

ČESKÁ SPOLEČNOST PRO JAKOST

Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1

**63. SEMINÁŘ
ODBORNÉ SKUPINY PRO SPOLEHLIVOST**

pořádaný výborem Odborné skupiny pro spolehlivost
k problematice

**PREDIKTIVNÍ ANALÝZY
SPOLEHLIVOSTI A MOŽNOSTI
JEJICH VYUŽITÍ II.**



**Materiály z 63. semináře
odborné skupiny pro spolehlivost**

Brno, červen 2016

Odborný garant semináře: prof. Ing. David Vališ, Ph.D.

OBSAH:

ÚVOD DO PREDIKTIVNÍCH ANALÝZ SPOLEHLIVOSTI – ÚČEL A ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY **3**

*Prof. Ing. Zdeněk VINTR, CSc., dr.h.c., Fakulta vojenských technologií,
Univerzita obrany v Brně*

*Prof. Ing. David VALIŠ, Ph.D., Fakulta vojenských technologií,
Univerzita obrany v Brně*

PREDIKCE BEZPORUCHOVOSTI – DATABÁZE A METODIKY **10**

Ing. Michal VINTR, Ph.D., Expert na spolehlivost a bezpečnost produktů

ANALÝZA BLOKOVÉHO DIAGRAMU BEZPORUCHOVOSTI **31**

*Prof. Ing. Zdeněk VINTR, CSc., dr.h.c., Fakulta vojenských technologií,
Univerzita obrany v Brně*

MARKOVOVA ANALÝZA **46**

*Prof. Ing. David VALIŠ, Ph.D., Fakulta vojenských technologií,
Univerzita obrany v Brně*

Sborník přednášek: **Prediktivní analýzy spolehlivosti a možnosti jejich využití II.**

Vydání 1., Česká společnost pro jakost

Brož

ISBN: 978-80-7231-469-0

Kolektiv autorů

58 stran

ÚVOD DO PREDIKTIVNÍCH ANALÝZ SPOLEHLIVOSTI – ÚČEL A ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY

prof. Ing. Zdeněk VINTR, CSc., dr.h.c.

e-mail: zdenek.vintr@unob.cz

pplk. prof. Ing. David VALIŠ, Ph.D.

e-mail: david.valis@unob.cz

1. Úvod

Cílem příspěvku je seznámit čtenáře se základy a úvodními principy metod prediktivních analýz spolehlivosti. Prediktivní analýzy spolehlivosti se používají k přezkoumání a předpovědi ukazatelů bezporuchovosti, pohotovosti, udržovatelnosti a bezpečnosti systému. Analýzy spolehlivosti se provádí zejména v etapě volby koncepce a stanovení požadavků, v etapě návrhu a vývoje a v etapě provozu a údržby a to především pro vyhodnocení a stanovení ukazatelů spolehlivosti a pro posouzení zda byly splněny specifikované požadavky.

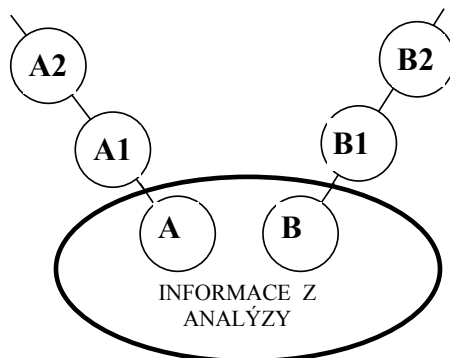
2. Cíle prediktivní analýzy spolehlivosti systému

Analýza spolehlivosti systému je proces, jehož podstatou je získávání, zkoumání a uspořádávání informací specifických a významných pro daný systém a potřebných pro rozhodování o něm a o stanovených cílech. Zkoumání probíhá obvykle na modelu systému. Konečným produktem tohoto procesu je soubor informací o vlastnostech modelu systému. Model může být v průběhu analýzy modifikován. V souladu s touto definicí je primárním cílem analýzy systému získávání informací o něm. Analýza musí být provedena podle jasně stanovených pravidel a postupů, tak aby proces analýzy byl opakovatelný a vždy vedl ke stejným výsledkům (dvě nezávisle provedené analýzy jednoho systému nemůžou dospět ke vzájemně rozporným výsledkům).

Informace, které jsme schopni z analýzy získat, nemusí být na první pohled a na jejím začátku zcela zřejmé. Vysvětlení poskytuje Obrázek 1.1. Kruh představuje informace, které musí být získány proto, aby analýza systému splnila svůj účel. Analytik, který se zaměřuje na typ problémů A začíná svůj výzkum v této oblasti a vyřešení řady problémů které ho zajímají, jej může dovést do oblasti A1; objasnění těchto problémů jej může dále přivést do oblasti A2; atd. Jiný analytik, zaměřený na skupinu problémů B může obdobně dospět k oblastem B1, B2 atd.

Pro ilustraci problému uvažujme např. elektronický bezpečnostní systém ochrany důležitého průmyslového podniku. Analytik začíná výzkum jeho spolehlivosti identifikací a popisem rozhraní systému, možných příčin a důsledků poruch jeho externího napájecího systému, rozbořem poruch vlastního napájecího systému, pokračuje rozbořem příčin a důsledků poruch interní elektrické instalace a nakonec jednotlivých výkonných prvků bezpečnostního systému. Uvážit musí vazby mezi prvky a důsledky kombinace poruch

jednotlivých prvků na výslednou spolehlivost systému ve všech předpověditelných režimech provozu.



Obrázek 1.1 Oblasti informací, získávaných analýzou spolehlivosti.

3. Metodologické přístupy k analýze

Existují dva rozdílné metodologické postupy při provádění analýzy spolehlivosti systému: induktivní a deduktivní.

Induktivní postup: je založen na provádění analýzy od specifických a elementárních problémů k obecnějším a globálnějším problémům. Od analýzy funkcí a poruch prvků (a jejich kombinací) na nejnižší úrovni členění systému se postupuje k analýze poruch a jejich důsledků na nadřazené systémy až k poruchám celého systému. Tento postup se uplatňuje například v metodě FMEA, kde se posuzují důsledky poruch prvků na funkci nadřazených systémů. Při zkoumání důsledků poruch se tedy uplatňuje induktivní postup.

Deduktivní postup: je založen na provádění analýzy od globálních (obecných) problémů k problémům elementárním. Od analýzy poruch systému na nejvyšší úrovni členění se postupuje k analýze jejich příčin a podílu poruch elementárních prvků na těchto poruchách. Při zkoumání příčin vzniku poruch se tedy uplatňuje deduktivní postup. Tento postup se uplatňuje například v metodě stromu poruch.

4. Základní metody analýzy spolehlivosti

Tak jak se vyvíjela spolehlivost jako vědní obor, rozvíjely se i metody analýzy spolehlivosti. Dnes jsou nejvýznamnější metody analýzy spolehlivosti již standardizovány a návody k jejich použití jsou k dispozici ve formě národních, mezinárodních či vojenských norem. V současné praxi se při provádění analýz spolehlivosti můžeme setkat zejména s následujícími metodami:

- Předběžná analýza nebezpečí (PHA).
- Analýza způsobů a důsledků poruch (FMEA).
- Analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch (FMECA).
- Metoda grafů a blokových diagramů bezporuchovosti (RBD).
- Metoda pravdivostní tabulky.

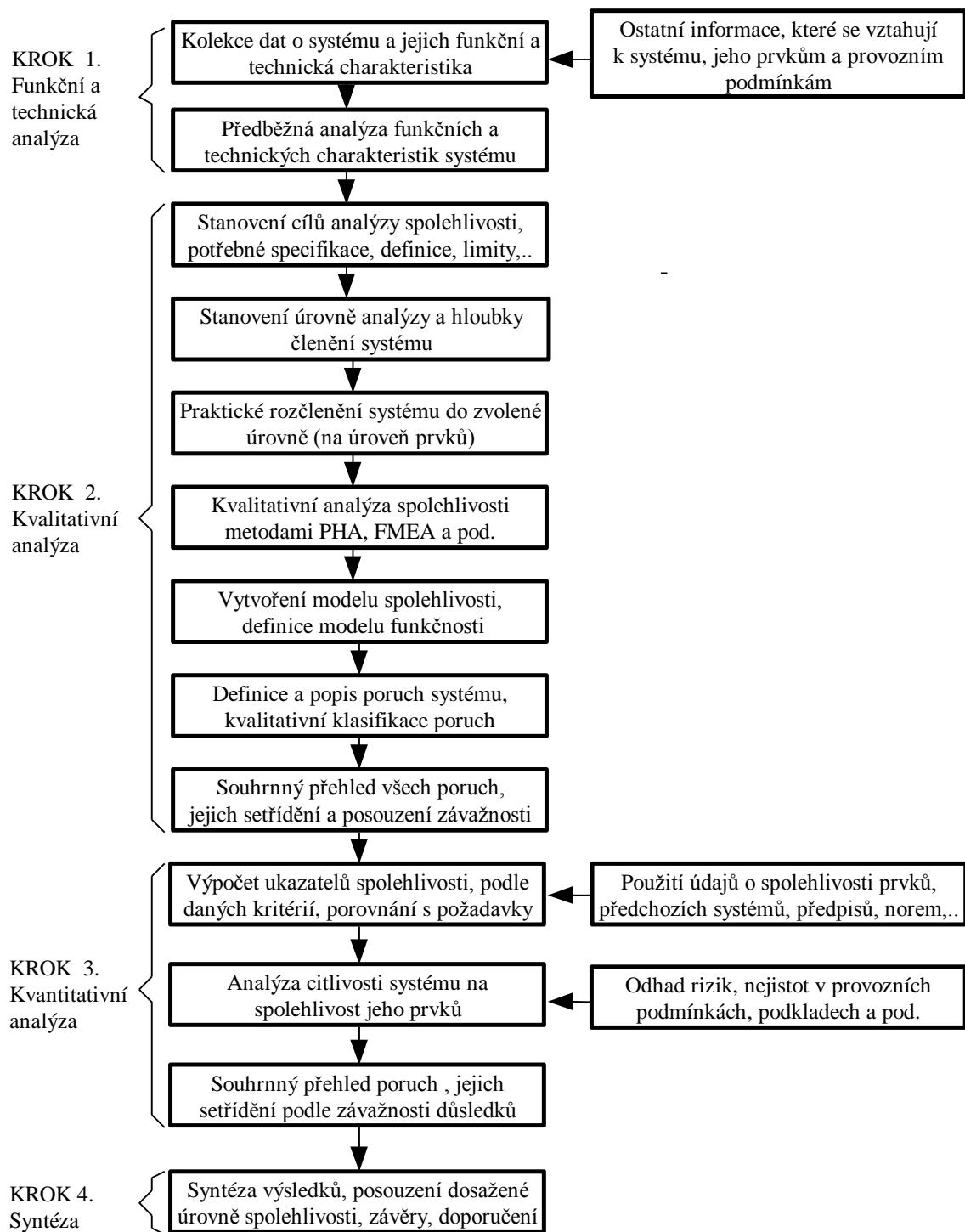
- Metoda orientovaných stromů událostí (FTA, ETA, aj.).
- Markovovy metody (MA).
- Simulační metody.

5. *Hlavní kroky a charakteristiky prediktivní analýzy*

V principu existují čtyři hlavní kroky (etapy) při provádění prediktivní analýzy spolehlivosti a to:

- Funkční a technická analýza.
- Kvalitativní analýza.
- Kvantitativní analýza.
- Syntéza výsledků analýzy.

Vzájemná návaznost těchto etap a přehled základních úkolů, které jsou v rámci každé etapy realizovány je znázorněn na Obr. 1.2.

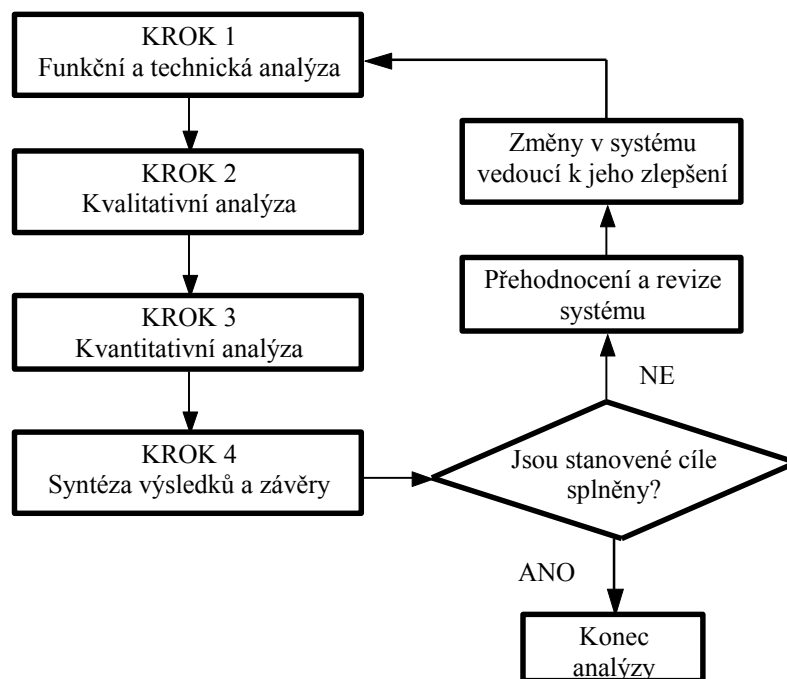


Obrázek 1.2 Prediktivní analýza spolehlivosti systému

Mezi hlavní charakteristiky prediktivních analýz patří:

Interaktivní povaha analýzy: Pro snadnější pochopení podstaty a cílů analýzy spolehlivosti byl postup jejího provádění rozdělen do čtyř samostatných a relativně nezávislých kroků. Ve skutečnosti ovšem toto dělení a nezávislost kroků nemá ostré hranice. Pro každý reálný systém, který má být definován, vyvinut a vyroben mají jednotlivé etapy, jimiž jeho vznik prochází v prováděných činnostech vzájemné průniky.

Iterativní povaha analýzy: Ze své povahy má analýza spolehlivosti iterativní charakter. Je integrální součástí všech vývojových prací na systému, přináší náměty a návrhy na změny systému, které jsou důsledkem odhalených nedostatků. První závěry z analýzy vedou ke změnám v systému a ke zvýšení jeho spolehlivosti. Vliv těchto změn a modifikací vyvolává potřebu opakování (aktualizaci) analýzy až do té doby, dokud nejsou splněny na začátku projekčních prací stanovené cíle. Iterativní aspekty, obsažené v analýze spolehlivosti ukazuje Obrázek 1.3.



Obrázek 1.3 Iterativní povaha analýzy spolehlivosti

6. Závěr

Kvalitativní modelování, které je implicitní součástí analýzy má v sobě i kvantitativní aspekty. Identifikace a definice možných poruch, jejich projevů, důsledků a rizika jejich vzniku mají vždy stochastickou povahu a nesou v sobě i jistou chybu v odhadu. Proto vždy můžeme v analýze pouze předpokládat vznik poruch a jejich důsledků a to obvykle na základě zkušeností získaných empiricky z provozu stejných nebo příbuzných systémů.

Syntéza informací a závěry z kvalitativní a kvantitativní analýzy např. přesně ukáže ty poruchy a jejich kombinace, na nichž je nejvíce závislá spolehlivost systému, odhalí nejkritičtější prvky systému nebo nejvýznamnější funkce systému. Tímto způsobem lze rozhodnout o takových technických či technologických opatřeních, která nejúčinnějším a nejrychlejším způsobem povedou ke zvýšení spolehlivosti, konkrétně bezporuchovosti, bezpečnosti, pohotovosti, udržovatelnosti a jiných vlastností systému. Ze závěrů analýzy je možné usoudit, zda systém splnil nebo nesplnil požadavky na jeho spolehlivost a bezpečnost. Stejně tak analýza může posloužit i k jiným praktickým krokům:

- ke zvýšení úrovně spolehlivosti prvků;
- ve změnách v zálohování prvků;

- ke zdůvodnění nezbytnosti dodatečného zálohování prvků;
- k odstranění nadbytečného zálohování;
- k dodatečné ochraně nebo monitorování funkcí prvků;
- k nezbytnosti zabudování ochrany systému před poruchou společných prvků;
- k nezbytnosti předepsat kontrolu správné funkce prvků se skrytými poruchami;
- k úpravě preventivních údržbových operací;
- ke změnám charakteru a period kontrolních zkoušek;
- k minimalizaci rizika vlivu lidského faktoru na spolehlivou funkci systému apod.

Analýza poskytuje celou řadu dalších užitečných informací, využitelných při organizaci, řízení a kontrole provozu. Dává též první podklady pro objektivní plánování systému logistické podpory budoucího provozu.

Použité zdroje

- [1] DHILLON, B. S. *Design reliability: Fundamentals and applications*. Boca Raton: CRC Press, 1999. ISBN 0-8493-1465-8.
- [2] HOLUB, R. – VINTR, Z. *Spolehlivost letadlové techniky* [Elektronická učebnice]. Brno: VUT v Brně, 2001.
- [3] HOLUB, R. – VINTR, Z. *Základy spolehlivosti*. Brno: VA v Brně, 2002.
- [4] MATĚJČEK, J. Stručný přehled norem z oblasti spolehlivosti. In *Úvod do spolehlivosti*. Praha: Česká společnost pro jakost, 2014, s. 18–26. ISBN 978-80-02-02514-6.
- [5] MURTHY, D.N.P. – RAUSAND, M. – ØSTERÅS, T. *Product reliability: Specification and performance*. London: Springer-Verlag, 2008. ISBN 978-1-84800-270-8.
- [6] MYKISKA, A. Systém managementu spolehlivosti. In *Normy z oblasti managementu spolehlivosti a rizik*. Praha: Česká společnost pro jakost, 2006, s. 11–18.
- [7] VINTR, M. Oborové normy ve spolehlivosti. In *Mezinárodní a národní normalizace ve spolehlivosti*. Praha: Česká společnost pro jakost, 2012, s. 29–36. ISBN 978-80-02-02421-7.
- [8] ČSN IEC 60050/192. Mezinárodní elektrotechnický slovník – Část 192: Spolehlivost. Praha: UNMZ, 2015.
- [9] ČSN EN ISO 9000:2006. *Systémy managementu kvality – Základy, zásady a slovník*. Praha: ČNI, 2006.
- [10] ČSN EN ISO 9001:2009. *Systémy managementu kvality – Požadavky*. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [11] ČSN EN 60300-1. *Management spolehlivosti – Část 1: Systémy managementu spolehlivosti*. Praha: ČNI, 2004.
- [12] ČSN EN 60300-2. *Management spolehlivosti – Část 2: Směrnice pro management spolehlivosti*. Praha: ČNI, 2005.

- [13] IEC 60300-1/Ed3. *Dependability management – Part 1: Guidance for management and application (Final draft – 56/1550/FDIS)*. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2014.
- [14] MIL-STD-785B. *Reliability Program for Systems and Equipment Development and Production*. Washington: Department of Defense, 1980.
- [15] NASA-STD-8729.1. *Planning, Developing and Managing an Effective Reliability and Maintainability (R&M) Program*. Washington: NASA, 1998.
- [16] SAE JA1000. *Reliability Program Standard*. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1998.
- [17] SAE JA1000/1. *Reliability Program Standard Implementation Guide*. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1999.
- [18] SAE JA1010. *Maintainability Program Standard*. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 2011.
- [19] SAE JA1010/1. *Maintainability Program Standard Implementation Guide*. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 2011.
- [20] VDA 3.1. *Zabezpečení spolehlivosti u výrobců automobilů a dodavatelů*. Praha: Česká společnost pro jakost, 2002.

PREDIKCE BEZPORUCHOVOSTI – DATABÁZE A METODIKY

Ing. Michal VINTR, Ph.D.

*Expert na spolehlivost a bezpečnost produktů
e-mail: mvintr@mvintr.cz, www.mvintr.cz*

1. Úvod

Nezbytným předpokladem pro modelování bezporuchovosti systému jako celku a provádění řady prediktivních analýz spolehlivosti je modelování bezporuchovosti na úrovni jednotlivých prvků systému. Uvedeným modelováním se v kontextu tohoto příspěvku rozumí získání ukazatele bezporuchovosti prvku. Pro získání v počátečních etapách životního cyklu systému se zažil pojem predikce bezporuchovosti (anglicky „reliability prediction“).

Cílem příspěvku je seznámit čtenáře se základními principy predikce bezporuchovosti prvků a zejména představit nejrozšířenější a nejpoužívanější databáze bezporuchovosti a metodiky používané pro predikci bezporuchovosti. V příspěvku je dále uveden seznam softwarových produktů pro podporu predikce bezporuchovosti a souhrn významných změn v oblasti databází a metodik za posledních deset let.

