

SZERKEZETI ELEMEK TÖNKREMENTETELI ANALÍZISE

Sipkás Vivien

PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Gép- Terméktervezési Intézet
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: machsv@uni-miskolc.hu

Vadászné Bognár Gabriella

egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: v.bognar.gabriella@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A cikk célja, hogy bemutassuk a faktoriális kísérlettervezés alkalmazását a vizsgált szerkezeti elemek élettartamának meghatározására irányuló kísérleteknél. Feltárjuk, hogy hogyan tudjuk a kísérlettervezés metodikáját felhasználva megvizsgálni a mikrokapcsolók élettartamát. Ez a módszer lehetővé teszi, hogy egy időben vegyük figyelembe egyszerre több faktor hatását is. A teljes faktoriális kísérletterv szabályait követve meghatározzuk a faktorok összes lehetséges szintjének kombinációját, megvizsgáljuk, hogy melyik faktor milyen mértékben módosítja az optimalizációs paraméter értékét, amely információk alapján a kísérletsorozat megtervezhető.

Kulcsszavak: kísérlettervezés, válaszfüggvény, mikrokapcsoló, teljes faktoriális kísérletterv

Abstract

The aim of this paper is to introduce the application of factorial experimental design for the lifetime of the structural components tested. The application of the experimental design method into the lifetime of the micro switch's tests is shown. This method allows multiple factors to be examined simultaneously. Following the rules of the full factorial design, we determine all possible level combinations of factors, we investigate what extent the value of the optimization parameter has been modified by these factors and design the experiment tests accordingly.

Keywords: design of experiments, response function, micro switches, complete factorial experiment design

1. Bevezetés

A mikrokapcsolókat az iparban széles körben alkalmazzák, elsősorban elektromos berendezésekben automatikus vezérlés céljából. A mindennapi életben gyakran használunk olyan termékeket, melyek működéséhez elengedhetetlen a mikrokapcsolók beépítése. Például az elektromos kéziszerszámokban, kertigépekben, különféle háztartási gépekben és járművekben egyaránt találkozhatunk különböző típusú és méretű kapcsolókkal.

A felhasználók megkövetelik a legmagasabb műszaki tartalommal bíró, legmegbízhatóbb, kifogástalan termékeket. Ezért a nagyobb meghízhatóság követelményei megkívánják a rendszerek, alkatrészek és anyagok tesztelését megbízhatóság szempontjából. Ennek megfelelően a mikrokapcsolók vizsgálatát is ilyen szempontok alapján kell elvégezni.

A kutatásunk célja egy olyan élettartam-elemző módszert bemutatni, amely az egységek tesztelése során figyelembe veszi az elektromos kerti szerszámokban alkalmazott mikrokapcsolók speciális működési feltételeit, tönkremeneteli folyamatait és vizsgálati igényeit.

Korábbi munkáink során már elemeztük és összegyűjtöttük azokat a lehetséges meghibásodásokat, amelyek használat közben előfordulhatnak a vizsgált mikrokapcsolóknál [11, 12]. Ezen meghibásodások között a leggyakoribb tönkremeneteli forma a mikrokapcsolók érintkező felületeinek kopása, ill. beégése. A felületek károsodását több tényező is befolyásolhatja, ilyen például a hőmérséklet, a páratartalom és a kapcsolási idő. Ezek alapján megterveztük a mikrokapcsolókat vizsgáló tesztberendezést [12-14], melyen egyszerre négy termék tesztelhető, továbbá lehetőség van a kapcsolási idő és a páratartalom szintjének beállítására.

A vizsgálatok során feltárjuk azokat a működési viszonyokat, amelyek a berendezés szokásos működési terheléséhez képest nagyobb terhelést jelentenek, és összehasonlíthatjuk a más-más szinteken működtetett termékek élettartam adatait. A berendezés kialakítását, működését és a tesztek folyamatát korábban már ismertettük [13, 14]. A dolgozatunk célja, hogy a mérések eredményeiből a faktoriális kísérlettervezés szabályainak alkalmazásával a mikrokapcsolók élettartamára következtetéseket vonjunk le.

2. Kétszintű kísérleti terv

A statisztikai kísérlettervezés számos módszerét alapvetően három nagy csoportba sorolhatjuk: a faktoriális tervek, a válaszfelülettervek, valamint a négyzetes tervek.

