

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Měření částečných výbojů v průmyslové výrobě**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2014/2015

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Václav VLÁŠEK**  
Osobní číslo: **E12B0120K**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Měření částečných výbojů v průmyslové výrobě**  
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište účinky částečných výbojů na izolační systém elektrických zařízení.
2. Popište měřicí metody částečných výbojů.
3. Proveďte měření částečných výbojů na souboru zhášecích tlumivek.
4. Proveďte vyhodnocení měření.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

1. Diagnostika elektrických zařízení, Mentlík a kol., BEN 2008.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Ulrych**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Prof. Ing. Václav Kús, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na řešení problematiky vzniku částečných výbojů v elektrických strojích. Popisuje metodiku měření a vyhodnocování výbojové činnosti na zhášecích tlumivkách vyráběných ve firmě EGE, spol. s r.o. sídlící v Českých Budějovicích. Cílem této práce bylo zjištění reprodukovatelnosti technologických procesů a postupů při výrobě zhášecích tlumivek.

## **Klíčová slova**

Částečné výboje (ČV), zhášecí tlumivka, zdánlivý náboj, počáteční napětí částečných výbojů, zhášecí napětí částečných výbojů, koróna, kalibrace, izolační hladina, zpracování naměřených ČV na PC.

## **Abstract**

The presented thesis is focused on solution of problems of partial discharges in electrical machines. Describes the methodology of measurement and evaluation of partial discharge activity on ARC suppression coil manufactured in the company EGE, spol. s r.o. based in České Budějovice. The aim of this study was to determine the reproducibility of technological processes and procedures in the production of ARC suppression coil.

## **Key words**

Partial discharge(PD), ARC suppression coil, apparent charge, partial discharge inception voltage, partial discharge extinction voltage, corona, calibration, level of system insulation, PC processing.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

.....  
podpis

V Plzni dne 5.6.2015

Václav Vlášek

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>1 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE (ČV) - ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
1.1 CO JSOU ČV, KDE VZNIKAJÍ A PROČ JE MĚŘÍME .....	10
1.2 NEJČASTĚJŠÍ DRUHY ČV A JEJICH PRŮBĚHY .....	11
1.2.1 Vnitřní a povrchové ČV.....	11
1.2.2 Vnější ČV.....	13
1.3 ÚČINKY ČV NA IZOLAČNÍ SYSTÉM ELEKTRICKÝCH STROJŮ .....	15
1.4 PARAMETRY ČV.....	16
1.4.1 Základní parametry ČV.....	16
1.4.2 Vývojové (porovnávací) parametry ČV.....	19
1.4.3 Typické obrazce ČV .....	19
<b>2 METODY PRO MĚŘENÍ ČV</b> .....	<b>22</b>
2.1 NEELEKTRICKÉ METODY MĚŘENÍ ČV .....	22
2.1.1 Akustická detekce.....	22
2.1.2 Optická detekce.....	23
2.1.3 Chemická detekce.....	23
2.2 ELEKTRICKÉ METODY MĚŘENÍ ČV.....	24
2.2.1 Globální metoda měření ČV .....	25
2.2.2 Měřicí impedance pro snímání ČV .....	27
2.3 KALIBRACE.....	28
2.4 MĚŘICÍ METODA A ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ ČV POUŽÍVANÁ VE FIRMĚ EGE .....	30
<b>3 NAMĚŘENÁ DATA ZE VZORKU MĚŘENÍ ZHÁŠECÍCH TLUMIVEK VYRÁBĚNÉ FIRMOU EGE</b> .....	<b>33</b>
3.1 ÚVOD.....	33
3.2 ZKUŠEBNÍ METODIKA PRO VYHODNOCENÍ ČV .....	33
3.3 PŘEHLED ZKOUŠENÝCH ZAŘÍZENÍ.....	35
3.4 NAMĚŘENÁ DATA .....	35
3.4.1 Výsledky měření ze zkoumané tlumivky ASR 10 V, v.č.: 8949.....	35
3.4.2 Výsledky měření ze zkoumané tlumivky ASR 10 V, v.č.: 9057.....	38
3.4.3 Výsledky měření ze zkoumané tlumivky ASR 6.3 V, v.č.: 9201.....	40
3.4.4 Výsledky měření ze zkoumané tlumivky ASR 6.3 V, v.č.: 9226.....	43
3.4.5 Výsledky měření ze zkoumané tlumivky ASR 15 V, v.č.: 9225.....	46
<b>4 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT</b> .....	<b>49</b>
4.1 VYHODNOCENÍ ZHÁŠECÍCH TLUMIVEK TYPU ASR 10 V .....	49
4.2 VYHODNOCENÍ ZHÁŠECÍCH TLUMIVEK TYPU 6.3V .....	50
4.3 VYHODNOCENÍ ZHÁŠECÍ TLUMIVKY TYPU ASR 15V .....	50
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>52</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>53</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>

