

Aspekty strukturální elektrotechnologické diagnostiky

prof. Ing. Václav Mentlík, CSc., FEL, ZČU v Plzni,
Ing. Radek Polanský, Ph.D., FEL, ZČU v Plzni

1. Vazba diagnostiky s technologickými procesy – elektrotechnologická diagnostika

Rozvoj všech odvětví průmyslu, včetně elektrotechniky, s sebou nese stále se stupňující požadavky na přesnost, kvalitu a spolehlivost všech výrobků. Jakost se stává prioritním programem a v podnicích je zcela bezpodmínečnou nutností akceptování norem ISO řady 9000 a v přímé návaznosti i 14000.

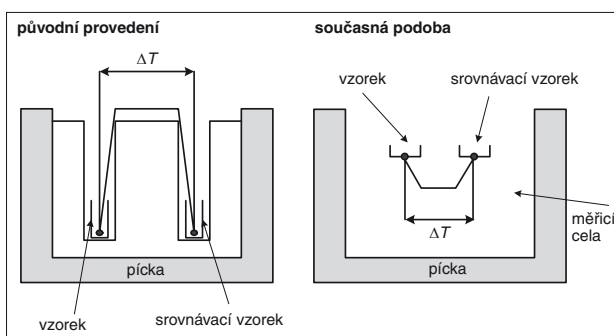
Tento trend akcentující kvalitu s sebou nese pochopitelně i odpovídajícím způsobem rostoucí požadavky na informace a systémy jejich získávání. To se nevyhýbá ani současné elektrotechnice, kterou si nelze představit bez dostatečných informací na všech jejích úrovních a hladinách. Disciplínou, která zde hraje nezastupitelnou roli a která umí tyto informace dodat, je **diagnostika**. Její informace jsou nezbytné jak v oblasti prvků, tak podsystémů i systémů elektrických zařízení. Stává se tak provazujícím článkem ostatních odvětví podílejících se na vzniku a provozu elektrických strojů i přístrojů. Respektuje **úlohu řídicích procesů**, a to jak ve výrobě vlastní, tak i při řízení diagnostických procesů.

Už na úrovni **materiálového inženýrství** jsou třeba nezbytné informace o parametrech látek (použitých materiálů), jejich vývoji při modifikaci pro daný účel i následně při interakcích probíhajících při všech těchto procesech. Na úrovni vstupu prvků – materiálů – do vlastní výroby jsou nutné informace o tom, zda všechny jejich vlastnosti jsou v požadovaných mezích s přípustnými tolerancemi. Uvedené úkoly jsou tedy prvořadou, základní náplní diagnostiky, kterou lze právem nazvat elektrotechnologickou, neboť jde o činnost, které jsou v přímém úzkém kontaktu s výrobou, činnostmi a interakcemi, které k ní patří. Stejně důležité poslání má takto pojatá diagnostika i ve vlastní výrobě, tedy v oblasti technologických procesů. Zde má několik důležitých úkolů. V první řadě to jsou mezioperační kontroly. Tedy oblast, v níž diagnostika tím, že včas vyloučí z dal-

šího výrobního procesu špatné díly (popř. jejich části), má významný **ekonomický efekt** – zabrání postupu výrobku se špatnou částí následným technologickým procesem. Dalším místem, kde v oblasti výroby diagnostika účinně pomáhá, jsou výstupní kontroly – vyzkoušení hotového výrobku po jeho dohotovení u výrobce. I tato diagnostika má značný ekonomický význam, spočívající zejména v minimalizaci záručních řízení a oprav. V této skutečnosti lze spatřovat značnou sílu diagnostiky s ekonomickými efekty vyjádřenými v praxi.

2. Praktické výstupy a dopady elektrotechnologické diagnostiky

Dopady elektrotechnologické diagnostiky je nutné spatřovat v širším kontextu, a to



Obr. 1. Uspořádání měřicí cely DTA

zejména v rozboru příčin poruch, k nimž dochází během provozu zařízení. Vzniklé poruchy jsou zaznamenávány, tříděny a archivovány v databázích. Z rozboru jejich příčin vyplývají mnohá fakta a informace, které jsou nesmírně cenné. Jedná se např. o návrhy směřující ke změnám konstrukce příslušného zařízení. To je v případě, že opakující se poruchy ukazují na nedostatky v tomto směru. Diagnostika je **nositelkou zlepšení zařízení** vedoucích k vyloučení prvků a částí, které byly příčinou opakovaných poruch. V této oblasti může diagnostika ukázat i na nedostatky ve vlastní výrobě, upozorní-li na opakující se poruchy, které lze charakterizovat jako následek chybného výrobního procesu. Rozbor zde vyústí v doporučení následných změn v technologickém procesu výroby zařízení. Stejně tak se výsledků rozboru poruch využívá i ve smyslu úprav pracovního

prostředí, v němž zařízení pracuje. To se děje tehdy, jestliže opakované poruchy signalizují přetěžování zařízení parametry prostředí. Instrukce diagnostiky vedou ke krokům odstraňujícím tento zátěžový faktor.

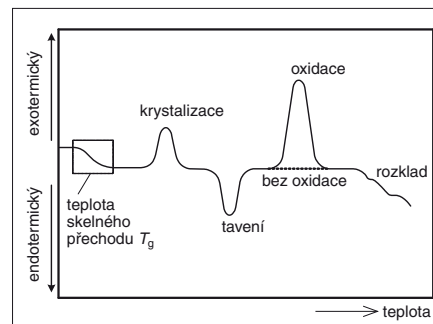
Další důležitou skutečností je také to, že diagnostika má k dispozici vlastní aparát k tomu, aby, je-li odhalena porucha, byl okamžitě navržen postup, jak ji co nejefektivněji odstranit.

