Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti (JOSRA). JOSRA 4 - 2011, roč. 4.

Prediktivní údržba a metody technické prognostiky – seznámení se s problematikou

31.01.2012

PREDICTIVe MAINTENANCE aND METHODS of TECHNICAL PROGNOSis – PROBLEM INTRODUCTION

Miroslav Krupa[1]

[1]*Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, miroslav.krupa@phd.feec.vutbr.cz*

údržba | technická bezpečnost | technická zařízení | diagnostika | prognostika

Abstrakt

Volba správné metody údržby má zásadní vliv na funkčnost a spolehlivost technických zařízení a významně tak ovlivňuje jejich bezpečnost. Konvenční predeterminovaná a korekční údržba nesplňuje plně požadavky dnešních komplexních zařízení a strojů. Je potřeba využít nových strategií jako např. údržby podle stavu resp. prediktivní údržbě, založené na trvalém monitorování zařízení, průběžném vyhodnocování jeho stavu včetně odhadu úrovně degradace a určování zbývající životnosti. Zvyšující se výpočetní výkonnost vestavných jednoúčelových real-time monitorovacích systémů (tzv. embedded systémů) usnadňují nasazení komplexních diagnostických a prognostických algoritmů, nebo alespoň rozšiřují konektivitu, a tím napomáhají lépe monitorovat dané zařízení. Samozřejmě rozvoj senzorové techniky, zejména měření neelektrických veličin, rozšiřuje spektrum použítí diagnostických embedded systému. Ve výsledku tak můžeme snadněji nasadit systém prediktivní údržby a ušetřit tak výrazně na provozních nákladech, což je vedle spolehlivosti další z klíčových stimulů pro rozvoj v této oblasti. Tento příspěvek srovnává obecné metody údržby, rozvádí princip prediktivní údržby. Autor také uvádí příklady aplikací a hlouběji rozvadí aktuálně řešená témata v této oblasti, a to zejména technickou prognostiku.

Klíčová slova: technická diagnostika, technická prognostika, model-based vývoj, diagnostika, prediktivní údržba, údržba podle stavu, embedded systém, hardware

Abstract

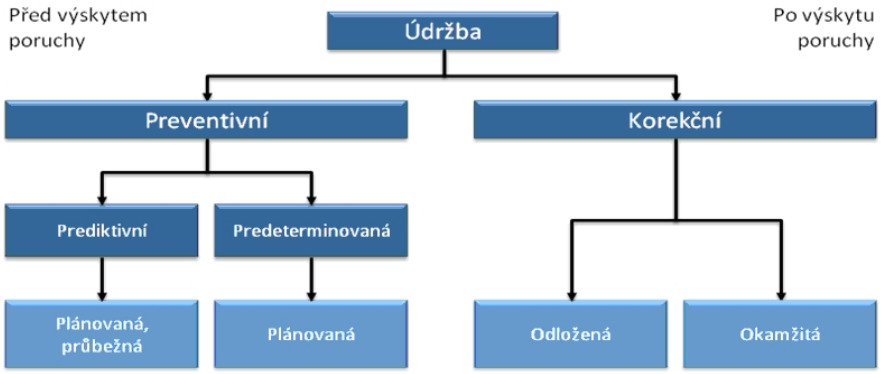
Selecting the proper methods of maintenance has a major impact on the functionality and reliability of technical equipment and significantly affects their safety. Conventional predetermined and corrective maintenance meet fully the requirements of today's complex equipment and machinery. There is a need to use the new condition based maintenance respectively predictive maintenance strategies based on continuous monitoring and evaluation of

equipment condition, including its estimate of the level of degradation and determining the remaining useful life. Increasing computing performance of the embedded systems helps to deploy complex diagnostic and prognostic algorithms or at least extend connectivity and thus help to better monitor the equipment. The development of sensor technology particularly the measurement of non-electrical quantities increases range of embedded system deployment. As a result, we can easily deploy a system of condition based maintenance and save operating costs significantly, which is next to the reliability another key incentive for development in this area. This paper describes and compares general maintenance methods, elaborates the principle of condition based maintenance. The author also gives examples of the application and further elaborates on the latest developments topics in this area especially technical prognosis.

