

Szerecz Bálint¹ – Dr. Békési Bertold²

HEAD-UP DISPLAY-EK FEJLŐDÉSE³

A repülőgépek fejlődésével és rendszereinek bonyolultabbá válásával a pilótafülkében egyre több műszer felhalmozása vált szükségessé. Az információ mennyisége egy idő után elérte azt a mértéket, hogy a hajózó nem tudta összehangolni, és eredményesen felhasználni őket. Le- és felszállás vagy légi harc során, veszélyt jelenthetett, ha a pilótának egyszerre kellett a műszereket és a kifutópályát (ellenséget) figyelnie. A cikk ezen problémák kiküszöbölésére szánt eszköz a Head-Up-Display (HUD) fejlődésének útját kíséri végig, a reflexüveges célzókészülékektől a napjainkban alkalmazott eszközökig, valamint említést tesz a jövőbe mutató, fejlesztésekről, lehetőségekről.

DEVELOPEMENT OF HEAD – UP DISPLAYS

The advancement of aircrafts made aircraft-systems more sophisticated, so it was necessary to place more and more instruments in cockpits. The amount of information reached a level when the pilot can't handle them efficiently. It caused dangerous situations when the pilots must watch the cockpit instruments and the planes environment at the same time, over a landing manoeuvre or a dogfight. This article presents the solution for the lately mentioned problems, the evolution of Head-Up-Displays (HUD) from the reflector gunsight to the modern HUDs. Furthermore it describes the future developments and research possibilities

BEVEZETÉS

Abban mindenki egyetért, hogy a gépkocsi bonyolultságú járműveken, legalább egy műszernek segítenie kell az azt irányító személyzetet, hogy az üzembiztonság a megfelelő szinten maradjon. A légi járműveken sincs ez másként, de mivel működésüket biztosító rendszerek komplexek, valamint 6 szabadságfokú mozgásra képesek, jóval több műszer szükséges ahhoz, hogy a repülőgépvezető megfelelően képes legyen kezelni járművét. A repülés egyes fázisaihoz jellemzően nem szükséges a fedélzeten található összes műszer, de előfordulnak olyan, a pilótát pszichikailag nagymértékben leterhelő helyzetek, amikor nagymennyiségű információ feldolgozására rövid idő áll rendelkezésre. Ha ő ekkor már fáradt, és nem dolgozza fel kellő ütemben a biztonságos repüléshez elengedhetetlen információkat, annak kimenete végzetessé válhat, ezért szükséges a személyzet leterheltségének határait szűkebbre venni. Az egyik ilyen eszköz e célra, a head-up display.

Az alábbi cikkben, az előbb említett kijelző fejlődésének történetével ismerkedhetünk meg. Kezdetben a reflexüveges és giroszkópos célzókészülékekkel, melyek alapként szolgáltak a head-up displayek megalkotásában. Majd néhány fontosabb mérföldkő kerül említésre, mind a

¹ honvéd tisztjelölt, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, szereczbalint@gmail.com

² okl. mk. alez. egyetemi docens, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, bekesi.bertold@uni-nke.hu.hu

³ Lektorálta: Dr. Szilvássy László okl. mk. alez; egyetemi docens, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, szilvassy.laszlo@uni-nke.hu

katonai, mind a civil felhasználásból. Végül röviden betekintünk a jövőt jelentő lehetőségekbe.

A HEAD-UP DISPLAYEK ÖSE: CÉLZÓKÉSZÜLÉKEK

A legkorábbi célzókészülékek alkalmazására, csakúgy, mint a repülőgépek első katonai alkalmazására az I. világháborúban került sor. Bár kezdetben a légi harcokat még kézfegyverekkel vívták, és a földi célok támadása is kézből ledobott kezdetleges bombákkal történt, mindkét esetben igen alacsony találati pontossággal és csekély tűzerővel. A technika fejlődése lehetővé tette a sorozatlövésre alkalmas fegyverek alkalmazását a levegőben. A legáltalánosabb a repülőgép orrában történő elhelyezés és összehangolás a légcsavarral, hogy lövészet során az ne szenvedjen találatot. A repülőgépeken ekkor jelentek meg a rögzített mechanikus célzókészülékek, melyeknél a célzás két mechanikus elem alkotta célgömbbel történt. A célzókészülék két hátránnyal is bírt, az egyik, hogy az idővel gyorsabbá váló repülőeszközökre csak kis pontossággal lehetett vele tüzelni. [1]

A másik negatívum a parallaxis jelenségének megléte volt. A parallaxis egy a szemlélő látómezejében elhelyezkedő két tárgy, egy közelebbi és egy távolabbi által bezárt szög. Ha a szemlélő a közelebbi tárgy mögött helyezkedik el, akkor, ha lép egyet oldalra a két tárgy által bezárt szög megváltozik, ennek nagysága függ attól, hogy a szemlélő és a távolabbi tárgy között hol helyezkedik el a közelebbi objektum. A vadászipilótát tekintve a szemlélő a pilóta, a közelebbi tárgy a célgömb a távolabbi pedig a célpontot nyújtó gép. Ebből adódik, hogy viszonylag távoli célok ellen lehetetlen volt alkalmazni.