Významné a cenné je místo a význam diagnostiky při sledování života technických zařízení – při provozní diagnostice. V této oblasti je důležité nejen sledovat vývoj parametrů zařízení, ale také ukládat údaje, vytvářet cenné databáze hodnot popisujících vývoj chování systémů. Na základě těchto informací lze zpracovat předpověď chování systému v následném, dalším období. Elektrotechnologická prognostika je vlastně závřením diagnostiky – tedy tím, co je v této oblasti očekáváno – a logickým vyvrcholením uváděné činnosti.

3. Nástroj diagnostiky – diagnostický systém

Aby mohla diagnostika plnit svou funkci, potřebuje určitý aparát – prostředky nutné k vykonávání diagnostických činností. Ty jsou shromážděny v diagnostickém systému, který splňuje uvedené podmínky a zahrnuje následující požadavky:

- Nutné instrumentální vybavení pro diagnostiku – soubor měřidel s vhodnými převodníky a potřebná čidla (ta by měla být součástí zařízení), neboť diagnostika musí být samozřejmě součástí konstrukce zařízení (pochopitelně tam, kde je to opodstatněné cenou a důležitostí diagnostikovaného objektu).



Obr. 2. Idealizovaná křivka DTA zobrazující základní typy změn v polymerních materiálech

- Model diagnostikovaného objektu (nejčastěji matematický), který je schopen simulovat jak bezchybné provozní stavy, tak všechny poruchové stavy diagnostikovaného objektu, pochopitelně včetně všech možností, které se zde mohou vyskytnout.
- Volbu přístupu k řešení diagnostického problému, který je dvojitý, a sice fenomenologický (při diagnostice jsou důležité jen reakce diagnostikovaného objektu na vstupní diagnostické signály) nebo strukturální (důležité je, co se děje v systému – struktura – diagnostikovaného objektu); z názoru plyne, že strukturální přístup dává vydatnější informace, jeho šetření mají menší rozptyl hodnot, vyžaduje však nákladnější aparaturu a speciálně školenou obsluhu; fenomenologický je oproti tomu jednodušší, jsou s ním četné zkušenosti, neboť se používá již dlouho.
- S uvedenou problematikou volby přístupu souvisí další aspekt – problém destruktivnosti či nedestruktivnosti vykonávaných zkoušek. Destruktivní zkoušky mají dobrou schopnost výpovědi, vykoupenou velkou spotřebou experimentálního materiálu, který je zkouškami znehodnocen. Tím je i ekonomicky náročnější. Nedestruktivní zkoušky lze opakovat, experimentální materiál zůstává v podstatě nepoškozen.
- Volbu postupu diagnózy (stanovení režimu, jakým bude diagnostika postupovat; zde obecně lze použít dva přístupy, a sice off-line nebo on-line).
- Znalostní a zkušenostní potenciál, tedy pracovníci s odpovídajícími zkušenostmi a znalostmi na požadované úrovni.
- Stanovení metodologie – postupu – vlastní diagnostiky, určení jednotlivých diagnostických operací, jejich optimalizace, stanovení jednotlivých kroků diagnózy s respektováním ekonomických aspektů.

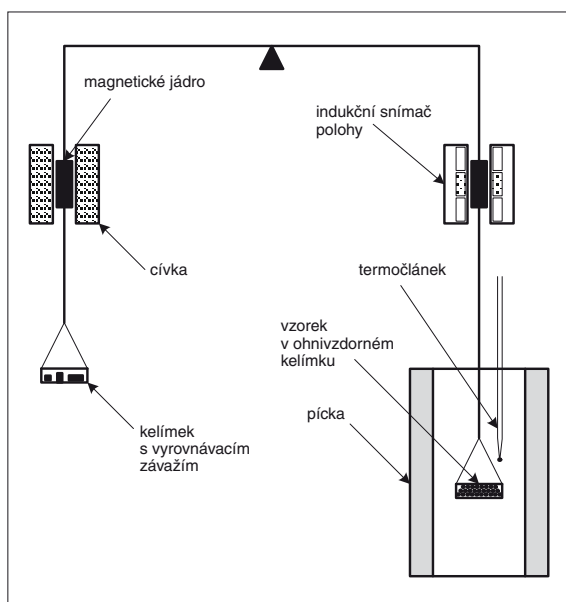
4. Strukturální metody a jejich místo v elektrotechnologické diagnostice

V oblasti aplikovaných diagnostických metod roste význam strukturálního přístupu pro jeho nesporné přednosti, k nimž bezesporu patří větší schopnost výpovědi i vydatnost získaných informací, včetně menšího rozptylu výsledků. Ten plyne přímo z principů metod užívaných u tohoto přístupu. Cestou v této oblasti je aplikování metod nevyžadujících extrémně nákladná instrumentální zařízení. Jako dobrý příklad lze uvést tzv. **termické analýzy** – diferenční termickou

analýzu (DTA), diferenční skenovou kalorimetrii (DSC), termomechanickou analýzu (TMA) i termogravimetrii (TGA). Termické analýzy jsou podskupinou strukturálních analýz a jde o experimentální metody, které popisují změny fyzikálně-chemických vlastností látek při jejich ohřevu.

Tyto metody jsou vhodné pro:

- sledování technologické kázně výroby vysokonapěťových izolačních systémů,
- sledování stupně vytvrzení reaktoplastických pryskyřic – pojev elektroizolačních systémů,
- určení stupně degradace elektroizolačních systémů,
- sledování postupu termooxidace izolačních systémů,
- sledování vlivu katalyzátoru (druhu a množství) na vlastnosti syntetických pryskyřic,
- zefektivnění získávání životnostních křivek materiálů.



Obr. 3. Příklad konstrukčního uspořádání aparatury TGA

Toto lze doložit mnoha příklady: [1], [2], [3], [4], [5].

