

Prehľad diagnostiky transformátorov v teréne vzhľadom na analýzu ich vlhkosti a nadprúdov

doc. Ing. Miroslav Gutten, PhD., doc. Ing. Milan Šimko, PhD., doc. Ing. Milan Chupáč, PhD.,
Žilinská univerzita v Žiline, Katedra merania a aplikovanej elektrotechniky

Úvod

Prevádzkovanie rôznych energetických zariadení prináša stále väčšie nároky na spoľahlivosť týchto zariadení vzhľadom k tomu, že okrem technicko-prevádzkových aspektov sa dostávajú do popredia aj aspekty ekonomicke. Rentabilnosť takéhoto zariadenia je možná len vtedy, ak je zariadenie čo najmenej poruchové. Z tohto hľadiska patria výkonné transformátory medzi kľúčové zariadenia elektroenergetických sústav. Detekcia možných porúch už v počiatočnom štádiu i v teréne podstatne znižuje náklady spojené s opravami po vzniku poruchy.

Prax potvrdzuje, že je potrebné vykonávať diagnostiku nielen na veľkých blokových transformátoroch 440 (220) kV, ale aj na distribučných 110 kV. Okrem vplývajúcich poruchových stavov siete (napr. skrat, nesymetrie, prúdové preťaženie, prepätie apod.) pôsobí na celkové poškodenie týchto transformátorov aj ich aktuálny stav izolačných hladín (napr. stav zostarnutia oleja, izolácie vinutia, príchodiek, stav vlhkosti apod.).

V prípade, že by sa dal vopred určiť vhodnou diagnostikou v teréne zhoršený stav kvality vinutia alebo izolácie dôsledkom nadprúdov, príp. vlhkosti, je možné pred samotnou závažnou poruchou takýto transformátor poslať na predčasnú podrobnú kontrolu. Bežne používané diagnostické metódy kladú požiadavky, ktoré zohľadňujú nutnosť krátkodobého odstavenia zariadení z prevádzky (neodporúča sa používať časovo náročné metódy) ako i minimalizáciu počtu operácií, nutných na prípravu stroja k samotnému meraniu.

1. Analýza vlhkosti olejových transformátorov

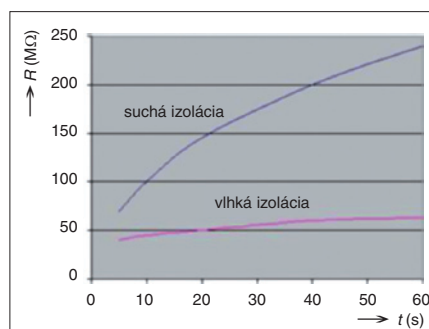
Kvalitný stav novej izolácie sa v prevádzke môže zhoršovať napr. znečistením povrchu izolátorov a izolácií, ich navlhnutím, starnutím apod. Ak sa včas neurobia opatrenia na zamedzenie zhoršovania, dospeje sa do toho štádia, ktoré sa prejaví ako poškodenie izolácie, čo spravidla vyradí celé elektrické zariadenie z prevádzky. Pri dôležitých elektrických zariadeniach, ako sú napr. prenosové transformátory, každý krátkodobý okamih vyradenia z prevádzky znamená veľké národohospodárske škody. Preto je nesmierne dôležité pravidelne kontrolovať stav izolácií. Prítomnosť vody v olejovom transformátore má napr. za násle-

dok zhoršovanie stavu izolácie, dôsledkom čoho vzniká akútne nebezpečenstvo tepelnej poruchy pevnej izolácie. Dielektrické zohrievanie môže byť totiž tak vysoké, že teplotný nárast sa stáva nekontrolovateľným a transformátor sa stáva nebezpečným pre svoje okolie i samotnú prevádzku.

