kellően alapos kiválasztása miatt olyan kezelők is az UAV-k közelébe kerülhetnek, akik korlátozott, nem megfelelő mentális és fizikai alkalmassággal rendelkeznek.

Ehhez társulhat még a képzésük elégtelen volta mind szakmai, mind technikai értelemben, amelyet a harctéri háborús események során sokszor a szükségletek irányítanak, és a minőségi és egyéb szempontok jórészt nem dominálnak.

A HUMÁN OPERÁTOR SZÁMÍTÓGÉPES VIZSGÁLATA

A humán operátor (UAV-kezelő, hajóző) modelljének analízise előtt vizsgáljuk meg, hogyan kezelhető a nemlineáris

holtidő matematikai modellje, más szóval, hogyan tudjuk linearizálni a holtidő matematikai modelljét.

Írányításméletből jól ismert, hogy a holtidő linearizálható a széles körben használt Padé-approximációs módszer segítségével [11; 410. o.]:

$$e^{-s\tau} \cong P_\sigma(s) = \frac{N_\sigma(s)}{D_\sigma(s)} = \frac{\sum_{k=0}^n (-1)^k c_k \tau^k s^k}{\sum_{k=0}^n c_k \tau^k s^k}, \quad (3)$$

ahol a (3) egyenlet c_k együtthatóit az alábbi összefüggés segítségével számíthatjuk:

$$c_k = \frac{(2n - k)! \cdot n!}{2n! \cdot k! \cdot (n - k)!}, \quad n = 1, 2, 3, \dots; k = 0, 1, 2, 3, \dots, k. \quad (4)$$

A gyakorlatban felmerül a kérdés, hogy mi az az approximációs rendszám, amely esetén még megfelelő a közelítés pontossága, és a közelítő matematikai modell még kezelhető. A szerző a [11] munkájában a kislekencés harmonikus jelek követésére használt operátormodell 2%-os pontosságának elérését tűzte ki célul, amit ötödrendű Padé-approximáció mellett ért el.

Mindezek alapján, a humán operátor (2) átviteli függvényében szereplő $\tau = 0,3$ s holtidőt annak ötödrendű Padé-approximációs lineáris alakjával közelíthetjük, vagyis [11; 410. o.]:

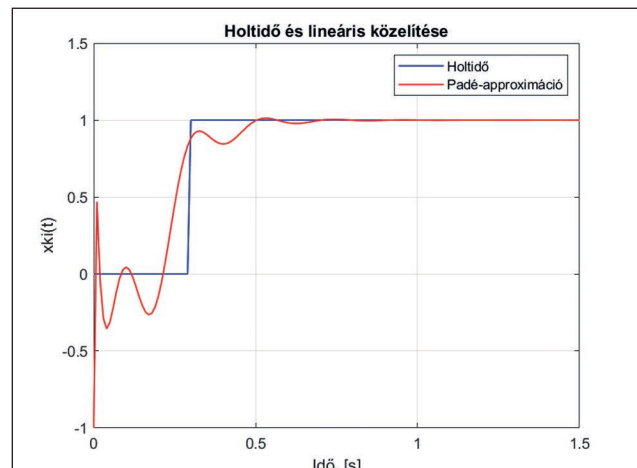
$$e^{-\tau s} = e^{-0,3s} \cong \frac{1 - \frac{0,3}{2}s + \frac{0,3^2}{12}s^2 - \frac{0,3^3}{120s}s^3 + \frac{0,3^4}{1680s^4} - \frac{0,3^5}{30240}s^5}{1 + \frac{0,3}{2}s + \frac{0,3^2}{12}s^2 + \frac{0,3^3}{120s}s^3 + \frac{0,3^4}{1680s^4} + \frac{0,3^5}{30240}s^5} \quad (5)$$

A holtidő, és annak approximált alakjának az $x_{be} = 1(t)$ egységugrás függvény bemeneti jelre adott válasza az 5. ábrán látható.

