

Zajišťování kvality přesných elektronických měření

doc. Ing. Jiří Horský, CSc.,
Dr. Ing. Pavel Horský

Elektronická měření pronikají do všech oblastí techniky. Kvalita měření je charakterizována jeho nejistotou, která má odpovídat zamyšlenému účelu měření. Snižování nejistoty vyvolává exponenciální nárůst nákladů na měření. Proto je požadováno, aby nejistota měření byla taková, jaká postačuje uvažovanému použití. Kvalita měření znamená, že nejistota měření není větší než deklarovaná. Důležité je, aby deklarované nejistoty laboratoře bylo skutečně dosahováno a aby byla přiměřená účelu měření. Článek se zaměří i na kvalitu měření především v kalibračních laboratořích elektrických a elektronických veličin, kde jsou požadavky na dosaženou nejistotu větší než ve většině provozních měření, a proto je nutné věnovat i větší pozornost všem souvislostem.

Obecné požadavky

Návaznost měření tvoří základní vertikálu metrologického systému a je jeho nejdůležitější částí. Vede z navazované laboratoře, přes metrologické organizace s lepší přesností měření až k národním etalonům.

Interní procesy laboratořích, které se používají k zabezpečení jakosti laboratoře, mají mnoho dílčích složek. Základní zásady pro zajišťování jakosti měření jsou shodné pro všechny obory měření, nezávisle na měřené veličině. Byly postupně formulovány v různých učebnicích, zákonných předpisech (především pro oblast legální metrologie) a technických normách. Z těchto zásad vznikl systém požadavků pro kalibrační laboratoře formulovaný do normy ISO/IEC 17025. Základem pro práci kalibrační laboratoře jsou:

- pracovníci,
- zařízení,
- prostory,
- prostředí,
- pracovní postupy.

Pracovníci

Na znalostech a zkušenostech pracovníků záleží využitelnost parametrů zařízení. Na jejich vzdělání jsou kladeny vysoké požadavky a vzdělání musí být periodicky aktualizováno. Vzdělávání je největší problém, protože specializovaná škola v podstatě neexistuje a předávání zkušeností mezi laboratořemi není rozšířené, protože laboratoře si konkurují, a mají proto potřebu tajit svoje know-how.

Zařízení

Zařízení je určující pro dosažitelné možnosti laboratoře. Využití schopnosti zařízení znamená soustavně sledovat jeho parametry. U jednohodnotových kvalitních etalonů (etalony napětí, odporu) je po počátečním stárnutí pozorovatelný předvídatelný posun hodnoty, který obvykle lze pro období mezi kalibracemi proložit přímkou. U složitých přístrojů je taková předpověď obtížná, protože změny mají v různých částech rozsahů

různý charakter. Zde se sleduje, zda má dlouhodobá změna hodnoty charakter šumu okolo správné hodnoty.

Údržba stejnosměrných (ss) a nízkofrekvenčních (nf) elektronických zařízení je poměrně jednoduchá. Jde především o péči o čistotu jak konektorů a svorek, tak i celého přístroje. To znamená např. pravidelné čištění filtrů přístrojů s ventilátory. V kartě etalonu má být vyznačeno vše, co ho charakterizuje. U oprav je třeba popsat, co byla vada a jak byla opravena. Často chybí záznamy o rozsahu a uložení průvodní dokumentace. To vede ke ztrátám této dokumentace a přístroj bez dokumentace ztrácí velkou část své hodnoty.

Prostory

Prostory jsou pro měření velmi důležité. Kalibrační laboratoř by pokud možno neměla být ovlivňována vnějším prostředím již svou stavební konstrukcí. Z tohoto pohledu je optimální suterénní umístění nebo vestavěná místnost uvnitř budovy. V žádném případě by laboratoř neměla mít okna nebo stěnu směrem k jihu. Okna k severu a severovýchodu, jsou-li dobře utěsněna, umožňují využívat denní osvětlení. Laboratoř by měla být v klidné části budovy a z hlediska vibrací pro velmi citlivá měření není vhodné umístění ve vyšších podlažích. Klimatizační systém musí zajistit dostatečné proudění a výměnu vzduchu v laboratoři. Tato otázka je velmi důležitá a je často podceňována. Dobře navržený systém zajistí rovnoměrnou cirkulaci vzduchu bez jeho vrstvení do různých teplých vrstev a sníží teplotní gradienty uvnitř laboratoře. Proudění vzduchu je ovlivněno rozložením přístrojů a teplem generovaným zařízením a osobami přítomnými v laboratoři. V obvyklé laboratoři je důležité udržení požadované teploty ve výšce mezi 1 a 1,5 m nad podlahou a odvedení tepla vznikajícího v zařízeních s větším příkonem tak, aby nebylo narušeno teplotní pole v laboratoři. Požadováno je mírné proudění vzduchu. Důležitá je také částečná výměna vzduchu s vnějším prostředím.