Jako další metody použitelné v této oblasti lze uvést chromatografické metody, infračervenou spektrometrii i rentgenovou fluorescenční spektrometrii a infračervenou spektrometrii s Fourierovou transformací (FT-IR), neboť i s těmito metodami jsou již určité zkušenosti [6], [7], [8]. Je ovšem nutné zdůraznit, že při navržení těchto metod pro aplikaci je třeba vždy přihlédnout k zachování plné objektivity pohledu na diagnostikovaný objekt i zachování ekonomické vyváženosti řešení. V následujícím textu je stručný popis vybraných metod, které jsou vhodné pro účely elektrotechnologické diagnostiky.

Diferenční termická analýza (DTA) umožňuje měřit tepelné efekty spojené s chemickými nebo fyzikálními změnami látky v závislosti na lineárně se měnící teplotě. Tyto

tepelné efekty vyjadřují změnu tepelného obsahu vzorku, mohou být endo- i exotermické a měří se diferenční metodou. Teplota zkoumaného vzorku se plyne porovnává s teplotou teplotně inertního standardu (srovnávacího vzorku). Rozdíl teplot je graficky zaznamenáván v závislosti na teplotě a čase a dává obraz o stavu reakceschopných částic látky. Získané výsledky umožňují jak kvantitativní, tak kvalitativní vyhodnocení a lze je použít nejen z hlediska analytického, ale i při studiu reakční kinetiky k získání termodynamických veličin – tedy i ke studiu stavu izolantů. Schematické uspořádání měřicí cely DTA je na obr. 1.

V případě současné podoby DTA jsou měřený vzorek a inertní standard vloženy každý zvlášť do svého kelímku. Kelímky jsou umístěny na jednotlivých termočláncích, se kterými musí mít co největší styčnou plochu tak, aby byla citlivost při měření teploty co nejvyšší. Bohužel vzhledem k tomuto požadavku hrozí kontaminace termočlánců samotným vzorkem (např. při zvrhnutí kelímku), proto je při konstrukci nutné volit kompromis. Držák vzorků je spolu s kelímky a termočlánci umístěn v prostoru pícky. Od té musí být odpovídajícím způsobem elektricky odstíněn, aby nedocházelo k rušení signálu termočlánců ze strany topných členů pícky. Pícka samotná musí být schopna velmi rychle reagovat na pokyny teplotního regulátoru, který je nastaven obsluhou.

Na obr. 2 je znázorněna idealizovaná křivka DTA zobrazující základní typy změn vyskytujících se v polymerních materiálech [9], [10].

Použití DTA v našem oboru vychází ze skutečnosti, že působením okolních vlivů dostávají částice materiálů energii, která jim umožní přestoupit energetickou bariéru a vstoupit do reakcí majících za následek změnu vlastností sledovaného materiálu. Časovou změnu produktů probíhající reakci popisuje Guldberg-Waagův zákon:

$$\frac{d(m_0 - m)}{dt} = k m \quad (1)$$

Vyjadřuje skutečnost, že vstoupí-li do reakce m_0 výchozích molekul, v průběhu reakce za čas t se jich m nezmění. Závislost rychlosti probíhající reakci k na teplotě vyjadřuje kvantitativně Arrheniův zákon. Měníci se koncentrace (počet) aktivních molekul úzce souvisí se změnou fyzikálních vlastností materiálů. Časovou změnu sledované fyzikální vlastnosti P lze vyjádřit po dosažení Arrheniova vztahu:

$$\frac{dP}{dt} = -A e^{-\frac{E}{RT}} f(P) \quad (2)$$

V uvedeném vztahu A vyjadřuje předexponenciální faktor (s^{-1}). Udává frekvenci střetávajících se molekul (10^{13} Hz). Aktivační energie E ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) udává výši energetické bariéry, kterou musí překonat molekuly vstupující do reakce. R je univerzální plynová konstanta

8,315 J·grad⁻¹·mol⁻¹. T (K) vyjadřuje teplotu, při níž děj probíhá. Funkce $f(P)$ zahrnuje řád probíhající reakce a respektuje souvislost mezi koncentrací (počtem) reagujících částic a vnějším projevem změn – sledovanou vlastností materiálu. Výše zmíněná aktivační energie E je tedy jednou z charakteristických, děj popisujících veličin pro svoji jednoznačnost, s níž jej charakterizuje. Tím DTA přímo navazuje na studium chování a vlastností materiálů. Popisuje stav reakcí schopných částic v materiálech. Znamená to, že informuje o tom, kolik částic už zreagovalo a kolik jich má látka ještě k dispozici – na jaké úrovni je její momentální entalpie. Tím popíše stupeň degradace materiálu i kvalitu jeho zpracování na základě údajů přímo ze struktury zkoumaných látek. Dominantním členem základní rovnice popisující tuto metodu je citovaná aktivační energie:

$$\frac{d(\Delta T)}{dt} + A(\Delta T - \Delta T_{ust}) = \frac{E}{C_v} \left(\frac{dm_r}{dt} \right) \quad (3)$$

Rozdíl okamžitých teplot vzorku a inertního standardu je ΔT . Nedochází-li ve vzorku ke změně entalpie, indikuje diferenční termočlánek rozdíl teplot ΔT_{ust} , což odpovídá nulové linii termogramu.