1.1 Analýza vlhkosti meraním izolačného odporu

Pomerne najstaršou a najjednoduchšou metódou na zisťovanie stavu izolácií je meranie izolačného odporu. Hlavnou nevýhodou tejto metódy je, že izolačný odpor nezávisí len od stavu izolácie, ale aj od jej druhu a rozmerov. Z tohto dôvodu stav izolácie elektrického zariadenia je možné podľa hodnoty izolačného odporu posúdiť len vtedy, ak už máme predchádzajúce skúsenosti s rovnakou izoláciou v rovnakom zariadení. Ďalšou nevýhodou tejto metódy je, že síce ukáže i malé miestne zhoršenie izolácie v prípade, pokiaľ toto prechádza naprieč izolačnou vrstvou napr. olej-papier, avšak nedokáže identifikovať, či je zhoršenie na strane papiera, alebo oleja.

Pri tejto metóde sa navyše využíva poznatok, že zmena stavu sa prejavuje zmenou časovej závislosti prúdu tečúceho izoláciou



Obr. 1. Typické priebehy izolačného odporu v závislosti od času

pri jednosmernom napätí. Prúd tečúci izoláciou je tvorený s časom klesajúcou absorpčnou zložkou ako i ustálenou zložkou. S rastúcim obsahom vlhkosti v izolácii podstatne vzrastá ustálená zložka prúdu ako absorpčná. Absorpčná zložka prúdu sa tak menej uplatňuje na charaktere časovej závislosti prúdu i odporu, ktorá sa tak pri zvýšenej vlhkosti sploštuje (obr. 1).

Pre využitie tohto poznatku na zisťovanie stavu izolácie netreba stanovovať celú časovú závislosť prúdu, ale stačí určiť hodnoty prúdu (odporu) v dvoch rôznych časoch od pripojenia jednosmerného napätia. Na charakterizovanie stavu izolácie je vhodný podiel týchto dvoch hodnôt nazývaný ako polarizačný index p_i (pretože je to bezrozmerná veličina, nezávisí od rozmerov izolácie). Na základe normy sa v USA meria polarizačný index po 1 a 10 min, naproti tomu v EÚ sa meria po



Obr. 2. Merač izolačného odporu Megger MIT510 (5 kV)

15 a 60 s pri skúšobnom napätí 2 500 V. Merač izolačného odporu Megger, ktorý využíva americkú, ako aj európsku normu merania izolačného odporu a polarizačného indexu je znázornený na obr. 2.

Zmeny hodnoty polarizačného indexu sú najlepšie vidieť, ak ho vyjadríme pomocou oboch zložiek prúdu, absorpčnej i_a a ustálenej i_∞ :

$$p_i = \frac{R_{60}}{R_{15}} = \frac{i_{a15} + i_\infty}{i_{a60} + i_\infty} \quad (1)$$

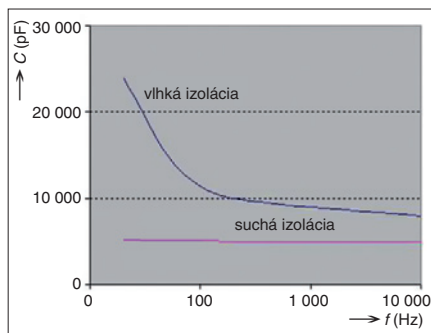
Pri vlhkej a znečistenej izolácii prevažuje zložka i_∞ , preto čitateľ i menovateľ majú hodnoty len málo sa líšiace, takže ich podiel je blízky číslu 1. Naopak pri suchej a čistej izolácii v dobrom stave je ustálený prúd malý, uplatní sa silne časovo závislá zložka i_a , takže hodnota zlomku je oveľa väčšia ako 1. Absorpčný činiteľ nových transformátorov pred uvedením do prevádzky má byť minimálne 1,3 – obvykle sa pohybuje medzi hodnotami 1,7 až 1,8.

Ďalšou výhodou polarizačného indexu voči izolačnému odporu je oveľa menšia závislosť od teploty, takže nie je potrebné tak presne dodržiavať určitú teplotu pri meraniach, ako je to pri izolačnom odpore. Po-

čas jedného merania sa však teplota nesmie meniť. Ďalej je dôležité, aby izolácia transformátora bola pred meraním vybitá, t.j. bez napätia. Preto je potrebné na nejaký čas pred meraním spojiť vinutie s kostrou (z hľadiska bezpečnosti je treba po skúške izoláciu vybiť), taktiež pri meraní majú byť odpojené vedľajšie zariadenia.

