

Dr. Békési Bertold<sup>1</sup>

## REPÜLŐGÉPEKEN ALKALMAZOTT DIGITÁLIS ADATBUSZOK<sup>2</sup>

*A repülőgépeken az avionika szolgálja ki a villamosenergia-ellátás, a világítás, a hírközlés, a navigáció eszközeit, de ugyanígy felel a hajtóművek, repülésvezérlés, vagy a futómű villamos vezérlő és jelzőrendszeréért. A korszerű fedélzeti berendezések között a rendkívül összetett és nagysebességű információáramlást digitális adatbusz rendszerekkel valósítják meg. Az írásmű célja ennek az új eszköznek és eljárásnak a bemutatása – a széleskörű szakmai érdeklődők számára.*

### **DIGITAL DATABUS ON BOARD OF AIRPLANE**

*The avionics serves on board of airplanes electric supply, lighting, communications, navigations tools, but also responsible for engines, flight controls, landing gears, and diagnostic systems. The advanced on-board equipment of the very complex and high-speed digital data bus flow of information systems implemented. The writing of this work is the presentation of the new tools and procedures – a wide range of professional interested.*

## BEVEZETÉS

A Második Világháborúban az elektronika megjelent a repülőtechnikában is. A repülőgépek közötti és a földi irányítással kapcsolatot teremtő rádióhíradás rendkívül intenzíven fejlődött. A magnetron új lehetőségeket teremtett a földi és fedélzeti felderítő rádiólokátorok számára.

A digitális technika alapelvei már ismertek voltak azelőtt, hogy a repüléstechnikában alkalmazni kezdték volna. A Második Világháborúban a Colossus nevezetű kód-feltörő gép rengeteg elektroncsövet használt, a hatalmas mérete miatt természetesen nem lehetett a fedélzetre vinni.

A számítástechnika történetének nagyjai között Neumann, Mauchly, Eckert, Atanasoff, Berry és Goldstine neve mellett meg kell említenünk Alan Turingot is, aki részt vett az első elektronikus, digitális számítógép tervezésében a II. világháborúban, de erről a világ mit sem tudott az 1970-es évekig.

Az ő elmélete és Max Newman tervei alapján 1943-ban megépítették a Colossus nevű elektronikus számítógépet a náci vezérkar által használt Lorenz titkosítás feltörésére. A Colossus elektronikus elven működő, programozható, digitális számítógép volt, Turing algoritmusát felhasználva, és továbbfejlesztve építették meg.

(Sok helyen lehet olvasni, hogy ő tervezte vagy építette a Colossust – ez nem igaz. Az ő elméletét használták a kódfeltörő algoritmushoz.) A háború végén már tíz, továbbfejlesztett Colossus II. dolgozott az üzenetek dekódolásán. A háború után azonban ezeket a gépeket

<sup>1</sup> okleveles mérnök alezredes, egyetemi docens, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, e-mail: bekesi.bertold@zmne.hu

<sup>2</sup> Lektorálta: Prof. Dr. Makkay Imre, egyetemi tanár, CSc, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, makkay.imre@zmne.hu

megsemmisítették, a tervrajzokat is titkosították [1].

A Második Világháborúban az elektronika megjelent a repülőtechnikában is. Az 1960-as évektől az elektroncsöveket kezdte felváltani a tranzisztor - bizonyos alkalmazásokban. A 1970-es években a tranzisztorokkal már digitális áramköröket fejlesztettek a repülő rendszerek számára. Kezdetben ezek kizárólag a katonai repüléstechnikában kerültek felhasználásra, mint navigációs és harci berendezések.

A fedélzeti elektronika alkalmazása sok éven keresztül korlátozott volt – az analóg rendszerek jelszint- és feszültség ingadozásai és egyéb lineáris és nemlineáris problémáik miatt, melyek a rendszert megbízhatatlanná tették.

