

A műszaki megbízhatóság elmélete és az ember öregedési folyamata

DR. BALOGH ALBERT

albert.balogh@axelero.hu

Kulcsszavak: műszaki-biológiai analógiák, kádgörbe, elméleti háttér

Az írás az emberi öregedés folyamata és a műszaki megbízhatóság közötti kapcsolatot mutatja be. Megállapítható, hogy az emberi szervezet működése és öregedési folyamata olyan régi számítógépekhez hasonlít, amelyeket már kezdetben hibás elemekből építettek fel. Ebből adódik, hogy az öregedési folyamatokból adódó halálozási ráta meredekebb változású (növekedésű) a korszerű eszközök meghibásodási rátájánál. Ezeket az új rendszereket nagy megbízhatóságú elemekből építik fel. A nagy megbízhatóságot folyamatszabályozással, gyártásközi ellenőrzésekkel és szűrővizsgálatokkal érik el a műszaki tervezés során. Az emberi életkort ehhez hasonlóan a kezdeti károsodások, a magzati hibák kiküszöbölésével és az előregegett szervek cseréjével kell növelni. A módszereket a megbízhatóság műszaki tervezéséből lehet átvenni.

1. Bevezetés

Az emberi élet végességének és az elhalálozás, öregedés folyamatainak elemzése óhatatlanul felveti azt a kérdést, hogy modellezhető-e ezek a folyamatok, növelhető-e az életkor. Két biológus – L. Gavrilov és N. Gavrilov [1] – már megkísérelte a válaszadást erre a kérdésre. Ennek a publikációnak alapján tekintjük át, hogy a műszaki megbízhatóság elmélete miként adhat magyarázatot az emberi öregedésre.

Ha megtartanánk szervezetünk funkcióit olyan szinten, ahogy azok 10 éves korunkban működnek, akkor várhatóan körülbelül 5000 év átlagos élettartamot érhetnénk el. Ez sajnos nem így van, már 11 éves korunkban megkezdődik a hanyatlás szakasza. A probléma az, hogy szervezetünk az idő múlásával elhasználódik. A legtöbb emberi élet esetében a halál kockázata exponenciálisan növekszik, amelyet az jellemez, hogy ez 8 évente kétszereződik. A kérdés az, hogy miért használódunk el és mennyiben tehetünk erről saját magunk?

Sok tudós meg van győződve arról, hogy már kifejlesztettük és elegendő mértékben megértettük az emberi öregedés jellegét ahhoz, hogy megkezdjük a módszerek tervezését a korai halál leküzdésére. Ezek a tudósok abból az egyszerű, de parancsolóan szükség-szerű megfontolásból indultak ki, hogy az emberi szervezet, amely messze nem tökéletes alkotás, meghibásodásra hajlamos és hibák által veszélyeztetett gépezet, amelyet a biológiai fejlődés sztochasztikus folyamata alakított ki. Ennek a nézetnek figyelembe vételével szervezetünk javítható a genetikai tervezéssel és jobban karbantartható a megelőző, regeneráló és öregedést gátló gyógymódok alkalmazásával, valamint az elhasználódott szervek megjavításával és cseréjével. Röviden, az elhasználódás aránya (sebessége) csökkenthető, lehet, hogy elhanyagolható szintre is. Az öregedési folyamat megértése és szabályozása ar-

ra vezette rá az említett két biológust, hogy ihletet mérítsen egy teljesen valószínűtlennek látszó forrásból, amely nem volt más mint a műszaki megbízhatóság tervezése. (Megjegyzendő, hogy a megbízhatóság-elmélet korábban éppen az emberi folyamatok modellezéséből származtatta kádgörbéjét!). Az öregedés megértéséhez vezető műszaki megközelítés olyan elképzeléseken, módszereken és modelleken alapszik, amelyek a megbízhatóság-elméletből származnak.