1.2 Analýza vlhkosti meraním stratového činiteľa a kapacity

Meranie stratového činiteľa $\tan \delta$ a kapacity vinutí slúži k dopĺňajúcemu ohodnoteniu dosiahnutého stupňa izolácie vcelku alebo v jej častiach. Stratový činiteľ indikuje prítomnosť polárnych a iónových zložiek v oleji, a teda reaguje na starnutie oleja. Teplotná závislosť $\tan \delta$ môže odhaliť prítomnosť cudzích rozpustných látok v oleji, ako aj reaguje na stu-



Obr. 3. Závislosť kapacity od frekvencie pri suchej a vlhkej izolácii

peň vlhkosti. Stratový činiteľ závisí len od druhu izolačného materiálu, a nie od rozmerov a spôsobu jeho použitia, pričom je necitlivý na miestne zhoršenie izolácie.

Ďalšou metódou (obr. 3) na posúdenie vlhkosti je sledovanie frekvenčnej závislosti kapacity do 10 kHz. V tomto prípade sa jedná o tzv. dielektrickú spektroskopiu, kde jej princípom je sledovanie odozvy (polarizácie) častíc na základe zmeny frekvencie v širokom pásme.

Vo vlhkej izolácii je absorpčný prúd prekrytý oveľa väčším od frekvencie nezávislým zvodovým prúdom. Stav izolácie je možné teda posudzovať podľa pomeru kapacít meraných pri dvoch rôznych frekvenciách. Obvykle sa používa na kontrolu vlhkosti izolácie transformátorov triedy A meranie kapacity pri frekvencii 2 a 50 Hz. Hodnoty pomeru C_2/C_{50} sa pohybujú pred sušením medzi 1,3 až 2,3 – po sušení klesnú pod hodnotu 1,2.

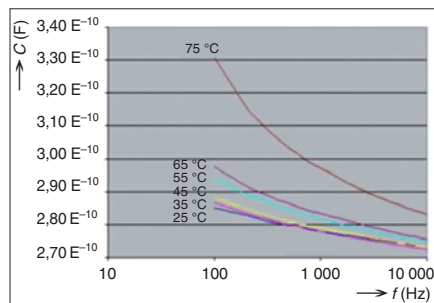
Rýchlosť absorpčných procesov (obr. 4) charakterizovaná ich časovými konštantami sa zo stúpajúcou teplotou zväčšuje (nárast kapacity). Meraním pri dvoch rôznych teplotách je možné duálne získať rovnakú informáciu ako meraním pri dvoch rôznych frekvenciách. V oboch prípadoch sa mení pomer rýchlosti zmeny napätia, pri ktorom sa meria, ku rýchlosti zmien rozloženia absorpčných nábojov.

Metóda sa zakladá na stanovení pomeru:

$$\frac{C_{75} - C_{20}}{C_{20}} \quad (2)$$

kde

C_{20} a C_{75} (príp. C_{80}) sú kapacity pri 20 a 75 °C (príp. 80 °C).



Obr. 4. Namerané experimentálne krivky kapacity v závislosti od frekvencie pri rôznych teplotách oleja transformátora

Vzhľadom na svoje experimentálne nevýhody v teréne (pretože sa musí meniť teplota v oleji) bola táto metóda nahradená metódou opierajúca sa o určenie pomeru C_2/C_{50} .

Prístroj IDAX-206, ktorý funguje na princípe dielektrickej spektroskopie, t.j. meraním stratového činiteľa, kapacity a permitivity



Obr. 5. Prístroj IDAX-206

vity v závislosti od frekvencie 1 kHz až 0,0001 Hz pri sínusovom napájaní o efektívnom napätí 140 V je znázornený na obr. 5. Jeho aplikácia na transformátoroch spočíva v podpore štandardizovaných meraní v zapojení GST a UST (ground i gard). Prednosťou prístroja je možnosť reálnej tepelnej kompenzácie nameraných hodnôt spomínaných dielektrických parametrov [6]. Aplikácia určená výhradne pre transformátory je určenie obsahu vody (hmotnostne) priamo v papierovej izolácii, bez ohľadu na teplotu transformátora (metóda nevyužíva prepočet cez olej).

