

# Harmonizace metod vyhodnocení naměřených dat při zkratových zkouškách

P. Křemen – (Zkušebnictví, a.s.), R. Jech – (Zkušebnictví, a.s)

*Jsou uvedeny principy a postup harmonizace metod zpracování a vyhodnocení naměřených dat ve zkušebních silnoproudých zařízeních a výsledky dosažené ve Zkratovně Běchovice v rámci mezilaboratorního porovnání měřících systémů velkých proudů.*

## 1. Úvod:

Současné měřicí systémy výkonových zkušeben silnoproudých přístrojů a zařízení - zkratoven tvoří poměrně složitý vícekanálový digitální systém a software pro vyhodnocení naměřených hodnot. Tento systém musí být schopen přesně zaznamenat a vyhodnotit průběhy proudů o frekvenci od 0 Hz do 5000 Hz a o velikosti amplitudy od 1 A do 750 kA.

Protože měřicí systém musí splňovat i řadu velmi specifických podmínek vlastních každé zkušebně, je navržen a vyroben pouze pro ni. A to včetně software pro vyhodnocování měření. To přináší značnou hardwarovou i softwarovou odlišnost měřících systémů jednotlivých zkušeben. Ve většině případů však jde o zkušebny akreditované, takže jakost měření je zaručena metrologickým ověřením v rámci splnění požadavků normy ISO/IEC 17025.

V roce 1998 bylo v rámci mezinárodního sdružení zkratoven STL (Short Circuit Testing Liaison) provedeno orientační porovnání přesnosti měření největších výkonových zkušeben ze sedmi západoevropských zemí. Byl zvolen zjednodušený postup vycházející z použití stejného měřícího senzoru (bočník a rogowského cívkou) a stanoveného zkušebního programu. Odchylky měření proudů v jednotlivých laboratořích se pohybovaly v rozmezí  $\pm 2,3 \%$  pro stanovení efektivní hodnoty (50 Hz) a  $- 4,7 \%$  až  $+2,7 \%$  pro stanovené vrcholové hodnoty nárazu proudu. Ve všech laboratořích se prokázala velmi dobrá linearita systémů pro měření v oblasti frekvence 50 Hz. Méně příznivé byly výsledky porovnání přesnosti měření při zkratových zkouškách s proudy vyšší frekvence (do 5 kHz). Zde se již odchylky naměřených hodnot pohybovaly v rozmezí  $\pm 10\%$ .

Výsledkem tohoto mezilaboratorního pozorování bylo přijetí 2 doporučení, která by měla zajišťovat stejnou úroveň měření proudů v laboratořích STL:

- a) celková nejistota měření proudů měřícího systému zkušebny nemá být vyšší než je uvedeno v následující tabulce.

Tab. 1

Měření proudu		Celková nejistota měření %		
		Národní standard	Referenční systém	Laboratorní systém
Průmyslová frekvence 50 Hz	Vrcholová hodnota nárazu	0,3	1,5	5
	Efektivní hodnota	0,1	1	3
Vyšší frekvence do 5000 Hz	Vrcholová hodnota nárazu	1	3	10

- b) bude postupně vyvinut referenční měřicí systém dle kterého budou laboratoře STL ověřovat své měřicí systémy;