A bonyolult elektrotechnikai és elektronikai berendezések meghibásodási és öregedési folyamatait leíró megbízhatóság-elmélet az 1950-es évek végén (sőt már a II. világháború távol-keleti hadműveletei során) alakult ki és rohamos mértékben fejlődött az utóbbi évtizedekben. Ez a tudományág lehetővé teszi a kutatók számára, hogy adott felépítésű (struktúrájú) és adott megbízhatóságú alkatrészekből összeállított rendszer megbízhatóságát (meghibásodási folyamatát) előre jelezzék az idő függvényében.

A megbízhatóság-elmélet alkalmazási területe olyan általános, hogy felhasználható élő organizmusok (szervezetek) öregedési folyamatainak vizsgálatára is. Ennek megfelelően az, hogy öregsünk és meghalunk, nem nagyon különbözik azoknak az eszközöknek a működésétől és meghibásodásától, amelyeket éppen mi hoztunk létre. A különbség, amit felfedeztek [1], hogy ez minimalizálható, ha magunkról a következő kedvezőtlen módon gondolkozunk: a gépekhez hasonlóan mi is redundáns (tartalékolt) alkatrészekből vagyunk felépítve, ezek között azonban sok hibás van a kezdettől fogva.

2. A műszaki megbízhatóság elmélete és módszerei

A műszaki megbízhatóság közös tudományos nyelvet és általános keretet nyújt az emberi öregedéssel foglalkozó kutatók számára. Lebontja azokat az elválasztó

falakat, amelyeket a szakértők emeltek fel egymás között, és elősegíti egymás jobb megértését. A legfontosabb az, hogy segít megérteni világosan az öregedés fogalmát. A megbízhatóság-elméletben az öregedést a meghibásodás növekvő kockázata határozza meg. Ezt a „Megismerendő fogalmak” fejezete foglalja össze. Pontosabban kifejezve ez azt jelenti, hogy valami akkor öregszik, ha nagyobb valószínűséggel hibásodik meg holnap, mint ma (feltéve, hogy az adott időpontig jól működött). Ha ez a feltételes meghibásodási kockázat nem növekszik az idő függvényében, akkor nincs öregedési folyamat a megbízhatóság-elmélet szerint.

Ha közelebbről megvizsgáljuk az emberi öregedés adatait, meglepő hasonlóságot találunk az élőszervezetek és a műszaki eszközök öregedése és meghibásodása között. Mindkét esetben a meghibásodási ráta közelítőleg kádgörbével írható le. A görbének három szakasza van: korai működés (korai meghibásodások) szakasza (gyermek-halandóság szakasza); normál működés (hasznos élettartam) szakasza; öregedési szakasz. A megbízhatósági szakemberek napjainkban már nem észlelik ennek a három szakasznak a megjelenését, mivel a kezdeti szakaszt megszüntetik gyártásközi szűrővizsgálatokkal, hogy elkerüljék a garanciális költségek katasztrofális anyagi következményeit; az öregedési szakasz pedig nem jelenik meg, mert a korszerű elektronikai termékek már elavulnak, mielőtt előregednének. A kádgörbe azonban általában még mindig jól szemlélteti azt a folyamatot, ahogy a termékek és így az emberek is meghibásodnak.

A berendezések élettartamának kezdetén – a korai meghibásodások szakaszában – a meghibásodási ráták egy nagy értékről indulnak; ezt követően az idő múlásával csökkennek. Ebben a szakaszban a rendszer hibás alkatrészei hibásodnak meg. Például egy új mikroprocesszor kezdeti meghibásodásának a kockázata gyakran a kezdet kezdetén magasabb, mint később, a szilícium hibái vagy a gyártási folyamat kisebb változásai miatt, amelyek olyan áramköröket eredményeznek, melyek a kezdeti működtetés igénybevételének hatására meghibásodnak. Az élőszervezetek, így az emberi szervezetek, esetében is hasonló kezdeti működési szakasz figyelhető meg, ezt a korai halandóság szakaszának nevezik. Azok a számítógépek és azok az emberek, amelyek (akik) nem hibásodtak meg kezdetben, jól működnek egy ideig, ezt a normális működés vagy a hasznos élettartam szakaszának nevezik. Ezt a szakaszt csekély és közel állandó meghibásodási ráta érték jellemzi. Embereknél ez a szakasz túl rövid, csak 10-15 év, a szakasz 5 éves korban kezdődik.