## Seznam symbolů a zkratek

<i>VVN</i>	velmi vysoké napětí
<i>ČV</i>	částečný výboj
<i>UHF</i>	oblast měření v ultra vysokých frekvencích
<i>KJ</i>	kulové jiskřiště
$U_i$	amplituda zápalného napětí [V]
$U_e$	amplituda zhášecího napětí [V]
$q$	zdánlivý náboj [pC]
$C_1$	kapacita plynové dutinky [F]
$C_2$	kapacita zbytkové části zdravé izolace [F]
$C_3$	kapacita zbytku dielektrika [F]
$n$	četnost impulsů [ $s^{-1}$ ]
$I$	střední proud částečných výbojů [A]
$D$	střední kvadratický součet [ $C^2/s$ ]
$P$	výkon částečných výbojů [W]
$k_C$	hodnota kalibračního náboje [pC]
$C_a$	kapacita testovaného vzorku [F]
$C_k$	vazební kapacita [F]
$Z_m$	snímací impedance [ $\Omega$ ]
<i>CD</i>	vazební zařízení
<i>CC</i>	spojovací stíněný kabel
<i>MI</i>	detektor částečných výbojů
<i>OL</i>	optický kabel



## Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na princip vzniku částečných výbojů, jejich účinků na izolační systém elektrických strojů.

Text je rozdělen do čtyř částí; první se zabývá obecně vznikem a účinky částečných výbojů, druhá se zabývá metodami měření ČV, třetí rozbořem naměřených dat na vzorku zhášecích tlumivek vyráběné firmou EGE a poslední se zabývá vyhodnocením naměřených hodnot.

# 1 Částečné výboje (ČV) - úvod

Jako významný nástroj pro zabezpečení jakosti vyráběných výrobků v oblasti silnoproudé elektrotechniky, se měření částečných výbojů (dále jen ČV), za posledních cca 60 let stalo neodmyslitelnou součástí zkušební techniky. Tento diagnostický nástroj dokáže odhalit nedostatky v izolačním systému, které jsou jinými metodami prakticky nezjistitelné. Stěžejní norma pro zajištění správného a reprodukovatelného měření ČV je v současnosti v naprosté většině případů používá na IEC 60270[1]. V současné době se stále více prosazuje měření ČV v oblasti UHF. Tato metoda je využívána zejména pro provozní diagnostiku a trvalý monitoring kabelů, transformátorů, zapouzdřených systému apod.

## 1.1 Co jsou ČV, kde vznikají a proč je měříme

V názvosloví techniky vysokého napětí lze rozlišit úplný a neúplný přeskok napětím namáhané izolace. Při úplném přeskoku jsou obě elektrody spojeny nízkou odporovým výbojem a celá izolace je tímto výbojem proražena. Při neúplném průrazu je výbojem proražena pouze část izolace, či že se vytvoří pouze částečný průraz a zbytek zdravé izolace má ještě dostatečnou elektrickou pevnost a napěťové namáhání vydrží. V případě, že se jedná o částečný průraz v plynném izolantu, hovoříme o částečném výboji. Koróna je forma částečného výboje, který se objevuje v plynném prostředí kolem vodičů, jež jsou vzdálené od pevné nebo kapalné izolace. Termín koróna by neměl být používán jako obecný termín pro všechny formy částečných výbojů.[2] Podle normy[1] je částečný výboj lokalizovaný elektrický výboj, který pouze částečně přemosťuje izolaci mezi vodiči a který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče. Částečné výboje jsou obvykle důsledkem koncentrace lokálního elektrického namáhání v izolaci nebo na povrchu izolace a vytvářejí proudové (napěťové) impulsy s dobou trvání mnohem menší než  $1\mu\text{s}$ . ČV lze tedy jinými slovy popsat jako výboje, které překlenou vzdálenost mezi dvěma elektrodami pouze částečně a zbytek izolace je schopen udržet celé provozní, nebo zkušební namáhání. ČV mohou vycházet přímo z jedné z elektrod, nebo mohou probíhat i v dutině izolantu. Impuls částečného výboje je proudový nebo napěťový impuls vznikající jako výsledek přítomnosti částečného výboje objevujícího se ve zkoušeném objektu. Impuls je měřen prostřednictvím vhodných detekčních obvodů, které jsou začleněny do zkušební (měřicího) obvodu. ČV silně snižují spolehlivost a životnost přístrojů a systémů, proto jsou tyto výboje nevídané a mají zejména tyto nedobré následky:

Sníženou životnost dielektrik. Přehřátí a bombardování elektrony a ionty ničí izolační materiál.

