



## ISTITUTO NAZIONALE DI RICERCA METROLOGICA Repository Istituzionale

Miglioramento delle capacità di taratura dell'INRIM per tensioni impulsive di origine atmosferica fino a 700 kV

*Original*

Miglioramento delle capacità di taratura dell'INRIM per tensioni impulsive di origine atmosferica fino a 700 kV / Caria, S. E.; Galliana, F.; Roccato, P. E.. - (2024).

*Availability:*

This version is available at: 11696/79259 since: 2024-02-26T09:10:45Z

*Publisher:*

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

*S.E. Caria, F. Galliana, P.E. Roccato*

**Miglioramento delle capacità di taratura dell'INRiM  
per tensioni impulsive di origine atmosferica fino a 700 kV**

R.T. n. 4/2024

Febbraio 2024

RAPPORTO TECNICO I.N.R.I.M.

## Indice

Sommario .....	3
Abstract .....	3
Introduzione .....	4
Le attrezzature del LATFC.....	5
Metodi per ridurre le Incertezze .....	6
Metodi di Convoluzione e Deconvoluzione.....	7
Effetti della Deconvoluzione.....	7
Ricalcolo del Confronto .....	9
Considerazioni Finali.....	20
Riferimenti.....	21

## Sommario

Presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM) sono state apportate migliorie alle capacità di taratura (CMC) per le misure delle tensioni impulsive di origine atmosferica fino a 700 kV. Le misure dell'INRiM a tensioni superiori a 200 kV sono state fornite per il confronto EURAMET.EM-S42 relativo agli impulsi di origine atmosferica e sono state sottoposte a un'elaborazione mediante un metodo di deconvoluzione. Questo processo ha consentito un accordo soddisfacente con il valore di riferimento del confronto (KCRV) con le incertezze ipotizzate come obiettivo, anche per impulsi brevi (0,84  $\mu$ s), dove le dimensioni del divisore utilizzato non sono ottimali. Le nuove incertezze variano dallo 0,5% per  $d\beta'$  per l'impulso lento a 600 kV al 2 % per  $T_1$  sia per l'impulso veloce a 400 kV che a 600 kV. Viene fornita anche un'alternativa proposta di validazione delle incertezze desiderate e dell'applicazione della deconvoluzione.

## Abstract

At the Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM) an improvement of the calibration capabilities (CMC) for measurements of lightning impulse voltages up to 700 kV was made. The INRiM measurements at voltages higher than 200 kV provided for the EURAMET.EM-S42, comparison of lightning impulse LI were submitted to a refinement by means of a deconvolution method. This process allowed a satisfactory agreement with the key comparison reference value (KCRV) with the target hypothesized uncertainties also for short impulses (0.84  $\mu$ s), where the size of the used divider is not optimal. The new uncertainties span from 0,5 % for  $d\beta'$  for the long pulse at 600 kV to 2 % for  $T_1$  for both Short impulse at 400 kV and 600 kV. An alternative validation proposal of the target uncertainties and of the applied deconvolution is also given.

## Introduzione

Secondo la IEC 60060-1 [1], un impulso di origine atmosferica (LI) è una tensione impulsiva con un tempo di salita inferiore a  $20 \mu\text{s}$ . I sistemi di misura per LI sono costruiti per valutare lo stress dielettrico delle sovratensioni transitorie causate da fulmini, scariche disruptive, per convalidare componenti o dispositivi elettrici. Presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM), il Laboratorio Alte Tensioni e Forti Correnti (LATFC), un laboratorio di alta tensione e potenza, è attrezzato con strumentazione adatta per effettuare tarature con forme d'onda LI fino a 700 kV. Attualmente, due sistemi di misura con due diversi divisori di tensione, rispettivamente per tensioni fino a 200 kV e fino a 600 kV, sono disponibili presso il LATFC. Mediante questi due sistemi di misura, il LATFC ha partecipato con risultati soddisfacenti al confronto supplementare EURAMET.EM-S42 [2]. Tuttavia, recentemente, le capacità dell'INRiM per tensioni LI fino a 200 kV sono state migliorate mediante una rivalutazione dei risultati del confronto [2-3], introducendo nell'analisi del confronto nuove e ridotte incertezze dell'INRiM dopo uno studio ulteriore del sistema di misura. Con le nuove incertezze, le misure dell'INRiM sono risultate ancora compatibili senza influire sui risultati degli altri partecipanti al confronto [3]. Inoltre, per validare le nuove incertezze, le risposte ai gradini dei divisori e le forme d'onda significative da [4] sono state convolute secondo [5 Allegato D] mediante un algoritmo dell'INRiM. Le differenze tra le forme d'onda convolute e quelle di riferimento da [4] sono risultate inferiori alle nuove incertezze dell'INRiM. Poiché le misure dei LI sono affette da errori derivanti principalmente dai divisori di tensione, dai digitalizzatori (a causa della loro risposta gradino non ideale) e dal software per la valutazione delle misure, strumenti matematici come la deconvoluzione possono aiutare a correggere la risposta gradino di ciascun componente di un sistema di misura. Attraverso la convoluzione delle risposte gradino, gli errori di misura possono essere indagati [6], mentre la deconvoluzione consente di ricostruire un segnale in ingresso dal segnale di uscita distorto e dalla risposta al gradino di un sistema di misura [7]. Ad esempio, in [8, 9], la deconvoluzione è stata applicata per correggere la risposta gradino dei divisori e dei digitalizzatori per misure di impulsi. In particolare, in [8] la deconvoluzione è stata applicata con successo a un divisore di tensione da 140 kV, mentre in [9] l'efficacia della correzione mediante deconvoluzione di un digitalizzatore a 12 bit è stata validata confrontando i con un calibratore calcolabile di tensione impulsiva [10]. Tuttavia, la deconvoluzione delle risposte al gradino non ideali, pur riducendo gli errori sistematici, può aggiungere rumori principalmente sui range inferiori dei digitalizzatori, come affermato anche in [11]. Comunque, la riduzione degli errori sistematici consente la riduzione dell'incertezza dei sistemi di misura per LI (o impulsi di manovra SI). In [11] è anche dimostrato che l'efficacia della correzione basata sulla deconvoluzione sembra non essere influenzata dalla disposizione dell'impianto di misura che, al contrario, induce errori non trascurabili nelle risposte al gradino. Inoltre, i divisori di tensione possono essere adatti anche senza correzione per le misure, accettando una incertezza superiore. Da questo punto di vista si è fatta una scelta di compromesso fra quelle che sono le esigenze di miglioramento delle CMC e quelle che sono le esigenze di svolgere tarature in tempi ragionevoli, per cui laddove non risulti strategico il miglioramento dell'incertezza di misura, si è deciso di non procedere alla deconvoluzione, che introduce tempi di misura aggiuntivi. La peculiarità e la novità di questo lavoro consistono nell'applicazione specifica del processo di deconvoluzione, applicato in forma discreta anziché mediante trasformata di Fourier, in una proposta semplice di validazione delle nuove incertezze secondo [12], anche per impulsi brevi ( $0,84 \mu\text{s}$ ), dove le dimensioni e, di conseguenza, il comportamento dinamico del nostro divisore non sono ottimali.