Az első digitális rendszereket is használó repülőgépet, a North-American A-5 Vigilante-ot az Amerikai Egyesült Államok fejlesztett ki a 1960-as években, és üzemeltette az US Navy anyahajóján.

Az 1960-as években ez a technika még nem létezett az Egyesült Királyságban egészen addig, amíg az Anglo-French Jaguar és a Hawker Siddeley Nimrod fejlesztésbe nem kezdtek. A céljuk az volt, hogy a digitális technikát az egész repülőgépen alkalmazzák, így alkották meg a TSR 2-öt, mely fejlesztését később a Brit kormány 1965-ben leállította. A TSR 2-ön alkalmazott technika alapját a félvezető tranzisztorok alkották, bár ez a technika ekkor még gyerekcipőben járt.

Az 1970-es évek második fele és az 1980-as évek eleje óta elképesztő mértékben kezdték alkalmazni a digitális technikát, ennek a kulcsfontosságú elemei a már rendelkezésre álló, és nem drága digitális adatbuszok voltak, úgy, mint az ARINC 429, MIL-STD-1553B illetve az ARINC 629. Az olcsó mikroprocesszorok, valamint a szoftveres fejlesztések tették lehetővé ezek széleskörű elterjedését és ma már gyakorlatilag egyetlen repülőrendszer sem képes nélkülözni ezt a technikát. Az 1. ábrán az intenzív fejlesztés jelentősebb állomásai láthatók.

Hajtómű vezérlés	1950	1960	1970	1980	1990	2000
Repülés vezérlés		Analóg elektronikus hajtóművez.	Részleges digitális hajtóművez.	Teljes digitális hajtóművez.		
			Analóg elsődleges/mechanikus tartalék	Digitális másodlagos vezérlés	Digitális elsődleges/mechanikus tartalék	Digitális elsődleges/nincs mechanikus tartalék

1. ábra Főbb elektronikai fejlesztések 1950-es évektől

Az analóg hajtóművezérlő rendszereket első körben az Ultra vezette be még az '50-es években, amely elektronikus jelzésű gázkarral volt ellátva, úgy, mint a Bristol Britannia. Teljesen digitális hajtóművezérlő rendszereket csak az 1980-as évek óta készítenek.

Az Airbus A320-as családra jellemző az elsődleges digitális vezérlés – mechanikus biztonsági rendszerrel. Az A330\A340-es típusoknál oldalsó vezérlő kart, a B777 típusnál, pedig hagyó-

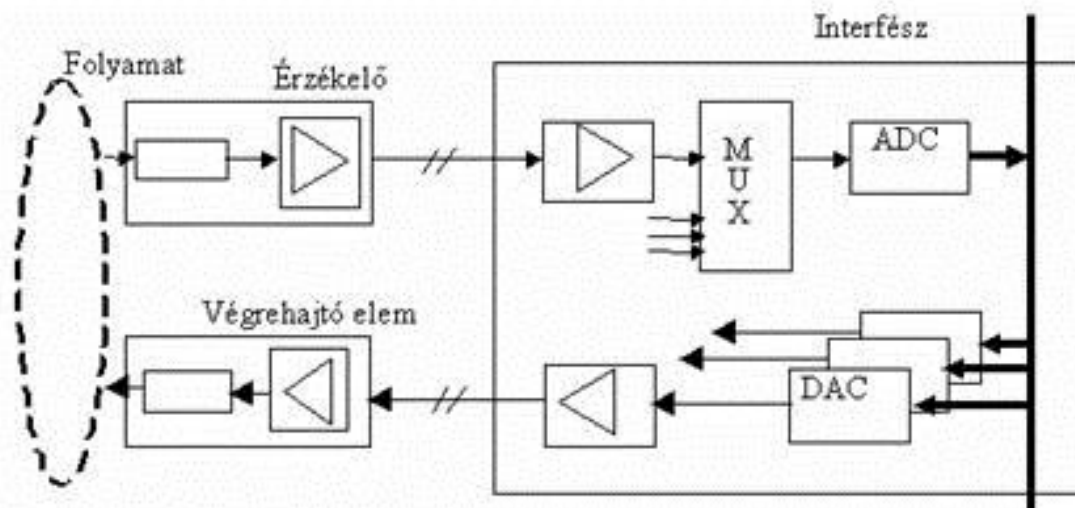
mányos szarv-kormányt használnak. Az Airbus A380-as és a Boeing 787-es típusoknál már csak digitális szabályozó berendezések működnek – mechanikus biztonsági rendszer nélkül.

