Békési Bertold

A MEGBÍZHATÓSÁG-ELMÉLET ÉS ANNAK GYAKORLATI ALKALMAZÁSA A MEGHIBÁSODÁSOK VALÓSZÍNŰSÉGÉRE

A műszaki üzemeltetés célja a repülőgép, mint szerkezet megbízhatóságának a betervezett szinten tartása a karbantartás és javítás módszereivel, az esetleges meghibásodások gyors feltárásával és elhárításával.

Megbízhatóságnak nevezzük a légi jármű szerkezetének (rendszerének, berendezésének, elemének vagy akár az egész üzemeltetés rendszerének) azon tulajdonságát, hogy előírt funkcióit teljesíti, miközben meghatározott üzemeltetési mutatók értékeit az üzemeltetés, a műszaki karbantartás, a javítás, a tárolás és a szállítás előre megadott üzemmódjai feltételeinek megfelelő, előírt határok között az időben megőrzi. A megbízhatóság összetett tulajdonság, magába foglalja a hibamentességet, a tartósságot, a meghibásodások elleni érzéketlenséget, a karbantarthatóságot, a javíthatóságot, a tárolhatóságot stb.

A megbízhatóság-elmélet alkalmazása a mérnök-műszaki biztosítás minősítését meghatározó mutatószám-rendszer kialakításához szükségessé teszi az alapvető meghatározások ismertetését, a főbb, alkalmazott képletek indoklását.

A meghibásodások jellegétől, a tervezési, a gyártási-üzemeltetési sajátosságoktól függően a meghibásodott elem, rendszer vagy az egész repülőgép üzemképes állapota vagy javítható, vagy nem.

A NEM JAVÍTHATÓ BERENDEZÉSEK MEGBÍZHATÓSÁGA

A nem javítható berendezések csak az első meghibásodásig működnek, ezután technikai vagy gazdasági okból kikerülnek a további üzemeltetésből. (Ezek általában pl.: izzók, szelepek, szűrők stb.)

Az üzemeltetés során a berendezések meghibásodhatnak, azonban a nem javítható berendezés csak egyszer hibásodhat meg. A meghibásodás bekövetkezésének ideje, ami azonos a hibamentes működés idejével több tényezőtől függhet és így véletlenszerű.

A nem javítható berendezések megbízhatósági jellemzői különbözőek, ezek a berendezés hibamentes működése véletlenszerű időtartamát jellemző paraméterek, meghatározott körülmények között.

A hibamentes működés valószínűsége adott „t” időtartam alatt nem más, mint annak valószínűsége, hogy a „T” időtartam, ami a berendezés hibamentes működésének időtartama, nagyobb ennél a „t” előre megadott időtartamnál

$$P(t) = P(T \rangle t) \tag{1}$$

A meghibásodás bekövetkezésének valószínűsége megadott „t” időtartam alatt annak valószínűsége, hogy a hibamentes működés „T” időtartama kisebb mint „t”

$$Q(t) = Q(T \langle t) \tag{2}$$

A fenti meghatározásnak megfelelően $Q(t)$ berendezés hibamentes működési időtartamának, vagyis a meghibásodás bekövetkezési idejének eloszlásfüggvénye. Tehát a $P(t)$ és $Q(t)$ a berendezés „t” működési idejét jellemző időfüggvények, ezeket tartalmuknak megfelelően megbízhatósági és megbízhatatlansági függvényeknek nevezzük.

Látható, hogy a meghibásodás és a hibamentes működés egymással ellentétes, komplementer események, ezért

$$P(t) + Q(t) = 1 \tag{3}$$

A berendezés hibamentes működési ideje eloszlásának sűrűség függvénye (meghibásodási valószínűség sűrűsége), a meghibásodások valószínűségének idő szerinti differenciálhányadosa

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt} \tag{4}$$

A meghibásodások intenzitása vagy rátája az eloszlások sűrűségének és a hibamentes működés valószínűségének hányadosa:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} \tag{5}$$