A hátrányok kiküszöbölése érdekében kezdték el alkalmazni már az 1918-as évektől a repülőgépeken a Sir Howard Grubb által megalkotott kollimátoros⁴ célzókészüléket, melynek alapelveit már 1900-ban lefektette feltalálója. Felépítését tekintve ez egy optikai célzókészülék mechanikus elemekkel. Működési elve a következő: egy égő fénye egy lencsén keresztül egy tárcsára esik, amelyen a vágatok úgy lettek kialakítva, hogy az azon áthaladó fény megalkossa a több körből álló célgyűrű képét, majd ez a kép lencsék és tükrök alkotta rendszeren (optikai rendszer) keresztül kerül kivetítésre egy megdöntött üveglapra, amiről aztán a fény egy része a vadászipilóta szemébe kerül. Ezt az üveglapot, más néven reflexüveget úgy helyezték el a pilótafülkében, hogy a fej nagyobb mértékű mozgása nélkül lehessen elvégezni segítségével a célzást. A célgyűrű több körből való kialakítása arra szolgált, hogy a pilóta könnyen meghatározhassa a szükséges előretartást. [1][2]

Az elrendezés következtében egy bizonyos nagyságú látómező jött létre (angolul field-of-view, FOV). A FOV a pilótát körülvevő tér azon szelete melyet a reflexüvegen keresztül még képes belátni. Ez szögértékben szokás megadni mind vízszintes, mind pedig függőleges irányban. A látómező nagyságát akkoriban a reflexüveg és a kollimátor lencse mérete határozta meg leginkább. Innen kapta az elnevezését is kollimátoros célzókészülék.

A parallaxis hatás kiküszöbölése oly módon történt, hogy általában az optikai rendszer utolsó lencséjén, a kollimátor lencsén következett be a kép „végtelenbe” történő fókuszálása. Így ha

⁴ kollimátor - (lat.), készülék, amely arra szolgál, hogy a belépő fénysugarakat párhuzamossá tegye. Lényegében egy cső, amelyben kettősen domború lencse (lencse-rendszer) foglal helyet.

a célgyűrű középpontjában cél helyezkedett el és tegyük fel hogy a pilóta szeme nem várt módon pár centivel arrébb került, akkor még mindig azt látta a reflexüvegen, hogy a repülőgépén található fegyverzet csöve melyik pontra irányul.

A kollimátoros célzókészülék alkalmazása szinte a legtöbb vadászgépen és bombázón elterjedté vált az 1930-as évekre, de ezzel még nem vesztek ki teljesen a régmódi mechanikus felépítésű társaik. Az alapelv alkalmazásra került még légvédelmi ágyúkon, harckocsikban és napjainkban is igen elterjedt a kézfegyverek optikai irányzékaként.

Az 1930-as évek végén, ahogy korszerűsödött a repülőgépek manőverező képessége, valamint egyre nagyobb sebességeket értek el, nehezebbé vált a légi harcok eredményes megvívása. Mivel a légijárművek mozgása kevésbé volt kiszámítható, ezért nagyon tapasztalt pilóták voltak csak képesek meghatározni az előretartás megfelelő mértékét. Szükség volt egy olyan rendszerre, amely képes volt segítséget nyújtani a vadászpilótáknak a helyes előtartást illetően.

Elsőként az angolok találták meg a megoldást. Az alaplevet Maurice Hancock dolgozta ki. Az előretartás szögét a rendszer egy pneumatikus giroszkóp segítségével alkotta meg, ezért a giroszkópos célzókészülék (gyro gunsight; GGS) elnevezés. Felépítésében nagyban hasonlít a kollimátoros elődjéhez, a különbség abban mutatkozik, hogy az optikai rendszerében található egy kör alakú tükör melynek állásszöge a repülőgép manőverezése következtében változik. A tükör elmozdulásához szükséges jelet pedig a giroszkóp dolgozta ki. A rendszer képes volt a helyesbített irányzóvonalat úgy kivetíteni, hogy kiküszöböljék a lövedékek ballisztikai tulajdonságai okozta eltérést is. A célzókészülék kezelőpanelén akkortájt két forgókapcsoló kapott helyet, az egyiket a fényerő a másikat a célok távolságának beállítására kellett alkalmazni. [2]

A célok távolságának becslése a következőképp történt: a célzókészülékben található izzó után 2 db tárcsa került beépítésre, az egyik a középpontból kiinduló, egyenes koncentrikusan elhelyezkedő bevágásokkal (radiális tárcsa), a másik tárcsán ugyanígy elhelyezkedő ívelt bevágásokkal (logaritmikus tárcsa), a két egymás fölé beépített tárcsán áthaladó fény, egy képzeletbeli kör mentén elhelyezkedő rombuszokból álló gyűrű (rombuszgyűrű) képét hozta létre. A távolságbeállító tekerésével a két tárcsa elfordult egymás mellett, így a rombuszgyűrű átmérője nőtt vagy csökkent. Ebbe az alakzatba kellett belehelyezni a célt, és a távolságbeállító segítségével úgy hangolni, hogy a cél beleférjen a rombuszgyűrűbe. Szükség volt a cél geometriai méretének ismeretére is (szárnyfesztség, teljes hossz). Mivel a heves manőverezés következtében a giroszkóp tulajdonságai miatt egyre pontatlanabbá vált a szükséges előretartás szög megjelenítése, ezért párhuzamosan alkalmaztak egy stabil célkeresztet is, ami a reflexüveg közepén helyezkedett el. A giroszkóp jelentette hátrány volt még a pörgettyű lassú beállása bekapcsolás után.

