

MEZŐGAZDASÁGI GÉPEK HIBAMEGELŐZŐ JAVÍTÁSÁNAK TERVEZÉSE

REMSEI NÁNDOR

a műszaki tudományok kandidátusa

Keszthelyi Agrártudományi Egyetem Gépészeti Kar, Kőrmend

Bevezetés

A mezőgazdaságban üzemeltetett gépek, technikai berendezések hibamegelőző javításának a tervezése a mezőgazdasági gépgyártás és gépüzemvitel egyik sajátos és fontos feladata.

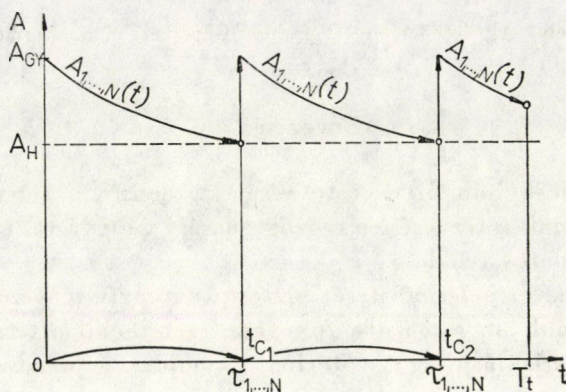
Hazánkban a termelés bővítését biztosító extenzív tényezők kimerülőben vannak. Mindinkább az intenzitás fokozása, ezen belül a termelés komplex gépesítése, automatizálása kerül előtérbe. A komplex géprendszerek meghibásodásából adódó hatékonyságromlás, így például a termelés csökkenése, a helyszínelés, a hibakeresés többletköltsége igen jelentős lehet. Az említett hatékonyságromlás gyakorlatilag két módon kerülhető el: a gépek megbízhatóságának a növelésével, a megfelelő időközönként és módon végzett javításokkal. A mezőgazdasági gépek megbízhatóságát elfogadható ráfordítások mellett növelő eszközök és módszerek erősen korlátozottak. Így a meghibásodásból eredő hatékonyságromlás csökkentésére elsősorban az optimális javítási ciklusidőket és technológiákat meghatározó módszerek jöhetnek számításba.

A kutatási feladat

Jelen tanulmányban a mezőgazdasági gépek hibamegelőző javításának tervezési kérdéseit tárgyaljuk a modern matematika általános szemléletmódja segítségével. Azt kutatjuk, hogy miként lehet a gépgyártás és gépüzemvitel során meghatározni a legkedvezőbb következményeket maga után vonó javítási ciklusidőket és technológiákat. A hibamegelőző javítás tervezésének módszerét alapvetően azok az állapotjellemzők határozzák meg, amelyek a gépek üzemképességét, pontosabban műszaki megbízhatóságát reprezentálják. Ezen állapotjellemzők a gépüzemvitel során általában változnak: az üzemeléskor rendszerint romlanak, az üzemfenntartás során pedig javulnak.

Viszonylag igen egyszerű a javítási ciklusidők és technológiák meghatározása abban az esetben, ha az üzemképességet reprezentáló állapotjellemzők (A_1) változása determinisztikus. A determinisztikus állapotváltozás ugyanis azt jelenti, hogy tetszőlegesen nagy számú N azonos típusú hibahely (agregát) mindegyike azonos módon romlik le a gépüzem során, tehát ugyanabban az

időpontban (τ) éri el az A_H meghibásodási határt (1. ábra). Ebben az esetben a javítási ciklusidő (t_c) közel azonos a τ meghibásodási időponttal, a javítástechnológia pedig vagy azonos a gyártástechnológiával, (például javítás gyári pótalkatrésszel) vagy olyan felújítástechnológia, amely azzal ekvivalens.



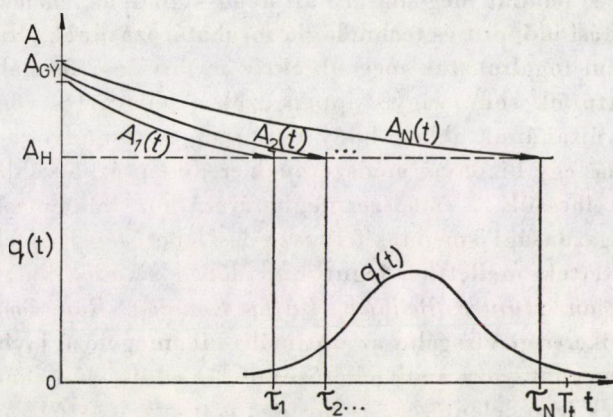
1. ábra. A hibahelyek javítási ciklusideje determinisztikus állapotváltozás esetén (A = a hibahely megbízhatóságát megadó állapotjellemző; A_{Gy} = az „A” állapotjellemző értéke a gyártás után; A_H = hibahatár; τ = a meghibásodás időpontja, t_c = a hibamegelőző javítás időpontja; T_t = a hibahely selejtezésének időpontja; t = üzemidő)

A gyakorlatban a mezőgazdasági gépek hibahelyeinek túlnyomó többségénél az üzemképességet reprezentáló állapotjellemzők változása, a rendelkezésre álló anyagok inhomogenitása, a gyártástechnológiák pontatlansága, az igénybevétel fluktuációja stb. miatt sztochasztikus jellegű. Az állapotjellemzők sztochasztikus viselkedése nagymértékben megnehezítheti a javítási ciklusidők tervezését, mivel N számú azonos típusú hibahely állapotváltozása csak N számú, általában azonos típusú, de különféle paraméterű függvénnyel [$A_1(t)$, $A_2(t)$, ..., $A_N(t)$] adható meg. Ez egyben azt is jelenti, hogy a hibahelyek különféle időpontokban ($\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N$) érik el a hibahatárt (A_H), tehát — leszámítva a hibahelyek egyedi, és igen gyakori állapotvizsgálatát — előzetesen csupán a meghibásodás valószínűsége adható meg (2. ábra).

Az A állapotjellemzők sztochasztikus jellegéből következik, hogy a meghibásodások az üzem során „váratlanul” lépnek fel. A „váratlan” meghibásodások, mivel komoly zavarokat okozhatnak a termelésben, és mert tetemesen növelhetik a gépüzemfenntartási ráfordításokat, igen jelentős mértékben ronthatják a gépüzemvitel hatékonyságát. Az említett hatékonyságcsökkenés megakadályozására, de legalábbis mérséklésére — figyelembe véve az állapotjellemzők leírásának és bemérésének műszaki, valamint matematikai módszereit, továbbá a rendelkezésre álló gyártás- és felújítástechnológiákat — több módon is lehetőség nyílik:

1. Olyan gyártás- és felújítástechnológiák alkalmazása, amelyeknél a meghibásodási időpontok szórása ugyan jelentős, de a hibahelyek túlnyomó többsége a gépek selejtezési időpontja után hibásodik meg.