Tepelnou kapacitu vzorku a kontejneru DTA vyjadřuje C_v . Relativní koncentraci aktivních částic vyjadřuje m_r :

$$m_r = \frac{m_0 - m}{m_0} \quad (4)$$

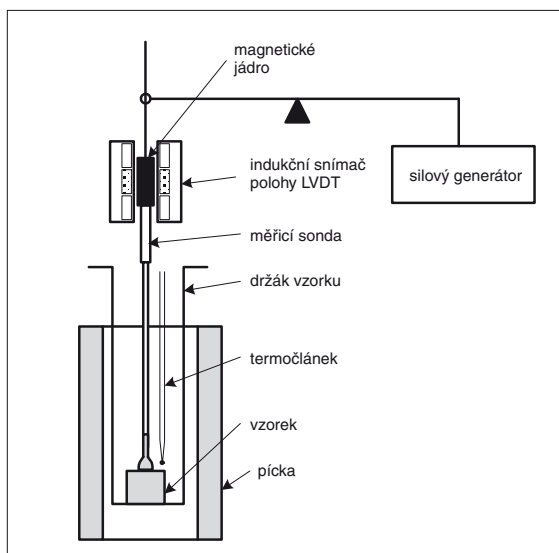
kde

m_0 je počet molekul vstupujících do sledované reakce,

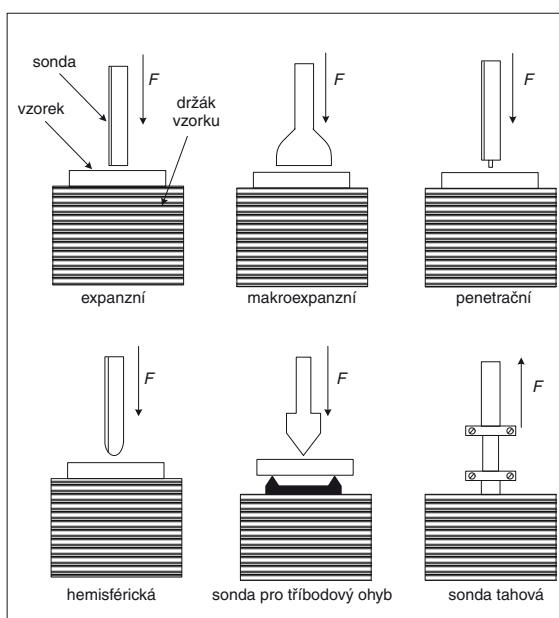
m počet částic, které se během reakce nezměnily.

Jednou z informací s největší vypovídací schopností o stavu izolantů je sledování jejich hmotnosti. Změna volné entalpie může být při některých procesech (jako je oxidace či dehydratace) doprovázena i změnou hmotnosti sledované látky. Z této skutečnosti vychází aplikace **termogravimetrické analýzy** (TGA) v diagnostice izolantů. Při této analýze se měří změna hmotnosti vzorku jako funkce rostoucí nebo klesající teploty. Metoda spočívá v plynulém nebo periodicky pravidelně opakovaném měření hmotnosti vzorku, který je ohříván. Příklad konstrukčního řešení termogravimetrie je na obr. 3.

Vzorek (v podobě prášku) je umístěn v ohnivzdorném kelímku (nejčastěji keramickém či platinovém). Kelímek se nachází v horké zóně pece a je zavěšen na vahadle vysoce přesné váhy. Termočlánek je v bezprostřední blízkosti vzorku, ale není s ním ve styku, takže nepřekáží vahadlu ve volném pohybu. Váha je elektronicky kompenzována, a z tohoto důvodu se kelímek nepohybuje, ani když vzorek ztrácí či získává na hmotnosti. Má-li vzorek tendenci ke změně hmotnosti, je tato změna ihned zaznamenána snímačem polohy, který je propojen s cívkou na protější straně váhy. Proud tekoucí cívkou vyvine sílu a vy-



Obr. 4. Schematické uspořádání aparatury TMA



Obr. 5. Základní typy měřících sond pro TMA

rovná protipohybem váhu do nulové polohy. Velikost proudu potřebná k tomuto pohybu je úměrná velikosti změny hmotnosti vzorku. Z důvodu ochrany aparatury před potenciálně korozivními plyny uvolňovanými ze vzorku je celý vnitřní prostor pece proplachován plynem. Popsané univerzální uspořádání aparatury pro TGA odpovídá v současné době nejčastěji používanému principu [11].

Výsledkem této analýzy jsou křivky TGA vyjadřující závislost hmotnosti na teplotě nebo čase nebo křivky DTG zachycující závislost rychlosti změny hmotnosti na teplotě. Všechny získané křivky mají v tomto případě kvantitativní charakter – vyjadřují změny hmotnosti.

I v případě TGA je uvažována změna sledované vlastnosti materiálu v souladu se vztahem (2), kde je jako sledovaná vlastnost uvažována hmotnost vzorku G , která je funkcí teploty a času. Při aplikaci termogravimetrie

je nutné si uvědomit, že s její pomocí lze zaznamenat pouze chemické reakce, které jsou doprovázeny úbytkem hmotnosti. I při těchto reakcích termogravimetrie vypovídá jen velmi málo o jejich charakteru, proto je v praxi často kombinována s ostatními analýzami.

V tomto ohledu vycházejí výrobci aparatur uživatelům vstříc, a lze se tak na trhu setkat s tzv. **simultánní termickou analýzou** (STA), která kombinuje termogravimetrii např. s diferenční termickou analýzou (popř. s diferenční skenovací kalorimetrií). Výhodou tohoto uspořádání je, že lze měřit oběma analýzami najednou, a to dokonce za stejných experimentálních podmínek. Porovnání výsledků TGA a DTA je ihned dostupné, a lze tak výrazně šetřit čas potřebný k analýze. Nevýhodou ovšem zůstává kompromisní konstrukční řešení těchto aparatur, které ubírá na citlivosti jednotlivým analýzám. Kombinací výsledků TGA a DTA lze odhalit i reakce, které nejsou doprovázeny změnou hmotnosti (tavení, krystalizace, skelný přechod aj.).

Dalším podstatným a důležitým zdrojem informací o povaze testovaných materiálů jsou plynné produkty jejich tepelného rozkladu. Tento fakt přímo vybízí k použití TGA v kombinaci s různými spektrometry či chromatografy. Kombinace těchto technik je často obecně nazývána **analýzou uvolněných plynů** (EGA).

Jako příklad lze uvést tyto kombinace:

- TGA + MS – termogravimetrie v kombinaci s hmotnostní spektrometrií,
- TGA + FT-IR – termogravimetrie v kombinaci s infračervenou spektrometrií s Fourierovou transformací,
- TGA + GC – termogravimetrie v kombinaci s plynovou chromatografií.