A faktoriális tervek lehetővé teszik több faktor egyidejű vizsgálatát. A kísérletek számának csökkentése érdekében a vizsgált beállítások számát faktoronként általában kettőre maximalizálják. Ez az érték elegendő a faktorok jelentőségének kimutatásához és esetenként az optimális beállítási tartomány meghatározásához is. A faktoriális tervek kezelése egyszerű és logikus, éppen ezért az ipari gyakorlatban kiválóan és könnyedén tudják használni. Az utóbbi években az ipar előszeretettel alkalmazza az egyszerűsített módszereket, mint például Shainin-féle [1, 2, 7-10, 18] és a Taguchi-féle [2, 6-10, 17] faktoriális módszereket.

A válaszfelület-módszerek a jelleggörbe-mezők modellezésére és az összefüggések részletes vizsgálatára használatosak. A módszerek előnye, hogy az előre meghatározott kísérleti utasítások lehetővé teszik a jelleggörbe-mezők matematikai modelljének felépítését. Ilyen ismert módszer például a Box-Wilson módszer is, amelyet a kísérleteink megtervezéséhez alkalmazni fogunk.

A négyzetes terveket kettőnél több beállítási lehetőséggel rendelkező faktor egyidejű elemzésére használhatjuk. A faktorok számát azonban korlátoznunk kell a könnyebb kezelhetőség érdekében. A négyzetes tervek csoportjába tartozik az úgynevezett Latin négyzet és a Youden négyzet módszer is [7].

Az általunk alkalmazott eljárásban a Box-Wilson módszer szabályai szerint egy kísérletsorozatban minden faktor egyszer az egyik, és egyszer a másik szintre lesz beállítva. Tehát minden faktornak csak két szintje lesz. A k számú faktor összes lehetséges szintkombinációját megvalósító N kísérleti beállítások száma az

$$N = 2 \cdot k. \quad (1)$$

összefüggéssel határozható meg.

A kísérletiterv összeállításánál a faktorok egyik szintjének jele $+I$, másik szintjének jele pedig $-I$ lesz. Ebben az esetben nem számít, hogy az alsó, vagy a felső szintet jelöljük-e $+I$ -gyel illetve $-I$ -gyel. Ezek a megadott szintek a kísérletek elvégzése során konkrét fizikai mennyiségeket jelölnek majd, annak függvényében, hogy az adott faktor milyen mennyiséget képvisel (lásd 1. táblázat) [3].

A kísérletet úgy kell megtervezni, hogy minden faktor ugyanannyiszor szerepeljen $+1$ szinten, mint -1 szinten, és a faktorkombinációk is egyforma mennyiségben jelenjenek meg $+1$ szinten, mint -1 szinten. Ezt kísérleti mátrix segítségével mutatjuk be [3].

1. táblázat. Kísérleti mátrix 2 faktor esetén

Kísérleti beállítás sor-száma (i)	x_1	x_2	x_1x_2	Kísérleti eredmények (y)
1	-1	-1	+1	y_1
2	+1	-1	-1	y_2
3	-1	+1	-1	y_3
4	+1	+1	+1	y_4

Az 1. táblázatban összefoglaltuk a kísérleti beállítások lehetséges eseteit. A faktorok beállítási szintjei a mátrix soraiban foglalnak helyet, míg a táblázat oszlopai a faktorok hatásának jellemzéséhez szükségesek. A táblázat oszlopainak kitöltéséhez az előjelváltogatás-módszert használtuk fel. Az első faktornál egyenként váltogattuk az előjeleket, a második faktornál kettessel. A kereszthatás oszlopban (x_1x_2) a kereszthatásban résztvevő faktorok oszlopainak összeszorzásával határozzuk meg az előjeleket [3].

3. Teljes faktoriális kísérleti terv

A teljes faktoriális kísérleti terv olyan módszer, amelyben meghatározzuk a faktorok összes lehetséges szintkombinációját. Az ilyen kísérletet kétszintű, $2k$ típusú kísérletnek nevezzük. A kísérletek megtervezése során öt alapvető követelményre kell figyelni.

A faktorokkal szemben támasztott követelmények [3-5]:

- irányíthatók legyenek,
- egyértelműek legyenek,
- hatékonyak legyenek, azaz szignifikáns hatásuk legyen a kísérlet eredményére,
- ismert és korlátozott értékészletük legyen,
- a faktor szintek beállíthatók legyenek.