2. Olyan gyártás, és felújítástechnológiák bevezetése, amelyeknél a meghibásodások ugyan a gépek selejtezése előtt következnek be, de a meghibásodások időpontjának a szórása kellőképpen kicsi.



2. ábra. A hibahelyek sztochasztikus állapotváltozása (A = a hibahely megbízhatóságát reprezentáló állapotjellemző; A_{Gy} = az „ A ” állapotjellemző értéke a gyártás után; A_H = hibatár; τ = a meghibásodás időpontja; T_t = a hibahely selejtezésének időpontja; t = üzemidő; $q(t)$ = meghibásodási sűrűségfüggvény)

3. Diagnosztikai beverendzések segítségével a hibahelyek állapotváltozásának egyedenkénti bemérése. Vagyis az $A_1(t)$, $A_2(t)$, \dots , $A_N(t)$ függvények üzemi mérések alapján történő felvétele, és e függvények segítségével a meghibásodások időpontjának prognosztizálása.

4. Olyan tervezési módszerek alkalmazása, amelyek a meghibásodási időpontok nagy szórása és selejtezési időponton belüli elhelyezkedése esetén is kellőképpen érzékelik a véletlenszerű meghibásodásokból adódó kockázatot, valamint figyelembe veszik azt a jogos igényt is, hogy a gépüzemvitel hatékonyságnövelésének elengedhetetlen eszköze a mind hosszabb gépüzem biztosítása.

A felsoroltak közül, megítélésünk szerint megkülönböztetett figyelmet érdemelnek a 4. pontban körvonalazott tervezési módszerek. A különféle gyártás- és felújítástechnológiák, valamint az ezekhez felhasznált anyagok az utóbbi évtizedekben nagy fejlődésen mentek keresztül. Ennek ellenére, sok esetben mégsem teszik lehetővé az 1. és 2. pontban foglaltak megvalósítását. Hasonlók mondhatók el a diagnosztizálási eljárásokról is. Az e téren elért eredmények jelentősek, mégis a mezőgazdasági gépekben nagy számmal találunk olyan hibahelyeket, amelyek állapotjellemző-változásainak [$A_i(t)$] üzemzerű bemé-

rése nem megoldott. Végül a 4. pontban foglalt tervezési módszerek alkalmazását indokolja az a tény is, hogy segítségükkel egzakt módon meghatározhatók az 1, és 2, pontban szereplő túlnyomó többség, kellőképpen kis szórás kifejezések.

A feladat megoldására tett kísérletek

A kutatási feladat megoldására általánosságban az jellemző, hogy a hibamegelőző javítási időpont és technológia meghatározásának általános törvényszerűségeit nem fogalmazták meg objektív mennyiségi formában. Nincsenek feltárva struktúráik sem, vagyis éppen azok a jellegzetes vonások, amelyek lehetőséget nyújtanának ahhoz, hogy pontosan, tudományosan előre lássuk a feladatmegoldás egy bizonyos módszerének eredményét, továbbá, hogy tárgyilagosan értékelhessük a módszermeghatározáshoz alkalmazható műszaki, matematikai, gazdasági ismeretek felhasználási lehetőségeit és feltételeit.

Az említettek mellett, a legutóbbi időben számos kutató így például *Barlow, Proshan, Hunter, Beljajev, Buffa, Konszon, Rau, Smith, Szelivanov, Cox, Usakov* sikeresen vizsgálta az optimális hibamegelőző javítási ciklusok és technológiák meghatározásának lehetőségeit. Az eddig elért elméleti és gyakorlati eredmények igen jelentősek, és ha nem is teszik lehetővé a problémamegoldást célzó kutatómunka lezártnak nyilvánítását, azt meggyőzően bizonyítják, hogy megvan a reális lehetőség a mind hatékonyabb tervezési módszerek kidolgozására és alkalmazására, és ezáltal a gépüzemvitel teljesítményének további növelésére.

Kutatási eredmények

1. Tervezési módszer a hibamegelőző javítás ciklusidejének és technológiájának meghatározására

A mezőgazdasági gépek túlnyomó többsége számos olyan hibahelyet tartalmaz, amelyekre az jellemző, hogy a műszaki megbízhatóságuk a gép selejtezése előtt igen alacsony értékre csökken, továbbá az átlagos élettartamuk csupán tört része a gép üzemviteli időtartamának, a meghibásodási időpontok szórása pedig viszonylag nagy. Az ilyen tulajdonságokkal rendelkező gépek hibamegelőző javítástervezésének a kiindulópontjával az a felismerés szolgálhat, hogy az általános célkitűzés megvalósítására, vagyis a gépüzemvitel teljesítményének a maximalizálására, általában csak egymással ellentétesen ható tényezők figyelembevétele mellett nyílik lehetőség. Más szóval, a gépüzemvitel teljesítményét megadó paraméterek közül egyesek nem növelhetők anélkül, hogy másokat ne csökkentetnének. Például a gépüzemvitel teljesítménynövelésének egyik legfontosabb eszköze a műszaki megbízhatóság fokozása lehet. A műszaki megbízhatóság növelése azonban általában csak költségesebb anyagok, techno-

lógiai, nagyobb tartalékok képzése stb. árán érhető el. Mindezek közvetlenül, vagy közvetve csökkentik a gépüzemvitel teljesítményét.

Az említett egymással ellentétesen ható tényezők különösen jól tanulmányozhatók abban az esetben, ha az üzemvitel-teljesítmény maximalizálásával rendszerint ekvivalens üzemviteli ráfordítás minimalizálást tekintjük alapcélkitűzésnek. Ekkor határozottan értékelhető, és számszerűen is kimutatható, hogy a gyártási, gépjavítási költségek a minél hosszabb gépüzemet, a meghibásodásból adódó költségek pedig — mivel a meghibásodás valószínűsége az üzemidő szerint nő — a gép mind gyakoribb javítását, vagy mielőbbi cseréjét indokolják. A továbbiakban, a probléma könnyebb megoldhatósága érdekében feltételezzük, hogy a gépüzemvitel teljesítményével ekvivalens a gépüzemvitel ráfordítás, és ennek érték mérőjéül az üzemóránkénti gépüzemviteli költséget (Ft/üzemóra) választjuk. Ebben az esetben, a tervezési módszer célfüggvénye, bevezetve a gépüzemvitel ráfordításait üzemidő (t) szerint leíró $W_i^{(d)}(t)$ függvényeket:

$$\sum_{i=1}^n W_i^{(d)}(t) \rightarrow \min; d = 1, 2, \dots; i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

alakban adható meg, ahol d jelöli a döntési változókat, vagyis a hibamegelőző javítás során számításba jöhető gyártás- (pótalkatrész) és felújítástechnológiákat. Az i index pedig az egyes gépüzemviteli ráfordítások jele.