Vizsgáljuk meg az eloszlások sűrűsége és a meghibásodások intenzitása összefüggését. Ennek érdekében az (5) egyenlet mindkét oldalát megszorozzuk $P(t)\ dt$ -vel:

$$P(t)\,\lambda(t)dt = f(t)dt \tag{6}$$

innen a (4) egyenlet alapján

$$P(t)\,\lambda(t)dt = dQ(t) \tag{7}$$

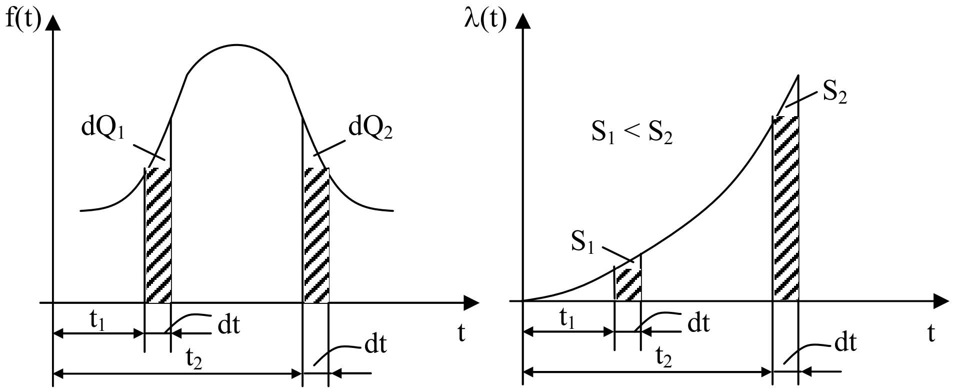
A kapott egyenlet jobb oldala a (4) egyenlet alapján nem más, mint a meghibásodások valószínűsége $f(t)dt = dQ(t)$ a „t, $t+ dt$” időintervallumban.

Annak érdekében tehát, hogy a berendezés a fenti időintervallumban hibásodjon meg, hibamentesen kell működjön a „t” időszak alatt, ami megelőzi a „dt” időtartamot.

A valószínűségek szorzási szabályának megfelelően $dQ(t)$ egyenlő két valószínűség szorzatával. Vagyis a fenti egyenlet bal oldala $P(t)$, ami a hibamentes működés valószínűsége a „t” időtartam alatt és a meghibásodás feltételes valószínűsége $\lambda(t)dt$ szorzata a (t, $t+ dt$) intervallum alatt.

Ennek alapján $f(t)dt$ a meghibásodás bekövetkezésének feltétel nélküli valószínűsége a (t, $t+ dt$) időtartam alatt. Azon feltétel mellett, hogy hibamentesen működött a „t” alatt.

$\lambda(t)dt$ a meghibásodás feltételes valószínűsége ugyanebben az intervallumban, olyan feltétellel, hogy az intervallum erejéig a berendezés hibátlanul működik.



1. ábra.

Vizsgáljuk meg a szimmetrikus eloszlás sűrűségfüggvényét és a meghibásodások intenzitását ugyanannál a berendezésnél. Az időtengelyen kiválasztunk két azonos (t, $t+ dt$) intervallumot úgy, hogy a sűrűségfüggvény alatti területük azonos legyen. A területeket a görbe, az időtengely és a kijelölt pontokban húzott merőlegesek határolják. Ezek a területek számszerűleg az időintervallum alatt bekövetkező meghibásodások valószínűségével egyenlőek.

$$dQ_1 = dQ_2 \tag{8}$$

Mivel a fenti valószínűségek egyenlőek, a működés megkezdése előtt „t=0 -nál” előre becsülhető, hogy a berendezések egyforma valószínűséggel fognak meghibásodni mindkét $(t_1, t_1 + dt\,; t_2, t_2 + dt)$ időintervallumban.

A működés során a berendezések egy része meghibásodik. Azok a berendezések, melyek működőképesek maradnak a „t_1” és a „t_2” időpontokig elmondhatjuk, hogy meghibásodásuk valószínűsége a $(t_1, t_1 + dt)$ illetve a $(t_2, t_2 + dt)$ működési időket összehasonlítva, a „t_1” működési idő után sokkal kisebb, mint a „t_2” után. Ezt jól mutatja a meghibásodások intenzitásának változása a működési idő függvényében $S_1 < S_2$, az 1. ábra alapján.