3.1. Faktorok és faktorszintek meghatározása

Meg kell határoznunk a faktorokat és a faktorszinteket. A faktorok a folyamatot jelentősen befolyásoló körülmények, azaz paraméterek. A faktorszintek pedig a faktorok által felvehető értékek. Ezeket a faktorokat és faktorszinteket a 2. táblázatban foglaltuk össze.

Ha egy kísérletben minden faktor ugyanannyi szintet vehet fel, akkor a kísérletben az összes lehetséges faktorszintek száma:

$$n = p \cdot k, \quad (2)$$

ahol n a kísérletek száma, p egy-egy faktor szintjeinek a száma, k pedig a faktorok számát jelöli. A mikrokapcsolók esetén a kísérletek száma 4 a (2) összefüggés alapján [3].

2. táblázat. Faktorok számának és szintjeinek meghatározása

Faktorok száma (k)	Faktor szintek jelölése (p)
Kapcsoló típusok	$D1, D2, K1, K2$
1 faktor: Kapcsolási idő	2 szint: $0,25s$ és $0,30s$
2 faktor: Relatív páratartalom	2 szint: 60% és 80%

A 2. táblázatban foglaltuk össze a kísérleteinket befolyásoló tényezőket. Eszerint 2 faktorunk van különböző faktor szinteken a 4 kapcsoló típusra ($D1, D2, K1, K2$ jelöléssel), 2 kapcsolási idő (ST) és 2 páratartalom (RH) szint, ez 16 tesztet jelent egy mintára. Minden tesztet 10-szer ismételnünk minden egyes típusnál, így összesen 160 tönkrement mikrokapcsoló minta lesz, melyek alapján élettartam adatokat lehet meghatározni. Megjegyezzük, hogy általában a kísérletekben célszerűen legfeljebb 15 faktor lehet, és azok maximum 30 szintet vehetnek fel. A dolgozatban 4 tönkrement minta eredményeit mutatjuk be.

3.2. Faktoriális kísérlettervezés interpolációs képletei

Meg kívánjuk vizsgálni, hogy melyik faktor milyen mértékben módosítja az optimalizációs paraméter értékét, és majd ezek alapján lehet megtervezni a teljes kísérletet. A Box-Wilson módszer, más néven gradiens-módszer lényege, hogy egymás után végrehajtott egyszerű kísérletsorozatokkal megállapítható, hogy a faktor-szintek milyen irányú módosításával határozható meg az optimális beállítás.

A faktoriális kísérlettervezés módszere felhasználható olyan kísérletek tervezéséhez, melyek célja az interpolációs képletek szerkesztése vagy optimális feltételek, szélsőértékek keresése [5]. A faktorok jelölése általánosan az alábbi:

$$x_1, x_2, x_3 \dots x_N. \quad (3)$$

A függő változók természetes értékét pedig y jelöli a (4) jelű összefüggésnek megfelelően. A modell az y optimalizációs paraméter és az x_1 és x_2 faktorok közötti függvénykapcsolat, amelynek általános alakja a φ válaszfüggvény:

$$y = \varphi(x_1, x_2). \quad (4)$$

Mivel az n -dimenziós térben egy-egy faktor irányában csak két adatunk van, így erre a két pontra csak egyenes fektethető.

3.2.1. Lineáris modell

A mérési adatok alapján a lineáris modell általános alakja N faktor esetén az (5) jelű egyenlettel írható le:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_N \cdot x_N. \quad (5)$$

Az egyes faktorok hatásának változásánál elegendő a változás irányát és nagyságát megadnunk ahhoz, hogy a következő lépést megtervezzük. Az (5)-ös összefüggésbe feltüntettük a b_i együtthatókat, melyeket a későbbiekben a mérési adatokból kívánunk meghatározni (lásd 4. fejezet).

$$2^N = \sum_{l=1}^N \binom{N}{l}. \quad (6)$$

A (6) összefüggésben N a faktorok összes lehetséges szintkombinációját realizáló kísérleti beállítások számát jelöli, l pedig a vizsgált hatások sorszáma.

