

## **HIBAJAVÍTÓ KÓDOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA IPAR 4.0 ALKALMAZÁSOKHOZ**

Csikós Sándor – Czifra György – Sárosi József

**Absztrakt:** Az adat kulcsfontosságú komponens minden ipar 4.0-s technológiában, így az adatok épségének ellenőrzése, illetve javítása kiemelkedő jelentőségű. Mivel minden hibadetektáló vagy javító kód bizonyos szintű redundáns információra épít, fontos szempont az adat sérülésének veszélyét figyelembe venni, amikor meghatározzuk, milyen kódolást választunk az adatok tárolására. Választásunk kihatással lesz az adatok tárolásához szükséges memóriára, valamint az adatok feldolgozási sebességére. A cikk különböző típusú hibajavító kódokat hasonlít össze azzal a céllal, hogy meghatározza, melyik a leghatékonyabb bizonyos alkalmazásokhoz. Először a különböző kódtípusok, így a lineáris blokk kódok, a konvolúciós kódok és a turbókódok kerülnek bemutatásra, majd az egyes kódtípusok értékelését a hibajavító képességük szempontjából. A cikk ezután elemzést ad az egyes kódtípusok előnyeiről és hátrányairól, valamint a különböző ipar 4.0-s alkalmazásokhoz való alkalmasságukról.

**Abstract:** Data is a crucial component in every Industry 4.0 technology, therefore, ensuring and improving the integrity of data is of paramount importance. As every error-detection or correction code relies on a certain level of redundant information, it is important to consider the risk of data corruption when choosing the encoding for data storage. Our choice will have an impact on the memory required for data storage, as well as the speed of data processing. The article compares various types of error-correcting codes with the aim of determining the most effective for certain applications. First, different code types such as linear block codes, convolutional codes, and turbo codes are presented, followed by an evaluation of each code type's error-correcting capabilities. The article then provides an analysis of the advantages and disadvantages of each code type, as well as their suitability for various Industry 4.0 applications.

*Kulcsszavak:* ipar 4.0, hibajavító kódok, hibadetektáló kódok

*Keywords:* industry 4.0, error correcting codes, error detecting codes

### **1. Bevezetés**

Az ipar 4.0 jelentőségének növekedésével az adatok szerepe és jelentősége is megnőtt minden iparágban. Az adatok mérésének, elemzésének és értékelésének növekvő szerepe miatt az adatok épsége és megbízhatósága kiemelt jelentőséggel bír. Az adatok sérülése vagy elvesztése nagy károkat okozhat, és akadályozhatja az ipari folyamatok hatékony és biztonságos működését. Az adatok megbízhatósága és épsége az ipar 4.0 kulcsfontosságú eleme, és az adatokkal való hatékony munka alapja.

Az adatok épségének biztosítása számos technológiát és eszközt igényel, beleértve az adatok tárolására és feldolgozására használt kódolásokat is. Az adatok biztonságának és megbízhatóságának érdekében az adatok tárolására használt kódolásoknak redundáns információkkal kell rendelkezniük, amelyek megakadályozzák az adatok sérülését vagy elvesztését. Az adatok tárolására használt kódolásnak nagy hatása lehet a felhasznált memóriára és a feldolgozási sebességre is, ezért fontos az optimális kódolás megtalálása.

A cikk célja, hogy összehasonlítsa a különböző típusú hibajavító kódokat és meghatározza a legmegfelelőbb kódolást az ipar 4.0-s alkalmazások számára. A cikk

bemutatja a lineáris blokk kódokat, a konvolúciós kódokat és a turbókódokat, majd az egyes kódtípusok értékelését a hibajavító képességük szempontjából. A cikk elemzést ad az egyes kódtípusok előnyeiről és hátrányairól, valamint a különböző ipar 4.0-s alkalmazásokhoz való alkalmasságukról. Az eredmények alapján a cikk ajánlást tesz a legmegfelelőbb kódolásra az ipar 4.0-s alkalmazások számára. A cikk eredményei fontosak lehetnek az ipar számára, hogy biztonságosabb és hatékonyabb adatkezelést valósítsanak meg, és támogassák az ipar 4.0-s fejlődését.

## 2. Kódolási eljárások

### 2.1. Blokk kódok

Az adatok megbízhatóságának és hibajavító képességének javítása érdekében különböző típusú kódolási eljárásokat fejlesztettek ki. Az egyik legelterjedtebb kódolási módszer a blokk kódolás, amely egy sor bitből álló blokkokat használ az adatok kódolására. A blokk kódolás során az adatblokkot az ún. generátor mátrix segítségével kódolják, majd a kódolt adatblokkot a vevő oldalon a dekóder segítségével dekódolják.