Ezt követi a harmadik szakasz, amelyet öregedési szakasznak neveznek. Ezt a szakaszt a meghibásodási ráta kérelhetetlen növekedése jellemzi. A legtöbb élőszervezet, így az emberek, esetében is a meghibásodási ráták növekedését egy meredek röppálya írja le, amelyet a Gompertz-féle halandósági (halálozási) törvény határoz meg. Emberek esetében az öregedési szakasz közelítőleg 20 és 100 év között van.

Létezik azonban egy negyedik szakasz is. Ezt a szakaszt a biológiában a késői élettartam halandósági (halálozási) szakaszaként ismerik. Ebben a szakaszban az a törvény érvényesül, hogy a halálozási ráták az exponenciális növekedés megállítását mutatják előrehaladott életkorban és a növekedés helyett állandó értéken maradnak. Az emberek esetében ez azt jelenti, hogy 100 évet meghaladó életkorban ez a jelenség következik be. Ha valaki 110 évet élt, akkor annak valószínűsége, hogy a következő születésnapján is élni fog nem túl jó esély, de paradox módon nem sokkal rosszabb, mint amikor azt vizsgáljuk, hogy 102 évet élt ember a következő születésnapján élni fog-e vagy sem. A biológiában ezt a jelenséget a reprodukálással és a fejlődéssel magyarázzák, de hasonló eredményeket figyeltek ember által készített eszközök esetében is (például acél, ipari relék és motorok hőszigetelése). Ezekre a kérdésekre a megbízhatóság-elmélet jobb választ adhat.

Ez utóbbi megállapításnak az a következménye, hogy nincs rögzített végpontja az emberi életnek. A másik következtetés az, hogy fennáll az úgynevezett halandósági kiegyenlítő törvény vagy másképpen a késői életkor halandósági konvergencia törvénye. A tapasztalati törvény szerint viszonylag kis különbség figyelhető meg késői öregkorban a különböző életkörülmények között élő embercsoportok elhalálozási rátája között. Bár Indiában a II. világháború alatt sokkal nagyobb volt a középkorúak halálozási aránya, mint Norvégiában az 1950-es években, ugyanezek a ráták idős korban meglehetősen közel vannak egymáshoz a két népcsoportban.

3. Megismerendő fogalmak

Meghibásodási ráta: a rendszer meghibásodási gyakorisága az idő függvényében (pontosabban: annak valószínűsége, hogy a rendszer egy adott időpontot követő igen kicsiny egységnyi időszakaszban meghibásodik, feltéve, hogy az időpontban működőképes volt).

Öregedés: a megbízhatóság-elméletben azt jelenti, hogy a meghibásodási ráta az idő függvényében növekszik.

Gompertz-féle halálozási törvény: az a megfigyelés, hogy a halálozási (lásd meghibásodási) ráta logaritmus az életkornak lineáris függvénye. Ezt a törvény névadója az életbiztosítás területére javasolta alkalmazni.

Weibull-féle hatványfüggvény: a meghibásodási ráta logaritmus lineáris az idő logaritmusának a függvényében (Megjegyzés: az anyagok kifáradása és szilárdságvizsgálata esetében alkalmazott Weibull-eloszlás meghibásodási rátája hatványfüggvény, amely a kádgörbe három szakaszát három különböző előjelű kitévővel írja le:

1. szakasz = a hatványkitevő negatív;
2. szakasz = a hatványkitevő 0 (expon. eloszlás);
3. szakasz = a hatványkitevő pozitív).

A halandóság kiegyenlítődési törvénye: az a megfigyelés, hogy különböző körülmények között élő embercsoportok halálozási rátája csökkenő különbséget mutat az életkor növekedésével (ez azt jelenti, hogy a halálozási rátákban kis különbség van 90 éves korban egy szegény és egy gazdag ország lakosai között).

Késői életkor halálozási arányának lassuló jellege: a halálozási rátái igen magas életkorban azt mutatják, hogy közel állandóak az idő függvényében (például 100 éves személy körülbelül azonos valószínűséggel marad életben a következő születésnapjáig, mint egy 115 éves – lásd meghibásodási ráta definíciója).