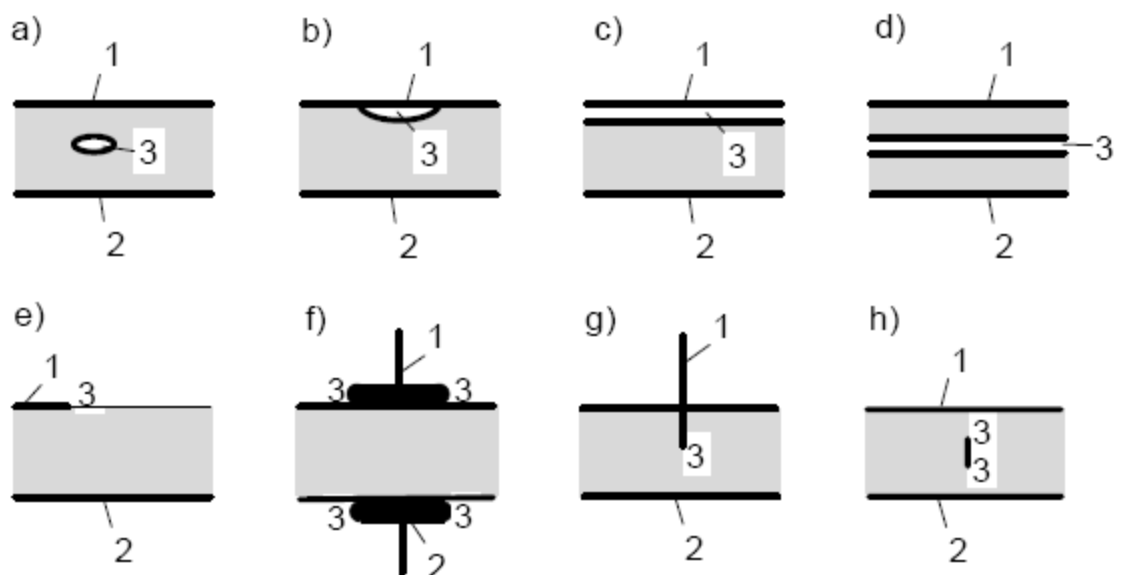
Impulzy vyvolané částečnými výboji v proudových obvodech přístrojů mají velice strmé čelo a opakují se s vysokým kmitočtem a s takovou amplitudou, že ruší signály elektrických spojů a řízení (např. rušení rozhlasu)

## 1.2 Nejčastější druhy ČV a jejich průběhy

Podle[2] můžeme částečné výboje zhruba rozdělit na vnější, vnitřní a povrchové (klouzavé) částečné výboje. Vnější částečné výboje jsou částečnými výboji v plynech v okolí elektrod malých poloměrů nebo zakřivení, jako jsou například doutnavé výboje či korónové výboje. Vnitřní částečné výboje jsou částečné výboje v plynech, obklopené pevným nebo kapalným dielektrikem, jako jsou například výboje v plynných dutinkách v pevném dielektriku. Povrchové částečné výboje se mohou vyskytnout v okolí elektrod na rozhraní pevného a plynného dielektrika, například klouzavé výboje.

### 1.2.1 Vnitřní a povrchové ČV

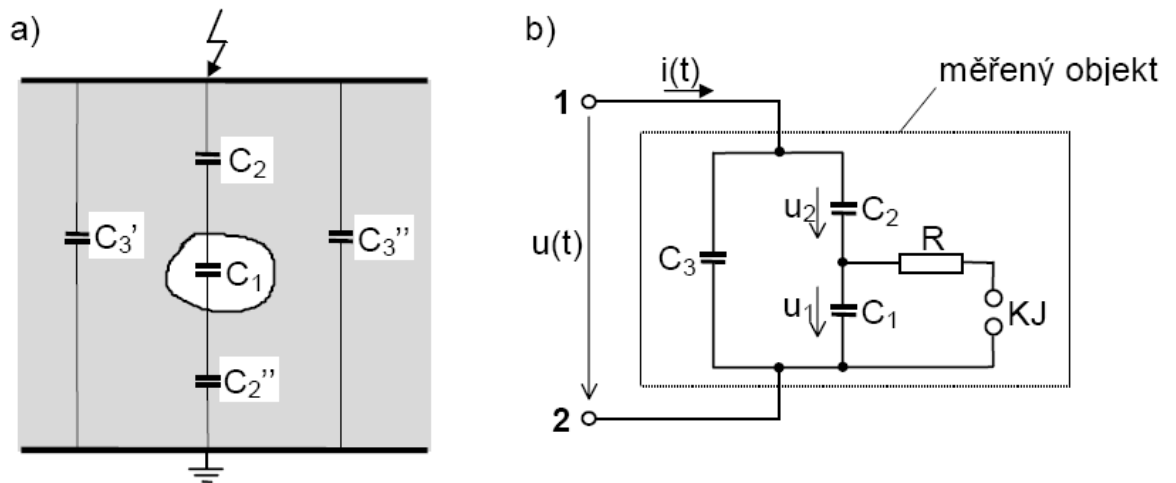
Typické elektrodové uspořádání, na které lze vnitřní a povrchové částečné výboje charakterizovat je možno vidět na obr. 1.