Az 5. ábrán jól látható, hogy az időtartományban – a holtidő zónában – a közelítő modell „leng” a zérus értékű ideális holtidő függvénye körül. A két dinamikus viselkedés magasabb rendszámú approximáció segítségével pontosabb

5. ábra. Holtidő vizsgálata időtartományban

(A MATLAB-scriptet a szerző készítette)



sabban is egymásra illeszthető, ennek velejárója azonban a bonyolultabb modell, aminek vizsgálata jóval nagyobb számítási kapacitást igényel.

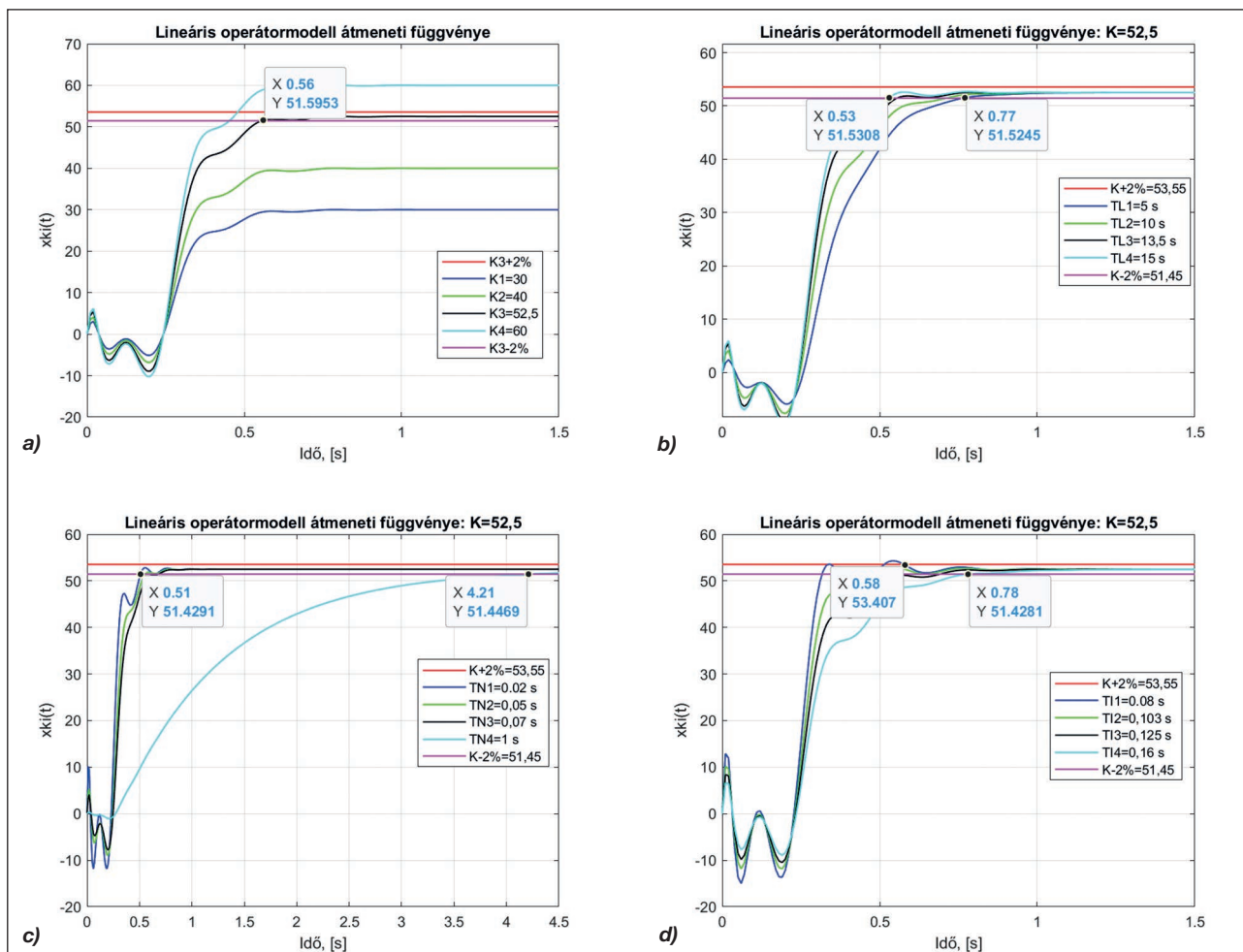
A humán operátor viselkedésének (2) átviteli függvénye az (5) egyenlet figyelembevételével most az alábbi alakban írható fel:

$$Y(s) = \frac{x_{ki}(s)}{x_{be}(s)} = K \frac{1 + \sigma s T_L}{(1 + s T_I)(1 + s T_N)} \frac{1 - \frac{0,3}{2}s + \frac{0,3^2}{12}s^2 - \frac{0,3^3}{120s}s^3 + \frac{0,3^4}{1680s^4} - \frac{0,3^5}{30240}s^5}{1 + \frac{0,3}{2}s + \frac{0,3^2}{12}s^2 + \frac{0,3^3}{120s}s^3 + \frac{0,3^4}{1680s^4} + \frac{0,3^5}{30240}s^5} \quad (6)$$

A humán operátor (6) egyenlettel adott dinamikáját az alábbi paraméterek mellett vizsgáljuk:

$$K = 52,5; \quad \sigma = 0,0076; \quad T_L = 13,5s; \quad T_I = 0,103s; \quad T_N = 0,05s, \quad (7)$$

és az $x_{be} = 1(t)$ egységugrás függvény bemeneti jelre adott humán operátor válaszfüggvény a 6. ábrán látható.



6. ábra. A humán operátor átmeneti függvénye (A MATLAB-scriptet a szerző készítette)

A 6.a ábrán jól látható, hogy $\Delta = \pm 2\%$ dinamikus pontossággal számolva a humán operátor transziens ideje $t_{ss} = 0,55$ s, ami gyors beavatkozási sebességet jelent a gyakorlatban. Szintén megállapítható, hogy a K erősítés növekedésével a transziens idő folyamatosan csökken. A 6.b ábra azt szemlélteti, hogy a T_L predikciós időállandó növekedése csökkenti a transziens időt. A 6.c ábra azt mutatja be, hogy a T_N neuromuszkuláris időállandó növekedése lényeges mértékben növeli a transziens időt. Végezetül, a 6.d ábra azt igazolja, hogy a T_I időállandó növekedése szintén növeli a transziens időt, ami hátrányosan befolyásolhatja egy-egy követési feladat sikeres végrehajtását. A 6.b, a 6.c, és a 6.d ábrák alapján megállapíthatjuk, hogy a transziens időre

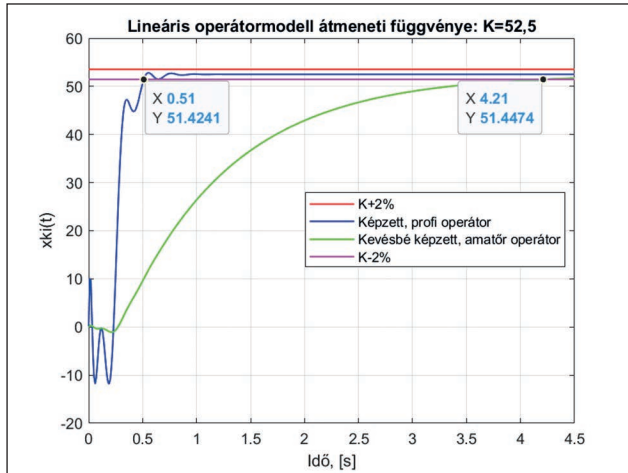
döntően a T_N neuromuszkuláris időállandó változása hat, leginkább erre a paraméterre érzékeny a modell.

A korábban ismertetettek szerint tehát felírhatjuk a humán operátor két, egymástól drasztikusan eltérő dinamikus modelljét. Az első esetben a matematikai modell egy jól felkészült, okos, higgadt operátort (pl. profi, képzett operátorok) ír le, míg a másik esetben a modell egy szerény képességekkel, alacsony képzettséggel rendelkező, stresszes operátor (pl. amatőr, modelloperátorok) tevékenységét írja le. A két matematikai modell adatait a 2. táblázat foglalja össze.

