

Zárójelentés  
OTKA F 68756 sz. projekt  
Komplex rendszer elektrosztatikus veszélyek kockázatbecslésére  
Kiss István

A kutatás célja olyan komplex rendszer kidolgozása volt, amely alkalmas elektrosztatikus feltöltődés ill. kisülés miatt kialakuló veszélyek mértékének számszerűsítésére, ennek alapján a védekezési lehetőségek közül az optimális kiválasztására.

A teljes rendszer kimenete a kockázat időfüggvénye, különböző „kockázati állapotban” (különböző átlagos kármentes időszakhoz tartozó esetekben). A kockázatelemzés területén elterjedt értelmezés szerint kockázat alatt egy olyan számértéket értünk, amely megadja, mekkora a valószínűsége annak, hogy adott idő elteltéig egy végzetes káresemény bekövetkezik. („Végzetes” alatt azt értjük, hogy a teljes lehetséges kár bekövetkezik, amelynek költségét, mint viszonyítási alapnak vett  $C_{all}$  költséget el kell viselnünk. Fontos megemlítenünk, hogy a teljes megsemmisülést jelentő katasztrófa nem feltétlenül alakul ki, kisebb értékű káresemény is bekövetkezhet, de a kockázatot a teljes kárra vonatkoztatjuk.) Ezt azért érdemes már az elején hangsúlyoznunk, mert vannak olyan megközelítések is, amelyek az éves kárköltség értékét értik a kockázat alatt [1].

A viszonyítási alapul szolgáló költség ( $C_{all}$ ) meghatározása nem is olyan könnyű feladat. Figyelembe kell venni, hogy mi a legrosszabb forgatókönyv, ami kialakulhat (pl. üzemcsarnok teljes leégése), meg kell becsülni a megsemmisült termék értékét a bevételkiesést, az esetlegesen harmadik félnek okozott kárt és mindezek összegéhez kell viszonyítani a többi lehetséges káresemény kárértékét.

Nehézséget jelent ebben a felfogásban az emberi élet, egészségkárosodás, figyelembevétele. Bizonyos esetekben az emberi élettel, egészséggel kapcsolatos kockázatot külön kezelik [1], és más viszonyítási alapot választanak (a halálos balesetek bekövetkezésének gyakoriságára szabnak határt [2]). Más szemlélet szerint az emberi élet elvesztése, egészségkárosodás kapcsán számszerűsíthető költségek merülnek fel (kártérítés, bírságok, stb.), amelyek  $C_{all}$  értékében figyelembe vehetők. Ehhez viszont meg kell határozni, a következmények súlyosságát. Ennek a munkának egy részfeladatát végeztem el kollégáimmal a projekt keretében [3].

A kockázat időfüggvényét a rendszer az  $R(t)=1-\exp(-t/T)$  függvény alapján számítja [4], ahol  $T$  két  $C_{all}$  költségigényű káresemény bekövetkezése közötti átlagos idő (periódusidő), amely  $T=1/D$  összefüggésből határozható meg.  $D$  értéke több, egymástól független folyamat esetén bekövetkező káresemény figyelembe vételével az egyes károkat kiváltó események bekövetkezési gyakoriságának ( $N$ ) és annak a súlyozott valószínűségnek ( $w$ ) a szorzata, amely megadja, hogy a kiváltó esemény fellépése esetén mekkora valószínűséggel alakul ki a viszonyítási alapnak tekintett költségű kár. (A projekt témája szerint a kiváltó esemény az elektrosztatikus kisülés hatására bekövetkező tűz, v. robbanás.)

$$D = N_I w_I + N_{II} w_{II} + \dots + N_k w_k.$$

A súlyozott valószínűségek számításánál figyelembe kell venni, hogy ugyanaz a kiváltó esemény többfajta kárt is előidézhet. Ha  $c_i$  jelöli az  $i$ . kártípus relatív költségét ( $c_i=C_i/C_{all}$ ,  $C_i$  a kár tényleges költsége), akkor a  $k$ . ipari folyamat kárának súlyozott valószínűsége a jól ismert

$$w_k = 1 - (1 - p_1 c_1)(1 - p_2 c_2) \dots (1 - p_m c_m) \dots$$

formában írható. Példaként néhány lehetséges káresemény:

- gyártóberendezés sérülése
- személyi sérülés
- termék sérülése
- üzemcsarnok leégése
- stb.