Az egyik leggyakrabban használt blokk kódolási módszer a lineáris blokk kódolás, amelyben a generátor mátrix lineáris kombinációit használják az adatok kódolására. A lineáris blokk kódolás előnye, hogy egyszerű és hatékony kódolási módszer, amely nagyobb hibajavító képességgel rendelkezik, mint a nem lineáris blokk kódolások.

A lineáris blokk kódolásnak több típusa van, mint például a Hamming-kód, a Reed-Solomon-kód és a kiterjesztett Hamming-kód. Ezek a kódok különböző hibajavító képességgel és kódolási sebességgel rendelkeznek, ezért különböző alkalmazásokhoz alkalmasak.

A Hamming-kód egy olyan lineáris blokk kód, amelyet a hibajavításra fejlesztettek ki. A Hamming-kód az egyik legegyszerűbb hibajavító kód, amely csak egyetlen bit hibáját tudja javítani. A Reed-Solomon-kód egy másik lineáris blokk kód, amelyet a CD-k és DVD-k adatkódolására használnak.

Összességében a lineáris blokk kódolás a legelterjedtebb kódolási módszer az adatok megbízhatóságának javítására, és különböző alkalmazásokhoz számos típusa érhető el. A lineáris blokk kódolás előnyei közé tartozik a nagyobb hibajavító képesség, valamint a kódolás egyszerűsége és hatékonysága (Benedetto–Montorsi, 1995).

### 2.2. Ciklikus kódok

A blokk kódolási módszerek között a ciklikus kódolás egy másik népszerű megközelítés az adatok hibajavítására. A ciklikus kódokban a generátor polinomokat használják az adatok kódolására, és a polinomokat maradékos osztással készítik el.

A ciklikus kódolásnak több típusa van, mint például a Cyclic Redundancy Check (CRC) és a Bose-Chaudhuri-Hocquenghem (BCH) kódok. A CRC kódokat gyakran használják a számítógépes hálózatokban az adatintegritás ellenőrzésére. A BCH kódok használata hasonló az előző szakaszban említett lineáris blokk kódokhoz, de

a BCH kódoknak nagyobb hibajavító képességük van. A ciklikus kódolás előnye, hogy nagyon hatékony és könnyen implementálható. Emellett a ciklikus kódolás nagyobb hibajavító képességgel rendelkezik, mint a nem ciklikus kódolási módszerek, például a lineáris blokk kódolás.

Azonban a ciklikus kódolásnak is vannak korlátai, például az, hogy csak egy bizonyos méretű adatblokkok kódolására alkalmasak. A ciklikus kódolás szintén nem garantálja az abszolút adatintegritást, csak a hibák detektálására és javítására használható.

Összefoglalva, a ciklikus kódolás egy másik hatékony és elterjedt módszer az adatok megbízhatóságának javítására. Az előnyei közé tartozik a hatékonyság, a könnyű implementálás és a nagyobb hibajavító képesség. Azonban a ciklikus kódolásnak is vannak korlátai, és az alkalmazását figyelembe kell venni az adott adatkódolási feladatok során (Burton–Weldon, 1965).

### 2.3. Konvolúciós kódok

A konvolúciós kódok a megbízhatóbb adatok elérése érdekében alkalmazott harmadik típusú hibajavító kódok. A konvolúciós kódokban az adatokat áramkörökhöz hasonlóan dolgozzák fel, majd az így kapott adatokat további kódolási lépésekkel kezelik a hibatűrő képesség javítása érdekében.

A hibajavítás a kódolt adatok dekódolásával történik a konvolúciós kódok esetében. A konvolúciós kódok használatának egyik előnye, hogy nagyobb hibajavító képességgel rendelkeznek, mint a lineáris blokk kódok, és könnyen implementálhatók, hasonlóan a ciklikus kódokhoz. Ezen kívül a konvolúciós kódok adaptívak, azaz változó környezeti feltételekre is képesek reagálni.

Azonban a konvolúciós kódoknak is vannak korlátai. Azok bonyolultsága miatt nehezebb az enkódolási folyamat és a hibajavító képesség tesztelése is. Továbbá, az alkalmazott algoritmusok számítási igénye magas, ami idővel jelentős késéseket eredményezhet a rendszerben.