A $W_i^{(d)}(t)$ függvények analitikus megadásának módszere heurisztikus, és a gépüzemviteli ráfordításokat leíró paramétereiktől függően más és más. Például, ha a gépüzemviteli ráfordításokat a hibamegelőző javítás költsége ($i = 1$) és a gép meghibásodásából eredő termelés-csökkenés költsége ($i = 2$) jellemzi, a $W_i^{(d)}(t)$ függvények a következők lehetnek:

$$W_1^{(d)}(t) = \frac{K_1^{(d)}(t)}{\int_0^t tq^{(d)}(t) dt}, \quad (2)$$

ahol: $K_1^{(d)}(t)$ = a d -edik javítástechnológiai változat költsége a t időpontban
 t = üzemidő

$q^{(d)}(t)$ = a d -edik technológiai változat meghibásodási sűrűségfüggvénye

$$W_2^{(d)}(t) = \frac{K_2^{(d)}(t) \cdot Q^{(d)}(t)}{\int_0^t tq^{(d)}(t) dt}, \quad (3)$$

ahol: $K_2^{(d)}(t)$ = a d -edik technológiai változatot tartalmazó hibahely meghibásodása okozta termelés-csökkenés és költsége a t időpontban

$Q^{(d)}(t)$ = a d -edik technológiai változat meghibásodási eloszlásfüggvénye.

A $W_R^{(d)}(t)$ függvények analitikus megadása lehetővé teszi az egyes javítástechnológiai változatokkal elérhető minimális gépüzemviteli ráfordítások kiszámítását. Jelölje $W_R^{(d)}(t)$ a $W_i^{(d)}(t)$ függvények összegezését, vagyis $W_R^{(d)}(t) = \sum_{i=1}^{i=n} W_i^{(d)}(t)$ -vel, ekkor a d -edik döntési változó minimális gépüzemviteli ráfordítása:

$$W_{R_{\min}}^{(d)} = \left\{ \frac{d W_R^{(d)}(t)}{dt} = 0; \text{ és } \frac{d^2 W_R^{(d)}(t)}{dt^2} > 0 \right\}. \quad (4)$$

A $W_R^{(d)}$ ismeretében az optimális javítástechnológiai változat (k) a következőképpen adható meg:

$$W_{R_{\text{opt}}}^{(k)} = \min \left\{ W_{R_{\min}}^{(d)}; d = 1, 2, \dots, k, \dots \right\}, \quad (5)$$

az optimális hibamegelőző javítási időpont (t_{opt}) pedig ott van, ahol

$$\frac{dW_R^{(k)}(t)}{dt} = 0; \text{ és } \frac{d^2 W_R^{(k)}(t)}{dt^2} > 0. \quad (6)$$

A t_{opt} hibamegelőző javítási időpont a gépüzemvitel során mindaddig ciklikusan ismétlődik, amíg a k jelű javítástechnológiánál hatékonyabb gyártási, felújítási eljárást nem sikerül bevezetni.

A bemutatott számítási eljárás arra alkalmas, hogy a hibahelyek egyenkénti javítása esetén megadja a legkisebb üzemviteli ráfordítást biztosító javítástechnológiát, és a tervszerű hibamegelőző javítás ciklusidejét. Számos esetben, a hibahelyek egyenkénti javításának tervezésén túlmenően, bizonyos hibahely-csoportok együttes javítási lehetőségeit is szükséges megvizsgálni. A mezőgazdasági gépek konstrukciós kialakításából adódóan ugyanis gyakori jelenség, hogy egyetlen hibahely javítása jónéhány más hibahely ki- és beszerelését teszi szükségessé. Ekkor a hibahely-csoportokra vonatkozó üzemviteli (javítási) költség — tekintettel az egyenkénti és együttes javítás közel azonos ki-, beszerelési, beszabályozási, gépállási, stb. költségére — megközelítheti az egyetlen hibahelyre vonatkozó üzemviteli (javítási) ráfordítást.

Az elmondottakból következik, hogy bizonyos esetekben előnyösebb lehet egyetlen hibahely üzemképtelenné válásakor a gép más típusú hibahelyeit is javítani, annak ellenére, hogy azok üzemideje még nem érte el a 6-os egyenlet alapján számított optimális hibamegelőző javítási időpontot. Természetesen ennek az ellenkezője is feltételezhető: egy hibahelyet nem célszerű az előzőekben tárgyalt számítási eljárással megadott időpontban javítani, hanem hasznosabb bevárni más hibahelyek üzemképtelenné válását, vagy optimális javítási időpontját.

A hibahelyek, agregátok együttes javításának az előzőekben felsorolt lehetőségein túlmenően számos más technikai változat is lehetséges. A nagyszámú változat közül az optimális meghatározásának egy módja a következő lehet:

$$W^{(d^*)} = \sum_{f=1}^n \sum_{r=1}^m z_f^{(d^*)} K_r^{(d^*)}; \quad d^* = 1, 2, \dots \quad (7)$$

$$W_{\text{opt}}^{(j)} = \min \{ W^{(d^*)}; \quad d^* = 1, 2, \dots, j \dots \}, \quad (8)$$

ahol: $W^{(d^*)}$ = a hibahelyek, agregátok együttes javítására vonatkozó d^* -edik technikai változat üzemviteli ráfordításai

d^* = döntési változó; a hibahelyek együttes javításának technikai változatait jelöli

$z_f^{(d^*)}$ = d^* -edik javítástechnikai változatban realizálódó különféle típusú javítások (f) száma

$K_r^{(d^*)}$ = d^* -edik javítástechnikai változatban szereplő f típusú javítások üzemviteli ráfordításai

j = az optimális javítástechnikai változat.

A $z_f^{(d^*)}$ javításszámok üzemi vizsgálattal és matematikai úton: sztochasztikus szimulációval, úgynevezett Monte Carlo módszerrel határozhatók meg. A számítógépes sztochasztikus szimuláció alkalmazását elsősorban az indokolja, hogy segítségével nagyszámú javítástechnikai változat bevizsgálására, tetemes költség és időmegtakarításra nyílik lehetőség. További indok, hogy a vizsgált hibahelyek selejtezéséig általában csak viszonylag „rövid” időtartammal számolhatunk, és így a tömegkiszolgálási elmélet aszimptikus jellegű eredményeket adó analitikus eljárásai nem nyújtanak pontos információkat.