A „profi” és az „amatőr” humán operátorok átmeneti függvényei a 7. ábrán láthatók.

2. táblázat. Humán operátor paraméterei (A szerző szerkesztése)

Humán operátor	T_p [s]	T_L [s]	T_N [s]	σ	K
Alkalmas, képzett, higgadt, profi operátor	0,08	15	0,02	0,0053	52,5
Kevésbé alkalmas, kevésbé képzett, stresszes, amatőr operátor	0,16	5,0	1	0,032	52,5



7. ábra. A profi és az amatőr humán operátor átmeneti függvényei (A MATLAB-scriptet a szerző készítette)

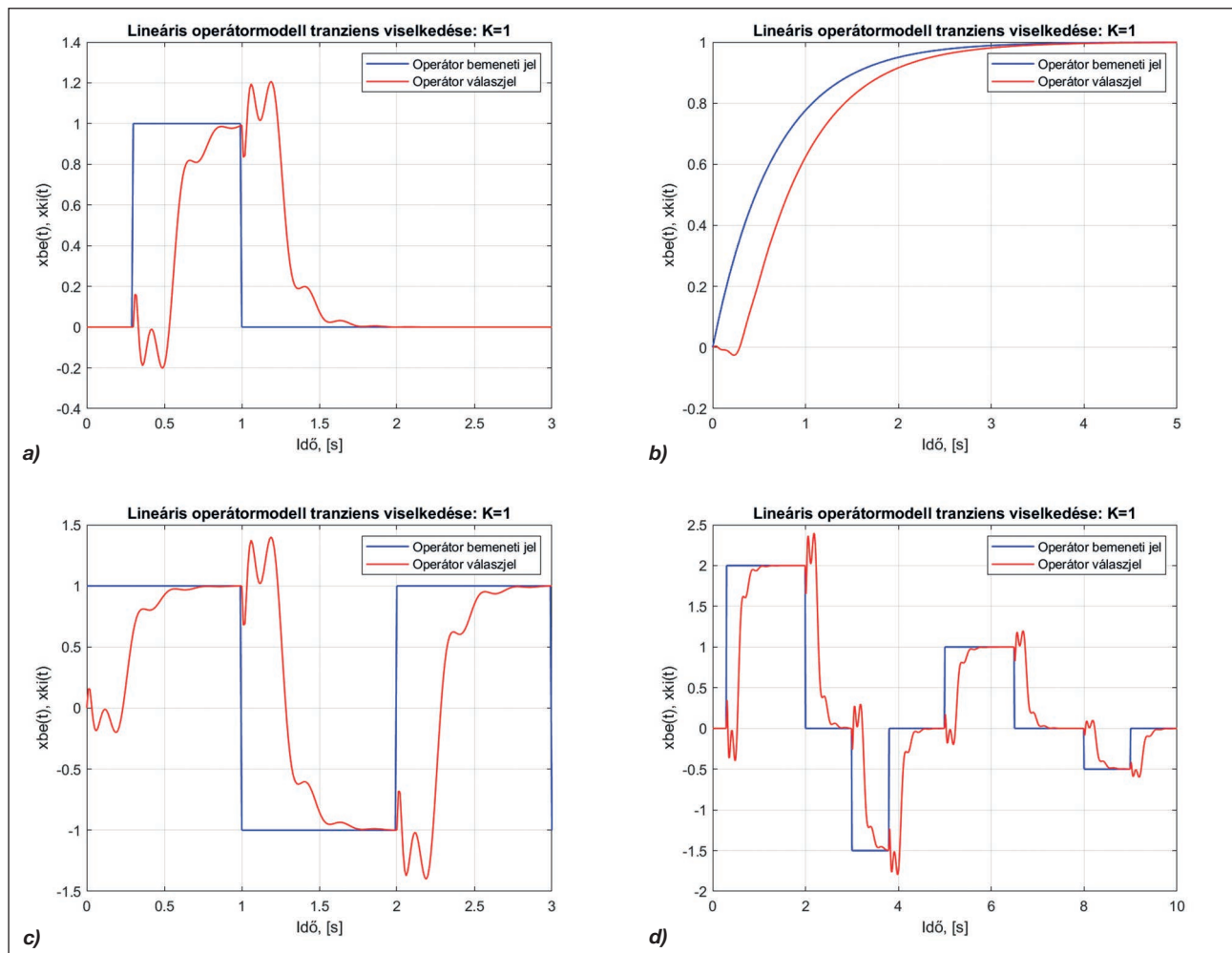
A 7. ábrán is jól látható, hogy ugyanazon egységugrás-alapjel követési feladat ellátásához a profi operátornak $\approx 0,51$ s időre, míg az amatőr operátornak $\approx 4,21$ s időre van szüksége. Könnyen belátható, hogy a tranziens idő ilyen mértékű megváltozása a gyakorlatban akár a követési feladat megoldásának sikertelenségét is jelentheti.

