

Příspěvek k rozboru spolehlivosti výkonových olejových transformátorů 1. část

Contribution to Reliability Analysis of Power Oil Transformers - 1. Part

Miloš Hammer, Jakub Ertl, Oldřich Barvenčík, David Kutálek

*hammer@fme.vutbr.cz, yertlj00@stud.fme.vutbr.cz, ybarve00@stud.fme.vutbr.cz,
ykutal01@stud.fme.vutbr.cz*

Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně

Abstrakt: V úvodu článku jsou definovány základní pojmy z teorie spolehlivosti a údržby technických zařízení. Dále jsou popsány dva přístupy k rozboru spolehlivosti, které jsou aplikovány na výkonové olejové transformátory. První předpokládá transformátor jako celek, druhý jej chápe jako neopravovaný sériový systém.

Abstract: Basic concept of reliability and maintenance of technical equipments is introduced in this article. Two methods for reliability assessment of power oil transformers are described in this article too. The first method is based on usual stochastic model of reliability with constant failure rate or with power failure rate. The second method assumes that power oil transformer is non-repairable system. In this article is shown that model with power failure rate has better accuracy than model with constant failure rate.

Příspěvek k rozboru spolehlivosti výkonových olejových transformátorů – 1. část

Miloš Hammer¹, Jakub Ertl², Oldřich Barvenčík³, David Kutálek⁴

¹Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně
Email: hammer@fme.vutbr.cz

²Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně
Email: yertlj00@stud.fme.vutbr.cz

³Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně
Email: ybarve00@stud.fme.vutbr.cz

⁴Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně
Email: ykotal01@stud.fme.vutbr.cz

Abstrakt – V úvodu článku jsou definovány základní pojmy z teorie spolehlivosti a údržby technických zařízení. Dále jsou popsány dva přístupy k rozboru spolehlivosti, které jsou aplikovány na výkonové olejové transformátory. První předpokládá transformátor jako celek, druhý jej chápe jako neopravený sériový systém.

1 Úvod

Problematika spolehlivosti je nedílnou a důležitou součástí péče o jakost. **Jakost** se definuje jako stupeň splnění požadavků souborem vlastních znaků. Za znak se považuje jakákoliv rozlišující vlastnost. Rozlišují se dva druhy znaků:

- znak kvalitativní** – je rozlišitelný srovnáním,
- znak kvantitativní** – je rozlišitelný měřením.

Jakost se vztahuje na produkty, procesy a organizace. Jakost produktů je obecně určována ekonomickými složkami (náklady a přínosy výrobce i zákazníka) a užitnými vlastnostmi. Struktura určení jakosti produktu je znázorněna v následujícím diagramu, podle kterého patří spolehlivost mezi užitné vlastnosti při určování jakosti produktu.

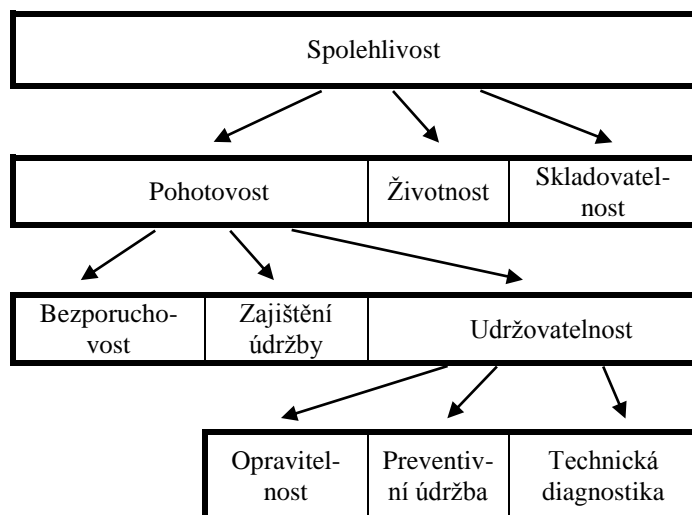
Tabulka 1: Určení jakosti produktu.

Jakost produktu	
Užitné vlastnosti	Náklady
Funkčnost	Výrobce Zákazníka
Spolehlivost	
Bezpečnost	
Ekologie	

2 Základní pojmy

Pojem spolehlivosti lze definovat v širším nebo užším pojetí. Spolehlivost v širším pojetí je chápána jako komplexní vlastnost, vyjadřující obecnou schopnost objektu zachovávat funkční a další vlastnosti v čase a za stanovených podmínek. Zahrnuje tak dílčí vlastnosti objektu jako **životnost, skladovatelnost, pohotovost**, atd. Spolehlivost v užším pojetí se podle [3] definuje jako souhrnný termín používaný pro popis pohotovosti a činitelů, které ji ovlivňují: **bezporuchovost, udržitelnost a zajištění údržby**. V angličtině bývá takto definovaná spolehlivost označována pojmem **dependability**. Vztah mezi uvedenými definicemi vyjadřuje Tab. 2.

Tabulka 2: Definice spolehlivosti.



Vlastnosti objektu, které patří do studia spolehlivosti, jsou v [3] definovány následujícím způsobem:

Životnost (durability) - schopnost objektu plnit požadovanou funkci v daných podmínkách používání a údržby do dosažení mezního stavu.

Pohotovost (availability) - schopnost objektu být ve stavu schopném plnit požadovanou funkci v daných podmínkách, v

daném časovém okamžiku nebo v daném časovém intervalu, za předpokladu, že jsou zajištěny požadované vnější prostředky.