Vzhledem k tomu, že se lze v praxi nejčastěji setkat s kombinací TGA + FT-IR, je v tomto příspěvku zmíněna technika této metody patřící do skupiny spektrometrických metod. Předchůdcem, a vlastně i základem techniky FT-IR je **infračervená spektrometrie**, která je nejběžnější technikou využívanou v organické a anorganické chemii k získávání informací o struktuře látek a k identifikaci různých směsí. Její podstatou je vzájemná interakce mezi analyzovaným vzorkem a infračerveným zářením. Dopadající infračervené (IČ) záření je při průchodu vzorkem

absorbováno jednotlivými molekulami a následně přeměněno na energii, která se projevuje vibracemi těchto molekul (proto se IČ spektrometrie často označuje jako vibrační spektrometrie). V aparatuře pro infračervenou spektrometrii je tedy vzorek uměle ozařován paprskem infračerveného záření. K absorpci záření vzorkem dochází, odpovídá-li energie záření energii některé z molekulových vibrací.

Výsledné infračervené spektrum je funkční závislost energie, většinou vyjádřené v procentech tzv. **transmittance** – poměr intenzity záření, které prošlo vzorkem (I), k intenzitě záření vycházejícího ze zdroje (I_0) – nebo jednotkách **absorbance** (dekadický logaritmus převrácené hodnoty transmittance) na vlnové délce dopadajícího záření.

Přístroje používané v infračervené spektrometrii lze rozdělit podle jejich principu a konstrukčního uspořádání na dvě hlavní skupiny, a to na **disperzní a nedisperzní spektrometry**. Z historického hlediska tvoří starší skupinu spektrometry disperzní, které se začaly používat již ve 40. letech minulého století. Teprve v 80. letech dochází k masivnímu rozšíření nedisperzních infračervených spektrometrů, jejichž nejznámějším zástupcem je infračervený spektrometr s Fourierovou transformací (tzv. FT-IR spektrometr), který díky větší rychlosti a citlivosti nahradil v mnohých aplikacích spektrometry disperzní.

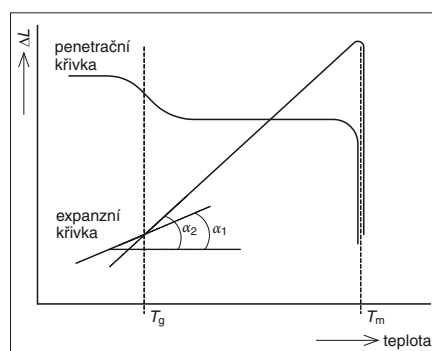
Objevem techniky FT-IR došlo k výraznému rozšíření možnosti celé infračervené spektrometrie. Spektrometry FT-IR lze totiž použít i v takových aplikacích, ve kterých disperzní spektrometry selhávají nebo ve kterých by bylo jejich použití příliš složité. Na rozdíl od sekvenčního sledování každé frekvence zvlášť (disperzní přístroje) jsou v případě spektrometrie FT-IR simultánně sledovány všechny frekvence najednou, což činí tuto metodu výrazně rychlejší. U této techniky se měří na výstupu interferometru celková intenzita prošlého záření, tzv. interferogram. Každý takto zaznamenaný interferogram obsahuje veškeré spektrální informace, které se převedou následnou Fourierovou transformací na průběh závislosti intenzity záření na frekvenci (vlnové délce), tj. na infračervené spektrum [12].

Aparatury využívající infračervené spektrometrie s Fourierovou transformací mohou analyzovat vzorky všech tří skupenství a tuto metodu lze s úspěchem v elektrotechnologické diagnostice použít k mnoha účelům. Jako v případě všech předchozích analýz hraje IČ spektrometrie hlavní úlohu především při analýze polymerních elektroizolačních materiálů. S její pomocí lze analyzovat [12] např.:

- změny struktury molekul,
- chemické reakce (včetně izomerizačních a polymeračních),
- fázové přechody,
- adsorpci molekul na povrch vzorků i vzájemnou interakci molekul.

Dále ji lze používat k identifikaci polymerního materiálu, a to jak kvalitativní, tak i kvantitativní. Infračervená spektrometrie může také sloužit k určení koncentrace nečistot, antioxidantů, aditiv a emulgátorů, změkčovadel, plniv a zbytkových monomerů v polymerním materiálu. Vzhledem k malé rychlosti některých procesů lze dále sledovat procesy, jako je např. vulkanizace, polymerace nebo degradace. Rovněž lze studovat vliv vnějších podmínek na polymery (teploty a tlaku, záření, deformace, vliv stárnutí nebo vlhkosti okolního prostředí) [12].

Při klasifikování izolantů z hlediska jejich použitelnosti se přihlíží i k oblasti teplot, při nichž je materiál schopen plně vykonávat svoji funkci. Rozhodujícím momentem v této oblasti je **teplota skelného přechodu** T_g , při níž se mění materiálové vlastnosti i o několik řádů. Znáť tedy tento parametr je velmi zajímavé, v některých případech dokonce rozho-



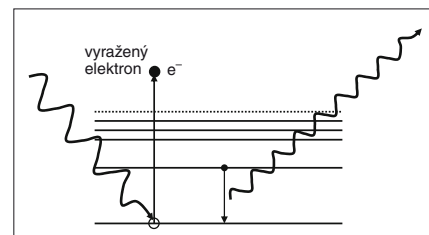
Obr. 6. Porovnání penetrační a expanzní křivky při analýze TMA (T_g – teplota skelného přechodu, T_m – teplota tavení)

dující. Metodou, která umožní tento údaj zjistit, je **termomechanická analýza** (TMA). Tato metoda také umožňuje získat další velmi zajímavý a důležitý parametr, a sice součinitel délkové teplotní roztažnosti α v oblasti před dosažením teploty skelného přechodu α_1 a po dosažení této teploty α_2 , tedy ve sklovitém i kaučukovitém stavu materiálu.