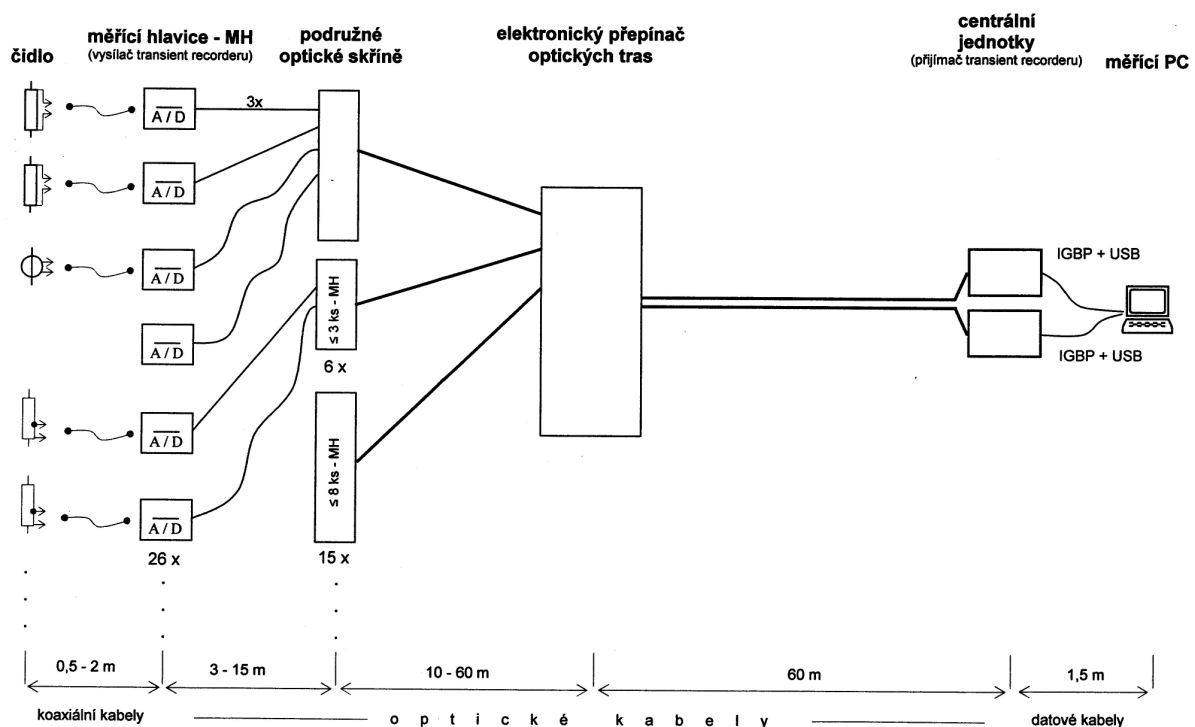
Na rozdíl od vysokonapěťových zkušeben, kde platí norma IEC 61083-2, není doposud normalizován referenční měřicí systém pro výkonové zkušebny. Norma IEC 61083-2 se zabývá výhradně systémy pro měření impulsních napětí. Konečným cílem laboratoří STL je vytvořit technické podmínky a podklady pro normalizaci referenčního měřicího systému velkých proudů ve zkratovnách.

## 2. Měřicí systém

Měřicí systém ve výkonových zkušebnách silnoproudých přístrojů a zařízení tvoří vícekanálový digitální systém pro přenos a záznam dat a software pro vyhodnocení naměřených hodnot.

Zkratovna Běchovice takovýto systém používá od r. 1990, kdy byl po 2 ročním ověřovacím provozu paralelně s analogovým oscilografickým měřením uveden do provozu 16-kanálový 8 bitový systém založený na speciálně navržených transientrecordrech a optopřenosch. V současné době je uváděn do provozu nový 12 bitový měřicí systém. Jeho základní struktura je uvedena na obr. 1. V tomto systému je práce s analogovým signálem co nejvíce minimalizována tím, že digitalizace měřeného signálu se provádí co nejbližší měřicího senzoru. Veškerý přenos dat je realizován číslicově pomocí optopřenosů. Samozřejmostí je izolované napájení jednotlivých částí systému a trojitě stínění všech elektronických obvodů.

### ZKU - měřicí systém



Obr. 1 Zakladní struktura měřicího systému Zkratovny

Pro mezilaboratorní porovnání takovýchto měřicích systémů je třeba vytvořit určité podmínky. Z hlediska technického provedení systému jsou pro správnost měření rozhodující vlastnosti měřicího členu (měřicí transformátor proudu, bočníky, rogowského cívka) a počet bitů digitalizovaného signálu. Pro vyhodnocení naměřených hodnot jsou rozhodující použité vyhodnocovací metody a jejich softwarové zpracování. Práce byly proto zaměřeny do dvou směrů.

- 1) Na základě matematických modelů zkušebních obvodů byl vypracován softwarový generátor časových průběhů zkratových proudů při typických zkratových zkouškách. Tento generátor slouží pro porovnání stávajících vyhodnocovacích programů jednotlivých laboratoří a jejich následné harmonizaci.
- 2) Byl navržen, vyroben a mezinárodně metrologicky ověřen referenční měřicí senzor – bočník.