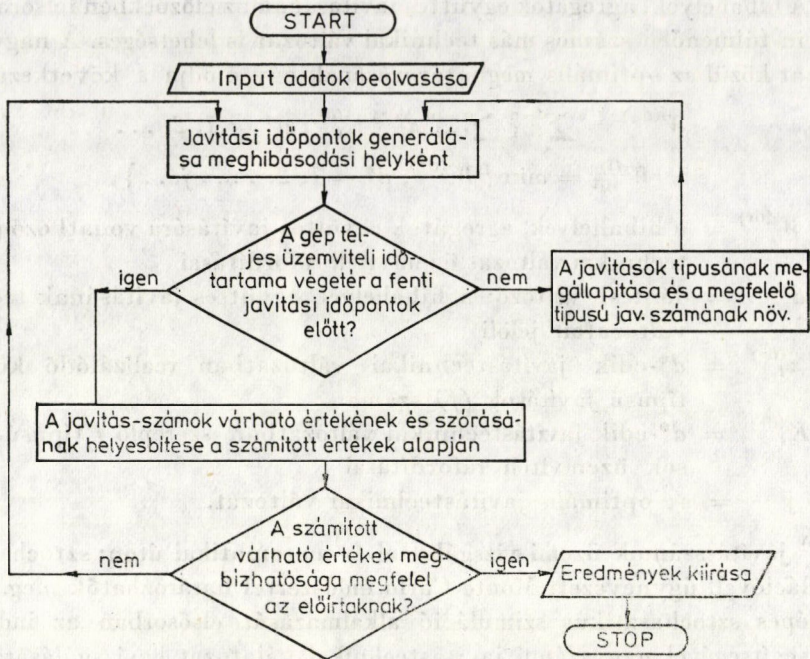
A Monte Carlo módszert tartalmazó számítási eljárás (3. ábra) a véletlen eseményeket is magukban foglaló modellek számítógépes szimulációjon alapul. A szimuláció a véletlen jelleggel meghibásodó hibahelyek javításainak modell-reprezentánsait állítja elő véletlenszám-generátor segítségével, és ennek alapján a modellezett probléma, vagyis a z_{f,d^*} javításszámok egy lehetséges megadását számítja ki. Az eljárás többszöri megismétlése lehetővé teszi, hogy a vizsgált kérdésre vonatkozóan statisztikai megállapításokat tegyünk, és a megállapítások megbízhatóságát matematikai statisztikai próbák segítségével ellenőrizzük.

A modell véletlenszám-generátora (z52 szubratin) a véletlen számokat aritmetikai úton állítja elő, azaz a generált véletlen számok „pseudo véletlenek”. A generálás módszere multiplikatív kongruenciámódszer. A számítás képlete:

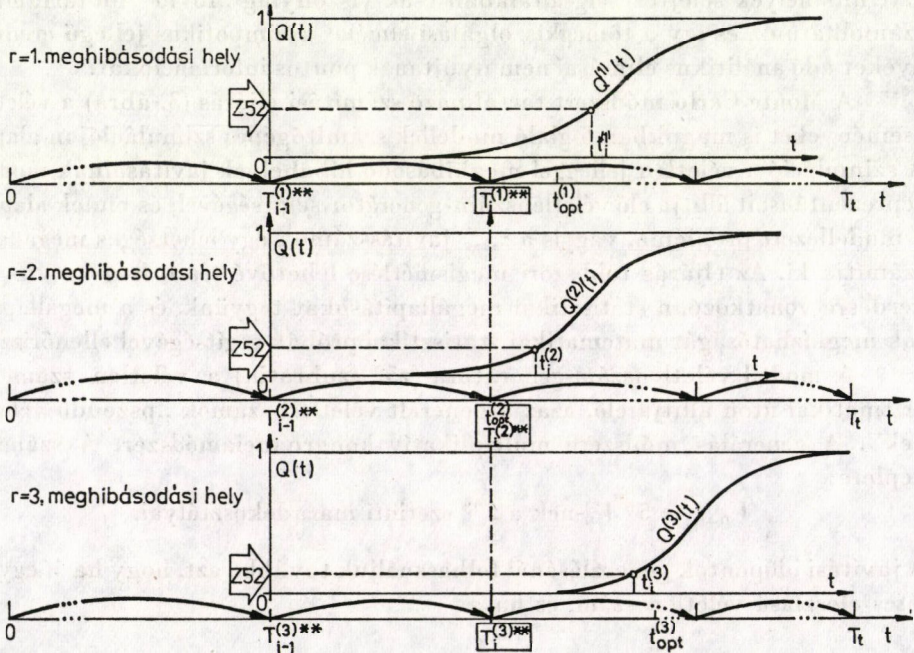
$$V_{n+1} = 5^5 V_n \text{-nek a } 2^{23} \text{ szerinti maradékosztályai.} \quad (9)$$

A javítási időpontok generálásánál felhasználjuk továbbá azt, hogy ha V egyenletes eloszlású véletlen szám, és ha a

$$V = \int_0^i Q'(t) dt \quad (10)$$



3. ábra. A hibahelyek javításszámait meghatározó program



4. ábra. Három hibahelyet tartalmazó agregát javítási időpontjainak $[T_i^{(r)***}]$ megadása

integrálegyenletet i -re megoldjuk, akkor az i az általunk megadott $Q(t)$ meghibásodási eloszlásfüggvényből származó véletlen szám. A véletlenszám — számítás kezdő értéke a programban $V_0 = 1$.

A feladatmegoldás egy-egy iterációs lépése (4. ábra) a hibahelyek teljes üzemviteli időszakára (T_i) vonatkozó különféle, a d^* döntési változóknak megfelelő, javítások számát határozza meg az egymásután végrehajtott javítások időpontjainak megadásával (T_i), és az említett időpontokban elvégzett különböző típusú javítások megfelelő összegezésével. Az egymást követő iterációs lépések eredményeiből a program az adott döntési változóra vonatkozóan az egyes hibahelyeken szükséges javítások számának várható értékét és szórását határozza meg. Kellően nagyszámú iteráció elvégzése után a javításszámok várható értékének szórása általában oly mértékben csökken, hogy az közvetlenül behelyettesíthető a 7-es egyenletbe.

A 7-es és 8-as egyenletekkel megadható $d^* = j$ döntési változó előállítása egyben a feladat kidolgozásának a befejezését, vagyis az optimális hibamegelőző javítási ciklusidők és technológiák meghatározását jelenti.

