

Vážení zákazníci,

dovolujeme si Vás upozornit, že na tuto ukázkou knihy se vztahují autorská práva, tzv. copyright.

To znamená, že ukázka má sloužit výhradně pro osobní potřebu potenciálního kupujícího (aby čtenář viděl, jakým způsobem je titul zpracován a mohl se také podle tohoto, jako jednoho z parametrů, rozhodnout, zda titul koupí či ne).

Z toho vyplývá, že není dovoleno tuto ukázkou jakýmkoliv způsobem dále šířit, veřejně či neveřejně např. umístováním na datová média, na jiné internetové stránky (ani prostřednictvím odkazů) apod.

redakce nakladatelství BEN – technická literatura
redakce@ben.cz



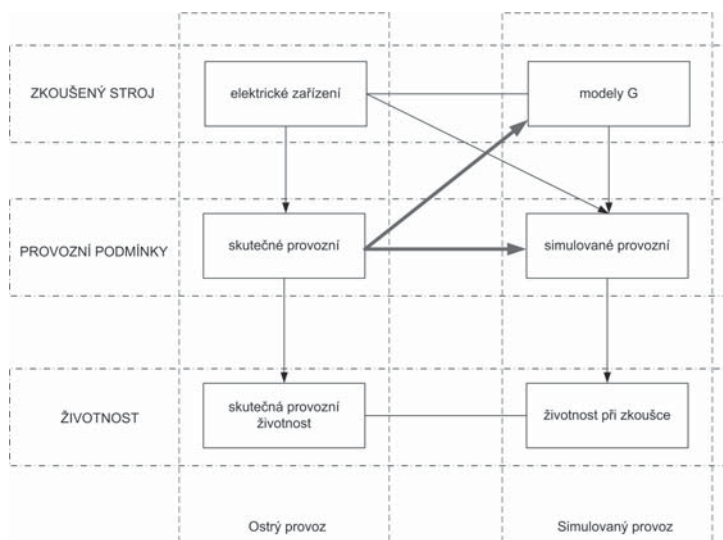
kapitola 5

ASPEKTY ZJIŠŤOVÁNÍ SPOLEHLIVOSTI ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ

Zařízení mající pevné místo a definovanou funkci v **zajištění kvalitních podmínek pro život společnosti** se právem dostávají do středu pozornosti všech, kdo mají na starost její plynulý a kvalitní život, zejména pak těch, kdo ručí za bezporuchovou dodávku energií, bez nichž si dnes už neumíme náš život představit. Přední, nezaměnitelné místo mezi těmito energiemi 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** a zařízení pro přeměnu elektrické energie při jejím přenosu – **transformátory**. Jejich bezporuchový chod je podmíněn bezchybností jejich vnitřního systému, který je možno si představit 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], [2]. 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 provádí. Je logické, že někdy může být prováděna zbytečně, jsou-li diagnostické intervaly krátké, stejně tak, jako můžeme s diagnostikou přijít pozdě, jsou-li degradační procesy z nějakých příčin rychlejší než jsme předpokládali, nebo byl 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 původní možnosti, která se v této oblasti naskytá. Jedná se 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. 5.1), jsou 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. Blokové schéma této naznačené situace zachycuje Obr. 5.1. 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 podmínkami 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 schématu na Obr. 5.1 vyznačeno silnými čárko-

vanými čarami). Z obrázku je také dobře patrná oblast vlastního ostrého provozu a provozu simulovaného.



Obr. 5.1 Poměry v diagnostice elektrických zařízení v závislosti na použitém diagnostickém systému

5.1 Problematika točivých strojů

Po úvodní obecné úvaze věnované nastínění a popisu situace při diagnostice zařízení se můžeme 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 jejím určení uvažujeme, že aktuální stav stroje ovlivňují tepelné působení, mechanické namáhání, výbojová činnost, vibrace, rozběhy, odstávky, aktuální otáčky – tedy všichni činitelé působící v daném okamžiku na sledovaný stroj. Působení těchto vlivů vyjadřujeme pomocí stanovených součinitelů – konstant K respektujících vlivy působící na stav stroje. Provozní spolehlivost stroje je $P(t)$ v daném časovém okamžiku je potom daná rovnicí (5.1).

$$P(t) = P(t = 0) \cdot gK(0) \quad (5.1)$$

kde gK je funkce vlivů působících na degradaci stroje.

