

Aspekty zjišťování spolehlivosti elektrických zařízení – generátorů

prof. Ing. Václav Mentlík, CSc. a doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.,
Fakulta elektrotechnická, Západočeská univerzita v Plzni

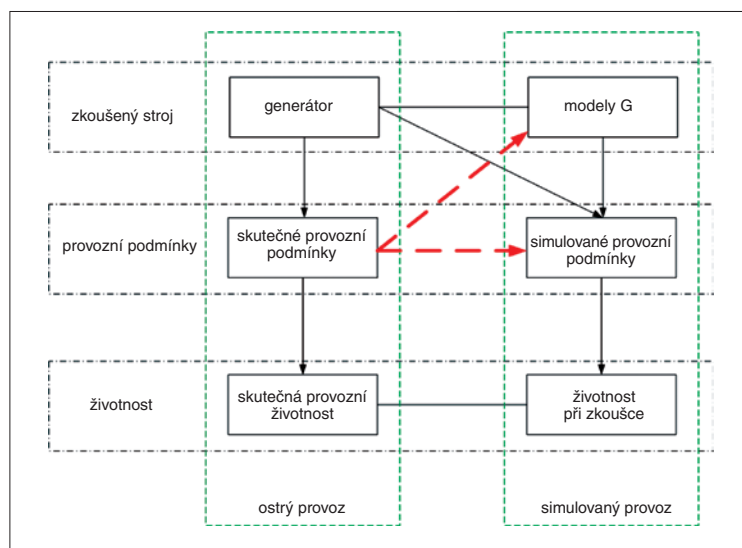
Zařízení mající pevné místo a definovanou funkci v zajištění kvalitních podmínek pro život společnosti se právem dostávají do středu pozornosti všech, kdo mají na starosti její plynulý a kvalitní život, zejména pak těch, kteří ručí za bezporuchovou dodávku energií, bez nichž si v současné době už neumíme náš život představit. Jednu z nejdůležitějších rolí má nepopíratelně elektrická energie. Pro dodávku této energie je podmínkou bezchybná funkce celého výrobního energetického řetězce tvořeného jednotlivými, z tohoto hlediska klíčovými, prvky.

Nezaměnitelné místo zde mají zdroje elektrické energie – generátory. Jejich bezporuchový chod je podmíněn bezchybností jejich vnitřního systému, který si je možné představit např. jako sériový spolehlivostní řetězec. Zmíněný zdůrazněný bezporuchový chod těchto zařízení je průběžně zjišťován dokonale fungujícími diagnostickými systémy, které se tak výrazně podílí na jeho zajištění. Diagnostické systémy, jak je všeobecně známo, mohou fungovat jako on-line nebo off-line systémy [1]. Ty první se používají pro nepřetržité sledování chodu zařízení s tím, že pro ně nelze použít všechny známé diagnostické metody bez omezení, ty druhé jsou zcela běžné pro profylaktické sledování chování – vývoj – jednotlivých parametrů strojů. Dokonalý diagnostický systém má navíc možnost dodávat relevantní instrukce pro údržbu zařízení podle zjištěného stavu sledovaného zařízení, a tím operativně řešit momentální vzniklou situaci. Off-line diagnostika má značnou nevýhodu v tom, že potřebuje odstavený stroj, a tím odhad intervalů, v nichž se vykonává. Je logické, že někdy může být vykonávána zbytečně, jsou-li diagnostické intervaly krátké, stejně tak jako lze s diagnostikou přijít pozdě, jsou-li degradační procesy z nějakých příčin rychlejší, než se předpokládalo, nebo byl-li interval mezi jednotlivými šetřeními zvolen příliš dlouhý.

Řešení, které mohou nabídnout současné znalosti podpořené zkušenostmi, spočívá v odhadu provozní spolehlivosti zařízení spojené logicky s odhadem jeho zbytkové životnosti. Další text je tedy věnován nastínění pů-

v návazné přímé linii. Víme, že pro vyjádření předpovědi budeme muset využít určitou apriorní – modelovou situaci, takže skutečnému stroji bude odpovídat modelový stroj, skutečným podmínkám simulované provozní podmínky a konečně skutečné provozní spolehlivosti provozní spolehlivost při zkoušce. Při řešení této situace přicházejí v úvahu dva případy podle využívané diagnostiky.