Mindent egybevetve, a konvolúciós kódolás egy nagyon hatékony technika, magas hibajavító képességgel, amely adaptív és könnyen implementálható. Azonban vannak korlátai a konvolúciós kódok alkalmazásában, amelyeket figyelembe kell venni a specifikus adatkódolási feladatok során. Általában a konvolúciós kódokat mobilkommunikációban és úrkutatásban alkalmazzák a magas hibajavító képességük, adaptabilitásuk és könnyű implementálhatóságuk miatt (Johannesson–Zigangirov, 1999).

### 2.4. Turbo kódok

A turbo kódok olyan hibajavító kódok, amelyek nagyon hatékonyak a bit hibák javításában. A turbo kódokat Claude Berrou és társai fejlesztették ki az 1990-es években, és azóta széles körben alkalmazzák a digitális kommunikációs rendszerekben, beleértve a mobiltelefonokat és a műholdas kommunikációt (Heegard–Wicker, 1999).

A turbo kódok az ún. iteratív dekódolás elvén alapulnak, amelyben az információ a kódolás során többször áthalad a kódoló és dekódoló egységeken. A turbo kódokat

két egymástól független, ám hasonló kódoló- és dekódoló egységből álló rendszer alkotja. A két egység együttesen végez hibajavítást, amelynek eredményeként nagyon hatékonyan képes javítani a bit hibákat.

A turbo kódok nagyon hatékonyak a bit hibák javításában, és jelentős előnyöket kínálnak a hagyományos blokk és konvolúciós kódokhoz képest. Azonban a turbo kódok dekódolása bonyolult és erőforrás-igényes folyamat, amely magas processzor- és memória-igényt jelenthet. Emiatt a turbo kódokat elsősorban olyan alkalmazásokban használják, ahol a nagy hibaellenállás és a nagy adatátviteli sebesség kritikus fontosságú.

A turbo kódokat a mobiltelefon-hálózatokban és a műholdas kommunikációban széles körben alkalmazzák, ahol nagyon fontos a hibaellenállóság és az adatátviteli sebesség. A turbo kódok további alkalmazási területei közé tartoznak a digitális televízió- és rádióadások, a Wi-Fi hálózatok és az optikai kommunikációs rendszerek.

Összefoglalva, a turbo kódok olyan hatékony hibajavító kódok, amelyek széles körben alkalmazhatóak a digitális kommunikációs rendszerekben. Bár a turbo kódok dekódolása bonyolult és erőforrás-igényes folyamat, a nagy hibaellenállás és az adatátviteli sebesség miatt számos kritikus alkalmazásban használatosak (Heegard–Wicker, 1999; Joerssen–Meyr, 1994).

### 3. Hibajavító kódok értékelése

Az adatok hibaérzékenységének kezelése számos különböző kódolási technikával történhet. Moon (2021) tankönyvében leírtak alapján az (1) szerinti egyenlőtlenségnek kell eleget tennie egy hibajavító kódoknak.

$$t = \left\lfloor \frac{d-1}{2} \right\rfloor \quad (1)$$

ahol:

t = a maximális javítható hibák száma

d = a minimális hamming távolság bármely két kód között

A továbbiakban összehasonlítjuk a négy leggyakrabban használt kódolási technikát hibaérzékenység szempontjából:

**Blokk kódok:** A blokk kódok hatékonyak rövid, fix hosszúságú adatblokkok esetén, de azoknál az adatoknál, amelyek hossza változó, nem alkalmazhatóak hatékonyan. A blokk kódok nagyobb hibaérzékenységgel rendelkeznek, mint a ciklikus kódok és a konvolúciós kódok.

**Ciklikus kódok:** A ciklikus kódok hatékonyak hosszabb, változó hosszúságú adatok esetén is. Nagyobb hibaérzékenységgel rendelkeznek, mint a blokk kódok, de alacsonyabb hibaérzékenységgel rendelkeznek, mint a konvolúciós kódok.

**Konvolúciós kódok:** A konvolúciós kódok nagyon hatékonyak a hosszú, változó hosszúságú adatok esetén, és a legjobb hibaérzékenységgel rendelkeznek az összes kódolási technika közül. Azonban a dekódolásuk bonyolultabb, mint a blokk és a ciklikus kódoké, így nagyobb erőforrásokat igényelnek.