2. Csepel motor vezérműtengely hibamegelőző javításának tervezése

A Csepel motor vezérműtengely hibamegelőző javítástervezését az előző fejezetben ismertetett eljárás szerint végezzük. Ennek megfelelően, az egyes hibahelyekre (vezérműtengely bütyök $r = 1$; vezérműtengely csap $r = 2$) motornagyságtól ($h = 2, 4, 6$ hengeres) és az alkalmazott javítástechnológiától (javítás fémszórással felújított alkatrészszel $d = 1$, javítás gyári pótalkatrészszel $d = 2$) függően, megadjuk a gépüzemvitel teljesítményét, illetve az azzal ekvivalens gépüzemvitel ráfordításokat leíró $W_R^{(h,r,d)}(t)$ függvényt:

$$W_R^{(h,r,d)}(t) = \frac{(K_g^{(h,r,d)} + K_a^{(h,r,d)} + K_u^{(h,r,d)}) \cdot Q^{(h,r,d)}(t)}{\int_0^t tq^{(h,r,d)}(t) dt}, \quad (11)$$

ahol: $W_R(t)$ = a gépüzemvitel teljesítményét, illetve az azzal ekvivalens gépüzemviteli ráfordításokat leíró függvény

h = motor hengerszám

r = hibahely jele (vezérműtengely bütyök $r = 1$, vezérműtengely csap $r = 2$)

d = döntési változó, vagyis az alkalmazott javítástechnológia jele (fémszórással felújított vezérműtengely bütyök és csap $d = 1$; gyári (cementált) vezérműtengely bütyök és csap $d = 2$)

t = üzemidő; $t \leq T_i$; $T_i = 15\ 000$ üzemóra

I. táblázat
A vezérműtengely gépüzemviteli költségei

Költség megnevezése	Vezérműtengelybütők [r = 1]						Vezérműtengelycsap [r = 2]					
	h = 2		h = 4		h = 6		h = 2		h = 4		h = 6	
	Költs. jele	Költs. Ft	Költs. jele	Költs. Ft	Költs. jele	Költs. Ft	Költs. jele	Költs. Ft	Költs. jele	Költs. Ft	Költs. jele	Költs. Ft
Felújítási költség	$K_f^{(2,1,1)}$	196,2	$K_f^{(4,1,1)}$	372,3	$K_f^{(6,1,1)}$	568,5	$K_f^{(2,2,1)}$	119,3	$K_f^{(4,2,1)}$	189,0	$K_f^{(6,2,1)}$	258,6
Szerelési és beállítási költség	$K_{sz}^{(2,1,1)}$	480,0	$K_{sz}^{(4,1,1)}$	720,0	$K_{sz}^{(6,1,1)}$	800,0	$K_{sz}^{(2,2,1)}$	480,0	$K_{sz}^{(4,2,1)}$	720,0	$K_{sz}^{(6,2,1)}$	800,0
A tervszerű hibamegelőző jav. költsége (felújított vezérműtengellyel)	$K_g^{(2,1,1)}$	676,2	$K_g^{(4,1,1)}$	1092,3	$K_g^{(6,1,1)}$	1368,5	$K_g^{(2,2,1)}$	599,3	$K_g^{(4,2,1)}$	909,0	$K_g^{(6,2,1)}$	1058,6
A gyári vezérműtengely ára	$K_p^{(2)}$	453,0	$K_p^{(4)}$	516,0	$K_p^{(6)}$	903,0	$K_p^{(2)}$	453,0	$K_p^{(4)}$	516,0	$K_p^{(6)}$	903,0
A tervszerű hibamegelőző jav. költsége (gyári vezérműtengellyel)	$K_g^{(2,1,2)}$	933,0	$K_g^{(4,1,2)}$	1236,3	$K_g^{(6,1,2)}$	1703,0	$K_g^{(2,2,2)}$	933,0	$K_g^{(4,2,2)}$	1236,3	$K_g^{(6,2,2)}$	1703,0
Gépállási költség	$K_a^{(2,1)}$	2540,0	$K_a^{(4,1)}$	3650,0	$K_a^{(6,1)}$	7220,0	$K_a^{(2,2)}$	2160,0	$K_a^{(4,2)}$	3220,0	$K_a^{(6,2)}$	5900,0
A hibaelhárító javítás költsége (felújított vezérműtengellyel)	$K_u^{(2,1,1)}$	1253,0	$K_u^{(4,1,1)}$	1924,0	$K_u^{(6,1,1)}$	2369,0	$K_u^{(2,2,1)}$	978,0	$K_u^{(4,2,1)}$	1341,0	$K_u^{(6,2,1)}$	1660,0
A hibaelhárító javítás költsége (gyári vezérműtengellyel)	$K_u^{(2,1,2)}$	1510,0	$K_u^{(4,1,2)}$	2068,0	$K_u^{(6,1,2)}$	2704,0	$K_u^{(2,2,2)}$	1310,0	$K_u^{(4,2,2)}$	1668,0	$K_u^{(6,2,2)}$	2304,0

K_g	=	a tervszerű hibamegelőző javítás költsége
K_a	=	a meghibásodásból adódó gépállás költsége
K_n	=	a hibaelhárító javítás költsége
$Q(t)$	=	meghibásodási eloszlásfüggvény
$q(t)$	=	meghibásodási sűrűségfüggvény

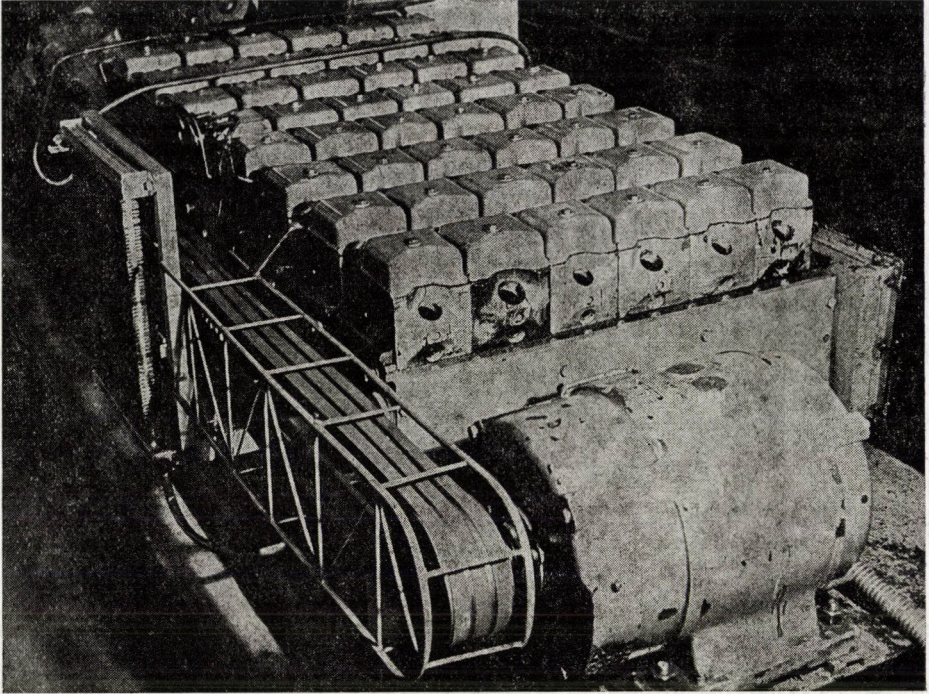
A 11. képletből következik, hogy a vezérműtengely üzemviteli teljesítményét a tervszerű hibamegelőző javítás, a meghibásodásból adódó gépállás, a hibaelhárító javítás költségével, valamint az egyes döntési változók (javítástechnológiák) műszaki megbízhatósági paramétereivel jellemezzük.