Při aplikaci off-line diagnostiky jsou ze schématu patrné vazby stroje a jeho modelu a dále mezi modelem a simulovanými pod-



Obr. 1.
Poměry
v diagnostice
generátorů
v závislosti
na použitém
diagnostickém
systému

vodní možnosti, která se v této oblasti naskýrá. Jde o obecnou, teoretickou úvahu, která je úvodními myšlenkami pro rozvoj dalších činností v této, pro další rozvoj tohoto odvětví průmyslové praxe, potřebné oblasti.

Pro vstupní představu situace při sledování stavu elektrického zařízení si uvědomíme, že v provozu skutečné provozní podmínky působí na stroj všemi svými deterioračními faktory (teplota, napětí, vibrace atd.), a ovlivňují tak jeho spolehlivost. Posloupnost sledovaných prvků zde vytváří zkoušený stroj, provozní podmínky a skutečná spolehlivost stroje. Zařadíme-li je do blokového schématu vyjadřujícího sledovanou situaci (obr. 1), jsou

mínkami i strojem a simulovanými provozními podmínkami.

Při aplikaci on-line diagnostiky dochází i k vazbám mezi skutečnými provozními podmínkami a modelem stroje, skutečnými podmínkami a podmínkami simulovanými (na obr. 1 vyznačeno silnými čárkovanými čarami). Z obr. 1 je také dobře patrná oblast vlastního ostrého provozu a provozu simulovaného.

Po úvodní obecné úvaze věnované nastínění a popisu situace při diagnostice zařízení se lze věnovat aspektům koncepce určení provozní spolehlivosti generátorů.

Základní myšlenka úvahy o určení provozní spolehlivosti generátorů $P(t)$ vychází z toho,

že okamžitou spolehlivost lze aktuálně určit jako funkci spolehlivosti, která byla vložena do stroje při jeho projektu $P(t=0)$ – tedy jeho inherentní spolehlivosti ve výchozím nulovém provozním čase. Tato úvaha vychází z cíle provozovatelů stroje mít stále k dispozici zůstatkovou hodnotu spolehlivosti stroje, a tím i informaci o zbytkové životnosti. Provozní spolehlivost $P(t)$ vychází z geneze stroje a zahrnuje superpozici aktuálního stavu a jeho modelových stavů určených většinou výpočtem. Při

vení tolerancí a dovolených odchylek parametrů daného zařízení;

- výsledky laboratorních zkoušek před uvedením do provozu i během provozu – ověřené hodnoty parametrů, hodnoty pro určení potřebných tolerancí sledovaných parametrů daného zařízení;
- výsledky diagnostických šetření off-line – profylaktická měření stroje během jeho provozu, doplněno o výsledky strukturálních analýz pro získání vydatnějších informací;

Při práci s uvedenými informacemi si musíme uvědomit, že všechny údaje jsou převáděny do statistického charakteru, a jsou tedy zatíženy rozptylem svých hodnot. Stejně tak je nutné respektovat, že požadované parametry zařízení se pohybují v pásmu svých tolerancí daných požadavky, které jsou na ně kladeny.

Jako základní skutečnost při naší úvaze vedoucí k určení aktuální spolehlivosti elektrických zařízení, v našem případě generátorů, chápeme spolehlivost zařízení P jako pravděpodobnost jeho bezporuchového chodu, tedy jako rozdíl jednotky a poruchovosti daného systému, což lze vyjádřit vztahem:

$$P = 1 - Q$$

kde Q je poruchovost, tj. pravděpodobnost, která je funkcí rozdílu mezi pevností sledovaného prvku x_p a působícího zatížení x_z

Každé zařízení – tedy i generátor – vstupuje do svého funkčního života s vlastní inherentní spolehlivostí $P(t=0)$ v počátečním čase $t = 0$, která je funkcí konstrukce (K), materiálů (M) a technologií (T) používaných, a tím vstupujících do jeho systému (obr. 2).

Uvažujeme, že i podmínky, v nichž sledovaný systém pracuje, jsou v určitých tolerančních mezích. Za vlastního provozu zařízení pracuje s provozní spolehlivostí v okamžitém čase t . Jeho vlastnosti se nacházejí opět v určitých tolerančních mezích, hodnotově daných mezemi sledovaných vlastností a parametrů.