2. Analýza nadprúdov výkonových transformátorov

Nadprúd je zvýšenie normálneho prevádzkového prúdu nad požadovanú hodnotu, majúci obyčajne za následok vznik nebezpečných stavov, ktoré vyžadujú dostatoč-

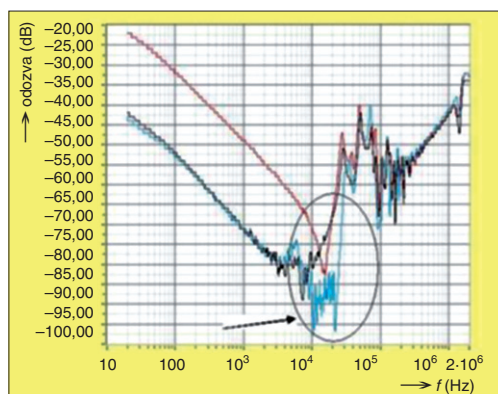
ne rýchle samočinné odpojenie od zdroja napätia pri dosiahnutí daných kritických podmienok. Nadprúdy poznáme dvojakého druhu, a to nadprúd charakteru prúdového preťaženia a nadprúd charakteru skratového prúdu.

Vinutia výkonových transformátorov musia byť navrhnuté tak, aby pri pôsobení takýchto nadprúdov, ktoré sa môžu v prevádzke vyskytnúť, nevzniklo na nich poškodenie alebo deformácia mechanického či tepelného charakteru. Okrem trvalo deformačných následkov nadprúdov dochádza aj pri správnom dimenzovaní elektrického zariadenia k postupnému starnutiu, ktoré môže zhoršiť jeho mechanické vlastnosti. Predovšetkým pri transformátoroch s prirodzeným chladením je zvlášť potrebné zamedziť nepredvídanej poruche počas prevádzky. Z tohto dôvodu je dôležité zvoliť vhodnú diagnostiku, ktorá by predvídala takýto stav.

2.1 Analýza účinkov skratových prúdov na transformátore metódou SFRA

Priamou príčinou vzniku síl pôsobiacich na vinutia je pôsobenie magnetického poľa na vodiče pretekané prúdom. V prípade vinutí transformátora je to pole rozptyľového toku. Pri normálnom chode, keď prúdy v transformátore neprekračujú menovitú hodnotu, sú sily pôsobiace na vinutia všeobecne malé. Naproti tomu pri skratoch, keď prúdy dosahujú veľkosti mnohonásobku menovitých hodnôt, môžu sa tieto sily stať veľmi nebezpečné pre vinutia i upevňujúce konštrukcie.

V súčasnosti je už spracovaná metodika experimentálneho merania a diagnostikovania samotných účinkov skratových prúdov – porovnávaním grafických závislostí pomocou rozmietavej frekvenčnej analýzy odoziev



Obr. 6. Zistenie medzizávitového skratu na primárnom vinutí transformátora (poškodená fáza A)

(SFRA – Sweep Frequency Response Analysis) transformátorov. Pomocou tejto metódy (obr. 6) je možné určiť najdôveryhodnejší obraz o účinkoch skratových prúdov na vinutiach transformátora počas prevádzkového stavu (príklad zistenia medzizávitového skratu).

Power transformers are key equipment for transfer and distribution of the electric power. Considering the significance of the power transformers in the electric system, their price and possible damages occurred by accidents, it is necessary to pay attention to their higher prevention. To prevent failure states of transformers, we perform different types of measurements. They shall illustrate a momentary state of the measured equipment and if necessary to draw attention in advance to changes of parameters, which have specific relationship to no-failure operation of the equipment.

Metódu vysokofrekvenčnej analýzy SFRA radíme k metódam bezdemontážnej diagnostiky transformátorov. Pri meraní sa nerobí žiaden zásah do konštrukcie meraného stroja, je prevedená pri odpojenom stroji, čiže nie je pod napätím.