Keywords: technical prognosis, technical prognostic, model-based development, diagnostic, condition-based maintenance, predictive maintenance, embedded system, hardware, model-based prognosis

Úvod

Funkčnost a spolehlivost technických zařízení významně ovlivňuje provozní náklady a bezpečnost moderních systému po celou dobu jejich životnosti. Cílem každé organizace je snaha pomocí diagnostiky a následné strategie údržby minimalizovat rozsah škod způsobených selháním jakéhokoliv užitého zařízení. Diagnostikování stavu a údržba zařízení probíhá neustále všude kolem nás v každém odvětví lidské činnosti, počínaje těžkými strojními zařízeními (přístavní jeřáby, důlní zařízení), přes leteckou techniku až po jemné biotechnologické zařízení, jako jsou např. kardiostimulátory. V podstatě provoz každého zařízení, jehož selhání může způsobit škody na životech nebo majetku, vyžaduje nějakou formu monitorování, diagnostiky a údržby.



Obr. 1 Přehled typů údržby volně podle EN 13306 [14]

Konvenční strategie údržby technických zařízení a systémů je možné rozdělit do dvou základních skupin, a to na korekční (opravnou) a preventivní. Korekční údržba systému je založená na principu nutnosti zásahu až po selhání zařízení (např. oprava defektu pneumatiky, výměna prasklého řemenu, výměna nefunkčního servomotoru apod.) [1]. Preventivní údržba (Preventive maintenance, dále jen jako PM) je založena naopak na včasném zásahu/výměně komponenty v oblasti známých běžně se vyskytujících selhání. Preventivní údržba se nejčastěji vykonává podle předem zadaných časových rozvrhů, popř. na základě objektivních ukazatelů definovaných a vytvořených analýzou spolehlivosti a na základě empirických dat z minulosti. Takovéto údržbě říkáme, že je předem determinovaná (Predetermined Maintenance, dále jen PM-PM), jako příklad uveďme výměnu pneumatik při malé hloubce desénu, výměnu rozvodového řemene po ujetí stanoveného množství kilometrů, výměnu lopatek kompresoru proudového motoru po uplynutí definované provozní doby. Preventivní údržba významně zlepšuje dostupnost, funkčnost a provozuschopnost technických zařízení, ale na druhou stranu významně prodražuje provoz zařízení, protože dochází často k výměnám zařízení či komponent dlouho dopředu před ukončením jejich životnosti. Studie v minulosti [2] navíc ukázaly, že příčiny vážných selhání zařízení často nejsou vůbec vztaženy k době provozu zařízení. Což dokazuje, že

preventivní předem determinovaná údržba založená na časovém plánu nepřináší vždy očekávaný efekt a navíc může být velmi nákladná.

S ohledem na výše zmíněná stanoviska je patrné, že konvenční strategie údržby nenaplňují potřeby údržby komplexních a velmi nákladných průmyslových zařízení a systémů. Uveďme jako příklad automobilový a letecký průmysl, kde pro letecké společnosti či automobilové dopravce jsou minimální provozní náklady alfou a omegou udržení se v silném konkurenčním boji. Údržba podle technického stavu (Condition Based Maintenance, dále jen jako CBM), se jeví jako nejvhodnější alternativa konvenčních metod [3] a [4] a je brána jako další podskupina preventivní údržby [5] a [14]. CBM využívá možnosti trvalého monitorování zařízení jeho diagnostiky a prognostiky k určení funkčního stavu zařízení. Na základě vyhodnocování stavu zařízení je možno odvozovat, resp. předvídat stav degradace daného zařízení a usuzovat tak na případné selhání daného zařízení, v tomto případě mluvíme o tzv. prediktivní údržbě (Predictive Maintenance), která je podmnožinou CBM. Zejména v české literatuře dochází častokrát k záměně termínu *prediktivní údržby* a *údržby podle stavu*, proto i v tomto článku jsou pro zjednodušení oba pojmy považovány za ekvivalentní.