Esetünkben az interakcióban szereplő kísérletek száma négy és két hatást kívánunk vizsgálni; ennek értelmében a (6) összefüggés az alábbi szerint írható:

$$2^N = \sum_{l=1}^N \binom{4}{2} = 2^4 = 16. \quad (7)$$

3.2.2. Polinom approximáció

Sokszor nem megfelelő a kísérleti felületet lineáris modellel közelíteni, hiszen elfordulhat, hogy két faktor között kölcsönhatás van, azaz a két faktor egyidejű hatása nem ugyanolyan változást hoz létre az y optimalizációs paraméteren, mintha a két faktor hatását külön-külön vizsgáljuk. Ekkor a lineáris kísérleti felület nem megfelelő. A nemlineáris kísérleti modell két faktor esetén az alábbiak szerint írható fel:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (8)$$

4. A b együtthatók meghatározása

Az (5) és (8) egyenletekben szereplő b együtthatók kiszámítása a mérési adatok alapján történik. Ezek meghatározzák a kísérleti felületet, vagyis az összes faktor együttes hatását. A b együtthatókat az alábbi képlet felhasználásával számíthatjuk ki $N = 4$ esetén:

$$b_j = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 x_{ji} \cdot y_i, \quad (j = 0, 1, 2) \quad \text{és} \quad b_{12} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 x_{1i} x_{2i} \cdot y_i, \quad (9)$$

ahol x_{ji} értékek pedig a transzformált faktorok értékeit jelölik.

A 3. táblázatban a módszer bemutatására egy DI jelölésű mikrokapcsoló tesztelése során kapott eredményeket mutatjuk be. Az y_i érték azt a kapcsolási számot jelöli, amelynél a kapcsoló tönkrement. A kiszámított b_0 , b_1 , b_2 , és b_{12} együtthatók értékeit a 3. táblázatban összesítettük. A kísérletünkben az ST a kapcsolási időnek megfelelő transzformált faktor az x_1 és az RH relatív páratartalomnak megfelelő az x_2 .

3. táblázat. 22 típusú kétfaktoros teljes kísérleti mátrix a DI mikrokapcsolóra

Kísérleti beállítás sorszáma i	Faktor (ST) $[s]$	Faktor (RH) $[\%]$	Transzformált faktorok				Kísérleti eredmények (y)
			x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	
1	0,25	60	+1	-1	-1	+1	$y_1=139034$
2	0,30	60	+1	+1	-1	-1	$y_2=168082$
3	0,25	80	+1	-1	+1	-1	$y_3=117241$
4	0,30	80	+1	+1	+1	+1	$y_4=141253$
			$b_0=141402,5$	$b_1=-12155,5$	$b_2=-13265$	$b_{12}=1259$	

A válaszfüggvény a faktorok egymásra hatását figyelmen kívül hagyó (5) lineáris modellel a 3. táblázat adatai alapján az alábbiak szerint írható fel:

$$y = 141402,5 - 12155,5 \cdot x_1 - 13265 \cdot x_2 . \quad (10)$$

A kölcsönhatás figyelembevételével a (8) formula szerint a válaszfüggvény a nemlineáris modellel a következő:

$$\hat{y} = 141402,5 - 12155,5 \cdot x_1 - 13265 \cdot x_2 + 1259 \cdot x_1 \cdot x_2 . \quad (11)$$

Hasonló eljárással a további három kapcsolóra is előállíthatóak a lineáris és a nemlineáris válaszfüggvények, melyeket a 4-6. táblázatokban mutatunk be.

4. táblázat. 22 típusú kétfaktoros teljes kísérleti mátrix a D2 mikrokapcsolóra

Kísérleti beállítás sorszáma i	Faktor (ST) [s]	Faktor (RH) [%]	Transzformált faktorok				Kísérleti eredmények (y)
			x_0	x_1	x_2	x_1x_2	
1	0,25	60	+1	-1	-1	+1	$y_1=205622$
2	0,30	60	+1	+1	-1	-1	$y_2=196031$
3	0,25	80	+1	-1	+1	-1	$y_3=146875$
4	0,30	80	+1	+1	+1	+1	$y_4=156876$
			$b_0=176351$	$b_1=102,5$	$b_2=24475,25$	$b_{12}=4898$	

A D2 típusú mikrokapcsolóra:

lineáris válaszfüggvény $y = 176351 - 102,5 \cdot x_1 - 24475,2 \cdot x_2 \quad (12)$

nemlineáris válaszfüggvény $\hat{y} = 176351 - 102,5 \cdot x_1 - 24475,2 \cdot x_2 + 4898 \cdot x_1 \cdot x_2 . \quad (13)$