Sledování a dokumentování teploty v laboratoři je kontrolováno ve všech systémech

kvality. Je důležité, aby teploměr, pomocí něhož se sledování vykonává, byl umístěn na vhodném místě laboratoře. Nemá být ani u okna či u dveří, ani v blízkosti zdrojů tepla. Nejobjektivnější je používat elektronické měřiče pracující automaticky s pamětí měřených hodnot. Ty umožní dokumentovat prokazatelným a přehledným způsobem pomocí grafu průběh teploty v laboratoři za sledované období.

V každé laboratoři jsou teplotní gradienty. Proto je u přesných měření třeba měřit teplotu přímo na měřeném prvku, např. etalonu kapacity nebo odporu. V některých novějších elektronických přístrojích, jako je např. multimetr HP 3458A, je vestavěn teploměr umožňující sledovat teplotu uvnitř přístroje. Ta je většinou podstatně vyšší než teplota okolí, např. 35 °C. Díky sledování vnitřní teploty je možné porovnat, jak se tato teplota liší od teploty při kalibraci a jak se mění.

Vlhkost není u běžných elektrických měření kritická. Nesmí být velká při měření velkých odporů, velmi malá může způsobovat potíže se statickými náboji. Hermetizace velmi zpomalí vliv kolísání vlhkosti. Důležité jsou sezónní změny; v létě bývá vlhko, v zimě je vlhkost velmi malá. Atmosférický tlak se uplatňuje u nejpřesnějších měření. Vliv rušivých vysokofrekvenčních (vf) signálů stále roste a je velmi obtížné kvalifikovatelný a nesnadno potlačitelný. Kvalitní stínění laboratoře je velmi drahé.

Prostředí

Každé měřicí zařízení má vlastnosti závislé na okolních podmínkách. Rozlišují se tři základní druhy okolních podmínek. Jsou to okolní podmínky referenční, pracovní a skladovací. **Referenční podmínky** jsou takové, při kterých zařízení dosahuje nejlepších parametrů. V **pracovních podmínkách** se mohou parametry mírně zhoršit, ale zařízení musí pracovat spolehlivě. **Skladovací podmínky** nesmí ovlivnit vlastnosti zařízení po jeho opětovném uvedení do provozu. Zmínění druhy podmínek jsou definovány různými normami. Obvykle jsou referenční podmínky (23 ± 1) °C u starých přístrojů a (23 ± 5) °C u nových typů, pracovní podmínky u elektronických zařízení 5 až 40 °C, skladovací podmínky např. –20 až 70 °C.

V metrologii je snaha všechny etalony provozovat i skladovat pouze v referenčních podmínkách, aby změnami podmínek nebyla ovlivněna jejich dlouhodobá stabilita. Pro běžné provozy, jako je výroba, opravy apod., je přípustné rozšíření teplotního rozsahu na

(23 ± 5) °C. Elektrická měření jsou většinou méně citlivá na prostředí než měření fyzikální, mechanická a délková. Jsou méně citlivá na čistotu prostředí než optická a délková měření a od doby přechodu na elektronická zařízení při elektrických měřeních se snížila i citlivost na vibrace. Přesto však všechny metrologické laboratoře vyžadují speciální opatření a umístění k zajištění vhodného prostředí. Pro středí je třeba také sledovat a dokumentovat. Obvykle je sledována teplota, vlhkost a atmosférický tlak.

Pracovní postupy

Metodiky umožňují využít vlastností zařízení. Jejich význam roste. Je požadováno, aby byly zdokumentovány. Dříve byla metoda založena na zkušenosti a na návodu k přístroji, nyní je vyžadována písemná, dokumentovaná forma. Metodika má být validována a doplněna postupem pro výpočet nejistot. Nedostatkem velké většiny metodik vypracovaných laboratořemi v ČR byla jejich nekonkrétnost, citace mnoha nesouvisejících materiálů a opisování údajů společných pro více metodik, které je lépe umístit na jednom místě.

Konkrétní a stručné metodiky, zachycující potřebné údaje k provedení a vyhodnocení měření, vznikaly velmi těžko a dosud je má jen malá část laboratoř. Protože metodiky jsou know-how laboratoře, laboratoře je nepublikují a jejich úroveň závisí na úrovni laboratoře. Minimální úroveň akreditovaných postupů závisí na kvalitě a neústupnosti odborného posuzovatele.

Návaznost

Návaznost je základním požadavkem při měření. Poměrně jednoduchá je u jednohodnotových etalonů veličin široce používaných v praxi. Složitá může být u speciálních přístrojů majících mnoho funkcí, mnoho rozsahů a měřících málo obvyklé veličiny. Zde záleží na technické erudici kalibrační laboratoře, minimem by měla být kalibrace alespoň v rozsahu navazovaném výrobcem (raději však širším).