Pomocou tejto metódy sa zisťujú odozvy transformátorov v časovej alebo frekvenčnej oblasti [6]. Meranie odozvy časovej oblasti znamená zistenie časového priebehu odozvy na určitý impulz napätia privedený na vstup



Obr. 7. Meracie systémy DOBLE M5100 a FRAX-101

vinutí. Meranie odozvy vo frekvenčnej oblasti spočíva v zistení amplitúdy (popr. i fázy) odozvy na harmonické napätie premennej frekvencie privádzané na vstup vinutia. Zatiaľ čo odozva zistená v časovej oblasti je záznamom časového priebehu napätia, odozva zistená vo frekvenčnej oblasti je závislosť amplitúdy odozvy na frekvenciu.

Metóda SFRA je aplikovateľná pri určovaní a meraní transformátorov ihneď po výrobe, teda slúži na meranie referenčných hodnôt, podľa ktorých sa bude následne vykonávať porovnávanie údajov s inými meraniami uskutočnenými na danom transformátore počas odstávky prevádzky transformátora, po poruche a po následnej oprave, príp. revízií.

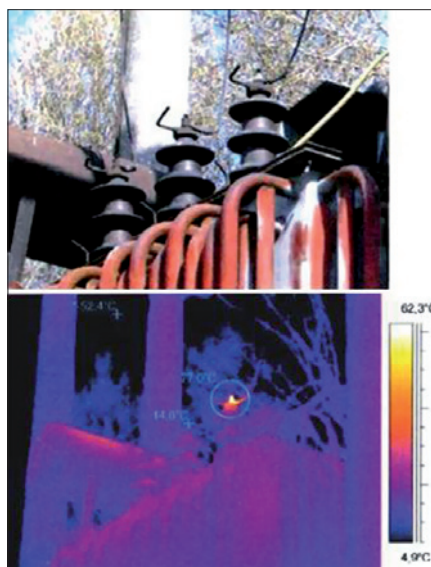
Meracie systémy od rôznych výrobcov, ktoré analyzujú transformátor na princípe SFRA sú znázornené na obr. 7. Frekvenčný rozsah u oboch prístrojov s ohľadom na okolité rušenia je vedený v zaručovaných minimálnych rozmedziach 20 Hz až 2 MHz.

Priebehy namerané takýmito meracími systémami môžu slúžiť u nového transformátora ako referenčné a potrebné k porovnávaniu po jeho dlhšom prevádzkovom čase. Taktiež k porovnaniu testov uskutočnených po havárii transformátora (alebo po *n*-skratoch), po oprave a ako diagnostický test, pokiaľ vibračné snímače indikujú potenciálny problém v transformátore.

2.2 Prínos termovízie v diagnostike transformátorov

Meranie teploty dotykovými (invazívnymi) metódami je v mnohých prípadoch veľmi obtiažne a z prevádzkových a bezpečnostných dôvodov až nemožné. Z toho dôvodu je potrebné sa zamerať na meracie zariadenia a spôsoby merania teploty, ktoré nevyžadujú priamy kontakt s meranými zariadeniami. Diagnostické zariadenia, ktoré spĺňajú tieto podmienky sú založené na snímaní vyžarovanej infračervenej energie. Infračervená technika teda nachádza uplatnenie všade tam, kde taká fyzikálna veličina, ako je teplota, signalizuje technický stav daného zariadenia alebo niektorej jeho časti.

Infračervená termografia je bezdotykový (neinvazívny) spôsob merania rozloženia teploty na povrchu snímaného objektu v infračervenej oblasti (1 až 13 μm) elektromagne-



Obr. 8. Zistenie nadmerného oteplenia na spoji v priechodke (reálny a tepelný obraz)

tického spektra. Infračervené merania sa dajú realizovať rýchlo a ekonomicky s minimálnou potrebou času a pracovných síl, pretože nevyžadujú žiadne úpravy alebo vypínanie meraných zariadení. Pri kontrole transformátorov sa termovízná technika používa ku zisteniu, či nedochádza k nadmernému otepleniu jeho určitých častí (obr. 9), ale tiež

Doc. Ing. Miroslav Gutten, PhD., sa na-



rodil 3. 2. 1972 v Žiline. V roku 1997 absolvoval štúdium na Elektrotechnickej fakulte Žilinskej univerzity, v roku 2002 obhájil dizertačnú prácu (PhD.) a v roku 2007 sa habilitoval v odbore silnoprúdová elektrotechnika. Od roku 1999 pôsobí ako vysokoškolský učiteľ na katedre merania a aplikovanej elektrotechniky Žilinskej univerzity v Žiline. V rámci vedeckej činnosti spolupracuje na vývoji niekoľkých meracích a diagnostických systémov transformátorov v SR a ČR. V súčasnosti participuje na projektoch zamerané na diagnostiku a meranie elektroenergetických zariadení vzhľadom na účinky skratových prúdov a aktívne sa podieľa na ich realizácii.