5. táblázat. 22 típusú kétfaktoros teljes kísérleti mátrix a K1 mikrokapcsolóra

Kísérleti beállítás sorszáma i	Faktor (ST) [s]	Faktor (RH) [%]	Transzformált faktorok				Kísérleti eredmények (y)
			x_0	x_1	x_2	x_1x_2	
1	0,25	60	+1	-1	-1	+1	$y_1=99140$
2	0,30	60	+1	+1	-1	-1	$y_2=182428$
3	0,25	80	+1	-1	+1	-1	$y_3=125789$
4	0,30	80	+1	+1	+1	+1	$y_4=138965$
			$b_0=136580,5$	$b_1=24116$	$b_2=-4203,5$	$b_{12}=-17528$	

A K1 típusú mikrokapcsolóra:

$$\text{lineáris válaszfüggvény} \quad y = 136580,5 + 24116 \cdot x_1 - 4203,5 \cdot x_2 \quad (14)$$

$$\text{nemlineáris válaszfüggvény} \quad \hat{y} = 136580,5 + 24116 \cdot x_1 - 4203,5 \cdot x_2 - 17528 \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (15)$$

6. táblázat. 22 típusú kétfaktoros teljes kísérleti mátrix a K2 mikrokapcsolóra

Kísérleti beállítás sorszáma i	Faktor (ST) [s]	Faktor (RH) [%]	Transzformált faktorkok				Kísérleti eredmények (y)
			x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	
1	0,25	60	+1	-1	-1	+1	$y_1=154036$
2	0,30	60	+1	+1	-1	-1	$y_2=212592$
3	0,25	80	+1	-1	+1	-1	$y_3=119831$
4	0,30	80	+1	+1	+1	+1	$y_4=126723$
			$b_0=153295,5$	$b_1=16362$	$b_2=-30018,5$	$b_{12}=-12916$	

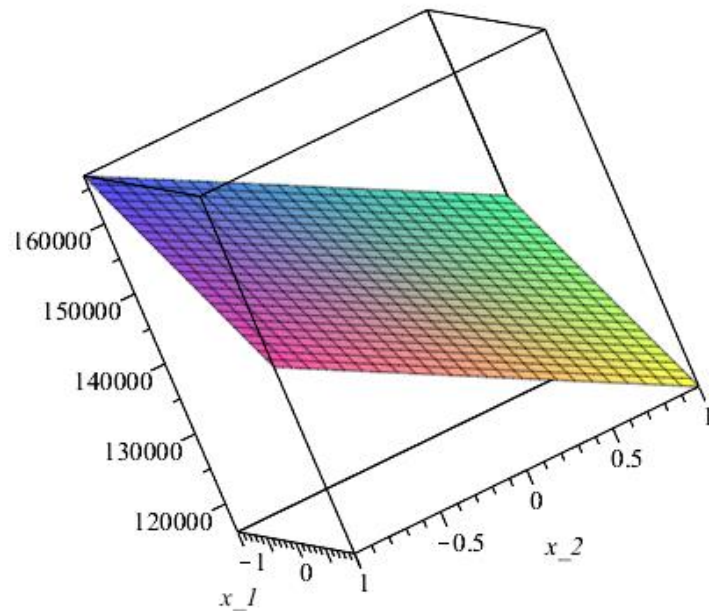
A K2 típusú mikrokapcsolóra:

$$\text{lineáris válaszfüggvény} \quad y = 153295,5 + 16362 \cdot x_1 - 30018,5 \cdot x_2 \quad (16)$$

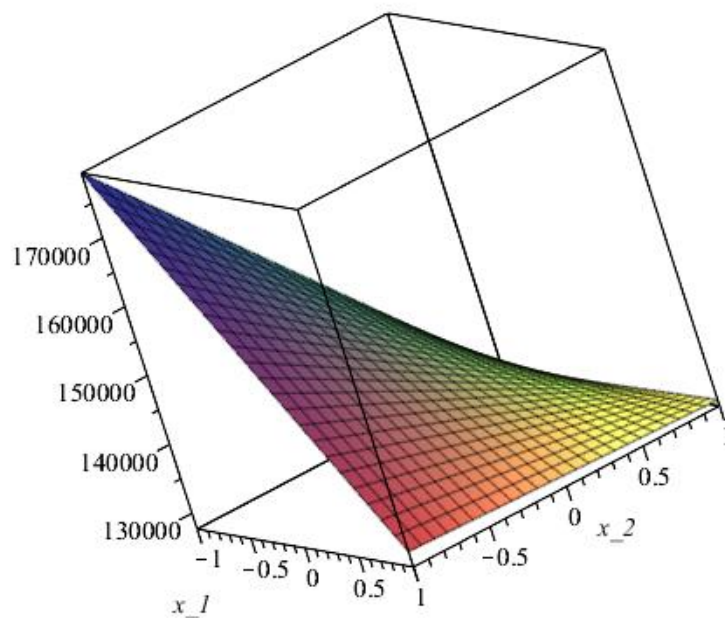
$$\text{nemlineáris válaszfüggvény} \quad \hat{y} = 153295,5 + 16362 \cdot x_1 - 30018,5 \cdot x_2 - 12916 \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (17)$$