A fentiek alapján megkülönböztetünk feltétel nélküli meghibásodási valószínűséget bizonyos intervallumon belül és feltételest, ami akkor következik be, ha ezen időpont előtt a meghibásodás nem jött létre.

Ezen kívül alkalmaznak számszerű mutatókat, melyek jellemzik a rendszer hibamentes működési idejét, ilyen a $T_{köz.}$ a hibamentes működés közepes ideje (matematikai várható érték), közepes négyzetes eltérés (σ) és mások.

RENDSZEREK MEGBÍZHATÓSÁGA

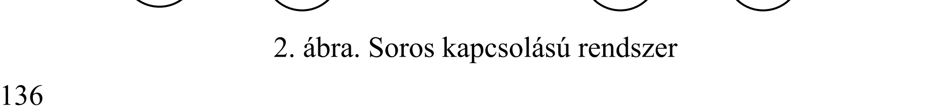
A gyakorlatban csak a legritkább esetben fordul elő, hogy csupán egyes elemek vagy egységek megbízhatóságát vizsgáljuk és tervezzük meg. A számos elemből összetett berendezések, rendszerek megbízhatósági problémája igazán fontos. A rendszerek megbízhatóságának számításához nagyjából kétféle adatsor szükséges:

- a rendszerben adott üzemiszonyok között, adott környezetben felhasznált elemek megbízhatóságának minél pontosabb ismerete és;
- a rendszerben előforduló elemek különféle kombinációinak megbízhatósági vizsgálatából kapott tapasztalat.

Soros kapcsolású rendszer

Megbízhatósági szempontból legegyszerűbb felépítésű rendszer, amely az $1, 2, \ldots, n$ egymás után kapcsolt, ún. soros elemből áll (2. ábra). Itt minden egyes elem meghibásodása illetve meg nem hibásodása független. A soros rendszer több elemből, ennek megfelelően a meghibásodás, mint valószínűségelméleti esemény és a hozzá tartozó megbízhatóság is teljesen független.

A valószínűségelmélet alapvető szabálya szerint ilyenkor az adott elemekből felépített rendszer megbízhatóságát az elemek megbízhatóságának szorzata adja meg (ez a valószínűségek szorzási szabálya).



2. ábra. Soros kapcsolású rendszer

Vagyis ha P_1 az egyik elem megbízhatósága, P_2 a másik elemé és így tovább P_n-ig, akkor annak a valószínűsége, hogy az „1” és „2” elemek a t előírt időn belül kifogástalanul működnek:

$$P_S(t) = P_1(t)P_2(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda_1 dt\right)\exp\left(-\int_0^t \lambda_2 dt\right) \tag{9}$$

míg az „n” elemből álló soros rendszer eredő megbízhatósága

$$P_S(t) = P_1(t)P_2(t)\ldots P_n(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda_1 dt\right)\exp\left(-\int_0^t \lambda_2 dt\right)\ldots\exp\left(-\int_0^t \lambda_n dt\right) \tag{10}$$

ahol: $\lambda_1, \lambda_2, \ldots \lambda_n$ — az egyes elemek megbízhatósági rátái

Ha P jelentette a rendszer megbízhatóságát, akkor nyilvánvaló a rendszer megbízhatatlanságát, vagyis annak a valószínűségét, hogy a rendszer „1”, „2” vagy akár valamennyi eleme meghibásodik, a következő kifejezés adja:

Két elem esetén: $Q_S(t) = 1 - P_1(t)P_2(t)$

„n” elem esetén: $Q_S(t) = 1 - P_1(t)P_2(t)\ldots P_n(t)$

ahol: $Q_S(t) = 1 - P_S(t)$ jelenti a rendszer megbízhatatlanságát.

Soros rendszer tehát az olyan rendszer, amelyben bármelyik elem meghibásodása az egész rendszer meghibásodását váltja ki.