Vlivem provozních a klimatických podmínek se spolehlivost každého systému při jeho funkci mění podle určité životnostní charakteristiky. Zařízení stárne – jeho spolehlivostní charakteristika má zvolna klesající charakter. Diagnostika (v převážné většině off-line), která je použita, zjistí v aktuálním čase t některý dílčí problém (např. poškozený polovodičový ná-

Tabulka posloupnosti činností pro vyjádření provozní spolehlivosti generátorů

1	studium fyzikálních zákonitostí procesů probíhajících při interakci izolačních systémů generátorů s výrobními i provozními vlivy
2	studium modelů stárnutí a životnosti izolačních systémů generátorů
3	určení citlivých míst vhodných pro diagnostikování stavu generátorů
4	výběr a stanovení metod vhodných pro diagnostikování stavu generátorů
5	studium materiálové základny pro podsystemy generátorů
6	koncepce řešení diagnostického systému pro sledování stavu generátorů
7	konstrukce modelu expozice a stárnutí podsystemů generátorů
8	modelové laboratorní zkoušky podsystemů generátorů
9	výběr matematického modelu pro určení provozní spolehlivosti a životnosti generátorů
10	koncepce stanovení provozní spolehlivosti generátorů
11	software pro určení provozní spolehlivosti a životnosti generátorů

jejím určení uvažujeme, že aktuální stav stroje ovlivňují tepelné působení, mechanické namáhání, výbojová činnost, vibrace, rozběhy, odstávky, aktuální otáčky – tedy všechny činitele působící v daném okamžiku na sledovaný stroj. Působení těchto vlivů lze vyjádřit pomocí stanovených součinitelů – konstant K respektujících vlivy působící na stav stroje. Provozní spolehlivost stroje je $P(t)$ v daném časovém okamžiku je potom dána rovnicí:

$$P(t) = P(t=0) \cdot gK(0)$$

kde gK je funkce zachycující působení všech degračních vlivů na stroj.

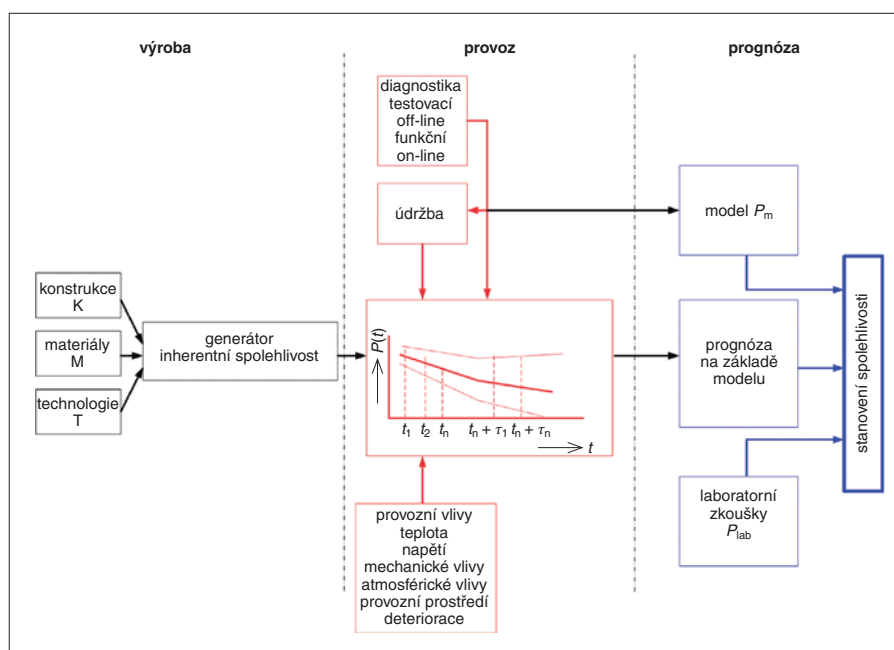
Okamžitá, aktuální počítaná spolehlivost $P(t)$ daného zařízení je průnikem skutečností, které ji ovlivňují, tedy výchozích vlastností, změn, k nimž při předchozím provozu došlo, okamžitého (aktuálního) stavu (to vše shrnuto vyjádřením jako geneze zařízení) i součinitelů vyjadřujících působení všech uvedených vlivů K .

Součinitel K vyjadřuje superpozici všech vlivů působících na dané zařízení, lze ho tedy vyjádřit s respektováním skutečnosti, že se pohybujeme v oblasti určitého spolehlivostního řetězce sledovaného zařízení, jako průnik výstupů diagnostických šetření v provozu a laboratorních zkoušek na vzorcích – např. v podobě životnostní křivky.