TMA je termická analýza, která zkoumá chování materiálu vystavovaného současnému působení řízeného teplotního režimu a mechanického namáhání. Při analýze se měří změny rozměrů vzorku v závislosti na teplotě nebo čase. Schematické uspořádání aparatury TMA je na obr. 4.

Jádrem aparatury pro termomechanickou analýzu je indukční snímač polohy LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*). Ten je tvořen transformátorem, který obsahuje tři cívky ve tvaru toroidu. Primární vinutí je navinuto na prostřední cívce, sekundární je rozděleno mezi zbývající dvě cívky. Měřicí sonda je spojena s feromagnetickým jádrem transformátoru, které se volně pohybuje uprostřed všech tří cívek. Střídavý proud protékající primárním vinutím indukuje napětí v obou sekundárních cívkách, jehož velikost je úměrná jejich vzájemné indukci. Po-

hyb feromagnetického jádra uvnitř cívek způsobí změnu vzájemné indukčnosti. Pokud je jádro v centrální poloze, je výstupní sekundární napětí rovno nule (sekundární vinutí jsou zapojena v diferenciálním uspořádání). Dojde-li k posunu jádra, zvyšuje se indukované napětí v jednom ze sekundárních vinutí, zatímco v druhém se napětí snižuje. Tento jev způsobí zvyšování výstupního napětí od nuly do maxima. Napětí je ve fázi s primárním napětím. Posune-li se jádro v opačném směru, napětí se opět zvyšuje z nuly do ma-



Obr. 7. Vyrazení elektronu dopadajícím rentgenovým zářením

xima, ale je v opačné fázi s primárním napětím. Velikost napětí je tedy úměrná posunu feromagnetického jádra a fáze napětí indikuje směr tohoto posunu [13].

Na feromagnetické jádro LVDT může být jednoduše připojena jakákoliv z mnoha běžně používaných měřicích sond (obr. 5). Konec sondy dosedá na vzorek, který je umístěn na držáku. Měřicí sondy a držák vzorku jsou nejčastěji vyrobeny z křemenného skla. V těsné blízkosti vzorku se také nachází termočlánek. V průběhu měření je vzorek (spolu s držákem a koncem sondy) umístěn uvnitř pece a jeho výška je kontinuálně vyhodnocována.

Podle charakteru namáhání při vykonávání TMA v rámci elektrotechnologické diagnostiky se nejčastěji hovoří o dilatometrii a penetraci.

Při **dilatometrii** je expoziční mechanické namáhání vzorku zanedbatelně malé nebo nulové a TMA přechází na měření délkové teplotní roztažnosti. Teplotní roztažnost je ve své podstatě následek neharmonických vibrací atomů kolem rovnovážných poloh v krystalové mřížce. Míru teplotní roztažnosti udává součinitel teplotní roztažnosti a charakterizuje ji průměrný součinitel délkové teplotní roztažnosti α_p , který lze vyjádřit vztahem (5), rozměrem je $\text{ppm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ (*parts per milion*, miliontina metru na stupeň Celsia):

$$\alpha_p = \frac{1}{\Delta v} \cdot \frac{\Delta h}{h} \quad (5)$$

kde

Δv je teplotní interval měření ($^\circ\text{C}$),
 Δh přírůstek výšky vzorku (mm),
 h počáteční výška vzorku (mm).

Kromě průměrného součinitele délkové teplotní roztažnosti lze vypočítat i lokální součinitel délkové teplotní roztažnosti α_L .

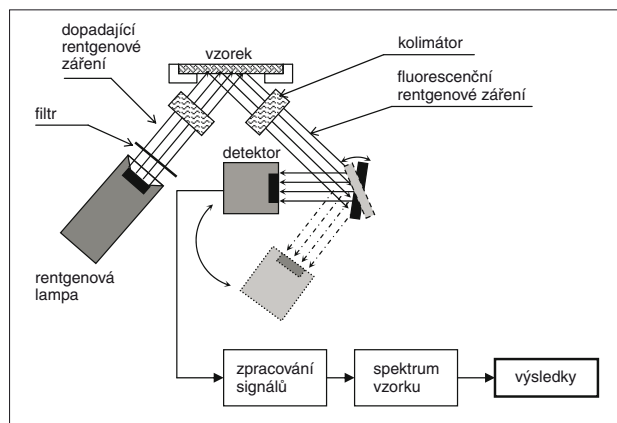
U TMA se obecně jedná o měření výšky vzorku, který je podroben řízenému teplotní-

mu ohřevu. Měřený materiál zde přitom prochází dvěma mezními stavy. První z nich je kaučukovitý, druhý sklovitý. Zjištění teploty přechodu mezi oběma stavy – teploty skelného přechodu T_g – je velmi důležité. Dochází k přeměně pevného sklovitého stavu látky na kaučukovitý, nebo naopak. Sklovitý stav charakterizuje součinitel α_{P1} a kaučukovitý stav součinitel α_{P2} . Teplota skelného přechodu T_g se odvodí z průsečíku tečen křivky před počáteční deformací na ose teploty a po ní. Součinitele α_{P1} a α_{P2} se určí jako úhly prodloužených tečen obou částí průběhu $h = f(v)$ a rovnoběžky s osou teploty v bodě, kde tečna opouští dolní část křivky.

Při **penetraci** se pracuje s větším mechanickým zatížením vzorku než při dilatometrii. Měří se zde hloubka vniku sondy do vzorku v závislosti na teplotě. Podobným způsobem je možné také měřit teplotní závislost průhybu vzorku. Aby takové měření mohlo být uskutečněno, je nutné nejprve zajistit vhodné uspořádání dosedacích ploch. Měřený materiál je umístěn na dvou podpěrách, přičemž na něj mezi těmito podpěrami působí daná síla.