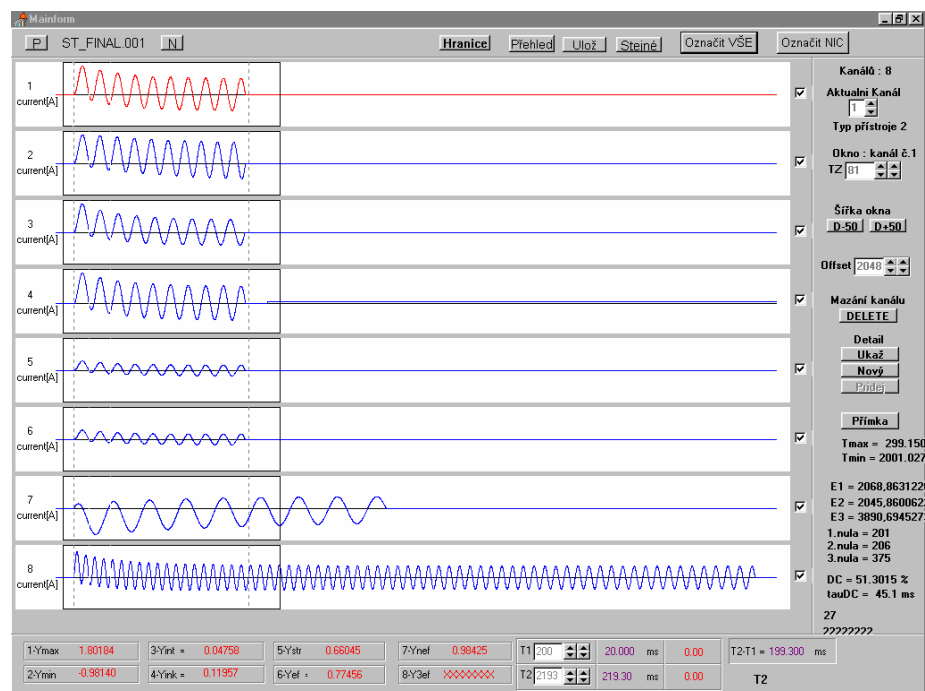
### 3. Porovnání a harmonizace metod vyhodnocení naměřených dat

Aby bylo možné vypracovat softwarový generátor referenčních průběhů měřených veličin, byla nejprve provedena analýza požadavků norem na měření a záznam průběhů jednotlivých veličin při zkratových zkouškách (obvyklé průběhy proudu a napětí) a požadavků norem na veličiny, jejichž hodnoty mají být z naměřených průběhů vyhodnoceny (efektivní hodnota, vrcholová hodnota, časové konstanty, apod.)

Na základě této analýzy byl v roce 2004 zpracován matematický model umožňující zpětně vypočítat časové průběhy jednotlivých veličin na základě parametrů, které jsou předmětem vyhodnocení těchto průběhů. Tento matematický model tvoří základ softwarového generátoru časových průběhů zkratového proudu při typických zkratových zkouškách.

Každá laboratoř, která se porovnání zúčastnila, obdržela tento data generátor s pevně zadanými parametry pro generování 8 referenčních průběhů zkratových proudů. Každý referenční průběh je vypočten s různou mírou vlivu jednotlivých parametrů (obr.2) od nejjednoduššího sinusového průběhu s konstantní amplitudou a frekvencí, který je superponován na exponenciálu s jednou časovou konstantou, až po nejsložitější průběhy u kterých se uplatňuje kombinace řady dalších vlivů (tab. 2).

Datový generátor provede výpočet požadovaného průběhu na základě zadání rozsahu vzorkování, rozsahu amplitudy a celkové doby záznamu děje. Vypočtený průběh je pak digitalizován v počtu bitů, který je použit v daném měřicím systému zkušebny pro digitalizaci naměřeného analogového signálu.



Obr. 2 Zobrazení referenčních průběhů měřicím systémem Zkratovny Běchovice

Tab. 2  
Referenční průběhy

Průběh č.	Hlavní parametry
1	Časová konstanta ss složky      Ta = 45 ms
2	Časová konstanta ss složky      Ta = 120 ms Vzrůstající efektivní hodnota Klesající frekvence
3	Časová konstanta ss složky      Ta = 45 ms Klesající efektivní Hodnota Klesající frekvence
4	Časová konstanta ss složky      Ta = 45 ms Ofset
5	Časová konstanta ss složky      Ta = 45 ms 30 % dynamický rozsah
6	Časová konstanta ss složky      Ta = 45 ms Rušení
7	Časová konstanta ss složky      Ta = 80 ms Subtransientní složka              Td' = 400 ms Bez transientní složky, ofset, rušení
8	Časová konstanta ss složky      Ta = 80ms Subtransientní složka              Td' = 400 ms Transientní složka                    Td" = 16 ms Klesající frekvence