Az egyes káresemények definiálása és kárértékük becslése a kockázat viselőjével együttesen határozandó meg. A  $p$ -vel jelölt valószínűség-értékek meghatározása összetett feladat. Nagyságukat befolyásolja, hogy a vizsgált ipari folyamat ill. annak környezete rendelkezik-e tűzjelző hálózattal, automata tűzoltó rendszerrel, vannak-e a közelben olyan éghető anyagok, amelyek a tüzet tovább terjesztik, milyen gyorsan léptethetők életbe különböző védelmi intézkedések. Ezt a tényezőt befolyásolja az előbb említett tűzjelző ill. oltórendszerek, ill. az egyéb biztonságtechnikai rendszerek megbízhatósága is. Ezek számszerűsítése összetett feladat, a nemzetközi szakirodalomban többféle módszer is megtalálható [2]. A kockázatbecslő rendszer jelenleg a fenti paramétereket bemenő adatokként kezeli.

A kifejlesztett kockázatbecslő rendszerben a hangsúly a károkat kiváltó események bekövetkezésének gyakoriságát ( $N$ ) meghatározó módszer továbbfejlesztésén van, ez adja a kutatómunka újdonságtartalmát. A számítást az elterjedten használt hibafa-elemzés korábban továbbfejlesztett változatával, az ún. fuzzy hibafával végezzük. Ennek okai az alábbiak.

Az elektrosztatikus feltöltődésből és kisülésből származó veszélyek vizsgálata sok esetben még ma is kvalitatív, helyszíni szemrevételezés alapján végzik, és a megfelelő védelmi módszerek alkalmazását nem alapos kockázatbecslés, hanem a hagyományok, más rendszerekkel kapcsolatban szerzett tapasztalatok határozzák meg. Ehhez képest jelentett előrelépést a klasszikus hibafa kialakítása.

A károkat kiváltó esemény több feltétel együttes teljesülése esetén következik be, amelyek további feltételek teljesülése esetén állnak fent. Az eseményfa ezeknek az aleseményeknek logikai kapcsolatát reprezentálja. Hibafává akkor változik, ha az egyes eseményekhez bekövetkezési valószínűséget rendelünk hozzá. Ha a fa hierarchiájában legalul álló ún. alapeseményekhez sikerül megfelelő értékeket megadni, akkor a rendszer a hibafán végighaladva, (az egyes logikai kapcsolatoknak megfelelő műveleteket elvégezve) kiadódik a kárt kiváltó esemény bekövetkezési gyakoriságára vonatkozó  $N$  érték, általában esemény/év mértékegységben értve. (A továbbiakban – mivel a károkat kiváltó esemény a hibafa csúcán helyezkedik el – a csúcs- v. végső esemény kifejezéseket fogjuk használni.)

Számos nehézség merül fel azonban a módszer alkalmazása kapcsán. Az egyik annak biztosítása, hogy az elemzés teljes legyen, tehát ne maradjon ki a hibafából olyan esemény, amely szerepet játszik a végső esemény bekövetkezésében. A másik, a kiinduló események gyakoriságának meghatározásával kapcsolatos bizonytalanság. Utóbbinak különféle okai lehetnek, mint például a feltöltődés mértékének függése nehezen mérhető paraméterektől, emberi tényező, stb. Ennek a bizonytalanságnak a kezelésére hatékony módszernek bizonyult a fuzzy logika alapú hibafa használata, amely lehetővé tette, hogy ez a bizonytalanság értékelhető legyen. Az események bekövetkezésének gyakoriságát egyetlen érték helyett fuzzy tagsági függvények segítségével adja meg. A tagsági függvény „szélességét” (nem nulla tartomány hossza) ugyanis befolyásolja az információval kapcsolatos bizonyosság vagy

bizonytalanság, és a hibafán végighaladva a csúcsesemény tagsági függvényének alapja (annak mérete) szintén arányos lesz a számítás bizonyosságával vagy bizonytalanságával.

A kutatás első évében a módszer alkalmazását az elektrosztatikus por, pernye ill. cseppleválasztásra dolgoztam ki, ahol bizonyos esetekben (főként jelentős mennyiségű CO, vagy egyéb gázok megjelenése miatt) tűz és robbanásveszély alakulhat ki. Az elektrosztatikus porleválasztókban kialakuló tűz és robbanásveszély mértékének meghatározásakor azonosítottam a tűz ill. robbanás kialakulásához vezető eseményeket és hibafa-analízis segítségével megállapítottam, hogy a veszélyhelyzet végső soron milyen fizikai paraméterek milyen érték-kombinációi mellett jöhet létre. Elsősorban szakirodalmi adatok alapján, valamint a társszerzők korábbi eredményeinek, tapasztalatának felhasználásával becslést adtam az egyes paraméterek kritikus tartományban való elhelyezkedésének gyakoriságára, az elemzés alapján pedig a tűz és robbanás adott időn belüli bekövetkezésének valószínűségére. A módszerről és alkalmazásának eredményeiről előadást tartottam a 11. Elektrosztatikus Porleválasztó Konferencián [5].