Ha az exponenciális változási törvényt fogadjuk el a meghibásodása [vagyis $P = \exp(-\lambda t)$], akkor a soros rendszer megbízhatóságát akár a már említett képletek módosításával adódó

$$P_S(t) = P_1(t)P_2(t)P_3(t)\ldots P_n(t) = \prod_{i=1}^{n} P_i(t) \tag{11}$$

képlet határozza meg, vagy az egyes kifejezések ismeretében az eredeti kifejezésüket leírva és a hatványok szorzási tételét figyelembe véve

$$P_S(t) = e^{-\lambda_1 t}e^{-\lambda_2 t}\ldots e^{-\lambda_n t} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \ldots + \lambda_n)t} = \exp\left(-t\sum_{i=1}^{n}\lambda_i\right) \tag{12}$$

Párhuzamos kapcsolású rendszer

A megbízhatósági elmélet valószínűségi alapjait szolgáltató matematikusok, köztük is első helyen Neumann János, csakhamar megmutatták annak a lehetőségét, hogyan lehet segíteni azon a helyzeten, hogy a soros rendszer eredő megbízhatósága katasztrofális mértékben, látszólag leküzdhetetlenül csökken. Neumann bebizonyította, hogyha a rendszer bemenetére kerülő jelet nem egyetlen egy, hanem több azonos típusú, párhuzamosan kapcsolt egységbe juttatjuk, akkor helyesnek tekinthetjük azt az eredményt, amely a párhuzamos egységek többségének kimenetén jelentkezik. Ez a többségi kiválasztási elv.

A rendszer megbízhatósága tehát elemeinek párhuzamos kapcsolásával jelentősen növelhető. Párhuzamos kapcsolás esetén egy elem meghibásodása még nem jelent rendszerhibát. A rendszerhibát a rendszer felépítésének függvényében fogjuk meghatározni.

Ha a rendszerben levő tartalékegységek vagy tartalékrendszerek csak az elsődleges egységek vagy részrendszerek csak elsődleges egységek vagy részrendszerek meghibásodása után lépnek üzembe, akkor helyettesítéses redundanciáról, helyettesítő tartalékról beszélhetünk. Ha a rendszerben bármelyik bekapcsolt egység vagy részrendszer helyettesítheti a másik, ugyancsak bekapcsolt, de meghibásodott egységet vagy részrendszert, akkor állandó tartalékolásról beszélünk.

Vizsgáljuk meg most a rendszer megbízhatóságát az elemek illetve részrendszerek kapcsolásának függvényében.

Nyilvánvaló, hogy egy soros rendszer megbízhatósága nem lehet nagyobb, mint a legkisebb megbízhatóságú elemének a megbízhatósága. Ha pl. van egy 10 000 elemből álló rendszerünk, akkor a rendszer kifogástalan működésének valószínűsége

$$P = P_e^{10^4} \tag{13}$$

A nagyságrendek értékelésére vegyük azt az esetet, amikor az eredő megbízhatóság $P = 0{,}9$. Ez annyit jelent, hogy 10 elemből átlagosan 9 üzemképes és egy hibás. Ekkor már kifejezhetjük az egyes elemek meghibásodási rátáját illetve megbízhatatlanságát. A mi esetünkben:

$$(1 - Q_e)^{10^4} = 0{,}9 \tag{14}$$

Ha a zárójelben levő kifejezést hatványsorba fejtjük és a „Q” kis értéke folytán az első két tag kivételével a sorba fejtés összes többi tagját elhanyagoljuk, akkor azt kapjuk, hogy:

$$1 - Q_e^{10^4} = 0{,}9 \tag{15}$$

$$Q_e = 1 \cdot 10^{-5} \tag{16}$$

$$P_e = 1 - Q_e = 0{,}99999 \tag{16}$$

Ez annyit jelent, hogy a rendszerben szereplő elemektől megköveteljük a megbízhatóságnak azt a fokát, amikor átlagosan minden 100 000 elemre nem jut több, mint egyetlen meghibásodott elem.

Ezt a fajta megbízhatóságot sorozatgyártású elemekkel válogatás nélkül szinte meg sem lehet valósítani. Ez azt bizonyítja, hogy bonyolultabb rendszerek esetén a soros felépítés helyett más megoldáshoz kell folyamodni. Ez a másfajta megoldás csakis a redundancia valamelyik fajtája lehet.