ÚDRŽBA	VÝHODY	NEVÝHODY	OBLAST POUŽITÍ
KOREKČNÍ	- maximální využití životnosti komponenty, zařízení- žádné nebo minimální náklady na monitorování systému	- vyšší náklady spojené s případnou výměnou celého zařízení - nutná dostupnost náhradních dílů pro případ nečekaného selhání	- málo kritické a nákladově nevýznamné zařízení
PREVENTIVNÍ - PREDETERMINOVANÁ	- životnost zařízení může být prodloužena - opravné akce se dají dobře plánovat, a tím usnadnit organizaci práce	- vyšší náklady spojené s příliš častou výměnou komponent - časté odstavování zařízení zvyšuje náklady - citlivost na statistické určení intervalu údržby	-vhodné pro většinu zařízení
PREDIKTIVNÍ - ÚDRŽBA PODLE TECHNICKÉHO STAVU	- znalost aktuálního stavu zařízení- údržba se může plánovat podle aktuálního stavu a potřeb - případné selhání je dobře identifikováno a oprava je tak snadnější a rychlejší	- pořizovací náklady na senzory, měřicí systémy a SW - vyšší provozní náklady spojené s údržbou samotného diagnostického systému	- vhodné pro většinu zařízení

PROAKTIVNÍ – SPOLEHLIVOSTNĚ ORIENTOVANÁ	- znalost aktuálního stavu zařízení - selhání zařízení může být predikováno na základě spolehlivostních modelů	- pořizovací náklady na senzory, měřicí systémy a SW -nedostatečně obecné prognostické modely-vyšší provozní náklady spojené s údržbou samotného diagnostického systému-nepřesnost spolehlivostních modelů	-vhodné pro zařízení, jehož selhání má fatální následky (škody na životech a majetku)

Tabulka 1: Srovnání metod údržby

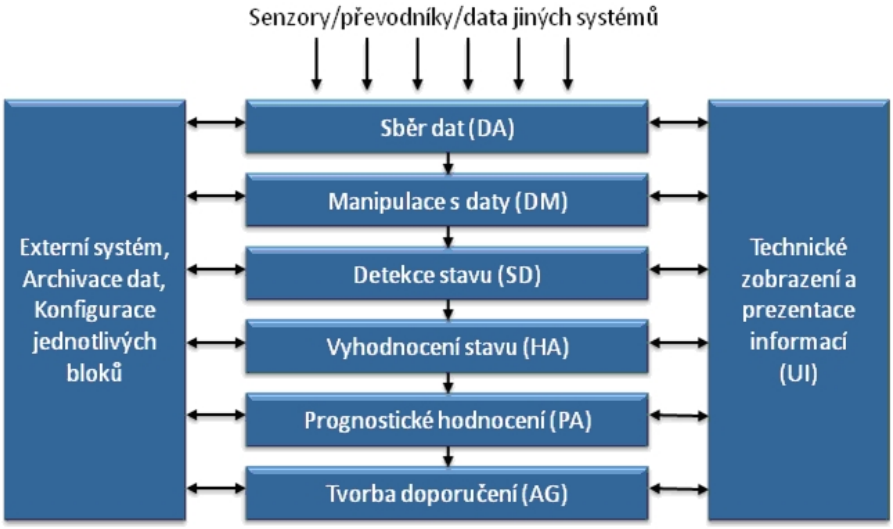
Uveďme jako příklad systémy HUMS (Health and Usage Monitoring Systems), které spadají do široké oblasti CBM. Typickou aplikací HUMS je systém monitorování vibrací rotorových listů helikoptér, jejich následná analýza s návrhem pro nápravu a následnou minimalizaci těchto vibrací. Tento proces má v konečném důsledku pozitivní dopad na životnost celé helikoptéry, kde zvláště mechanická konstrukce vibracemi velmi trpí. Zavedení takového systému na začátku vyžaduje vždy poměrně vysokou vstupní investici, která se však za dobu provozu zařízení s rezervou vrátí.