Pro dokreslení situace je na obr. 6 znázorněno porovnání termomechanických křivek získaných při měření expanze a při měření penetrace spolu s vyhodnocením teploty skelného přechodu a teploty tavení.

Pro sledování stavu prvků elektrických zařízení lze, podle našich zkušeností, použít také **rentgenovou fluorescenční spektrometrii (XRF)**.



Obr. 8. Obecné uspořádání fluorescenčního spektrometru

Tato metoda je založena na analýze sekundárního (fluorescenčního) záření, které je uvolněno při vyražení elektronu dopadajícím rentgenovým zářením. Vyražení tohoto elektronu se projevuje přechodem jiného elektronu z vyšší hladiny elektronového obalu do nižší. Situaci dokresluje obr. 7.

Intenzita fluorescenčního záření je úměrná intenzitě primárního záření, výtěžku fluorescence a podílu prvku ve směsi. Vyhodnocování sekundárního záření může být komplikováno jeho reabsorpcí vzorkem (reabsorpce je závislá na matici vzorku).



Obr. 9. Celkový pohled na přístroje v laboratoři termických analýz

Obecné uspořádání rentgenového fluorescenčního spektrometru je na obr. 8.

Klasický spektrometr XRF je tvořen zdrojem rentgenového nebo radioaktivního záření (rentgenová lampá nebo radionuklid), vhodnými filtry pro optimalizaci podmínek stanovení některých prvků, kolimátory (zařazenými jak u primárního, tak u sekundárního svazku paprsků – v prvním případě pro vymezení aktivní plochy vzorku, podobně jako maska, v druhém případě k úpravě sekundárního záření před dopadem na detektor, nejčastěji Solerovy clonky), krystalem, detektorem rentgenového záření.

Klíčová je u techniky XRF příprava vzorků. Na vzorky jsou již předem kladeny požadavky umožňující úspěšnou analýzu. Povrch pevných vzorků se předem brousí a leští. Homogenní práškové vzorky se lisují do podoby tablet. Lze rovněž analyzovat kapalně vzorky a plynné vzorky po zkapalnění.

Obecně se rentgenová fluorescenční spektrometrie používá při analýze minerálů, keramických materiálů, slitin, plastů i biologických materiálů. Je použitelná pro důkaz a stanovení prvků s atomovým číslem větším než deset. V elektrotechnologické diagnostice je vhodná pro identifikaci produktů degradace v elektroizolačních materiálech.

5. Diagnostika a strukturální analýzy na pracovišti autorů

Diagnostika elektrických zařízení je dlouhodobě součástí odborné části náplně praco-

viště autorů tohoto článku (oddělení elektrotechnologie katedry technologií a měření Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni). V podstatě od 70. let minulého století je zde kromě diagnostiky velkých točivých elektrických strojů (zejména metodik lokalizace a analýzy výbojové činnosti) věnována pozornost i strukturálnímu aspektu diagnostických šetření, jmenovitě aplikaci termických analýz v oblasti studia elektroizolačních materiálů – vysokonapěťových izolačních systémů pro elektrické točivé i netočivé stroje, a kabelových izolací.

V této oblasti pracoviště úspěšně prohlubuje spolupráci s výrobcí elektrických zařízení a jejich komponent – Škoda Electric, s. r. o., Plzeň, ETD Transformátory, a. s., Plzeň, Cogebi, a. s., Tábor, a dalšími, pro něž byla úspěšně vykonána řada prací z oblasti diagnostických šetření i vývoje.

Celá činnost pracoviště se odráží v publikacích realizovaných jeho členy – nepatrná část z nich je uvedena v seznamu literatury tohoto článku. Autoři článku i ostatní členové uvedeného pracoviště rádi prodiskutují s případnými zájemci jejich problémy a pomohou s jejich řešením.

Za zmínku také stojí, že uvedené pracoviště je organizátorem konferencí Diagnostika, kterých již proběhlo osm, vždy v lichém roce počínaje rokem 1993. Jde o pravidelná setkání všech, kdo se věnují problematice diagnostiky elektrických zařízení a jejich prvků, stejně jako výzkumu v této oblasti. Ze všech konferencí byl vždy vydán sborník příspěvků, které zde odeznelly. Plně znění sborníku Diagnostika 2007 si lze prohlédnout na webových stránkách <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/>. Vybrané příspěvky byly také zveřejněny v čísle 2/2007 on-line časopisu ElectroScope ISSN 1802-4564 (<http://electroscope.zcu.cz>).

V současné době je na tomto pracovišti kromě dobře vybavených laboratoří dielektrických systémů a mechanických vlastností v provozu také **termoanalytická laboratoř** vybavená simultánním termickým analyzátozem firmy TA Instruments SDT Q600 napojeným na infračervený spektrometr s Fourierovou transformací firmy Nicolet a termomechanickým analyzátozem TMA Q400EM firmy TA Instruments (obr. 9).

Kromě výše uvedených prací v návaznosti na spolupráci s podniky je současná pozornost na pracovišti pochopitelně zaměřena na výzkumné práce v rámci řešení poměrně rozsáhlého projektu – záměru MŠMT ČR Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice, jehož je pracoviště nositelem.

6. Elektrotechnologická diagnostika – posila elektrotechnického průmyslu

Pro celou oblast diagnostiky, a tedy i pro její elektrotechnické aplikace, platí to, že jde o velmi rozsáhlou a komplexní disciplínu. Ta zahrnuje poznatky z mnoha oborů a prochází neustálým vývojem, který je obrazem dynamičnosti a modernosti jejich nosných myšlenek. Tím se beze sporu stává elektrotechnologická diagnostika v pojetí, které bylo představeno v tomto příspěvku, nedílnou součástí pokroku v současném elektrotechnickém průmyslu. Strukturální metody jsou moderním diagnostickým nástrojem umožňujícím získání bohatých informací o dějích ve struktuře materiálů, a tím dobré orientace ve změnách vyvolaných jak technologickými procesy, tak deterioračními procesy v provozu. To dále pomáhá i při stanovení reálné prognózy dalšího vývoje vlastností materiálů.