Bezporuchovost (reliability) - schopnost objektu plnit požadovanou funkci v daných podmínkách a v daném časovém intervalu. Obecně se předpokládá, že na počátku časového intervalu je objekt ve stavu schopném plnit požadovanou funkci.

Udržovatelnost (maintainability) - schopnost objektu v daných podmínkách používání setrvat ve stavu nebo vrátit se do stavu, v němž může plnit požadovanou funkci, jestliže se údržba provádí v daných podmínkách a používají se stanovené postupy a prostředky.

Zajištění údržby (maintenance support performance) - schopnost organizace poskytující údržbářské služby zajišťovat podle požadavků v daných podmínkách prostředky potřebné pro údržbu podle dané koncepce údržby. Dané podmínky se vztahují jak na vlastní objekt, tak i na podmínky používání a údržby.

Údržba (maintenance) - kombinace všech technických a administrativních činností, včetně činností dozoru, zaměřených na udržení ve stavu nebo navrácení objektu do stavu, v němž může plnit požadovanou funkci.

Preventivní údržba (preventive maintenance) - údržba prováděná v předem určených intervalech nebo podle předepsaných kritérií a zaměřená na snížení pravděpodobnosti poruchy nebo degradace fungování objektu.

Oprava (repair) - část údržby po poruše, při níž se na objektu provádějí ruční operace.

Zbývající pojmy z Tab. 2 lze definovat takto:

Technická diagnostika (technical diagnostics) - vědní obor, který se zabývá metodami, postupy a prostředky většinou bezdemontážního a nedestruktivního zjišťování technického stavu objektů.

Opravitelnost (repairability) - znamená schopnost výrobku navrátit se do stavu plnění funkcí po odstranění vzniklých poruch.

V souvislosti s určováním spolehlivosti v technické praxi se rozlišují tři různé druhy:

a) **Inherentní spolehlivost** - spolehlivost objektu navržená během jeho vývoje a výroby. Podmínky jeho provozu, vlivy okolního prostředí, druhy prováděné údržby atd. zde nejsou uvažovány.

b) **Provozní spolehlivost** - spolehlivost, která zahrnuje okolní vlivy a další podmínky spojené s provozem daného objektu.

c) **Odhadovaná spolehlivost** - spolehlivost, která je výsledkem aplikace matematických postupů a analýzy provozu objektu.

2.1 Stavby objektů

Následující odstavce, které uvádí výčet základních pojmů, jsou zpracovány podle [3]. **Provoz** je stav, kdy objekt plní požadovanou funkci. V jistém smyslu opačný stav, kdy objekt neplní požadovanou funkci, nazýváme **prostoj**. Základních příčin, proč objekt neplní svou funkci, může být několik, například porucha (tém se budeme věnovat v dalším textu), provádění údržby, nezajištěnost vnějších zdrojů, ale také přerušo-

ení provozu uživatelem. **Použitelný stav** objektu je charakterizován skutečností, že objekt může plnit požadovanou funkci za předpokladu, že vnější prostředky, jsou-li požadovány, jsou zajištěny. **Provozuneschopný stav (výpadek)** je charakterizován tím, že objekt je neschopný plnit z jakýchkoliv důvodů požadovanou funkci. Provozuneschopný stav lze dále rozdělit podle vlastností jeho příčiny. Rozlišujeme **provozuneschopný stav z vnějších příčin** (objekt je v použitelném stavu, ale nemá požadované vnější prostředky nebo je provozuneschopný z důvodů jiných plánovaných operací, než je údržba) a **provozuneschopný stav z vnitřních příčin**, neboli **nepoužitelný stav**. V tomto stavu se objekt nachází, pokud je v **poruchovém stavu** (objekt není schopen plnit požadovanou funkci, vyjma neschopnost během preventivní údržby nebo jiných plánovaných činností a kvůli nedostatku vnějších prostředků), nebo pokud není schopen plnit požadovanou funkci během preventivní údržby (bude upřesněno v dalším textu). **Nevyužitým stavem** (také **neobsazeným stavem**) rozumíme prostoj objektu v použitelném stavu v době nepožadované funkce. Stav objektu, u kterého se usuzuje, že může způsobit úraz osob, značné materiální škody nebo jiné nepříjemné následky, se nazývá **kritický**. **Pohotovostní stav** objektu je jeho prostoj v použitelném stavu během doby požadované funkce. Vztahy mezi vybranými stavy objektů jsou v Tab. 3.

Tabulka 3: Vybrané stavy objektů

		Prostoj	
		Použitelný stav	Nepoužitelný stav
Provoz	Nevyužitý stav	Provozuneschopný stav z vnějších příčin	Provozuneschopný stav z vnitřních příčin
			Preventivní údržba Poruchový stav

2.2 Poruchy objektů

Poruchou v teorii spolehlivosti nazýváme ukončení schopnosti objektu plnit požadovanou funkci. Porucha, způsobená neshodou výrobního provedení nebo určených výrobních postupů, se nazývá **výrobní porucha**. Častěji se však zabýváme **poruchou způsobenou stárnutím**, to je porucha, jejíž pravděpodobnost výskytu vzrůstá s časem jako důsledek vnitřních procesů v objektu. Poruchu, která nebyla očekávána na základě předchozího zkoumání nebo sledování, nazveme **náhlou**.

2.3 Činnosti na objektech

Údržba je kombinace všech technických a administrativních činností, včetně činností dozoru, zaměřených na udržení ve stavu nebo navrácení objektu do stavu, v němž může plnit požadovanou funkci. Základními typy údržby je již zmíněná údržba preventivní a **údržba po poruše**, ta je prováděna po zjištění poruchového stavu a zaměřená na uvedení objektu do

stavu, v němž může plnit požadovanou funkci. Konstatování, že nastal poruchový stav, se podle [3] nazývá **zjištění poruchového stavu**. **Diagnostikování zařízení** jsou operace prováděné za účelem zjištění poruchového stavu, lokalizace porouchané části a identifikace příčiny.