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 výše uvedených vlivů K . Když uvažujeme, že K je závislé na čase, tedy $K = gK(t)$, platí pro $P(t)$ rovnice (5.2):

$$P(t) = \text{geneze zařízení} \wedge K \quad (5.2)$$

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. formou životnostní křivky, což lze obecně vyjádřit rovnicí (5.3).

$$K = K_{\text{el model}} \wedge K_{\text{mech model}} \wedge K_{\text{tepel model}} \wedge K_{\text{čv}} \wedge K_{\text{vibrace}} \wedge K_{\text{otáčky}} \wedge K_{\text{rozběhy, odstávky}} \quad (5.3)$$

Do **výpočtu aktuální spolehlivosti stroje** pak v souladu s výše uvedeným vstupují následující **data a informace**:

- **údaje dané konstrukcí stroje**, určující projektovanou životnost stroje včetně stanovení tolerancí a dovořených odchylek parametrů daného zařízení,
- **výsledky laboratorních zkoušek** před uvedením 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,
- **výsledky šetření on-line** – sledování působení degradačních činitelů diagnostickým systémem – vývoj sledovaných parametrů,
- **zásahy údržby** prováděné 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.

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.

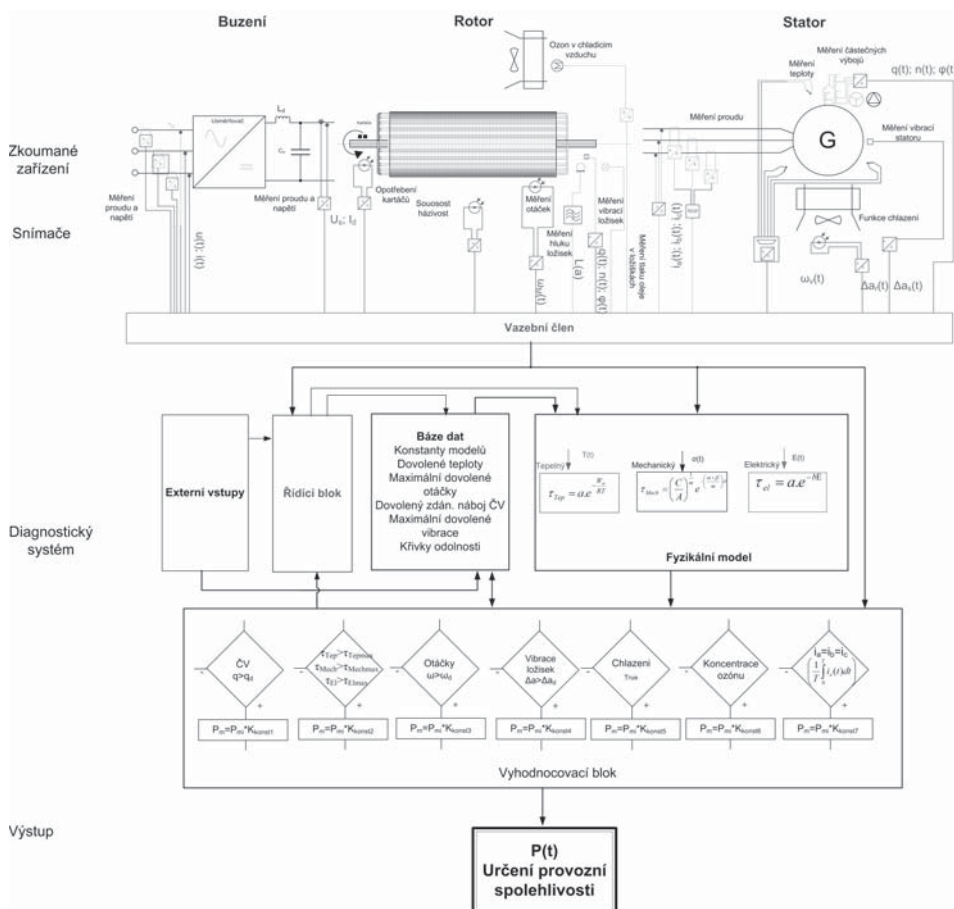
Jako **základní skutečnost** při naší **úvaze** vedoucí k **určení aktuální spolehlivosti** elektrických zařízení, v našem případě **generátorů**, chápeme **spolehlivost zařízení** P jako **pravděpodobnost** jeho **bezporuchového chodu**, tedy jako rozdíl jednotky a poruchovosti daného systému, což lze vyjádřit vztahem (5.4):