Annak ellenére, hogy a repülőgép segédberendezéseiben a digitális technikát csak később vezették be – erről egy későbbi cikkben esik majd szó – a mai fedélzeti rendszerekben gyakorlatilag már minden digitális. Azért, hogy megértsük ennek jelentőségét, nézzük meg a korszerű avionika egy szegmensét, az adatbuszokat – kicsit részletesebben.

## A MIKROELEKTRONIKAI ESZKÖZÖK FAJTÁI

A teljesen digitális rendszereknek tartalmazniuk kell olyan interfészeket, amely az analóg „valós világgal” lépnek kapcsolatba. A mikrovezérlők és a Bemenet\Kimenet (I/O) alkalmazás specifikus integrált áramkörök (ASICS - Application Specific Integrated Circuits) a kapuk a digitális és az analóg világ között. Az A\D és D\A konverterek feladata az analóg jelek átalakítása digitális jellé, és fordítva. A CPU-k és memóriák együtt az ASICS-kel hajtják végre a digitális jelfeldolgozással kapcsolatos feladatokat. (lásd 2. ábra)

A félvezetőket a gyártás különböző szakaszaiban, különböző részeinél szigeteléssel vonják be, hogy az árnyékolás megfelelő legyen. A legtöbb technológia az 1-3 mikron hosszúságú mikrovezérlőket alkalmazza. (1 mikron, az 1 méter egymilliomod része) tehát nagyon apró dologról van szó. A készülék 0,4 hüvelyk nagyságú és akár százezer tranzisztort\kaput is tartalmaznia kell, hogy a kívánt feladatot megfelelően el tudja látni. A gyártás alatt néha hibás méretűek is keletkezhetnek, melyeket később, már méretre vágva lehet értékesíteni.



2. ábra. Az analóg folyamatok vezérlése digitális áramkörökkel [2]

A félvezetők mérete, összetettsége, a technológia kiforrottsága, valamint az anyag minősége fogja meghatározni, hogy abból a félvezető körből hány darab hibás és hány darab hibátlan fog készülni a gyártás alatt és ez meg fog érződni az árban, illetve a termelékenységben. A szabványosított eszközök, mint az ARINC 429 és a MIL-STD-1553B széleskörű ipari felhasználásra alkalmasak, míg mások nem érik el ezt a szintet. (lásd 3. ábra)

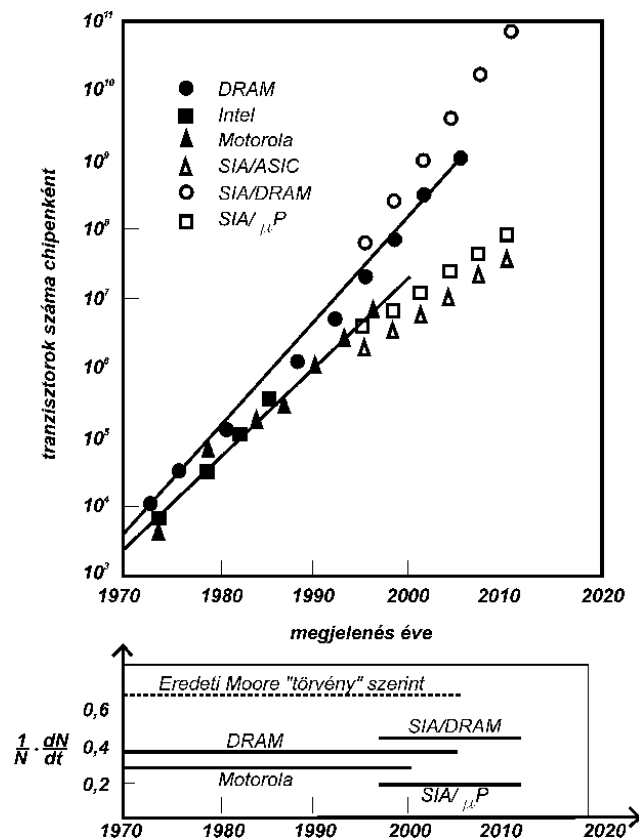
A mikroelektronikai készülékeket az alkalmazási környezet szempontjából is megvizsgálják, és három kategória valamelyikébe sorolják:

- kereskedelmi,
- ipari,
- repülő katonai – a polgári repülés is ebbe a kategóriába esik.

A tapasztalatok azt mutatják, hogy a szűrési technika segített fejleszteni a minőséget, futamidőt és a gyártási eljárást.



3. ábra Egy félvezető szelet [3]



4. ábra Az integrált áramkör fejlesztés tendenciái [4]

Habár növekvő, de az összes felhasználóhoz képest kis hányadát használja a repülő technika az elkészült mikroelektronikai áramköröknek. Van olyan vélemény, hogy a besorolás csak az áramkörök árát növeli – a magasabb kategóriákban. Azt remélik, hogy a repüléstechnikai beszállítók a jövőben nagyobb felelősséggel fognak ügyelni a minőségre. Van egy növekvő és



gyorsuló trend a repülőgép fedélzeti mikroelektronikában, amit a számítógépes és híradástechnikai ipar is gerjeszt.

Egy évtized alatt a tranzisztorok száma tízszeresére emelkedett a mikrovezérlőkben (lásd 4. ábra). A gyorsaságuk is megnőtt. Míg az elektroncsövek kapcsolási ideje  $1\mu\text{S}$ , 10-szer gyorsabbak tranzisztoroké  $100\text{ nS}$ , a szilícium mikrovezérlőké pedig  $1\text{ nS}$  – és ez már a mindennapok technikája.

A gyorsaságon kívül a fejlesztések másik fontos iránya az áramfogyasztás csökkentése. Ez függhet a technológia típusától, illetve a számítási műveletek gyorsaságától. A gyorsabb számítás nagyobb energiaigénnyel jár, és fordítva.

A fejlesztés legfontosabb területei:

### Processzorok

Az első mikroprocesszor az 1971-ben megjelent 4 bites szóhosszúságú volt. Később több sikeres 8 bites sorozat jelent meg több gyártó részéről (Intel 8008, 8080, 8085, Zilog Z80, Motorola 6800, MOS Technology 6502).

A 80-as évektől kezdve megnőtt a processzorok szóhossza (Intel 8086 (az IBM PC és PC/XT processzora): 16 bit (20-bites címtartomány), Intel 80286 (a PC/AT processzora): 16 bit (24 bites címtartomány) – 1982, Intel 80386: 32 bit – 1985) az órajel folyamatos növekedése mellett [5].

A család első tagja, 1979-ben jelent meg. 32 bites belső felépítéssel, de 16 bites külső adat és 24 bites külső címbusszal rendelkezett. Rengeteg variációban és tokozásban készült az évek során, fontosabb variációi a 68008, amely 8 bites külső adatbusszal rendelkezett (például a 8 bites Sinclair QL-ben használták), valamint a 68010, amelyet – bár külső MMU segítségével – de felkészítettek a virtuális memória kezelésére is. Ezt a processzort használta a European Fighter Aircraft és a Boeing 777 is [6].