## Le attrezzature del LATFC

Al LATFC sono attivi due sistemi per misurare le tensioni LI che differiscono per l'uso di due divisori diversi:

- SAGI 304 per misure fino a 200 kV;
- HAEFELY R600 per misure fino a 600 kV.

Completano i sistemi di misura:

- Generatore di impulsi HAEFELY SGSA 800/40 che fornisce fino a 800 kV, equipaggiato con otto stadi, ciascuno dei quali fornisce fino a 100 kV;
- Digitalizzatore PXIe-5124 di National Instruments con velocità massima di campionamento di 200 MS/s e una risoluzione di 12 bit;



**Figura 1 - Divisore resistivo SAGI 304**



**Figura 2 - Divisore capacitivo smorzato HAEFELY R600**



**Figura 3 - Generatore di impulsi HAEFELY SGSA 800/40**

## Metodi per ridurre le Incertezze

Le incertezze di misura dell'INRiM per le misure di alte tensioni impulsive di origine atmosferica sono state dichiarate e validate durante il confronto internazionale EURAMET.EM-S42 [2], durante il quale l'INRiM ha dichiarato le incertezze riportate in Tabella 1:

**Tabella 1 – Definizioni ed incertezze dichiarate durante il confronto**

Parametro	Incertezza estesa (%)
Tensione	200 ÷ 700 kV
Valore della tensione di prova, $U_t$	1
Durata del fronte, $T_1$	5
Tempo all'emivalore, $T_2$	5

Per ridurre le incertezze si può percorrere un processo analogo a quello svolto per ridurre l'incertezza del sistema di misura fino a 200 kV [3]. Esso prevede l'effettuazione considerazioni *a posteriori* sulla dinamica del divisore di tensione per considerare la riduzione dell'incertezza dichiarata durante il confronto, quindi ricalcolare i risultati del confronto internazionale senza effettuare modifiche hardware o software. Con questo procedimento si raggiungono risultati importanti, ma volendosi spingere oltre si è deciso di effettuare anche delle modifiche al software per implementare un metodo che consente di andare a ridurre l'effetto delle non idealità della dinamica del sistema di misura: il metodo di deconvoluzione. Anche in questo caso è necessario effettuare il ricalcolo dei risultati ottenuti durante il confronto internazionale per verificare se i risultati che si sarebbero ottenuti durante il confronto utilizzando questo metodo sono compatibili con le misure effettuate da tutti i partecipanti al confronto. In quanto più innovativo, si riportano in primo luogo i risultati ottenuti con il metodo di deconvoluzione, dove viene spiegato questo processo. Successivamente si riportano i risultati del metodo senza deconvoluzione.

# Metodi di Convoluzione e Deconvoluzione

## A. Metodo di Convoluzione

Il metodo di convoluzione, come descritto nella norma IEC 60060-2:2011 [5], viene utilizzato per valutare il comportamento dinamico di un sistema di misura mediante le misure della risposta al gradino. La norma descrive l'uso di questo metodo come un modo per valutare il contributo di incertezza del comportamento dinamico del sistema di misura per tensioni impulsive. La forma d'onda in uscita, ottenuta con un calcolo che include una forma d'onda di ingresso nota e la risposta gradino del sistema di misura di interesse, consente di valutare gli errori dovuti al sistema di misura non ideale. Nel nostro caso, utilizziamo la convoluzione discreta perché il tempo di campionamento della forma d'onda di ingresso e la risposta gradino sono gli stessi. L'equazione (1) descrive il metodo di convoluzione:

$$V_{out}(i) = \sum_{k=0}^i V'_{in}(k) \cdot g(i-k) \cdot \Delta t \quad i = 0,1,2, \dots, n-1 \quad (1)$$

Dove:

- $V_{out}(i)$  è l'output del metodo di convoluzione nel punto  $i$ ;
- $V'_{in}(k)$  è la prima derivata dell'input nel punto  $k$ ;
- $g(i)$  è l'array di risposta gradino;
- $n$  è il numero di campioni dell'array di input;
- $\Delta t$  è l'intervallo di campionamento.

## B. Metodo di Deconvoluzione

Il metodo della deconvoluzione è il processo inverso della convoluzione: partendo dalla forma d'onda acquisita è possibile ridurre l'effetto del comportamento non ideale del sistema di misura, come dimostrato in [9]. In questo modo attraverso la deconvoluzione si può ridurre l'effetto delle non idealità dinamiche del sistema di misura dalla forma d'onda misurata, quindi si può osservare meglio la forma d'onda applicata. L'equazione (2) mostra il metodo di deconvoluzione nella sua forma discreta:

$$V_{dec}(i) = \sum_{k=0}^i \frac{V'_{ac}(k)}{g(i-k)} \cdot \Delta t \quad i = 0,1,2, \dots, n-1 \quad (2)$$

Dove:

- $V_{dec}(i)$  è la forma d'onda che si ricava con il metodo di deconvoluzione al punto  $i$ -esimo;
- $V'_{ac}(k)$  è la derivata prima della forma d'onda acquisita al punto  $k$ .

## Effetti della Deconvoluzione

La deconvoluzione ci permette, come già accennato, di limitare gli effetti causati dal comportamento non ideale del sistema di misura nella misura dell'impulso di origine atmosferica. Nella nostra applicazione, vogliamo vedere quali risultati si sarebbero ottenuti utilizzando questo metodo nel confronto supplementare EURAMET.EM-S42 [2] tenutosi dal 2016 al 2019. Poiché desideriamo migliorare i risultati del confronto, prendiamo tutte le misure effettuate durante il confronto con il sistema di misura utilizzato fino a 600 kV e applichiamo la deconvoluzione per valutare quali sarebbero stati i nostri risultati. Per fare ciò, utilizziamo la risposta al gradino misurata durante il confronto. Nel caso che stiamo esaminando, gli impulsi possono avere andamenti che possono differire leggermente, come descritto in [1]. Per quanto riguarda il comportamento dinamico di qualsiasi sistema di misura adatto per misurare queste forme d'onda, il parametro che presenta

i problemi più critici è  $T_1$ , che rappresenta il tempo di salita dell'impulso. Questo può essere "veloce", cioè 0,84  $\mu\text{s}$ , o "lento" con  $T_1$  uguale a 1,56  $\mu\text{s}$ . Per non dilungarci, analizziamo tre situazioni diverse: nella Tabella 2 vengono mostrati i risultati dell'INRiM per l'impulso positivo veloce con una tensione applicata di 400 kV.