4. A megbízhatóság-elmélet matematikai megállapításai

Az egyik megállapítás az, hogy a nem-öregedő elemekből felépített rendszer is meghibásodik az idő múlásával, mivel a véletlen tényezők az állandó meghibásodási rátájú elemek meghibásodását idézik elő, ilyen például a sugárzás hatása vagy a vírusfertőzés. Ez vonatkozik olyan tartalékolt rendszerekre, amelyek nem cserélhető elemekből vannak felépítve.

Egyszerű példa egy olyan számítógép, amely három mikroprocesszorból áll és csak akkor hibásodik meg, ha mindhárom elem meghibásodik. Ebben az esetben maguk a mikroprocesszorok nem öregednek, azonban bármely előre nem jelezhető időpontban károsodást szenvedhetnek és maradandóan meghibásodhatnak. Ha a rendszer csak egy processzorból állna, akkor már egy meghibásodás tönkretenné a rendszert.

Tartalékolt rendszer esetében ez a meghibásodási valószínűség csökken a tartalékelemek számának növekedésével, ugyanis a tartalékelemek meghibásodási valószínűségei összeszorozódnak. Ez esetünkben például azt jelenti, hogy ha egy mikroprocesszor meghibásodási valószínűsége, akkor a három elemű tartalékolt rendszer meghibásodási valószínűsége lesz így a károsodás(hiba)-tűrés a rendszer megbízhatóságát, így élettartamát is javítja. Az emberi szervezet esetében is feltételezhető, hogy legalábbis részben tartalékolt nem-öregedő elemekből van felépítve. Ez egyenes következménye annak, hogy szervezetünk (szerveink és rendszereink) sok alkotóelemből állnak, amelyek a sejtek szintjén nem öregsznek.

Az utóbbi évek kutatásai azt mutatták, hogy az idegrendszeri betegségek (neurodegeneratív folyamatok) mögött olyan mechanizmusok állnak, amelyekben az agysejtek halálozási aránya állandó, kortól független (ilyen a Parkinson-kór). Sok sejtfunkció idős korban is éppen olyan jónak bizonyult, mint újkorában volt.

A tartalékolás a három öregedési törvényből kettőt vesz számításba. Az egyik a kiegyenlítődési törvény: az idősebb emberek különböző embercsoportokban közel azonos halálozási arányt mutatnak, jóllehet ezeknek az embercsoportoknak halálozási rátái fiatalabb korban eltérőek voltak. Feltételezve, hogy az egyes alkatrészek meghibásodási rátája állandó, lehet, hogy

egy 10 elemű tartalékolt rendszer kezdetben kisebb valószínűséggel hibásodik meg, mint egy 8 elemű tartalékolt rendszer. Egy bizonyos időpontban azonban mindegyik rendszerben csak kevés működő elem marad és a meghibásodás kockázata azonos lesz. (Megjegyzés: ebben tévednek [1] szerzői, ugyanis a 10 elemű rendszer még mindig működni fog, amikor a 8 eleműt már ki kell dobni; így ekkor nem áll fenn az emberi szervezet és a műszaki eszköz közötti analógia, mert az embert halála után már csak a kórboncnak vizsgálhatja). Persze a szerzők is megállapítják, hogy a 10 elemű rendszer tovább fog működni.

A tartalékolt rendszerek is szimulálják a halálozási arány állandósuló menetét, amely 100 év feletti embebernél tapasztalható. Idős korban ugyanis az összes rendszer már elvesztette tartalékelemeit és csak egy-egy kritikus eleme maradt. Ezért a műszaki rendszerekre és az idős emberekre egyaránt igaz, hogy meghibásodási (halálozási) rátájuk magas, de inkább állandó, mint növekvő.