Doc. Ing. Milan Šimko PhD., absolvoval

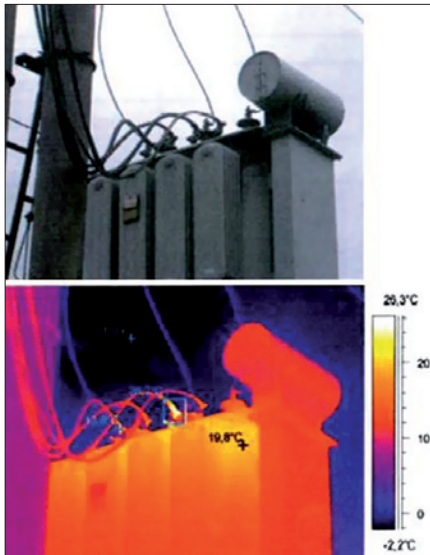


štúdium na Elektrotechnickej fakulte Žilinskej univerzity v roku 1983 v odbore technická prevádzka telekomunikácií. Titul kandidát technických vied získal v roku 1991 a habilitoval sa v odbore teoretická elektrotechnika v roku 2007. Od roku 1984 pracuje ako pedagóg na Žilinskej univerzite v Žiline. V priebehu svojho pôsobenia na katedre merania a aplikovanej elektrotechniky sa venoval teórii elektromagnetického poľa, konkrétne šírení elektromagnetických vln a ich interakcii s prostredím. V súčasnosti svoju činnosť zameriava v rámci riešenia projektov na oblasť diagnostiky energetických ako i telekomunikačných zariadení.

Doc. Ing. Milan Chupáč PhD.,



absolvoval štúdium na Elektrotechnickej fakulte Žilinskej univerzity v roku 1983 v odbore technická prevádzka telekomunikácií. Titul PhD. získal v roku 2002 a v roku 2007 sa habilitoval v odbore telekomunikácie. Momentálne pôsobí ako docent na Žilinskej univerzite, katedra merania a aplikovanej elektrotechniky. Svoju odbornú činnosť zameriava hlavne v oblasti termodiagnostiky anténových systémov rozhlasových vysielačov. V súčasnej dobe sa venuje novo otvorenému učebnému odboru autoelektrotechnika.



Obr. 9. Reálny a tepelný obraz nádoby olejového transformátora

ku kontrolám priechodky transformátora, rozloženie teplotného poľa na nádobách olejových transformátorov (obr. 9) apod.

3. Záver

Na záver treba pripomenúť, že existuje celý rad diagnostických či monitorovacích meracích metód, ktoré sa v súčasnosti bežne používajú, najmä u dôležitých elektroenergetických blokových transformátoroch. Najmä monitorovacie systémy dokážu odhaliť slabé miesta v izolačnej sústave transformátora, a stanoviť tak stupeň postupného znehodnocovania tejto sústavy ako celku. My sme si vybrali len niektoré diagnostické metódy, ktoré sú možné použiť bežne v teréne pri odstavkách alebo aj počas prevádzky (termovízia).

Spojením termovízie, metódy SFRA, dielektrickej spektroskopie a meraním izolačného odporu sa tak vytvárajú veľmi dobré podmienky pre realizáciu kvalitnej a bezdemonštranej diagnostiky týchto strojov.

Príspevok v tomto článku je súčasťou riešenia projektu VEGA: 1/0548/09 – Diagnostika výkonových transformátorov vzhľadom na účinky skratových prúdov a nadprúdov a 1/0007/09 – Termodiagnostika anténových vysielateľov.