2.4 Vybrané pozorované veličiny

Doba provozu – časový interval, během něhož je objekt v provozu. Podobně definujeme **dobu provozu do poruchy**. Jedná se o celkovou dobu provozu objektu od okamžiku prvního uvedení do použitelného stavu až do poruchy. V případě, že se jedná o neopravovaný objekt, je doba provozu do poruchy zároveň dobou technického života tohoto objektu. U opravených objektů nazveme celkovou dobu provozu mezi dvěma po sobě jdoucími poruchami **dobou provozu mezi poruchami**. Časový interval lze také jednoduše přiřadit k činnosti zmíněným v předchozím odstavci, jejich vzájemné vztahy jsou v Tab. 4. Doplňme, že **logistické zpoždění** je kumulovaná doba, během níž se nemohou provádět údržbářské operace z důvodu nezbytného k získání údržbářských prostředků, kromě administrativního zpoždění. Podobně kumulovanou dobu potřebou k provedení pomocných technických operací, které souvisí s údržbářským zásahem, nazveme **technickým zpožděním**.

Tabulka 4: Schéma dob údržby

Doba údržby				
Doba preventivní údržby		Doba údržby po poruše		
		Doba aktivní údržby		
Logistické zpoždění	Doba aktivní preventivní údržby	Doba aktivní údržby po poruše		Logistické zpoždění
		Doba opravy		
		Doba lokali- zace poru- chy	Doba ak- tivní opra- vy	Doba kon- troly

Je zřejmé, že do rozboru spolehlivosti je nutné zahrnout všechny výše uvedené základní pojmy. Rozlišuje se několik stavů zkoumaného technického zařízení a několik druhů údržby, která závisí na aktuálním stavu objektu. V další části článku bude tento postup aplikován na výkonové olejové transformátory.

3 Výkonový olejový transformátor

Výkonové olejové transformátory jsou jedním z nejdůležitějších zařízení v distribuci elektrické energie od výrobce směrem ke spotřebiteli. Různé poruchy transformátorů mohou způsobit přerušení dodávek elektrické energie, újmu na zdraví obsluhy, ztráty na lidských životech, poruchy dalších technických zařízení a v neposlední řadě škody v průmyslové výrobě nebo nemalé ekonomické ztráty. Často je havárie transformátorů spojena s výbuchem, požárem a jinými možnými ekologickými škodami. V případě jaderných elektráren to může vést až k porušení radiální bezpečnosti. Ve světě jsou známy různé havárie transformátorů, kde číselné vyjádření škod a důsledků dosáhlo v jednotlivých případech **až i stovek milionů korun**. Z těchto důvodů je nutné sledovat stav výkonových olejových transformátorů a provádět rozbor jejich spolehlivosti. Podle [14] dochází v technickém životě transformátorů k poruchám a haváriím z různých příčin. V Tab. 5 jsou uvedeny příčiny poruch a relativní četnost jejich výskytu [14].

Výkonový olejový transformátor lze považovat za systém, jehož podstatné části ovlivňující celkovou spolehlivost mohou být zejména:

- **izolační systém** – olej a celulóza,
- **magnetický obvod** – plechy
- **elektrický obvod** – vinutí,
- **mechanické části konstrukce** – svorníky, držáky, šrouby,
- **chladicí nádoba s příslušenstvím**,
- **průchodky**.

Všechny podstatné části jsou detailně popsány v [3].

Tabulka 5: Příčiny poruch výkonových olejových transformátorů [14].

Příčina	Zasažený systém	Procentuální podíl
Chyba izolace	Izolační systém	26 %
Chyba výroby	Není specifikováno	24 %
Neznámá	Není specifikováno	16 %
Zkrat	Izolační systém/ Elektrický obvod	7 %
Nesprávná údržba	Není specifikováno	5 %
Přetížení	Izolační systém	5 %
Kontaminace oleje	Izolační systém	4 %
Přetížení	Izolační systém/ Mechanické části konstrukce	4 %
Požár/exploze	Izolační systém/ Chladicí nádoba s příslušenstvím	3 %
Blesk	Izolační systém	3 %
Povodeň	Chladicí nádoba s příslušenstvím	2 %
Vlhkost	Chladicí nádoba s příslušenstvím	1 %

4 Stochastický model spolehlivosti

Stochastický model určitého zařízení stojí na předpokladu, že doba jeho bezporuchového provozu je spojitá náhodná veličina T , která nabývá nezáporných hodnot. Pro její popis lze užít zejména následujících funkčních charakteristik [4].

Distribuční funkce $F(t)$ náhodné veličiny T je funkce

$$F(t) = P(T < t),$$

definovaná pro všechna $t \in (-\infty, \infty)$ a vyjadřuje pravděpodobnost jevu, že doba bezporuchového provozu objektu je menší než t , takže $F(t) = 0$ pro $t \in (-\infty, 0)$.

Hustota pravděpodobnosti $f(t)$ náhodné veličiny T je nezáporná funkce $f(t)$, pro kterou platí

$$\int_0^t f(\tau) d\tau = F(t)$$

pro všechna $t \in (-\infty, \infty)$.