A kezdeti kedvezőtlen próbálkozások után az USA Légierője bevezette a MIL-STD 1750A szabványt, amely meghatározza az utasításkészletet (Instruction Set Architecture-ISA), amelyekkel a repülőgépeket programozni lehet [7].

### Memóriák

A számítógép memóriája a processzor mellett alapvető fontosságú alkatrész [8].

A memória elektronikus adattárolást valósít meg. A számítógép csak olyan műveletek elvégzésére és csak olyan adatok feldolgozására képes, melyek a memóriájában vannak. Az információ tárolása kettes számrendszerben történik [9].

A memóriák csoportosítása:

**A memóriákat fizikai szempontból két csoportra osztjuk:**

- **ROM (csak olvasható) típusú memóriák:** Tartalmuk kiolvasható, de nem változtatható meg. Programozásuk a gyártáskor történik. A számítógép vezérléséhez szükséges alapvető parancsokat tartalmazza. Információtartalmukat a gép kikapcsolása után is megőrzik.

**Speciális fajtájuk:**



- PROM, melyet a felhasználó egy speciális készülékkel programozhat, utána azonban tartalma csak olvasható.
- EPROM, mely ultraibolya (UV) fényvel törölhető, majd újraírható;
- EEPROM (elektronikusan törölhető PROM): Elektromos feszültséggel törölhető és újraírható. Ilyenek például a Flash memóriák<sup>3</sup> is).
- **RAM (írható és olvasható) típusú memóriák:** Olvashatók, törölhetőek és újra írhatók. Külső tápfeszültségre van szükségük az adatok tárolásához, vagyis a gép kikapcsolásakor az adatok elvesznek. Operatív tár céljára használják. Egy program futtatását a számítógép úgy végzi el, hogy először beolvassa a programot a RAM-ba, majd egymás után végrehajtja a parancsokat [10].

## Adatbuszok

A busz vagy sín a számítógép-architektúrákban a számítógép olyan, jól definiált része, alrendszere, amely lehetővé teszi adatok vagy tápfeszültségek továbbítását a számítógépen belül vagy számítógépek, illetve a számítógép és a perifériák között. Eltérően a pont-pont kapcsolattól, a busz logikailag összekapcsol több perifériát ugyanazt a vezetékrendszert használva. Minden buszhoz számos csatlakozó tartozik, amelyek lehetővé teszik a kártyák, egységek vagy kábelek elektromos csatlakoztatását.

A korai számítógépek buszrendszerei betű szerinti értelemben párhuzamos elektromos buszok voltak, több csatlakozóval, de fizikai kiépítésükben eltértek attól, funkcionálisan viszont azonosak voltak. A mai modern számítógépek buszai már párhuzamos és bit-soros kapcsolatokat is meg tudnak valósítani, vagy (elektromosan) párhuzamos huzalozásúak sokcsatlakozósak (multidrop), vagy pedig lánc topológiával rendelkezők, illetve egy kapcsoló hub-hoz csatlakozók, mint például az USB (univerzális soros busz).

A MIL-STD-1553 volt az első szabványosított adatbusz, amit az Amerikai Egyesült Államok Légierője rendszeresített 1974-ben. A civil repülésben az ARINC 429-es adatbusz volt az elfogadott. Ezt használta a Boeing 757 és 767 típusok, valamint az Airbus A300/A310 is az 1970-es évek vége és az 1980-as évek elején. A korai '80-as években a Boeing fejlesztésekbe kezdett, hogy egy erősebb, gyorsabb adatbuszt hozzon létre. Ez lett később az ARINC 629-es szabvány, melyet kizárólagosan a Boeing 777 használ. Jellemzője a Digitális Autonóm Terminál Összeköttetés (Digital Autonomous Terminal Access Communication - DATAC).