Obr. 1 Typické elektrodové uspořádání pro ČV[2]

Elektrody jsou znázorněny číslicemi 1 a 2, oblasti výbojové činnosti ČV jsou označeny číslicí 3. Pevné dielektrikum, obsahující plynou dutinku (např. vytvořenou při lití epoxidové izolace) je na obrázku 1a. Na obrázku 1b je typický příklad povrchové dutinky, která je způsobena odtržením izolace od elektrody. Na obrázcích 1c a 1d je možno vidět mezeru, která je mezi elektrodou a pevným izolantem, nebo uvnitř izolantu vzniklou tzv. delaminací izolace. Typické ČV objevující se na hranách elektrod, rovnoběžně s povrchem izolantu (povrchové, nebo klouzavé výboje) jsou na obrázcích 1e a 1f. Dva typy uspořádání jehlové elektrody v pevném či kapalném izolantu jsou na obrázcích 1g a 1h.

Náhradní schéma a jednoduchý model charakterizující vnitřní ČV, tzv. troj kapacitní model můžeme vidět na obr. 2.

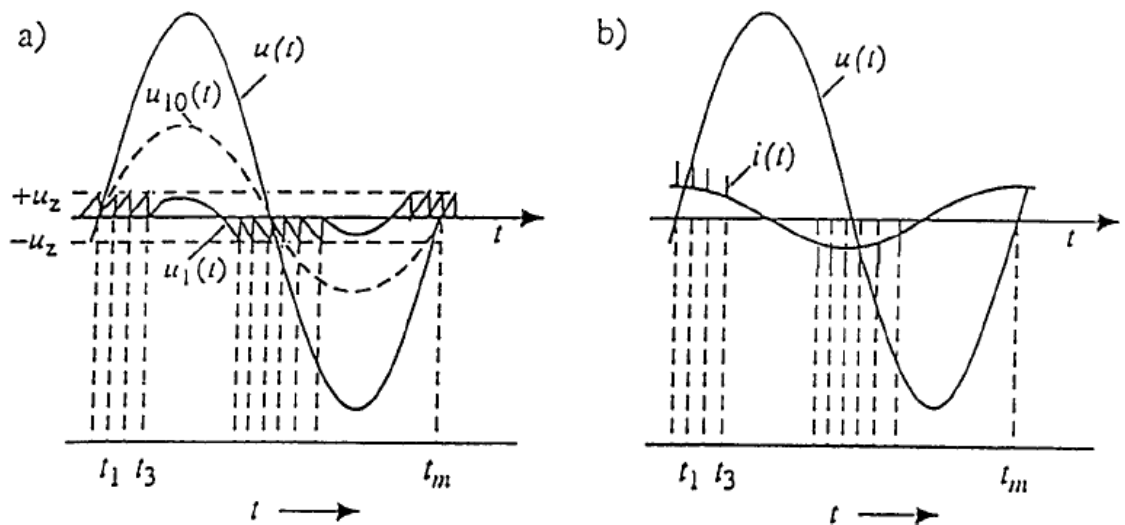


Obr. 2 Jednoduchý model a náhradní schéma charakterizující ČV [2]

Na obr.2a je schematický obrázek pevného dielektrika s vnitřní plynovou dutinkou a na obr.2b je jeho zjednodušené náhradní schéma. Kde  $C_1$  je kapacita plynové dutinky a  $C_2$  je kapacita zbytkové části zdravé izolace v sérii s dutinkou (sériová kombinace kapacit  $C_2'$  a  $C_2''$ ).  $C_3$  je poměrně velká kapacita zbytku dielektrika (paralelní kombinace  $C_3'$  a  $C_3''$ ). Kulové jiskřiště KJ připojené ke kondenzátoru  $C_1$  představuje v náhradním obvodu přeskok ve vzduchové mezerce při překročení její elektrické pevnosti. Odpor  $R$  symbolizuje odpor výbojové cesty po přeskoku na KJ, tedy odpor cesty proudu výboje v oblasti vybíjených plošek povrchu dutinky a odpor dráhy výboje. Tento děj, v prostorových poměrech, proběhne řádově za jednotky ns. Pokud na svorky vzorku (objektu) 1 a 2 přiložíme střídavé napětí  $u(t)$  a za předpokladu, že nedojde k přeskoku v dutince (na KJ), je průběh napětí  $u_{10}(t)$  na kondenzátoru  $C_1$  dán vztahem:

$$u_{10}(t) = \frac{C_2}{C_1 + C_2} u(t) \quad (1)$$

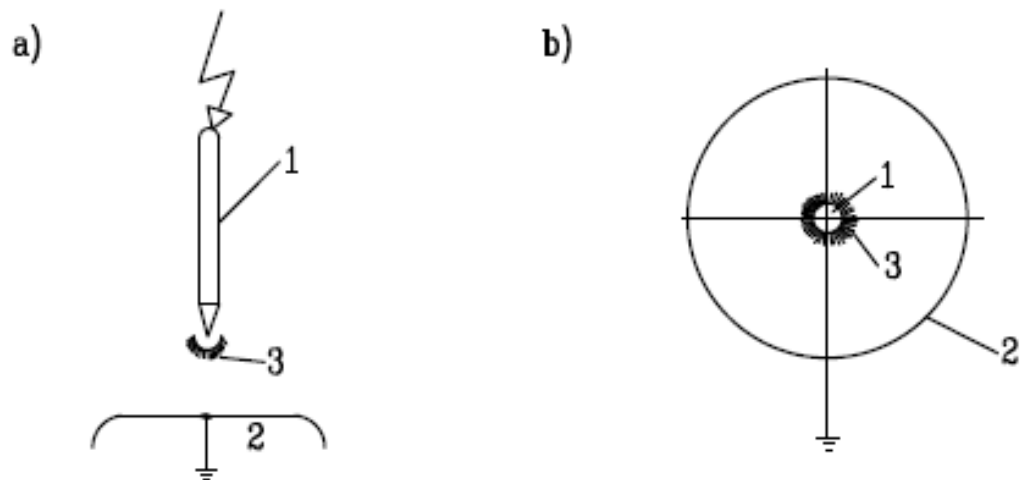
Časový průběh sinusového napětí  $u(t)$  a fiktivního napětí  $u_{10}(t)$  na dutince bez přeskoaku je na obr.3a.



Obr. 3 Časové průběhy napětí a proudů (vnitřní ČV)

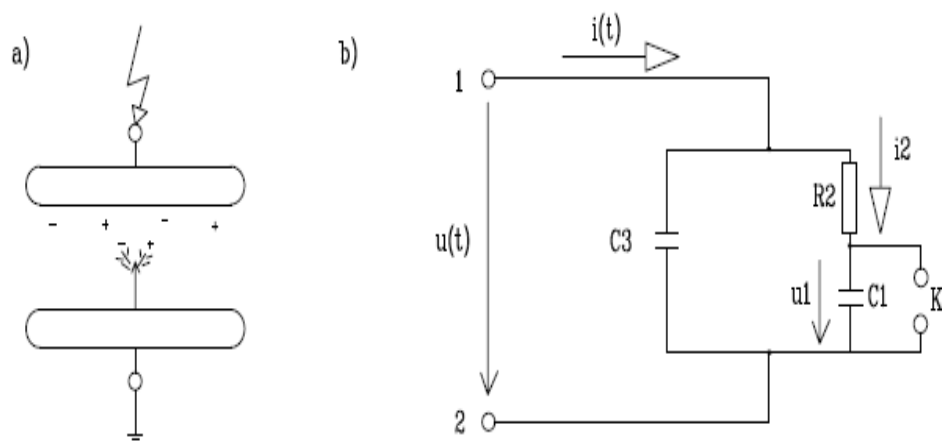
### 1.2.2 Vnější ČV

Vnější ČV se vyskytují obvykle na hranách nebo na malých poloměrech elektrod, které se nacházejí v plynném prostředí. Pro vnější ČV je typické uspořádání typ hrot-deska (viz obr.4a), kde se ČV objevují na ostrém zakončení elektrody. Jiným klasickým uspořádáním je koncentrické (koaxiální) uspořádání elektrod patrného z obrázku 4b. Číslicemi 1 a 2 jsou označeny elektrody a číslicí 3 je označena oblast ČV.