Egyetlen kérdés maradt megválaszolatlanul. Ez a halálozási törvény eltérő viselkedése műszaki eszközök és emberek esetében. A műszaki eszközök meghibásodási rátája hatványfüggvényt követ, azaz a meghibásodási ráta logaritmus az idő logaritmusának lineáris függvénye. Az emberi halálozási arány esetében azonban annak logaritmus az időnek lineáris függvénye, amely azt mutatja, hogy az ember halálozási aránya meredekebben növekszik, mint a műszaki eszközé. Az [1] közlemény szerzői sokáig töprengtek ezen a különbségen. Végül eszükbe jutott, hogy több évvel ezelőtt olyan elavult számítógéppel kellett dolgozniuk Oroszországban, amelynek a viselkedése olyan emberi fogalmakkal volt leírható, mint személyiségi jegyek, jellem, hangulatváltozás. Ez arra az elképesztő ötletre vezette őket, hogy az élőszerkezet (az emberi szervezet is) megdöbbenően és inkább hasonlít egy részlegen károsodott régi számítógépre, mint egy új komputerre.

A műszaki eszközök megbízhatósága nagy megbízhatóságú (kiváló minőségű) elemek beépítésével érhető el, ugyanakkor az élőszerkezetek megbízhatósága csak nagyon magas fokú rendszer-tartalékolással biztosítható. Ezzel lehet kiküszöbölni néhány elem gyenge minőségét. Más szavakkal kifejezve ez azt jelenti, hogy a berendezéseket úgy készítik, hogy elkerüljék a hibákat, az élőszerkezetek pedig magukat teszik hibátűrővé (hibákkal szemben ellenállóvá).

A régi orosz számítógépek viselkedésén elgondolkozva a kutatók rájöttek arra, hogy a megbízhatóság-elmélet szokásosan azzal a hallgatólagos feltevéssel él, hogy a rendszer kezdetben hibátlan állapotú. Ennek megfelelően meghibásodási rátájuk a Weibull-féle hatványfüggvénnyel írható le, amelynek kitevője pozitív szám. Az élőszerkezetek öregedését azonban a meredekebb növekedésű, exponenciális függvény (vi-gyázat: nem exponenciális eloszlás) írja le a halálozási

arány jellemzésére. Ez az exponenciális halálozási ráta-függvény azt jelenti, a kezdeti károsodás nagy veszélyével indul a felnőtt élet felé (a szervezetben már a születés előtt és közvetlenül az után is vannak hibás sejtek).

Bár ez a feltevés intuitív lehet, jól igazolható a korai fejlődés szakaszában megfigyelt tömeges sejtvesztéssel. Például a női emberi magzat 4-5 hónapos korában 6-7 millió petével rendelkezik, születés után pedig ez a szám 1-2 millióra csökken. A lányok serdülő korban általában 0,3-0,5 millió petével rendelkeznek, azaz a kezdeti számnak csak az 5-7%-ával. Megalapozottan kimutatható, hogy a peték számának időbeli csökkenése felelős a klimaxért (menopauze-ért, havi vérzés elmaradásáért) és ez okozhatja a nők termékenységi rendszerének meghibásodását. Azok a hölgyek, akiknek több petesejtjük van, hosszabb ideig képesek megtermékenyítésre.

Ha elfogadjuk, hogy nagy mennyiségű károsodással születünk, akkor ebből az következik, hogy a korai emberi fejlődés szakaszában (folyamataiban) elvégzett csekély mértékű javítások is – olyanok, amelyek növelik a kezdeti funkcionális elemek számát – eredményezhetik a halandóság csökkenését és az emberi élettartam jelentős kiterjesztését.

Egyre több bizonyíték van arra, hogy a felnőttkori degeneratív betegségeket és az öregedés kezdetének, valamint az élettartam hosszának korai életkorban való meghatározását magzati eredetű állapotokra (eredetekre) lehet visszavezetni.

Érdekes, hogy a korai életkor olyan körülménye, mint például a születési hónap hatással van az élettartam hosszúságára. Ezt mutatják például olyan csecsemőkorban észlelt évszakkal járó betegségek, mint a vitaminhiány, amely a szülőanya téli fogyasztó diétájából vagy influenzás megbetegedéséből származik. Ezeknek hosszú ideig tartó következményei lehetnek.