A tervszerű hibamegelőző javítás költsége (I. táblázat) a vezérműtengely gyártási, illetve fémszórással történő felújítási, ki- és szerelési, valamint a motor szerelés utáni beállítási költségéből tevődik össze. A fémszórás költsége egyedi, kísérleti jellegű felújítási eljárásra vonatkozik, a szerelés és beállítás költségét pedig állami gazdasági javítóműhely-normatívák alapján határozzuk meg. A Csepel Autógyár által készített vezérműtengely esetében az AUTOKER által megadott árral számolunk.

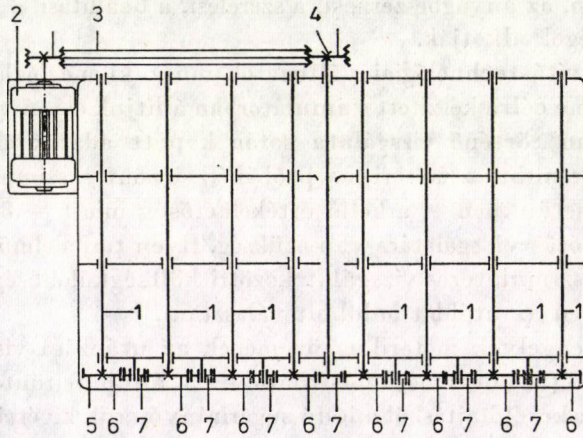
A vezérműtengely meghibásodásából adódó gépállás költségét a hibakeresésre való várakozás, a hibakeresés, a javítóműhelybe szállítás, a javításra történő várakozás, valamint a javítási időtartamok alatt fellépő termelés-csökkenés becslésével állapítjuk meg. E munka bázisadatait állami gazdasági mérések szolgáltatják. A hibaelhárító javítás költségét a hibakeresési, a javítóműhelybe szállítási, az anyagbeszerzési, a szerelési, a beállítási, a gyártási, illetve felújítási költségek alkotják.

Az egyes javítástechnológiai változatok műszaki megbízhatósági paramétereit egy külön e célra készített szimulátorban állítjuk elő. A vezérműtengelyek szimulátorban történő vizsgálata során kapott adatok általában nem olyan valósághűek, mint a motorikus próbáké, viszont a szimulátor kevésbé költségigényes. Esetünkben — a kellő értékelhetőség miatt — 8 db vezérműtengely több ezer órás vizsgálatára van szükség. Ilyen terjedelmű kísérleteknél a motorikus és a szimulátoros vizsgálat közötti költségkülönbség olyan nagy, hogy mindenképpen az utóbbit indokolt választani.

A vezérműtengelyek motorikus üzemének az utánzása viszonylag egyszerű berendezéssel (5. ábra) megvalósítható. Az 5. ábrán feltüntetett szimulátor — a soros fogaskerékajtásból adódó sugárirányú erők kivételével — a motorikussal azonos igénybevételt biztosít a vezérműtengelyeknek (6. ábra). A kenési viszonyok (olajnyomás, hőmérséklet stb.) szintén megközelítően azonosak (7. ábra). Mindez azonban még nem jelenti azt, hogy a szimulátorban üzemeltetett vezérműtengelyek műszaki megbízhatósága is megegyezik a motorokban üzemelőkével. A szimulátor ugyanis nem rendelkezik a motor dinamikus üzemét (az indítását, a változó fordulatszámot stb.) utánzó programmal és programvezérléssel.

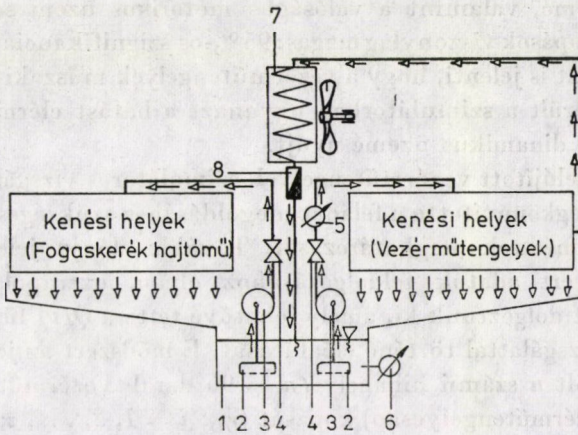


5. ábra. Vezérműtengely szimulátor



6. ábra. A vezérműtengely szimulátor hajtásvázlata (1. vezérműtengely, 2. villanymotor, 3. ékszíjhajtás, 4. elosztótengely, 5. hajtóműház, 6. vezérműtengely fogaskerék, 7. (közvetétfogaskerék)

A dinamikus üzemet utánzó program helyettesítésére a következő kísérletet végezzük el. Feltételezzük, hogy létezik egy olyan fordulatszám, amelynél a szimulátorban a vezérműtengelyek műszaki megbízhatósági paraméterei, így



7. ábra. A vezérműtengely szimulátor kenésvázlata (1. olajtartály, 2. olajszűrő, 3. olajszivattyú, 4. nyomásszabályozó szelep, 5. olajnyomásmérő, 6. olajhőfokmérő, 7. olajhűtő, 8. védőkapcsoló)

a vezérműtengelybüttyökön és csapokon keletkező kopás eloszlásfüggvénytípusa, várható értéke, valamint szórása magas szignifikancia szinten megegyezik a motorikus üzemével. E vezérműtengely-fordulatszámot az alábbi módon határozzuk meg:

1. A vezérműtengelyeket (8 darab) 300 órán keresztül $n_{Sz} = 720$ (f/p) fordulatszámon üzemeltetjük a szimulátorban. Ezt követően megmérjük a vezérműtengelybüttyök és csapok kopását, kiszámítjuk azok számtani közepét (\bar{x}_b ; \bar{x}_{cs}) és korrigált tapasztalati szórásnégyzetét (σ_b^{*2} , σ_{cs}^{*2})

2. Kettő darab vezérműtengelyt 300 órán keresztül valóságos terhelési viszonyok mellett motorban üzemeltetünk. Ezek után megmérjük a vezérműtengelybüttyök és csapok kopását, kiszámítjuk azok számtani közepét (\bar{x}_{bm} ; \bar{x}_{csm}) és a korrigált tapasztalati szórásnégyzetét (σ_{bm}^{*2} ; σ_{scm}^{*2}).