Dalším příkladem je nasazení CBM systému na větrné elektrárny umístěné v pobřežních vodách [12]. Díky povětrnostním vlivům (kroupy, blesky) či díky případným kolizím s ptáky dochází k vzniku prasklin a zlomů v materiálu (nejčastěji sklolaminát) listů rotoru elektrárny. Praskliny pokud nejsou speciálními technikami (vyplň lepidlem, materiálová záplata) opraveny, tak se postupně rozšiřují a po čase je nutné vyměnit celý list. Takováto výměna je poměrně nákladná a navíc může trvat až 20 dní po kterou elektrárna nevyrábí elektrickou energii, a tudíž dochází k dalším finančním ztrátám. Pokud se ovšem nasadí monitorovací systém, v tomto případě infračervená termografie a ultrazvuková diagnostika, dá se zavčas zachytit případná prasklina a může tak být opravena dříve, než dojde k nenávratnému poškození listu a tudíž k nezbytné výměně.

Oblasti CBM je v poslední dekádě věnována mimořádná pozornost. To samozřejmě neznamená, že konvenční přístupy zůstávají opomenuty, přesto však je patrný ústup do pozadí, popř. přístupy jsou kombinovány. Velká pozornost je také věnována optimální údržbě a tzv. proaktivní - spolehlivostně orientované údržbě RCM (Reliability Centered Maintenance), která kombinuje zejména preventivní predeterminovanou a podmíněně-prediktivní údržbu [1] a snaží se je optimálně zkombinovat pro dosažení maximální spolehlivosti a minimalizaci nákladů.

Dosavadní vývoj a použité metodiky

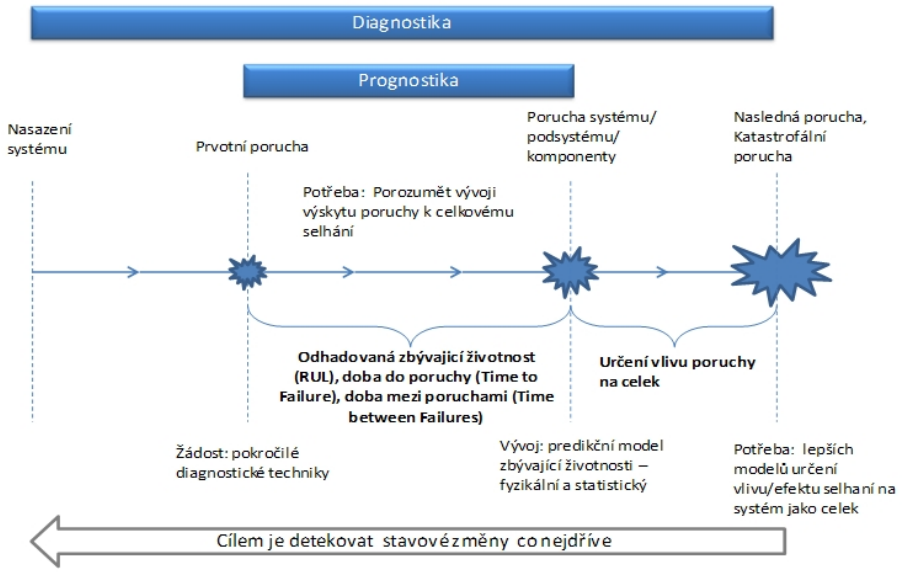
Problematiku CBM a zejména kompatibilitu různých komponent/bloků tohoto systému se snaží zformalizovat a standardizovat norma ISO 13374, která poskytuje základní požadavky na specifikaci softwarových produktů a snaží se o platformě nezávislé předávání měřených dat či jiných informací z monitorování strojů, včetně jejich následného zpracování, vyhodnocení a prezentaci. Na následujícím obrázku je názorně zakresleno, jak na sebe navazují jednotlivé bloky zpracování dat v systémech prediktivní údržby, které vycházejí z normy ISO 13374.