Ebben az időben nagy erejű fejlesztések folytak a processzorok, memóriák, adatbuszok és egyéb mikroelektronikai készülékek terén, mely megkönnyítette a repülőtechnikai alkalmazásokat. Korábban nagy mennyiségű kábelköteget használtak a rendszerek közötti kommunikáció biztosítására, melyek bonyolultak és lassúak voltak. Az adatbuszok nem tapasztalt ütemben gyorsították és tették biztosabbá az adattovábbítást.

A mikroelektronika legnagyobb hatása az elektronikai rendszereken került bevezetésre szabványosított digitális adatbuszok nagymértékű javításával, melyek biztosították az összekötte-

---

<sup>3</sup> A **flashmemória** egy nem-felejtő, megmaradó („non-volatile”) típusú számítógépes adattároló technológia, mely elektronikusan törölhető és újraprogramozható. ([http://hu.wikipedia.org/wiki/Flash\\_mem%C3%B3ria](http://hu.wikipedia.org/wiki/Flash_mem%C3%B3ria))



tést a légijármű-rendszerekben. Korábban a repülőgépeken nagy mennyiségű kábelezésre volt szükség a csatlakozáshoz és egyéb berendezések számára.

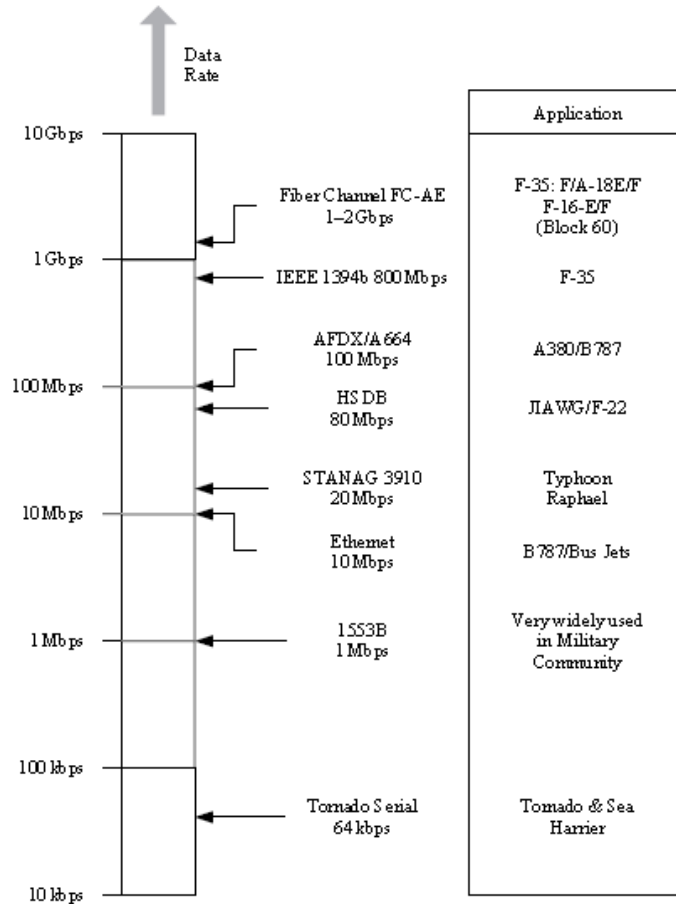
Ahogy a rendszerek összetettebbé és integráltabbá váltak, ezt a problémát súlyosbították. A digitális adatátvitel-technikák olyan kapcsolatokat használnak, amik berendezés között küldik el a digitális adat áramlásait. Ezek az adatkapcsolatok felölelnek csak két vagy négy csavart vezeték, és ezért az összekötő vezetékek száma jelentősen csökken.