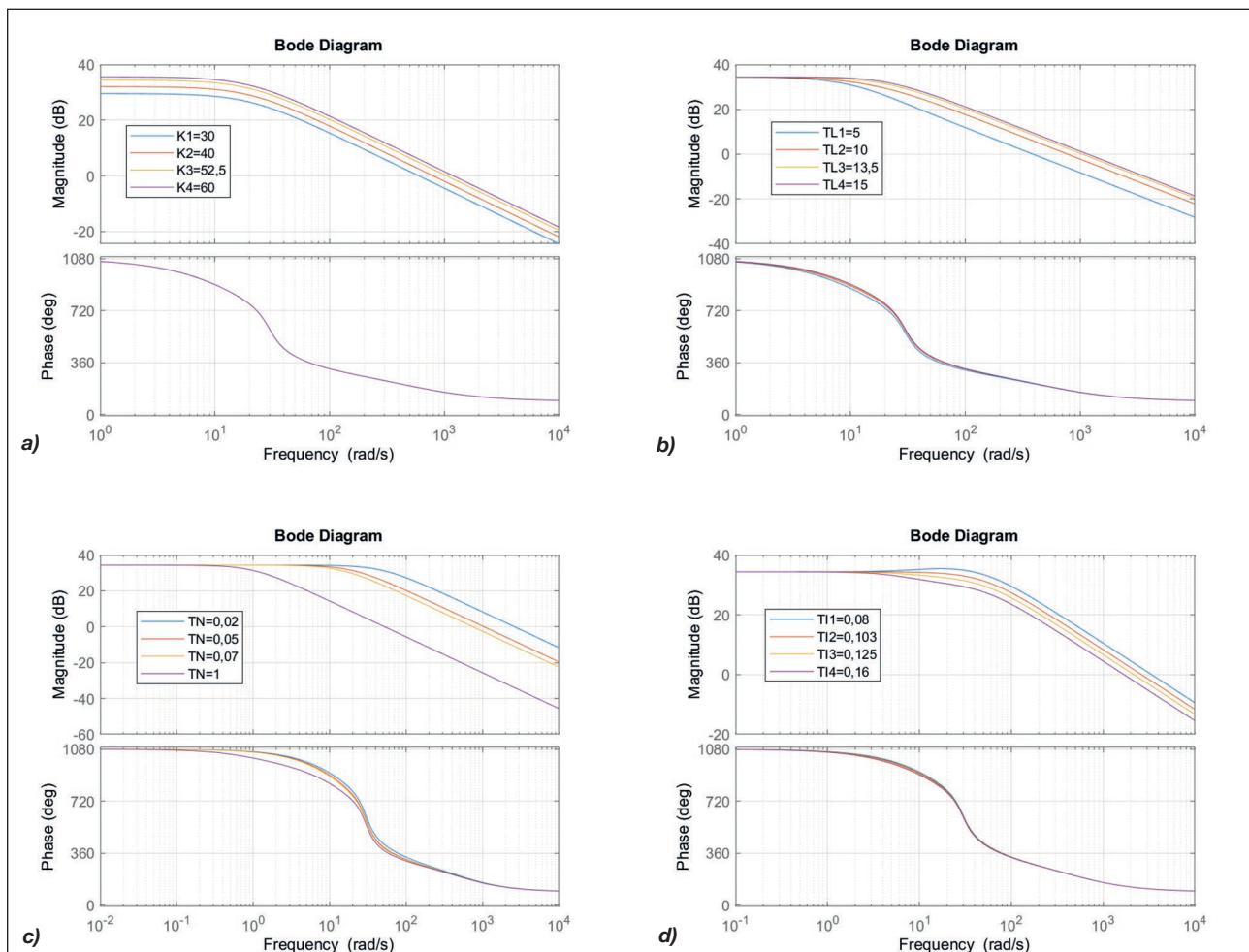
A továbbiakban vizsgáljuk meg a humán operátor viselkedését különféle tipikus, determinisztikus bemeneti vizsgálójelre, amelyek legyenek az alábbiak (8. ábra):