Funkce spolehlivosti $S(t)$ náhodné veličiny T je funkce

$$S(t) = 1 - F(t) = P(T \geq t)$$

pro všechna $t \in (-\infty, \infty)$. $S(t)$ vyjadřuje spolehlivost objektu, jedná se o pravděpodobnost, že doba bezporuchového provozu překročí dobu t . Dále bude popsáno, jak lze tuto charakteristiku získat pomocí naměřených dat [10]. Předpokládáme, že je k dispozici n dob do poruchy nějakého zařízení t_1, t_2, \dots, t_n jako nezávislé realizace veličiny T . Pak funkci

$$S_n(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{(t, \infty)}(t_i),$$

kde

$$I_A(t_i) = \begin{cases} 1, & \text{pokud } t_i \in A \\ 0, & \text{jinak,} \end{cases}$$

nazýváme **empirickou spolehlivostní funkcí**. Hodnota $S_n(t)$ udává poměr počtu pozorování, jejichž hodnota je větší než t , k počtu všech pozorování. Lze tak dostat první informaci o tvaru spolehlivostní funkce, kterou můžeme využít například pro vhodnou volbu spolehlivostního modelu.

Další funkční charakteristikou pro popis náhodné veličiny T je její **intenzita poruch** $h(t)$, nechť

$$h(t) = \frac{f(t)}{S(t)}.$$

Kumulovaná intenzita poruch $H(t)$ náhodné veličiny T je pak dána předpisem

$$H(t) = \int_0^t h(\tau) d\tau.$$

Charakteristika, která se nazývá **střední zbytková životnost** a značíme ji $r(t)$, se pokouší nalézt odpověď na otázku, kolik času do poruchy zbývá průměrně danému zařízení v čase t . Definována je následovně

$$r(t) = E(T - t | T > t).$$

Následně lze dojít ke vztahu, že

$$r(t) = \frac{\int_t^\infty S(\tau) d\tau}{S(t)}.$$

Mezi uvedenými charakteristikami platí vzájemně jednoznačné vztahy [8]. Zde je vybráno několik z nich pro situaci, kdy je známá intenzita poruch $h(t)$ náhodné veličiny T , ta je totiž výstupem modelů popsanych dále. Platí, že

$$f(t) = h(t) \cdot \exp \left[- \int_0^t h(\tau) d\tau \right],$$

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \int_0^t h(\tau) d\tau \right],$$

$$S(t) = \exp \left[- \int_0^t h(\tau) d\tau \right],$$

$$H(t) = \exp \left[- \int_0^t h(\tau) d\tau \right].$$

V následujícím textu budou popsány vybrané postupy, jak modelovat spolehlivostní charakteristiky.

4.1 Model předpokládající konstantní intenzitu poruch (KIT)

Jak již napovídá název modelu, předpokládá **konstantní intenzitu poruch** $h(t)$ náhodné veličiny T , tedy

$$h(t) = \lambda, \quad \lambda > 0.$$

Z uvedeného vyplývá, že

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t},$$

což je předpis pro hustotu pravděpodobnosti náhodné veličiny, která má exponenciální rozdělení pravděpodobnosti s parametrem λ . Je tedy zřejmé, že tento model je vhodné užít zejména v případech, kdy se náhodná veličina T řídí právě tímto rozdělením. K odhadu parametru λ lze užít například funkci `expfit` implementovanou v systému MATLAB.

Model KIT tak dobře popisuje především spolehlivost objektů, u nichž dochází k poruchám ze zcela náhodných příčin, nikoliv z důvodu např. opotřebení.

4.2 Model předpokládající mocninnou intenzitu poruch (MIT)

Intenzitu poruch pozorované náhodné veličiny je možné v souladu s předpokladem, aby byla **mocninnou funkcí** času, napsat ve tvaru

$$h(t) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} t^{\alpha-1},$$

kde α a β jsou kladné konstanty. Lze odvodit následující vztah pro hustotu pravděpodobnosti $f(t)$

$$f(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right].$$

Zde se jedná o hustotu pravděpodobnosti náhodné veličiny, jež má **Weibullovo rozdělení** pravděpodobnosti o parametrech α a β [10]. Je vhodné poznamenat, že Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti se někdy uvádí jako tříparametrické [8], [9], pak by byl v popsaném případě třetí parametr nulový. Parametry α a β lze odhadnout například užitím systému MATLAB (funkce `wblfit`).

Model MIT je tak vhodný právě pro situace, kdy má sledovaná náhodná veličina Weibullovo rozdělení. Je zřejmé, že pokud položíme $\alpha = 1$, dostáváme model KIT.

5 Odhadování spolehlivostních charakteristik

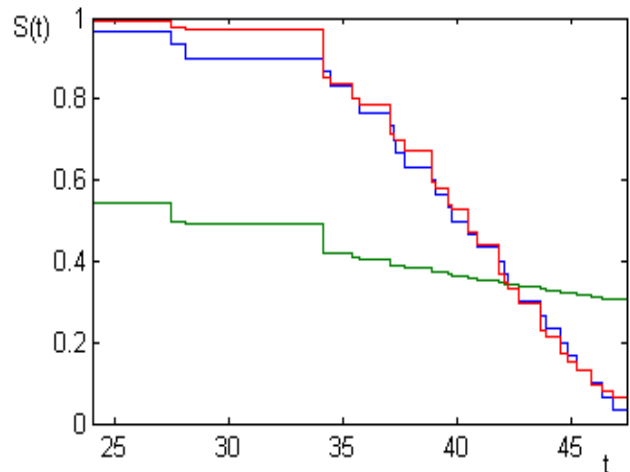
Aplikací modelů popsaných v kapitole 4 na datový soubor obsahující 30 dob do poruchy vybraných výkonových olejových transformátorů lze odhadnout spolehlivostní charakteristiky, které jsou uvedeny v kapitole 2.