A giro célzókészülék első példányait 1941-ben Farnboroughban tesztelték, elnevezése Mark I volt. A szolgálatba állítás 1943-ig váratott magára, amikor is a Ferranti által gyártott Mark II típusú GGS-el szerelték fel az angol Spitfire és Hurricane vadászgépeket. A német oldalon a Carl Zeiss és az Ascania szakemberei 1935-től kezdve dolgoztak a megfelelő kialakításon sikertelenül, egészen 1942-ig, mígnem a németek elfogtak egy giro célzókészülékkel ellátott amerikai P-47-es vadászrepülőgépet, ami jó alapot szolgáltatott a saját kutatásaiknak. [3]



1. ábra. A Spitfirehez készített Mk II giro célzókészülék
(forrás: <http://spitfiresite.com/2007/11/mark-ii-gyro-gunsight.html>)

A technika fejlődésével az 1950-es évek közepére egyre több repülési paraméter játszott szerepet a célgyűrű megfelelő mozgatásában. A folyamat gyorsabb és megbízhatóbb lett mivel a mechanikus részegységek helyét elektromosak vették át. Bővült a bevethető fegyverek száma, megjelentek az irányítható és nem irányítható rakéták. A céltávolság becslése légi célok esetén jóval pontosabbá vált, ha az a földi radarról érkezett, vagy ha a repülőgép rendelkezett saját radarral. Lehetőség nyílt a földi célok pontos támadására is. A célzókészülék már két részre bontható: egy analóg számító egységre és egy megjelenítő egységre. [3]

Az analóg számítóegység a következő paramétereket dolgozta fel:

- a fegyver ballisztikai sajátosságait;
- a repülőgép barometrikus magasságát, állás- és csúszás szögét, különböző tengelyek körüli szögsebességét;
- valamint a cél szögsebességét, méretét és távolságát.

KEZDETLEGES HUD-OK

Az előző felsorolásból látható hogy a célzókészülékek több olyan paramétert is felhasználtak, amelyeket a navigációs műszerek külön-külön megjelenítenek. A head-up display (szemmagasságú kijelző, homloküveg indikátor, HUD) előnye a hagyományos kijelzőkkel ellentétben abban rejlik, hogy a célzókészülékekhez hasonlóan közvetlenül a pilóta látóterében elhelyezett üveglapra (kombiner üveg, angolul combiner, reflexüveg) jelenítik meg a repülésben elengedhetetlennek számító információkat. Ennek eredményeként a hajózó nem kényszerül a

műszerfal periodikus figyelésére olyan körülmények között, amikor a külvilágra történő folytonos koncentráció és reakció életbevágó. Ilyen helyzetek lehetnek, például a manőverező légi harc, leszállás, felszállás, kismagasságú csapásmérés. Egy anyahajóra történő leszálláskor, mikor a kifutópálya folyamatosan változik, és még „halad” is, nincs idő a műszerekről a távolba és onnan vissza a műszerekre fókuszálni, hiszen az emberi szem számára ez csaknem 2-3 másodpercet vesz igénybe, a látási viszonyoktól függően.

Sokszor jelentett problémát a giro célzókészülékeknek a nem megfelelő fényerő. Erős természetes fény esetén előfordult, hogy a reflexüvegen visszatükröződött a pilótafülke képe. Szükség volt olyan eszközre, ami jobban látható képeket biztosít a pilóta számára. Az 1950-es évek végén az első homloküveg indikátorokban kezdték alkalmazni az akkor már fél évszázada ismert katódsugárcsőket (cathode ray tube, CRT), mint új fényforrást. A CRT-ben található elektronágyú elektron nyalábot bocsát egy fluoreszcens ernyőre, melyen a sugár következtében zöld fény gerjesztődik. Az elektronsugár irányát, eltérítő tekercsek által létrehozott elektromágneses mező képes megváltoztatni, függőleges és vízszintes irányokban. Az elv alapján egyszerű vonalas alakzatok és alfanumerikus karakterek rajzolhatók a foszforernnyőre.

Az angol haditengerészetben alkalmazott Blackburn Buccaneer csapásmérő repülőgépekre szerelték fel az első HUD-nak tekinthető kijelzőket 1958-ban. A kijelzőt a Cintel, később Elliot Flight Aviation gyártotta a Buccaneerek számára. A HUD a fegyverkezelés támogatásán kívül olyan navigációs adatokat is megjelenített, mint: műhorizont, magasság, sebesség, bólintási szög skála. Az említett adatok közvetlen észlelése lehetővé tette a viszonylag kis magasságokon történő támadást, így javítva a hatékonyságot és túlélő képességet. A Királyi Haditengerészet szolgálatában álló Buccaneerek pilótái számára jelentősen megkönnyítette a fedélzetre való leszállást. [4][5]



2. ábra. Blackburn Buccaneer HUD

(forrás: http://www.rochesteravionicsarchives.co.uk/View_Object?ObjectId=1097)

Mivel a head-up display egy új alkalmazás volt, természetesen akadtak akik kétségbe vonták hatékonyságát és szükségességét. Ennek oka nem csak az volt, hogy az avionikai rendszer összköltségének közel 10%-át tette ki, hanem az is, hogy tetemes tömeg többletet is jelentett. A gyakorlat azonban azt mutatta, hogy a HUD-al felszerelt repülőgépek pilótái sokkal hatéko-

nyabban voltak képesek irányítani légijárműveiket. A velük egy időben HUD-ok nélkül alkalmazott repülőgépekhez képest kisebb százalékban történtek leszállás közben katasztrófák.

Az Egyesült Államok légierijében szolgáló első HUD-al rendelkező repülőgép a Vought A-7 Corsair II könnyű csapásmérő feladatkört látott el, ezért széles körben alkalmazták a Vietnámi háborúban. A Marconi-Elliot által gyártott HUDWAS-ra (Weapon Aiming System – célzás rásegítő rendszer) indikátor került rá, mely nagymértékben támogatta a csapásmérő feladatok végrehajtását. Amellett, hogy az alap navigációs adatokat megjelenítette, a fegyverrendszer célzását különböző üzemmódokkal igyekezett hatásosabbá tenni. A Marconi-Elliot cég további elavultabb avionikájú repülőgép típusokra gyártott homloküveg indikátorral egybeépített célzó rendszert, mint például az F-4 Phantom, vagy A-4 Skyhawk, mivel a vietnámi háború rámutatott, ezen típusok hiányosságaira. A később beépített HUD-ok esetében figyelmet fordítottak a már meglévő avionikával való kompatibilis kialakításra. [6]