Obr. 4 Obvyklá elektrodová uspořádání pro vnější ČV

Zjednodušené náhradní schéma elektrodového uspořádání hrot-deska s vnějšími ČV znázorňuje obr. 5. Kondenzátor  $C_1$  představuje kapacitu vzduchového prostoru, který je vždy úplně zkratován, pokud dojde k částečnému výboji, tj. když napětí dosáhne přeskokové hodnoty (na obr.5b znázorněno přeskokem na kulovém jiskřišti KJ). Vytvořený náboj na hrotu výboje se pohybuje vlivem elektrického pole k elektrodě opačné polaroty a jeho vodivost charakterizuje odpor  $R_2$  v náhradním obvodu. Kondenzátor  $C_3$  je potom paralelní kapacita elektrodového uspořádání.



Obr. 5 Náhradní schéma pro vnější ČV

Z náhradního obvodu plyne, že vnější ČV se objevují v širokém spektru hodnot v oblasti zvýšené intenzity elektrického pole, v závislosti na okamžité hodnotě přiloženého napětí. Na okamžité hodnotě intenzity elektrického pole závisí velikost a typ ČV. V oblastech s nižší intenzitou elektrického pole, než je hodnota prahová pro vznik ČV, se potom ČV nevyskytují.

### 1.3 Účinky ČV na izolační systém elektrických strojů

Pro všechny druhy částečných výbojů jsou charakteristické destruktivní účinky na izolační systém. Výboje v dielektriku mohou mít účinky elektrické, erozivní, chemické a tepelné.

**Elektrické účinky:** Vznikne-li v dutince oblouk, jeho následkem se může vytvořit vodivá dráha. Při vysokých intenzitách elektrického pole může koncentrace elektrického pole v tomto místě způsobit čistě elektrický průraz a vodivá dráha se tak může postupně šířit dielektrikem. Destruktivní účinek vyvinují také ionty a elektrony bombardováním stěny dutinky,

**Erozivní účinky:** Výboje v dielektriku, obzvláště bombardování stěn dutinky ionty a elektrony, způsobují erozi stěn dutinky. Dutinka se postupně zvětšuje a při pokračující erozi může dojít k průrazu celého dielektrika,

**Chemické účinky:** Pokud dutinky obsahují kyslík, vytvářejí výboje v dutince ozón, který zvětšuje oxidační účinky. Chemickou destrukci dielektrika mohou způsobit i produkty rozkladu některých izolantů při výbojích. Z hlediska možnosti vzniku tepelného průrazu dielektrika, mohou produkty rozkladu pronikat do pevného dielektrika a vytvářet tak vodivější oblasti,

**Tepelné účinky:** Opakovaným působením částečných výbojů se dielektrikum otepluje a tím klesá jeho hladina napětí tepelného průrazu, tzv. tepelná nestabilita,

Měření ČV se tak stalo velmi aktuální téma, protože všechny tyto účinky jsou velmi nepříjemné, vzhledem k tomu, že nedokážeme vyrobit dielektrika bez nehomogenit či jiných vad.

I když se při výrobě izolačních materiálů a systémů provádí kontrola a dodržování technologických procesů, nelze zcela vyloučit vznik povrchových, či objemových nehomogenit, které mohou být zdrojem ČV. Ačkoliv jsou ČV relativně málo energeticky náročné, mají, hlavně svým opakováním negativní vliv na izolaci, tzn. zkracují především její životnost a postupně snižují její elektrickou pevnost až do průrazu dielektrika. ČV v pevných či kapalných izolantech lze obecně považovat za nebezpečné a stupeň jejich nebezpečnosti závisí na typu materiálu a umístění zdroje výbojové činnosti. Tímto pohledem lze ČV ve venkovní vzduchové izolaci chápat jako méně nebezpečné, oproti ČV v kabelech. Nevhodným návrhem elektrického uspořádání nebo přítomností cizích (obvykle kovových) částic mohou vznikat v izolačním oleji lokální nehomogenity, které také mohou vést až ke vzniku ČV. Touto činností pak může docházet k lokálnímu přehřátí, což vede k degradaci izolačního oleje. Tradiční pevná dielektrika jako je slída či porcelán jsou velmi odolná, na rozdíl od plastů, jako polyetylén (PE), či polytetrafluóretylén (PTFE, teflon), které jsou velmi citlivé na ČV. Proto je důležité s tímto počítat, pokud plasty použijeme např. v PVC kabelech. U izolačních olejů se může projevit přítomnost cizích částic především tím, že vznikají různé sloučeniny a dochází k degradaci media a je nutné kontrolovat také složení uvolňovaných plynů. Různé druhy výbojů mají vliv na druh uvolňovaných plynů.

## 1.4 Parametry ČV

Pro základní vyhodnocení intenzity výbojové činnosti se používají základní parametry ČV, díky nimž lze projevy ČV kvantifikovat. Pokud se provádí měření ČV periodicky na tomtéž elektrickém zařízení (či na podobném druhu elektrických zařízení) zajímají nás parametry porovnávací, ve kterých se dají sledovat změny či trendy výbojové činnosti. Pro zjištění typu výbojové činnosti se dají použít parametry vztahující se k fázovému úhlu napájecího napětí, tzv. obrazce ČV.