**Tabella 2 - Deconvoluzione applicata alla misura "Short P400 kV"**

Short P400 (kV)	$U_t$ (kV)	$T_1$ ( $\mu\text{s}$ )	$T_2$ ( $\mu\text{s}$ )
Confronto	408,31	0,850	42,15
Deconvoluzione	408,40	0,822	41,80
Deviazione (%)	-0,013	1,887	0,487

Le prime due righe mostrano, rispettivamente, i risultati ottenuti nel confronto e con l'applicazione della deconvoluzione. La terza riga riporta invece la variazione percentuale tra i due dati. Valutando teoricamente questi risultati, la variazione di tensione più elevata ( $dV/dt$ ) si verifica sul fronte di salita. In questa condizione i parametri parassiti del divisore influenzano maggiormente le misure, quindi è accettabile che il parametro  $T_1$  mostri la deviazione maggiore.  $U_t$  è praticamente invariata. Questo è un ottimo punto di verifica che conferma che il metodo funziona correttamente per questo parametro, poiché il divisore è progettato in modo da misurare queste tensioni senza grandi problemi. La Tabella 3 mostra i risultati per l'impulso positivo veloce con una tensione applicata di 600 kV.

**Tabella 3 - Deconvoluzione applicata alla misura "Short P600 kV"**

Short P600 (kV)	$U_t$ (kV)	$T_1$ ( $\mu\text{s}$ )	$T_2$ ( $\mu\text{s}$ )
Confronto	599,63	0,869	42,70
Deconvoluzione	599,7	0,841	42,36
Deviazione (%)	-0,007	1,897	0,46

Per il nostro sistema di misura, 600 kV è la tensione massima che può essere misurata, con la durata del fronte più breve. Pertanto, ci si aspettava che nei risultati della deconvoluzione il parametro temporale  $T_1$  fosse il più deviato, ed effettivamente è più elevato rispetto al caso di 400 kV. Per gli altri parametri valgono le considerazioni fatte in precedenza. La Tabella 4 riporta un caso diverso in cui abbiamo applicato il metodo di deconvoluzione all'impulso positivo lungo con una tensione applicata di 400 kV.

**Tabella 4 - Deconvoluzione applicata alla misura "Long P400 kV"**

Long P400 (kV)	$U_t$ (kV)	$T_1$ ( $\mu\text{s}$ )	$T_2$ ( $\mu\text{s}$ )
Confronto	400,17	1,585	43,97
Deconvoluzione	399,04	1,550	43,84
Deviazione (%)	0,163	1,293	0,175

Anche per questa forma d'onda, il  $T_1$  è il parametro con la deviazione massima. È ragionevole che la deviazione percentuale sia inferiore rispetto agli altri casi perché il  $dV/dt$  è inferiore.

## Ricalcolo del Confronto

### A. Ricalcolo con la Deconvoluzione

Per verificare se la deconvoluzione può essere utilizzata per migliorare le incertezze di laboratorio, i risultati ottenuti devono essere validati. Nel paragrafo precedente sono stati mostrati i risultati ottenuti dai dati raccolti dall'INRiM durante il confronto internazionale, confrontandoli con i valori ottenuti dopo la loro deconvoluzione. A questo punto vediamo quali risultati del confronto si sarebbero stati se avessimo utilizzato la deconvoluzione durante il confronto. Dato che l'obiettivo è quello di ridurre l'incertezza, le incertezze dichiarate durante il confronto sono riportate in Tabella 1, mentre le incertezze desiderate sono mostrate in Tabella 5.

Si è deciso di suddividere la singola incertezza di  $U_t$  in una matrice: fino a 400 kV e fino a 600 kV. Per i parametri temporali la riduzione è significativa, ma abbiamo visto nel paragrafo precedente che la deconvoluzione ha un effetto importante su tali parametri.

**Tabella 5 - Incertezza estesa desiderata applicando la deconvoluzione**

Parametro	Incertezza estesa (%)		
	Veloce ( $T_1 < 1,2 \mu s$ )		Lento ( $T_1 \geq 1,2 \mu s$ )
Tensione	200 ÷ 400 kV	400 ÷ 600kV	200 ÷ 600 kV
$U_t$	0,7	1%	0,5%
$T_1$	2		
$T_2$	1		

Il processo utilizzato per questo lavoro è lo stesso di [3], che consiste nel ricalcolo di tutti i parametri ottenuti con il confronto per ogni misura del confronto in cui l'INRiM ha utilizzato il divisore Haefely [2]. Vengono riportati solo i risultati più significativi. In Figura 4 viene mostrato il risultato dell'INRiM nel confronto per la forma d'onda veloce ( $T_1 = 0,84 \mu s$ ) con picco positivo a 600 kV:

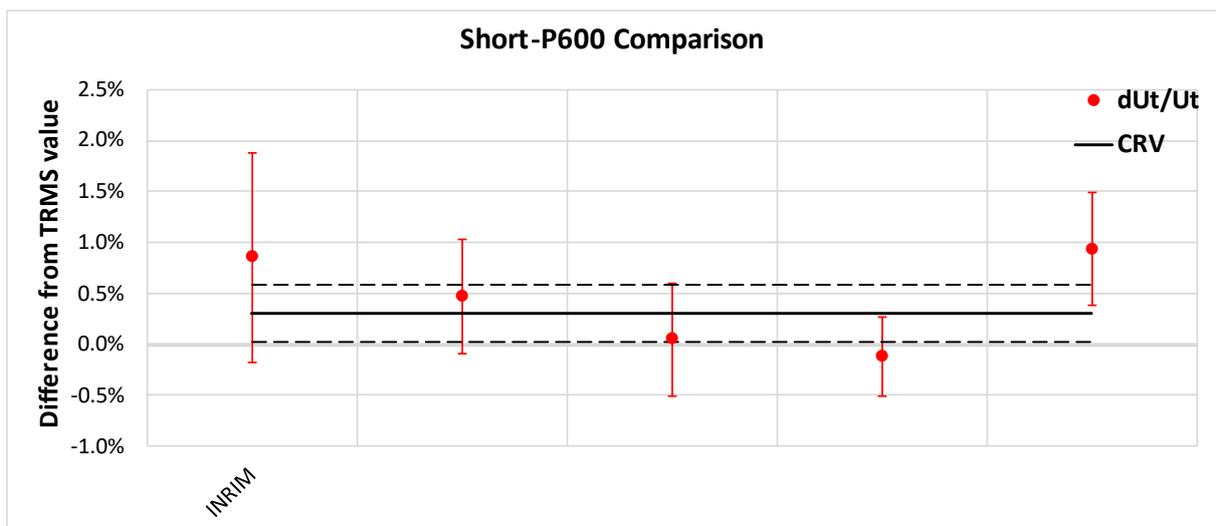


Figura 4 - Risultati del confronto per  $U_t^1$

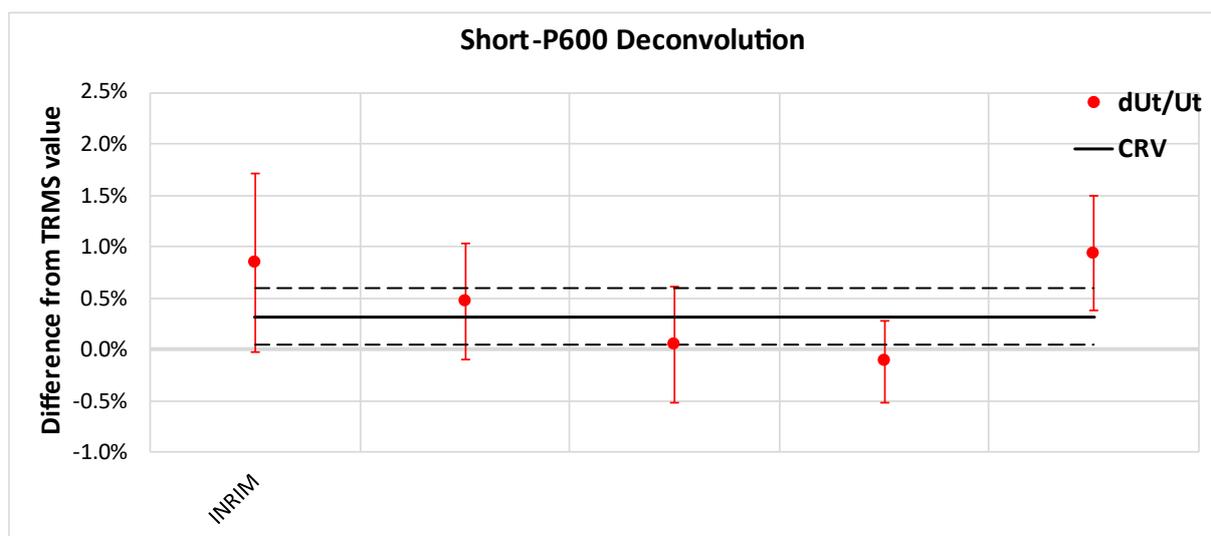
I risultati vengono rappresentati così come sono stati presentati durante il confronto internazionale [2], dove si ha il CRV che rappresenta il valore di riferimento ottenuto dai risultati di tutti i laboratori partecipanti al confronto e i singoli laboratori vengono rappresentati come distanza percentuale dal CRV, con le barre che rappresentano le incertezze relative. Questa è la forma d'onda più impegnativa per il sistema di misura dell'INRiM a causa della grande variazione di tensione in un breve periodo di tempo. Gli altri partecipanti al confronto sono anonimizzati. In Tabella 6 vengono mostrati i risultati del confronto. In questa tabella, l'errore normalizzato  $E_n$  è stato preso in considerazione per verificare che i risultati ottenuti da INRiM durante il confronto siano compatibili con il CRV. Per verificare la coerenza del confronto, è stato applicato il test del  $\chi^2$  risultando soddisfacente con  $\Pr(\chi^2) \geq 5\%$  [2].

Tabella 6 - Risultati del confronto per  $U_t$

Lab	$\Delta x_i$ (%)	$U(\Delta x_i)$ (%)	$E_n$
INRIM	0,55	1,03	0,53
Others	0,16	0,56	0,29
	-0,26	0,56	-0,46
	-0,42	0,39	-1,09
	0,63	0,56	1,13
CRV %	$U(\text{CRV})$ %	$\Pr(\chi^2)$ %	
0,3	0,28	6	

<sup>1</sup>Il dato si riferisce ad  $U_t$  in figura tuuttavia si sono indicati i corrispondenti punti con la notazione utilizzata in [2].

In Fig. 5 sono mostrati i risultati ricalcolati dopo la deconvoluzione:



**Fig. 5 – Risultati dopo ricalcolo con deconvoluzione per  $U_t^2$**

Si può osservare che le barre di incertezza relative all'INRiM sono ridotte. In Tabella 7 sono riportati i risultati numerici, dove l' $E_n$  dell'INRiM è inferiore a 1 mentre  $\text{Pr}(\chi^2)$  è del 5%. Pertanto, per il valore della tensione di prova i risultati sono stati soddisfacenti.

**Tabella 7 – Risultati dopo ricalcolo con deconvoluzione per  $U_t$**

Lab	$\Delta x_i$ (%)	$U(\Delta x_i)$ (%)	$E_n$
INRiM	0,53	0,87	0,60
Others	0,15	0,56	0,27
	-0,27	0,56	-0,48
	-0,44	0,39	-1,11
	0,62	0,56	1,10
<b>CRV %</b>	<b><math>U(\text{CRV})</math> %</b>	<b><math>\text{Pr}(\chi^2)</math> %</b>	
0,32	0,27	5	

<sup>2</sup> il dato si riferisce a  $U_t$ , nella figura tuttavia si sono indicati i corrispondenti punti con la notazione utilizzata in [2].

In Fig. 6 e In Tabella 8 sono riportati rispettivamente i risultati di  $T_1$  nel confronto e i risultati numerici. Si può osservare che i risultati dell'INRiM sono accettabili per il confronto, ma con un'incertezza maggiore rispetto agli altri partecipanti.