3. ábra A-7E HUD

(forrás: http://www.rochesteravionicarchives.co.uk/View_Object?ObjectId=1104)

FOLYAMATOSAN MEGJELENŐ ÚJÍTÁSOK

A hatvanas évek közepén indított új repülőgéptípusok létrehozására irányuló fejlesztések során egyre több repülőgépre tervezték a head-up display beépítését. Ekkor még előnyt élveztek a potensebb vadászgépek, mint például a Hawker Siddeley Harrier, vagy a közös európai összefogás alatt készülő MRCA (Multi Role Combat Aircraft – többcélú harcirepülőgép), mely végül a Panavia Tornado lett, valamint az amerikai YF-16, később F-16. A könnyű vadászgépeken, vagy kiképző gépeken leginkább még mindig a GGS-t alkalmazták néhány kivételtől eltekintve pl.: SEPECAT Jaguar. [7][8]

Az új HUD rendszerekben már a digitális technológia kezdetleges elemei kerültek felhasználásra. Az egyre növekvő memóriakapacitás megsokszorozta a HUD által megjeleníthető üzemmódok számát. Az első 2000 szavas beépített memória az általános navigációs paramé-

terek mellett légi célzást és manuális bombázást tett lehetővé. Az egy generációval jobb 4000 szavas memória már támogatta a CCIP (Continuously Computed Impact Point – folyamatosan számított becsapódási pont) segítségével történő bombázást. [9]



4. ábra. F-15E HUD CCIP üzemmódjának szimbólumai
(forrás: <http://www.ausairpower.net/Profile-F-15A-D.html>)

Egy másik újítás volt a röppálya vonal vagy nyomjelző vonal (tracer-line) megjelenése. A HUD légiharc üzemmódban nem csak a célgyűrűt vetítette ki, hanem egy vonalat is, ami a lövedék várható röppályáját hivatott szimulálni. Az alakja dinamikusan változott a repülőgép manőverezésével együtt. Mivel már a fedélzeti radarok képesek voltak megállapítani a cél távolságát, azt könnyen értelmezhető módon kellett kijelezni a pilóta számára: ez egy olyan nyolcszöggel történt melynek oldalai egyenként 100 m távolságot jelentettek, ahogy közeledett az ellenséges repülőgép, úgy tűntek el egymás után a nyolcszög oldalai, ezzel szemléltetve a csökkenő távolságot. A pilóták elmondása szerint a nyomjelző vonal és a távolságjelző nyolcszög jelentősen megnövelte a találati pontosságot. [10]

A HUD-ok képesek lettek a fegyverzet állapotát is jelezni. Rakéták vagy bombák esetén annak típusát, rendelkezésre álló mennyiséget, a fedélzeti gépágyú(k), géppuska(ák) esetében a lőszer maradvány kijelzését. A HUD memóriájába betáplálhatóak voltak a repülési útvonal fordulópontjai, így a megfelelő szimbólumok követésével könnyebbé vált a navigáció. A beépített memória képes volt tárolni a célok, veszélyes légterek, és repterek helyzetét.

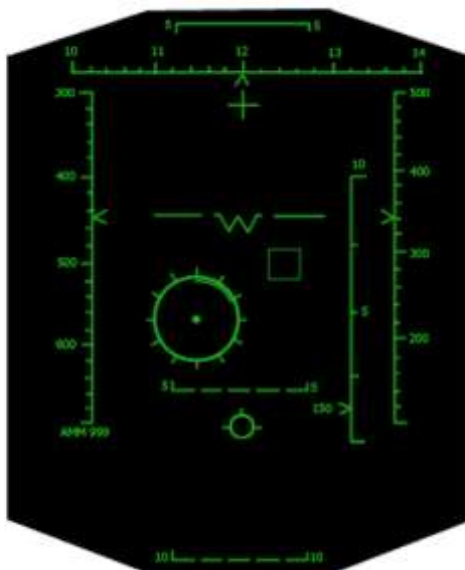
ÁLTALÁNOS HUD ÜZEMMÓDOK ÉS A HOZZÁJUK TARTOZÓ SZIMBÓLUMOK

Mint általában a katonai repülésben, a HUD-tól elvárt működési paraméterek, üzemmódok és az általános szimbólumok is különböző katonai szabványok formájában került egységesítésre és rögzítésre. Az egységes szimbólumok megalkotását az USA légierije kezdeményezte 1991-ben. A tesztek során a már ismert HUD üzemmódokhoz a szimbólumok csoportjainak több kombinációját tesztelték. A projekt azért vált szükségessé, mert a gyártók saját belátásuk

szerint alkották meg a szimbólum csoportokat. Ezért fordulhatott elő, hogy a kiképző repülőgépeken megtanult jeleket a hajózó növendékek már nem tudták alkalmazni későbbi gépeiken, de az átképzések során is időtöbbletet jelentett az oktatásban. Mindig az adott HUD sajátosságait kellett megszokni.

Az Amerikai Védelmi Minisztérium (USA Department of Defense, DoD) 1996-ban jelentette meg a MIL-STD-1787B szabványt melynek rendeltetése a katonai repülőgépeken alkalmazott elektro-optikai kijelzőkön (HMD, HUD, HDD) található szimbólumok egységessé tétele. Így a repülőgép vezetők könnyebben válthattak a típusok között. Máshonnan megközelítve, ha pilóta figyelmét áthelyezte a szemmagasságú kijelzőről a szem alatti kijelzők valamelyikére, nem kellett fejben átváltania az információkat. A kijelzők helyettesíthették egymást, esetleges meghibásodás esetén. [11]

Az esetleges változtatások nem jelentettek nagy problémát az alkalmazó légierők számára, mert a szimbólum generátor blokkok átprogramozása nem volt idő- és költségigényes feladat.