A fuzzy logika alapú hibafa alkalmazásával tehát információt kapunk arról, hogy az alapeseményekhez rendelt kiinduló gyakorisága hogyan befolyásolja a csúcsesemény megbízhatóságát. (Érdekesség, hogy a jelen kutatást végző oktató egyik doktorandus hallgatója éppen ezen a területen javasolt újszerű megoldást [6], de ez még nem vált a jelenlegi szakértői rendszer részévé.)

Az alapesemények bekövetkezési gyakoriságának pontosabb becslésének problémája állt a kutatás második évének középpontjában. A kockázatbecslő rendszer segítségével egy konkrét ipari folyamat vizsgálatát végeztem el egy olyan tipikus műveletsorra, amelyet a gyógyszeriparban alkalmaznak. A folyamat elemzéséhez a fentiekben már vázolt módon azonosítottam a tűz ill. robbanás kialakulásához vezető eseményeket és fuzzy logika alapú hibafa-analízis segítségével megállapítottam, hogy a veszélyhelyzet végső soron milyen fizikai paraméterek milyen érték-kombinációi mellett jöhet létre. Szakirodalmi adatok és konkrét mérési eredmények, működési tapasztalatok alapján meghatároztam az alapeseményekhez tartozó bekövetkezési valószínűségek fuzzy tagsági függvényeit.

A fentiek alapján elvégzett hibafa-elemzés megadta a tűz ill. robbanás bekövetkezésének gyakoriságát (természetesen fuzzy tagsági függvény formájában). A tűz ill. robbanás okozta lehetséges károk figyelembe vételével meghatároztam a kockázat mértékét különböző esetekre. Ezek összevetésével lehetővé vált annak megállapítása, hogy bizonyos védőintézkedések megtétele milyen mértékben csökkenti a kockázatot, ill. egyes intézkedések elmaradása milyen mértékben növeli azt. [7]

A bemeneti értékek meghatározásánál különös figyelmet fordítottam annak elemzésére, hogy az ipari folyamatokban az elektrosztatikus feltöltődés miatt keletkező veszély számszerűsítése során [8] milyen problémák adódnak a fuzzy logika alapú hibafa-analízis alapeseményeihez rendelt előfordulási gyakoriságértékek meghatározásakor. Az elemzés során a feltöltődés, ill. kisülés kialakulását leíró egyszerűsített modelltől indultam ki, amely az elektrosztatikus eredetű gyújtóforrások jelenlétének fizikai alapokon nyugvó meghatározását teszi lehetővé.

Az egyszerűsített fizikai modellben a töltésszétválást egy áramgenerátor szimbolizálja, amelynek árama a töltésszétválás intenzitásával arányos. A töltések felhalmozódása a földtől elszigetelt fém részekon, illetve szigetelő felületeken jön létre. Ezeket a helyettesítő áramkörben az áramgenerátor kapcsaira csatlakozó kapacitással vehetjük figyelembe. A töltés

felhalmozódását a szándékosan kialakított földelési utak, vagy a spontán képződő levezetési útvonalak (pl. folyadékfilm szigetelő felületen) csökkentik. Ezeket egy, a kapacitással párhuzamosan kapcsolt ellenállással modellezhetjük. Egyensúlyi állapotban a kapacitás feszültsége megegyezik a levezetési ellenállás és a generátor áramának szorzatával. Az ipari folyamat folyamatos és biztonságos üzeme akkor biztosítható, ha a kapacitás egyensúlyi állapothoz tartozó feszültsége nem éri el az átütéshez tartozó értéket.

Elektrosztatikus kisüléssel akkor kell számolnunk, ha a fenti egyensúly megbomlik. Ilyen helyzet alakulhat ki a töltésszétválás intenzitásának növekedése, a levezetési ellenállás növekedése, a kapacitás csökkenése, vagy az átütési feszültség csökkenése esetén. A hibafa segítségével tulajdonképpen azt kell feltérképezni, hogy ez az egyensúlybomlás hogyan alakulhat ki.