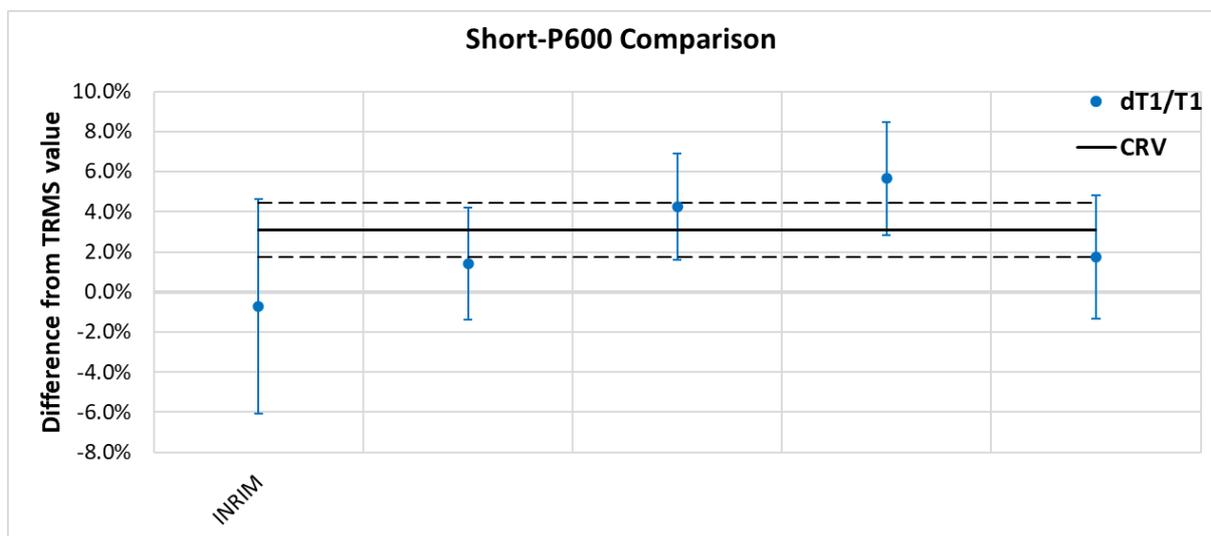


Fig. 6 - Risultati del confronto per  $T_1^3$

Tabella 8 - Risultati del confronto per  $T_1$

Lab	$\Delta x_i$ (%)	$U(\Delta x_i)$ (%)	$E_n$
INRiM	-3,83	5,19	-0,74
Others	-1,68	2,43	-0,69
	1,16	2,26	0,51
	2,56	2,45	1,04
	-1,35	2,77	-0,49
<b>CRV %</b>	<b><math>U(\text{CRV})</math> %</b>	<b>Pr (<math>\chi^2</math>) %</b>	
3,1	1,36	8	

In Fig. 7 sono mostrati i risultati dopo la deconvoluzione e si può osservare che le barre di incertezza dell'INRiM sono ridotte e la misura si trova all'interno delle linee tratteggiate.

<sup>3</sup> il dato si riferisce a  $T_1$ , nella figura tuttavia si sono indicati i corrispondenti punti con la notazione utilizzata in [2].