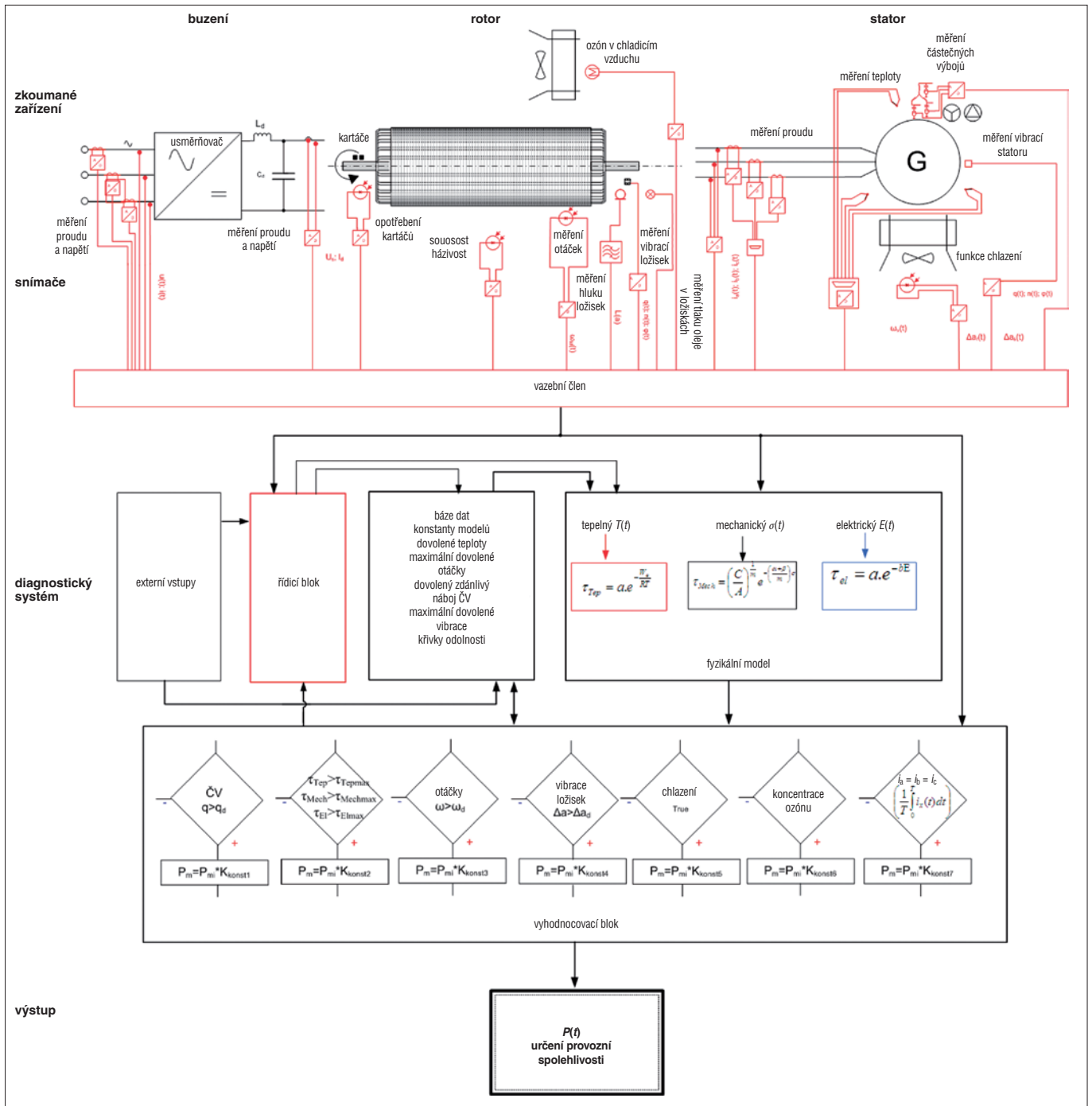
Do výpočtu aktuální spolehlivosti stroje pak v souladu s uvedenými skutečnostmi vstupují tato data a informace:

- údaje dané konstrukcí stroje, určující projektovanou životnost stroje, včetně stano-

- výsledky šetření on-line – sledování působení degračních činitelů diagnostickým systémem – vývoj sledovaných parametrů;
- zásahy údržby vykonávané na pokyn výstupů diagnostických šetření – opravy strojů;
- modely životnosti jednotlivých komponent;
- údaje vyjadřující doplnění informací o stroji – počet a průběh startů, najíždění, fázování, délky odstávek stroje, poruchy a zásahy údržby.