A különböző tartalékolási formák a rendszereknél

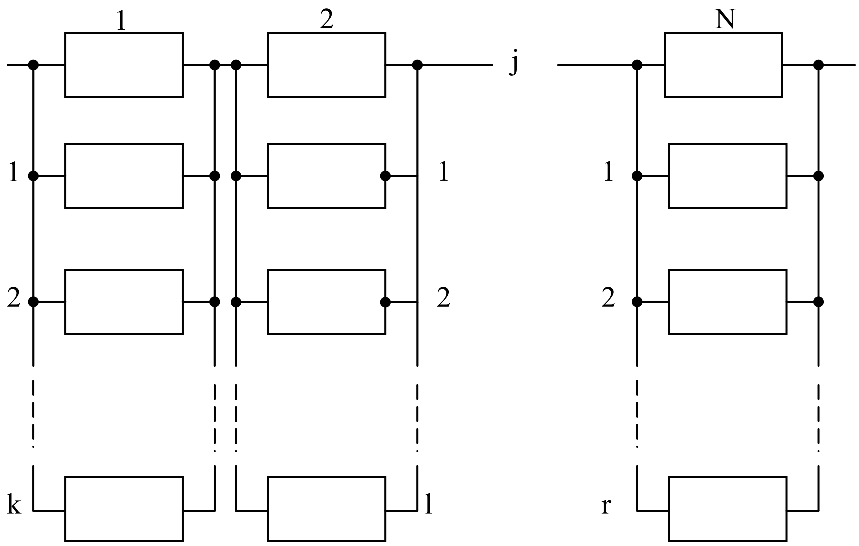
A megbízhatóság növelésénél különleges szerepet játszanak a tartalékolás különböző formái, mivel a legteljesebben képesek megoldani a szükséges megbízhatósági szint elérését viszonylag alacsony megbízhatóságú elemekből.

A tartalékolás elve abból áll, hogy a rendszerbe behelyeződnek kiegészítő (tartalék) elemek (blokkok, csatornák), melyek többletet jelentenek a rendszer működéséhez — szükséges és elégséges — elvi szerkezeti struktúrájához viszonyítva.

A tartalék elemek (csatornák) kapcsolási megoldásai függvényében megkülönböztetnek két tartalékolási módszert:

— osztott tartalékolás;
— általános tartalékolás.

Az *osztott tartalékolás* esetén (3. ábra) tartalékkal látják el a működési struktúra egyes vagy akár minden elemét.



3. ábra. Osztott tartalékolás

Ekkor az első tartalékolással ellátott elem hibamentes működésének valószínűsége:

$$P_1 = 1 - \prod_{i=1}^{k+1} q_i \tag{17}$$

A második és „N”-edik elemre ennek megfelelően

$$P_2 = 1 - \prod_{i=1}^{l+1} q_i, \ldots; \quad P_N = 1 - \prod_{i=1}^{r+1} q_i \tag{18}$$

ahol: q_i — a tartalékolt rendszerbe kapcsolt elemek meghibásodási valószínűsége.

Az egész tartalékolt rendszer hibamentes működésének valószínűsége osztott tartalékolás esetén:

$$P_{osztott} = \prod_{j=1}^{N} P_j \tag{19}$$

mivel „j” sorral rendelkezünk amit sorba kapcsoltunk.

Abban az esetben, ha a rendszer tartalékolási többszöröse az összes „N” elemre egyforma és egyenlő „m”, valamint a fő és tartalék elemek egyenlő megbízhatóságúak, akkor

$$P_{osztott} = P^N = \left(1 - q^{m+1}\right)^N \tag{20}$$

Ha a képletet elemezzük megállapíthatjuk, hogy az osztott tartalékolással rendelkező rendszerben még ha a fő rendszer elemeinek számát „N” növeljük a végtelenig, akkor is a hibamentes működés valószínűsége megközelítheti az egységet azáltal, hogy minden határok nélkül növeljük a tartalék elemek számát ($m \to \infty$).