5. ábra. F-15E HUD levegő – légi harc célzás üzemmód szimbólumok
(forrás: <http://www.ausairpower.net/Profile-F-15A-D.html>)

CÉL: NAPSZAKTÓL FÜGGETLEN BEVETHETŐSÉG

A hetvenes évek közepére a navigációs rendszerek már olyan fejlettek voltak, hogy segítségükkel teljesíteni lehetett az alacsony látási körülmények közti repüléseket, sőt a HUD-okon parancsközlő indexek mozogtak a magasság és sebesség függőleges skálái, valamint az irány-szög körcikkek mellett. Az éjszakai bevetethetőség nagy előnyt jelentett az ellenséges légvédelemmel szemben. Problémát jelentett, hogy a földi célok támadása nagyon kis hatásfokúnak bizonyult az erősen csökkent látási viszonyok mellett. Miután megjelentek az LLTV (Low Light Television) és FLIR rendszerek (Forward Looking Infrared) ez gyökeresen megváltozott. A kettő közül az infravörös sugarakat észlelő FLIR volt az, amely hatékonyabbnak bizonyult, hisz napjainkban is monopóliumot élvez. Az egyik legjobb példa az akkoriban újnak

számító LANTRIN konténer, melyet az F-16 vadászgéphez, valamint A-10 csatarepülőgéphez fejlesztettek ki. A függesztményen belül egy FLIR és egy földfelszín letapogató radar (Terrain Mapping Radar) található. A FLIR és LLTV képeket eleinte csak a műszerfalba épített CRT kijelzőkön lehetett követni, de újra belátták, hogy rontja a pilóta helyzetérzékelését, ha nem a körülötte lévő környezetre koncentrálna, így a legtöbb HUD gyártó cég megoldotta, hogy kijelzőiken egyszerre rásztér – FLIR által közvetített TV-szerű kép – és a hagyományos vonalas alakzatok legyenek megjeleníthetőek. A HUD képét előállító CRT-t ki kellett egészíteni a FLIR képeket feldolgozó és közvetítő blokkal. A HUD-on megjelenő termovizuális kép a CRT biztosította monokróm zöld szín árnyalataiból tevődött össze. A hőmérsékleti tartományok színei napszakonként változtak, mégpedig: nappal a meleg objektumok sötétek, a hidegek világosak, éjszaka fordítva. Ez a kialakítás műhorizont dublorként is szolgált, hiszen nappal az eget világosnak, éjszaka sötétnek látta a pilóta, a valóságnak megfelelően. [12][13]



6. ábra. A-10 HUD kikapcsolt állapotban

(forrás: <http://www.jetairblog.com/2011/05/80/a-10-thunderbolt-ii-profile>)

Sajnos probléma maradt a FLIR egységek biztosította kis látószög ezért a fordulók végrehajtása veszélyessé is válhatott, hiszen a hajózó nem láthatta, hogy hová tart a repülőgépe. Az egyik megoldás a HUD és a FLIR által belátható tér növelése lett volna, de a 70-es évek végén ezek a technológiák még kísérleti fázisban léteztek csak. Egy másik lehetőség, az éjjellátó (NVG – Night Vision Googles) alkalmazása volt. Ha az alkalmazó légierő ezt a megoldást választotta, akkor a homloküveg indikátort úgy kellett konfigurálnia, hogy a fényereje és színe ne okozza az NVG biztosította kép romlását. [13]

A HUD BIZTOSÍTOTTA LÁTSZÖG NÖVELÉSE

A head-up displayek esetében a rajtuk keresztül látható terület nagyságát vízszintes és függőleges irányban egy szögréértékkel adják meg. Ezt az értéket a reflexüveg méretei, a hajózó szemétől való távolsága valamint, a kollimátor lencse átmérője a reflexüvegtől való távolsága határozza meg. Ezek olyan tényezők, amiket a pilótafülke méreteiből fakadóan nem lehetett következmények nélkül növelni. Figyelembe kellett venni a tömeg korlátozásokat, valamint

hogy a HUD egység nem nyúlhatott a biztonságos katapultáláshoz szükséges területen (ejection line) belültre.

Az 1970-es évek közepéig gyártott HUD-ok átlagosan $20^\circ \times 15^\circ$ (függőleges x vízszintes) látószöget nyújtottak. Ez nem is jelentett addig problémát, amíg szükségessé nem vált a FLIR vagy LLTV képeinek 1:1 méretarányú megjelenítése. A gyártók az előző bekezdésben említett problémák valamelyikének kiküszöbölésével próbálták növelni a FOV-t (Field of View vagy Field of Vision). Egy ekkor már ismert technológia a holográfia segítségével a kutatók megoldották azt, hogy a kollimátor lencse elhanyagolható legyen és a képek végtelenbe történő fókuszálása magán a reflexüvegen történjen. A kulcs a diffrakciós rács felhasználása, melyet holografikus eljárással hoztak létre egy vékony átlátszó filmrétegre. Ez biztosította a megfelelő fókuszálást. Sőt a diffrakciós rács szűrőként is funkcionált, így csak a CRT foszforernyőjéről származó fény hullámhosszát és annak közeli tartományát verte vissza. Ezzel megszűnt a napfény okozta tükröződés és a hagyományos üveghez képest a hasznos fény 30%-a helyett 90%-ot juttatott a hajózó szemébe.