Autor příspěvku publikoval příspěvek na stejné téma (s názvem „Přehled metod a nástrojů pro odhad bezporuchovosti prvků“ [3]) již v roce 2007, v rámci 27. semináře Odborné skupiny pro spolehlivost. Aktuální příspěvek je oproti původnímu příspěvku výrazně rozšířen o teoretický úvod, o méně rozšířené databáze a metodiky, o seznam softwarových produktů a zejména o řadu novinek a popis vývoje v dané oblasti za dobu od vydání původního příspěvku.

2. Predikce bezporuchovosti

Bezporuchovost (reliability) je dle nově platné terminologické normy ČSN IEC 60050-192 [10] definována jako schopnost fungovat v daných podmínkách během daného časového intervalu bez poruchy tak, jak je požadováno.

Predikce, předpověď (prediction) je ve stejné normě [10] definována jako výpočetní proces používaný k získání předpovězené hodnoty veličiny. Přičemž *předpovězená hodnota (predicted value)* je v [10] definována jako hodnota veličiny vyhodnocená před tím, než je skutečně pozorovatelná, s použitím informací týkajících se stejné charakteristiky.

Dle Akademického slovníku cizích slov [24] je význam slova *predikce* následující: odhad budoucích hodnot skutečného průběhu; (vědecké) předvídaní, předpovídání, předpověď, předpoklad.

V kontextu uvedených definic lze *predikci bezporuchovosti (reliability prediction)* chápat jako proces získání hodnoty ukazatele bezporuchovosti před tím, než je ukazatel skutečně pozorovatelný (tj. typicky v počátečních etapách životního cyklu). Zjednodušeně lze na predikci bezporuchovosti nahlížet jako na předpověď ukazatele bezporuchovosti v počátečních etapách životního cyklu.

Ukazatel bezporuchovosti je obecně charakterizován číselnou hodnotou nebo funkcí použitou pro popis rozdělení pravděpodobnosti náhodné proměnné, která charakterizuje bezporuchovost. Takovou náhodnou proměnou je například doba provozu mezi poruchami.

Jedním ze základních ukazatelů bezporuchovosti je *pravděpodobnost bezporuchového provozu*, která je definována jako pravděpodobnost fungování za daných podmínek v časovém intervalu (t_1, t_2) tak, jak je požadováno [9]. Když $t_1 = 0$ a $t_2 = t$, potom se $R(0, t)$ jednoduše označuje jako $R(t)$ a nazývá se funkce bezporuchovosti.

Pro praktické použití je vhodné rozdělení pravděpodobnosti náhodné proměnné (tj. také funkci bezporuchovosti) charakterizovat typem rozdělení a jeho parametry. V oblasti spolehlivosti patří mezi často používané typy rozdělení následující dva:

- Weibullovo rozdělení, jehož funkce bezporuchovosti je dána vztahem [2]:

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right]$$

kde: α = parametr polohy rozdělení; β = parametr tvaru rozdělení.

- Exponenciální rozdělení, jehož funkce bezporuchovosti je dána vztahem [2]:

$$R(t) = \exp[-\lambda t]$$

kde: λ = parametr rozdělení (intenzita poruch).

Cílem predikce bezporuchovosti je předpovědět příslušný parametr (nebo parametry) daného rozdělení. Například u exponenciálního rozdělení je parametrem λ – intenzita poruch, která je v čase konstantní.

Predikci bezporuchovosti prvků lze provádět s využitím nejrůznějších informačních zdrojů. Dále jsou uvedeny zdroje informací o bezporuchovosti prvků seřazené podle úrovně jejich věrohodnosti:

- informace o bezporuchovosti prvku garantované výrobcem;
- průkazné výsledky zkoušek (sledování) spolehlivosti stejného (srovnatelného) prvku;
- informace o bezporuchovosti získané s využitím přístupu „Physics-of-Failure“ (podrobně viz [6], [9]);
- standardizované výpočty bezporuchovosti prvků (metodiky predikce bezporuchovosti);
- specializované databáze informací o bezporuchovosti prvků (databáze bezporuchovosti);
- obecné databáze informací o bezporuchovosti prvků;
- expertní odhady.

Příspěvek je dále zaměřen na mezinárodně uznávané a nejčastěji používané databáze bezporuchovosti a metodiky predikce bezporuchovosti. Ty umožňují predikovat konkrétní ukazatel bezporuchovosti, kterým je nejčastěji intenzita poruch (λ), a to ve formě číselné hodnoty (tj. konstanty). Z toho vyplývá, že apriori předpokládají exponenciální rozdělení. Proto je na výsledek predikce třeba nahlížet nejen jako na ukazatel bezporuchovosti, ale také jako na parametr rozdělení, v tomto případě exponenciálního. V praxi se pro vyjádření intenzity poruch (a výsledků predikce) často používají nejrůznější způsoby a označení, jako například: počet poruch za hodinu (FR); počet poruch za milion hodin (FPMH); počet poruch v čase (za 10^9 hodin) (FIT); počet poruch za milion kilometrů (FPMK).

Databáze bezporuchovosti poskytují pro konkrétní typy prvků (např. šroub s šestihrannou hlavou) číselné hodnoty ukazatelů bezporuchovosti.

Metodiky predikce bezporuchovosti obsahují pro jednotlivé skupiny prvků (např. rezistory) výpočtové postupy, které umožňují volbou nejrůznějších koeficientů zohlednit konkrétní reálnou situaci a vypočítat hodnotu ukazatele bezporuchovosti.

Ve většině dále uvedených databází a metodik jsou hodnoty ukazatelů bezporuchovosti vždy uváděny pro různé úrovně kvality prvku a různá provozní prostředí. *Úroveň kvality prvku* charakterizuje úroveň návrhu, vývoje a výroby daného prvku. Nejčastěji se lze setkat s následujícími úrovněmi kvality: unknown; lower; commercial; military-specific; atd. *Provozní prostředí* charakterizuje okolní prostředí, ve kterém bude prvek provozován. Příklady používaných kategorií provozních prostředí jsou: Ground, Benign (G_B); Ground, Fixed (G_F); Ground, Mobile (G_M); Naval, Sheltered (N_S); Airbone, Inhabited, Cargo (A_{IC}), Space, Flight (S_F); Missile, Launch (M_L); atd.

Pro provedení predikce bezporuchovosti s využitím databází a metodik je nezbytné mít k dispozici potřebné vstupní informace. Mezi základní informace patří:

- specifikace podmínek provozu a prostředí;
- přehled požadavků na spolehlivost a bezporuchovost systému a prvků;
- funkční struktura systému;
- rozčlenění systému na jednotlivé prvky;
- podrobné informace o jednotlivých prvcích (typ, úroveň kvality, ...).

Výsledkem predikce bezporuchovosti s využitím databáze nebo metodiky je obvykle:

- intenzita poruch každého prvku systému;
- přehled použitých zdrojů pro predikci bezporuchovosti;
- uvažovaná úroveň kvality a uvažované provozní prostředí pro každý prvek;
- dokumentovaný postup výpočtu (predikce bezporuchovosti každého prvku).

Minimálně by měl výsledek predikce bezporuchovosti pro každý prvek obsahovat intenzitu poruch a její zdroj.

3. Databáze bezporuchovosti

3.1 Základní databáze bezporuchovosti

Dále jsou uvedeny databáze bezporuchovosti, které jsou v současné době mezinárodně uznávané a nejčastěji používané v oblasti strojírenství, elektrotechniky a elektroniky. Vždy jsou uváděny nejnovější verze, revize, resp. vydání, které jsou aktuální k datu vzniku příspěvku (květen 2016).

NPRD

Databáze *NPRD-2016 – Nonelectronic Parts Reliability Data* [21] (Data o bezporuchovosti neelektronických prvků) byla vydána americkou společností Quanterion Solutions Incorporated v roce 2015. NPRD-2016 je aktuální revizí databáze NPRD-2011, která byla vytvořena americkou společností Reliability Information Analysis Center (RIAC). Obě revize navazují na nejrozšířenější revizi NPRD-95, která byla vytvořena americkou

společností System Reliability Center (SRC) (dříve Reliability Analysis Center – RAC, které působilo jako účelové zařízení Ministerstva obrany USA).

Databáze NPRD-2016 obsahuje údaje o intenzitách poruch široké škály elektrických, elektromechanických a mechanických prvků. Údaje byly získány dlouhodobým sledováním systémů a prvků v provozu, které probíhalo již od počátku 70. let 20. století až do roku 2014. Sběr dat byl přitom zaměřen na získání údajů o relativně nových prvcích, s nimiž nebyly dostatečné zkušenosti, a to z nejrůznějších zdrojů, provozních podmínek a úrovní kvality.

Mezi hlavní cíle databáze patří poskytnutí údajů o intenzitách poruch prvků vyrobených v komerční kvalitě, poskytnutí údajů o intenzitách poruch nejmodernějších součástí a doplnění obdobných metodik o údaje o prvcích, které v nich nejsou obsaženy.

Databázi NPRD-2016 lze zakoupit ve formě knihy, elektronického dokumentu, jako součást komplexních řešení společnosti Quanterion zahrnujících sadu databází NPRD, EPRD a FMD (softwarová databáze, on-line databáze, elektronický dokument) a jako součást většiny komplexních softwarových produktů pro oblast spolehlivosti.

Další informace lze nalézt na webových stránkách současného producenta: <https://www.querion.com/>.

EPRD

Databáze *EPRD-2014 – Electronic Parts Reliability Data* [12] (Data o bezporuchovosti elektronických prvků) byla vydána americkou společností Quanterion Solutions Incorporated v roce 2014. EPRD-2014 navazuje na předchozí revizi EPRD-97, která byla vytvořena americkou společností System Reliability Center (SRC) (dříve Reliability Analysis Center – RAC, které působilo jako účelové zařízení Ministerstva obrany USA).

Databáze EPRD-2014 obsahuje údaje o intenzitách poruch elektronických prvků. Jedná o následující prvky: integrované obvody, diskrétní polovodiče (diody, tranzistory, optoelektronické prvky), tyristory, rezistory, kondenzátory, cívky, transformátory, konektory, relé a spínače. Údaje byly získány dlouhodobým sledováním systémů a prvků v provozu, které probíhalo již od počátku 70. let 20. století až do roku 2013. Sběr dat byl zaměřen na získání údajů o relativně nových prvcích, s nimiž nebyly dostatečné zkušenosti, a to z nejrůznějších zdrojů, provozních podmínek a úrovní kvality.

Mezi hlavní cíle databáze patří poskytnutí údajů o intenzitách poruch prvků vyrobených v komerční kvalitě, poskytnutí údajů o intenzitách poruch nejmodernějších součástí a zejména doplnění MIL-HDBK-217F o údaje o prvcích, které v ní nejsou obsaženy.

Databázi EPRD-2014 lze zakoupit ve formě knihy, elektronického dokumentu, jako součást komplexních řešení společnosti Quanterion zahrnujících sadu databází NPRD, EPRD a FMD (softwarová databáze, on-line databáze, elektronický dokument) a jako součást většiny komplexních softwarových produktů pro oblast spolehlivosti.

Další informace lze nalézt na webových stránkách současného producenta: <https://www.querion.com/>.

FMD

Databáze *FMD-2016 – Failure Mode/Mechanism Distributions* [15] (Rozložení způsobů poruch) byla vydána americkou společností Quanterion Solutions Incorporated v roce 2015. FMD-2016 je aktuální revizí databáze FMD-2013, která byla vytvořena

americkou společností Reliability Information Analysis Center (RIAC). Obě revize navazují na nejrozšířenější revizi FMD-97, která byla vytvořena americkou společností System Reliability Center (dříve Reliability Analysis Center – RAC, které působilo jako účelové zařízení Ministerstva obrany USA).

FMD-2016 není databází obsahující číselné hodnoty ukazatelů bezporuchovosti, ale vzhledem k její úzké návaznosti na predikci bezporuchovosti je nezbytné ji zmínit. Databáze FMD-2016 obsahuje údaje o pravděpodobnosti výskytu jednotlivých způsobů poruch u konkrétních elektronických, elektrických, elektromechanických a mechanických prvků. Údaje byly získány dlouhodobým sledováním systémů a prvků v reálném provozu.

Hlavním cílem databáze FMD-2016 je poskytnout nezbytné podklady pro provádění prediktivních analýz spolehlivosti, především FMECA a FTA.

Databázi FMD-2016 lze zakoupit ve formě knihy, elektronického dokumentu, jako součást komplexních řešení společnosti Quanterion zahrnujících sadu databází NPRD, EPRD a FMD (softwarová databáze, on-line databáze, elektronický dokument) a jako součást většiny komplexních softwarových produktů pro oblast spolehlivosti.

Další informace lze nalézt na webových stránkách současného producenta: <https://www.quanterion.com/>.

SPIDR™

Databáze *SPIDR™* – *System and Part Integrated Data Resource* (Integrovaný zdroj dat o systémech a prvcích) byla vydána na počátku roku 2006 společností System Reliability Center (SRC) (dříve Reliability Analysis Center – RAC, které působilo jako účelové zařízení Ministerstva obrany USA).

Databáze *SPIDR™* je komplexní produkt, který v době vydání nahrazoval databáze NPRD-95, EPRD-97 a FMD-97 a obsahoval více než dvojnásobek aktualizovaných dat oproti původnímu balíku databází. Konkrétně databáze obsahuje data o více než 6000 typů elektronických, elektrických, elektromechanických a mechanických prvků. Databáze je založena na téměř 40 letech zkušeností a sběru dat realizovaném společností RAC, respektive SRC.

Databázi *SPIDR™* lze zakoupit jako samostatný softwarový produkt společnosti System Reliability Center.

Další informace lze nalézt na webových stránkách producenta: <http://src.alionscience.com/>.

3.2 *Specifické databáze bezporuchovosti*

Dále jsou uvedeny databáze, které jsou prioritně určeny pro použití v konkrétních průmyslových oblastech. Vždy jsou uváděny nejnovější verze, revize, resp. vydání, které jsou aktuální k datu vzniku příspěvku (květen 2016).

OREDA

Databáze *Offshore and Onshore Reliability Data (OREDA)* (byla vytvořena v rámci společného projektu společností podnikajících v ropném a plynárenském průmyslu. Projekt *OREDA* byl zahájen v roce 1981 pod záštitou Norwegian Petroleum Directorate a funguje dodnes. Mezi účastníky projektu patří, mimo jiné, společnosti Shell, Total, Petrobras a BP.

Přístup do kompletní databáze mají pouze společnosti podílející se na projektu. Pro ostatní zájemce je vydávána příručka OREDA.

První vydání příručky OREDA (Offshore Reliability Data) proběhlo v roce 1984. V současné době je aktuální již 6. edice – OREDA Handbook 2015, přičemž název této edice byl rozšířen o slovo „onshore“. Databáze OREDA obsahuje data o poruchách a údržbě více než 17 000 prvků provozovaných na pobřežních a pevninských ropných a plynárenských zařízeních. Poslední vydání příručky obsahuje data získaná v letech 1981 až 2009.

Příručku OREDA lze zakoupit v papírové podobě. Další informace lze nalézt na webových stránkách: <http://www.oreda.com/>.

PDS Data Handbook

Příručka *Reliability Data for Safety Instrumented Systems – PDS Data Handbook 2013 Edition* byla vydána norskou nezávislou výzkumnou organizací SINTEF v roce 2013. Dřívější edice používaly název *Reliability Data for Control and Safety Systems – PDS Data Handbook*. Příručka obsahuje data o intenzitách poruch prvků bezpečnostních přístrojových systémů (tzv. SIS).

Příručku lze zakoupit a další informace lze nalézt na webových stránkách: <https://www.sintef.no/projectweb/pds-main-page/>.

SERH

Příručka *Safety Equipment Reliability Handbook – 4th Edition (SERH)* byla vydána celosvětově působící společností exida (psáno s malým „e“) v roce 2015. Příručka obsahuje data o intenzitách poruch prvků bezpečnostních přístrojových systémů (tzv. SIS).

Příručku SERH lze zakoupit v elektronické podobě. Další informace lze nalézt na webových stránkách producenta: <http://www.exida.com/>.

EIREDA

Kniha *European Industry Reliability Data Bank (EIREDA)* byla vydána v roce 1998 (3. vydání) pod záštitou evropské asociace ESReDA (European Safety, Reliability & Data Association). Kniha obsahuje data o bezporuchovosti prvků provozovaných ve francouzských jaderných elektrárnách v letech 1978 až 1995. Kniha již není běžně dostupná k zakoupení.

IAEA-TECDOC-478

Technická zpráva *IAEA-TECDOC-478 – Component Reliability Data for Use in Probabilistic Safety Assessment* [17] byla vydána Mezinárodní agenturou pro atomovou energii (IAEA) v roce 1988. Zpráva obsahuje data o intenzitách poruch generických prvků z oblasti jaderné energetiky. Data byla získána zejména ze specializované literatury a odborných studií z oblasti spolehlivosti a bezpečnosti jaderných zařízení.

Technickou zprávu lze v elektronické podobě legálně a zdarma získat na webových stránkách metodiky IAEA: <http://www-pub.iaea.org/books/>.

4. Metodiky predikce bezporuchovosti

Dále jsou uvedeny metodiky predikce bezporuchovosti, které jsou v současné době mezinárodně uznávané a nejčastěji používané. Vždy jsou uváděny nejnovější verze, revize, resp. vydání, které jsou aktuální k datu vzniku příspěvku (květen 2016).

MIL-HDBK-217

Norma *MIL-HDBK-217F – Military Handbook: Reliability Prediction of Electronic Equipment* [20] (Vojenská příručka: Predikce bezporuchovosti elektronických zařízení) je obranným standardem vydaným Ministerstvem obrany USA. Byla vytvořena v roce 1961 a od té doby byla již několikrát revidována, naposledy v roce 1995 (rev. F, notice N2), kdy byl její vývoj ze strany Ministerstva obrany ukončen.

Od roku 2007 Centrum námořních a pozemních sil (NSWC) při Námořnictvu USA, konkrétně divize Crane, koordinovalo činnosti vedoucí k vydání revize G normy MIL-HDBK-217. Výsledkem bylo v roce 2011 vydání pracovní verze pro recenzi ze strany odborné veřejnosti. Avšak z interních důvodů na straně NSWC byla tato pracovní verze stažena a dosud nebyla oficiálně vydána [25].

Norma byla primárně vyvinuta pro potřeby predikce bezporuchovosti armádních elektronických systémů, ale postupem času se její použití rozšířilo do řady oblastí mimo armádu a v současnosti je nejpoužívanější metodikou predikce bezporuchovosti elektronických prvků.

V normě uvedené hodnoty veličin, které jsou užívány pro výpočet intenzity poruch, byly získány z odhadů založených na analýzách skutečných poruch v provozu. Norma obsahuje výpočtové postupy pro generické typy elektronických prvků a není reálně možné, aby obsahovala údaje pro všechny typy jednotlivých prvků. Generické typy prvků obsažené v normě jsou následující: mikroobvody, polovodiče, elektronky, lasery, rezistory, kondenzátory, cívky, rotační prvky, relé, spínače, konektory, spojovací a propojovací prvky, křemíkové krystaly, žárovky, elektronické filtry a pojistky.

Norma obsahuje dvě odlišné metody predikce bezporuchovosti: metodu predikce počítáním z prvků („parts count“) a metodu predikce namáháním prvků („part stress“).

Predikce bezporuchovosti prvků dle MIL-HDBK-217F metodou namáháním prvků je použitelná v případě, když je návrh a vývoj produktu z větší části dokončen a když je k dispozici podrobná specifikace jednotlivých prvků a jejich namáhání.

Základní postup určení intenzity poruch je založen na násobení výchozí (základní) intenzity poruch prvku s koeficienty namáhání podmínkami provozu a prostředí. Matematický model pro určení intenzity poruch prvku při použití metody namáhání je uveden na příkladu polovodičových prvků:

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_T \pi_A \pi_R \pi_S \pi_C \pi_Q \pi_E$$

kde: λ_p = výsledná intenzita poruch prvku; λ_b = základní intenzita poruch; π_T = koeficient závislosti na teplotě; π_A = koeficient závislosti na použití; π_R = koeficient závislosti na jmenovitém výkonu; π_S = koeficient závislosti na elektrickém zatížení; π_C = koeficient závislosti na konstrukci; π_Q = koeficient závislosti na kvalitě; π_E = koeficient závislosti na prostředí.

Koeficienty závislosti na kvalitě (π_Q) a prostředí (π_E) jsou použity v modelech pro většinu generických typů prvků. Použití i význam ostatních koeficientů se pro jednotlivé typy prvků liší. Konkrétní hodnoty výchozí intenzity poruch a všech potřebných koeficientů se určují dle tabulek uvedených v normě.

Predikce bezporuchovosti prvků dle MIL-HDBK-217F metodou počítání z prvků je použitelná v počátečních etapách návrhu a vývoje produktu, kdy není k dispozici dostatek informací potřebných pro použití metody namáhání prvků.