#### **Közös típusú digitális adatátvitel a következők:**

- Egy forrás - egyirányú összeköttetés (szimplex kapcsolat). Két fizikai vagy logikai végpont közötti összeköttetést, adatátviteli utat jelöl vagy foglal magában. Az adatok csak egy irányban áramolhatnak, az ellentétes irányban nem lehetséges adatáramlás. Ez a legkorábbi alkalmazás, ami egy dedikált kapcsolatot az egyik berendezés a másikkra. Ezt fejlesztették ki az 1970-es években használható Tornado és Sea Harrier repülő elektronikai rendszereken. Ezt a technikát nem használják a repülőgéprendszerek integrációjára (Ez a '70-es évek fejlesztése volt, a repülőelektronikában nem került felhasználásra. A Tornado és a Sea Harrier rendszerekre tervezték őket.)
- Egy forrás – váltakozó irányú összeköttetés (Félduplex kapcsolat). Fizikai vagy logikai összeköttetés, adatátviteli út két végpont között, amelyen keresztül mindkét irányba továbbíthatnak adatokat, de egyszerre csak az egyik irányba. A félduplex összeköttetés fontos paramétere az irányváltási idő, vagyis a küldő és fogadó szerepcseréjéhez szükséges idő. Az adatátvitelhez egy vagy több vivőfrekvenciát is használhatnak az állomások, a kapcsolatban ez lényegtelen. Az ARINC 429-es is félduplex kapcsolatot biztosít. Ilyet használnak többek között a polgári utasszállító és az üzleti repülőgépek.
- Több forrás - kétirányú összeköttetés (Duplex kapcsolat). Két végpontot összekötő, fizikai vagy logikai kapcsolat, adatátviteli út jelzője. A kapcsolaton keresztül egyidejűleg mindkét irányban küldhetők adatok. Ez az úgynevezett teljes-duplex rendszer, és széles körben alkalmazott katonai felhasználók (MIL-STD-1553B), valamint a B777 (ARINC 629).

Az adatbuszok használata rendkívüli módon megnövekedett az elmúlt pár évben. Ez a hatalmas kereslet eredményezte azt, hogy mára kereskedelmi úton forgalmazzák ezeket az adatbuszokat (Commercial-off-the-Shelf) direkt az informatika és a távközlési ipar számára.

Mindezt a jó tulajdonságainak köszönheti: gyorsaság, előállítási költségek, rendelkezésre állás és futamidő. Azonban e tulajdonságai mellett is nagy hangsúlyt kell fektetni arra, hogy csak az igazán kiválóak kapjanak szerepet a repülőtechnikában. Az 5. ábra. bemutatja a legtöbb, ha nem is az összes adatbuszt, amelyeket a repülőgépeken alkalmaznak az adatátvitel sebességének megfelelően.



5. ábra Adatbusz fejlődése [11]

A legújabb adatbuszok, amik felhasználásra kerültek a repülőtechnikában az IEEE 1394b, amit a Joint Strike Fighter (JSF)/F-35-ön alkalmaznak, valamint az AFDX/ARINC 664, amit az Airbus A380 és a Boeing 787 típus használ.

## ZÁRÓ GONDOLATOK

Az AVIONIKA a korszerű repülőgépek „szíve” és „esze” amely nélkül elképzelhetetlen a fedélzeten működő ezernyi egység, részegység összehangolt működése. Az elektronikai ipar legújabb és – a tervezők, kivitelezők szándékai szerint – csak a legmegbízhatóbb termékei kerülhetnek alkalmazásra a repülésben. A repülés – ellentétben a szárazföldi, vagy vízi közlekedési eszközökkel –,türelmetlen” az AVIONIKA esetleges bizonytalansága miatt (a „francia autó” típusú szoftverhibák a levegőben nagyon kellemetlenek.)

A digitális adatbuszokat – először a hadi-, később a polgári repülésben szerzett tapasztalatok alapján – ma már a járműipar minden területén alkalmazzák. Az „úttörők” az első alkalmazói voltak a digitális áramköröknek és ma is élenjárói a legújabb fejlesztéseknek, a „szoftver-repülőknék”.

A harci és polgári repülőgépek AVIONIKA rendszerének e nélkülözhetetlen elemét természetesen sokkal részletesebben és mélyrehatóbban lehet tanulmányozni – amelyhez a cikk megírásakor áttekintett irodalmat is az olvasók szíves figyelmébe ajánljuk.