Természetesen magának a kisülésnek a megjelenése még nem feltétlenül vezet tűz v. robbanás kialakulásához, hiszen ahhoz oxigén és megfelelő koncentrációjú éghető anyag is szükséges. Olyan esetekben azonban, ahol a folyamat részben nyitott (pl. alapanyagok bevitele), vagy a gyúlékony légtérrel kizáró inertizáló rendszer meghiúsodik, a csúcsesemény bekövetkezéséhez szükséges feltételek teljesülnek, tehát a gyújtóforrás megjelenésének gyakoriságát kell korlátozni.

Erre alapvetően három lehetőség kínálkozik. Ha a folyamat csak viszonylag rövid, adott ideig zajlik, a kapacitás növelése megoldást jelent a feszültség korlátozására, a töltődés időállandójának növekedése miatt. Mégsem ez a legjobb megoldás, mert abban az esetben, ha az előfeltétel nem teljesül sokkal nagyobb energiájú kisülés alakulhat ki, mint az eredeti kapacitás mellett. Leginkább a levezetési ellenállás értékét szokás korlátozni, több, párhuzamos levezetési út biztosításával. Ebben az esetben a hibafa egy lényeges része azon események halmaza, amelyen ezeknek a levezetési utaknak a megszakadását jelentik.

A másik lehetőség a töltésszétválás intenzitásának csökkentése, pl. az anyagmozgatás sebességének megfelelő megváltoztatásával. Ilyenkor a hibafa-elemzésben annak előfordulási gyakoriságát keressük, hogy a korlátozás valamilyen okból kifolyólag sikertelen.

Bizonyos esetekben a töltésszétválás intenzitását nem tudjuk korlátozni. Különösen akkor nem, ha maga az alkalmazott technológia követeli meg bizonyos anyagok feltöltését. Ilyen eset a kutatás első évében biztonságtechnikai szempontból elemzett villamos por- pernye, ill. csepleválasztók (elektrosztatikus porleválasztó), amelyben a szennyezőanyagokat koronakisülés segítségével töltjük fel. A kiülés létrehozásához szükséges nagyfeszültség azonban néha átütést okoz a leválasztókamrában. Mivel a kisülési energia ebben az esetben sokszorosa a nagy szikraérzékenységgű gőzök ill. gázok minimális gyulladási energiájának, gyúlékony légtér üzemszerű jelenléte egy villamos leválasztóban nem megengedett.

Nem üzemszerűen, esetenként azonban megjelenhet a nem kívánt légtér, tipikusan szén-monoxid és oxigén együttes jelenléte alakulhat ki. A veszély mérséklése érdekében a leválasztókamrát CO érzékelőkkel látják el. Amennyiben a mért CO koncentráció meghalad egy kritikus értéket, az automatikus folyamatirányító rendszer beavatkozik és kikapcsolja a porleválasztó tápforrását. Mivel ez a kibocsátás növekedésével járna, általában a teljes leválasztási folyamat leáll. A kockázatot ebben az esetben az jelenti, hogy az előbbi biztonságtechnikai rendszer meghiúsodik.

Többféle esettanulmány elkészítése során megerősítést nyert, hogy vannak olyan tipikus paraméterek, amelyek a legtöbb esetben jelentősen befolyásolják az elektrosztatikus feltöltődést ill. kisülést, mérő-adatgyűjtő berendezést és megfelelő érzékelőket szereztem be. A kialakított mérőrendszer alkalmas adott folyamat környezeti hőmérsékletének, páratartalmának figyelésére, a veszélyeztetett helyeken (tűz- ill. robbanásveszélyt nem okozó módon telepített) villamos térerősségmérő segítségével a feltöltődés mértékének rögzítésére. Annak érdekében, hogy olyan folyamatok is vizsgálhatóak legyenek, ahol a töltésszétválasztást csőben áramló folyékony közeg eredményezi, a mérőrendszerhez egy vezetőképesség-mérő szonda is hozzátartozik.

Bizonyos paraméterek értékét nem tudjuk folyamatosan mérni. Ilyen például a padló levezetési ellenállása, a dolgozók által viselt ruházat felületi és térfogati vezetőképessége, stb. Ezeket időszakosan ellenőrizzük és regisztráljuk. A mérési eredmények feldolgozásával a hibafelemzés bemeneti eseményeinek előfordulási gyakoriságaira nagyobb megbízhatósággal tudunk becslést adni.