Obr. 2: Zpracování informací a tok dat podle normy ISO – 13374

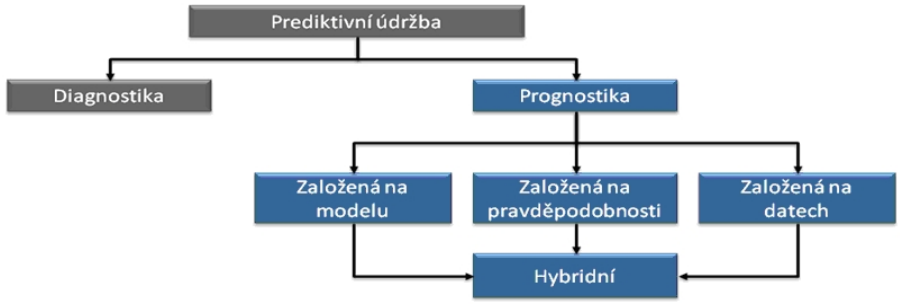
Základními pilíři, na kterých staví CBM, jsou technická diagnostika (blok DA, DM, SD, HA z Obr. 2) a technická prognostika (blok PA z Obr. 2), které hrají klíčovou roli při zlepšování bezpečnosti, při plánování provozu, údržby a při minimalizaci odstavení zařízení. Úkolem technické diagnostiky je zjištění aktuálního stavu systému, což zahrnuje mimo jiné detekci poruchy systému/zařízení, detekce anomálií. K tomuto jsou využívané různé techniky měření, v poslední době se rozvíjí zejména bezkontaktní a nedestruktivní metody a k nim příslušné zpracovaní signálů a jejich interpretace. Technická diagnostika je poměrně široká interdisciplinární oblast.

Technická prognostika je vnímána jako přidaná hodnota technické diagnostiky. Spojením diagnostiky a prognostiky jsme schopni usuzovat na nejen současný stav zařízení, ale zároveň predikovat předpokládanou dobu životnosti systému na základě degradace jednotlivých komponent, na základě provozních podmínek atd. V technické prognostice se snažíme odhadnout s danou pravděpodobností tyto parametry: *zbývající životnost (RUL – remanining useful life), doba k poruše (TF – time to failure)*. Historie technické prognostiky je poměrně krátká na rozdíl od technické diagnostiky, a proto je stále poměrně novou oblastí zájmu a stálé je nejslabším článkem v tomto spojení – zejména kvůli přesnosti a komplexnosti odhadu budoucího vývoje. Přestože bylo registrováno již mnoho patentů a publikováno velké množství literatury a článků, které se této problematice věnují, je oblast zejména model-based prognostiky stále poměrně nová.



Obr. 3: Vývoj poruchy v čase podle [13]

Systémově orientovaný přístup k prognostice vyžaduje rozšíření samotné detekce chyb a inspekčních metod o informace týkající se degradace jednotlivých dílů systému a jejich význam pro chod celého systému, tzn., že takový přístup si nevšímá pouze selhání jednotlivých komponent, ale i vlivů jejich selhání na ostatní komponenty, popř. systému jako takového [2] a [6]. V současné době existuje řada prognostických metod, které lze principiálně rozdělit do třech základních skupin, resp. přístupů. První skupinu tvoří prognostika řízená daty (data-driven, dále jen DD), druhou skupinou je přístup založený na modelu (model-based, dále jen MB). Třetí skupinou tvoří statistické metody vycházející z předchozích zkušeností. Každý z přístupů má své výhody a nevýhody, proto se v mnoha případech používá jejich kombinace.