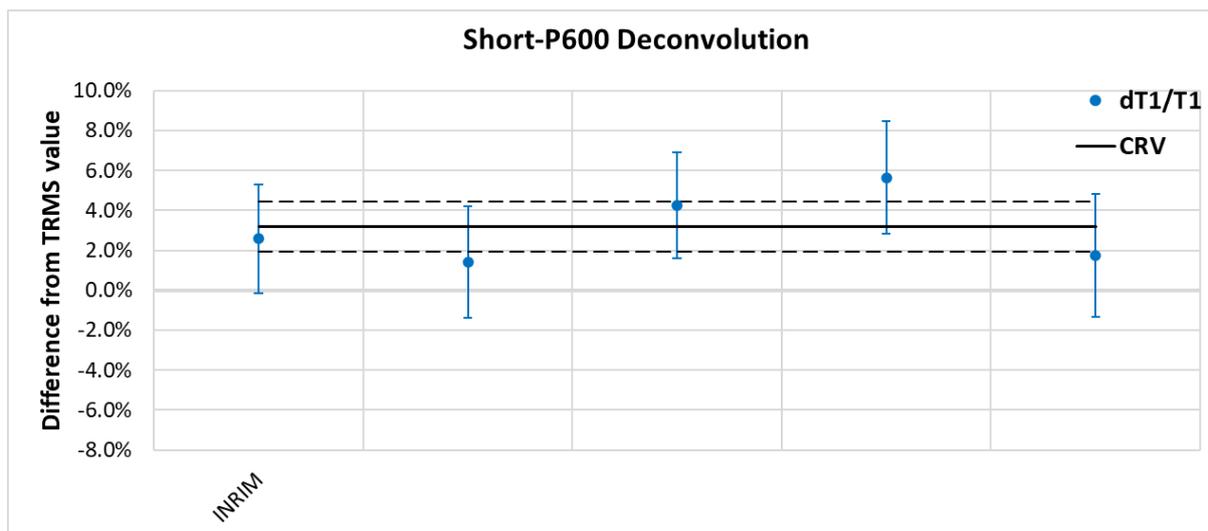


Fig. 7 – Risultati dopo ricalcolo con deconvoluzione per  $T_1$ <sup>4</sup>

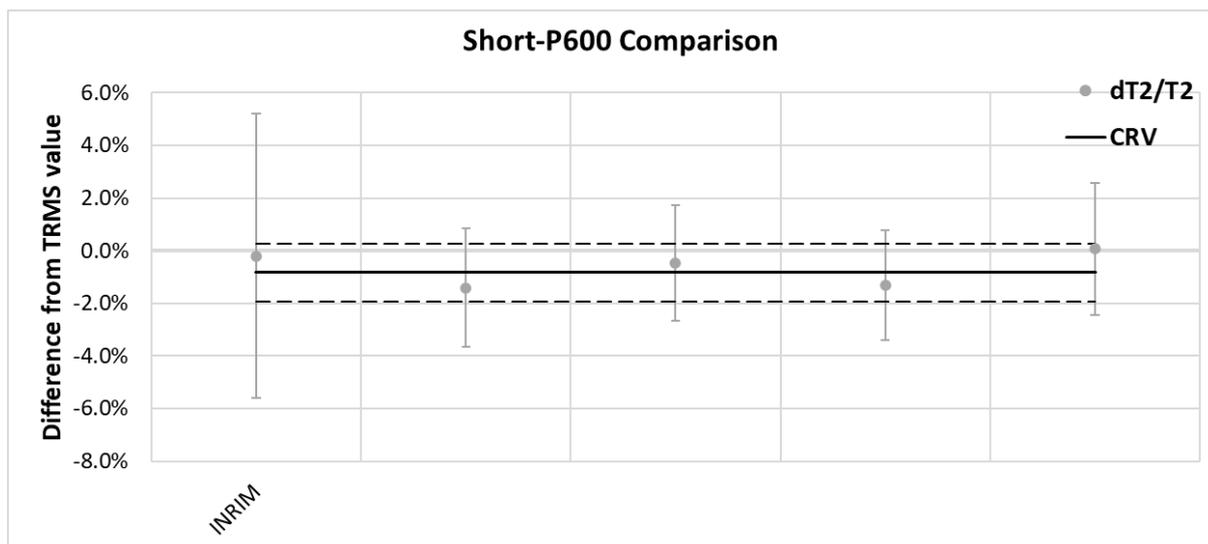
In

Tabella 9 sono riportati i risultati numerici ottenuti dopo la deconvoluzione. La tabella mostra che  $E_n$  è inferiore rispetto a prima, il che significa che il risultato è più affidabile. Essendo anche migliore la coerenza del confronto rispetto a prima, questo risultato per  $T_1$  può essere considerato altamente soddisfacente.

Tabella 9 – Risultati dopo ricalcolo con deconvoluzione per  $T_1$

Lab	$\Delta x_i$ (%)	$U(\Delta x_i)$ (%)	$E_n$
INRIM	-0,62	2,44	-0,25
Altri	-1,78	2,49	-0,72
	1,06	2,32	0,46
	2,46	2,50	0,98
	-1,45	2,82	-0,52
<b>CRV %</b>	<b>U(CRV) %</b>	<b>Pr (<math>\chi^2</math>) %</b>	
3,2	1,25	17	

<sup>4</sup> il dato si riferisce a  $T_1$ , nella figura tuttavia si sono indicati i corrispondenti punti con la notazione utilizzata in [2].



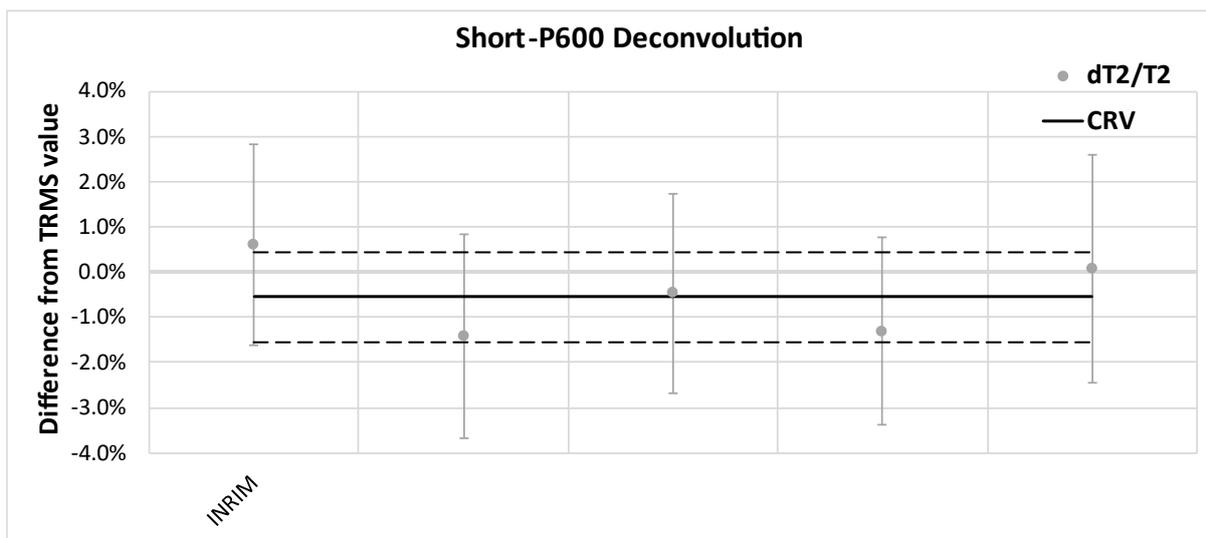
**Fig. 8 - Risultati del confronto per  $T_2^5$**

In Fig. 8 e in Tabella 10 sono riportati rispettivamente i risultati di  $T_2$  nel confronto e i risultati numerici. Si può osservare che anche in questo caso i risultati dell'INRiM sono accettabili per il confronto, ma con un'incertezza maggiore rispetto agli altri partecipanti.

**Tabella 10 - Risultati del confronto per  $T_2$**

Lab	$\Delta x_i$ (%)	$U(\Delta x_i)$ (%)	$E_n$
INRIM	0,62	5,28	0,12
Altri	-0,59	1,96	-0,30
	0,34	1,91	0,18
	-0,49	1,76	-0,28
	0,89	2,26	0,39
<b>CRV %</b>	<b>U(CRV) %</b>	<b>Pr (<math>\chi^2</math>) %</b>	
-0,82	1,10	89	

<sup>5</sup> il dato si riferisce a  $T_2$ , nella figura tuttavia si sono indicati i corrispondenti punti con la notazione utilizzata in [2].



**Figura 9 - Risultati dopo ricalcolo con deconvoluzione per  $T_2$ <sup>6</sup>**

In Figura 9 e in Tabella 11 sono riportati i risultati dopo l'applicazione del metodo con deconvoluzione per  $T_2$  e dalla figura si può vedere la riduzione significativa dell'incertezza dell'INRiM, valori confermati dalla tabella dove tutti i risultati risultano abbondantemente entro i limiti richiesti durante il confronto.

**Tabella 11 - Risultati dopo ricalcolo con deconvoluzione per  $T_2$**

Lab	$\Delta x_i$ (%)	$U(\Delta x_i)$ (%)	$E_n$
INRiM	1,16	1,99	0,58
Altri	-0,86	2,01	-0,43
	0,08	1,97	0,04
	-0,76	1,82	-0,42
	0,62	2,30	0,27
CRV	$U(\text{CRV})$	$\text{Pr}(\chi^2)$	
-0,55	1,00	65	

Le stesse considerazioni sono state fatte per le altre forme d'onda. Una conferma della affidabilità delle nuove incertezze proviene dall'analisi delle deviazioni dei valori deconvoluti dai corrispondenti valori CRV. Queste deviazioni possono essere trattate come componenti rettangolari dell'incertezza delle misure INRiM deconvolute a livello di fiducia  $2\sigma$  [12]. È stato verificato che tutte queste deviazioni risultavano inferiori alle nuove incertezze allo stesso livello di confidenza. Questo risultato può essere considerato una ulteriore convalida sia delle nuove incertezze delle misurazioni dell'INRiM con deconvoluzione, sia della strategia

<sup>6</sup>Il dato si riferisce a  $T_2$  nella figura tuttavia si sono indicati i corrispondenti punti con la notazione utilizzata in [2].

peculiare nella deconvoluzione stessa. Nelle Tabella 12 e Tabella 13 sono riportati il confronto dei valori deconvolti per le due forme d'onda più critiche.