### 1.4.1 Základní parametry ČV

V plynném, či kapalném dielektriku, mohou ČV vykazovat kromě elektrických také neelektrické efekty, které lze pozorovat i kvantifikovat. Především může jít o efekty optické, zvukové a chemické. Zvukové a optické efekty mohou být patrné zvláště v případě vnějších ČV a klouzavých výbojů. Užitím těchto diagnostických metod vyžaduje speciální přístrojovou techniku, jako jsou fotonásobiče, přístroje pro noční vidění, či směrové mikrofony pracující ve slyšitelném, či ultrazvukové oblasti. Použitím chemických



diagnostických metod, je pro poměrně malou energii ČV, omezeno především na izolační systémy, které jsou vystaveny dlouhodobým účinkům ČV, jako např. olejové náplně transformátorů apod.

Elektrické metody měření ČV, jsou na rozdíl od metod neelektrických v praxi mnohem více rozšířeny a to především z důvodu větší citlivosti a určování množství ČV. Základní elektrické parametry ČV jsou:

**Zdánlivý náboj:** Označuje se  $q$  a podle [1] je to takový unipolární náboj, který, je-li injektován ve velmi krátkém čase mezi svorky zkoušeného objektu v předepsaném zkušebním obvodu, by měl na měřicím přístroji způsobit stejnou výchylku, jako vlastní proudový impuls ČV. Udává se v pC a nerovná se množství náboje lokálně působícího v místě výboje (který nelze být přímo měřen), vztahy těchto nábojů mohou být pro různé ČV ve stejném objektu rozdílné. V mezinárodním měřítku se zdánlivý náboj stal základním diagnostickým parametrem pro měření a vyhodnocování ČV. Při kusových (rutinních) měřeních se obvykle zjišťuje maximální hodnota zdánlivého náboje za periodu napájecího napětí,

**Četnost impulsů:** Jedná se o poměr mezi celkovým počtem impulsů ČV zaznamenaných ve vybraném časovém intervalu za dobu trvání tohoto intervalu [1]. Označuje se  $n$  a udává se v  $s^{-1}$ . V praxi se ale většinou uvažuje pouze s impulsy nad určitou úrovní, nebo v rámci úrovní předepsaného rozsahu,

**Střední proud částečných výbojů:** Označuje se  $I$  a je představen jako součet absolutních hodnot zdánlivých nábojů za určitý časový interval  $T$ , vydělený délkou tohoto intervalu. Udává se v coulombech za sekundu nebo v ampérech resp. miliampérech,

$$I = \frac{1}{T_{ref}} \sum_{i=1}^m |q_i| \quad (2)$$

Pokud mají všechny výboje stejnou velikost zdánlivého náboje  $q$ , zjednoduší se vztah na:

$$I = nq \quad (3)$$

**Střední kvadratický součet:** Značí se  $D$  a udává součet druhých mocnin hodnot jednotlivých úrovní zdánlivých nábojů  $q_i$  za určitou délku časového intervalu  $T$  vydělený tímto intervalem. Udává se v  $C^2$  za sekundu a je možné jej určit přímým měřením nebo výpočtem z naměřených hodnot  $q_i$  podle vztahu

$$D = \frac{1}{T_{ref}} \sum_{i=1}^m q_i^2 \quad (4)$$

kde  $m$  je počet výbojů v intervalu  $T_{ref}$ . Pokud mají všechny výboje stejnou velikost  $q$ , zjednoduší se vztah na

$$D = nq^2 \quad (5)$$

**Výkon částečných výbojů:** Značí se  $P$  a je roven střední hodnotě výkonu impulsů ČV přivedeného mezi svorky zkoušeného objektu po dobu trvání výbojové činnosti,

$$P = \frac{1}{T_{ref}} \sum_{i=1}^m q_i u_i \quad (6)$$

kde  $u_i$  jsou okamžité hodnoty testovacího napětí, při kterých nastali částečné výboje o velikosti  $q_i$ . Výkon ČV je vyjádřen ve W, resp. mW a jeho velikost lze také určit přímým měřením. Při střídavém napětí může nastat situace, kdy energie jednotlivých výbojů (součin  $q_i u_i$ ) nabude záporných hodnot a to v případě, že jsou  $q_i$  a  $u_i$  opačné polarity. Tento diagnostický parametr se používá jako doplňkový, pro hodnocení intenzity ČV.