Obr. 4: Rozdělení metod prognostiky v kontextu prediktivní údržby

Prognostika řízená daty (Data-driven Prognosis): Všechny metody spadající do této kategorie využívají a zpracovávají data získané z monitorování provozovaného zařízení (spektrální výkon, vibrace, akustický signál, teplota, tlak, napětí, proud) [7]. Ve většině systémů jsou měřené vstupní a výstupní hodnoty hlavním určujícím zdrojem pro poznání stavu systému a jeho případné degradace. DD přístupy vycházejí z předpokladu, že statistická charakteristika dat je relativně stála do té doby, než se v systému objeví selhání. Prognostika řízená daty je víceméně založena na teorii rozpoznání vzoru (pattern recognition), která využívá široké spektrum technik od multivariačních statistických metod (princip statické a dynamické komponenty PCA, lineární a kvadratické determinanty, parciální metoda nejmenších čtverců PLS, kanonická variační analýza CVA) přes black-box metody založené na neuronových sítích [7] a [9] (pravděpodobnostní neuronové sítě PNN, rozhodovací stromy, několikavrstvé perceptrony, kvantizovaného učícího se vektoru LVQ), grafické metody (Bayesovy sítě, skryté Markovovy modely), signálovou analýzu (FFT, filtry, auto-regresivní modely) až po fuzzy rozhodovací systémy.

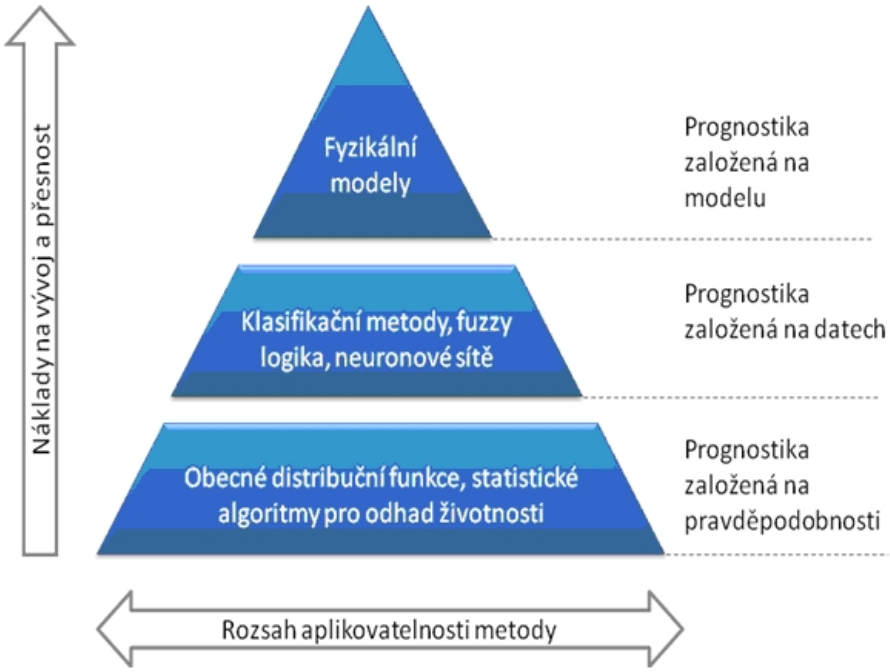
Velkou výhodou prognostiky řízené daty je schopnost transformovat a redukovat značné množství dat do mnohem menšího počtu validních a významných dat užitých při diagnostickém a prognostickém rozhodování. Nevýhodou tohoto prognostického přístupu je výrazná závislost na kvantitě a kvalitě získaných provozních dat, se kterou efektivnost prognostiky výrazně roste, resp. klesá. Tento přístup je proto použit u komplexních systémů, jejichž provozní chování nemůže být plně popsáno fyzikálním modelem [3] a kde neexistuje přesný matematický model.