**Tabella 12 - Confronto fra lo scarto dei risultati deconvolti dal CRV e le incertezze desiderate per l'impulso veloce a 600 kV**

Parametro	$\Delta x_i$ %	Incertezza desiderata %
$U_t$	0,53	0,9
$T_1$	-1,68	2
$T_2$	-0,62	1

**Tabella 13 - Confronto fra lo scarto dei risultati deconvolti dal CRV e le incertezze desiderate per l'impulso veloce a 400 kV**

Parametro	$\Delta x_i$ %	Incertezza desiderata %
$U_t$	-0,013	0,9
$T_1$	1,887	2
$T_2$	0,487	1

I componenti di incertezza  $s$  al livello di confidenza di  $1\sigma$  per  $U_t$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  e per il sistema di riferimento sono riportati in Tabella 14 per l'impulso veloce.

**Tabella 14 - Budgets delle nuove incertezze per  $U_t$ ,  $T_1$  e  $T_2$**

Componente	$u(U_t)$ %	$u(T_1)$ %	$u(T_2)$ %
Fattore di scala	0,22	0,44	0,22
Linearità	0,15	0,15	0,15
Comportamento dinamico	0,3	0,75	0,35
Stabilità a breve termine	0,1	0,15	0,1
Stabilità a lungo termine	0,1	0,20	0,1
Effetto della temperatura (5 °C)	0,04	0,16	0,16
Effetto prossimità	0	0	0
Software	0,15	0,43	0,08
<b>RSS</b>	<b>0,45</b>	<b>1,03</b>	<b>0,50</b>

Considerando un fattore di copertura  $k = 2$ , [12] le incertezze estese per i tre parametri al livello di fiducia del 95% sono:  $U(U_t) = 0,9\%$ ,  $U(T_1) = 2\%$  e  $U(T_2) = 1\%$ .

### B. Ricalcolo senza la Deconvoluzione

In questo caso si cerca la migliore incertezza possibile per le grandezze di interesse, il processo per effettuare il ricalcolo senza la deconvoluzione è il medesimo presentato in precedenza. Dalle analisi effettuate sul comportamento dinamico del sistema di misura si è calcolato che le migliori incertezze possibili sono quelle riportate in Tabella 15:

**Tabella 15 - incertezza estesa desiderata senza la deconvoluzione**

Parametro	Incertezza estesa (%)	
	Veloce ( $T_1 < 1,2 \mu s$ )	Lento ( $T_1 \geq 1,2 \mu s$ )
Tensione	200 ÷ 600kV	200 ÷ 600 kV
$U_t$	1%	0,5%
$T_1$	3%	
$T_2$	1%	

Si può notare come per quanto riguarda le forme d'onda veloci si è mantenuto l'1% per  $U_t$  in quanto si tratta già dell'incertezza migliore che si può ottenere allo stato attuale con questo sistema di misura senza l'implementazione della deconvoluzione, mentre per le forme d'onda lente si può raggiungere lo 0,5% anche senza deconvoluzione. Per quanto riguarda i parametri temporali, si evidenzia come, per  $T_2$ , l'incertezza dell'1% è un valore che si riesce a raggiungere anche senza la deconvoluzione, mentre per  $T_1$  la migliore incertezza ottenibile senza deconvoluzione è del 3%. Nelle Tabella 16, 17 e 18 vengono riportati i risultati ottenuti dal ricalcolo dei risultati con le nuove incertezze senza aver applicato il metodo di deconvoluzione sulla forma d'onda veloce "Short P400kV", rappresentativa dei risultati di tutte le forme d'onda veloci.

**Tabella 16 - Risultati dopo ricalcolo senza deconvoluzione per  $U_t$  per la forma d'onda "Short P400"**

Lab	$\Delta x_i$ (%)	$U(\Delta x_i)$ (%)	$E_n$
INRIM	0,44	0,98	0,45
Altri laboratori	-0,03	0,57	-0,05
	-0,47	0,58	-0,81
	-0,41	0,41	-1,00
	0,43	0,49	0,89
	0,45	0,57	0,79
CRV (%)	$U(CRV)$ (%)	Pr ( $\chi^2$ ) (%)	
0,35	0,25	6	

**Tabella 17 - Risultati dopo ricalcolo senza deconvoluzione per  $T_1$  per la forma d'onda "Short P400"**

Lab	$\Delta x_i$ (%)	$U(\Delta x_i)$ (%)	$E_n$
<b>INRIM</b>	-3,01	3,35	-0,898
<b>Altri laboratori</b>	-0,90	2,54	-0,36
	0,86	2,39	0,36
	3,01	2,56	1,18
	-0,05	2,17	-0,03
	-1,09	2,54	-0,43
<b>CRV (%)</b>	<b><math>U(\text{CRV})</math> (%)</b>	<b>Pr (<math>\chi^2</math>) (%)</b>	
2,36	1,13	11	

**Tabella 18 - Risultati dopo ricalcolo senza deconvoluzione per  $T_2$  per la forma d'onda "Short P400"**

Lab	$\Delta x_i$ (%)	$U(\Delta x_i)$ (%)	$E_n$
<b>INRIM</b>	0,19	2,04	0,10
<b>Altri laboratori</b>	-1,19	2,06	-0,58
	0,24	2,02	0,12
	-0,86	1,87	-0,46
	1,03	2,06	0,50
	0,72	2,06	0,35
<b>CRV (%)</b>	<b><math>U(\text{CRV})</math> (%)</b>	<b>Pr (<math>\chi^2</math>) (%)</b>	
-0,33	0,90	68	

Come nel paragrafo precedente i risultati sono risultati accettabili e questo comporta che si fossero dichiarate tali incertezze durante il confronto i risultati dell'INRiM sarebbero stati accettati senza compromettere i risultati degli altri laboratori. Nelle Tabella 19,20 e21 vengono riportati i risultati ottenuti dal ricalcolo dei risultati con le nuove incertezze senza aver applicato il metodo con la deconvoluzione sulla forma d'onda lenta denominata "Long P600kV", rappresentativa dei risultati di tutte le forme d'onda lente.