Az ilyen kialakítású kijelzőket holografikus, vagy diffrakciós HUD-oknak nevezték el. A DHUD használatával a vízszintes látószög 15° -ról 30° -ra nőtt. A függőleges látószög megnövelését csak 2-3 reflexüveg, eltérő szögben egymás mögé helyezésével lehetett elérni, ilyen megoldást találunk például az F/A-18-on is. [14]

Az első holoHUD-ot a Hughes Aircraft építette be egy svéd J-37 Viggenbe, mellyel 1979-től 1982-ig körülbelül 150 tesztrepülést hajtottak végre. A technika előnyeinek nyilvánvalóvá válásával, egyre több új típusba tervezték beépíteni. A régebbi repülőgépeken modernizálások során igyekeztek a hagyományos HUD-okat lecserélni. Az eleinte magas előállítási költség miatt, az avionikai rendszerekkel foglalkozó gyártók nem álltak el a hagyományos optikával rendelkező HUD-ok gyártásától sem. Termékeiket úgy tervezték, hogyha a vásárló később mégis igényt tartana a holografikus változatra, ne kelljen teljes cserét végrehajtani, néhány blokk beépítésével megoldható legyen a váltás.

Az 1985-ös adatok alapján a következő gépeken került vagy tervezték a holoHUD-ok alkalmazását: [14][15]

- GEC Avionics(UK): F-16, A-10;
- Kaiser Electronics(USA): F-15E;
- Hughes Aircraft(USA): JAS-39 Gripen, F/A-18;
- Ferranti(UK): RAF Tornado;
- Smith Industries(UK): Jaguar, Eurofighter Typhoon;
- Thomson CSF(FR) (Thales): Dassault Rafale.

Az 1980-as évek közepén, mint az előbbi felsorolásból is látszik, folyt a napjainkban is korszerűnek számító gépek kifejlesztése, vagy korszerűsítése. A diffrakciós típusú HUD-ok használata, szinte kivétel nélküli csak a katonai repülésben. Előrelépést a korszerűsödő számítástechnika jelentett, például: egyre gyorsabb számítógépek, CRT helyett LCD, később AMLCD képalkotás. Az üzemmódok, és a hozzájuk tartozó szimbólumok is csak az új lehetőségek megjelenésével változott, jó példa erre az egyes gépek által észlelt célok helyzetének kivetítése a vele szövetséges repülőgép HUD-jára.

Miközben a legtöbb ország légierijének pilótái már több mint egy évtizede, napi szinten találkoztak a HUD-okkal, addig a civil alkalmazás még váratott magára. Egészen 1972-ig, míg Gilbert Kopfstein francia mérnök, berepülő pilóta megalkotta a CV-91 típusú homloküveg indikátort. A saját tapasztalatait felhasználva a tervezés során, olyanra készítette, hogy jó látási viszonyok közt végrehajtott leszállások során asszisztáljon a pilótáknak. Ekkor a kijelzőt még nem elsődleges támpontnak használták a leszállások során. [16]

Forradalminak számító megoldása a pályavektor szimbólum, egy mozgó köralakként jelent meg a kijelzőn, jó megközelítéssel megadva a távolban azt a pontot, ahová a repülőgép tömegközéppontja várhatóan érkezik. Az alkalmazó pilóták szerint ez a megoldás jelentős segítséget nyújtott a leszállás során, annak ellenére, hogy pontatlan volt, mivel az oldalszelet még nem szemléltette.

Kopfstein következő HUD-ja a TC-121, újabb fontos újítást jelentett a repülésben. A kijelzőn megjelent a célreptér kifutópályájának körvonala, egy trapéz alakzat formájában. A repülőgép beérkezése közben, mikor az már érzekelte a reptér ILS jeleit, a HUD jelgenerátor blokkja feldolgozta és megjelenítette a tükör-üvegen a kifutópálya keretét. Kiegészítő tájékozási pontként, a körvonalakat középen átszelő vonal segítségével szemléltették a felszállópálya középvonalát. A parallaxis hiba kiküszöbölése következtében nagy távolságokból is jó referenciát kaptak a pilóták a kifutó helyzetéről, hisz a trapéz alakzat a leszállás végéig olyan érzetet keltett mintha a kifutópálya szegélye teljesen ki lenne világítva. Mivel az ILS vevőről érkező jelek feldolgozásra kerültek így a head-up displayek helyettesíthették az elektromechanikus ILS kijelzőket is. [16]

Elsőkét a francia Air Intel légitársaság alkalmazta 1974 járatain a szintén francia Thomson CSF homloküveg indikátorát, Dassaul Mercure típusú gépeiken. Csak másodlagos leszállási támpontként szolgált, az automata leszállító rendszer ellenőrzésére, bár ennek meghibásodása esetén engedélyezett volt a kézi leszállás a HUD segítségével. [16]

Az egyik legnagyobb gazdasági és repülésbiztonsági problémát a rossz időjárási viszonyok jelentették a civil légitömegközlekedésben. A repterek, vagy nem fogadhattak, vagy nem indíthattak járatokat, a repülőgépek várakozó légtérbe kényszerülhettek, de egy távolabbi reptérre is küldhették őket, és a már megkezdett leszállások sem maradtak mindig eseménymentesek. Bár az ILS rendszer segítségével alacsonyabb időjárási minimumok mellett is megkezdődhetett a beérkezés. Az ilyen jellegű rendszerek repülőterenként és gépenként is eltérő időjárási minimumokhoz voltak használhatóak.

	Minimum döntéshozatali magasság (decision height, DH)	Minimum kifutópálya látótávolság (runway visual range, RVR)
Category I (CAT I)	61 méter	800 vagy 550 méter
Category II (CAT II)	61 – 30 méter	300 vagy 350 méter
Category III A (CAT IIIa)	30 méter	200 méter
Category III B (CAT IIIb)	15 méter	50 vagy 75 méter
Category III C (CAT IIIc) (gyakorlatban még nem megvalósítható)	0 méter	0 méter

1. táblázat ILS leszálláskor használt időjárási minimumok

Hiába rendelkezett egy légi jármű CAT III leszálláshoz szükséges rendszerekkel, ha a célreptér adói csak a CAT I leszállásokat támogatták. Mivel a törölt leszállások és más repterekre történő átirányítások, évente jelentős összeget jelentettek a légitársaságoknak, szükség volt a minimumok csökkentésére.