Az *általános tartalékolás* esetén (4. ábra) a szerkezet minimális struktúrája teljes tartalékolásra kerül. A minimális funkcionális struktúra hibamentes működési valószínűsége:

$$P_i = \prod_{j=1}^{N} P_j \tag{21}$$

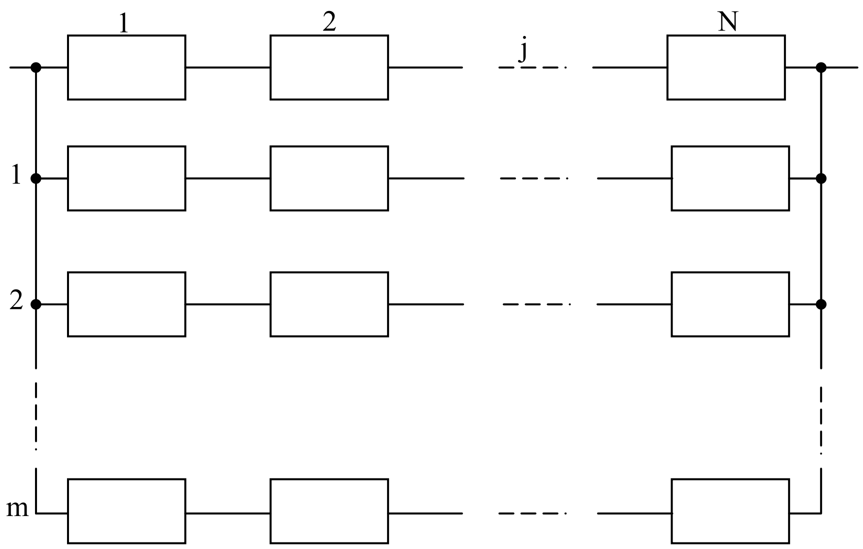
ahol: P_j — a hibamentes működés valószínűsége a funkcionális struktúra sorba kapcsolt elemeire.

Az általános tartalékolású rendszer hibamentes működésének valószínűsége

$$P_{ált.} = 1 - \prod_{i=1}^{m+1} q_i \tag{22}$$

ahol: $q_i = 1 - P_i$

$$P_{ált.} = 1 - \prod_{i=1}^{m+1}\left(1 - \prod_{j=1}^{N} P_j\right) = 1 - \prod_{i=1}^{m+1}\left(1 - \prod_{j=1}^{N}\left(1 - q_j\right)\right) \tag{23}$$



4. ábra. Általános tartalékolás

Abban az esetben, ha minden fő- és tartalékelem azonos megbízhatóságú, akkor

$$P_{ált.} = 1 - \left[1 - (1 - q)^N\right]^{m+1} \tag{24}$$

Tehát a képletből következik, hogy az általános tartalékolású rendszerekben, ha minimális funkcionális rendszer struktúrájának elemei „N" végtelenül nőnek, a hibamentes működés valószínűsége tart a nullához még abban az esetben is, ha a tartalék csatornák száma tart a végtelenhez $(m \to \infty)$.

Ha összehasonlítjuk az általános és az osztott tartalékolást, akkor a következőket állapíthatjuk meg, hogy:

- az általános tartalékolás esetén a rendszer meghibásodásához elegendő, hogy minden csatornájában legalább egy (valamelyik) elem hibásodjon meg;
- az osztott tartalékolású rendszernél a rendszer meghibásodása akkor következik be, ha az „N" csoportból legalább egynél tönkremegy mind az „$m + 1$" elem.

Látható, hogy ez utóbbi esemény bekövetkezési valószínűsége nagyon kicsi. Ahhoz, hogy mennyiségileg össze tudjuk hasonlítani az általános és az osztott tartalékolást feltételezve, hogy minden elemük azonos megbízhatóságú, meghatározzuk a fenti rendszerek meghibásodási valószínűségét:

$$Q_{ált.} = \left[1 - (1-q)^N\right]^{m+1}$$
$$Q_{osztott} = 1 - \left(1 - q^{m+1}\right)^N \tag{25}$$

Ha a képletek jobb oldalát sorba fejtjük és figyelembe vesszük, hogy $q << 1$, akkor a következő egyszerűsített képletet kapjuk.

$$Q_{ált.} \approx N^{m+1} q^{m+1} \ ; \ Q_{osztott} \approx N q^{m+1} \tag{26}$$

$$\frac{Q_{ált.}}{Q_{osztott}} = N^m \ ; \ Q_{osztott} = \frac{Q_{ált.}}{N^m} \tag{27}$$

A hányados elemzése lehetővé teszi olyan következtetés levonását, hogy az osztott tartalékolás lényegesen előnyösebb a megbízhatóság szempontjából. Ahhoz, hogy végleges minősítést adjunk az alkalmazás célszerűségéről bármelyik tartalékolási módszer szempontjából, vizsgáljuk meg a tartalékolások kapcsolásának módját. A legelterjedtebb két módszer alkalmazása az *állandó* és a *helyettesítő tartalékolás*.