1. aperiodikus, hirtelen megjelenő, hirtelen eltűnő négyszögjel (8.a ábra);
2. aperiodikus, exponenciális jel (8.b ábra);
3. periodikus, előjelváltó, szimmetrikus négyszögjelsorozat (8.c ábra);
4. aperiodikus, előjelváltó, aszimmetrikus négyszögjelsorozat (8.d ábra).

A 8.a alapján elmondhatjuk, hogy a humán operátor holtidővel és időkésséssel ugyan, de leköveti a vizsgálójel. A holtidő közelítése (5. ábra) több lengést is jelent a zérus érték körül. Ez a közelítő lengés lényeges mértékben csök-

8. ábra. A humán operátor válaszjelei időtartományban (A MATLAB-scriptet a szerző készítette)





9. ábra. A humán operátor válaszelei frekvenciatartományban (A MATLAB-scriptet a szerző készítette)

kenthető magasabb rendszámú Padé approximáció alkalmazásával, ebben az esetben azonban számottevő mértékben megnőhet a számítási igény.

A 8.b ábrán jól látható, hogy a lassan változó, folytonos, exponenciálisan változó jelet jól követi az operátor, a transziens folyamat kezdetén is csak kismértékű lengés figyelhető meg, és a transziens folyamat végére az operátor teljesen kiküszöböli a kezdeti holtidőt.

A 8.c ábrán olyan bemeneti jelet adunk a vizsgált operátormodell bemenetére, ami a gyakorlatban is sokszor előfordul. Az operátor viselkedése – hasonlóan a 8.a ábrán látható eredményekhez – a transziens folyamatok kezdetén mindig lengő, míg a teljes folyamat egytárolós, időkéséses jellegű, de elmondható, hogy az operátor képes lekövetni a bemeneti jelet.

Végezetül, a 8.d ábrán látható eredmények alapján kijelenthető, hogy az operátor képes lekövetni a bemeneti jelet, de a transziens folyamatok a holtidő közelítése miatt mindig intenzív lengésekkel indulnak.

Különös figyelmet érdemel az operátorok viselkedése frekvenciatartományban (9. ábra). Tekintettel a humán operátor matematikai modelljének változó és változtatható hangoló paramétereire, a 9. ábra összefoglalja az összes lehetséges paraméterváltozást, és azoknak az irányítási folyamatra gyakorolt hatását.

A 9.a ábrán látható, hogy a K erősítés-változás nem változtatja meg a fázisviszonyokat, hanem az erősítés-jellegzőgörbék helyzete változik a függőleges tengely mentén.

A 9.b ábrán a T_L predikciós időállandó változásának hatása, hogy közel azonos fázisviszonyok mellett, az időállandó növekedése növeli az erősítési tényezőt.