$$P = 1 - F \quad (5.4)$$

kde F je poruchovost = pravděpodobnost, která je funkcí rozdílu mezi pevností sledovaného prvku x_p a působícího zatížení x_z

Obr. 5.2 tak zachycuje obecně **celkový postup** při vyjádření **provozní spolehlivosti** sledovaného elektrického zařízení. Uvedená myšlenka pochopitelně platí a je aplikovatelná obecně pro jakékoli 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. 5.2 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. 5.3 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**.



Obr. 5.3 Vazba signálů snímaných ve sledovaném stroji a výstupu určení provozní spolehlivosti

Snímané signály jsou poplatné on-line diagnostickému systému a podle měřeno-
ného místa je lze rozdělit na signály snímané na **budiči, rotoru a statoru** generátoru.
Na **vstupu budiče** snímáme časové průběhy napětí a proudu, za usměrňovačem
pak **hodnoty napětí a proudu**. Na rotoru předně měříme časovou závislost otáček,
dále **hluk, vibrace a tlak oleje** ložisek, **souosost** a házivost, **opotřebení kartáčů**
a množství **ozonu v chladícím vzduchu** – u strojů chlazených vzduchem. Na sta-
toru měříme časovou závislost **proudu a teploty** ve všech fázích, dále jeho **vibrace**
a **funkci chlazení**. Znázorněný **diagnostický systém** odpovídá on-line diagnostice
[2] 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 elektro-
magnetického pole – lze využít podle úvahy dále uvedené následující modely.

Matematické modely jsou nejjednodušší a jsou získané empiricky ze zjištěných
závislostí. Jako příklad můžeme uvést model exponenciální (5.10) a mocninný (5.11).

$$\tau = k \cdot E^{-n} \quad (5.10)$$

$$\tau = a \cdot e^{-bE} \quad (5.11)$$

kde **k, a, b, a n** jsou experimentálně určené konstanty,
E (kV.mm-1) je intenzita elektrického pole.

Fyzikální modely se zabývají více faktory najednou (napětí, teplota). Vycházejí
z teoretických předpokladů fyzikálního působení degradačních faktorů na degrado-
vaný materiál. Uvedme některé.

Simoniho model [18], (5.12):

$$\tau = A \cdot e^{-\frac{B}{T}} \cdot e^{(a+\frac{B}{T})} \cdot f(E) \quad (5.12)$$

kde **f(E)** obecná funkce vyjadřující vliv elektrického pole,
T termodynamická teplota,
A, a, B materiálové konstanty.