Tato metoda je relativně jednoduchou metodou predikce bezporuchovosti, která využívá předdefinovaných hodnot namáhání. Pro její použití je nezbytné znát alespoň generický typ prvku, úroveň kvality prvku a provozní podmínky. Matematický model pro určení intenzity poruch celého zařízení při použití metody počítání z prvků je následující:

$$\lambda_{EQUIP} = \sum_{i=1}^{i=n} N_i (\lambda_g \pi_Q)_i$$

kde: λ_{EQUIP} = celková intenzita poruch zařízení; λ_g = generická intenzita poruch pro i -tý generický prvek; π_Q = koeficient závislosti na kvalitě pro i -tý generický prvek; N_i = počet i -tých generických prvků; n = počet rozdílných kategorií generických prvků v zařízení.

Uvedený vztah lze využít, pokud je při určování generických intenzit všech prvků uvažováno stejné provozní prostředí. V případě, že jsou pro různé generické prvky uvažována různá prostředí, měl by být uvedený vztah použit na jednotlivé části zařízení zvlášť.

Číselné hodnoty generické intenzity poruch (λ_g) pro jednotlivá prostředí a koeficientu závislosti na kvalitě (π_Q) pro jednotlivé generické prvky jsou obsaženy v normě.

Obecně metoda predikce počítáním z prvků poskytuje více konzervativní odhady intenzit poruch prvků než metoda predikce namáháním prvků.

Normu MIL-HDBK-217F lze v elektronické podobě legálně a zdarma získat na webových stránkách ASSIST (Acquisition Streamlining and Standardization Information System): <http://quicksearch.dla.mil/>. Postupy predikce založené na normě MIL-HDBK-217F jsou součástí většiny komplexních softwarových produktů pro oblast spolehlivosti.

PRISM[®]

PRISM[®] – Reliability Prediction and Database for Electronic and Non-electronic Parts (Predikce a databáze bezporuchovosti pro elektronické a neelektronické prvky) je metodikou predikce bezporuchovosti prvků, vyvinutou americkou společností System Reliability Center (SRC), která do června 2005 působila pod jménem Reliability Analysis Center (RAC) jako účelové zařízení Ministerstva obrany USA. Metodika byla vydána na počátku roku 1999 s cílem nahradit zastarávající metodiky popsané v MIL-HDBK-217F. Naposledy byla metodika aktualizována v roce 2003.

Metodika odhadu bezporuchovosti PRISM[®] se skládá ze dvou částí. Nejprve jsou na úrovni prvků určeny intenzity poruch, které jsou poté na úrovni systémů modifikovány procesními koeficienty, které vystihují příčiny vzniku poruch.

Matematický model intenzity poruch systému při použití metodiky PRISM[®] je následující:

$$\lambda_P = \lambda_{IA} \left(\frac{\Pi_P \Pi_{IM} \Pi_E + \Pi_D \Pi_G + \Pi_M \Pi_{IM} \Pi_E \Pi_G +}{+ \Pi_S \Pi_G + \Pi_I + \Pi_N + \Pi_W} \right) + \lambda_{SW}$$

kde: λ_P = predikovaná intenzita poruch systému; λ_{IA} = odhad počáteční intenzity poruch; Π_P = multiplikátor procesů prvků; Π_{IM} = koeficient počáteční fáze provozu; Π_E = koeficient provozního prostředí; Π_D = multiplikátor procesu vývoje; Π_G = koeficient růstu bezporuchovosti; Π_M = multiplikátor procesu výroby; Π_S = multiplikátor procesu systému managementu; Π_I = multiplikátor vyvolaného procesu; Π_N = multiplikátor procesu bez vad; Π_W = multiplikátor procesu opotřebení; λ_{SW} = predikce intenzity poruch softwaru.

Uvedený model vyžaduje jako vstupní hodnotu odhad počáteční intenzity poruch (λ_{IA}). Ten lze provést pomocí modelu nazvaného *RACRates* (je součástí metodiky), databázi bezporuchovosti prvků nebo lze využít vlastní data.

Dále je uveden princip určení počátečního odhadu intenzity poruch (λ_{IA}) pomocí *RACRates* modelu. Model uvažuje pro každý generický typ mechanismu poruchy samostatnou intenzitu poruch, která je poté akcelerována příslušným zatížením nebo vlastností prvku. Matematické vyjádření obecného modelu je následující:

$$\lambda_{IA} = \lambda_o \pi_o + \lambda_e \pi_e + \lambda_c \pi_c + \lambda_i + \lambda_{sj} \pi_{sj}$$

kde: λ_{IA} = odhad počáteční intenzity poruch; λ_o = intenzita poruch určená z provozního namáhání; π_o = multiplikátor pro provozní namáhání; λ_e = intenzita poruch určená z namáhání provozním prostředím; π_e = multiplikátor pro namáhání provozním prostředím; λ_c = intenzita poruch určená z namáhání výkonovými nebo teplotními cykly; π_c = multiplikátor pro cyklické namáhání; λ_i = intenzita poruch určená z vyvolaných namáhání, včetně elektrických přepětí; λ_{sj} = intenzita poruch určená z namáhání pájenými spoji; π_{sj} = multiplikátor pro namáhání pájenými spoji.

Modely pro jednotlivé typy prvků se liší, ale vychází z uvedeného obecného modelu. Číselné hodnoty intenzit poruch, koeficientů a multiplikátorů se určují na základě vstupních informací o prostředí, provozu, vývoji, výrobě, namáhání atd.

Metodiku PRISM[©] lze zakoupit jako stejnojmenný softwarový produkt (verze 1.5 z roku 2003) společností System Reliability Center (SRC) a lze ji také zakoupit jako součást některých komplexních softwarových produktů pro oblast spolehlivosti.

Další informace lze nalézt na webových stránkách producenta: <http://src.alionscience.com/>.

217Plus™

217Plus™:2015 – Reliability Prediction Models (Modely predikce bezporuchovosti) je metodikou predikce bezporuchovosti prvků vydanou americkou společností Quanterion Solutions Incorporated v roce 2015. *217Plus™:2015* je aktuální revizí metodiky *217Plus™*, která byla vytvořena americkou společností Reliability Information Analysis Center (RIAC). Poprvé byla metodika *217Plus™* vydána v červenci 2006 [16] s cílem plně nahradit zastaralou MIL-HDBK-217F a starší konkurenční produkt PRISM[©]. Vzhledem k tomu, že na vývoji metodiky *217Plus™* pracovali stejní tvůrci, kteří vyvinuli metodiku PRISM[©], jsou si tyto dvě metodiky dosti podobné.

Metodika umožňuje predikci bezporuchovosti třinácti skupin elektronických prvků, konkrétně: kondenzátorů, konektorů, diod, cívek, integrovaných obvodů, optoelektronických

součástí, relé, rezistorů, spínačů, tyristorů, tranzistorů, transformátorů a fotonických prvků. Přičemž modely u šesti skupin jsou modernější než u metodiky PRISM[©].

Predikce bezporuchovosti dle metodiky 217PlusTM:2015 se provádí ve dvou stupních. Nejprve je na úrovni komponent vypočtena bezporuchovost jednotlivých prvků, která je poté na úrovni systému modifikována systémovými koeficienty.

Obecný matematický model intenzity poruch na úrovni komponent je následující:

$$\lambda_p = \lambda_o \pi_o + \lambda_e \pi_e + \lambda_c \pi_c + \lambda_i + \lambda_{sj} \pi_{sj}$$

kde: λ_p = predikovaná intenzita poruch; λ_o = intenzita poruch z provozního namáhání; π_o = multiplikátor intenzity poruch z provozní namáhání; λ_e = intenzita poruch z namáhání prostředím; π_e = multiplikátor intenzity poruch z namáhání prostředím; λ_c = intenzita poruch z namáhání výkonovými nebo teplotními cykly; π_c = multiplikátor intenzity poruch pro cyklické namáhání; λ_i = intenzita poruch z vyvolaných namáhání, včetně elektrických přepětí; λ_{sj} = intenzita poruch z namáhání pájenými spoji; π_{sj} = multiplikátor intenzity poruch pro namáhání pájenými spoji.

Modely pro jednotlivé skupiny prvků se liší, ale vychází z uvedeného obecného modelu. Číselné hodnoty intenzit poruch a koeficientů se určují na základě vstupních informací o prostředí, provozu, vývoji, výrobě, namáhání atd. Intenzitu poruch na úrovni komponent lze určit i s využitím jiných databází a metodik, případně lze využít vlastní data.

Obecný matematický model intenzity poruch na systémové úrovni je následující:

$$\lambda_p = \lambda_{IA} \left(\begin{array}{l} \Pi_P \Pi_{IM} \Pi_E + \Pi_D \Pi_G + \Pi_M \Pi_{IM} \Pi_E \Pi_G + \\ + \Pi_S \Pi_G + \Pi_I + \Pi_N + \Pi_W \end{array} \right) + \lambda_{SW}$$

kde: λ_p = predikovaná intenzita poruch systému; λ_{IA} = odhad počáteční intenzity poruch systému; Π_P = koeficient úrovně procesů prvků; Π_{IM} = koeficient počáteční fáze provozu; Π_E = koeficient prostředí; Π_D = koeficient úrovně procesu vývoje; Π_G = koeficient růstu bezporuchovosti; Π_M = koeficient úrovně procesu výroby; Π_S = koeficient úrovně procesu systému managementu; Π_I = koeficient úrovně vyvolaného procesu; Π_N = koeficient úrovně procesu bez vad; Π_W = koeficient úrovně procesu opotřebení; λ_{SW} = intenzita poruch softwaru.

Číselné hodnoty koeficientů na úrovni systému se určují prostřednictvím odpovědí na bodované otázky.

Metodiku 217PlusTM:2015 lze zakoupit ve formě knihy nebo elektronického dokumentu (HDBK-217Plus:2015 – Handbook of 217PlusTM Reliability Prediction Models), jako samostatný softwarový produkt společnosti Quanterion (217PlusTM:2015 Calculator) a jako součást některých komplexních softwarových produktů pro oblast spolehlivosti.

FIDES

Metodika FIDES popsána v příručce *FIDES Guide 2009 Edition A – Reliability Methodology for Electronic Systems* [13] (FIDES příručka 2009 Edice A – Metodika bezporuchovosti pro elektronické systémy) byla vydána v roce 2010 pod záštitou Ministerstva obrany Francie. Jedná se o první aktualizaci druhého vydání (z roku 2009), přičemž poprvé byla příručka vydána v roce 2004 jako standard DGA-DM/STTC/CO/477-A [14]. V roce 2011 francouzská standardizační organizace UTE akceptovala příručku FIDES a vydala ji jako francouzskou telekomunikační normu pod označením UTE C 80-811. Příručku

vypracovalo konsorcium FIDES, složené z francouzských průmyslových podniků působících v oblastech letectví a obranného průmyslu. Mezi členy konsorcia patří např. Airbus, Eurocopter a Thales.

Metodika byla vyvinuta s využitím praktických dat z oblasti letectví a vojenství a dat od výrobců. Má za cíl umožnit realistickou predikci bezporuchovosti elektronických zařízení, včetně systémů pracujících v náročných podmínkách (obránné systémy, letectví, atd.).

Metodika poskytuje modely pro elektrické, elektronické a elektromechanické prvky a pro součásti plošných spojů. Bere v úvahu všechny technologické a fyzikální faktory, které mají vliv na bezporuchovost produktu. Konkrétně bere v úvahu typ mise, elektrická, mechanická a teplotní přetížení a poruchy související s procesy vývoje, výroby, provozu a údržby. Je použitelná ve všech oblastech využívajících elektroniku.

Základní matematický model pro výpočet intenzity poruch prvku je následující:

$$\lambda = \lambda_{Physical} \Pi_{PM} \Pi_{Process}$$

kde: $\lambda_{Physical}$ = fyzikální příspěvek k intenzitě poruch; Π_{PM} = koeficient zahrnující kvalitu a technické zvládnutí výroby prvku; $\Pi_{Process}$ = koeficient zahrnující kvalitu a technické zvládnutí procesů vývoje, výroby a provozu produktu, ve kterém je prvek obsažen.

Fyzikální příspěvek ($\lambda_{Physical}$) lze matematicky vyjádřit následovně:

$$\lambda_{Physical} = \left[\sum_{Physical_Contributions} (\lambda_0 \Pi_{Acceleration}) \right] \Pi_{Induced}$$

kde výraz v hranaté závorce vyjadřuje příspěvek jmenovitých omezení a $\Pi_{Induced}$ je příspěvek vyvolaných přetížení příslušejících dané oblasti použití.

Příspěvek jmenovitých omezení zahrnuje výchozí intenzitu poruch (λ_0) přiřazenou všem prvkům, příspěvek charakteristický pro použitou technologii a koeficient zrychlení ($\Pi_{Acceleration}$) používaný pro přiřazení fyzických omezení, kterým je prvek vystaven během používání. Příspěvek charakteristický pro použitou technologii je zahrnut ve výchozí intenzitě a koeficientu zrychlení.

Koeficient Π_{PM} charakterizující kvalitu prvku lze matematicky vyjádřit následovně:

$$\Pi_{PM} = \exp[\delta_1(1 - Part_Grade) - \alpha_1]$$

kde δ_1 a α_1 jsou koeficienty korelace vyjadřující míru vlivu koeficientu Π_{PM} na bezporuchovost prvku. Přičemž koeficient Π_{PM} závisí na úrovni zabezpečování kvality u dodavatele, úrovni zabezpečování kvality prvku, úrovni zabezpečování bezporuchovosti prvku a na zkušenostech s dodavatelem prvku.

Faktor $\Pi_{Process}$, charakterizující kvalitu a technické zvládnutí procesů ovlivňujících bezporuchovost produktu během životního cyklu, lze matematicky vyjádřit následovně:

$$\Pi_{Process} = \exp[\delta_2(1 - Process_Grade)]$$

kde: $Process_Grade$ = stupeň vyjadřující úroveň řízení procesů; δ_2 = koeficient korelace vyjadřující rozsah $\Pi_{Process}$ faktoru.

Určení konkrétních hodnot všech faktorů a potřebných vstupních hodnot se provádí na základě tabulek, vztahů a doporučení uvedených v příručce.

Příručku obsahující metodiku FIDES lze v elektronické podobě legálně a zdarma získat na webových stránkách metodiky FIDES: <http://fides-reliability.org/>. Na uvedených stránkách je volně ke stažení také jednoúčelový softwarový nástroj pro predikci dle metodiky FIDES. Postupy predikce založené na metodice FIDES jsou součástí některých komplexních softwarových produktů pro oblast spolehlivosti.

RDF 2000 (IEC/TR 62380)

Mezinárodní norma *IEC/TR 62380 – Reliability Data Handbook – A universal model for reliability prediction of electronics components, PCBs and equipment* (Příručka dat o bezporuchovosti – Obecný model pro predikci bezporuchovosti elektronických prvků, desek plošných spojů a příslušenství) byla vydána mezinárodní elektrotechnickou komisí (IEC) v srpnu 2004. Norma vychází z francouzské telekomunikační normy UTE C 80-810 [23] vydané v roce 2000. Metodika uvedená v obou normách je známa pod označením RDF 2000. Metodika RDF2000 kompletně nahradila původní verzi známou pod označením CNET RDF93.

Metodika obsahuje výpočtové modely pro celou řadu elektronických prvků, zejména pro desky plošných spojů a jejich součástí. Metodika zohledňuje celou řadu ovlivňujících faktorů a zejména umožňuje zohlednit profil zatížení prvku.

Normu IEC/TR 62380 lze zakoupit, jako většinu norem IEC, v papírové nebo elektronické podobě. Postupy predikce založené na metodice RDF2000 jsou součástí většiny komplexních softwarových produktů pro oblast spolehlivosti.

Další informace lze nalézt na webových stránkách IEC: <http://www.iec.ch/>.

Telcordia SR-332

Norma *SR-332 – Reliability Prediction Procedures for Electronic Equipment* (Postupy predikce bezporuchovosti pro elektronická zařízení) byla vytvořena společností Telcordia Technologies (dnes součást korporace Ericsson), která vznikla transformací společnosti AT&T Bell Laboratories. Proto jsou starší vydání metodiky nazývány Bellcore SR-332. Původní norma Bellcore SR-332 měla šest vydání. V současnosti je aktuální čtvrté vydání normy Telcordia SR-332 z března 2016. Společnost Telcordia metodiku pravidelně aktualizuje přibližně každých pět let.

Metodika uvedená v normě vychází z principů uvedených v MIL-HDBK-217F, lépe však odráží specifika telekomunikačního průmyslu a umožňuje zohlednit tzv. zahořování. Predikci lze provádět třemi různými metodami, které jsou založeny na počítání z dílů, datech získaných laboratorními zkouškami a datech získaných sledováním prvků v provozu. Metodika je určena především pro komerční elektronické produkty a je velmi rozšířená v oblasti telekomunikací.

Normu Telcordia SR-332 lze zakoupit v elektronické podobě. Postupy predikce založené na normě SR-332 jsou součástí většiny komplexních softwarových produktů pro oblast spolehlivosti.

Další informace lze nalézt na webových stránkách: <http://telecom-info.telcordia.com/>.

GJB/z 299

Norma *GJB/z 299C – Reliability Calculation Model for Electronic Equipment* (Model pro výpočet bezporuchovosti elektronických zařízení) byla vytvořena Čínskou lidovou osvobozenou armádou a vydána v roce 2006. Dřívější revize, označovaná GJB/z 299B,

byla v květnu 2001 přeložena do angličtiny. Norma a v ní popsaná metodika je někdy nazývána zjednodušeně jako China 299C (resp. China 299B).

Metodika je založena na principech uvedených v MIL-HDBK-217 a obsahuje výpočtové postupy pro predikci bezporuchovosti elektronických prvků metodami počítáním z prvků a namáháním prvků.

Norma je dostupná ve formě papírové nebo elektronické. Postupy predikce založené na normě GJB/z 299C jsou součástí většiny komplexních softwarových produktů pro oblast spolehlivosti.

NSWC

Příručka *Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment* (Příručka postupů predikce bezporuchovosti mechanických zařízení) byla vytvořena Centrem námořních a pozemních sil (NSWC) při Námořnictvu Spojených států amerických, divize Carderock. Poslední revize příručky byla vydána v květnu 2011 pod označením NSWC-11 [22]. V posledních deseti letech byla příručka několikrát aktualizována.

Příručka NSWC-11 obsahuje výpočtové modely pro různé typy mechanických prvků používaných zejména v lodním průmyslu (např. ložiska, pružiny, hřídele atd.). Modely umožňují zohlednit teplotní namáhání, silové namáhání a mnoho dalších vlivů. Jedná se o jedinou široce rozšířenou metodiku vyvinutou pro mechanické prvky.

Příručka NSWC-11 a její předchozí verze jsou dostupné v elektronické podobě, dále ve formě jednoúčelového software MechRel vytvořeného NSWC a postupy predikce založené na NSWC-11 nebo jejích předchozích revizích jsou součástí většiny komplexních softwarových produktů pro oblast spolehlivosti.

Siemens SN29500

SN29500 je podnikovou normou společnosti Siemens. Norma je rozdělena do dvanácti samostatných dokumentů, jejichž poslední revize byly vydány v rozmezí let 2004 až 2011. Norma obsahuje metodiku predikce bezporuchovosti založenou na postupech popsaných v normě IEC 61709. Norma obsahuje výpočtové modely pro elektrické a elektronické prvky.

Norma není běžně dostupná, protože má charakter vnitropodnikového standardu. Postupy predikce založené na normě SN29500 jsou součástí většiny komplexních softwarových produktů pro oblast spolehlivosti.

HRD

Metodika HRD byla naposledy vydána v příručce *British Handbook of Reliability Data for Electronic Components used in Telecommunication Systems (HRD-5)* (Britská příručka dat o bezporuchovosti pro elektronické komponenty používané v telekomunikačních systémech) v roce 1994. Příručku vydala britská společnost British Telecommunications (BT Group). Předchozí revize příručky byla označena HRD-4. Příručka obsahuje výpočtové modely zejména pro elektronické prvky používané v oblasti telekomunikací.

Příručka již není dostupná, avšak postupy predikce založené na metodice HRD-5 jsou součástí některých komplexních softwarových produktů pro oblast spolehlivosti.

5. Další zdroje informací k predikci bezporuchovosti

Dále uvedené zdroje neobsahují databáze ani metodiky predikce bezporuchovosti, tj. neumožňují samostatně předpovědět číselnou hodnotu ukazatele bezporuchovosti. Avšak uvedené zdroje mají velmi těsnou vazbu na problematiku predikce bezporuchovosti.