Nejprve byla stanovena empirická spolehlivostní funkce. Pomocí vztahů uvedených výše a v [8] byly dopočítány ostatní charakteristiky.

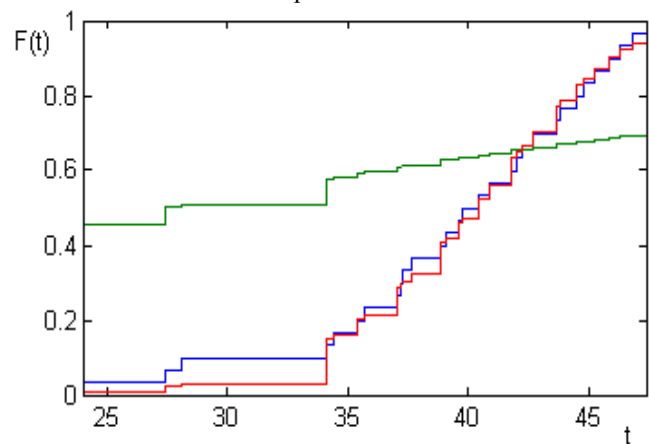
Dále byly k odhadům uvedených charakteristik užity modely KIT a MIT. Součástí modelování bylo i testování hypotéz, zda mají použítá data exponenciální nebo Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti, užit byl Kolmogorovův - Smirnovův test dobré shody, např. [9]. Hypotéza, že data mají exponenciální rozdělení pravděpodobnosti byla zamítnuta. Hypotéza, že mají Weibullovo však zamítnuta nebyla.

Výsledné odhady všemi třemi postupy jsou zakresleny do jednotlivých obrázků, modře pro empirické spolehlivostní charakteristiky, zeleně pro charakteristiky odhadnuté modelem KIT a konečně červeně charakteristiky odhadnuté modelem MIT. Zobrazené spolehlivostní charakteristiky jsou definovány v předchozí kapitole, čas t má jednotku roky provozu.

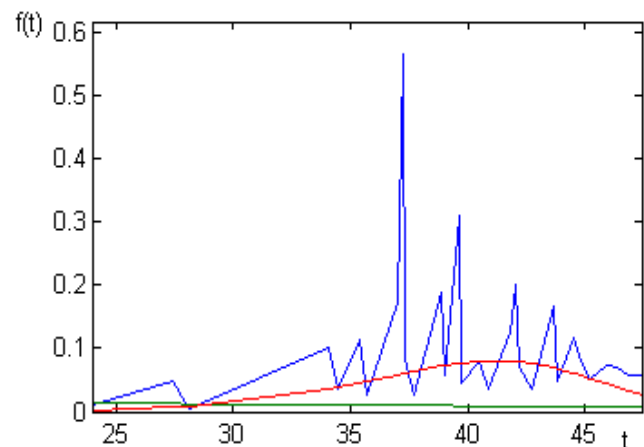
Na Obr. 1 jsou odhady spolehlivostních funkcí. Je patrné, že odhad získaný modelem MIT má k empirické spolehlivostní funkci výrazně blíže než odhad modelem KIT. Odpovídající distribuční funkce jsou na Obr. 2.



Obrázek 1: Spolehlivostní funkce

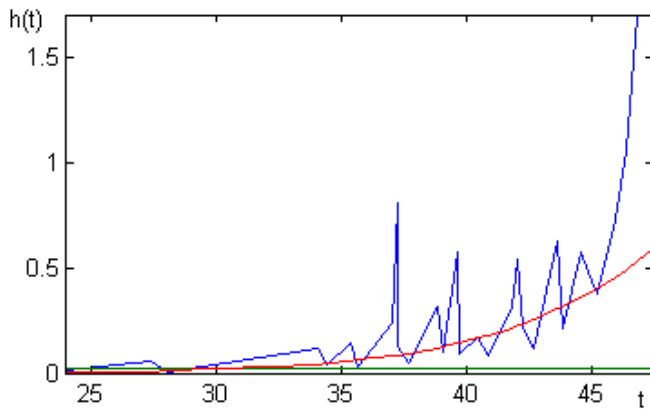


Obrázek 2: Distribuční funkce.



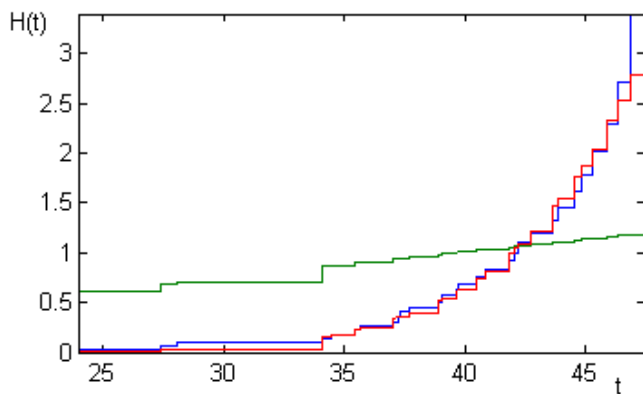
Obrázek 3: Hustoty pravděpodobnosti.

Odhadnuté hustoty pravděpodobnosti (Obr. 3) se od sebe liší výrazněji a odpovídají příslušným modelům, nelze rozhodnout, který z modelů se více blíží odhadu odvozenému z empirické spolehlivostní funkce.