Obr. 2. Vývoj spolehlivosti elektrického zařízení



Obr. 3. Vazba signálů snímaných ve sledovaném stroji a výstupu určení provozní spolehlivosti

těr výstupu vinutí z drážky, uvolněné klínová-
ní vinutí, chybu ložiska atd.). Použitá údržba
podle pokynu plynoucího ze závěru dané dia-
gnostiky chybu opraví. Tím zvýší pohotovost
stroje a jeho provozní spolehlivost se změní
na provozní spolehlivost po opravě P_{op} v době,
která se změnila o určitý časový úsek τ .
Na obr. 2 tomu odpovídá změna sklonu život-
nostní charakteristiky.

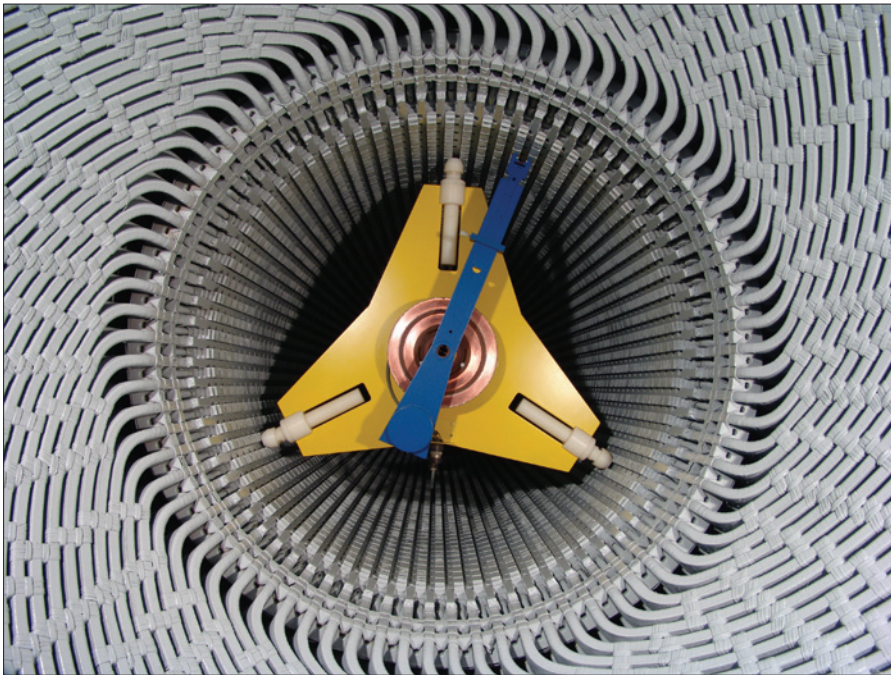
Ze zkušeností z praxe je nutné brát v úva-
hu, že s rostoucí dobou provozu roste rozptyl
hodnot charakteristických parametrů. I zde
tedy platí interval daný mezemi těchto pa-
rametrů. Při sledování stavu stroje přistupu-
je on-line diagnostika vybraných parametrů

(např. sledování vývoje produktů výbojové
činnosti – ozonu u strojů chlazených vzdu-
chem). Popisovanou situaci, tedy vznik za-
řízení (jeho konstrukcí a výrobou vzniklou
vlastní vstupní spolehlivost) a jeho provoz
(spolehlivost zařízení v provozu) blokově za-
chycuje levá a střední část obr. 2.

Problematika modelové spolehlivosti P_m
a určení jednotlivých komponent součinite-
le K, vychází ze zkoušek životnosti jedno-
tlivých dotčených komponent. Pro každou sle-
dovanou součást je nutné stanovit sledovaný
parametr a pro něj určit meze.

Jako příklad lze uvést hlavní elektrickou
izolaci točivého stroje a její tepelné namá-

hání. Při životnostních zkouškách je určena
křivka odolnosti příslušného izolačního sys-
tému v závislosti na době a velikosti teplot-
ního namáhání. Ze získané křivky lze poté
on-line extrapolovat příslušnou kompen-
tu součinitele K, tedy K_{tepel} model. Ač je sa-
motná spolehlivost (zbytková životnost) izo-
lačního systému počítána podle příslušného
modelu pro tepelné stárnutí (obecný příklad
– Büssingův model), do samotného výpo-
čtu modelové spolehlivosti P_m je pro prá-
ci on-line běžícího programu třeba on-li-
ne extrapolovat součinitel K. K tomu je sa-
mořejmě nutné monitorovat teplotu vinutí
stroje (obr. 3).