Prognostika založená na modelu (Model-based prognosis, dále jen MBP): Tato metoda předpokládá, že je k dispozici poměrně přesný matematický a fyzikální model zařízení. Metody založené na modelu využívají rezidua jako základní parametr odhadu selhání zařízení a jeho životnosti. Rezidua jsou výsledkem porovnávání výstupů z měřeného zařízení s matematickým modelem. Je to podobný přístup používaný u adaptivních kontrolérů s modelem. Základním předpokladem tohoto přístupu je fakt, že rezidua jsou výrazně velká v případě selhání a malá za normálního režimu (i s ohledem na nepřesnost modelu, šum signálu). Pro hranici detekce chyby se využívají statistické metody. Existují tři základní metody pro generování reziduí [2]. První je odhadování parametrů, pozorování (Kalmanovy filtry) a rovnostní vztahy.

Hlavní výhodou prognostiky tohoto typu je možnost zahrnout fyzikální znalost systému do monitorování. Což např. umožňuje redukovat množství snímaných veličin na minimální množství a další parametry odvozovat přímo z modelu. Velkou výhodou je také možnost adaptovat model s postupující degradací monitorovaného systému, čímž se zvyšuje přesnost odhadu náhlé chyby. Velké využití tohoto typu prognostiky je v oblasti model-based návrhu, kde bývají pro návrh řídících členů k dispozici poměrně přesné matematické modely, a tudíž je možné k nim přidat i model degradace jednotlivých komponent v závislosti na době simulace. Tato oblast prognostiky je poměrně nová a perspektivní, jak dokazuje řada případových studií, např. [8].

Prognostika založená na pravděpodobnosti (Probability-based prognosis): Tyto metody mají nejdelší historii, vyžadují nejméně detailní data a využívají zejména různé distribuční funkce pravděpodobnosti (PDF - Probability Distribution Functions), které byly parametrizovány pro jednotlivé systémy/subsystémy/komponenty na základě výrobních parametrů, provozních údajů, statistických dat z historie. Nejčastěji jsou používány normální, Weibullovo a exponenciální rozložení. Typickým rozložením popisujícím intenzitu poruch v závislosti na čase je tzv. „vanová křivka“, která byla poprvé publikována již v roce 1965 a dodnes má své opodstatnění. Tento přístup k prognostice poskytuje také limity určitosti, ve kterých se pohybujeme, což je důležité pro stanovení přesnosti a pravděpodobnosti našeho odhadu. PDF se používají ve spolehlivostní analýze.

Na následujícím obrázku jsou přehledně uvedeny jednotlivé přístupy s uvedením rozsahu použitelnosti a přesnosti.



Obr. 5: Srovnání prognostických metod podle [13]

Závěr

Tento článek je čistě přehledový a jeho hlavním cílem je seznámit čtenáře se současnými trendy v údržbě, poukázat na rozvíjející se typ *údržby založené na stavu (Condition Based Maintenance)*, která zažívá rozvoj zejména díky rostoucím možnostem nasazení různých jednoúčelových vestavných monitorovací zařízení a díky zdokonalujícími se měřicími technikami. Dále jsou uvedeny základní pilíře této údržby a to technická diagnostika a technická prognostika. Technická prognostika je více rozvedena včetně klasifikace základních metod. Jedná se o poměrně nový a stále se rozvíjející obor, který však naráží na stále stejné úskalí, a to předpověď budoucnosti. Poslední vývoj však ukazuje, že nové metody, zejména neuronové sítě a fuzzy rozhodovací stromy, jsou použitelné a poskytují uspokojivé výsledky. Přestože hlavním zaměřením tohoto časopisu je bezpečnost práce, je oblast technické diagnostiky a prognostiky její nedílnou součástí, protože jakékoliv selhání zařízení může způsobit škody na majetku i na zdraví, popř. může ohrozit lidské životy.

Literatura

[1] SUNG, H. J. *Optimal maintenance of a multi-unit system under dependencies* : *a thesis presented to the academic faculty* [online]. Georgia : Georgia Institute of Technology, December 2008. 145 s. Dostupné z WWW: < https://smartech.gatech.edu/handle/1853/26511> Poslední aktualizace: 16.4.2010.