5. A válaszfüggvény kísérleti modellje

Két faktor esetén a lineáris válaszfüggvény térben ábrázolható, melyet az 1. ábra szemléltet a D1 kapcsoló esetére. Itt az ST és RH faktorok transzformált faktorai a vízszintes síkon találhatóak, míg az y optimalizációs paraméter értékei meghatározzák a válaszfüggvény felületét, amelynek legmagasabb pontja a keresett optimális beállítást jelzi. Itt kapjuk a legnagyobb élettartam-értéket. A válaszfüggvénynek most csak egy kis négyszögű darabját látjuk. Az ábrán látható, hogy a maximális kapcsolási számot teljesítő mikrokapcsoló esetén 168 082 a tönkremeneteli ciklusszám, amelyet ST=0,30 s kapcsolási idő és 60% relatív páratartalom beállítása mellett rögzítettünk. A 139 034 tönkremeneteli ciklusszám ST=0,25 s kapcsolási idő és 60% relatív páratartalom beállításával adódott. A 141 253 ciklusszám 0,30 s kapcsolási idő és 80% páratartalom beállításával, míg a 117 241 érték 0,25 s kapcsolási idő és 80% páratartalom beállításával jött létre. A 2. ábra a (11) összefüggéssel megadott nemlineáris válaszfüggvény mutatja. Az 1. ábra négyszögfelületet, míg a 2. ábra egy nyeregfelületet ábrázol.



1. ábra. A válaszfüggvény két faktor esetén, lineáris modell alapján (D1 kapcsolóra)



2. ábra. A válaszfüggvény két faktor esetén, nemlineáris modell alapján (D1 kapcsolóra)

Ezek alapján megállapíthatjuk, hogy legjobb eredményeket akkor kapjuk, ha a $0,30\text{ s}$ kapcsolási idővel és 60% -os páratartalom beállítással tesztelünk. Rosszabb eredményt pedig $0,25\text{ s}$ kapcsolási idő és 80% páratartalom megadásával. Tehát a vizsgált termékelemek élettartama csökken ha a páratartalmat növeljük, illetve ha a kapcsolási idő $0,30\text{ s}$ -ról $0,25\text{ s}$ -re csökken.

6. Összefoglalás

Cikkünkben bemutattuk a mikrokapcsolók tesztelésére alkalmazott kísérlettervezési módszerek adta lehetőségeket. A Box-Wilson módszert választva, meghatároztuk a faktorok összes lehetséges szintkombinációját és a kísérleti beállítások számát.

A kísérleti mátrixban összefoglaltuk az összes kísérleti lehetőséget és ábrázoltuk a válaszfelületeket. A kísérleti mátrix egyes oszlopai az egyes faktorok hatásának kiszámításához nyújtott segítséget. Meghatároztuk a kísérletünkben szereplő faktorokat és szinteket a vizsgált mikrokapcsoló-típusok, kapcsolási idő és páratartalom függvényében. Ezt követően pedig definiáltuk a b_i együtthatók kiszámítására alkalmas összefüggéseket a kísérleti mátrix elemeivel. Ábrázoltuk a válaszfüggvényt lineáris és nemlineáris modell esetén a faktorok és a tönkremeneteli ciklusszámok megadásával.

A négy mikrokapcsolóra kapott eredmények összehasonlításakor megállapítható, hogy a legnagyobb élettartam $0,30\text{ s}$ kapcsolási idő és 60% páratartalom esetén adódik mind a négy kapcsoló típus esetén, és a legnagyobb élettartam ebben az esetben a $K2$ típus esteén $212\ 592$ kapcsolás. A legkisebb élettartamot a $D1$ típus esetén $0,25\text{ s}$ kapcsolási idő és 80% páratartalom mellett tapasztaltuk, ennél a kapcsolónál $117\ 241$ a kapcsolások száma.