---

## A CIKKHEZ KAPCSOLÓDÓ – JAVASOLT - IRODALOM

- [1] B. Middleton *et al.* (1989) *Avionics Systems*. Harlow: Longman Scientific & Technical.
- [2] Cary R Spitzer (1993) *Digital Avionics Systems: Principles & Practice*, McGraw-Hill.
- [3] ARINC Specification 429: Mk 33 Digital Information transfer System, Aeronautical Radio, Inc., 1977.
- [4] MIL-STD-1553B Digital Time Division Command/Response Multiplex data Bus, Notice 2, 8 September 1986.
- [5] ARINC Characteristic 629, Multi-Transmitter Data Bus, Aeronautical Radio, Inc., November 1989.
- [6] Boeing 777 ARINC 629 Data Bus – Principles, Development and Application, RAeS Conference – Advanced Avionics on the Airbus A330/A340 and the Boeing 777 Aircraft, November 1993.
- [7] Aplin, Newton & Warburton (1995) ‘A Brief Overview of Databus Technology’, *RAeS Conference The Design and Maintenance of Complex Systems on Modern Aircraft*, April.
- [8] Principles of Avionics Data Buses, Avionics Communications Inc., 1995
- [9] Ian Moir and Allan Seabridge: *Aircraft Systems Mechanical, electrical, and avionics subsystems integration, Third Edition*. John Wiley & Sons, Ltd. 2008. ISBN: 978-0-470-05996- 8 [441-449]
- [10] Ian Moir and Allan G. Seabridge: *Military Avionics Systems*. Seabridge 2006 John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 0-470-01632-9 (47-78)
- [11] Mike Tooley *Aircraft Digital Electronic and Computer Systems: Principles, Operation and Maintenance*. Published by Elsevier 2007 (33-43)
- [12] Cary R Spitzer: *The Avionics Handbook*. Boca Raton, CRC Press LLC. 2001. [61]
- [13] Cary R Spitzer: *Avionics: elements, software, and functions*. Taylor & Francis Group, LLC, 2007.

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] <http://www.rentit.hu/cikk/74/alan-turing.aspx>
- [2] <http://www.fajltube.com/biologia/szamitogepes/A-szamitastechnika-ipari-alkal65282.php>
- [3] <http://prohardver.hu/dl/cnt/2009-06/46641/28nm.jpg>
- [4] <http://www.inco.hu/inco1/innova/images/image27.gif>
- [5] <http://hu.wikipedia.org/wiki/CPU>
- [6] [http://hu.wikipedia.org/wiki/Motorola\\_68000](http://hu.wikipedia.org/wiki/Motorola_68000)
- [7] <http://ru.wikipedia.org/wiki/MIL-STD-1750A>
- [8] [http://hu.wikipedia.org/wiki/V%C3%A9letlen\\_el%C3%A9r%C3%A9s%C5%B1\\_mem%C3%B3ria](http://hu.wikipedia.org/wiki/V%C3%A9letlen_el%C3%A9r%C3%A9s%C5%B1_mem%C3%B3ria)
- [9] [http://www.angela.sulinet.hu/hz/info\\_11/010-Alapismeretek/03-04-00-Memoria.htm](http://www.angela.sulinet.hu/hz/info_11/010-Alapismeretek/03-04-00-Memoria.htm)
- [10] [http://www.ujhelyi.sulinet.hu/x3/c3/h\\_2.htm](http://www.ujhelyi.sulinet.hu/x3/c3/h_2.htm)
- [11] Ian MOIR and Allan SEABRIDGE: *Aircraft Systems Mechanical, electrical, and avionics subsystems integration, Third Edition*. John Wiley & Sons, Ltd. 2008. ISBN: 978-0-470-05996- 8 [441-449] Figure 12.6.