Další systémová opatření

Rozvoj systémů jakosti, požadavky na zvyšování přesnosti a cena kalibrací vyžadují tam, kde je to možné, zavádění doplňkových kontrol. Ty obvykle nejsou využívány k určení přesnosti, ale ke kontrole stability etalonů. Interní mezilhůtově porovnání se používá ke sledování stability etalonů laboratoře a může být uplatněno tehdy, má-li laboratoř k dispozici nejméně dva etalony porovnatelné přesnosti (tzn. takové, že odstup nejistot při kalibraci by byl menší než 1 : 3). Při těchto zkouškách je sledována stabilita porovnávaných etalonů. Jsou-li zaznamenány větší rozdíly, je nutné najít příčinu novou kalibrační etalonu. Porovnávat se tak mohou etalony po-

dobně přesnosti a z časové změny jejich ukázaných údajů lze uvažovat o stabilitě. Jinou možností jsou omezené kontroly vybranými stabilními prvky ve vybraných bodech. Jsou zaváděny měřicí systémy a vestavěná inteligence do přístrojů. Objevuje se automatizované zavádění korekcí a omezování etalonů potřebných ke kalibraci využitím metod autokalibrace (artifact kalibrace).

Speciální požadavky při měření elektrických veličin

Při měření elektronickými prostředky je třeba používat mnoho speciálních kabelů, vodičů a konektorů. Většina chyb při měření je způsobena jejich nesprávným stavem, poškozáním nebo korozí. Všechny propojovací vodiče musí být periodicky sledovány a kontrolovány a vadné a podezřelé vyřazovány. Jejich stav má vliv nejen na přesnost měření, ale v některých případech i na bezpečnost obsluhy. Zvláštní pozornost je nutné věnovat vysokofrekvenčním konektorům, kde je potřebná i kontrola mechanických rozměrů konektorů.

Některá elektrická zařízení, jako jsou dekady, děliče a některé mosty, obsahují mechanické přepínače. Dobrý stav těchto přepínačů je nezbytnou podmínkou práce uvedených zařízení. Proto jsou některé typy přístrojů konstruovány tak, aby bylo možné přepínače čistit a konzervovat.

Rušivé vlivy při měření signálů

Měření multimetry je relativně snadné a málo citlivé na různé rušivé vlivy. Při přesném měření však jejich vliv nelze zanedbat. Jde především o termální napětí, vliv rušivých polí, zemních smyček a šumu. Pochopení mechanismu vzniku těchto rušivých vlivů pomáhá jejich potlačení nebo odstranění.

Termonapětí

Termonapětí je nejčastější zdroj chyb při měření stejnosměrného napětí nízké úrovně. Toto napětí vzniká na styku dvou různých materiálů s různými teplotami. Jeho velikost záleží na druhu spojených materiálů a na rozdílu teplot obou stran těchto spojů v uzavřeném proudovém obvodu.

Nejčastěji jsou používány měděné vodiče. Termonapětí spoje dvou měděných vodičů je menší než 0,2 mV/°C. Je-li jeden z vodičů zoxidován, vzroste toto termonapětí až na neúnosně velkých 1 400 mV/°C. Proto musí být tam, kde je to možné, učiněna vhodná opatření, např. termonapětí mědi proti stříbru nebo zlatu je 0,3 mV/°C, mědi proti cínové pájce 1 až 3 mV/°C. Pájené spoje postačí v případě menších požadavků, nevýhodou postříbřených kontaktů je možnost jejich oxidace, zlatené vyhoví ve většině případů. Problémy jsou v pouzdření citlivých polovodičových obvodů, protože termonapětí mědi proti kovu je 40 až 75 mV/°C a mědi proti

křemíku 400 mV/°C. V tomto případě je jedinou možností dobrá teplotní vazba minimalizující teplotní rozdíly. Ta není problémem u vodivých materiálů; problematická je u izolátorů, které obvykle izolují elektricky i tepelně. Dobrou tepelnou vodivost vykazují z elektrických izolátorů elox na hliníku a berilliumoxid.

Magnetické vazby

Uzavřený obvod tvořený např. zemními spoji a síťovým zemněním působí jako rámová anténa. Indukují se do ní malá napětí, ale působí jako zdroj s malým vnitřním odporem. Jejich vliv je omezován zmenšením plochy antény, tzn. že se používají zkroucené nebo koaxiální vodiče. Citlivé obvody uvnitř přístrojů mohou být stíněny uzavřenými kryty z magneticky měkkého materiálu. Možnost vzniku smyček ze zemnicích vodičů je omezoována zemněním do jednoho centrálního zemního bodu a použitím, tam, kde je to možné, izolovaných napájecích zdrojů nebo baterií.