A kutatásunk későbbi szakaszában jelentősen több teszteredményre kívánjuk megadni ezen együtthatókat és ábrázolni a válaszfelületeket, ilyen módon biztosítani a kísérleti eredmények megbízhatóságát.

7. Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutatómunka az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-19-3. kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának szakmai támogatásával készült.



Irodalom

- [1] Verma, A. K., Srividya, A., Mannikar, A. V., Pankhawala, V. A., Ratharaj, K. J.: *Shainin method: edge over other DOE techniques*, 2004 IEEE International Engineering Management Conference, Singapore, ISBN 0-7803-8519-5
- [2] Aksu, B., Baynal, K.: *Shainin and Taguchi methods and their comparison on an application*, Gediz University, Izmir, 1st International Symposium on Computing in Science & Engineering (2010) pp.801-809.
- [3] Finszter, F., Aradi, P., Czmerk, A., Németh, Z., Wenzelné Gerőfy K., Halmai, A.: *Járműipari tesztelés és jóváhagyás* (Letöltés dátuma:2020.02.21.)
- [4] Fridrik, L., Csóka, J., Maros, Zs., Orosz L.: *Faktoriális kísérlettervezés I.*, Nehézipari Műszaki Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Miskolc (1988)
- [5] Fridrik, L.: *Faktoriális kísérlet-tervezés*, oktatási segédlet, Nehézipari Műszaki Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Miskolc (1979)

- [6] Jiju, A., Frenie Jiju, A.: *Teaching the Taguchi method to industrial engineers*, 50 No.4 (2001) pp.141-149. ISSN 0043-8022 <https://doi.org/10.1108/00438020110391873>
- [7] Johanyák, Zs.: *Bevezetés a kísérletmódszertanba*, Kecskeméti Főiskola, Kecskemét, 2002.
- [8] Kemény, S., Deák, A.: *Kísérletek tervezése és értékelése*, Műszaki Könyvkiadó, 2000
- [9] Otto, K. N., Antonson, E. K.: *Extension to the Taguchi method of product design*, Engineering Design, Research Laboratory, Division of Engineering and Applied Science, California Institute of Technology (1991) pp.1-26.
- [10] Tanco, M., Viles, E., Pozueta, L.: *Comparing different approaches for design of experiments (DoE)*, Advances in Electrical Engineering and Computational Science (2019) pp. 611-621. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2311-7_52
- [11] Sipkás, V., Vadászné Bognár, G.: *Mikrokapcsolók Weibull- eloszlásán alapuló gyorsított élettartam vizsgálatok*, Doktoranduszok Fóruma, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai kar (2018) pp.105-110. ISBN 978-963-358-166-7
- [12] Sipkás, V., Vadászné Bognár, G.: *Kerti gépekben alkalmazott mikrokapcsolók élettartam adatainak vizsgálata*, Multidiszciplináris Tudományok, 9 No.2 (2019) pp. 90-95. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2019.2.13>
- [13] Sipkás, V., Vadászné Bognár, G.: *Testing accelerated life data of micro switches*, Design of Machines and Structures, 9 No.2 (2019), pp. 44-50. ISSN 1785-6892 <https://doi.org/10.35925/j.multi.2019.2.13>
- [14] Sipkás, V., Vadászné Bognár, G.: *Mikrokapcsolók élettartam vizsgálatának kérdései*, XXVII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia (2019) pp. 476-479. ISSN 2068-1267
- [16] Sipkás, V., Vadászné Bognár, G.: *Methods for accelerated life testing of micro switches in vehicles*, GÉP folyóirat, 71 No.3-4 (2020), pp.72-75. ISSN 0016-8572
- [17] Veličković, S., Stojanović, B., Babić, M., Vencl, A., Bobić, I., Vadászné Bognár, G., Vučetić, F.: *Parametric optimization of the aluminium nanocomposites wear rate*, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 41 No.1 (2019) pp.1-10. <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1531-8>
- [18] Sharma, S., Chetiya, A. R.: *Simplifying the six sigma toolbox through application of Shainin DOE techniques*, 34 No.1 (2019) pp. 13-30. <https://doi.org/10.1177/0256090920090102>