3. Megvizsgáljuk, hogy a szimulátorban üzemeltetett vezérműtengelybüttyök és csapok kopásának a várható értéke [$M(\xi_b)$; $M(\xi_{cs})$] és szórása [$D(\xi_b)$; $D(\xi_{cs})$] azonos-e a motorban üzemeltetett büttyök és csapok kopásának várható értékével [$M(\eta_b)$; $M(\eta_{cs})$] és szórásával [$D(\eta_b)$; $D(\eta_{cs})$], vagyis elvégezzük a következő hipotézisvizsgálatokat:

$H_0 : M(\xi_b) = M(\eta_b)$, $H_0 : M(\xi_{cs}) = M(\eta_{cs})$, $H_0 : D(\xi_b) = D(\eta_b)$, $H_0 : D(\xi_{cs}) = D(\eta_{cs})$.

4. A felsorolt hipotézisek teljesülése esetén a szimulátor fordulatszámát (n_{sz}) megfelelőnek minősítjük. Ellenkező esetben újabb fordulatszámot választunk, és a vizsgálatot megismételjük. A kísérletet addig folytatjuk, amíg a megfelelő fordulatszámot meg nem határozzuk.

Az 1–4 pontokban foglalt vizsgálatokat elvégezve eredményül azt kapunk, hogy a vezérműtengelyek $n_{sz} = 720$ (f/p) állandó fordulatszámon történő

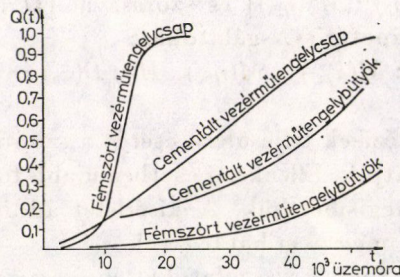
szimulátoros üzeme, valamint a valóságos motorikus üzem során keletkező csap- és büttyökkopások viszonylag magas: 95%-os szignifikancia szinten azonosak. Ez egyben azt is jelenti, hogy a vezérműtengelyek műszaki megbízhatóságát tekintve sikerült a szimulátorban ugyanazt a hatást elérni, mint amit a motor valóságos, dinamikus üzeme nyújt.

A gyári és felújított vezérműtengelyek szimulátoros vizsgálata igen jelentős mértékben megkönnyítette a feladat megoldásához szükséges műszaki megbízhatósági paraméterek meghatározását. További előnyt jelentett, hogy a szimulátorral nyert adatok feldolgozásához olyan, extrapoláción alapuló, értékelési eljárást dolgoztunk ki, amely lehetővé tette a $Q(t)$ függvény rövidített élettartamvizsgálattal történő előállítását. E módszert az jellemzi, hogy a vizsgálatra kijelölt n számú hibahely ($n = 96$ darab vezérműtengelybüttyök, $n = 32$ darab verérműtengelycsap) kopását (η_{ij} ; $i = 1, 2, \dots, z$; $j = 1, 2, \dots, n$) az előre megállapított t_1, t_2, \dots, t_z időpontokban megméri, és regresszióanalízissel értékeli. A t_z időpont rendszerint jóval kisebb, mint a hibahelyek meghibásodási határához (A_H) tartozó időpontok várható értéke $[M(\tau)]$. Az η_{ij} kopásmérések alapján előállított $A(t)$ regressziós görbe típusának megfelelően az

$$\begin{aligned} \eta_{11}, \eta_{21}, \dots, \eta_{z1} \\ \eta_{12}, \eta_{22}, \dots, \eta_{z2} \\ \eta_{1n}, \eta_{2n}, \dots, \eta_{zn} \end{aligned}$$

mérési sorokra külön-külön $A_1(t), A_2(t), \dots, A_n(t)$ függvények határozhatók meg. Az $A_1(t), A_2(t), \dots, A_n(t)$ függvényekbe A_H -t helyettesítve és τ -ra megoldva $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ időpontosor adódik. A $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ időpontosornak megfelelő $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ mintából statisztikai próbákkal, valamint a műszaki háttérből adódó elméleti megfontolásokkal általában közvetlenül előállítható a keresett $Q(t)$ meghibásodási eloszlásfüggvény.

A szimulátoros vizsgálati eredmények és azok extrapoláción alapuló értékelése alapján a vezérműtengelybüttyökre és csapokra a következő $Q(t)$ meghibásodási eloszlásfüggvények adódtak (8. ábra).



8. ábra. A vezérműtengelybüttyök és -csap meghibásodási eloszlásfüggvénye $[Q(t)]$

Fémszórással felújított vezérműtengelybütők:

$$Q_{[d=1]}^{[r=1]}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{t-107200}{56200}} e^{-\frac{u^2}{2}} du. \quad (12)$$

Gyári (cementált) vezérműtengelybütők:

$$Q_{[d=2]}^{[r=1]}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{t-36480}{30820}} e^{-\frac{u^2}{2}} du. \quad (13)$$

Fémszórással felújított vezérműtengelycsap:

$$Q_{[d=1]}^{[r=2]}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{t-12880}{2940}} e^{-\frac{u^2}{2}} du. \quad (14)$$

Gyári (cementált) vezérműtengelycsap:

$$Q_{[d=2]}^{[r=2]} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{t-27200}{15750}} e^{-\frac{u^2}{2}} du. \quad (15)$$

A fentiekben megadott műszaki megbízhatósági paraméterek, valamint az I. táblázatban feltüntetett adatok lehetővé teszik a 11, 4, 5, 6. egyenletek megoldását, vagyis az optimális javítási ciklusidők és technológiák meghatározását. E számítások eredményeiből (II. táblázat) következik, hogy a vezérműtengelybütők és csapok egyenkénti javítása esetén minden motornagyságnál (a ket-tő-, négy- és hathengeres motoroknál) mindkét hibahelyre (bütőkre és csapra) a fémszórás nyújtja a maximális gépüzemviteli teljesítményt. Ez egyben azt is jelenti, hogy kívánatos lenne a gyártás során a cementálásról a fémszórásra, vagy azzal közel azonos eredményt nyújtó más eljárásra áttérni. A fémszórás vezérműtengelycsapok optimális hibamegelőző javítási ciklusideje motornagyságtól függően 7500, 6250, 6000 üzemóra, a vezérműtengelybütőké pedig mintegy 60 000, 40 000, 20 000 üzemóra. A vezérműtengelybütők t_{opt} -ja jóval nagyobb a $T_t = 15 000$ üzemórás üzemviteli időtartamnál, ezért hibamegelőző javítása nem, csak hibaelhárító javítása indokolt. A vezérműtengelycsapok és bütők egyenkénti hibamegelőző javítására vonatkozó számítási eredményeinkből közvetlenül adódik a hibahelyek együttes javítására vonatkozó optimális eljárás. Tekintettel arra, hogy