ANSI/VITA 51.1

Norma *ANSI/VITA 51.1-2008 – Reliability Prediction MIL-HDBK-217 Subsidiary Specification* [8] obsahuje předdefinované hodnoty a metody určené pro přizpůsobení modelů obsažených v MIL-HDBK-217F Notice 2. Norma ANSI/VITA 51.1-2008 není revizí MIL-HDBK-217F, norma pouze normalizuje vstupy do modelů MIL-HDBK-217F, aby bylo dosaženo věrohodnějších výsledků predikce.

IEEE 1413

Normy *IEEE 1413-2010 – IEEE Standard Framework for Reliability Prediction of Hardware* [18] a *IEEE 1413.1-2002 – IEEE Guide for Selecting and Using Reliability Predictions Based on IEEE 1413* [19] stanovují základní pravidla pro provedení predikce bezporuchovosti. Dále normy poskytují informace nezbytné pro pochopení predikce, správnou interpretaci výsledků predikce a dokumentaci postupu predikce.

IEC 61709 (ČSN EN 61709)

Norma *ČSN EN 61709 ed. 2 – Elektrické součástky – Bezporuchovost – Referenční podmínky pro intenzity poruch a modely namáhání pro přepočty* [11] je určena pro předpověď bezporuchovosti prvků za podmínek, za nichž se skutečně používají. Norma neobsahuje data o bezporuchovosti prvků, ale popisuje, jak se mají data získaná z jiných zdrojů používat pro predikci bezporuchovosti za odlišných podmínek prostředí a namáhání. V současné době probíhá v rámci IEC příprava 3. vydání normy.

6. Softwary pro predikci bezporuchovosti

Dále je uveden přehled významných softwarů určených pro podporu predikce bezporuchovosti. Na trhu je dostupné široké spektrum softwarů od zdarma dostupných, přes jednoúčelové komerční (určené pouze pro predikci bezporuchovosti), až po komplexní komerční (určené pro celé spektrum činností v oblasti spolehlivosti). Vždy jsou uváděny informace o posledních a aktuálních verzích softwaru, které jsou platné k datu vzniku příspěvku (květen 2016).

6.1 *Zdarma dostupné softwary*

MechRel

Software, mimo jiné, pro provádění predikce bezporuchovosti dle metodiky NSWC, který byl vytvořen Centrem námořních a pozemních sil (NSWC) při Námořnictvu Spojených států amerických, divize Carderock. Dříve byl software dostupný na webových stránkách NSWC, divize Carderock. V současné době je software dostupný zřejmě pouze na vyžádání.

FIDES ExperTool

Jednoúčelový software (využívající MS Excel) pro provádění predikce bezporuchovosti dle metodiky FIDES, který vytvořilo konsorcium FIDES. Aktuální je verze 2.x z roku 2013. Zdarma jej lze získat na webových stránkách: <http://fides-reliability.org/>.

ALD MTBF Calculator

Jednoduchý software pro provádění predikce bezporuchovosti jednotlivých prvků dle většiny dostupných databází a metodik. Software byl vytvořen izraelskou společností ALD (Advanced Logistics Development). Aktuální je verze 3.0 z roku 2015. Software lze zdarma získat (po registraci) na webových stránkách producenta: <http://aldservice.com/>.

6.2 Jednoúčelové komerční softwary

Quanterion Automated Databook

Software pro provádění predikce bezporuchovosti jednotlivých prvků dle databází NPRD-2016, EPRD-2014 a FMD-2016, který vytvořila americká společnost Quanterion Solutions Incorporated. Předchůdcem byl software RIAC Automated Databook, vytvořený již neexistující americkou společností Reliability Information Analysis Center (RIAC). Poslední verze je z roku 2015. Software lze zakoupit na stránkách producenta: <https://www.quanterion.com/>.

Reliability Online Automated Databook System (ROADS)

Online databáze pro provádění predikce bezporuchovosti jednotlivých prvků dle databází NPRD-2016, EPRD-2014, FMD-2016 a jejich předchůdců, který vytvořila americká společnost Quanterion Solutions Incorporated. Demoverzi lze vyzkoušet a časově omezené předplatné lze zakoupit na stránkách producenta: <https://www.quanterion.com/>.

217Plus™:2015 Calculator

Software (ve formě souboru MS Excel) určený pro provádění predikce bezporuchovosti prvků a systémů dle metodiky 217Plus™:2015. Software vytvořila americká společnost Quanterion Solutions Incorporated. Předchůdcem (s výrazně odlišným uživatelským prostředím) byl samostatný software 217Plus™, vytvořený již neexistující americkou společností Reliability Information Analysis Center (RIAC). První a zatím poslední verze ve formátu MS Excel je z roku 2015. Software lze zakoupit na stránkách producenta: <https://www.quanterion.com/>.

PRISM[©]

Software určený pro provádění predikce bezporuchovosti prvků a systémů dle metodiky PRISM[©]. Software vytvořila americká společnost System Reliability Center (SRC), která do června 2005 působila pod jménem Reliability Analysis Center (RAC). Aktuální je verze 1.5 z roku 2003. Software lze zakoupit na stránkách producenta: <http://src.alionscience.com/>.

SPIDR™

Software pro provádění predikce bezporuchovosti jednotlivých prvků dle databáze SPIDR™, který vytvořila americká společnost System Reliability Center (SRC) (dříve RAC). První a současně poslední verze je z roku 2006. Software lze zakoupit na stránkách producenta: <http://src.alionscience.com/>.

6.3 *Komplexní komerční software*

Dále jsou uvedeny produkty od renomovaných producentů software zaměřených na podporu realizace celého spektra činností v oblasti spolehlivosti a bezpečnosti systémů. Většina producentů dodává software pro predikci bezporuchovosti samostatně. Většina producentů také umožňuje dodání softwaru obsahujícího buď všechny, nebo jen zákazníkem vybrané postupy predikce bezporuchovosti (metodiky a databáze), které daný software podporuje.

Často je software pro predikci bezporuchovosti začleněn (nebo může být začleněn) do kompletního balíku software pro podporu spolehlivosti a bezpečnosti. Tím je umožněno provázat predikci s dalšími analýzami, jako jsou např. analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch (FMECA), analýza blokového diagramu bezporuchovosti (RBD), analýza stromu poruchových stavů (FTA) a analýza stromu událostí (ETA).

Reliability Workbench – modul Reliability Prediction

Modul komplexního softwaru Reliability Workbench od amerického producenta Isograph. Více informací lze nalézt na webových stránkách producenta: <http://www.isograph.com/>.

PTC Windchill – modul Windchill Prediction

Modul komplexního softwaru PTC Windchill od celosvětového producenta PTC. Původně byl software vytvořen již neexistující americkou společností Relex Software. Více informací lze nalézt na webových stránkách producenta: <http://www.ptc.com/>.

Lambda Predict

Samostatný software Lambda Predict od amerického producenta ReliaSoft. Software může být propojen s dalšími produkty společnosti ReliaSoft. Více informací lze nalézt na webových stránkách producenta: <http://www.reliasoft.com/>.

ITEM ToolKit – modul Reliability Prediction

Modul komplexního softwaru ITEM ToolKit od amerického producenta ITEM Software. Více informací lze nalézt na webových stránkách producenta: <http://www.itemsoft.com/>.

RAM Commander – modul Reliability Prediction

Modul komplexního softwaru ITEM ToolKit od izraelského producenta ALD (Advanced Logistics Development). Více informací lze nalézt na webových stránkách producenta: <http://aldservice.com/>.

CARE – moduly MTBF Prediction

Dva moduly (MTBF Prediction for Electronic Design, MTBF Prediction for Mechanical Design) komplexního softwaru CARE od izraelského producenta BQR. Více informací lze nalézt na webových stránkách producenta: <http://www.bqr.com/>.

ASENT

Predikce bezporuchovosti je nedílnou součástí komplexního softwaru ASENT (Advanced Speciality Engineering Networked Toolkit) od producenta Raytheon. Více informací lze nalézt na webových stránkách produktu ASENT: <https://www.raytheoneagle.com/asent/index.htm/>.

7. Přehled významných změn v posledních deseti letech

V oblasti databází bezporuchovosti a metodik predikce bezporuchovosti došlo v posledních deseti letech k několika významným událostem (řazeno chronologicky):

- Společnost System Reliability Center (SRC) vydala zcela novou databázi SPIDR™ (2006).
- Nově vzniklá společnost Reliability Information Analysis Center (RIAC) vydala zcela novou metodiku 217Plus™ (2006).
- V Číně byla vydána aktuálně platná revize normy GJB/z 299C (2006).
- Konsorcium FIDES jednou výrazně a jednou drobně revidovalo metodiku FIDES (2009, 2010).
- Centrum námořních a pozemních sil (NSWC) při Námořnictvu USA (divize Carderock) opakovaně aktualizovalo metodiku NSWC (2006, 2009, 2010, 2011).
- Centrum námořních a pozemních sil (NSWC) při Námořnictvu USA (divize Crane) vydalo pracovní verzi revidované (revize G) metodiky MIL-HDBK-217 (2011).
- Společnost Siemens průběžně aktualizovala metodiku SN29500 (naposledy 2011).
- Společnost Reliability Information Analysis Center (RIAC) vydala aktualizované databáze NPRD-2011 a FMD-2013 (2011, 2013).
- Společnost Quanterion převzala společnost RIAC včetně jejích produktů a vydala aktualizované databáze NPRD-2016, EPRD-2014, FMD-2016. (2014, 2015).
- Společnost Quanterion vydala aktualizovanou metodiku 217Plus™:2015 (2015).
- V rámci projektu OREDA byla dvakrát aktualizována příručka OREDA (2009, 2015).
- Společnost Telcordia (dnes součást korporace Ericsson) opakovaně aktualizovala metodiku SR-332 (2006, 2011, 2016).

8. Shrnutí a závěr

Příspěvek si nečiní nárok být úplným přehledem všech existujících databází bezporuchovosti a metodik predikce bezporuchovosti, ale uvádí nejrozšířenější a nejpoužívanější mezinárodně uznávané databáze a metodiky.

V tabulkách (Tab. 1 a Tab. 2) na dalších stranách je uveden stručný přehled databází bezporuchovosti a metodik predikce bezporuchovosti, které byly zmíněny v kapitolách 3 a 4 tohoto příspěvku. Tabulky jsou aktuální k datu vzniku příspěvku (květen 2016).

K predikci bezporuchovosti mechanických prvků se v současné době nejčastěji používá databáze NPRD-2016 a její předchozí revize. Dále se používá databáze SPIDR™, která se však za deset let své existence výrazněji nerozšířila a nebyla aktualizována. Zvláštní místo v oblasti predikce bezporuchovosti mechanických prvků zaujímá metodika NSWC, která je jedinou metodikou pro oblast mechanických prvků. Pro široké spektrum průmyslových oborů nemají uvedené dvě databáze a metodika konkurenci.

Tab. 1 Stručný přehled databázi bezporuchovosti

Databáze	Současná (předchozí) verze	Producent	Typy obsažených prvků	Specifický obor použití	Poslední aktualizace
NPRD	NPRD-2016 (NPRD-2011, NPRD-95)	Quanterion Solutions Incorporated (USA)	elektrické, elektromechanické a mechanické prvky	-	2015
EPRD	EPRD-2014 (EPRD-97)	Quanterion Solutions Incorporated (USA)	elektronické prvky	-	2014
FMD	FMD-2016 (FMD-97)	Quanterion Solutions Incorporated (USA)	elektronické, elektrické, elektromechanické a mechanické prvky	-	2015
SPIDR	SPIDR	System Reliability Center (SRC) (USA)	elektronické, elektrické, elektromechanické a mechanické prvky	-	2006
OREDA	OREDA, OREDA-2015	OREDA (Norsko)	mechanické a elektrické prvky nadmořských/ podmořských ropných a plynárenských zařízení	ropný a plynárenský průmysl	2015
PDS Data Handbook	PDS Data Handbook 2013	SINTEF (Norsko)	prvky bezpečnostních přístrojových systémů (tzv. SIS)	procesní průmysl, zejména ropný	2013
SERH	SERH, SERH 4th ed.	exida (USA / Německo)	prvky bezpečnostních přístrojových systémů (tzv. SIS)	procesní průmysl	2015
EIREDA	EIREDA	ESReDA (European Safety, Reliability & Data Association)	elektronické, elektrické a mechanické prvky jaderných zařízení	jaderná energetika	1998
IAEA-TECDOC-478	IAEA-TECDOC-478	International Atomic Energy Agency (IAEA)	elektronické, elektrické a mechanické prvky jaderných zařízení	jaderná energetika	1988

Tab. 2 Stručný přehled metodik predikce bezporuchovosti

Metodika	Současná (předchozí) verze	Producent	Typy obsažených prvků	Specifický obor použití	Poslední aktualizace
MIL-HDBK-217	MIL-HDBK-217F Notice 2, resp. neoficiální revize MIL-HDBK-217G	United States Department of Defense (DOD)	elektronické prvky	-	1995 (neoficiální ve 2011)
PRISM	PRISM	System Reliability Center (SRC) (USA)	elektronické prvky a neelektronické prvky	-	2003
217Plus	217Plus:2015 (217Plus)	Quanterion Solutions Incorporated (USA)	elektronické prvky	-	2015
FIDES	FIDES, FIDES 2009, UTE C 80-811	FIDES (Francie)	elektrické, elektronické a elektromechanické prvky a prvky desek plošných spojů	letecký a obranný průmysl	2010
RDF 2000	RDF 2000, UTE C 80-810, IEC/TR 62380	International Electrotechnical Commission (IEC)	elektronické prvky a prvky desek plošných spojů	telekomunikační průmysl	2004
Telcordia SR-332	SR-332 Issue 4, Telcordia SR-332 (Bellcore SR-332)	Telcordia Technologies (dnes Ericsson) (USA)	elektronické prvky	telekomunikační průmysl	2016
GJB/z 299	GJB/z 299C, China 299C (GJB/z 299B)	Čínská lidově osvobozená armáda	elektronické	obrný průmysl, s vazbou na Čínu	2006
NSWC	NSWC, NSWC-11	NSWC, Carderock Division (USA)	mechanické	zejména obranný průmysl a lodní průmysl	2011
Siemens SN29500	SN29500, Siemens SN29500	Siemens (Německo)	elektrické a elektronické	široké spektrum oborů, s vazbou na společnost Siemens	2011
HRD	HRD-5 (HRD-4)	British Telecommunications (BT Group) (Velká Británie)	elektronické prvky	telekomunikační průmysl	1994

V oblasti predikce bezporuchovosti elektrických a elektronických prvků je situace výrazně zajímavější. Databáze EPRD-2014 a její předchozí revize jsou velmi rozšířené, obsahují značné množství reálných prvků, které nejsou obsaženy v metodikách, ale neumožňují takovou míru zohlednění ovlivňujících faktorů. V oblasti metodik predikce bezporuchovosti je v současné době stále nejrozšířenější MIL-HDBK-217F, ale tato metodika není od roku 1995 aktualizována (vyjma dosud neoficiální revize G) a stala se značně zastaralou. První metodikou s ambicemi nahradit MIL-HDBK-217F byla metodika PRISM[®], avšak ta nebyla od roku 2003 aktualizována. Proto se stále častěji prosazují progresivní metodiky, které jsou udržovány v aktuálním stavu, jako jsou především 217Plus[™], FIDES a Telcordia SR-332.

Konečné rozhodnutí o použití konkrétní metody predikce bezporuchovosti je ovlivněno účelem, pro který je predikce prováděna, a zejména požadavkem zákazníka, pro kterého je predikce bezporuchovosti prováděna. Záleží tedy vždy na konkrétní situaci, jaká metoda predikce bezporuchovosti je použita. Dle vlastních praktických zkušeností autora příspěvku lze drtivou většinu predikcí bezporuchovosti prvků v oblasti strojírenství a elektrotechniky provést s využitím kombinace databází NPRD, EPRD a normy MIL-HDBK-217F. V současné době se dá považovat za vhodné využití kombinace aktuálních databází NPRD-2016 a EPRD-2014 a nové metodiky 217PlusTM:2015.

Použité zdroje

- [1] ELERATH, J.G. – PECHT, M. IEEE 1413: An IEEE Standard for Reliability Predictions. In *Proc. 11th International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging*. Piscataway: IEEE, 2010.
- [2] HOLUB, R. – VINTR, Z. *Základy spolehlivosti*. 1. vyd. Brno: Vojenská akademie v Brně, 2002.
- [3] VINTR, M. Přehled metod a nástrojů pro odhad bezporuchovosti prvků. In *Počítačová podpora ve spolehlivosti*. Praha: Česká společnost pro jakost, 2007, s. 24–34.
- [4] VINTR, M. *Predikce nákladů na záruky za jakost*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 117 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Vasilij Teš, CSc.
- [5] VINTR, M. Reliability Assessment for Components of Complex Mechanisms and Machines. In *Proceedings of Twelfth World Congress in Mechanism and Machine Science – IFToMM 2007*. Besançon: Comité Français pour la Promotion de la Science des Mécanismes et des Machines, 2007.
- [6] WHITE, M. – BERNSTEIN, J.B. *Microelectronics Reliability: Physics-of-Failure Based Modeling and Lifetime Evaluation*. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2008.
- [7] Selection Guide for electronic components predictive reliability models. Gentilly: Institut pour la Maîtrise des Risques, 2009.
- [8] ANSI/VITA 51.1-2008. *Reliability Prediction MIL-HDBK-217 Subsidiary Specification*. Oklahoma City: VITA, 2008.
- [9] ANSI/VITA 51.2-2011. *Physics of Failure Reliability Predictions*. Oklahoma City: VITA, 2011.
- [10] ČSN IEC 60050-192. *Mezinárodní elektrotechnický slovník - Část 192: Spolehlivost*. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [11] ČSN EN 61709 ed. 2. *Elektrické součástky – Bezporuchovost – Referenční podmínky pro intenzity poruch a modely namáhání pro přepočty*. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [12] EPRD-2014. *Electronic Parts Reliability Data 2014*. Utica: Quanterion Solutions Incorporated, 2014.
- [13] *FIDES Guide 2009 Edition A – Reliability Methodology for Electronic Systems*. FIDES Group, 2009.
- [14] *FIDES Guide 2009 – Reliability Methodology for Electronic Systems*. FIDES Group, 2009.

- [15] FMD-2016. *Failure Mode/Mechanism Distributions 2016*. Utica: Quanterion Solutions Incorporated, 2015.
- [16] *Handbook of 217Plus™ Reliability Prediction Models*. Utica: Reliability Information Analysis Center (RIAC), 2006.
- [17] IAEA-TECDOC-478. *Component Reliability Data for Use in Probabilistic Safety Assessment*. Vienna: IAEA, 1988.
- [18] IEEE 1413-2010. *IEEE Standard Framework for the Reliability Prediction of Hardware*. New York: IEEE, 2010.
- [19] IEEE 1413.1-2002. *IEEE Guide for Selecting and Using Reliability Predictions Based on IEEE 1413*. New York: IEEE, 2002.
- [20] MIL-HDBK-217F. *Military Handbook: Reliability Prediction of Electronic Equipment*. Washington: Department of Defense, 1991.
- [21] NPRD-2016. *Nonelectronic Parts Reliability Data 2016*. Utica: Quanterion Solutions Incorporated, 2015.
- [22] NSWC-11. *Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment*. West Bethesda: Naval Surface Warfare Center, 2011.
- [23] UTE C 80-810. *RDF 2000 – Reliability Data Handbook – A Universal Model for Reliability Prediction of Electronics Components, PCBs and Equipment*. Fontenay-aux-Roses: Union Technique de l'Electricité, 2000.
- [24] <http://prirucka.ujc.cas.cz>
- [25] <http://vita.mil-embedded.com/articles/vita-and-reliability-reliability-prediction-challenges/>
- [26] <https://www.ntnu.edu/ross/info/data>
- [27] <https://www.quanterion.com/>
- [28] <http://src.alionscience.com/>
- [29] <http://www.isograph.com/>
- [30] <http://www.ptc.com/>
- [31] <http://www.reliasoft.com/>
- [32] <http://www.itemsoft.com/>
- [33] <http://aldservice.com/>
- [34] <http://www.bqr.com/>
- [35] <https://www.raytheoneagle.com/asent/index.htm/>
- [36] <http://www.oreda.com/>
- [37] <https://www.sintef.no/projectweb/pds-main-page/>
- [38] <http://www.exida.com/>
- [39] <http://fides-reliability.org/>
- [40] <http://telecom-info.telcordia.com/>
- [41] <http://quicksearch.dla.mil/>
- [42] <http://www-pub.iaea.org/books/>
- [43] <http://www.iec.ch/>

ANALÝZA BLOKOVÉHO DIAGRAMU BEZPORUCHOVOSTI (RELIABILITY BLOCK DIAGRAM ANALYSIS)

prof. Ing. Zdeněk VINTR, CSc., dr.h.c.