Obr. 4. Pohled na statorové vinutí turbogenerátoru s vloženým zařízením pro indikaci částečných výbojů v jednotlivých drážkách stroje při periodické diagnostice stroje

Obr. 2 zachycuje obecně celkový postup při vyjádření provozní spolehlivosti sledovaného elektrického zařízení. Uvedená myšlenka pochopitelně platí a je aplikovatelná obecně pro jakékoliv zařízení, které je sledované funkční (on-line) a testovací (off-line) diagnostikou.

Po vyjádření obecných myšlenek určování zbytkové spolehlivosti elektrických zařízení se posuneme do oblasti konkrétního názoru na problém – nejprve do oblasti možností získávání vstupních diagnostických signálů. Ve schématu na obr. 2 je tato oblast zachycena střední částí, kterou lze nazvat oblastí provozu – funkční on-line diagnostiky zajišťující relevantní informace o současném stavu sledovaného zařízení. Na obr. 3 je přiblížena konkrétní situace získávání těchto potřebných signálů a napojení jejich výstupů přes nutný vazební člen zajišťující potřebnou vazbu mezi získanými signály a jejich snímači v diagnostickém systému. Na výstup diagnostického systému pak navazuje blok softwarového zajištění dalšího vyhodnocování pro získání potřebné informace o provozní spolehlivosti.

Snímané signály jsou poplatné on-line diagnostickému systému a podle měřeného místa je lze rozdělit na signály snímané na budiči, rotoru a statoru generátoru. Na vstupu budiče se snímají časové průběhy napětí a proudu, za usměrňovačem hodnoty napětí a proudu. Na rotoru se předně měří časová závislost otáček, dále hluk, vibrace a tlak oleje ložisek, souosost a házivost, opotřebení kartáčů a množství ozonu v chladicím vzduchu – u strojů chlazených vzduchem. Na statoru se měří časová závislost proudu a teploty ve všech fázích, dále jeho vibrace a funkce chlazení. Znázorněný diagnostický systém odpovídá on-line diagnostice [1], a má tedy

odpovídající bloky. Celý systém je logicky řízen řídicím blokem, má bázi dat, vyhodnocovací blok, fyzikální model i paměť stavů. Jeho výstup jde do bloku určení provozní spolehlivosti.

Pro další práci systému jsou důležité používané modely jednotlivých komponent. Týká se to zejména interakcí mezi teplotou a izolačními systémy strojů, které jsou pro naše hodnocení

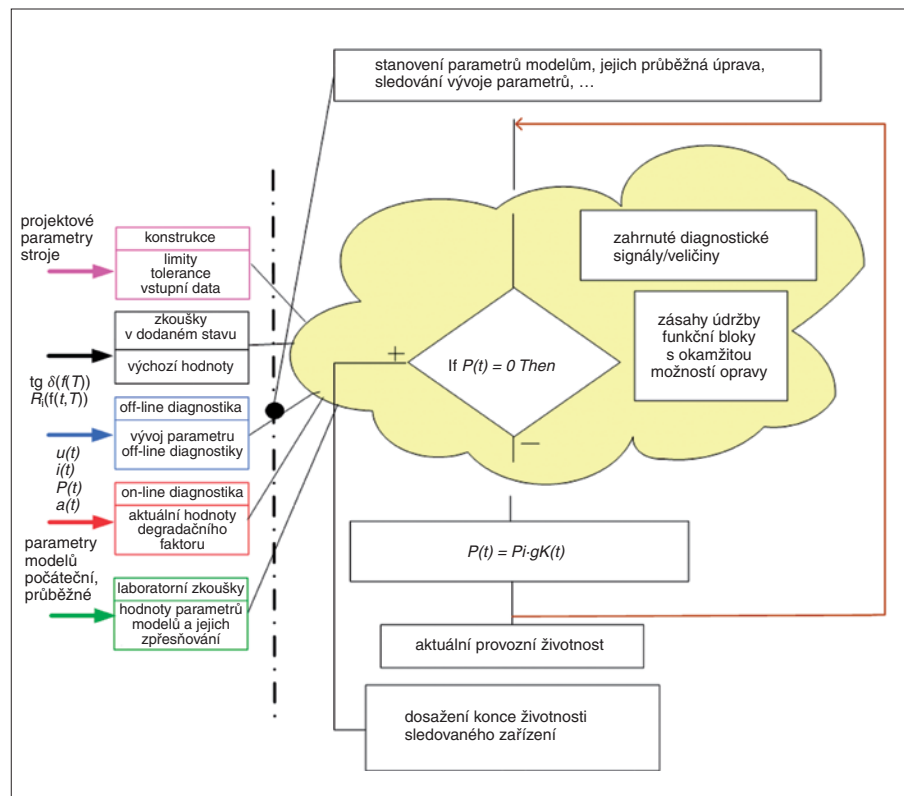
nejdůležitější. Pro elektrické stárnutí (interakci zařízení a elektromagnetického pole) lze využít podle úvahy matematické modely, získané empiricky ze zjištěných závislostí, nebo fyzikální modely, zabývající se více faktory najednou (napětí, teplota), jež vycházejí z teoretických předpokladů fyzikálního působení degračních faktorů na degradovaný materiál (obr. 4).