[2] LUO, J.; NAMBURU, M.; PATTIPATI, K.; QIAUIO, L. Model-based prognostic techniques. *AUTOTESTCON 2003 : IEEE Systems Readiness Technology Conference. Proceedings.* September 2003. S. 330-340. ISSN 1080-7725. ISBN: 0-7803-7837-7.

[3] LUO, J.; TU, F.; AZAMA S.,M.; PATTIPATI, K., R.; WILLETT P.,K. Intelligent model-based diagnostics for vehicle health management. *Proc. SPIE,* September 2003, Vol. 5107, No. 13, s. 13-26. ISSN 0277-786X.

[4] YOU S.; KRAGE, M.; JALICS, L. Overview of Remote Diagnosis and Maintenance for automotive Systems. *SAE Technical Paper*, April 2005, s. 1-8. ISSN 0148-7191.

[5] YANG, S.K. A condition-based failure-prediction and processing-scheme for preventive maintenance. *Reliability, IEEE Transactions on*

, September 2003, Vol. 52, Issue 3, s. 373-383. ISSN 0018-9529.

[6] BARBERA, F.; SCHNEIDER, H.; KELLE, P. A Condition Based Maintenance Model with Exponential Failures and Fixed Inspection Intervals. *The Journal of the Operational Research Society*, August 1996, Vol. 47, No. 8, s. 1037-1045.

[7] SCHWABACHER, M., A. A Survey of Data-Driven Prognostics. *American Institute of Aeronautics and Astronautics AIAA-2005-7002*, September 2005, s. 1-5.

[8] LUO, J.; PATTIPATI, K.R.; QIAO L.; CHIGUSA, S. Model-Based Prognostic Techniques Applied to a Suspension System. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 2008, Vol. 38, Issue 5, s. 1156–1168. ISSN 1083-4427.

[9] WU, S.-J.; GEBRAEEL, N.; LAWLEY, M., A. A Neural Network Integrated Decision Support System for Condition-Based Optimal Predictive Maintenance Policy. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on,* March 2007, Vol. 37, Issue 2, s. 226-236. ISSN 1038-4427.

[10] DVORAK, D.; KUIPERS, B. *Model Based Monitoring of Dynamic Systems : Technical Report* [online]. S. 1238-1243. Dostupné z WWW: <http://citeseerx.ist.psu.edu/>. Poslední aktualizace: 16.4.2010.

[11] KREIDL, M.; ŠMÍD, R.. *Technická diagnostika*. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2006. 408 s. ISBN 80-7300-158-6.

[12] BESNARD, F.; BERTLING, L. An Approach for Condition-Based Maintenance Optimization Applied to Wind Turbine Blades. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, July 2010, Vol. 1, Issue 2, s. 77-83. ISSN 1949-3029.

[13] VACHTSEVANOS, G.; LEWIS, F.; ROEMER, M.; HESS, A.; WU, B. *Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems*. New Jersey : John Wiley & Sons, 2006. 434 s. ISBN 978-0-471-72999-0.

[14] *ČSN EN 13306:2001*. Terminologie údržby. (Maintenance Terminology). Praha : Český normalizační institut, 1.9.2002. Verze ICS 01.040.03; 03.080.10.

[15] BOLDIŠ, P. *Bibliografické citace podle ČSN ISO 690 a ČSN ISO 690-2 : část 2 : modely a příklady citací u jednotlivých typů dokumentů : verze 3.0 (2004)* [online]. Poslední aktualizace 11.11.2004. Dostupné z WWW: < http://www.boldis.cz/citace/citace2.pdf>.

Vzorová citace

KRUPA, Miroslav. Prediktivní údržba a metody technické prognostiky : seznámení se s problematikou. *Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti* [online], 2011, roč. 4, č. 4. Dostupný z WWW: < http://www.bozpinfo.cz/josra/josra-04-2011/prediktivni_udrzba_krupa.html>. ISSN 1803-3687.

Autor článku:
Ing. Miroslav Krupa