Bílý šum

Každý elektrický odpor je zdrojem šumu. Jeho velikost závisí na hodnotě odporu, teplotě a šířce pásma. Proto je snaha omezovat šířku pásma na nezbytně nutnou; nízkofrekvenční obvody jsou obvykle nízkooimpedanční. Snížení šumu snížením teploty se dosahuje jen velmi speciálními a velmi nákladnými opatřeními. Šum je problémem vždy při měření izolačních odporů.

Rušivé proudy

Při citlivých měřeních se mohou uplatnit rušivé proudy vlivem triboelektrického, piezoelektrického jevu, elektrochemických jevů a svodů. Triboelektrický proud vzniká působením nábojů vytvářených při mechanickém namáhání izolátorů, např. při ohýbání koaxiálního kabelu. Piezoelektrický proud vzniká mechanickým namáháním některých izolačních materiálů. Elektrochemické jevy nejčastěji vznikají na nedostatečně čistých deskách plošných spojů; ty je nutné po pájení pečlivě očistit, v jednodušších případech methyloalkoholem. Hodnota rušivého proudu špatně očištěného plošného spoje může být až 10 nA, při pečlivém očištění může klesnout až na asi 0,1 pA. U koaxiálního kabelu se může pohybovat od 10 nA až po jednotky fA (femto = 10^{-15}), podle čistoty a mechanického namáhání kabelu. Kvalitní materiály jsou teflon a keramika, jejichž proudy jsou pod 1 pA.

Rušivé vlivy při měření nf prvků

Rozhodující je teplota použitého etalonu. Teplota se měří kalibrovaným teploměrem s rozlišením alespoň 0,1 °C v místě kalibrace. Při měření je třeba respektovat nejistotu stanovení teploty a teplotní závislost etalonů.

Jestliže není změřena, lze orientačně předpokládat tyto maximální hodnoty:

- etalony odporů s kovovou fólií a drátové 3 ppm/°C,
- etalony odporů s kovovou vrstvou 100 ppm/°C
- etalony kapacity invarové plněné dusíkem 5 ppm/°C,
- etalony kapacity hliníkové, mosazné, izolace vzduch 50 ppm/°C,
- etalony kapacity slída, keramika NPO 35 ppm/°C,
- etalony kapacity fóliové, podle druhu fólie 200 ppm/°C.

Všechna měření autobalančních mostů RLCG jsou vykonávána po nastavení mostu při zapojeném zkratu a rozpojeném obvodu. Proto záleží na správném provedení etalonů pro tyto hodnoty, které má být řešeno v souvislosti s provedením etalonů pro ostatní hodnoty.

Zkrat při měření nf prvků

Zkrat (*short*) definuje nulu. Obvykle jsou propojeny svorky *Hi Drive* a *Lo Drive*, *Hi Sense* a *Lo Sense* a mezi těmito propojeními je zkratovací spojka. Jestliže není k dispozici speciální prvek, lze použít přípravek se dvěma koaxiálními spojkami tvaru písmene T a vsuvkou. Provedení referenčního zkratu při nastavení měřidla je často podceňováno, a tím se zhoršuje přesnost měření pro velmi malé hodnoty u počátku rozsahu.

Zkrat při měření ss a nf signálů

Bývá řešen podobně jako u prvků, část ale může být jednodušší, protože většinou nejsou používány koaxiální kabely. Zkratuji se proudové svorky, zkratují se napěťové svorky a mezi těmito zkraty se umístí propojka. Přípravky zkratu pro altimetry mají tvar plošného spoje tvaru H nebo drátové propojky tvaru U.

Rozpojený obvod (*open*) při měření nf prvků

Většina přístrojů vyžaduje, aby byly vzájemně spojeny svorky *Hi Drive* a *Hi Sense* a *Lo Drive* a *Lo Sense*. K propojení se použijí např. stíněné krátké kabely.

Připojení měřeného prvku

Dvousvorkové připojení – měřený prvek je připojen pouze svými dvěma svorkami. Obsahuje-li i stínění, je připojeno k jedné ze svorek, zpravidla k té, která je připojena ke zdroji měřicího signálu. Dvousvorkově se nejčastěji připojují etalony indukčnosti. Měřený prvek musí být co nejdále od zdrojů rušení a ovlivňujících veličin (kovových předmětů u měřených indukčností). Dvousvorkové připojení je nejvíce ovlivňováno okolím a je nejméně vhodné pro přesné měření.

Třísvorkové připojení – měřený prvek je umístěn ve stínícím krytu, který je připojen na třetí svorku. Používá se nejčastěji u etalonu kapacity malých a středních hodnot kapacity. Je vhodné pro měření středních a velkých hodnot impedance.