*Univerzita obrany v Brně
e-mail: zdenek.vintr@unob.cz*

1. Úvod

Analýza blokového diagramu bezporuchovosti je deduktivní metoda analýzy bezporuchovosti systému založená na aplikaci speciálního diagramu nazývaného blokový diagram bezporuchovosti (RBD – Reliability Block Diagram), který graficky reprezentuje strukturu analyzovaného systému z hlediska podmínek jeho funkce. Diagram zobrazuje logickou závislost poruchy systému na poruchách jeho jednotlivých prvků a subsystémů. Kvantitativní analýza blokového diagramu umožňuje na základě znalosti ukazatelů bezporuchovosti jednotlivých prvků a subsystémů určit ukazatele bezporuchovosti systému jako celku. Tato metoda je velmi často využívána pro predikci bezporuchovosti systémů. Návod k praktické aplikaci metody lze nalézt v mnoha odborných publikacích i standardech. Nejčastěji je využívána mezinárodní norma IEC [1] věnovaná aplikaci této metody, která byla vydána i jako česká technická norma [2].

2. Charakteristika, cíle a postup provádění metody

Blokový diagram bezporuchovosti představuje grafickou reprezentaci uspořádání jednotlivých prvků systému, která znázorňuje, jakým způsobem bezporuchovost jednotlivých prvků ovlivňuje bezporuchovost systému jako celku. Diagram reprezentuje funkční stav systému. Obvykle je konstruován tak, aby reprezentoval použitelný stav, avšak je možné modelovat i poruchový stav systému. Vlastní diagram potom graficky znázorňuje závislost funkčního stavu systému na funkčních stavech jednotlivých prvků. Obecně se při aplikaci této metody předpokládá, že celý systém i všechny jeho prvky se mohou nacházet pouze ve dvou stavech – použitelném nebo poruchovém.

Cílem metody je vytvoření vlastního blokového diagramu bezporuchovosti a jeho následná kvantitativní analýza, která při znalosti příslušných číselných ukazatelů bezporuchovosti jednotlivých prvků umožňuje určit číselné hodnoty těchto ukazatelů i u systému jako celku.

Postup provádění analýzy blokového diagramu bezporuchovosti lze rozdělit do následujících částí:

- přípravná část;
- tvorba blokového diagramu bezporuchovosti;
- kvantitativní analýza blokového diagramu bezporuchovosti;
- vyhodnocení analýzy.

Obsahem přípravné části je shromáždění nezbytných informací o analyzovaném systému. Především je nutná znalost konstrukčního uspořádání systému a funkcí realizovaných systémem.

Dalším krokem v přípravné části analýzy je vymezení funkcí systému, které budou modelovány a analyzovány. Takovými funkcemi jsou především hlavní funkce systému, nebo ty funkce, které byly v rámci funkční analýzy systému identifikovány jako důležité (z různých hledisek).

Definice analyzované funkce musí jednoznačně popisovat podmínky její očekávané realizace, přesně vymezovat jakého systému nebo jeho části se týká a v jaké fázi provozu a za jakých podmínek má být realizována. Funkce musí být definována takovým způsobem, aby vždy bylo možné, s ohledem na uvažovaný stav systému a jeho prvků, jednoznačně určit, zda by analyzovaná funkce byla systémem realizována či nikoli.

Základním východiskem při tvorbě blokového diagramu bezporuchovosti je skutečnost, že blokovým diagramem bezporuchovosti nemodelujeme systém jako takový, ale podmínky jeho správné funkce. Proto je také obvyklé, že pro modelování různých funkcí jednoho systému musí být vytvořeny různé blokové diagramy. RBD vždy musí jednoznačně odrážet logický vztah stavu systému s ohledem na stav jeho prvků a jejich konkrétní funkční uspořádání v rámci systému. Vlastní postup tvorby RBD je popsán v kapitole 3.

Pokud jsou známy ukazatele bezporuchovosti jednotlivých prvků systému, je možné provést kvantitativní analýzu blokového diagramu bezporuchovosti. Cílem této analýzy je určení ukazatelů bezporuchovosti pro analyzovanou funkci systému. Postup kvantitativní analýzy blokového diagramu bezporuchovosti je popsán v kapitole 4.

Vyhodnocení analýzy blokového diagramu bezporuchovosti musí směřovat k vyhodnocení toho, zda výsledky kvantitativní analýzy jsou akceptovatelné a vyhovují stanoveným požadavkům na bezporuchovost analyzovaných funkcí systému. V případě, že požadavky nejsou naplněny, lze s využitím výsledků analýzy identifikovat ty prvky systému, které rozhodující měrou přispívají k neuspokojivé úrovni bezporuchovosti systému. Možnosti případného zlepšení situace lze obecně hledat v optimalizaci konstrukčního uspořádání systému (např. aplikací zálohování u kritických prvků), nebo ve zvyšování úrovně bezporuchovosti jednotlivých prvků systému. Možnosti efektivního zvyšování úrovně bezporuchovosti hlavních funkcí systému je vhodné hledat i v případě, kdy stanovené požadavky analyzovaný systém splňuje.

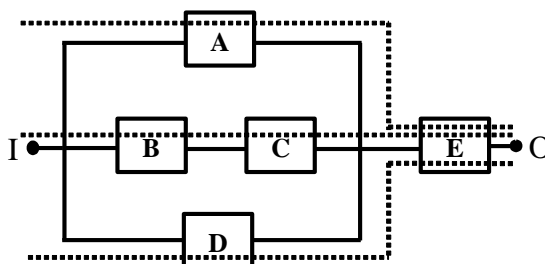
3. Tvorba RBD

3.1 Postup tvorby RBD

Prvním krokem tvorby RBD je rozdělení systému do bloků. Jeden blok přitom může reprezentovat jak konkrétní prvek systému (považovaný na dané úrovni za dále nedělitelný), tak i složitě konstrukční struktury (subsystémy). Rozdělení systému do bloků se provádí s ohledem na cíle analýzy a úroveň znalosti systému a dostupnost informací o bezporuchovosti jednotlivých prvků systému. Zohledněna také musí být omezení vlastní analytické metody. Obecně je třeba postupovat tak, aby jednotlivé bloky (jejich poruchy) byly vzájemně pokud možno statisticky nezávislé, případně aby vzájemná závislost jejich bezporuchovosti byla jasně popsána.

V dalším kroku, s ohledem na funkci, která má být modelována, se jednotlivé bloky propojí tak, aby vzniklý diagram znázorňoval logickou závislost funkčního stavu celého systému na funkčním stavu jednotlivých bloků. Ta se znázorňuje pomocí tzv. „cest úspěchu“. Cesty úspěchu prochází mezi vstupní a výstupní branou diagramu přes ty bloky, které musí fungovat, má-li fungovat celý systém. Na *Obr. 1* je znázorněn jednoduchý RBD ve kterém jsou přerušovanými čarami vyznačeny tři možné cesty úspěchu. V tomto diagramu je „I“

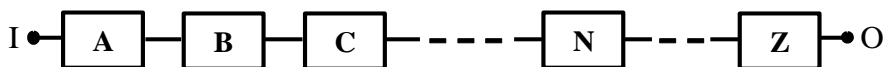
vstupní brána, „O“ výstupní brána a bloky A, B, C, C a D reprezentují strukturu systému pro danou funkci. Znárodný systém bude plnit požadovanou funkci vždy, pokud budou současně funkční všechny bloky ležící na libovolné z naznačených cest úspěchu.



Obr. 1 Cesty úspěchu v blokovém diagramu bezporuchovosti

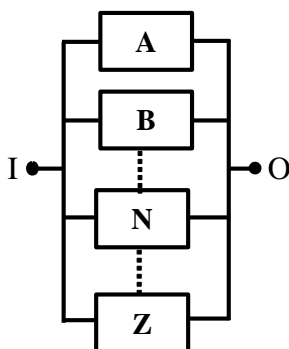
3.2 Základní typy struktury RBD

Každý RBD je možné dekomponovat na části charakterizované triviální strukturou. Stručná charakteristika těchto triviálních struktur je uvedena dále. Jestliže je například pro funkci systému nutné, aby fungovaly všechny bloky, potom blokový diagram bezporuchovosti znázorníme jako bloky zapojené v sérii (viz Obr. 2). Diagram tohoto typu je nazýván jako „sériový“ blokový diagram. Takový diagram se tedy použije, pokud platí, že porucha kteréhokoliv „bloku“ způsobí poruchu i celého systému.



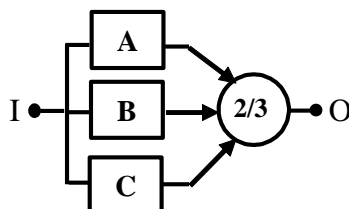
Obr. 2 Sériový blokový diagram bezporuchovosti

Dalším základním typem struktury blokového diagramu bezporuchovosti je tak zvaný „paralelní“ blokový diagram bezporuchovosti. U takového uspořádání systému platí, že systém je v poruše jen a pouze tehdy, kdy jsou v poruše všechny jeho prvky. Blokový diagram bezporuchovosti takového systému je znázorněn na Obr. 3.



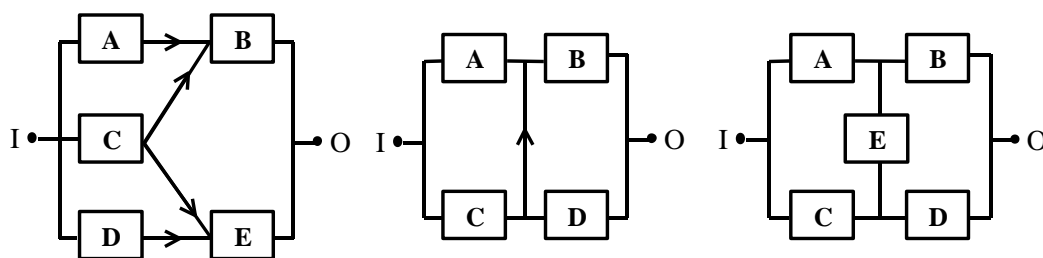
Obr. 3 Paralelní blokový diagram bezporuchovosti

Většina blokových diagramů bezporuchovosti je snadno pochopitelná a požadavky na správnou funkci systému jsou zřejmé. Ne všechny blokové diagramy však mohou být zjednodušeny jen na kombinace sériových nebo paralelních systémů. Často je nezbytné modelovat systémy, ve kterých je použitelný stav systému specifikován komplexněji. Například použitelný stav systému může být specifikován tak, že pro správnou funkci systému musí být k dispozici alespoň m z n paralelně spojených objektů. Blokový diagram potom nabývá tvaru uvedeného na *Obr. 4*.



Obr. 4 Příklad blokového diagramu bezporuchovosti systému m/n

Dále se v praxi můžeme setkat i s dalšími typy struktury RBD, jako jsou můstkové struktury, RBD s orientovanými hranami apod. Vybrané příklady takových struktur jsou uvedeny na *Obr. 5*.

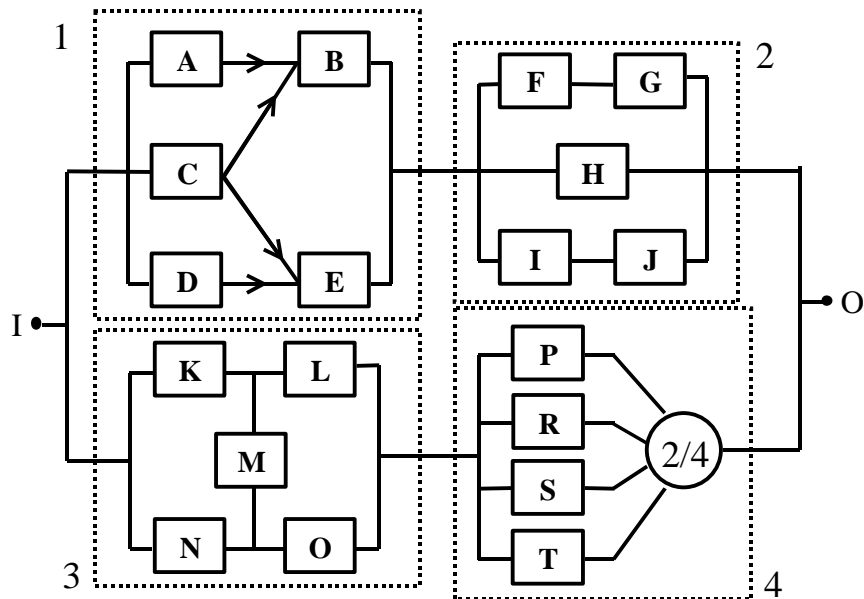


Obr. 5 Příklady dalších typů struktur RBD

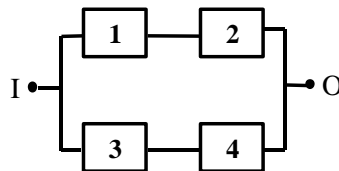
3.3 RBD složitých systémů

U složitých technických systémů zpravidla nelze znázornit logiku jejich fungování jen s využitím tak triviálních struktur jako jsou znázorněny na *Obr. 2* až *Obr. 5*, ale je třeba použít jejich kombinace. Příklad takového komplexního blokového diagramu bezporuchovosti je znázorněn na *Obr. 6*.

Při tvorbě takových RBD je třeba diagram vytvářet postupně a nejdříve vytvářet velké bloky (obsahující celé subsystémy) a teprve v dalších krocích analyzovat a znázorňovat logiku funkce těchto bloků. Například u blokového diagramu znázorněného na *Obr. 6*, byl v prvním kroku nejdříve vytvořen jednoduchý blokový diagram složený jen ze čtyř bloků (viz *Obr. 7*) a teprve poté byly analyzovány funkce těchto bloků a pro každý z nich vytvořen detailní RBD.



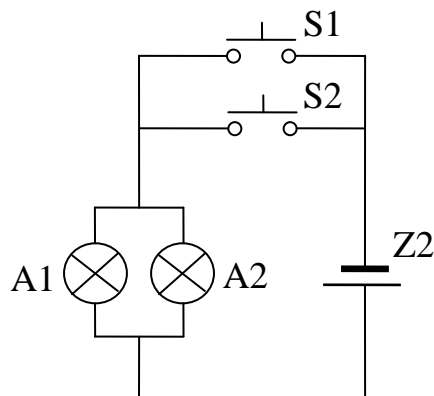
Obr. 6 Příklad RBD složitěho systému



Obr. 7 Redukovaný RBD složitěho systému

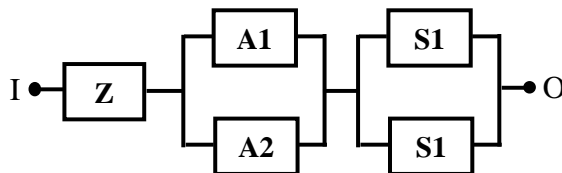
3.4 Příklady tvorby RBD

Praktický postup tvorby RBD bude dále prezentován na příkladech systému znázorněného na Obr. 8, který slouží k signalizaci překročení povoleného tlaku v tlakové nádobě. Nádobu je opatřena dvěma tlakovými spínači S1 a S2, které při překročení povoleného tlaku sepnou signalizační obvod. Překročení tlaku je signalizováno rozsvícením kontrolních žárovek A1 a A2. Celý systém je napájen ze zdroje Z.



Obr. 8 Systém signalizace překročení tlaku v nádobě

Hlavní funkcí tohoto systému světelná signalizace stavu, kdy je v tlakové nádrži překročen povolený tlak. Předpokládáme, že ke správné signalizaci postačuje rozsvícení alespoň jedné žárovky. Za těchto předpokladů lze hlavní funkci systému znázornit RBD uvedeným na *Obr. 9* (vliv kabeláže není uvažován).



Obr. 9 RBD pro funkci překročení tlaku je signalizováno

Od systému se také očekává, že nebude generovat falešné signály, tedy, že nebude signalizovat překročení tlaku v době, kdy v nádobě bude normální tlak. Takto formulované funkci systému (negeneruje falešný signál o překročení tlaku) odpovídá RBD znázorněný na *Obr. 10*. Z uvedeného příkladu je zřejmé, že blokové diagramy pro různé funkce jednoho systému se mohou značně odlišovat a i uspořádání stejných bloků se může lišit (viz bloky S1 a S2). Do blokového diagramu vždy vstupují jen ty bloky, které modelovanou funkci reálně ovlivňují. Například žárovky a zdroj v uvedeném příkladu nemohou žádnou svojí poruchou způsobit falešnou signalizaci a tak nejsou v RBD na *Obr. 10* zastoupeny.



Obr. 10 RBD pro funkci negeneruje falešný signál

4. Kvantitativní analýza RBD

4.1 Kvantitativní analýza základních typů RBD

Pokud jsou známy ukazatele bezporuchovosti jednotlivých prvků systému znázorněné v příslušném RBD, je možné provést jeho kvantitativní analýzu. Cílem této analýzy je určení ukazatelů bezporuchovosti pro daný systém, respektive pro jeho analyzovanou funkci. Dále jsou uvedeny výpočtové vztahy, které umožňují vypočítat pravděpodobnost bezporuchového provozu základních typů RBD.

U sériového RBD (viz *Obr. 2*) porucha kteréhokoliv prvku způsobí poruchu celého systému. Pro pravděpodobnost bezporuchového provozu u tohoto diagramu platí:

$$R = \prod_{i=1}^{i=n} R_i, \quad (1)$$

- kde: R - pravděpodobnost bezporuchového provozu systému;
 R_i - pravděpodobnost bezporuchového provozu i -tého prvku systému;
 n - počet prvků systému.

U paralelního RBD (viz *Obr. 3*) dojde k poruše celého systému pouze v případě, když se porouchají všechny jeho prvky. Pro pravděpodobnost bezporuchového provozu u tohoto diagramu platí:

$$R = 1 - \prod_{i=1}^{i=n} (1 - R_i) \quad (2)$$

U systému m/n dojde k poruše, pokud se porouchá více jak m prvků celkového počtu n prvků systému. V případě, že všechny prvky systému mají stejnou pravděpodobnost bezporuchového provozu a platí, že $R_0 = R_1 = R_2 = \dots = R_i \dots = R_n$, lze pravděpodobnost bezporuchového provozu systému vyjádřit následujícím vztahem:

$$R = \sum_{i=m}^{i=n} \frac{n!}{(n-i)!i!} R_0^i (1 - R_0)^{n-i} . \quad (3)$$

V případě, že prvky nemají stejnou pravděpodobnost bezporuchového provozu, uvedený vztah nelze použít a je nezbytné využít jiné výpočetní postupy uvedené v normě ČSN EN 61078.

4.2 Metoda dekompozice

Pro vlastní kvantitativní analýzu RBD se, v závislosti na rozsahu analyzovaného RBD a jeho struktuře (typy použitých základních struktur) a vzájemné závislosti poruch jednotlivých prvků systému, používá celá řada metod. Nejčastěji v praxi používané metody a postupy jsou popsány v normě ČSN EN 61078 [2].

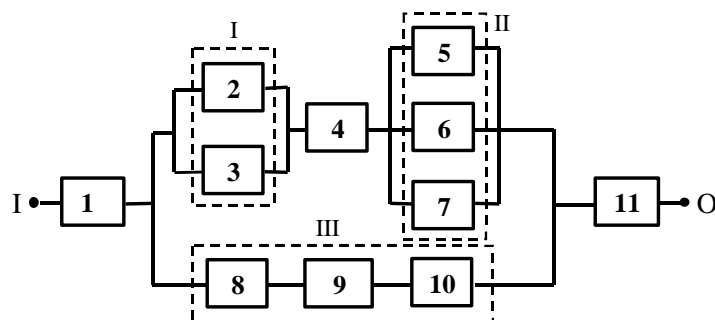
U většiny technických systémů se jako nejefektivnější způsob kvantitativní analýzy jeví použití tzv. metody dekompozice. Tato metoda je však použitelná jen za jistých podmínek. Nejdůležitější podmínkou je to, že analyzovaný blokový diagram bezporuchovosti musí být tvořen jen jednoduchou sériově-paralelní strukturou a že poruchy jednotlivých bloků diagramu musí být vzájemně statisticky nezávislé. Tato závislost může být dána reálnou závislostí poruch jednotlivých prvků systému (porucha jednoho prvku přímo vyvolá nebo zvýší pravděpodobnost poruchy jiného prvku) nebo vlastní konstrukcí blokového diagramu bezporuchovosti, kdy jeden a tentýž prvek systému je v diagramu znázorněn více bloky. Pokud je taková závislost poruch jednotlivých prvků identifikována, nelze metodu dekompozice použít a je třeba využít jiných metod a postupů popsáných v normě ČSN EN 61078 [2].