Literatúra:

- [1] Artbauer J. – Šedovič J. – Adamec V.: *Izolanty a izolácie*. ALFA, Bratislava, 1969.
- [2] Gutten M. – Kúdelčík J.: *Vplyv vlhkosti transformátora na jeho bezpečnosť a spoľahlivosť*. In ELDICOM 09, Žilina, 2009.
- [3] Gutten M. – Šimko M. – Michalík J.: *Monitoring of power transformers with thermovision utilization*. Proceedings Measurement 2005, 5th International Conference on Measurement, p. 497–500, Smolenice, Slovensko, 2005.
- [4] Gutten M. – Brandt M. – Polanský R. – Prosr P.: *High-frequency analysis of three-winding autotransformers 400/121/34 kV*. Advances in Electrical and Electronic Engineering, Žilina, No. 1–2, 7/2008.
- [5] Kvasnička V. – Procházka R. – Velek J.: *Verification of method frequency characteristics in control room of distribution system Czech Republic*. In Diagnostika 05, Plzeň 2005, Česká republika.
- [6] <http://www.tmvss.cz/Aplikace/Diagnostika-TRF.html>
- [7] http://www.doble.com/products/sweep_frequency_response_analysis.html
- [8] <http://www.encentrum.cz/>
- [9] http://mitchellinstrument.com/images/D/MEGGER_MIT5101.jpg
- [10] <http://www.els.webzdarma.cz/nadprud.html>

Technický týdeník

Pojďte s námi do světa průmyslu a nových technologií

www.techtydenik.cz

CELOSTÁTNÍ NEZÁVISLÝ LIST PRO VÝZKUM, VÝVOJ A PRŮMYŠLOVOU PRAXI

Technický týdeník

Cena: 50 Kč, předplatné 34 Kč
Slovensko: předplatné 49 \$/1,53 €
ročník 57 • 13. 1. 2009 č. 1

Stále aktuální technické zpravodajství na www.techtydenik.cz

Elmarco má nové vývojové centrum
Česká společnost Elmarco, která je v současnosti v procesu vývoje nového výrobku, otevřela své nové vývojové centrum v Praze. Až do konce roku 2009 se bude zabývat vývojem nových produktů. Až do konce roku 2009 se bude zabývat vývojem nových produktů. Až do konce roku 2009 se bude zabývat vývojem nových produktů.

Letos se otevře 53 km nových dálnic
V Česku začíná rok dálnic. Letos si začne otevřít přes 53 km nových dálnic. V Česku začíná rok dálnic. Letos si začne otevřít přes 53 km nových dálnic. V Česku začíná rok dálnic. Letos si začne otevřít přes 53 km nových dálnic.

Co čeká české strojírenství v roce 2009
Strojírenství v Česku čeká v roce 2009 výzvy. Strojírenství v Česku čeká v roce 2009 výzvy. Strojírenství v Česku čeká v roce 2009 výzvy. Strojírenství v Česku čeká v roce 2009 výzvy.

Regulace deregulace, nejdříve před 10 lety
I tak se v Česku EU a musí posílit. Regulace deregulace, nejdříve před 10 lety. I tak se v Česku EU a musí posílit. Regulace deregulace, nejdříve před 10 lety. I tak se v Česku EU a musí posílit.

Vaše zpráva pro web Technického týdeníku bude bleskově zařazena a předána 38 000 návštěvníků/měsíc: www.techtydenik.cz

ČR i celou Evropu trápí vraky aut
V České republice i v celé Evropě se stále nachází vraky aut. V České republice i v celé Evropě se stále nachází vraky aut. V České republice i v celé Evropě se stále nachází vraky aut.

Dotykové displeje vítězí
Dotykové displeje se stávají stále více oblíbenými. Dotykové displeje se stávají stále více oblíbenými. Dotykové displeje se stávají stále více oblíbenými.

17 kamionů nábytku z Krouny pro rakouské policisty
Výrobce nábytku z Krouny, společnost Krounský nábytek, dodala 17 kamionů nábytku pro rakouské policisty. Výrobce nábytku z Krouny, společnost Krounský nábytek, dodala 17 kamionů nábytku pro rakouské policisty.