**Tabella 19 - Risultati dopo ricalcolo senza deconvoluzione per  $U_t$  per la forma d'onda "Long P600"**

Lab	$\Delta x_i$ (%)	$U(\Delta x_i)$ (%)	$E_n$
<b>INRIM</b>	0,35	0,50	0,71
<b>Altri laboratori</b>	-0,50	0,63	-0,79
	-0,07	0,58	-0,12
	0,21	0,49	0,44
	-0,56	0,58	-0,97
	0,62	0,45	1,36
	-0,16	0,78	-0,20
	-0,39	0,42	-0,93
	0,55	0,58	0,94
<b>CRV (%)</b>	<b><math>U(\text{CRV})</math> (%)</b>	<b>Pr (<math>\chi^2</math>) (%)</b>	
0,43%	0,23%	5%	

**Tabella 20 - Risultati dopo ricalcolo senza deconvoluzione per  $T_1$  per la forma d'onda "Long P600"**

Lab	$\Delta x_i$ (%)	$U(\Delta x_i)$ (%)	$E_n$
<b>INRIM</b>	-1,48	2,89	-0,51
<b>Altri laboratori</b>	-0,13	1,95	-0,07
	0,53	1,89	0,28
	-1,10	1,89	-0,58
	0,70	1,76	0,40
	3,17	1,23	2,57
	-0,88	2,74	-0,32
	0,68	1,90	0,36
	-0,26	2,31	-0,11
<b>CRV (%)</b>	<b><math>U(\text{CRV})</math> (%)</b>	<b>Pr (<math>\chi^2</math>) (%)</b>	
0,84	0,91	66	

**Tabella 21 - Risultati dopo ricalcolo senza deconvoluzione per  $T_2$  per la forma d'onda "Long P600"**

Lab	$\Delta x_i$ (%)	$U(\Delta x_i)$ (%)	$E_n$
<b>INRIM</b>	0,72	1,16	0,62
<b>Altri laboratori</b>	-0,84	1,20	-0,70
	1,28	1,29	0,99
	0,50	2,11	0,24
	0,63	1,12	0,56
	0,68	1,11	0,62
	3,62	2,24	1,61
	-0,68	0,83	-0,83
	0,68	1,64	0,41
<b>CRV (%)</b>	<b><math>U(\text{CRV})</math> (%)</b>	<b>Pr (<math>\chi^2</math>) (%)</b>	
-0,82	0,54	25	

Analizzando i risultati ottenuti con il ricalcolo effettuato per le forme d'onda lente si possono considerare accettabili le nuove incertezze, poiché anche in questo caso il ricalcolo ha fornito risultati accettabili per INRiM senza modificare i risultati degli altri partecipanti al confronto.

## Considerazioni Finali

Per migliorare le incertezze relative alle misure di alte tensioni impulsive di origine atmosferica sono state utilizzate diverse metodologie dove tutte hanno previsto una analisi approfondita del comportamento dinamico del sistema di misura di riferimento presente dentro il Laboratorio di Alte Tensioni e Forti Correnti dell'INRiM. I due metodi utilizzati, con e senza deconvoluzione, hanno visto l'impiego di un metodo comune, il ricalcolo dei risultati ottenuti durante il confronto internazionale EURAMET.EM-S42 [2], grazie il quale è stato possibile determinare se i risultati ottenuti fossero accettabili. La scelta di utilizzare il sistema con il metodo della deconvoluzione è la soluzione con l'incertezza migliore, questo comporta il passaggio ulteriore della deconvoluzione, con conseguente onere aggiuntivo in termini di tempo e capacità di calcolo. Per questo motivo si è scelto di portare avanti entrambe le possibili soluzioni. In questo modo è possibile utilizzare il sistema più appropriato in funzione dell'incertezza richiesta volta per volta nelle attività di taratura, presso laboratori di prova o su campioni di riferimento.

## Riferimenti

- [1] IEC standard 60060-1: "High voltage test techniques- Part 1: General definitions and test requirements", ed. 3.0, 2010-09-29.
- [2] J Hällström, A-P Elg, J Havunen and F Garnacho, "Supplementary comparison EURAMET.EM-S42, comparison of lightning impulse (LI) reference measuring systems," *Metrologia*, vol. 58 1A DOI 10.1088/0026-1394/58/1A/01001.
- [3] S.E. Caria, P.E. Roccatò, "Improvement of calibration capabilities with an a posteriori evaluation of the lightning impulse international comparison EURAMET.EM-S42," in. *IMEKO TC4 2022 Int. Symp.*, Brescia, Italy, 2022, pp. 171–176.
- [4] IEC 61083-2 Instruments and software used for measurement in high-voltage and high current tests - Part 2: Requirements for software for tests with impulse voltages and currents, 2013.
- [5] IEC 60060-2 High-voltage test techniques - Part 2: Measuring systems, 2010–11.
- [6] Z. Matyas and M. Aro, "HV Impulse Measuring Systems Analysis and Qualification by Estimation of Measurement Errors via FFT, Convolution, and IFFT," *IEEE Trans. Instrum. Meas.* vol. 54, 5, pp. 2013-2019, October 2005, doi: 10.1109/TIM.2005.85367453674.
- [7] K. Schon, W. Gitt "Reconstruction of high impulse voltages considering the response of the measuring system," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. PAS-101, 10, pp. 4147–4155 October 1982.
- [8] J. Havunen, J. Hällström, A. Bergman and A. E. Bergman, "Using deconvolution for correction of non-ideal step response of lightning impulse digitizers and measurement systems," *20th Int. Symp. High Voltage Eng.*, Buenos Aires, Argentina, 2017, <https://zenodo.org/record/3568022>.
- [9] Jussi Havunen and Jari, "Hällström, "Reference Switching Impulse Voltage Measuring System Based on Correcting the Voltage Divider Response with Software," *IEEE Trans. Instrum. Meas.* vol. 70 1006008, 2021, doi: 10.1109/TIM.2021.3063753.
- [10] Hällström, Y. Chekurov and M. Aro, "A Calculable Impulse Voltage Calibrator for Calibration of Impulse Digitizers", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 52, 2, pp 400–403, april2003.
- [11] Wei Yan, Wei Zhao, and Yi Li, "Effect of Step Response Measurement Arrangement on the Correction of Ultrahigh-Voltage Lightning Impulse Dividers," *IEEE Trans. Instrum. Meas.* vol. 68 6, pp. 1666–1670, June 2019. doi: 10.1109/TIM.2019.290013.
- [12] JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement First edition