Posloupnost prací, které je třeba vykonat pro určení provozní spolehlivosti – lze zachytit např. postupovým diagramem (viz tab.).

Poslední etapou koncepce výpočtu provozní spolehlivosti je software pro její vlastní výpočet podle schématu na obr. 5. Schéma ve své levé části zobrazuje vstupy – to znamená údaje plynoucí z konstrukce stroje, výchozí hodnoty sledovaných parametrů, výsledky off-line i on-line diagnostiky a posléze i modelové hodnoty. Všechny tyto údaje a informace jsou neustále aktualizovány a upřesňovány. Jsou vstupujícími proměnnými do programu, který (jak zachycuje obr. 5) zahrnuje operace, dále blok zahrnující diagnostické veličiny a jejich změny, blok zásahů a kroků údržby. Výpočet ve smyčce vypočítává aktuální provozní spolehlivost $P(t)$. Na obr. 5 naznačená podmínka hlídá vyčerpání provozní spolehlivosti stroje. Výsledkem je neustále aktuální informace o provozní spolehlivosti $P(t)$ sledovaného stroje.

Poděkování

Tento článek vznikl za podpory výzkumného záměru Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České Republiky, MSM 4977751310 – Diagnostika interaktivních



Obr. 5. Koncepce výpočtu provozní spolehlivosti

dějů v elektrotechnice. Autoři dále zvláště děkují Ing. Lumíru Šaškovi, CSc., za podnětné připomínky k textu článku.

Literatura:

- [1] Mentlík, V. – Polanský, R. – Pihera, J. – Prosr, P. – Trnka, P.: *Diagnostika elektrických zařízení*. ISBN 978-80-7300-232-9, BEN technická literatura Praha 2008.
- [2] Simoni L.: *Fundamentals of endurance of electrical insulating materials*. CLUEB Publ., Bologna, 1983.
- [3] Montanari G. C. – Simoni L.: *Aging phenomenology and modelling*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 28, No. 5, October 1993, pp. 755–776.
- [4] Gjerde A. C.: *Multifactor Ageing Models – Origin and Similarities*. IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 1, 1997.
- [5] Mentlík V.: *Dielektrické prvky a systémy*. BEN Technická literatura, ISBN 80-7300-189-6, 240 s., Praha, 2006.
- [6] Lalam B. F. – The-Giam H.: *Pressure effect on the electrical ageing of polyethylene*. J. Phys. D: Appl. Phys. 33, L133–L136, UK, 2000.
- [7] Grzybowski S. – Kota N.: *Lifetime Characteristics of Magnet Wires under Multistress Conditions*. In CEIDP 2005, Nashville, USA, ISBN 0-7803-9257-4, 2005, pp. 605-608.
- [8] Koutský J.: *Degradační procesy a predikce životnosti*. FST, ZČU, Plzeň, 1995, ISBN 80-7082-177-9, 166 s.
- [9] Alexa L. – Šašek L. – Stauber J.: *Dimenzování vinutí turbogenerátoru z hlediska spolehlivosti*. EKT, č. 3., ročník 29, 1976, str. 164–171.
- [10] Alexa L. – Šašek L. – Stauber J.: *Dimenzování vinutí turbogenerátoru z hlediska spolehlivosti*. EKT, č. 4., ročník 29, 1976, str. 234–242.