Ramuúv model (např. [20]) je další z modelů odvozený ze základních vztahů
pro tepelné a elektrické stárnutí (5.13). Vztah působících faktorů je v modelu cha-
rakterizován pomocí zavedených konstant. Jedná se o model **elektrického stárnutí**
s tepelnou závislostí.

$$\tau(T, E) = c(T) E^{-n(T)} e^{-B\Delta(\frac{1}{T})} \quad (5.13)$$

kde platí následující substituce:

$$c(T) = e^{c_1 - c_2\Delta(\frac{1}{T})} \quad (5.14)$$

a

$$n(T) = n_1 - n_2\Delta\left(\frac{1}{2}\right) \quad (5.15)$$

kde c_1, c_2, n_1, n_2, B jsou konstanty,
a platí: $\Delta(1/T) = 1/T - 1/T_0$.

Fallouem induktivně **odvozený poloempirický model** je založen na exponenciálním modelu (5.11) pro elektrické stárnutí. Životnost izolačního systému pak je:

$$\tau = e^{A(E) + \frac{B(E)}{T}} \quad E > 0 \quad (5.16)$$

kde platí

$$A(E) = A_1 + A_2 E \quad (5.17)$$

a dále

$$B(E) = B_1 + B^2 E \quad (5.18)$$

kde A_1, A_2, B_1 a B_2 jsou konstanty, které je třeba zjistit experimentálně.

Většinou je vhodné tyto konstanty zjistit laboratorními zkouškami zrychleného stárnutí při konstantní teplotě a pak je aplikovat na model pro provozní namáhání.

V předchozím uvedené modely mají spíše empirický charakter. Vychází sice z termodynamiky, ale vždy je třeba stanovit experimentálně určité konkrétní charakteristiky pro každý zkoumaný izolační materiál.

Crineův model, na rozdíl od předchozích, je plnohodnotným fyzikálním modelem, kde všechny parametry mají svůj fyzikální význam. Crine vysvětluje proces stárnutí pomocí představy dvojité potenciálové jámy ([1],[21]). Energetická bariéra odděluje provozuschopný stav od stavu selhání. Aby se systém dostal z provozuschopného stavu do stavu selhání, potřebuje dostatečnou energii potřebnou k překonání energetické bariéry. Pravděpodobnost získání dostatečné energie k přechodu bariéry, tj. pravděpodobnost selhání systému, je dána Boltzmanovou statistikou. Čas potřebný k přechodu energetické bariéry do stavu selhání je podle Crinea doba života τ . Tomuto procesu významně napomáhá elektrické pole tím, že deformuje energetickou bariéru – viz Obr. 5.4 – a urychluje tak proces stárnutí.

Obr. 5.4 Model stárnutí materiálu jako dvojité potenciálové jáma

$$\tau = \left(\frac{h}{k_B T} \right) e^{\frac{\Delta W}{k_B T}} \cosh \left(\frac{e_p \lambda E}{k_B T} \right) \quad (5.19)$$

kde h Planckova konstanta,
 k_B Boltzmanova konstanta,
 ΔW volná aktivační energie,
 λ vzdálenost mezi oběma stavy,
 e_p elektrický náboj částic ovlivňujících proces stárnutí.
 $\Delta W, \lambda$ funkce teploty (Crineem blíže neurčené)

Pro **mechanický podsystém** lze např. použít model **Odingův**, nebo model dle **Dechťara a Usipova**, které svým tvarem korespondují s modely pro stárnutí elektrickým polem.

Příkladem je exponenciální model, vycházející z teorie mechanismu růstu trhlin při tahovém napětí dle Odinga [23]. Předpokládá, že vakantní místa se budou přemisťovat z objemu, který podléhá pružnému roztažení do objemů méně roztažených. Počítá změny koncentrace vakancí ve vztahu k vytvoření trhlin vlivem tahového zatížení.

$$V_{oc} = \frac{dN}{d\tau} \quad (5.20)$$

kde V_{oc} je rychlost koagulace a usazování vakancí úměrná jejich počtu N za jednotku času τ .

$$\tau = \left(\frac{C}{A} \right)^{\frac{1}{m}} e^{-\left(\frac{\alpha + \beta}{m} \right) \sigma} \quad (5.21)$$

kde τ doba do lomu (h)
 σ mechanické napětí (Pa)
 m ukazatel charakterizující způsobilost hromadit vakance
 C, A, β konstanty
 α parametr při odvození (5.22) použitého vztahu dle J. Nadie [23].