Poděkování: Tento článek vznikl za přispění vědeckého záměru MŠMT České republiky MSM 4977751310 Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice, řešeného na pracovišti autorů.

Literatura:

- [1] MENTLÍK, V.: *New Application of the DTA in Heavy-Current Electrotechnology*. ICTA 1985, Bratislava 1985, s. 336.
- [2] MENTLÍK, V.: *Macromolecular Substance Enthalpy by the sign of their Quality*. ETPC, 10, Řím, 1986.
- [3] MENTLÍK, V.: *Insulating system of new generation*. In: 2nd International Conference on Dielectric and Insulation, 2, Košice 2000, p. 61, ISBN 80-88922-14-3.
- [4] MENTLÍK, V.: *The aspects and perspective views of the diagnostics of electric devices*. Scientific Colloquium on High Voltage Engineering, Košice, Slovak Electrotechnic Society, 2002, p. 25–29, ISBN 80-89061-54-0.
- [5] POLANSKÝ, R. – PIHERA, J. – PROSR, P. – TRNKA, P.: *Termomechanická analýza izolačních materiálů na bázi slídy a silikonového pojiva*. In: Diagnostika 2005, Plzeň, Západočes-

Current trend of increasing quality and reliability of all electrical devices requires also more information about these devices. This kind of information is demanded in all phases of device manufacture and operation. Electrical technology as a branch of science contributes to this problem with a lot of important information. It is very extensive, modern and dynamic branch, which includes knowledge from number of other branches; it has been continuously developing and forms an integral part of electro-technics. Structural methods are one of the instruments of electrical technology and they are considered to be the modern diagnostic techniques, which enable to obtain full information about inner structure of tested materials. They provide data about changes in inner structure of material, usually evoked by technological processes during the material manufacturing or by deterioration effects appearing along the operation of device. Structural methods are for these reasons also able to determine the lifetime of tested materials.



Prof. Ing. Václav Mentlík, CSc., se narodil v roce 1939 v Plzni. V roce 1985 obhájil disertační práci Termické analýzy v diagnostice vysokonapěťových izolací na FEL ČVUT v Praze. 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 řadu projektů zaměřených do oblasti elektrotechnologie. Od roku 2005 je vedoucím řešitelem výzkumného záměru MŠMT České republiky MSM 4977751310 Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice pro období 2005 až 2010. 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.



Ing. Radek Polanský, Ph.D., se narodil v roce 1978 v Plzni. V roce 2002 úspěšně dokončil magisterské studium na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Tamtéž v roce 2005 obhájil doktorskou práci na téma Moderní diagnostika vysokoteplotních izolantů. Od roku 2004 působí jako odborný asistent v oddělení elektrotechnologie. Oblastí jeho odborného zájmu je aplikace strukturálních analýz v elektrotechnologické diagnostice, studium korelace výsledků strukturálních a fenomenologických metod elektrotechnologické diagnostiky, diagnostika a vývoj nových izolačních materiálů a systémů pro elektrotechniku, studium procesů stárnutí izolačních materiálů, studium kinetiky reakcí (analýza aktivační energie, rychlosti a řádu reakcí). Od roku 2005 je spoluřešitelem výzkumného záměru MŠMT České republiky MSM 4977751310 Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice pro období 2005 až 2010.

- ká univerzita, 2005, s. 381–384, ISBN 80-7043-368-2.
- [6] POLANSKÝ, R.: *Strukturální změny v polyetyleny vyvolané jeho tepelným rozpadem*. In: Zborník medzinárodnej konferencie Elektrotechnológia 2007, Košice, FEI TU, 2007, s. 118–121, ISBN 978-80-8073-834-1.
- [7] MENTLÍK, V. – POLANSKÝ, R. – PROSR, P. – PIHERA, J.: *Behaviour of Poly (ethylene: Vinyl Acetate) and Polyether Urethane-Urea during Thermal Decomposition*. In: Proceedings of the 2007 IEEE International conference on solid dielectrics, S. 1.: IEEE, 2007, s. 333–336, ISBN 1-4244-0750-8.
- [8] PROSR, P. – PIHERA, J. – POLANSKÝ, R. – TRNKA, P.: *FT-IR spektroskopie rozkladových plynů izolačních kapalin*. In: Diagnostika 2007, Plzeň, Západočeská univerzita, 2007, s. 283–286, ISBN 978-80-7043-557-1.
- [9] WENDLANDT, W. W.: *Thermal Analysis*. 3rd edition, John Wiley & Sons Ltd., USA, 1985, 421 s.
- [10] HARNISH, R. S.: *Thermal Properties of Selected Channel Compounds*. Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, 1997, 145 s.
- [11] SPEYER, R. F.: *Thermal analysis of materials*. Marcel Dekker, Inc., New York, 1994, 298 s.
- [12] TRCHOVÁ, M.: *Jak vibrují atomy v molekulách*. Otevřená věda, Praktické kurzy z fyziky a chemie, (s. l.), (s. n.), 2006 (cit. 2007-09-19), <http://www.otevrena-veda.cz/ov/index.php?p=kurzy>
- [13] *Linear variable differential transformer* (online). 2007 (cit. 2007-09-06, http://en.wikipedia.org/wiki/Linear_variable_differential_transformer)
- [14] Kolektiv autorů: *Rentgenová spektrometrie*. In: Sborník přednášek, 2 THETA, Český Tešín, 1997.
- [15] WILLARD, H. H. – MERRITT, Jr, L. L. – DEAN, J. A. – SETTLE, Jr, F. A.: *Instrumental Methods of Analysis*. Wadsworth Publishing Company. Belmont California, 7th edition, by Wadsworth Inc., USA, 1988.