A forgalmasabb repterek és nagyobb légitársaságok megengedhették maguknak, a jobb megbízhatóságú leszállító rendszereket, de a regionális légiközlekedésben ez nem mindig volt kivitelezhető. Ekkor jöhetett szóba a HUD-ok alkalmazása.

A nyolcvanas évek közepén az Alaskan Airlines az egyik legjobb példa, mivel gyakorta volt szükség a CAT III minimumok közti leszállásra az általuk használt reptereken. A Flight Dynamics kijelzőjének tesztelése a Boeing 727-ben 1985-ben kezdődött. A Szövetségi Légügyi Hatóság 1989-ben engedélyezte az Alaska Airlines 20 db 727-én a HUD-dal való CAT III leszállásokat. Az elsőt még ebben az évben sikeresen végrehajtották. Az új képesség kihasználásával a légitársaság 1 év alatt 1 millió dollárt takarított meg amellet, hogy körülbelül tízezer dollárt fordított az új HUD-ok üzemeltetésére. A rendszer jó mutatói miatt az USA-ban több regionális társaság alkalmazni kezdte a kijelzőt: Canada Air, Fed Ex. [16]

Szélesebb körben mégsem terjedtek el a HUD ok, ezért a gyártók, a képességek maximalizálására törekedtek. A kilencvenes évek elején szenzorfüzióval igyekeztek kiterjeszteni a homloküveg indikátorok felhasználhatóságát. Az Enchanted Flight Vision System (magnövelt észlelést biztosító rendszer) a FLIR kamera képével és terepkövető radar segítségével alkotta képeket vetített ki a HUD-ra. A Synthetic Vision System (mesterséges látvány alkotó rendszer), a GPS és domborzat adatbázis felhasználásával kreálta meg a környezet képét, melyet eleinte csak a műszerfalba szerelt kijelzőkön jelenítettek meg. A két rendszer évekig tartó rivalizálásának eredményeként a repülőgépeken vegyes alkalmazásként jelentek meg, így hátrányaik kiküszöbölhetőek voltak. A FLIR nem volt érzékeny a hőmérséklet anomáliákra, de valós idejű képet biztosított, az SVS pedig megbízható domborzati információkkal, magas építmények, veszélyes tereptárgyak, repterek helyzetével látta el a pilótákat. Emellett a kép a homloküveg indikátoron és a műszerfalba épített optikai kijelzőkön egyaránt megjeleníthető volt, így téve redundánssá a rendszert. [17][18]

A 90-es évek vége felé nagy lendületet adott a HUD fejlesztésének az egyre szélesebb körű alkalmazás a civil Bussines Jeteken (Gulfstream, Bombardier, Cessna). Az új, helyzetérzékelést javító megoldások még inkább segítették a pilóták munkáját. Megjelent a TCAS (Traffic

Collision Avoidance System – veszélyes megközelítést jelző rendszer), amelynek jelzése a HUD-on a veszélyt jelentő légkör bekeretezésével történik. A föld közelében veszélyes magasság esetén felirat és a javasolt magasság, sebesség és bólintási szögváltoztatás indexek jelzik a repülőgép vezető számára. [17][18]

A leszállások előtt a környező terület képe hasznos támpontokat szolgáltat, ezért a kijelző segítségével a domborzati adatbázis alapján könnyebb a tájékozódás (lásd 7. ábra – jól láthatóak a domborzat adatbázis által megjelenített magas építmények). A pilóta sebesség, magasság dőlés és bólintás korlátokat állíthat be, ha ezeket túllépi a repülőgép, a HUD-on kijelzésre kerül. [19]



7. ábra Rockwell Collins HGS-6000 HUD.

(forrás: GEORGE, Fred, Bussines and Commercial Aviation, 2011 november 52-54 o.)

Egyre több adat megjelenítésével a kijelzők akár zavaróakká, és félreérthetőekké válhattak a pilóta számára, ez főleg a leszállás előtti pillanatokra tartogatható veszélyt. Ezért jelent meg a kijelző túlszűfoltóságát megszüntető gomb. Leszállás pillanatban a gomb lenyomásával, csak azok az információk maradtak a HUD-on, melyek ténylegesen elengedhetetlenek az adott repülési fázis teljesítéséhez. Hogy melyek legyenek ezek az adatok, a személyzet maga táplálhatta be a rendszerbe.

Típusok melyeken alap vagy választható felszereltség a HUD:

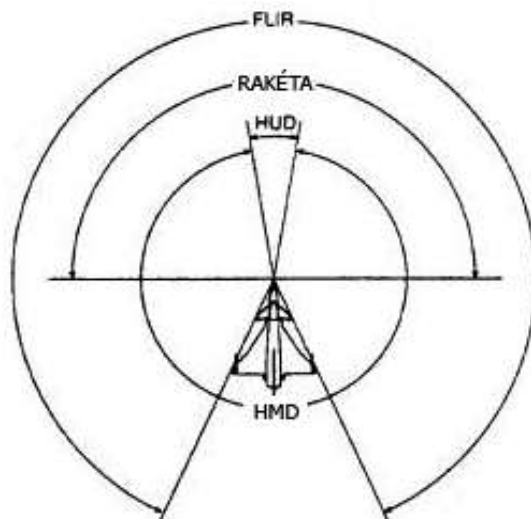
- Gulfstream 450, 500, IV, V;
- Embraer Legacy 450, 500;
- Bombardier 5000, 6000;
- Boeing MD-10, MD-11, 727, 737, 747;
- Airbus A300, A310, A330, A340, A380.