Výsledek je ve formátu ASCII uložen do souboru, který představuje naměřená data pro další zpracování vyhodnocovacího programu. Aby bylo možné porovnat výsledky, provádí se vyhodnocení referenčních křivek v určitém čase vždy po 1/2 cyklu frekvence 50Hz a stanoví se odchylka zjištěné hodnoty od hodnoty referenční. Z těchto odchylek je pak vypočtena hodnota nejistoty vyhodnocení dle zjednodušeného vztahu :

$$U_{DE} = 2\sqrt{1/3 * \max(a)^2}$$

kde „a“ je zjištěná odchylka.

Stanovené limity nejistoty vyhodnocení 8 referenčních průběhů jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 3  
Limity nejistoty vyhodnocení referenčních průběhů

Veličina	Nejistota referenční hodnoty
Vrcholová hodnota	≤ 0,2 %
Efektivní hodnota	≤ 0,4 %
Stejnoseměrná složka	≤ 2,0 %
Časový interval	≤ 0,3 %

Výsledky vyhodnocení referenčních průběhů programy používanými pro vyhodnocení naměřených dat ve Zkratovně Běchovicích jsou uvedeny v následujících tabulkách.

V tab. 4 je přehled parametrů zadání referenčních křivek a přehled parametrů pro digitální záznam vypočtených průběhů referenčních křivek

Příklad vyhodnocení referenčních křivek č.6 a 7 je v tab. 5 a 6.

Celkový přehled výsledků porovnání vyhodnocovacího softwaru Zkratovny Běchovice s referenčními průběhy je v tab. 7.

Tab. 4

a) Waveform parameters:

Reference curves	$I_k''$ [kA]	$I_k'$ [kA]	$I_{DC}$ [kA]	$\tau_{AC}''$ [ms]	$\tau_{AC}'$ [ms]	$\tau_{DC}$ [ms]	$\phi$ [°]	$\Delta f$ [Hz]
1	1	1	1	16	400	45	90	0
2	0,7	0,8	1	16	400	120	90	2,5
3	1,5	1,2	1	16	400	45	90	-2,5
4	1	1	1	16	400	45	90	0
5	1	1	1	16	400	45	90	0
6	1	1	1	16	400	45	90	0
7	2,5	1,25	1,25	400	400	80	-45	-3
8	1,43	1,11	1	400	16	80	45	-7

b) Digital recorder parameters:

Reference curves	Resolution [bit]	Number of samples [-]	Sampling rate [kHz]	Noise level [dB]	Offset level [kA]	Dynamic range [%]
1	12	2400	10	0	0	90
2	12	2400	10	0	0	90
3	12	2400	10	0	0	90
4	12	2400	10	0	-0,1	90
5	12	2400	10	0	0	30
6	12	2400	10	0,005	0	90
7	12	4096	20	0,005	-0,02	80
8	12	8192	5	0	0	80