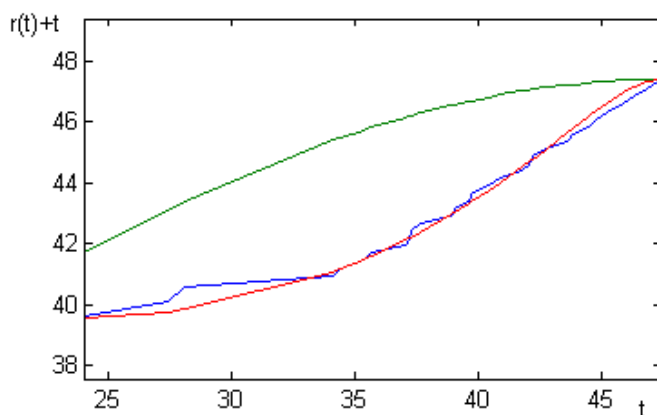
Obrázek 4: Intenzity poruch.

Z Obr. 4, na kterém jsou znázorněny intenzity poruch, je patrné, že i pro tento případ charakteru dat odpovídá lépe model MIT, tedy předpoklad mocninné intenzity poruch. Uvedenou skutečnost ilustruje i Obr. 5.



Obrázek 5: Kumulované intenzity poruch.

Zbývá poslední spolehlivostní charakteristika, jež byla odhadována, a to zbytková životnost. Její odhady znázorněny ve tvaru $r(t) + t$ jsou na Obr. 6, jedná se tak o pravděpodobné roky dožití stroje.



Obrázek 6: Zbytkové životnosti.

Také zde mají k sobě blíže odhad stanovený z empirické spolehlivostní funkce a odhad modelu MIT. Tento fakt lze vysvětlit

lit tím, že nebyla zamítnuta hypotéza, že data mají Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti.

6 Rozbor spolehlivosti výkonových olejových transformátorů jako neopravovaných systémů

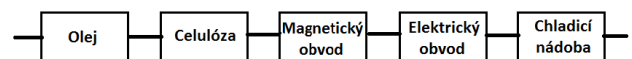
Systémy se obecně dělí na **neopravované** a **opravované**. Opravované systémy jsou podrobovány údržbě, která nefunkční prvky opraví nebo nahradí novými. Stáří jednotlivých prvků tedy už nadále není jednotné. U neopravovaných systémů je většinou pořízení zcela nových dílů ekonomičtější než jejich oprava.

Pro analýzu spolehlivosti složitějších neopravovaných systémů se používají metody z teorie grafů a matematické logiky:

- 1) **metoda seznamu,**
- 2) **metoda cest,**
- 3) **strom poruchových stavů,**
- 4) **jiné metody.**

6.1 Metoda seznamu

Princip této metody spočívá v sestavení všech možných logických událostí v systému. Nechť se systém skládá z n prvků, kde každý prvek může být v poruchovém nebo bezporuchovém stavu. Vypíše se seznam všech variací n -té třídy s opakováním z hodnot 0 (poruchový stav daného prvku) a 1 (bezporuchový stav daného prvku). Výsledkem je tak 2^n disjunktivních náhodných jevů, které značí poruchový stav, nebo bezporuchový stav celého systému. Pravděpodobnost bezporuchového stavu systému je potom rovna součtu pravděpodobností uvedených disjunktivních náhodných jevů pro bezporuchový stav systému. Možné blokové schéma výkonového olejového transformátoru je na obrázku 7.



Obrázek 7: Ideové blokové schéma podstatných částí výkonových olejových transformátorů.

Seznam událostí, které mohou nastat pro sériový systém z Obr. 7, zachycuje Tab. 6. Pravděpodobnost bezporuchového stavu celého transformátoru je potom rovna součtu pravděpodobností uvedených disjunktivních náhodných jevů pro bezporuchový stav systému:

$$P(T_T \geq t) = S_T(t) = S_o(t) \cdot S_c(t) \cdot S_m(t) \cdot S_e(t) \cdot S_{ch}(t).$$

6.2 Metoda cest

Tato metoda je založena na sestavení **grafu řešeného systému**. Graf má nejméně tolik hran, kolik má systém prvků, ale může jich mít i více, jestliže se hrana odpovídající jednomu prvku opakuje ve více spojeních vstupu s výstupem. **Sled** v orientovaném grafu je posloupnost hran, ke které lze najít takovou posloupnost uzlů, že pro každou hranu je odpovídající uzel uzlem vstupním a následující uzel uzlem výstupním.

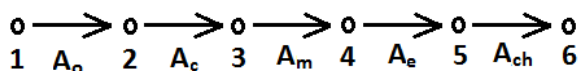
Tabulka 6: Seznam všech možných událostí pro sériový systém z Obr. 7.

Olej	Celulóza	Magnetický obvod	Elektrický obvod	Chladicí nádoba	Transformátor
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	0	0
0	1	1	1	1	0
0	1	1	1	0	0
1	0	1	1	1	0
1	0	1	1	0	0
1	1	0	1	1	0
1	1	0	1	0	0
1	1	1	0	1	0
1	1	1	0	0	0
0	0	1	1	1	0
0	0	1	1	0	0
0	1	0	1	1	0
0	1	0	1	0	0
0	1	1	0	1	0
0	1	1	0	0	0
1	0	0	1	1	0
1	0	0	1	0	0
1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	0	0
1	1	0	0	1	0
1	1	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0
0	0	0	1	0	0
0	0	1	0	1	0
0	0	1	0	0	0
0	1	0	0	1	0
0	1	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0

Tato posloupnost vede od vstupního uzlu sledu k výstupnímu uzlu sledu. Jestliže jsou v tomto sledu všechny uzly různé, potom jsou také všechny hrany různé a sled se nazývá **cesta**.