Metoda dekompozice je založena na skutečnosti, že lze snadno realizovat výpočet pravděpodobnosti bezporuchového provozu u čistě sériového a čistě paralelního systému s využitím výpočtových vztahů uvedených v předchozí kapitole. Metoda využívá postupné dekompozice systému, kdy jsou jednotlivé části RBD tvořené čistě paralelní či sériovou strukturou postupně nahrazovány fiktivními prvky, u nichž se stanoví pravděpodobnost použitelného stavu s využitím vztahů (1) a (2). Takto se v krocích postupuje až k určení výsledné pravděpodobnosti použitelného stavu celého systému.

Praktický postup výpočtu RBD metodou dekompozice je dále demonstrován na příkladu blokového diagramu bezporuchovosti znázorněného na *Obr. 11*, kde jsou také naznačeny jednotlivé kroky dekompozice. Blokový diagram bezporuchovosti je postupně zjednodušován a jednotlivé části diagramu, které mají prostou sériovou nebo paralelní strukturu jsou nahrazovány fiktivními prvky jejichž pravděpodobnost použitelného stavu je s využitím známých vztahů vyjádřena. Tak se postupuje, dokud není RBD zredukován na

jednoduché paralelní či sériové schéma, s jehož využitím lze snadno vyjádřit výslednou pravděpodobnost použitelného stavu pro celý systém. Zpětným dosazením dílčích výrazů potom lze obdržet výsledný vztah pro pravděpodobnost použitelného stavu systému a dosazením číselných hodnot pravděpodobností bezporuchového provozu jednotlivých prvků lze vypočítat výslednou pravděpodobnost pro celý systém.

1. krok

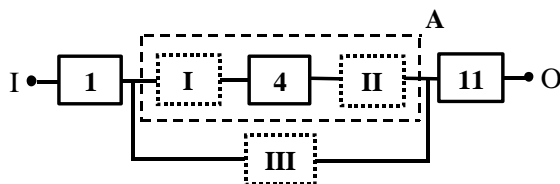


$$R_I = 1 - [(1 - R_2)(1 - R_3)]$$

$$R_{II} = 1 - [(1 - R_5)(1 - R_6)(1 - R_7)]$$

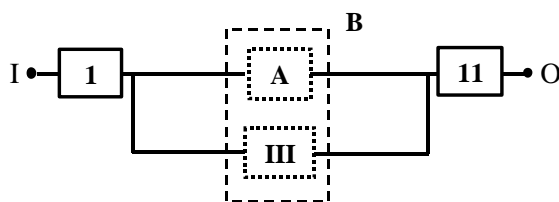
$$R_{III} = R_8 R_9 R_{10}$$

2. krok



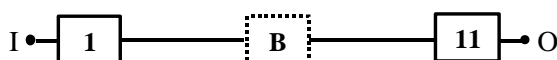
$$R_A = R_I R_4 R_{II}$$

3. Krok



$$R_B = 1 - [(1 - R_A)(1 - R_{III})]$$

4. krok



$$R_S = R_1 R_B R_{11}$$

Obr. 11 Postup dekompozice systému

4.3 Inspekční metoda

Podstata metody spočívá v tom, že s využitím vytvořeného RBD popíšeme použitelný stav systému jako logickou kombinaci jevů vyjadřujících stavy jednotlivých prvků a vyšetříme, s jakou pravděpodobností tato kombinace jevů může nastat.

Logický výraz vyjadřující stav systému vytváříme na základě „inspekce“ RBD systému, při které zkoumáme logické vazby mezi stavem jednotlivých prvků a stavem systému. Zde je třeba podotknout, že předmětem našeho zkoumání nemusí být pouze použitelný stav systému, ale stejně tak to může být i komplement tohoto stavu, tedy poruchový stav.

Dalším krokem řešení je odvození vztahu pro výpočet pravděpodobnosti toho, že se systém bude nacházet v popsaném stavu. K tomu využíváme pravidla booleovské algebry, jejichž popis a ukázky praktické aplikace lze také nalézt v normě ČSN EN 61078 [2].

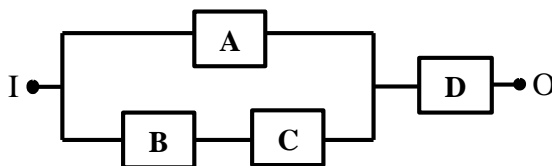
Jeden z možných postupů vychází ze známé skutečnosti, že pravděpodobnost nastoupení průniku dvou vzájemně nezávislých jevů A a B lze určit dle vztahu:

$$P(A \cap B) = P(A)P(B) \quad (4)$$

a pravděpodobnost sjednocení jevů lze určit s využitím vztahu:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A)P(B) \quad (5)$$

Dále je prezentovaná ukázka aplikace této metody na příkladu kvantitativní analýzy RBD znázorněného na *Obr. 12*.



Obr. 12 Příklad RBD pro použití inspekční metody

Logiku tohoto RBD (podmínku bezporuchové funkce systému) lze popsat s využitím následujícího logického výrazu:

$$S = D \cap [(B \cap C) \cup A].$$

Tento výraz upravíme do tvaru, kdy jeho pravá strana bude vyjadřovat prosté sjednocení průniků jevů:

$$S = (D \cap B \cap C) \cup (D \cap A)$$

Po této úpravě je již možné aplikovat vztahy pro výpočet pravděpodobnosti průniku (4) a sjednocení jevů (5) a získat vztah pro pravděpodobnost použitelného stavu celého systému:

$$R_S = P(S) = P(D)P(B)P(C) + P(D)P(A) - P(D)P(B)P(C)P(A)$$

Inspekční metodu je možné použít i v případě kdy poruchy prvků jsou vzájemně závislé. Potom je však třeba aplikovat známá pravidla pro práci s podmíněnou pravděpodobností. Inspekční metoda také může být s úspěchem použita i v případě, kdy se v modelu systému objevuje jeden a tentýž prvek opakovaně. Důsledné dodržování pravidel operací s jevy a pravděpodobnostmi zajistí, že opakovaný výskyt stejného prvku v modelu neovlivní výsledek řešení. To však platí jen v případě, že opakující se prvek je v RBD systému na všech místech výskytu vždy označován stejně.

Nevýhodou metody je skutečnost, že u složitějších systémů s vysokým počtem prvků její použití vede ke komplikovaným a zdoluhavým matematickým úpravám výpočtových vztahů.

4.4 Aplikace pravdivostní tabulky

Ke kvantitativní analýze RBD může také být využita aplikace pravdivostní tabulky. Metodu je možno aplikovat v podstatě na jakýkoliv RBD, u kterého je možné pro každou možnou kombinaci stavů prvků systému jednoznačně určit stav systému. Tato metoda je tedy použitelná jak pro systémy kde jsou poruchy prvků vzájemně závislé (potom je třeba důsledně respektovat pravidla pro práci s pravděpodobností podmíněných jevů) tak i u systémů v jejichž modelech se jeden a tentýž prvek objevuje více jak jednou. Metoda je také využitelná u některých systémů se složitější strukturou (viz *Obr. 4* a *Obr. 5*).

Pravdivostní tabulka je velmi názorná a pro RBD s malým počtem bloků i vhodná metoda, avšak u RBD s vyšším počtem bloků generuje velmi mnoho kombinací stavů bloků a metoda se stává relativně obtížnou a mnohdy manuálně neproveditelnou. Pokud uvažujeme jen dva možné stavy bloků a systému – poruchový a bezporuchový, musíme u systému s n prvky vyšetřit celkem 2^n kombinací stavů prvků. Například u systému tvořeného 10 prvky bychom již museli použít tabulku s 1024 řádky. Toto omezení metody však dnes můžeme snadno překonat při využití výkonné výpočetní techniky a vhodného softwaru.

Vlastní aplikace je dále prezentována na příkladu systému znázorněného na *Obr. 4*, který pracuje v režimu 2/3. Tento systém se nachází v použitelném stavu, pokud jsou v použitelném stavu alespoň dva libovolné bloky systému.

V prvním kroku řešení připravíme pravdivostní tabulku, do které vyznačíme všechny možné kombinace stavů jednotlivých bloků a každé této kombinaci přidělíme odpovídající stav systému a zapíšeme logický výraz popisující danou kombinaci stavů. Jednotlivé stavy bloků i systému budeme v tabulce označovat následujícím způsobem:

0 – poruchový stav,

1 – použitelný stav.

V logických výrazech budeme jevy představující použitelný stav prvků označovat písmeny A , B a C a použitelný stav systému písmenem S . Jevy reprezentující poruchové stavy budou označovány stejnými písmeny s pruhem \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} a \bar{S} . Vlastní postup tvorby pravdivostní tabulky pro systém znázorněný na *Obr. 4* je patrný z *Tab. 1*.

Tab. 1 Pravdivostní tabulka

Kombinace	Blok A	Blok B	Blok C	Systém	Logický výraz
(1)	0	0	0	0	$\bar{A} \cap \bar{B} \cap \bar{C}$
(2)	0	0	1	0	$\bar{A} \cap \bar{B} \cap C$
(3)	0	1	0	0	$\bar{A} \cap B \cap \bar{C}$
(4)	0	1	1	1	$\bar{A} \cap B \cap C$
(5)	1	0	0	0	$A \cap \bar{B} \cap \bar{C}$
(6)	1	0	1	1	$A \cap \bar{B} \cap C$
(7)	1	1	0	1	$A \cap B \cap \bar{C}$
(8)	1	1	1	1	$A \cap B \cap C$

Z tabulky je zřejmé, že vyšetřovaný systém je v použitelném stavu jestliže se jeho bloky nachází ve stavech popsaných kombinacemi (4), (6), (7) a (8). Ostatní kombinace odpovídají poruchovému stavu systému. V souladu s tímto zjištěním můžeme použitelný stav systému popsat rovnicí:

$$S = (\bar{A} \cap B \cap C) \cup (A \cap \bar{B} \cap C) \cup (A \cap B \cap \bar{C}) \cup (A \cap B \cap C)$$

Tento výraz již představuje sjednocení vzájemně disjunktčních jevů a bude tomu tak vždy, když při tvorbě logického výrazu bude využita pravdivostní tabulka, protože, každý řádek v tabulce vždy reprezentuje jedinečnou kombinaci stavů prvků, která vylučuje možnost, aby současně nastala jiná z kombinací. Protože logický výraz v této rovnici vyjadřuje sjednocení disjunktčních jevů, můžeme rovnici snadno přepsat do tvaru vyjadřujícího pravděpodobnost použitelného stavu systému:

$$\begin{aligned} R_S &= P(S) = P(\bar{A})P(B)P(C) + P(A)P(\bar{B})P(C) + P(A)P(B)P(\bar{C}) + P(A)P(B)P(C) = \\ &= P(A)P(B) + P(B)P(C) + P(A)P(C) - 2P(A)P(B)P(C) \end{aligned}$$

4.5 Aplikace teoremu úplné pravděpodobnosti

Metoda využívá teorem celkové pravděpodobnosti, který umožňuje pravděpodobnost použitelného stavu libovolného systému znázorněného odpovídajícím RBD vyjádřit následující rovnicí:

$$R_S = P(S|X)P(X) + P(S|\bar{X}) \cdot P(\bar{X}), \quad (6)$$

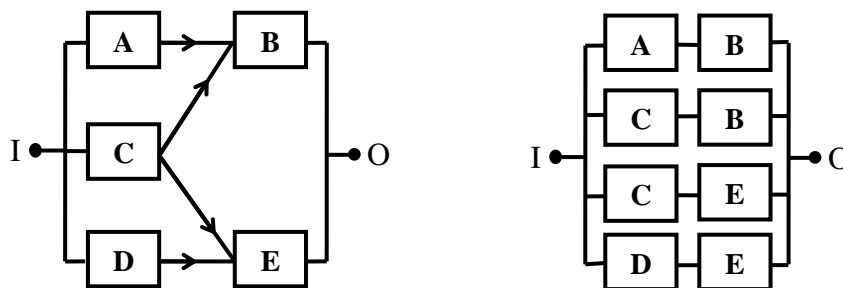
kde výraz $P(S|X)$ označuje pravděpodobnost použitelného stavu systému za předpokladu, že určitý blok X je v použitelném stavu a výraz $P(S|\bar{X})$ označuje pravděpodobnost toho, že se systém nachází v použitelném stavu za předpokladu, že blok X systému je v poruchovém stavu.

Při aplikaci metody se potom postupuje tak, že pravděpodobnost použitelného stavu systému vyjádříme s pomocí rovnice (6), přičemž jako blok X vyjádřený v rovnici vezmeme vybraný blok RBD. Dále upravíme blokový diagram systému tak aby v jednom případě znázorňoval logiku funkce systému za podmínky, že uvažovaný blok X je v použitelném stavu

a ve druhém případě za podmínky, že je tento blok v poruchovém stavu. Vzniklé diagramy mají zpravidla výrazně jednodušší strukturu než původní RBD a jejich kvantitativní analýzu lze relativně snadno provést a vypočítat pravděpodobnost použitelného stavu celého systému aplikací teorému celkové pravděpodobnosti (6).

Jestliže vzniklé grafy nemají strukturu umožňující snadné provedení kvantitativní analýzy, vyjádříme pravděpodobnost použitelného stavu těchto dílčích diagramů podle rovnice (6) a celý postup podle potřeby opakujeme, dokud nedospějeme k jednoduše řešitelným diagramům.

Prakticky si tento postup ukážeme na systému, jehož blokové diagramy bezporuchovosti jsou znázorněny na Obr. 13. Oba diagramy vyjadřují stejnou logiku správné funkce systému a jsou vzájemně ekvivalentní. Z provedení diagramů je parné, že na jejich kvantitativní analýzu nejde aplikovat metoda dekompozice, protože levý RBD nepředstavuje prostou sériově paralelní strukturu a pravý obsahuje opakující se bloky. Vzhledem k vyššímu počtu bloků by případné použití pravdivostní tabulky (32 řádků) nebo inspekční metody vedlo k poměrně komplikovaným výpočtům. Právě za takové situace se ukazují aplikace teorému celkové pravděpodobnosti jako velmi efektivní.



a) RBD s orientovanými hranami

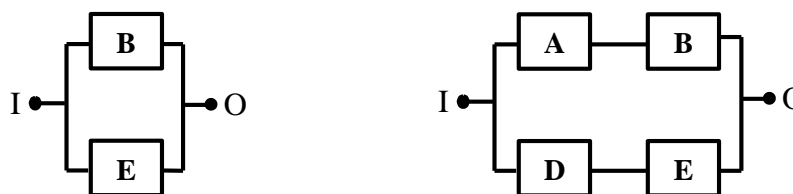
b) RBD s opakujícími se bloky

Obr. 13 Příklad RBD pro aplikaci teorému celkové pravděpodobnosti

Jako blok, ke kterému vztáhneme výpočet, zvolíme blok C. Rovnice (6) v takové případě přejde do následujícího tvaru:

$$R_S = P(S|C)P(C) + P(S|\bar{C}) \cdot P(\bar{C}). \quad (7)$$

Dále výše popsaným způsobem upravíme RBD systému a získáme jeden RBD znázorňující logiku funkce systému za podmínky že blok C je v použitelném stavu a druhý vyjadřující logiku funkce systému za podmínky, že blok C je v poruchovém stavu (viz Obr. 14).



Blok C je v bezporuchovém stavu

Blok C je v poruchovém stavu

Obr. 14 Blokové diagramy bezporuchovosti pro podmíněné stavy systému

Na základě těchto diagramů již snadno můžeme vyjádřit (například použitím inspekční metody) obě podmíněné pravděpodobnosti z rovnice (7):

$$P(S|C) = P(B) + P(E) - P(B)P(E),$$

$$P(S|\bar{C}) = P(A)P(B) + P(D)P(E) - P(A)P(B)P(D)P(E),$$

Dosazením těchto výrazů do rovnice (7) potom obdržíme vztah pro pravděpodobnost použitelného stavu systému:

$$R_S = [P(B) + P(D) - P(B) \cdot P(D)] \cdot P(C) + \\ + [P(A) \cdot P(B) + P(D) \cdot P(E) - P(A) \cdot P(B) \cdot P(D) \cdot P(E)] \cdot [1 - P(C)]$$

Aplikace teorému celkové pravděpodobnosti často vede k podstatně jednoduššímu a rychlejšímu určení hledané pravděpodobnosti než při použití ostatních metod kvantitativní analýzy RBD.

5. Problémy spojené s určením struktury RBD

Nezbytným předpokladem pro aplikaci všech výše prezentovaných metod kvantitativní analýzy RBD je navrzení věcně správného modelu, který reprezentuje logiku funkcí systému a umožňuje popis jeho bezporuchovosti.

Jednou z nejvýznamnějších zvláštností, se kterou se při tvorbě modelů bezporuchovosti setkáváme, je skutečnost, že logická struktura systému z hlediska bezporuchovosti zpravidla není totožná s konstrukčním uspořádáním prvků systému. To je dáno tím, že při zkoumání bezporuchovosti nás nezajímá vlastní prvek či systém, ale projev jeho existence – jeho funkce. Proto je třeba při tvorbě RBD jednoznačně vycházet z analýzy funkcí jednotlivých prvků systému a jejich vztahu k funkcím systému jako celku.

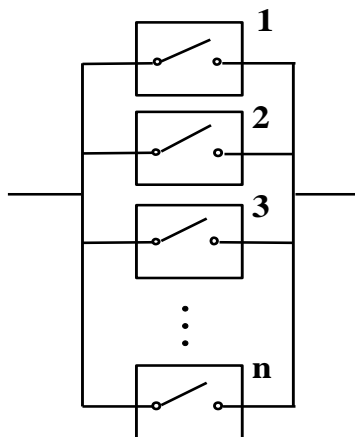
Často se tak v praxi můžeme setkat s případem, že prvky které jsou z hlediska konstrukce objektu uspořádány vedle sebe (paralelně) mají z hlediska bezporuchovosti sériovou strukturu a naopak. U některých typů prvků se dokonce může stát, že se nám z hlediska různých funkcí mohou stejné prvky jevit různě uspořádány.

Typickým příkladem mohou být prvky s vlastnostmi logického spínače, jejichž funkce je charakteristická dvěma funkčními stavy. Mohou to být například elektrické spínače (sepnuto – rozepnuto), pneumatické a hydraulické ventily (zavřeno – otevřeno), mechanické zámky polohy (zamčeno – odemčeno) a podobně. V dalším budou všechny tyto prvky souhrnně označovány jako spínače.

Na *Obr. 15* je znázorněna soustava n paralelně zapojených spínačů. Pokud jsou ve výchozím stavu všechny spínače rozepnuty a budeme u této soustavy modelovat funkci sepnutí příslušného obvodu, jsou spínače uspořádány i z hlediska bezporuchovosti v paralelní struktuře, protože k sepnutí obvodu postačuje správná funkce (sepnutí) alespoň jednoho z prvků. Pravděpodobnost bezporuchové funkce sepnutí u tohoto systému je tedy dána vztahem (2).

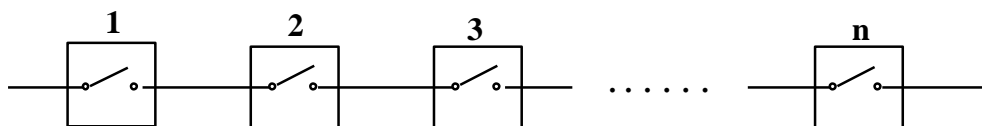
Pokud u soustavy na *Obr. 15* jsou ve výchozím stavu všechny spínače sepnuty a budeme modelovat funkci přerušení příslušného obvodu, jsou spínače z hlediska bezporuchovosti

uspořádány sériově, protože má-li být obvod přerušen, musí být ve stavu správné funkce (rozepruty) současně všechny prvky tohoto systému. Pravděpodobnost bezporuchové funkce rozeprutí u této soustavy je dána vztahem (1).



Obr. 15 Paralelní zapojení spínačů

Analogická situace je u soustavy n sériově zapojených spínačů (viz Obr. 16). Když sledujeme funkci rozeprutí obvodu, má soustava z hlediska bezporuchovosti charakter paralelní struktury a když sledujeme funkci seprutí má charakter sériové struktury.



Obr. 16 Sériově zapojené spínače

Z uvedeného je patrné, že struktury tvořené prvky s charakterem logického spínače mohou navenek vykazovat různou úroveň bezporuchovosti, v závislosti na funkci, kterou od nich požadujeme. Tyto poznatky musíme reflektovat i při tvorbě modelů bezporuchovosti systémů zahrnujících takové prvky.

6. Vyhodnocení analýzy

Výsledky analýzy blokového diagramu bezporuchovosti je vhodné shrnout do zprávy, která by měla zahrnovat alespoň:

- cíl a předmět analýzy;
- přehled použité technické dokumentace;
- popis systému (konstrukční popis, popis funkcí, vymezení hranic systému);

- uvažované provozní režimy a podmínky prostředí;
- definice funkcí systému, které jsou analyzovány;
- vytvořené blokové diagramy bezporuchovosti;
- výsledky kvantitativní analýzy (číselné hodnoty požadovaných ukazatelů);
- závěry analýzy (vyjádření zda systém splňuje stanovené požadavky, případně návrhy na změnu konstrukce systému, podmínek provozu či prostředí).