(redakčně upraveno podle doporučení
Redakční rady časopisu Elektro)

Reliable operation of the whole energy chain is necessary condition for the faultless electrical energy delivery. The key role in this chain play sources of the electrical energy – generators. Fault-free operation of this machinery is subject of their reliable inner systems. This is monitored by the perfectly functional diagnostics systems.



Prof. Ing. Václav Mentlík, CSc., je absolventem Fakulty elektrotechnické Vysoké školy strojní a elektrotechnické v Plzni.

V roce 1985 obhájil disertační práci Termické analýzy v diagnostice vysokonapěťových izolací na FEL ČVUT Praha. V roce 1990 se habilitoval na ZČU Plzeň v oboru elektrotechnologie – habilitační práce Diagnostika velkých točivých elektrických strojů. Od roku 1991 vede oddělení elektrotechnologie na FEL Západočeské univerzity v Plzni. V roce 1998 se stal profesorem pro obor elektrotechnologie. Vede tvůrčí kolektiv, který řeší mnoho projektů zaměřených na oblast elektrotechnologie. Od roku 2005 je vedoucím řešitelem vědeckého záměru MŠMT ČR MSM 4977751310 Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice pro období 2005 až 2011. Oblastí jeho odborného zájmu jsou aspekty fyziky izolantů, studium polarizačních jevů v nehomogenním dielektriku, interaktivní děje prvků a systémů s procesem výroby, pracovními podmínkami a prostředím, vývoj nových izolačních materiálů a systémů pro elektrotechnické aplikace, aplikace strukturálních analýz v elektrotechnologické diagnostice, diagnostika elektrických zařízení.



Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D., vystudoval FEL na ZČU v Plzni, obor průmyslová elektronika. V roce 2005 získal titul Ph.D. na stejné univerzitě. Od roku 2005 je zaměstnancem Katedry technologií a měření ZČU FEL v Plzni. V letech 2002 až 2003 byl studentem na technické vysoké škole Univerzity of Applied Science, Fachhochschule, Regensburg (Německo), šest měsíců působil v oddělení výzkumu Maschinenfabrik Reinhausen (Německo). V letech 2006 až 2007 pracoval jako postdoctoral associate ve vysokonapěťové laboratoři ECE, Mississippi State University, MS, USA. V roce 2008 získal titul docent na Elektrotechnické fakultě Žilinské univerzity v Žilíně. V současné době působí na ZČU FEL v Plzni. Je spoluřešitelem výzkumného záměru MSM 4977751310 a projektu MPO. Oblastí jeho zájmu jsou degrační procesy v elektroizolačních systémech. Je členem několika mezinárodních vědeckých organizací, včetně IEEE.

Ročenka Elektro 2011

novinka



Praha, FCC Public, formát A6, předpokládaná cena 110 Kč

V ročence Elektro 2011 najde čtenář kromě přehledu odborných veletrhů, výročí slavných osobností vědy a techniky, seznamu úřadů a institucí či adresáře ČKAIT také např. základní jednotky a konstanty, jakož i nejaktuálnější informace o nových elektrotechnických normách. S normami souvisí bezpečnost, které je věnována pátá kapitola. Čtenář v ní najde mj. také velmi zajímavý článek o vývoji zabezpečovacích zařízení na železnici. Ochrana před účinky blesku a přepětí je věnována kapitola šestá. Problémem mobilních napájecích zdrojů se zabývá článek sedmé kapitoly. Přehled o moderním pojetí inteligentních sítí lze získat v kapitole osmé. O tom, zda jsou lasery zdravotním rizikem, se může čtenář dočíst v zajímavém článku v kapitole deváté. Kvalitní osvětlení je základem dobré pohody i bezpečnosti. Jak toho dosáhnout, poradí odborník na měření osvětlení v kapitole desáté.

Ročenka je určena technikům, konstruktérům, projektantům, elektromontérům, pracovníkům údržby, revizním technikům, pracovníkům obchodně-technických služeb a všem zájemcům o aktuální informace z oblasti elektrotechniky.

Ročenka Elektro 2011 vyjde začátkem února 2011, ale objednat si ji můžete již nyní na:

Vydavatelství FCC Public, Pod Vodárenskou věží 4, 182 08 Praha 8, tel.: 286 583 011, e-mail: public@fccgroup.cz, <http://www.odbornecasopisy.cz>