Čtyřpárové připojení – používaná zkratka 4TP (*Terminal Pair*), nejdůležitější a nejčastěji používané připojení měřené impedance k autobalančním mostům. Je vhodné pro nejširší rozsah měření impedancí ze všech uvedených zapojení. Měřený prvek je umístěn ve stínícím krytu a vyveden čtyřsvorkově na čtyři koaxiální kabely.

Etalony odporu

Pro měření při stejnosměrném signálu se používají drátové etalony, jejichž konstrukce se za posledních více než 50 let podstatně nezměnila. Pro měření při střídavém signálu nad 1 kHz je třeba věnovat pozornost provedení etalonu odporu. Optimální jsou etalony zhotovené z fóliových rezistorů nebo z rezistorů s kovovou vrstvou. Drátové rezistory jsou málo vhodné, ale je možné použít některé typy určené pro střídavý proud za předpokladu, že byly kalibrovány na pracovní frekvenci.

Etalony kapacity

Pro hodnoty kapacity do 1 000 pF se používají etalony se vzduchovým, výjimečně s keramickým dielektrikem. Pro vyšší hodnoty do 1 μF se používají etalony se slídovým dielektrikem nebo s keramikou typu NPO. Pro vyšší hodnoty je nutné zvolit pokovenou fólii. U těchto etalonů je nutné respektovat sníženou stabilitu a velkou frekvenční a teplotní závislost.

Etalony indukčnosti

Používají se etalony tvořené toroidními nebo válcovými cívkami.

Teplotní závislost indukčnosti záleží na provedení a materiálu jádra. Teplotní závislost sériového odporu je asi 0,4 %/°C.

Při kalibraci etalony indukčnosti s otevřeným polem (např. typ RFT 0187) nesmí být v blízkosti etalonu, tj. nejméně 60 cm, vodivé předměty a v laboratoři nesmí být zdroje rušivého magnetického pole. Přítomnost rušivého pole se nejsnáze odhalí změnou orientace (polohy) měřeného etalonu.

Je možné použít simulované etalony vytvořené z článku tvaru písmene T se dvěma rezistory v podélné větvi a kondenzátorem v příčné větvi.

Současná terminologie pro měření

Na závěr je ještě vhodné upozornit na problematiku vyjadřování. Odborná terminologie je základem pro dorozumění ve všech odvětvích vědy a techniky. Každý termín musí mít

pro všechny uživatele tentýž význam, musí být dobře definován a také nemůže být v rozporu s terminologií, kterou běžně používají pracovníci v daném oboru. Proto byla názvosloví věnována velká pozornost a mezinárodní slovník vznikl ve spolupráci mnoha odborníků z mezinárodních organizací: ISO, IEC, BIPM, IFCC, IUPAC, IUPAP a OIML. Slovník označovaný jako VIM, má již tři vydání. První vydání VIM z roku 1984 bylo přeloženo jako slovník RVHP (Rada vzájemné hospodářské pomoci, hospodářsko-politická organizace států pod vlivem SSSR), ale do praxe se u nás příliš nedostalo. Do nového a posledního vydání, VIM 3, bylo nově vloženo množství termínů převzatých z GUM, který byl zaveden do ČSN P ENV 13005 *Pokyn pro vyjádření nejistoty měření*. Ve slovníku VIM 2 z roku 1993 (tj. ČSN 01 0115) byl pouze základní termín a příslušná definice pro nejistotu měření. Návrh revize VIM 2 z roku 2004 popisoval nejistotový a chybový přístup samostatně a odděleně. Protože i teorie chybového přístupu byla dále velmi podrobně dopracována, převládá názor, že není třeba tyto dva přístupy chápat jako základně rozdílné. Do VIM 3 z roku 2008, který je po terminologické stránce nadřazen GUM, byly doplněny některé termíny. VIM 3, přestože byl vydán ve velmi široké mezinárodní spolupráci, se brzy dočkal dost rozsáhlé opravenky k VIM 3, viz JCGM 200:2008 *Corrigendum* z května 2010. (Opravy se ale v převážné většině případů týkají tiskových oprav poznámek a příkladů uvedených ve VIM 3, nikoliv termínů a definic. Kdyby tomu tak bylo, byla by vydána ne opravenka, ale změna VIM 3.)