7. Závěr

Z výše uvedeného je zjevné, že metoda blokového diagramu bezporuchovosti – RBD je systematickou a účelnou analýzou v rámci prediktivních i provozních procesů posuzování bezporuchovosti a bezpečnosti. Díky své standardizované podobě získala pevné místo mezi obvykle volenými a používanými technikami.

Poděkování

Vznik tohoto příspěvku byl podpořen projektem pro institucionální rozvoj K-202 Univerzity obrany v Brně.

Použité zdroje

- [1] IEC 61078 *Analysis techniques for dependability – Reliability block diagram and boolean methods.*
- [2] ČSN EN 61078 *Techniky analýzy spolehlivosti – Blokový diagram bezporuchovosti a booleovské metody.*
- [3] HOLUB, R., VINTR, Z. *Základy spolehlivosti.* 1. vyd. Brno: Vojenská akademie v Brně, 2002.
- [4] HOLUB, R., VINTR, Z. *Spolehlivost letadlové techniky.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2001.
(dostupné na <http://www.lu.fme.vutbr.cz/files/SpolehlivostLetadloveTechniky.pdf>)

MARKOVOVA ANALÝZA

pplk. prof. Ing. David VALIŠ, Ph.D.

*Univerzita obrany v Brně
e-mail: david.valis@unob.cz*

1. Úvod

K analýze bezporuchovosti, pohotovosti, udržovatelnosti a bezpečnosti je k dispozici několik různých analytických metod, jednou z nich je Markovova analýza/technika. V [2] je uveden přehled dostupných metod a jejich obecných znaků.

V tomto článku jsou popsány základní principy, vlastnosti a použití Markovových technik v analýzách spolehlivosti, k modelování a analýze systému, k odhadu ukazatelů bezporuchovosti, pohotovosti, udržovatelnosti a bezpečnosti. V průmyslových odvětvích je nutné analyzovat systémy, které vykazují chování závislé na stavu. V Markovových technikách popsaných v tomto článku se předpokládají konstantní, na čase nezávislé intenzity přechodů mezi stavy. Takové techniky se nazývají homogenní Markovovy techniky.

Tento text je vytvořen s využitím [5] a [6]. Více informací je možné nalézt v literatuře, jejíž ukázka a přehled je uveden na konci článku.

2. Všeobecný popis

Při Markovových technikách se používá diagram přechodů mezi stavy, který je grafickým znázorněním chování systému z hlediska bezporuchovosti, pohotovosti, udržovatelnosti či bezpečnosti, z něhož lze vypočítat ukazatele bezporuchovosti, pohotovosti, udržovatelnosti či bezpečnosti systému. Tento diagram modeluje chování systému v čase. V tomto článku se na systém pohlíží jako na určitý počet prvků, z nichž každý může existovat pouze v jednom ze dvou stavů: použitelném, nebo nepoužitelném. Systém jako celek však může existovat v mnoha různých stavech, z nichž každý je určen určitou kombinací funkčních prvků a prvků, které mají poruchu. Tudiž pokud u prvku dojde k poruše, nebo se prvek opraví, "přechází" systém z jednoho stavu do následujícího. Tento druh modelu se obecně nazývá model s diskrétními stavy a spojitým/diskrétním časem.

Markovovy techniky jsou zvláště vhodné ke zkoumání systémů se zálohováním nebo systémů, u kterých porucha systému závisí na posloupnosti událostí, nebo systémů, které mají složité strategie údržby, například u systémů s prioritami obnovy nebo s několika týmy pro obnovu, s problémy řazení do fronty a s omezenými zdroji. Pracovník provádějící analýzu musí zajistit, aby model přiměřeně odrazil provoz reálného systému s ohledem na dané strategie a politiky údržby. Zejména je nutné přezkoumat vhodnost exponenciálních rozdělení pro modelování dob obnovy. Je třeba poznamenat, že když se modelují zálohované opravitelné systémy s omezenou kapacitou oprav, potom v důsledku "bezpečnostní" vlastnosti modelu může být skutečná doba opravy znázorněna nadměrně.

Za předpokladu, že je možné přijmout předpoklady a omezení popsané dále, je jednou z hlavních výhod Markovových technik, že mohou být snadno modelovány strategie údržby, například priority obnov jednotlivých prvků. Dále je možné v modelu uvažovat pořadí, ve kterém se vyskytují vícenásobné poruchy. Je třeba poznamenat, že jiné techniky analýzy

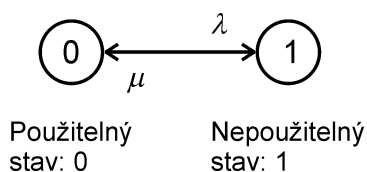
spolehlivosti, jako je například metoda analýzy stromu poruchových stavů (FTA) a metoda blokového diagramu bezporuchovosti (RBD) (jak jsou popsány v normách IEC 61025 a IEC 61078), neumožňují brát v úvahu složité strategie údržby, ačkoliv mohou mít k vyznačení přítomnosti těchto případů speciální hradla znázorněná zvláštními značkami (dynamická hradla). Vliv těchto hradel však musí být vyhodnocen samostatně pomocí dalších Markovových či jiných technik, přičemž výsledky musejí být začleněny do analýzy stromu poruchových stavů nebo RBD, přičemž se dodržují možná omezení.

Ačkoliv jsou z teoretického hlediska Markovovy techniky pružné a všestranně použitelné, je při řešení potíží při praktickém použití těchto technik nutná určitá opatrnost. Hlavním problémem je, že počet stavů systému a možných přechodů rychle vzrůstá s počtem prvků v systému. Čím větší je počet stavů a přechodů, tím je pravděpodobnější, že budou v analýze chyby a nesprávná znázornění. Ke snížení tohoto rizika se doporučuje při návrhu diagramu přechodů mezi stavy dodržovat určitá pravidla. Numerické techniky používané pro vyhodnocení diagramu mohou být též složité a mohou vyžadovat speciální počítačové programy.

Markovovy techniky jsou vhodné nejen k modelování strategií údržby, ale také metody též umožňují modelovat události typu porucha/obnova graficky, což je samo o sobě jejich velmi výhodná vlastnost. Proces porucha/obnova je reprezentován přechody od jedné značky stavu ke druhé v uspořádaném souboru značek stavu, které společně tvoří diagram přechodů mezi stavy systému.

Jelikož je počet možných stavů konečný, součet pravděpodobností ve všech stavech se rovná jedné, to jest v libovolném časovém okamžiku musí být systém znázorněn jedním a pouze jedním ze stavů v diagramu přechodů mezi stavy. Jestliže se z praktických důvodů stavy s nízkou pravděpodobností vynechají, potom je součet pravděpodobností ve všech stavech roven jedné pouze přibližně.

Popsaná technika modelování se může též použít u systémů, u kterých se některé nebo všechny prvky neobnovují. Je nutné poznamenat, že se na systém s neobnovitelnými prvky může pohlížet jako na speciální případ systému s obnovitelnými prvky, ve kterém jsou intenzity obnov nulové (neboli doby obnov nekonečné).



Obrázek 1 – Diagram přechodů mezi stavy pro obnovitelný systém s jedním prvkem

2.1 Základní vlastnosti – Markovův řetězec s diskrétním a spojitým časem

Bílý šum je proces $\{X_t, t \in Z\}$ nekorelovaných náhodných veličin s nulovou střední hodnotou a stejným konečným rozptylem. Pokud náhodné veličiny X_t jsou nezávislé, mluvíme o striktním bílém šumu.

Mějme pravděpodobnostní prostor (Ω, A, P) a uvažujme na něm posloupnost náhodných veličin $\{X_n, n \in N_0\}$, které nabývají pouze celočíselných hodnot. Necht' S je množina celých

čísel i takových, že $i \in S$ právě tehdy, když existuje $n \in \mathbb{N}_0$ tak, že $P(X_n = i) > 0$. Množina S může být buď konečná nebo spočetně konečná. Budeme jí říkat *množina stavů* náhodného procesu $\{X_n, n \in \mathbb{N}_0\}$ a její prvky budeme nazývat *stavy*. Bez omezení na obecnosti budeme předpokládat, že $S = \{0, 1, \dots\}$.

Posloupnost celočíselných náhodných veličin $\{X_n, n \in \mathbb{N}_0\}$ se nazývá *Markovův řetězec s diskrétním časem* a množinou stavů S , jestliže

$$P(X_{n+1} = j | X_n = i_n, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_0 = i_0) = P(X_{n+1} = j | X_n = i) \quad (1)$$

pro všechna $n = 0, 1, \dots$ a všechna $i, j, i_{n-1}, \dots, i_0 \in S$ taková, že $P(X_n = i, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_0 = i_0) > 0$.

Vztah (1) vyjadřuje *markovskou vlastnost*, což znamená, že pravděpodobnost výsledku v budoucím čase $n + 1$, známe-li výsledek v přítomném čase n a výsledky z minulých časů $n - 1, n - 2, \dots, 0$, je stejná, jako když známe jen výsledek v přítomném čase.

Podmíněné pravděpodobnosti

$$P(X_{n+1} = j | X_n = i_n) = p_{ij}(n, n+1)$$

(pokud jsou definovány) se nazývají *pravděpodobnosti přechodu* ze stavu i v čase n do stavu j v čase $n+1$, někdy též *pravděpodobnosti přechodu 1. řádu*. Podobně podmíněné pravděpodobnosti

$$P(X_{n+m} = j | X_n = i_n) = p_{ij}(n, n+m)$$

pro přirozené $m \geq 1$ se nazývají *pravděpodobnostmi přechodu* ze stavu i v čase n do stavu j v čase $n + m$, jinak též *pravděpodobnosti přechodu m -tého řádu*.

Jestliže pravděpodobnosti přechodu $p_{ij}(n, n+m)$ nezávisí na časových okamžicích n a $n + m$, ale jen na jejich rozdílu m , říkáme, že příslušný Markovův proces je *homogenní*.

Systém celočíselných veličin $\{X_t, t \geq 0\}$ definovaný na pravděpodobnostním prostoru (Ω, A, P) se nazývá *Markovův řetězec se spojitém časem* a spočtenou množinou stavů S , jestliže

$$P(X_t = j | X_s = i, X_{t_n} = i_n, \dots, X_{t_1} = i_1) = P(X_t = j | X_s = i) \quad (2)$$

pro všechna $i, j, i_1, \dots, i_n \in S$ a pro všechna $0 \leq t_1 < t_2 < t_3 < \dots < t_n \leq s < t$, pro která $P(X_s = i, X_{t_n} = i_n, \dots, X_{t_1} = i_1) > 0$.

Bez újmy na obecnosti budeme předpokládat, že $S = \{0, 1, \dots\}$ a tedy vztah (2) opět vyjadřuje *markovskou vlastnost*.

Označme $P(X_t = j | X_s = i)$ jako $p_{ij}(s, t)$; tyto podmíněné pravděpodobnosti budeme nazývat *pravděpodobnosti přechodu* ze stavu i v čase s do stavu j v čase t . Podobně pravděpodobnosti $p_j(t) = P(X_t = j)$, $j \in S$ budeme nazývat *absolutní pravděpodobnosti v čase t* a pravděpodobnosti $p_j(t) = p_j(0) = P(X_0 = j)$, $j \in S$ budou *počáteční pravděpodobnosti*. Zřejmě $p_j(t) \geq 0$ pro všechna $j \in S$ a $\sum_{j \in S} p_j(t) = 1$, $t \geq 0$.

Dále se budeme zabývat jenom *homogenními* řetězci se spojitým časem, tj. takovými, pro jejichž pravděpodobnosti přechodu platí

$$p_{ij}(s, s+t) = p_{ij}(t), \quad s \geq 0, t > 0.$$

Pro každé $i, j \in S$ tedy budeme uvažovat celý systém pravděpodobností $\{p_{ij}(t), t > 0\}$ takových, že $\sum_{j \in S} p_{ij}(t) = 1$, neboli celý systém matic pravděpodobností přechodu $\{P(t), t > 0\}$. Je obvyklé definovat $p_{ij}(0) = \delta_{ij}$, tj. $P(0) = I$. Pokud nedojde k nedorozumění, je možné v dalším textu přívlastek „homogenní“ vynechávat.

3. Předpoklady a omezení

Všeobecně se používají pravidla pro vytváření diagramu přechodů mezi stavy uvedená v dokumentu [5] v části 8.2 (kromě pravidla h)).

Popis numerických technik se však používá pouze tehdy, když jsou všechny intenzity přechodů konstantní, z čehož vyplývá, že jsou intenzity poruch a obnov všech prvků v analyzovaném systému konstantní v čase. Předpoklad konstantní intenzity poruch je rozumně přijatelný před obdobím opotřebení u součástí v mnoha systémech (avšak jeho oprávněnost se má též ověřit), ale pokud není střední doba do obnovy jednotek krátká ve srovnání s odpovídající střední dobou do poruchy, má se předpoklad konstantní intenzity obnov ověřit. Vyhodnocení pro obecný případ, kdy nejsou intenzity poruch nebo intenzity obnov konstantní v čase, není předmětem této normy.

Určité omezení vzniká v důsledku předpokladů použitých u matematických řešení, zejména že budoucí chování systému závisí pouze na současném stavu systému a ne na způsobu, jakým se systém do tohoto stavu dostal. Pracovník provádějící analýzu musí zajistit, aby byla tato "bezpaměťová" vlastnost Markovových modelů dostatečnou aproximací skutečného chování systému (viz [5] část 8.1). Zvláštní opatrnosti je třeba tehdy, když se modelují vlivy poruch se společnou příčinou, které mohou vést k některým potenciálně mezilehlým stavům, které se obcházejí (viz dokument [5] obrázek B.4).

Obvyklé předpoklady pro každý prvek v uvažovaném systému je možné shrnout takto:

- intenzita poruch λ a intenzita obnov μ jsou konstantní (nezávislé na čase);
- pravděpodobnost přechodu ze stavu i do stavu j v krátkém časovém intervalu $(t, t+\Delta t)$, za předpokladu, že je systém v čase t ve stavu i , je $q_{ij} \Delta t$, kde q_{ij} je součet intenzit poruch a obnov daných prvků.

Teoreticky může být omezení ohledně konstantní intenzity poruch a intenzity obnov často překonáno na úkor rozšíření stavového prostoru, pokud může být neexponenciální rozdělení dob do poruchy nebo do obnovy aproximováno součtem exponenciálních rozdělení. Každé z těchto exponenciálních rozdělení musí být modelováno jako dodatečný stav, který působí jako určitý druh paměti pro uplynulou dobu do poruchy nebo dobu do obnovy. Tato koncepce, obvykle nazývaná fázová koncepce (nebo koncepce doplňkových stavů), dosud nebyla široce zavedena do praxe.

Metoda Markovovy analýzy má vztah k jiným technikám analýzy spolehlivosti. V dokumentu [5] lze nalézt příklady vztahů k například metodě FTA, RBD, Petriho sítí, aj.

4. Konstrukce diagramů přechodů mezi stavy

Před zahájením analýzy systému se mají provést následující všeobecné úkoly:

- a) Stanoví se cíl analýzy: První zásadní otázkou, která musí být zodpovězena, je, co má být cílem analýzy. Tímto cílem by mohlo být stanovení odhadu jednoho nebo více z následujících ukazatelů:
 - pravděpodobnost, že bude mít systém poruchu před časem t ;
 - četnost nebezpečných událostí;
 - střední doba do výskytu první poruchy systému;
 - součinitel ustálené pohotovosti;
 - pravděpodobnost, že bude mít systém poruchu, když je vydán požadavek na jeho provoz (u systémů, které nejsou v nepřetržitém používání);
 - jiný ukazatel, který je nutné specifikovat.

Je nutné též stanovit jednotky měření.

- b) Vymezí se znaky systému a hraniční podmínky analýzy.

Zde je nutné zodpovědět otázky, jako například:

- Jaké jsou důležité význačné vlastnosti systému, které je zapotřebí modelovat?
- Jak lze tyto vlastnosti validovat nebo jak lze přinejmenším zkontrolovat jejich věrohodnost?
- Bude se systém (po poruše) obnovovat nebo nebude?
- Je nutné popsat časově závislé chování?
- Jaká je skutečná nejistota dat, např. intenzit poruch a obnov nebo faktorů způsobujících poruchy se společnou příčinou;
- Jaká je požadovaná přesnost a/nebo konfidenční úroveň výsledků?

Jestliže nejsou pro model některé význačné vlastnosti reálného systému důležité, má se to zdůvodnit.

- c) Je nutné se ujistit, že je pro daný úkol Markovova technika nejvhodnější technikou analýzy. Volba techniky má být založena na cílech analýzy a na znacích systému, nikoliv naopak; jinak nemají být určité znaky systému vůbec modelovány. Zejména je nutné pečlivě zkontrolovat předpoklady a omezení modelu.
- d) Model a vstupní data mají přezkoumat odborníci (profesionálové se zkušenostmi z provozu), jelikož by chyby nebo nepřesnosti v modelu nebo datech mohly mít velký dopad na výsledek analýzy.

Kritickým úkolem Markovovy analýzy je řádný návrh diagramu přechodů mezi stavy.

Některá doporučená pravidla jsou uvedena v dokumentu [5] v článku 8.2. Pravidla mají být stanovena před provedením analýzy a nadále mají sloužit k řádné identifikaci jednotlivých stavů a mají umožnit sestavení jasně srozumitelných grafických modelů. Některá z nich uvádíme dále.

Dále uvedená pravidla slouží jako návod pro systematickou konstrukci diagramů přechodů mezi stavy. Diagramy přechodů mezi stavy, které se řídí těmito pravidly, lze obvykle snadno pochopit a porovnávat. V některých případech budou možná vhodnější jiné značky nebo jiná uspořádání diagramu.

- a) Stav se má zobrazit kroužkem nebo obdélníkem s identifikací, která umožňuje, aby se numerický postup jednoznačně odkazoval na tento stav. Identifikátorem je obvykle písmeno nebo číslo.
- b) Pokud je to pro srozumitelnost diagramu přechodů mezi stavy nezbytné, má se do značky buď přímo, nebo pomocí odkazu na seznam vysvětlivek zahrnout jasný popis stavu.

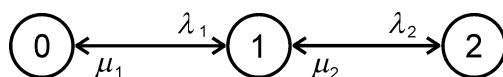
- c) Stav se mají uspořádat tak, aby stav umístěný nejvíce vlevo byl plně použitelný stav a stav umístěný nejvíce vpravo byl nepoužitelný stav systému. Relativní pozice mezilehlých stavů mají být takové, aby byl přechod zleva doprava výsledkem poruchy a aby se přechodu zprava doleva dosáhlo obnovou.
- d) Stav systému odpovídající stejnému počtu prvků v nepoužitelném stavu mají být svísele zarovnány.
- e) Přechody mezi stavy se mají vyznačit čarami se šipkami propojujícími určité stavy. Čára se šipkou vpravo představuje poruchu a čára se šipkou vlevo představuje obnovu. Jestliže je možné dosáhnout přechodu mezi dvěma stavy jak poruchou, tak obnovou, potom se mají tyto určité stavy propojit jedinou čarou se šipkami na obou koncích. Na jednoduchém diagramu přechodů mezi stavy je dovoleno k vyznačení poruchy a obnovy použít samostatné čáry vyznačující přechody.
- f) Šipky na čarách představující přechody se mají označit odpovídajícími intenzitami přechodů. To je možné provést vyznačením těchto intenzit buď přímo, nebo pomocí odkazu na jejich seznam s vysvětlivkami.
- g) Pokud je to možné, má každá čára spojoval pouze sousední značky stavu. Jestliže porucha se společnou příčinou vyřadí současně dva nebo více prvků, je nutné některý stav obejít.
- h) Ke zvýšení čitelnosti je možné nepoužitelné stavy na úrovni systému zvýraznit (např. tučnými čarami, vybarvením či šrafováním).

4.1 Grafická podoba a konstrukce diagramů přechodů mezi stavy

Prvním krokem při použití Markovovy techniky je vymezení stavů systému. Jako příklad je možné uvažovat systém s jedním prvkem. V nejjednodušším případě obsahuje příslušný diagram přechodů mezi stavy pouze dva stavy: použitelný stav 0 s intenzitou přechodu λ a nepoužitelný stav 1 s intenzitou přechodu μ , jak je znázorněno na obrázku 1.