Cesta tedy prochází každým uzlem grafu nejvýše jednou. Pro spolehlivost systému uvažujeme pouze cesty ze vstupního do výstupního uzlu celého grafu. Spolehlivost systému je potom rovna pravděpodobnosti toho, že alespoň jedna cesta sestává pouze z hran, které odpovídají prvkům bez poruchy [8].

Orientovaný graf pro sériový systém z Obr. 7 je zachycen na Obr. 8, kde A_o značí stav oleje, A_c stav celulózy, A_m stav magnetického obvodu, A_e stav elektrického obvodu a A_{ch} stav chladicí nádoby. Každý tento prvek může být buď ve stavu bezporuchové činnosti ($A_x=1$), nebo ve stavu poruchy (stav $A_x=0$).



Obrázek 8: Orientovaný graf pro sériový systém z Obr. 7.

Z orientovaného grafu systému je zřejmé, že existuje pouze jedna cesta C z uzlu 1 do uzlu 6, která obsahuje pouze hrany, které odpovídají pouze prvkům bez poruchy.

$$C = ((A_o = 1) \wedge (A_c = 1) \wedge (A_m = 1) \wedge (A_e = 1) \wedge (A_{ch} = 1)).$$

Pravděpodobnost bezporuchového stavu celého transformátoru se spočítá podle vztahu

$$P(T_T \geq t) = S_T(t) = P(C) = S_o(t) \cdot S_c(t) \cdot S_m(t) \cdot S_e(t) \cdot S_{ch}(t).$$

6.3 Strom poruchových stavů

Strom poruchových stavů znázorňuje logické vztahy mezi nejvyšší událostí a mezi příčinami jejího vzniku. Tyto příčiny mohou být poruchy či správná funkce jednotlivých prvků systému, chyby obsluhy, odchylky od předpokládané funkce prvků atd. Tato metoda dobře umožňuje popsat logiku rozvoje poruchy v řešeném systému a identifikaci všech možných příčin poruchového stavu. U analýz stromu poruchových stavů se rozlišují dva typy:

- 1) **kvalitativní** – přehledné znázornění všech možných kombinací příčin, které způsobí poruchový stav celého systému,
- 2) **kvantitativní** – spočítání pravděpodobnosti s jakou nastane nejvyšší událost (poruchový stav systému).

Nejvyšší událost může značit poruchový stav nebo bezporuchový stav. Zpravidla se ovšem volí poruchový stav, protože to umožní jednodušší kvalitativní i kvantitativní analýzu stromu poruchových stavů. Nejvyšší událost se musí definovat tak, aby se vždy dalo jednoznačně určit, zda může za daných podmínek nastat.

Kvantitativní analýza stromu poruchových stavů se provádí pomocí logické analýzy. Poruchové režimy systému se definují pomocí množiny řezů. Množina řezů je soubor takových událostí, jejichž výskyt dohromady způsobí nastoupení nejvyšší události. Pomocí pravidel Booleovy algebry se určují minimální množiny řezů. **Minimální množina řezů** je taková množina, z které po odstranění jakékoliv základní události nikdy nenastane nejvyšší událost. Nechť se nejvyšší událost označí T a nechť má strom poruchových stavů N minimálních množin řezů K_i , kde $i = 1, \dots, N$. Nejvyšší událost nastane, když existuje aspoň jedna minimální množina řezů [12].

$$T = K_1 + K_2 + \dots + K_N = \bigcup_{i=1}^N K_i.$$

Pro výpočet pravděpodobnosti výskytu nejvyšší události lze použít dvě metody:

- 1) **Převod logického výrazu do disjunktivního tvaru** – cílem metody je převést sjednocení minimálních množin řezů na sjednocení vzájemně disjunktivních minimálních množin řezů. K tomu se využívá známý vztah pro pravděpodobnost sjednocení nedisjunktivních náhodných jevů:

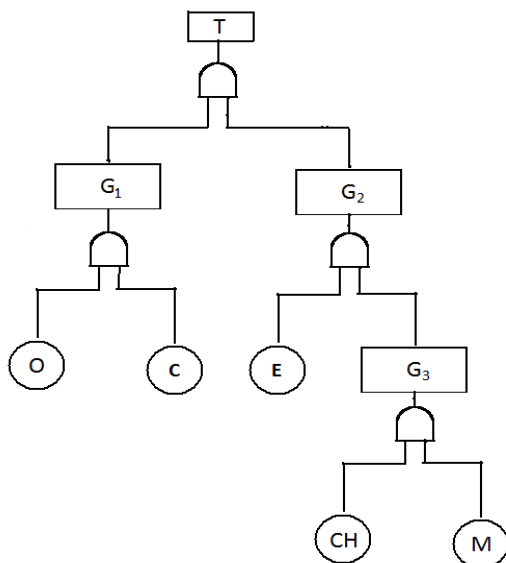
$$P(K_1 \cup K_2) = P(K_1 \cup [\overline{K_1} \cap K_2]) \\ = P(K_1) + P(\overline{K_1}) \cdot P(K_2)$$

kde $\overline{K_1}$ značí jev opačný k jevu K_1 .