Az *állandó tartalékolásnál* a tartalék elemek (csatornák) hozzá vannak csatlakoztatva a fő rendszerhez a teljes működés ideje alatt, és azzal azonos üzemmódon működnek. Az állandó tartalékolás fő *előnyei* közé tartozik, hogy egyszerű a bekapcsolása, és a tartalék azonnal kész a működésre szükség esetén.

Hátránya a meghibásodások megjelenésekor esetleg változhatnak a rendszer paraméterei, ami előidézheti a teljes működési üzemmód változását.

A *helyettesítéssel történő tartalékolás* esetén a tartalék aktiválása csak a meghibásodás jelentkezése után történik. Ezen üzemmód realizálására szükséges speciális csatlakoztató berendezés a meghibásodott elem, csatorna helyére. Azonban a csatlakoztató berendezés vezérlésére minden üzemmódon szükséges egy speciális beépített ellenőrző berendezés, amelyik észleli a meghibásodást és kidolgozza a szükséges parancsot a tartalék üzembe helyezésére.

A *helyettesítéssel történő tartalékolás előnye*, hogy megőrzi a tartalék üzemidejét, kizárja a tartalék esetleges befolyását az egész rendszerre valamint a lehetőség, hogy egy tartalék elemmel több azonos típusú berendezés működését lehet megoldani. A fő *hátránya* ennek a módszernek, hogy speciális csatolórendszert és beépített önellenőrző rendszert igényel.

A helyettesítéses tartalékolás az osztott rendszerű tartalékolással sokkal bonyolultabban oldható meg, mint az általános tartalékolással. Ha figyelembe veszszük a csatolóegységek és a beépített önellenőrző berendezés hatását a megbízhatóságra, akkor az osztott tartalékolási módszer előnyei már nem látszanak annyira nagynak.

KÖVETKEZTETÉS

A rendszerek tervezési és üzembentartási tapasztalatai azt mutatják, hogy a legáltalánosabban elterjedtek az általános tartalékolású rendszerek. Ez azzal magyarázható, hogy általános tartalékolás esetén sokkal egyszerűbb realizálni a beépített és a külső ellenőrzést. De azokon a helyeken, ahol könnyen megvalósítható a berendezés önellenőrzése és a tartalék csatlakoztatása (pl. az elektromos táplálás területén) alkalmazzák mind a helyettesítéses, mind az általános tartalékolási módszert.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] BÉKÉSI Bertold: A repülőszerkezetek műszaki karbantartása. Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 1999/3. (93-105) o.

[2] DR. ÓVÁRI Gyula: A Magyar Honvédség repülő eszközei típusváltásának és üzemeltetésének lehetőségei gazdaságossági kritériumok valamint NATO csatlakozásunk figyelembevételével. A légierő fejlesztése tanulmánygyűjtemény, Honvédelmi Minisztérium, 1997. 9–117. old.

[3] DR. ÓVÁRI Gyula: Korszerű harcászati repülőgépek műszaki üzemeltetésének sajátosságai és gazdaságossági-hatékonysági kérdései. A harcászati repülők fejlesztésének szükségessége és lehetősége, Konferencia előadás gyűjtemény, Magyar Hadtudományi Társaság, 1998. 26–33. old.

[4] DR. PETÁK György: A repülőtechnika üzemben tartása és javítása. Főiskolai jegyzet, KGYRMF, Szolnok, 1981.

[5] NAGY Ernő: Megbízhatóság a technikában. Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1967.

[6] Dr. Rohács József—Simon István: Repülőgépek és helikopterek üzemeltetési zsebkönyve. Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1989.