Korábbi ismeretes, hogy a T_N neuromuszkuláris időállandó változása lényeges mértékben befolyásolja, lassítja az operátor viselkedését időtartományban (6.c ábra). A időállandó változása a fázisszöveget a közepes frekvenciatartományban változtatja, míg az erősítést úgy közepes, mint nagyfrekvenciás tartományban csökkenti, amely hátrányos az alapjelkövetés sikerességének szempontjából.

Végezetül, a T_I időállandó érdemben csak a jelátvitel erősségét változtatja: az időállandó növekedése közepes és kisfrekvenciás tartományban a jelátvitel csökkenéséhez vezet, amely szintén hátrányos a bemeneti jelek követése során.

ÖSSZEGLÉS

Az „ember-gép” kapcsolat fontossága ma már vitathatatlan. Ebben a kétségtelenül bonyolult viszonyrendszerben az irányítási folyamatok összetettsége és kifinomultsága megköveteli, hogy az ember, a kezelő, az operátor megfelelően képzett legyen, és kellő tapasztalatot halmozzon fel az egyes irányítási folyamatokban.

A tanulmányban vizsgált operátormodell két fontos paraméterrel bír. Az egyik az operátor predikciós, „előre látó képességét” leíró T_L időállandója. E paraméter alapvetően

függ az operátor/kezelő tudásától és tapasztalataitól. Az T_L időállandó és a T_I időállandó viszonya dönti el, hogy a teljes operátor viselkedés előre látó (prediktív), fázissiettető lesz-e, vagy fáziskésleltető (integráló), követő lesz a teljes rendszer jellemzője.

Könnyű belátni, hogy a felkészült, profi operátor, aki kellő tudással, és a múltban felhalmozott, megfelelő mennyiségű tapasztalattal rendelkezik, az előre látó képessége miatt nem fog túlkormányozni, beavatkozásai nem lesznek agresszívok, tevékenysége során a stressz-szintje nem lépi túl az elfogadott szintet, az általa irányított folyamat az energiafelhasználás szempontjából is elfogadható lesz. A beavatkozásában kisebb lesz a holtidő, képes lesz gyorsabban reagálni, és szükség esetén pontos, kimért módon beavatkozni.

A kevésbé felkészült, és a múltban kevesebb tapasztalatot felhalmozó operátor stresszes, kapkodó, túlzott beavatkozásra, túlkormányzásra hajlamos lesz, így az irányítási rendszert szükségtelen terheléseknek teszi ki. Az irányítási folyamat agresszív lesz, és ugyanazon irányítási cél elérése érdekében nagyon sok energiát kell az irányításba befektetni.

Főként olyan rendszerekben, ahol nagyon korlátos az irányításhoz rendelkezésre álló energia (pl. kis méretű, villamos hajtású UAV-k) válik kulcsfontosságúvá az operátor viselkedése. Az agresszív kormányzásokkal irányított kis méretű UAV-k repülési ideje akár 30-40%-kal is csökkenhet, amely veszélyeztetheti egy-egy repülési feladat végrehajtásának hatékonyságát, vagy lehetetlenné teszi akár magát a repülési feladat végrehajtását is. Megemlíthjük, hogy a másik fontos jellemzője az operátor tevékenységének a T_N neuromuszkuláris időállandó értéke. A vizsgált operátormodell e paraméterre a leginkább érzékeny. A kevésbé képzett, stresszes, kapkodó operátor csak nagyon lassan képes követni a referenciajelet, a tranziens ideje sokszorosa a profi operátor hasonló paraméterének (7. ábra).

Végezetül, a fenti megállapítások egyértelműen igazolják, hogy az irányításokban aktívan résztvevő operátorok képzése, majd az irányítások végrehajtása során a tapasztalatok gyűjtése, egyaránt elengedhetetlen feltétele a biztonságos működésnek. Főként igaz ez a kis méretű UAV-k kezelőire: nem elég sokadszor sem hangsúlyozni, hogy a repülő eszközök méreteinek trendszerű csökkenésével nem csökken, sőt, növekszik az elvárt tudás és tapasztalat, ami a biztonságos repüléshez elengedhetetlen.