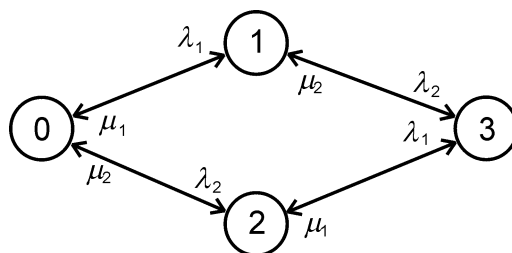
Šipka ze stavu 0 do stavu 1 vyznačuje výskyt poruchy s pravděpodobností $\lambda \Delta t$ během krátkého časového intervalu $(t, t + \Delta t)$. Šipka ze stavu 1 do stavu 0 znázorňuje dokončení obnovy systému s pravděpodobností $\mu \Delta t$.

Systém s jedním prvkem je možné též modelovat s použitím více než dvou stavů: 0 (funkční) a 1 (poruchový). Do diagramu je možné též zahrnout zhoršený stav, který je dosud použitelným stavem. Takový stav je stav 1 na obrázku 2: poruchový stav systému se stává stavem 2 (přičemž se předpokládá, že ve stavu 2 je možná oprava/obnova).



Obrázek 2 – Diagram přechodů mezi stavy systému s jedním prvkem v případě možných obnov/oprav ve stavu 2

Jelikož lze v zásadě jeden prvek znázornit dvěma stavy: 0 (použitelný) a 1 (nepoužitelný), jsou u systému se dvěma nezávislými prvky možné tyto stavy systému: (0 0), (0 1), (1 0), (1 1). Jestliže je systém se dvěma prvky sériový, je pouze stav (0 0) použitelný stav a stavy (0 1), (1 0), (1 1) jsou všechny nepoužitelné stavy. Jestliže systém obsahuje aktivní nebo pohotovostní zálohu, jsou všechny stavy (0 0), (0 1) a (1 0) použitelné stavy. V dalším textu se uvažuje pouze systém s aktivní zálohou 1 ze 2. Diagram přechodů mezi stavy pro systém s aktivní zálohou 1 ze 2, který nemá žádné obnovitelné prvky, je uveden na obrázku 3.



Obrázek 3 – Diagram přechodů mezi stavy systému se dvěma obnovitelnými prvky s aktivní zálohou 1 ze 2, dvěma týmy pro obnovu a bez omezení obnovy

5. Vyhodnocení Markovovy analýzy

Účelem vyhodnocení diagramů přechodů mezi stavy je stanovit hodnoty ukazatelů bezporuchovosti, pohotovosti, udržovatelnosti či bezpečnosti systému. Při vyhodnocení se používají dobře známé matematické metody uvedené stručně níže a podrobněji např. v dokumentu [5].

Je třeba si povšimnout, že úloha pro získávání přechodných (časově závislých) ukazatelů, např. $R(t)$ a $A(t)$, vyžaduje podstatně více výpočtů než úloha, při které se získává ustálená hodnota ukazatele A nebo se získají střední hodnoty, např. MTTF, MDT, MUT.

Na začátku analýzy se má rozhodnout, zda je hlavním cílem vyhodnocení diagramu přechodů mezi stavy získat přechodné nebo ustálené hodnoty pravděpodobností stavů. Ačkoliv lze u zkoumání pohotovosti získat ustálené hodnoty pravděpodobností z přechodných hodnot (tak, že se t zvětšuje do nekonečna), je možné v případě, že je na začátku známo, že se požaduje pouze ustálené řešení, použít relativně jednoduchý matematický postup (viz např. dokument [5] přílohu A). Jestliže se naopak požaduje přechodné řešení, potom může být nutné použít mnohem speciálnější postup s použitím například Laplaceových transformací nebo maticové algebry (viz např. dokument [5] přílohu C). Obecně lze z pravděpodobností stavů odvodit ukazatele bezporuchovosti, pohotovosti, udržovatelnosti nebo bezpečnosti.

Rozdíl mezi ukazateli bezporuchovosti, pohotovosti, udržovatelnosti nebo bezpečnosti spočívá hlavně v zaměření analýz a interpretaci výsledků. Pro vysvětlení je možné uvažovat obnovitelný prvek, jehož dílčí vlastnosti spolehlivosti jsou obvykle dány intenzitou poruch λ a intenzitou obnov μ . Aby se objekt opět uvedl do provozu poté, co se v něm objeví porucha, je obvykle nutné, aby nastaly nejméně dvě věci:

- je nutné detekovat a izolovat poruchový stav (někdy se též říká negovat: to znamená, že se má vstoupit do stavu, kdy porucha nemá žádné další následky);
- objekt je nutné obnovit a opět uvést do provozu.

Doba obnovy v tomto kontextu zahrnuje logistickou dobu pro obnovu po detekci poruchy, dobu vlastní obnovy (hledání poruchového stavu, obnova, výměna, kontrola) a dobu uvedení prvku nebo samotného systému do provozu.

V obecném základním modelu je třeba přiřadit čtyři časové intervaly, které nás zajímají, pouze dvěma parametřům (intenzitě poruch λ a intenzitě obnov μ).

V kontextu bezporuchovosti, udržovatelnosti nebo pohotovosti se bere v úvahu doba do detekce poruchy tak, že se vypočítá intenzita poruch, a doba od detekce do obnovy tak, že se vypočítá intenzita obnov. V aplikacích, které jsou kritické z hlediska bezpečnosti, se nelze spoléhat na samotestování nebo obdobná opatření (která jsou obvyklá v kontextu pohotovosti), ale je nutné provádět detekci a izolaci nezávisle na objektu (konkrétní požadavky a příklady viz IEC 61508). Rozdíl mezi bezporuchovostí, udržovatelností

a pohotovostí konečně spočívá v soustředění se na různé cílové ukazatele: MTTF, MDT či $A(t)$. V kontextu bezpečnosti se obecně doba vlastní obnovy zanedbává, jestliže se během této doby provádějí jiná řídicí opatření. V tomto případě se do výpočtu intenzity obnov z analýzy bezporuchovosti započítá úplná doba do izolace. V jednotlivých aplikacích se může interpretace lišit.

5.1 Vyhodnocení ukazatelů bezporuchovosti

Při analýze bezporuchovosti se v diagramu přechodů mezi stavy všechny nepoužitelné stavy na úrovni systému učiní absorpčními stavy. Pravděpodobnost, že je systém v čase t v daném stavu, se počítá s použitím speciálních matematických technik (viz např. [5] přílohy A až C). Když se t blíží nekonečnu, pravděpodobnost sdružená s každým použitelným stavem se blíží k nule a součet pravděpodobností absorpčních stavů se blíží k jedné.

Pro vyhodnocení bezporuchovosti se získá střední doba do poruchy systému $MTTF_{S_i}$, když systém začíná v čase $t = 0$ ve stavu i , řešením rovnic

$$MTTF_{S_i} = \frac{1}{q_i} + \sum_{\substack{j \in \text{UP} \\ j \neq i}} \frac{q_{ij}}{q_i} MTTF_{S_j}, \quad i \in \text{UP}, \quad q_i = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^m q_{ij}$$

Výše uvedenou soustavu algebraických rovnic je možné též použít k výpočtu střední doby do nebezpečné poruchy (pro zkoumání bezpečnosti) tak, že se stanoví vhodná množina UP použitelných stavů.

Přesný výraz pro funkci bezporuchovosti $R_{S_i}(t)$, když systém začíná v čase $t = 0$ ve stavu i , je dán řešením (s použitím Laplaceovy transformace) rovnice:

$$R_{S_i}(t) = e^{-q_i t} + \sum_{\substack{j \in \text{UP} \\ j \neq i}} \int_0^t q_{ij} e^{-q_i x} R_{S_j}(t-x) dx, \quad i \in \text{UP}.$$

5.2 Vyhodnocení ukazatelů pohotovosti a udržitelnosti

Při analýze pohotovosti je nutné ověřit, že lze v diagramu přechodů mezi stavy každého stavu dosáhnout z každého jiného stavu. Pravděpodobnost, že je v čase t systém v daném stavu, se stanovuje pomocí technik uvedených například v [5] v přílohách A až C. Funkce okamžité pohotovosti $A(t)$ se rovná součtu pravděpodobností stavů sdružených s použitelnými stavy. Jak se t blíží k nekonečnu, blíží se pravděpodobnost sdružená s každým stavem ke konstantní hodnotě. Funkce okamžité pohotovosti systému se rovněž blíží ke konstantní hodnotě A .

Mohou být také vyhodnoceny další užitečné ukazatele:

- parametr proudu poruch na úrovni systému;
- střední doba setrvání v daném stavu i ;
- četnost vstupů do daného stavu i ;
- četnost opuštění daného stavu i .

Z pravděpodobností stavů je též možné získat MUT (střední dobu použitelného stavu) a MDT (střední dobu nepoužitelného stavu) systému. MUT je střední doba strávená v použitelných stavech a MDT je střední doba strávená v nepoužitelných stavech.

Součinitel asymptotické a ustálené pohotovosti A_S je dán vztahem:

$$A_S = \sum_{j \in \text{UP}} P_j,$$

kde P_j se získá řešením rovnic

$$P_j = \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^m P_i \frac{q_{ij}}{q_j}, \quad j = 0, \dots, m, P_j > 0, \quad \sum_{j=0}^m P_j = 1, \quad q_i = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^m q_{ij}.$$

Jelikož tyto rovnice nejsou nezávislé, musí se jedna (libovolně zvolená) rovnice pro P_j vypustit a nahradit rovnicí

$$\sum_{j=0}^m P_j = 1.$$

Jelikož se předpokládá, že je intenzita poruch konstantní, je pro intervalovou pravděpodobnost bezporuchového provozu IR_S v ustáleném stavu dobrou aproximací:

$$IR_S(t, t + \theta) = \sum_{j \in \text{UP}} P_j R_{S_j}(\theta) \approx A_S e^{-\theta / \text{MTTF}_{S_0}},$$

kde 0 vyznačuje stav, v němž jsou všechny prvky v provozu (nebo připraveny k provozu).

Asymptotický a ustálený parametr proudu poruch (četnost poruch) na úrovni systému z_S je dán rovnicí:

$$z_S = \sum_{\substack{j \in \text{UP} \\ i \in \text{D}}} P_j q_{ji} = \sum_{j \in \text{UP}} P_j \left(\sum_{i \in \text{D}} q_{ji} \right)$$

Ve výše uvedené rovnici je nutné uvažovat všechny intenzity přechodů q_{ji} , při nichž se opouští stav $j \in \text{UP}$ směrem ke stavu $i \in \text{D}$.

Pro malé Δt udává $z_S \Delta t$ pravděpodobnost přechodu v intervalu $(t, t + \Delta t)$ pro libovolný čas t (v ustáleném stavu) z nějakého stavu v množině použitelných stavů do nějakého stavu v množině nepoužitelných stavů a naopak.

Veličiny MUT_S (střední doba použitelného stavu na úrovni systému) a MDT_S (střední doba nepoužitelného stavu na úrovni systému) jsou v ustáleném stavu dány rovnicemi:

$$\text{MUT}_S = \frac{A_S}{z_S} \quad \text{a} \quad \text{MDT}_S = \frac{1 - A_S}{z_S}$$

$\text{MUT}_S + \text{MDT}_S = 1/z_S$, kde z_S je asymptotický a ustálený parametr proudu poruch (četnost poruch) na úrovni systému.

Pro daný stav i platí zejména, že:

$$\frac{1}{q_i} = \text{nepodmíněná střední doba strávená ve stavu } i;$$

$$P_i(t)q_i = \text{četnost přechodů ze stavu } i;$$

$$\sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^m P_j(t)q_{ji}\Delta t = \text{nepodmíněná pravděpodobnost vstupu do stavu } i \text{ v intervalu } (t, t + \Delta t)$$

pro malé Δt .

Pro rozsáhlé sériově/paralelní struktury jsou přibližné výrazy známy z literatury. Pro velmi rozsáhlé a složité systémy může být nutné použít simulaci Monte Carlo.

6. Dokumentace Markovovy analýzy

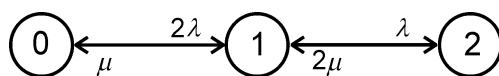
Do zprávy o výsledcích analýzy se mají zahrnout tyto prvky:

- a) specifikace požadovaných ukazatelů (např. bezporuchovosti, pohotovosti, udržovatelnosti, bezpečnosti);
- b) hlavní použité předpoklady včetně jejich oprávněnosti (například předpoklad konstantní intenzity poruch a intenzity obnov);
- c) oprávněnost vhodnosti použití Markovových technik;
- d) popis diagramu přechodů mezi stavy včetně hloubkového zkoumání následujících hledisek:
 - identifikace použitelných a nepoužitelných stavů;
 - důvody, proč jsou některé stavy seskupeny a jiné zanedbány, pokud je to použitelné;
 - přechody mezi stavy;
 - volba číselných hodnot intenzit přechodů;
 - základní předpoklady spojené se sestavením diagramu;
- e) popis
 - metod výpočtu a
 - počítačových programů, pokud se používají;
- f) číselné výsledky:
 - výsledky v číselném a grafickém tvaru;
 - vliv použitých předpokladů při vypracování diagramu přechodů mezi stavy nebo při výpočtech;
 - výsledky analýzy citlivosti.

Viz též IEC 60300-3-1.

7. Příklad Markovovy analýzy pro vyhodnocení pohotovosti pomocí metody diferenciálních rovnic

Za předpokladu, že jsou dané dva prvky v systému totožné, nebo že mají stejné intenzity poruch a obnov, se potom obdrží zjednodušený diagram, jako je na obrázku 4.



Obrázek 4 – Diagram přechodů mezi stavy pro systém s aktivní zálohou 1 ze 2 se stejnými prvky, dvěma týmy pro obnovu a neomezenými zdroji obnovy

Je třeba si povšimnout, že se diagram přechodů mezi stavy k odhadu pravděpodobnosti bezporuchového provozu $R(t)$ získá vyloučením přechodu obnovy ze stavu 2 do stavu 1. Stav 2 se tudíž stává absorpčním stavem.

Nechť $P_0(t)$, $P_1(t)$, $P_2(t)$ jsou pravděpodobnosti výskytu systému ve stavech 0, 1 a 2 v čase t (obrázek 4). Ze stavového diagramu na obrázku 4 se získají následující diferenciální rovnice:

$$\begin{aligned}\frac{dP_0(t)}{dt} &= -2\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) \\ \frac{dP_1(t)}{dt} &= 2\lambda P_0(t) - (\lambda + \mu)P_1(t) + 2\mu P_2(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda P_1(t) - 2\mu P_2(t)\end{aligned}$$

Dostáváme tudíž matici intenzit přechodů, kterou lze přímo stanovit z diagramu přechodů mezi stavy,

$$Q(\lambda, \mu) = \begin{bmatrix} -2\lambda & 2\lambda & 0 \\ \mu & -(\lambda + \mu) & \lambda \\ 0 & 2\mu & -2\mu \end{bmatrix}$$

a můžeme formálně vyjádřit diferenciální rovnici jako $\frac{d}{dt}P(t) = Q(\lambda, \mu)^T \times P(t)$, kde $P(t) = [P_0(t) \ P_1(t) \ P_2(t)]^T$.

Nyní je nutné nalézt vlastní hodnoty $\varepsilon(\lambda, \mu)$ a vlastní vektory $E(\lambda, \mu)$ matice Q^T . V případě různých vlastních hodnot (což platí v Markovových technikách u většiny modelů, které jsou předmětem zájmu, pro téměř všechny hodnoty parametrů), lze vektor pravděpodobností stavů přímo vyjádřit rovnicí:

$$P(t) = E(\lambda, \mu) \times \begin{bmatrix} \exp(\varepsilon(\lambda, \mu)_0 t) \\ \exp(\varepsilon(\lambda, \mu)_1 t) \\ \exp(\varepsilon(\lambda, \mu)_2 t) \end{bmatrix} \times E(\lambda, \mu)^{-1} \times P(0)$$

Vyhodnocením výše uvedené maticové rovnice lze vypočítat pravděpodobnosti $P_0(t)$, $P_1(t)$, $P_2(t)$ za předpokladu, že je například systém v čase $t = 0$ ve stavu 0, tj.

$$P(0) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

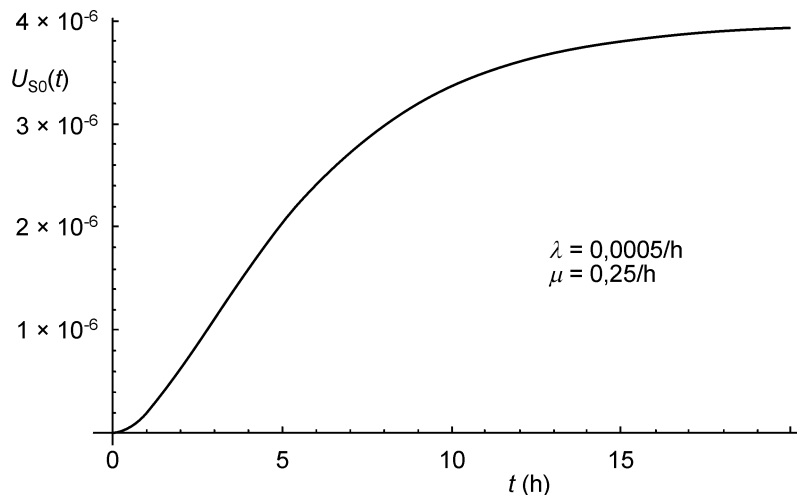
Funkce okamžité pohotovosti $A_{S0}(t)$ se potom vypočítá ze vztahu

$$A_{S0}(t) = P_0(t) + P_1(t)$$

Indexy S0 v $A_{S0}(t)$ jsou pro vysvětlení, že se jedná o pohotovost na úrovni systému, kdy systém začíná v čase $t = 0$ ve stavu 0. Pro tento jednoduchý model je možné vypočítat explicitní výraz s použitím λ a μ , například pomocí Laplaceovy transformace, daný vzorcem:

$$A_{S0}(t) = \frac{\mu^2 + 2\lambda\mu}{(\lambda + \mu)^2} + \left(\frac{\lambda}{\lambda + \mu} \right)^2 e^{-(\lambda + \mu)t} (2 - e^{-(\lambda + \mu)t})$$

Na obrázku 5 je ukázán číselný příklad pro součinitele nepohotovosti $U_{S0}(t) = 1 - A_{S0}(t)$.



Obrázek 5 – Číselný příklad pro součinitele nepohotovosti

8. Závěr

Markovova analýza poskytuje vhodný nástroj k posuzování pohotovosti, bezporuchovosti, udržovatelnosti a bezpečnosti.

Její možnosti grafického i analytického vyjádření jsou velmi široké a to rovněž s ohledem na složitost posuzovaného systému a jeho funkcí.

Výhodnost analýzy spočívá jak v grafické podobě, která vyjadřuje schématickou podobu chování systému – ve formě jednotlivých stavů, tak ve formě analytické a grafické názornosti výsledků. Výhodné rovněž je, že tato analýza umožňuje posuzování systému s určitou časovou dynamikou.

Na základě těchto výsledků mohou být provedeny návrhy konstrukčních změn, lze sestavovat, resp. modifikovat údržbu, nebo provádět studie nákladů a přínosů. Stejně jako ostatní analýzy spolehlivosti patří metoda Markovovy analýzy k neopomenutelným nástrojům, pomocí kterých je možné naplňovat požadavky na spolehlivost systému. To rovněž především standardizované podobě této metody [5].

Poděkování

Vznik tohoto příspěvku byl podpořen projektem pro institucionální rozvoj K-202 Univerzity obrany v Brně.

Použité zdroje

- [1] HOLUB, R. – VINTR, Z. Spolehlivost letadlové techniky [Elektronická učebnice]. Brno: VUT v Brně, 2001.
- [2] MATĚJČEK, J. Stručný přehled norem z oblasti spolehlivosti. In Úvod do spolehlivosti. Praha: Česká společnost pro jakost, 2014, s. 18–26. ISBN 978-80-02-02514-6.

- [3] VINTR, M. Oborové normy ve spolehlivosti. In Mezinárodní a národní normalizace ve spolehlivosti. Praha: Česká společnost pro jakost, 2012, s. 29–36. ISBN 978-80-02-02421-7.
- [4] ČSN IEC 60050/192. Mezinárodní elektrotechnický slovník – Část 192: Spolehlivost. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [5] ČSN EN 61165:2006. Techniky analýzy spolehlivosti – Analýza stromu událostí (ETA). Praha: ÚNMZ, 2011.
- [6] Prášková, Z. a Lachout, P. Základy náhodných procesů, Praha: UK, 1998.
- [7] IEC 60300-3-1:2004, Management spolehlivosti – Část 3-1: Pokyn k použití Techniky analýzy spolehlivosti – Metodický pokyn.
- [8] IEC 61508:2010, Funkční bezpečnost elektrických/elektronických/ programovatelných elektronických systémů souvisejících s bezpečností – Část 4: Definice a zkratky.