Tab. 5

Reference curve 6

Half cycle	Crest value (kA)			R.M.S. value (kA)			D.C. component (%)			Time of Crest value (samples)			
	TDG	ZKU	deviation (%)	TDG	ZKU	deviation (%)	TDG	ZKU	deviation (%)	TDG	ZKU	deviation (%)	
Reference curve 6	1	1,802	1,801	0,05	0,707	0,708	0,10	80,074	79,960	0,14	298,189	297,860	0,11
	2	-0,360	-0,359	0,29	0,707	0,707	0,04	64,118	64,084	0,05	401,440	401,677	0,06
	3	1,514	1,511	0,20	0,707	0,706	0,12	51,342	51,309	0,06	498,841	498,516	0,07
	4	-0,589	-0,588	0,13	0,707	0,707	0,05	41,111	41,142	0,07	600,924	600,428	0,08
	5	1,329	1,330	0,06	0,707	0,707	0,04	32,919	32,946	0,08	699,257	699,217	0,01
	6	-0,737	-0,737	0,05	0,707	0,707	0,01	26,360	26,313	0,18	800,593	800,791	0,02
	7	1,211	1,209	0,13	0,707	0,706	0,14	21,107	21,126	0,09	899,524	899,715	0,02
	8	-0,831	-0,828	0,30	0,707	0,706	0,08	16,901	17,071	1,01	1000,380	1000,123	0,03
	9	1,135	1,137	0,20	0,707	0,707	0,03	13,534	13,711	1,30	1099,695	1099,529	0,02
	10	-0,892	-0,891	0,15	0,707	0,707	0,06	10,837	10,868	0,28	1200,244	1200,559	0,03
	11	1,087	1,085	0,21	0,707	0,706	0,10	8,677	8,591	0,99	1299,805	1299,650	0,01
	12	-0,931	-0,931	0,02	0,707	0,707	0,06	6,948	6,851	1,40	1400,156	1399,905	0,02
	13	1,056	1,054	0,18	0,707	0,706	0,14	5,564	5,576	0,21	1499,875	1499,831	0,00
	14	-0,955	-0,953	0,25	0,707	0,706	0,16	4,455	4,565	2,48	1600,100	1599,969	0,01
	15	1,036	1,035	0,06	0,707	0,707	0,02	3,567	3,534	0,93	1699,920	1699,744	0,01
	16	-0,971	-0,974	0,28	0,707	0,708	0,11	2,857	2,725	4,61	1800,064	1800,199	0,01
	17	1,023	1,023	0,04	0,707	0,707	0,01	2,287	2,267	0,90	1899,948	1899,790	0,01
	18	-0,982	-0,984	0,15	0,707	0,707	0,03	1,832	1,921	4,86	2000,041	2000,058	0,00
Uncertainty (%)	0,35			0,19			0,21			0,13			

Note: DC components less than 20% are not considered in the calculations of uncertainties

Tab. 6  
Reference curve 7

Half cycle	Crest value (kA)			R.M.S. value (kA)			D.C. component (%)			Time of Crest value (samples)			
	TDG	ZKU	deviation (%)	TDG	ZKU	deviation (%)	TDG	ZKU	deviation (%)	TDG	ZKU	deviation (%)	
Reference curve 7	1	0,780	0,778	0,29	1,762	X	#####	-68,749	X	#####	251,533	251,292	0,10
	2	-3,973	-3,971	0,04	1,740	1,739	0,06	-61,392	-61,478	0,14	449,187	449,891	0,16
	3	1,100	1,100	0,01	1,719	1,718	0,08	-54,784	-54,717	0,12	654,511	654,197	0,05
	4	-3,575	-3,574	0,02	1,698	1,698	0,01	-48,822	-48,857	0,07	855,462	856,141	0,08
	5	1,341	1,344	0,19	1,677	1,676	0,03	-43,479	-43,332	0,34	1062,976	1063,371	0,04
	6	-3,251	-3,248	0,10	1,657	1,655	0,10	-38,692	-38,732	0,10	1267,229	1267,106	0,01
	7	1,520	1,517	0,20	1,637	1,634	0,16	-34,387	-34,370	0,05	1477,144	1476,850	0,02
	8	-2,987	-2,985	0,06	1,618	1,616	0,12	-30,521	-30,619	0,32	1684,732	1684,327	0,02
	9	1,649	1,648	0,05	1,599	1,597	0,15	-27,086	-27,003	0,31	1897,250	1896,980	0,01
	10	-2,771	-2,769	0,07	1,580	1,579	0,06	-23,991	-23,995	0,02	2108,226	2106,843	0,07
	11	1,740	1,742	0,13	1,562	1,560	0,10	-21,235	-21,050	0,87	2323,547	2322,186	0,06
	12	-2,593	-2,591	0,09	1,544	1,542	0,11	-18,770	-18,777	0,04	2537,988	2538,364	0,01
	13	1,800	1,799	0,06	1,526	1,524	0,16	-16,579	-16,511	0,41	2756,308	2756,095	0,01
	14	-2,446	-2,445	0,04	1,509	1,508	0,09	-14,624	-14,672	0,33	2974,310	2973,220	0,04
	15	1,838	1,839	0,03	1,492	1,490	0,12	-12,891	-12,764	0,99	3195,831	3195,573	0,01
	16	-2,323	-2,322	0,05	1,475	1,474	0,06	-11,341	-11,377	0,32	3417,510	3418,393	0,03
Uncertainty (%)	0,33			0,19			1,00			0,18			

Note: DC components less than 20% are not considered in the calculations of uncertainties