2) **Přímé vyjádření pravděpodobnosti náhodného jevu** – využívá známý vzorec pro počítání pravděpodobnosti nedisjunktních náhodných jevů:

$$P(T) = \sum_{i=1}^N P(K_i) - \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} P(K_i \cap K_j) + \dots + (-1)^{N-1} P(K_1 \cap \dots \cap K_N)$$

Pro jednoduchost je při rozboru spolehlivosti výkonového olejového transformátoru za nejvyšší událost zvolena pravděpodobnost jeho bezporuchového stavu. Strom poruchových stavů pro sériový systém z Obr. 7 je zachycen na Obr. 9 (význam symbolů použitých lze nalézt v [13]), kde T značí nejvyšší událost, 0 značí bezporuchový stav oleje, C bezporuchový stav celulózy, E bezporuchový stav elektrického obvodu, Ch bezporuchový stav chladicí nádoby a M bezporuchový stav magnetického obvodu.



Obrázek 9: Strom poruchových stavů

Ze stromu poruchových stavů vyplývá následující vztah pro nejvyšší událost

$$T = G_1 \cdot G_2 = (O \cdot P) \cdot (V \cdot G_3) = O \cdot P \cdot V \cdot CH \cdot M.$$

Existuje tedy jediná minimální množina řezů $O \cap P \cap V \cap CH \cap M$. Je-li pravděpodobnost bezporuchového stavu jednotlivých částí transformátoru je vyjádřena příslušnou funkcí spolehlivosti, platí pro bezporuchový stav transformátoru následující vztah

$$P(T_T \geq t) = S_T(t) = P(T) = S_o(t) \cdot S_p(t) \cdot S_m(t) \cdot S_v(t) \cdot S_{ch}(t).$$

7 Závěr

V článku jsou popsány dva přístupy k rozboru spolehlivosti výkonových olejových transformátorů. Postup, který předpokládá transformátor jako neopravovaný sériový systém, je v technické praxi hůře uplatnitelný, protože nejsou k dispozici doby do poruchy jednotlivých částí tohoto systému. Nicméně bylo ukázáno, že požití uvedených metod pro rozbor spolehlivosti výkonových olejových transformátorů jako sériového systému je ekvivalentní. Výsledkem všech popsaných metod byl stejný vztah pro výpočet funkce spolehlivosti.

Přístup k rozboru spolehlivosti transformátoru jako celku byl aplikován na datový soubor, který obsahoval doby dožití 30 vybraných výkonových olejových transformátorů. Postup modelování spolehlivostních charakteristik je uveden i s výsledky dříve v kapitole 5. Zde byly porovnávány modely KIT a MIT s charakteristikami určenými pomocí empirické spolehlivostní funkce. Model MIT lépe vystihuje charakter dat, což znamená, že výsledné spolehlivostní charakteristiky z tohoto modelu se více blížily charakteristikám empirickým. Lze to přisoudit tomu, že nebyla zamítnuta hypotéza o Weibullovkém rozdělení pravděpodobnosti dob do poruchy. Uvedené modely lze zpřesnit o vliv dat z diagnostických měření jednotlivých transformátorů. Více o tomto lze najít v [11].

Literatura

- [1] BAZOVSKY, I. *Reliability Theory and Practice*. Dover Publications, 2004. 304 p. ISBN-13: 978-0486438672.
- [2] BLANCHARD, B., S. *System Engineering Management*. 4th ed. Wiley, 2008. 560 p. ISBN-13: 978-0470167359.
- [3] ČSN IEC 50(421): *Mezinárodní elektrotechnický slovník - Kapitola 421: Výkonové transformátory a tlumivky*. Praha: Český normalizační institut, 1997. 46 s.
- [4] ČSN EN 61703 *Matematické výrazy pro ukazatele bezporuchovosti, pohotovosti, udržovatelnosti a zajištění údržby*. Praha: Český normalizační institut, 2002. 52 s.
- [5] ERTL, J. *Spolehlivost technických systémů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta Strojního inženýrství, 2009, 88 s. Vedoucí doc. RNDr. Zdeněk Karpíšek, CSc.
- [6] FUCHS, P. *Využití spolehlivosti v praxi*. Liberec, 2002. 127 s.
- [7] HOLUB, R., VINTR, Z. *Spolehlivost letadlové techniky*. Brno, 2001. 240 s.
- [8] KARPÍŠEK, Z. *Teorie spolehlivosti - metody a aplikace*. [PDF soubor]. Brno: Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně. Dostupný z: <<http://www.math.fme.vutbr.cz/default.aspx?catalog=3&catsrtext=1&catsrfield=38>>.
- [9] ANDĚL, J. *Matematická statistika*. Praha: SNTL, 1978.

- [10] SMITH, P., J. *Analysis of Failure and Survival Data*. Chapman and Hall/CRC, 2002. ISBN-13: 978-1584880752.
- [11] HAMMER, M., ERTL, J., BARVENČÍK, O., KUTÁLEK, D. Příspěvek k rozboru spolehlivosti výkonových olejových transformátorů – 2. část. *Elektrorevue*. 2011. (v tisku)
- [12] IRESON, G., W., COOMBS, C., F., MOSS, R. *Handbook of Reliability Engineering and Management*. 2nd ed. McGraw-Hill Professional, 1995. 816 p. ISBN-13: 978-0070127500.
- [13] O'CONNOR, P. *Practical Reliability Engineering*. 4th ed. Wiley, 2002. 514 p. ISBN-13: 978-0470844632.
- [14] ŠIMKOVÁ, M. *Příspěvek k diagnostice výkonových olejových transformátorů*. Brno: VUT v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. 2010. 154 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Hammer M., CSc.

Tento příspěvek vznik za podpory výzkumného centra MŠMT ČR, č.: 1M06047, název: Centrum pro jakost a spolehlivost ve výrobě a juniorského projektu specifického výzkumu: BD13102005, 2011, název: Rozbor spolehlivosti výkonových olejových transformátorů.