Mezinárodní metrologický slovník – Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM 3, TNI 010115) je základní a nejdůležitější pramen ke sjednocení používaných pojmů pro všechny obory měření. Je přeložen z anglického originálu *International vocabulary of Metrology – Basic and general concepts and associated terms* (VIM 3), vydaného v roce 2008 (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP a OIML). Český překlad byl vydán také jako technická normalizační informace TNI 01 0115:2009. Pro praxi je velmi užitečné, že sborník terminologie v oblasti metrologie na webu ÚNMZ (viz <http://www.unmz.cz/urad/terminologie-v-metrologii>) neobsahuje jen slovník VIM 3, ale je doplněn i slovníkem z oblasti legální metrologie podle OIML. Pro podrobnější oborové názvosloví tento materiál doplňují další názvoslovné dokumenty, z nichž se VIM 3 jmenovitě odkazuje na *Mezinárodní elektrotechnický slovník* Electropedia (IEV). On-line elektrotechnický slovník IEV je volně k dispozici na <http://www.electropedia.org/Electropedia> (také známý jako IEV On-line). Tento slovník je nejvíce komplexní elektronická terminologická databáze, obsahující více než 20 000 pojmů a definic v angličtině a francouzštině s překlady do jiných jazyků, jako je arabština, čínština, němčina, italština, japonština,

portugalština, polština, ruština, španělština a švédština. České překlady pojmů jsou ale k dispozici jen v rámci placených překladů mezinárodních norem v prodejnách norem nebo prostřednictvím služby ČSN on-line, podrobněji popsané na <http://www.unmz.cz/urad/csn-on-line>.

Závěr

Dále popisované zásady se používají především při obzvláště přesných měřeních, se kterými se lze nejčastěji setkat v kalibračních laboratořích. Jejich účelem je dosáhnout stálé jakosti a opakovatelnosti kalibrací. Námitka, že přesnost přístrojů používaných v praxi je podstatně menší, a proto není třeba se těmito vlivy tak podrobně zabývat, neobstojí, protože každý uživatel, revizní technik, opravář nebo jakýkoliv další pracovník provádějící měření, potřebuje měřidlo, jehož vlastnosti nejsou zhoršeny nedostatky při nastavení nebo opakované kalibraci. Je na uživateli měřidla, aby jeho vlastnosti správně využil. Také musí respektovat to, že kontroluje-li měřením jakoukoliv specifikaci, musí uvážit i nejistotu měření. Jestliže např. revizní technik měří odpor elektrických vodičů, záleží nejen na mě-

řidle, ale naměřená hodnota je velmi závislá i na teplotě, protože teplotní závislost odporu mědi je zhruba $0,4 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$. To znamená, že odpor téhož vedení měřený na stavbě v zimě nebo v létě se může lišit až o asi 10 %. Je-li ale udána teplota, při které se měřilo, lze naměřenou hodnotu přepočítat na hodnotu při jiné teplotě. Teplotu, při které se měří, nelze ale stanovit přesně. Pro nejistotu změněné teploty např. $\pm 1 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ je nejistota vlivem teploty $\pm 0,4 \text{ } \%$. Tento vliv již dále nelze příliš potlačit, ale vždy je třeba plně využít dosažitelné vlastnosti použitého měřidla.

Protože každá kalibrace něco stojí, měl by její zadavatel vědět přesně, co požaduje, v jakých rozsazích je potřebná přesnost měření nejdůležitější a podle toho zadávat kalibrace. Měl by být schopen jednat na odborné úrovni s kalibrační laboratoří i posoudit její vlastnosti. Výsledky kalibrace je nutné porovnat s požadavky, které na měřidlo má, a učinit závěr, zda vyhovuje předpokládanému použití. Zadáání kalibrace jen pro získání štítku, pro prokázání splnění požadavků všem posuzovatelům je nešvar dlouhodobě stále přetrvávající. Protože práce s měřidly vyžaduje i základní přehled o zajištění jejich přesnosti, byl uveřejněn tento seriál článků.

Literatura:

- [1] *Terminologie z oblasti metrologie*. ÚNMZ, Sborníky technické harmonizace 2010 (2. vydání), obsahuje VIM 3 a VIML. Dostupné na <http://www.unmz.cz/urad/terminologie-v-metrologii>.
- [2] *VIM 3 International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms VIM*. 3rd edition, včetně oprav *Corrigendum* (May 2010). Dostupné na http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_200_2008.pdf
- [3] JCGM 200:2008. Dostupné na http://www.iso.org/sites/JCGM/VIM/JCGM_200e_FILES/MAIN_JCGM_200e/Start_e.html
- [4] VIML OIML V1:2000, *International Vocabulary of Terms in Legal Metrology (VIML)*.
- [5] IEC, IEC 60050-300:2001 *Mezinárodní elektrotechnický slovník – Elektrická a elektronická měření a měřicí přístroje*.
- [6] ČSN EN 60359 *Elektrická a elektronická měřicí zařízení – Vyjadřování vlastností*.
- [7] ISO 10241:1992 *Mezinárodní terminologické normy – Příprava a uspořádání*.
- [8] ČSN P ENV 13005: *Směrnice pro vyjádření nejistot měření*. Český normalizační institut, Praha, 2005, 159 s.