A JÖVŐ

Napjainkban körülbelül 2000 HUD-ot alkalmaznak a kereskedelmi és 15 000-et a katonai repülésben. A katonai felhasználása azért ennyivel gyakoribb, mert a fegyverrendszerek elengedhetetlen részét képezi, mint a célzó-navigációs komplexum része. A civil repülésben sok esetben csak kiegészítő alkalmazásként szerepel, de a szakértők szerint a jövőben egyre job-

ban elterjed majd, a következő évtized végére várhatóan 5000 kereskedelmi- és magánrepülőgépen alkalmazzák majd.

A gyakorlat viszont azt mutatja, hogy a katonai repülésben lassan elérkezik a technika felváltása. A jelenleg legfejlettebbeknek számító 5. generációs többfeladatú harcászati repülő, az F-35 másnéven Joint Strike Fighter pilótafülkéjét 2 multifunkciós LCD kijelző uralja, head-up display nem került beszerelésre. A magyarázat egyszerű, feladatát teljes mértékben átvette a sisakra függesztett kijelző. A HUD egyik legnagyobb hátrányát küszöböli ki, azaz annak korlátozott látószögét. A következő ábra szemlélteti legjobban az egyes eszközök által belátható teret. [20]



8. ábra. Belátható tér

(forrás: COLLINSON, R.P.G. , Introduction to avionics systems, Springer; 2011, 47 o)

A JSF-en kívül évek óta alkalmazzák a HUD mellett kiegészítő alkalmazásként más vadászgépeken. Bár a közelmúltban már lehet, hogy inkább a HUD töltött be kiegészítő szerepet a HMD mellett. Ilyen repülőgépek: JAS-39 Gripen, F-16, F-18, F-22, Dassault Rafale, Eurofighter Typhoon. A célzó-navigációs komplexum részeként, több mint egy évtizede alkalmazzák a head mounted displayeket a harci helikoptereken is, például: AH-64.

Ahogy a HUD-ot hátrányai miatt felváltja a HMD, úgy hatékonyabb megoldások idővel leválthatják azt is. Már napjainkban is létezik, igaz csak technikai demonstráció szinten a retina kijelző (virtual retina display), mely egy felhelyezett kontaktlencse segítségével már 2 számjegyet képes a használó retinájára vetíteni.

A head-up displayek a repülésen kívül szinte a legtöbb közlekedési eszközön és más katonai alkalmazásokban is feltűnhetnek. 1988-ban a Corvette C 5 gépjárműveket már felszerelték HUD-dal, azonban az alkalmazás megmarad kuriózum szinten. Ennek oka talán az volt, hogy a gépjármű sofőrjének nem szükséges olyan mértékű koncentráció, mint egy A380-as pilótájának leszállás közben, emellett magas költsége sem indokolta elterjedését.

A cikk megírásával a szerzőknek az volt a céljuk, hogy a head-up displayek fejlődésének nem oly részletes történetét megismertessük, ezen keresztül az olvasó betekintést nyerhessen felhasználásuk, működésük alapelveibe. A cikk olvasása után beláthatjuk, hogy a homloküveg indikátorok hozzájárultak és hozzájárulnak a baleseti statisztikák és a hajózók helyzetérzékelésének javulásához, épp úgy, mint a fegyverek találati pontosságának nagymértékű növekedéséhez. A modern repülés egyik elengedhetetlen információforrásként, valószínűnek tartom, hogy a pilóták szeme a repült idő nagy részében a head-up displayekre szegeződik.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] MOORE – SEARSON, L. D. , Gunsight Evolution, Flight International, 1976 február, 494 – 495 o.
- [2] JARRET, D. N., Cockpit Avionics, Ashgate Publishing Limited, England, 1988.
- [3] Gyro gunsight, Wikipedia the free encyclopedia, e – dok. url: http://en.wikipedia.org/wiki/Gyro_gunsight (2011. 11. 04)
- [4] Head – up display, Wikipedia the free encyclopedia, e – dok. url: http://en.wikipedia.org/wiki/Head-up_display (2011. 09. 29.)
- [5] <http://www.rochesteravionicarchives.co.uk> (2011. 10. 11.)
- [6] Raster HUD for A – 7E, Flight International, 1977 március, 783 o.
- [7] PARKER, W. J., MRCA head – up display, Flight International, 1973 szeptember, 506 o.
- [8] Systems and Components, Flight International, 1974 szeptember, 303 o.
- [9] <http://www.ousairpower.net/TE-Fighter-Cockpits.html> (2011. 11.05.)
- [10] MOORE – SEARSON, L. D. , Snap - shoot, Flight International, 1974 február, 745 - 746 o
- [11] MIL – STD – 1787B, USA Department of Defence, 1996
- [12] Raster head – up displays, Flight International, 1975 október, 665 - 666 o.
- [13] Flying with Flir, Flight International, 1985 december, 26 - 28 o.
- [14] WARWICK, Graham, Head up holograms show the way, Flight International, 1986 march, 26 - 29 o.
- [15] Viggen tests Gripen avionics, Flight International, 1983 január, 64 o.
- [16] Taking a look ahead, Flight International, 1991 május, 32 - 34 o.
- [17] WARWICK, Graham, No need to see, Flight International, 1992 június, 40 - 42 o.
- [18] Virtual Landings, Flight International, 1993 augusztus, 40 - 42 o.
- [19] GEORGE, Fred, Business and Commercial Aviation ,2011 november 52-54 o.
- [20] COLLINSON, R.P.G. , Introduction to avionics systems, Springer; 2011, 47 o.