Az eredményül kapott időfüggvény alapján meghatározható, hogy adott ideig működő folyamat esetén mekkora a kockázat értéke. A folyamatos mérés egy érdekes lehetőséget is biztosít: az aktuális rendszerállapotnak megfelelő kockázati állapotot lehet meghatározni, ami időről-időre frissül. Ennek alapján bizonyos védelmi intézkedések meghozatalát is el lehet indítani, de ez már átvezet az automatizált diagnosztika és a biztonságtechnikai rendszerek területére.

A teljes rendszer felépítését és az elért eredményeket az Institute of Physics (IOP) által szervezett, 2011. évi Nemzetközi Elektrosztatikai Konferencián fogom publikálni, amelynek helyszíne Bangor (Nagy-Britannia).

A gyakorlati hasznosítás szempontjából fontos megemlíteni egy korábbi szakértői rendszert. A modern gépjárművek üzemanyagtovábbító rendszerében a szivattyú és a szűrő egyetlen szerkezeti egységbe építve helyezkedik el. A szűrő anyaga (csakúgy, mint az összeépített rendszer legtöbb alkatrészének) nagy fajlagos ellenállással rendelkező műanyag. A szerkezeten átáramló benzin (mérésekkel is igazolhatóan) jelentősen feltöltődik, és bizonyos alkatrészekben olyan töltésfelhalmozódást idéz elő, amely a benzintankon belüli kisüléshez vezethet. Ez főként olyankor alakul ki, amikor a gépjármű hidegben, alacsony hőmérsékleten üzemel, mert ilyenkor a benzintartályban gyúlékony légtér alakulhat ki.

Egy elektrosztatikus kisülés robbanást idézhet elő a fenti közegben. A kisülés kialakulásának kedvez, hogy nagy hidegben a benzin fajlagos vezetőképessége drasztikusan (nagyságrendnyit) csökken, ami növeli a töltésszétválasztó folyamat intenzitását.

A veszélyes mértékű feltöltődés kiküszöbölhető lenne, ha minden műanyag alkatrész disszipatív (elektrosztatikusan vezető) anyagból készülne, ez viszont a gyártó számára elviselhetetlen költségtöbbletet eredményezne. A feltöltődés mértéke azonban úgy is korlátozható, hogy csak bizonyos alkatrészek készülnek disszipatív anyagból.

A fuzzy hibafán alapuló rendszer segítségével kiszámítható, hogy adott konstrukció esetén hogyan változik a kockázat értéke, vagyis a tervezők (más szempontok alapján kidolgozott) különböző megoldások közül kiválasztatják a legkisebb kockázattal járót. Természetesen a becsült kockázathoz tartozik egy bizonytalansági sáv, amelynek nagysága jellemzi a kapott eredmény megbízhatóságát. Az új, komplex rendszer segítségével ez a bizonytalanság

csökkenthető. Az ennek alapján kifejleszhető új szakértői rendszer lehet a kutatás eredményének egyik gyakorlati alkalmazása.

## Irodalom

- [1] IEC 62305-2 Protection against lightning. Part 2: Risk management
- [2] Dave McDonald: Practical industrial safety, risk assesment and shutdown systems for industry. Newnes, 2004
- [3] Zoltán Ádám Tamus , Balázs Novák , István Kiss , István Berta: Can the Near Field of Lightning Impulse in Down Conductors Cause Harmful Health Effects? Proc. Of. 30th International Conference on Lightning Protection, 2010. paper 1042
- [4] T Horváth, Understanding Lightning and Lightning Protection. 2006, Research Studies Press (Wiley & Sons) <http://www.wiley.com/go/horvath>
- [5] Kiss I., Iváncsy T., Németh B., Berta I.: Advanced Risk Analysis for the Application of ESP-s to Clean Flammable Gas-pollutant Mixtures, Proc. of 11th Int. Conf. on Electrostratic Precipitation, 2008
- [6] S. Szabó, B. Németh, I. Kiss : Eliminating Bias in Fuzzy Fault Trees for Electrostatic Risk Assessment. Proc. Of 4th International Workshop of Soft Computing Applications. 2010.
- [7] Kiss I.: Increasing the reliability of risk assesment for systems endangered by electrostatic discharges, JOURNAL OF ELECTROSTATICS 67:(2-3) pp. 297-300. (2009), 2009
- [8] I. Berta, "Static Control", Journal of Electrostatics, Volume 63, Issues 6-10, June 2005, pp. 679-685