Turbo kódok: A turbo kódok olyan kódolási technikák, amelyek a konvolúciós és a blokk kódok előnyeit ötvözik, és nagyon hatékonyak a hosszú, változó hosszúságú adatok esetén. A turbo kódok kiváló hibaérzékenységgel rendelkeznek, de dekódolásuk rendkívül bonyolult és nagy erőforrásokat igényel.

Összefoglalva, a konvolúciós kódok a legjobb hibaérzékenységgel rendelkeznek, de dekódolásuk bonyolultabb. A blokk kódok hatékonyak rövid adatblokkok esetén, de hibaérzékenységük alacsonyabb. Azonban mindig szem előtt kell tartani, hogy a kódolás és a hibajavítás hatékonysága nem csak az alkalmazás típusától függ, hanem az alkalmazás különböző paramétereitől is. Például a kommunikációs csatorna jellemzőitől, az adatsebességtől, a zajszinttől és a memória korlátoktól függően egy adott kód hatékonysága változhat.

Összegzésként, a blokk, ciklikus, konvolúciós és turbo kódok mindegyike hatékony megoldás a hibajavításra. Mindegyiküknek előnyei és korlátai vannak, és a választás mindig az adott alkalmazás jellemzőitől függ. A különböző kódolási megoldások összehasonlítása azt mutatja, hogy az egyes kódok hibajavító képessége jelentősen különbözhet, és az alkalmazási szempontok szigorú figyelembevétele szükséges a hatékony kódolási megoldás kiválasztásához.

#### 4. Következtetések, összegzés, záró megjegyzések, záró gondolatok

Az adatok hibajavításának fontossága az ipar 4.0 számára kiemelkedő fontosságú, hiszen az ipari folyamatokban alkalmazott eszközök által rögzített adatok hibás vagy sérült formában jelentős gazdasági és biztonsági kockázatot jelenthetnek. A különböző hibajavító kódok, mint a blokk, ciklikus, konvolúciós és turbó kódok, különböző szintű hibajavítási képességgel rendelkeznek, és a kiválasztott kód típusa az adatok tárolásához szükséges memória méretét és az adatok feldolgozási sebességét is befolyásolja. Figyelembe véve, hogy a terepen alkalmazott adathordozók közül az RFID matricák vannak leginkább használva olyan körülmények között, ami veszélyezteti a rajtuk lévő adatokat és akár 12 bit hiba is érhet egy RFID matricát mielőtt használhatatlanná válik (Mezzah et al., 2021) a minimális Hamming távolság bármely két kódszó között a kódolásban 25 bit kell, hogy legyen. Erre bármelyik kódolás alkalmas, az egyedüli kérdés, hogy mekkora kódszó készletre van szüksége a szóban forgó alkalmazásnak. Összességében, a hibajavító kódok kiválasztása az adatok biztonságának és megbízhatóságának biztosításához elengedhetetlen az ipar 4.0-ban, és a kód típusának megválasztása függ a konkrét alkalmazás igényeitől, és az adatok tárolása és feldolgozása során felmerülő kihívásoktól. A hibajavító kódok kiválasztása az adatok megbízhatóságának biztosítása mellett elősegítheti az ipar 4.0-s rendszerek hatékonyabb működését és a gazdasági előnyök maximalizálását.

#### Irodalomjegyzék

- Benedetto, S., Montorsi, G. (1995): Average Performance of Parallel Concatenated Block Codes. *Electronic Letters*, 31 (3): 156–158. <https://doi.org/10.1049/el:19950101>
- Burton, H., Weldon, E. (1965): Cyclic Product Codes. *IEEE Transactions on Information Theory*, 11 (3): 433–439. <https://doi.org/10.1109/TIT.1965.1053802>

- Heegard, C., Wicker, S. B. (1999): *Turbo Coding*. Kluwer Academic, Boston. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2999-3>
- Joerssen, O., Meyr, H. (1994): Terminating the Trellis of Turbo-Codes. *Electronic Letters*, 30 (16): 1285–1286. <https://doi.org/10.1049/el:19940897>
- Johannesson, R., Zigangirov, K. (1999): *Fundamentals of Convolutional Coding*. IEEE Press, Piscataway, NJ. <https://doi.org/10.1109/9780470544693>
- Mezzah, I., Kermia, O., Chemali, H. (2021): Extensive fault emulation on RFID tags for fault tolerance and security evaluation. *Microelectronics Reliability*, 124: 114263. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114263>
- Moon, T. K. (2021): *Error Correction Coding: mathematical methods and algorithms*. Wiley, Hoboken. <https://doi.org/10.1002/0471739219>