Dechťar a Usipov vycházejí z představ o úloze vakancí, předpokládají, že fyzikální stav oblasti rozrušení je podobný zárodkům natavování (vakance je obklopena skupinou neuspořádaných atomů, takže krystalografická mřížka v jejím okolí nabývá podoby blízké kapalnému stavu při teplotě tání). Rozrušování je spojeno se vznikem určitého kritického množství zárodků kapalně následkem zvětšování koncentrace „natavovaných“ center.

Výsledkem odvození je vztah (5.22)

$$\tau_p = B \cdot e^{\frac{Q_0}{RT}} e^{-\left(\frac{qV_a \sigma}{2RT} \right)} \quad (5.22)$$

kde τ_p je doba do lomu (h),
 V_a objem molu atomů (m^3),
 q koeficient charakterizující koncentraci napětí v oblasti porušování,
 Q_0 aktivační energie samodifuze,
 T teplota (K),
 σ mechanické napětí (Pa),

R univerzální plynová konstanta $8,314\ 472\ \text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$,
 B konstanta.

Posloupnost prací, které musíme provést pro dosažení našeho cíle – **určení provozní spolehlivosti** – lze zachytit následujícím postupovým diagramem, který je zobrazen na Obr. 5.5.

Obr. 5.5 Posloupnost činností pro vyjádření provozní spolehlivosti generátorů

Poslední etapou koncepce výpočtu provozní spolehlivosti je software pro její vlastní výpočet podle schématu zachyceného na Obr. 5.6. Schéma ve své levé části zobrazuje vstupy – to znamená údaje plynoucí z konstrukce stroje, výchozí hodnoty sledovaných parametrů, výsledky off- i on-line diagnostiky a posléze i modelo-

vé hodnoty. Všechny tyto údaje a informace jsou neustále aktualizovány a upřesňovány. Jsou vstupujícími proměnnými do programu, který (jak je zachyceno na Obr. 5.6) zahrnuje operace vyjádřené rovnicemi (5.2) až (5.9), dále blok zahrnující diagnostické veličiny a jejich změny, blok zásahů a kroků údržby. Výpočet ve smyčce vypočítává aktuální provozní spolehlivost $P(t)$. V Obr. 5.6 naznačená podmínka hlídá vyčerpání provozní spolehlivosti stroje. Výsledkem je neustále aktuální **informace o provozní spolehlivosti $P(t)$** sledovaného stroje.

Obr. 5.6 Koncepce výpočtu provozní spolehlivosti

5.2 Problematika transformátorů

Stejná koncepce jako je uvedena v úvodu této kapitoly se dá obecně použít i pro jiná elektrotechnická zařízení. Důležitými stroji, které se používají při přenosu elektrické energie, jsou transformátory. Diagnostický systém, použitelný pro transformátory velkých výkonů a velkých napětí je uveden na Obr. 5.7.

Transformátor jako takový je složité zařízení skládající se s řady podsystémů, které je nutno z hlediska provozní spolehlivosti sledovat. Ve zmíněném obrázku jsou schematicky zakresleny důležité části transformátoru a veličiny, které je nutné snímat „on-line“ tak aby byla v každém okamžiku k dispozici informace o aktuálním stavu stroje.

Samotný diagnostický systém sbírá informace přes vazební člen a jeho koncepce je stejná jako u točivého stroje. Podívejme se nyní blíže na vstupující signály.

Na obrázku nahoře vlevo je naznačena vysokonapěťová průchodka, kterých je samozřejmě na transformátoru více, a to jak na vysokonapěťové, tak nízkonapěťové straně, s ohledem na počet fází, vinutí a jejich zapojení. U průchodek se na