5. A megbízhatóság-elmélet alkalmazása az öregedési folyamatok leküzdésére

A megbízhatóság-elmélet megállapításait figyelembe véve a kutatók most már legalább tudják, hogy miért és hogyan öregszünk. Öregedésünk oka az, hogy testünk nem helyettesíthető, de tartalékolt alkotóelemekből van felépítve, amelyek közül sok hibás van (már kezdetben is!) és öregedünk, ahogy ezek közül egyes alkotó elemek elkerülhetetlenül befejezik működésüket. Ennek az elméletnek ismeretében biológiai gyógyászati kutatásainkat arra összpontosíthatjuk, hogy lassítsuk vagy legalábbis szabályozzuk az öregedést.

Az ilyen jellegű legnagyobb beavatkozások egyike az a mód lenne, hogy elkerüljük (megszüntessük) a fejlődési károsodásokat (rendellenességeket) amelyek az életünket jellemző módon meghatározó magas kezdeti károsodási terhelést (igénybevételt) okozzák. Még olyan egyszerű dolgok, mint például a várandós anyák megfelelő vitaminokkal való ellátása, megakadályozza

a DNA károsodást és sokféle születési hibát. Például ha a terhes egereket olyan antioxidánsokkal etették, amelyek csökkentik a DNA-károsodásokat, akkor ezek az egerek hosszabb élettartamú utódoknak adtak életet. Ez a kutatási irány, amely már születés előtt az öregedéssel járó betegségek megelőzéséhez vezethet, hasonló a számítógépek chipjeinek gyártási folyamat során történő javításához (gyártásközi ellenőrzéshez, folyamatszabályozáshoz és a gyártási hibák megszüntetéséhez).

Még jobbat tehetnénk, ha megakadályoznánk a szövettani és szervi károsodásokat. A széleskörűen elterjedt fertőzések és lappangó gyulladások kiküszöbölése késleltetheti az izületi betegségek, az érlelmeszesedéssel járó betegségek, a bél- és gyomorbetegségek, az Alzheimer-kór és bizonyos típusú rákbetegségek bekövetkezését. Ahhoz, hogy ide eljussunk, meg kellene ismernünk (tanulnunk), hogyan tudjuk szervezetünket megjavítani (jobbá tenni), ha megsérülünk, vagy betegségtől legyengülünk.

Az élőszerkezetek már rendelkeznek számos javító mechanizmussal, így például bármilyen sérüléstől vagy a napsütéstől elhalt sejteket folyamatosan helyettesítik újakkal, amelyeket a törzssejtek alakítanak ki. Ezek olyan sejtek, amelyek megsokszorozhatják sokféle szövettípus kialakulását. A tudósok már vizsgálják a hormosis-hatást, vagyis azt a megfigyelést, hogy kis mennyiségű mérgező anyag aktivizálja a szervezet önjavító mechanizmusait, ennek mellékhatásaként nem kizárólag a mérge ellen véd, hanem más veszélyek ellen is. Ha megismernénk az ilyen védekezési hatásokat, akkor lehet, hogy képesek lennénk lassítani vagy megelőzni az öregedéshez vezető sejtvesztéseket és rendszerkárosodásokat.

Végezetül, meg kellene ismernünk, hogyan helyettesítsük új és egészséges szervekkel a károsodott idős szerveket. Sok kutató azt gondolja, hogy egy nap az emberi élettartam nagy mértékben megnövelhető az előregedett szervek pótlásával. Ezen az úton most indultunk el. A laboratóriumok világszerte nagy haladást értek el a szervek (szív, vese, tüdő, máj) átültetésében.

A megbízhatóság-elmélet rávilágít arra, hogy nem csak egyetlen alapvető öregedési folyamat léphet fel, hanem az öregedést tartalékolt rendszerek nagyszámú létrejövő folyamata idézheti elő. Egy hasonlattal élve, élettartamunk egy időzített bomba, sok különböző sebességgel égő gyújtózsínórral. Ha csak egy zsinórt vágunk el, amely lehet, hogy éppen nem az igazi, akkor ügynünk kell valamennyi maradék zsinórra is.

Irodalom

- [1] L. Gavrilov & N. Gavrilov:
Why we fall apart?
IEEE Spectrum, September 2004., pp.17–21.