Elektrifikace železnic

Při elektrifikaci železnic evropských zemí bylo použito několik různých napěťových systémů. Používají se tato napětí: stejnosměrná napětí (DC): 1,5 a 3 kV, střídavá napětí (AC): 15 kV, 16,7 Hz (16 2/3 Hz) a 25 kV, 50 Hz.

Současný stav v ČR

V bývalém Československu byl nejprve zaveden systém DC 1,5 kV, převzatý z Francie, a to pro elektrifikaci pražských nádraží koncem dvacátých let minulého století. Vlivem hospodářské krize a válečných událostí se s další elektrifikací započalo až koncem čtyřicátých let. Stejnosemerná soustava s napětím 1,5 kV byla již od počátku provozování považována odborníky za nevhodnou. Důvodem zavedení této soustavy byla tehdy hospodářská a vojenská návaznost na Francii. V roce 1949 začala velká elektrifikace hlavních tratí vyšším stejnosměrným napětím 3 kV (obr. 1). Elektrifikace mezi Děčínem, Prahou, Českou Třebovou, dále přes Ostravu a Valašské Meziříčí, do Žiliny, Košic a Čierne nad Tisou byla hotova přibližně za patnáct let. Tehdy se v Ev-



Obr. 1. Železniční trať elektrifikovaná stejnosměrnou proudovou soustavou 3 kV

ropě začala prosazovat střídavá napěťová soustava 25 kV, 50 Hz, vyvíjená před druhou světovou válkou v jižním Německu v okolí města Höllenthal. Tato část Německa přešla po válce pod francouzskou okupační zónu. Francouzi tuto soustavu původně s napětím 20 kV uvedli v severní Francii ze zkušebního stavu do provozu a zvedli napětí na 25 kV. Protože vývoj této soustavy byl úspěšný, zvláště po zvládnutí výroby křemíkových usměrňovačů, které nahradily usměrňovače rtuťové (ignitrony), bylo

František Majda, elektrotechnik,
Popovice u Kroměříže

v roce 1959 rozhodnuto zavést tento střídavý napěťový systém také u nás.

Jelikož tehdy byla na různých místech dokončována elektrifikace hlavních tratí stejnosměrným systémem 3 kV, bylo rozhodnuto elektrifikovat vše na sever od této hlavní trati stejnosměrnou soustavou a vše na jih střídavou soustavou 25 kV, 50 Hz.

Elektrifikace střídavou soustavou 25 kV, 50 Hz (obr. 2) má tyto výhody:

- trolejové vedení je napájeno pouhou transformací z vedení 110 kV na 25 kV,



Obr. 2. Napájení železniční trati elektrifikované střídavou proudovou soustavou 25 kV

u stejnosměrného systému 3 kV je nutný složitější dvanáctifázový transformátor a usměrňovač;

- trolejové vedení vyžaduje přibližně jen třetinu vodivých materiálů a umožňuje větší vzdálenost mezi podpěrnými ocelovými konstrukcemi, u střídavé soustavy není třeba zesilovací postranní vedení (hliníkové lano);
- napájecí stanice (měničny) jsou u stejnosměrné soustavy vzdáleny od sebe 20 km, u střídavé soustavy je to 50 km a jsou menší ztráty na trolejovém vedení, i když jsou napájecí místa více vzdálena, a rovněž průřez vedení stacích menší; toto je dáno velikostí napětí.

Provozování dvou soustav

Obě tyto soustavy jsou u nás provozovány souběžně, což má tyto nevýhody:

- lokomotivy jedné soustavy nemohou přejíždět na tratě elektrifikované druhou soustavou,
- pro vlaky vedené na tratích s různými napájecími soustavami se používají dvou- a vícesystémové lokomotivy, které jsou dražší.

Z obou předešlých důvodů jsou v České republice provozována tato drážní vozidla:

- lokomotivy a elektrické vozy napěťové soustavy DC 3 kV (obr. 3),
- lokomotivy a elektrické vozy napěťové soustavy AC 25 kV, 50 Hz,
- lokomotivy a elektrické vozy dvousystémové, které mají oba předešlé systémy.

Na hranicích s Rakouskem a Německem dochází ještě ke styku s jejich napěťovou soustavou 15 kV, 16 2/3 Hz, a to 25 kV, 50 Hz oproti 15 kV, 16 2/3 Hz a DC 3 kV oproti 15 kV, 16 2/3 Hz.

Naše nejmodernější souprava Pendolino je trojsystémová, a to DC 3 kV, AC 15 kV, 16 2/3 Hz a AC 25 kV, 50 Hz. Tento vlak jedoucí z Prahy do Vídně přejíždí přes všechny tyto systémy, z Prahy DC 3 kV, Brna AC 25 kV, 50 Hz a Vídně AC 15 kV, 16 2/3 Hz. V Plzni je vyvíjena nová lokomotiva pro nákladní vlaky s výkonem 6 MW, která je rovněž trojsystémová.