$$t_{opt}^{r=1} \gg T, \quad (16)$$

II. táblázat

A vezérműtengelybüttyök és -csap optimális javítási ciklusideje és technológiája

Motor henger-szám (h)	A hiba-hely jele (r)	A javítástechnológia jele (d)	A d jelű javítástechnológiával elérhető minimális gépüzemviteli ráfordítás [Ft/üóra] ($W^{(d)}$) R_{min} [$T_t = 15\ 000$ üzemóra, és $t_{W_{Rmin}} \leq T_t$]	A k jelű optimális javítástechnológiával elérhető minimális gépüzemviteli ráfordítás [Ft/üóra] ($W^{(k)}$)	Az optimális javítástechnológia (k)	Az optimális tervszerű hibamegelőző javítás időpontja (t_{opt})																																								
2	1	1	0,11	$W_{Ropt}^{(1)} = 0,11$	fémszórás	$t_{opt} \approx 6 \cdot 10^5$ üő. $T_t < t_{opt}$																																								
		2	0,49				4	1	1	0,27	$W_{Ropt}^{(1)} = 0,27$	fémszórás	$t_{opt} \approx 4 \cdot 10^5$ üő $T_t < t_{opt}$	2	1,87	6	1	1	0,63	$W_{Ropt}^{(1)} = 0,63$	fémszórás	$t_{opt} \approx 2 \cdot 10^5$ üő $T_t < t_{opt}$	2	6,97	2	2	1	0,094	$W_{Ropt}^{(1)} = 0,094$	fémszórás	$t_{opt} = 7500$ üő	2	0,20	4	2	1	0,176	$W_{Ropt}^{(1)} = 0,176$	fémszórás	$t_{opt} = 6250$ üő	2	0,37	6	2	1	0,223
4	1	1	0,27	$W_{Ropt}^{(1)} = 0,27$	fémszórás	$t_{opt} \approx 4 \cdot 10^5$ üő $T_t < t_{opt}$																																								
		2	1,87				6	1	1	0,63	$W_{Ropt}^{(1)} = 0,63$	fémszórás	$t_{opt} \approx 2 \cdot 10^5$ üő $T_t < t_{opt}$	2	6,97	2	2	1	0,094	$W_{Ropt}^{(1)} = 0,094$	fémszórás	$t_{opt} = 7500$ üő	2	0,20	4	2	1	0,176	$W_{Ropt}^{(1)} = 0,176$	fémszórás	$t_{opt} = 6250$ üő	2	0,37	6	2	1	0,223	$W_{Ropt}^{(1)} = 0,223$	fémszórás	$t_{opt} = 6000$ üő	2	0,75				
6	1	1	0,63	$W_{Ropt}^{(1)} = 0,63$	fémszórás	$t_{opt} \approx 2 \cdot 10^5$ üő $T_t < t_{opt}$																																								
		2	6,97				2	2	1	0,094	$W_{Ropt}^{(1)} = 0,094$	fémszórás	$t_{opt} = 7500$ üő	2	0,20	4	2	1	0,176	$W_{Ropt}^{(1)} = 0,176$	fémszórás	$t_{opt} = 6250$ üő	2	0,37	6	2	1	0,223	$W_{Ropt}^{(1)} = 0,223$	fémszórás	$t_{opt} = 6000$ üő	2	0,75													
2	2	1	0,094	$W_{Ropt}^{(1)} = 0,094$	fémszórás	$t_{opt} = 7500$ üő																																								
		2	0,20				4	2	1	0,176	$W_{Ropt}^{(1)} = 0,176$	fémszórás	$t_{opt} = 6250$ üő	2	0,37	6	2	1	0,223	$W_{Ropt}^{(1)} = 0,223$	fémszórás	$t_{opt} = 6000$ üő	2	0,75																						
4	2	1	0,176	$W_{Ropt}^{(1)} = 0,176$	fémszórás	$t_{opt} = 6250$ üő																																								
		2	0,37				6	2	1	0,223	$W_{Ropt}^{(1)} = 0,223$	fémszórás	$t_{opt} = 6000$ üő	2	0,75																															
6	2	1	0,223	$W_{Ropt}^{(1)} = 0,223$	fémszórás	$t_{opt} = 6000$ üő																																								
		2	0,75																																											

a 7, 8, egyenletek megoldásától eltekinthetünk, és a hibahelyek együttes javításának tervét a következőkben foglalhatjuk össze: a gépüzemvitel során meghibásodó vezérműtengelycsapokat és büttyöket hibaelhárító javítás keretében fémszórással felújítják; a vezérműtengelyeket $t_{opt}^{r=2}$ időpontban a motorból kiserelik, és a csapokat fémszórással javítják.

Következtetések

Jelen tanulmány alapján, a hibamegelőző javítás ciklusidejének és technológiájának meghatározására vonatkozóan, az alábbi következtetéseket tehetjük:

1. Az 1. fejezetben vázolt tervezési módszerrel jelentősen növelhető a mezőgazdasági gépüzemvitel teljesítménye.

2. A bevezetett sztochasztikus modellekkel általában jól leírható a kutatási feladat.

3. A hibahelyek, gépek hibamegelőző javításának tervezése során általában nem a legnagyobb műszaki megbízhatóságra, hanem a maximális gépüzemviteli teljesítmény elérésére célszerű törekedni.

4. A hibamegelőző gépjavítást, a feladatmegoldás első megközelítéseként, a gép megalkotásával egyidőben indokolt megtervezni.

5. Az 1. fejezetben körvonalazott tervezési módszer jelentős segítséget nyújthat a gépjavítás ágazati szintű megtervezéséhez. Ugyanis a hibamegelőző és a hibaelhárító javítások számának, valamint a géppark üzemidejének adott tervidőszakra történő becslésével meg lehet tervezni a gépjavítómunka terjedelmét, továbbá prognózist lehet készíteni a pótalkatrész-igény várható nagyságára.

6. A fémszórás mind gyártás, mind felújítástechnológiaként alkalmazva kiváló tulajdonságokkal rendelkezik. Különösen szembetűnő ez a vezérműtengelybütök esetében. A fémszórt bütök átlagos élettartama ugyanis mintegy háromszorosa a cementálténak. A meghibásodási eloszlásfüggvény szórása pedig fémszórásnál közel fele az élettartam várható értékének, míg a cementálásnál a szórás megközelítően azonos az élettartam várható értékével.

A lényegesen jobb megbízhatósági paraméterek igen kedvezően befolyásolják a gépüzemvitel hatékonyságát. Például négyhengeres motor vezérműtengelybütök esetén a fémszórással elérhető minimális gépüzemviteli ráfordítás 0,27 Ft/üzemóra, a cementálásnál ugyanez 1,87 Ft/üzemóra; így a 15 000 órás üzemvitel alatt motoronként 24 000 Ft megtakarítás érhető el.