KITEKINTÉS

Az operátorok, kezelők, irányítók gyakran zárt irányítási rendszerekben hajtják végre a küldetésüket, ezért a tevékenységük vizsgálata kiemelten fontos feladat. Ily módon lehetőség nyílik a PiL- (Pilot-in-the-Loop) jelenségek irányítástechnikai vizsgálatára, többek között az operátorok egyes paraméterei kritikus értékeinek meghatározására. Más szóval, az irányításelmélet jól szolgálja az operátorok

egy feladatokra történő kiválasztásának folyamatát is. A repülésben egy másik fontos és kiemelt kutatási terület lehet a PIO- (Pilot Induced Oscillations – pilóta által kiváltott oszcillációk) jelenség kialakulásának vizsgálata, amikor maga az operátor hoz létre olyan divergáló tranziens folyamatokat, amelyek a légi jármű elvesztését is eredményezhetik. E jelenségek vizsgálata különösen fontos extrém alacsony, valós repülési magasságokon feladatot végrehajtó UAV-k esetében, amikor a divergáló tranziens folyamatok nagyon rövid idő alatt katasztrófához vezethetnek.

HIVATKOZOTT IRODALOM

- [1] McRuer, D. T., Krendel, E. S. Dynamic Response of Human Operators, WADC Technical Report, 1957. pp. 56–524. <https://doi.org/10.21236/AD0110693>;
- [2] Ward, J. R. The Dynamics of a Human Operator in a Control System – A Study Based on the Hypothesis of Intermittency. PhD Dissertation, University of Sydney, Australia, 1958.;
- [3] McRuer, D. T., Krendel, E. S. The Human Operator as a Servo System Element. Journal of the Franklin Institute, Vol. 267, Issue5, 1959. pp. 381–403. [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(59\)90091-2](https://doi.org/10.1016/0016-0032(59)90091-2);
- [4] McRuer, D. T., Graham, G., Krendel, E., Reisener, W. Human Pilot Dynamics in Compensatory Systems. US Government Report, AFFDL-TR-65-15, 1965. <https://doi.org/10.1109/THFE.1965.6591261>;
- [5] Bekey, G. A. The Human Operator in Control Systems. University of Southern California, USCEE Report, 1969. p. 359;
- [6] McRuer, D. T., Krendel, E. S. Mathematical Models of Human Pilot Behavior. NATO AGARD-AG-188, 1974.;
- [7] Aslanyan, A. E. Aircraft Automatic Flight Control Systems, Part I. Kiev Military Aviation Technical Academy, Kiev, Ukraine, 1984.;
- [8] Krasovsky, A. A., Vavilov, Y. A., Sutchkov, A. I. Automatic Flight Control Systems. Air Force Academy of Joukovsky, Moscow, Russia, 1986.;
- [9] McRuer, D. T., Clement, W. F., Thompson, P. M., Magdaleno, R. E. Minimum Flying Qualities, Volume II, Pilot Modeling for Flying Qualities Applications. Technical Report WRDC-TR-89-3125, 1990.;
- [10] McLean, D. Automatic Flight Control Systems. Prentice Hall International (UK) Ltd., 1990.;
- [11] Szabolcsi, R. Modeling of the Human Pilot Time Delay Using Padé Series. Academic and Applied Research in Military Sciences, Volume 6, Issue 3, 2007. pp. 405–428;
- [12] Pallett, E. J. H., Coombs, L. F. E. Aircraft Instruments & Integrated Systems. Dorling Kindersley India Pvt. Ltd., Pearson Education in South Asia, 2011.;
- [13] Forrás: <https://avia.academic.ru/1336/> (Letöltve: 2023.2.8.).

2024-ben megújul a HADITECHNIKA

Tisztelt Olvasóink!

2024-ben – másfél évtized után – megújul folyóiratunk. Évi hat lapszámunk új köntösben, frissített tipográfiával jelenik meg. A Haditechnika ára 990 Ft-ra emelkedik, az éves előfizetés díja 5940 Ft.

a Szerkesztőség