Na území ČR je sedm vnitrostátních míst, kde se obě soustavy stýkají. Přejezd přes rozhraní soustav nevyžaduje zastavení. Lokomotiva přejíždí stykové místo se spuštěným sběračem bez napětí, setrvačností z jedné soustavy do druhé. Cestující nic nepoznají. Pro člověka znalého problematiky se po přejezdu ze střídavé soustavy do stejnosměrné objeví zesilovací vedení. Naopak při přejezdu ze stejnosměrné soustavy do střídavé vedení zeštíhlí.

Provozování více napěťových soustav ze současného hlediska

Soustava 25 kV, 50 Hz je výhradně používána ve státech, které započaly s elektrifika-

cí železnic později. To je Finsko, Maďarsko, Rumunsko a Bulharsko. Tato soustava je nyní rozšiřována v Rusku, Itálii, Francii, Holandsku, ve státech bývalé Jugoslávie, v Japonsku a ve Velké Británii. Také na trati Paříž – Londýn s podmořským tunelem.



Obr. 3. Elektrická jednotka řady 471 (City Elephant) pro stejnosměrnou proudovou soustavu 3 kV



Obr. 4. Napájecí stanice pro proudovou soustavu AC 25 kV

Pro vlaky s velkou rychlostí TGV, IC, ICE se budují v Itálii a Francii tratě výhradně s touto soustavou. Při jízdě po napěťové soustavě s nižším napětím (ss) nemohou z důvodu vysokých výkonů (proudů) dosahovat rychlostí 300 km·h⁻¹.

Protože ve světě dochází ke změně napěťových soustav směrem k vyššímu napětí střídavému, bylo by vhodné, aby se tak stalo i u nás.

Přestavba soustavy DC 3 kV na soustavu AC 25 kV, 50 Hz a možné výhody

Mezi přednostmi lze zařadit:

- zaměstnanost několika set pracovníků na dobu 30 let,
- úspora pracovníků v měničnách 110/3 kV, zrušení některých těchto zařízení a využití několikahektarových ploch pro jiné účely,
- úspora energie; bude-li uspořena elektrická energie poměřována s cenou za vykupovanou elektřinu z fotovoltaických elektráren, potom vycházejí úspory příznivě; výkupní cena ze solárních zdrojů je čtyř-

násobná oproti ceně elektřiny pro obyvatelstvo,

- úspora mědi, hliníku, železa,
- sjednocení typů vozidel, jejich lepší využití,
- možnost napájet elektrifikované tratě napětím 50 kV.

Délka trvání přestavby

Změnit napěťový systém by bylo nejvhodnější ve spolupráci se Slovenskem, kde byl stejný vývoj. Se Slovenskem se naše železnice dotýkají v soustavě DC 3 kV ve směru Bohumín–Žilina a Valašské Meziříčí–Púchov a v soustavě AC 25 kV, 50 Hz ve směru Břeclav–Bratislava. Posunutí střídavé soustavy od Trnavy po Žilinu by bylo přínosem i pro slovenské železnice.

Rychlejší změna napětí v délce deseti až patnácti let

Životnost lokomotiv dosahuje 40 až 50 let. Rychlejší přeměna soustavy by byla příležitostí pro výrobce lokomotiv. Umožnila by přeměnit existující, novější stejnosměrné stroje na střídavé s využitím jejich předností a rovněž využít novější poznatky v této oblasti.

Výhody stejných napájecích soustav

Uvedme zde příklad spolupráce mezi Německem a Švýcarskem. Nákladní vlaky z Německa do Itálie jezdí mezi Karlsruhe v Německu a Domodossolou v Itálii, kam až dosahuje trať švýcarské železnice, bez nutnosti výměny lokomotivy, a to s jízdou čtyři hodiny. Vzdálenost je to stejná jako z Děčína do Břeclavi. Je to umožněno nejen vzájemnou dohodou, ale především stejnou napěťovou soustavou.

Závěr

Jednotná elektrifikace střídavou soustavou 25 kV, 50 Hz by zlepšila využití všech strojů s možností přejezdu na větší vzdálenost. Dále by její zavedení vedlo ke zvýšení zaměstnanosti, přineslo by příležitost pro elektrotechnický průmysl a uplatnění nových znalostí při výrobě lokomotiv a napájecích soustav.

Soustava 25 kV, 50 Hz (obr. 4) je ze všech dosud provozovaných soustav nejjednodušší a nejpoužitelnější. Je zřejmé, že později bude i v jiných evropských státech dosavadní soustava přebudována na střídavou, tedy i tam, kde dosud není provozována.

☒