X it was not possible to determine by the three crest method

Tab. 7

Referenční křivka	Nejistota referenční hodnoty %			
	Vrcholová hodnota	Efektivní hodnota	Stejnoseměrná složka	Čas vrcholové hodnoty
1	0,12	0,22	0,35	0
2	0,13	0,36	0,90	0,02
3	0,11	0,24	0,45	0,01
4	0,11	0,21	0,32	0,01
5	0,18	0,15	0,29	0,02
6	0,35	0,19	0,21	0,13
7	0,33	0,19	1,00	0,18
8	0,20	0,16	0,28	0,01

Z porovnání se stanovenými limity nejistoty vyhodnocení referenčních průběhů uvedených v tab. 3 je zřejmé, že až na dvě položky splňuje vyhodnocovací software Zkratovny Běchovice mezinárodně uznávané doporučení STL

U položek, kde nebyly splněny doporučení STL, byla provedena analýza programové interpretace normou předepsaného postupu vyhodnocení. Na základě výsledku této analýzy se podařilo snížit nejistotu vyhodnocení blízko k limitu doporučenému STL.

#### 4. Referenční bočník

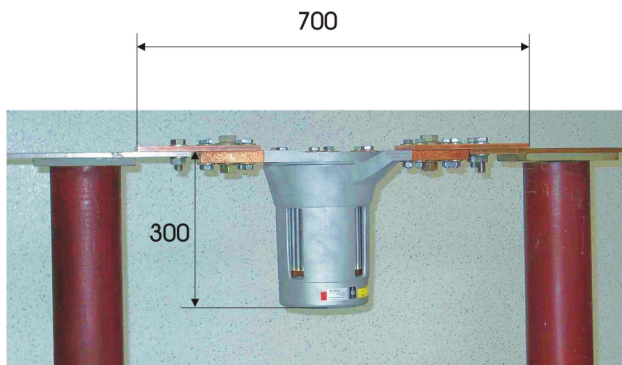
Referenční bočník byl navržen a metrologicky ověřen po měření velkých proudů s následujícími parametry:

Maximální efektivní hodnoty symetrického proudu	140 kA/1s.
Maximální vrcholová hodnota nesymetrického proudu	350 kA
Frekvenční rozsah	0-10 kHz
Časový interval mezi dvěma měřeními při plném proudu	1 hod

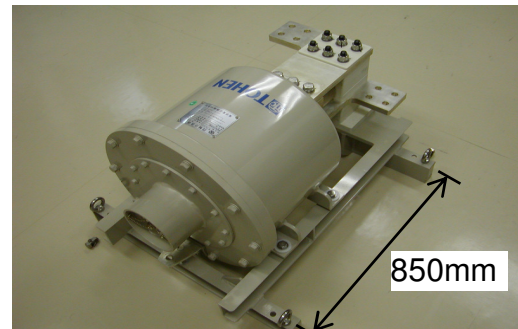
Dosažená nejistota je menší než 0,8 % pro měření proudů průmyslové frekvence a menší než 2,5 % pro měření proudů vyšší frekvence (do 10kHz)

Byly vyrobeny 2 bočníky. Jeden pro evropské členy STL (obr. 3) a druhý pro asijské členy STL (obr. 4). Každý člen STL dostane bočník na určitou dobu k dispozici pro ocejchování vlastních bočníků a pro ověření celého měřicího systému. Tohoto procesu se zúčastní 17 zkušeben z Evropy, (včetně Zkratovny Běchovice), zkušebna z Jihoafrické Republiky a řada zkušeben z Asie (Indie, Japonsko, Jižní Korea, Čína).

Srovnávací měření a cejchování byly zahájeny v druhé polovině roku 2005 a bude trvat do roku 2007. Opakovat se bude v pětiletých cyklech.



Obr. 3 Referenční bočník I



Obr. 4 Referenční bočník II

## **5. Závěr:**

Výsledky porovnání a harmonizace vyhodnocovacího software jednotlivých laboratoří jsou prvním krokem k mezilaboratornímu porovnávání celých měřicích systémů pomocí referenčního bočníku při konkrétních zkouškách. Na základě získaných výsledků budou stanoveny konečné parametry referenčního měřicího systému velkých proudů ve zkratovnách. Současně s tím budou ověřeny nové matematické vyhodnocovací postupy, které patrně nahradí zjednodušené grafické vyhodnocovací postupy uvedené v současných normách.