**Zkušební napětí ČV:** Je takové předepsané napětí, které je zkušebním postupem stanovené a během něhož by neměl zkoušený objekt vykazovat ČV překračující předepsanou mez. Tato mez se bere jako nejvyšší hodnota prezentována libovolným diagnostickým parametrem (obvykle  $q$ ) a je pro konkrétní zařízení určena příslušnou technickou komisí,

**Počáteční napětí ČV (Inception voltage PD):** Je tzv. zapalovací napětí ČV a jde o hodnotu nejnižšího zkušebního napětí, při kterém jsou ve zkoušeném objektu pozorovány opakující se ČV za předpokladu, že zkušební napětí je plynule zvyšováno z určité počáteční

nízké hodnoty do okamžiku zaznamenání výskytu těchto výbojů. Značí se  $U_i$  a udává se ve V, resp. kV,

**Zhášecí napětí ČV (Extinction voltage PD):** Jedná se o tzv. zhášecí napětí ČV a jde o napětí, při kterém se ve zkoušeném objektu přestávají objev opakuující se výbojová činnost, za předpokladu, že je zkušební napětí plynule snižováno z hodnoty vyšší, až do doby, kdy se ČV stanou neměřitelnými. Značí se  $U_e$  a udává se ve V, resp. kV,

#### 1.4.2 Vývojové (porovnávací) parametry ČV

Pro zamezení rizik spojených s havárií vysokonapěťových elektrických zařízení je vhodné sledovat vývoj (rozvoj) výbojové činnosti v závislosti na určitém čase. Tzn. porovnávat aktuální naměřená data diagnostických parametrů zařízení s hodnotami z minulých měření, popř. s hodnotami naměřenými na podobných či stejných strojích. Tyto hodnoty jsou obvykle získávány při vyhodnocování off-line měření (např. při revizi stroje) vyneseny do grafů a v závislosti na přiloženém napětí  $U$  jsou tyto křivky zpracovány. Při výskytu velkých odchylek lze též konstatovat přítomnost ČV v izolačním systému.

#### 1.4.3 Typické obrazce ČV

Při měření výbojové činnosti můžeme rozlišit několik základních typů ČV. Podle umístění ČV na křivce napájecího napětí, tj. podle fázového úhlu (fázového posunu) ČV, lze usuzovat na druh výbojové činnosti a určit tak jeho povahu a místo výskytu (zřídlo výbojové činnosti).[2]

Na analogových měřicích zařízení jsou obrazce ČV zobrazeny jako Lissajousovy obrazce napájecího napětí se superponovanými proudovými impulsy na sinusovce napájecího napětí. V dnešní době digitální techniky je více preferováno zobrazení výbojové činnosti na rozvinuté periodě sinusového zkušebního napětí. V tab. 1 můžeme vidět nejzákladnější typy obrazců ČV

Tab.1 Základní typy obrazců ČV [4]

Typ	Osciloskopický obraz	Popis	Typ výboje
A		<p>Pulzy stejné velikosti v jedné půlperiodě, symetricky okolo napětového maxima.</p> <p>Se zvyšováním napětí narůstá počet pulzů, ale jejich velikost se nemění.</p> <p>Pulzy v druhé půlperiodě pouze při vyšším napětí.</p>	<p>Uspořádání hrot-deska (tyč-rovina) v plynech. Jestliže se pulzy objevují v záporné půlperiodě, je hrot (tyč) na vysokém potenciálu; jestliže se pulzy objevují v kladné půlperiodě, je hrot (tyč) na zemním potenciálu.</p>
B		<p>Pulzy v obou půlperiodách, symetricky okolo napětových maxim; v jedné půlperiodě pulzy větší, v druhé půlperiodě větší počet menších pulzů stejné velikosti.</p> <p>Se zvyšováním napětí počet pulzů narůstá.</p>	<p>Uspořádání hrot-deska (tyč-rovina) v kapalných dielektrikách. Jestliže se velké pulzy objevují v kladné půlperiodě, je hrot (tyč) na vysokém potenciálu; jestliže se velké pulzy objevují v záporné půlperiodě, je hrot (tyč) na zemním potenciálu.</p>
C		<p>Pulzy mezi průchody nulou napětí a vrcholy v obou půlperiodách.</p> <p>Pulzy v obou půlperiodách mají přibližně stejnou velikost.</p>	<p>Dutinky v pevném dielektriku.</p> <p>Vzduchové dutinky v kapalném dielektriku.</p> <p>Dotyk izolovaných vodičů.</p> <p>Výboje na povrchu bez galvanického spojení.</p> <p>Neuzemněné kovové části měřícího obvodu.</p>
D		<p>Pulzy mezi průchody nulou napětí a vrcholy v obou půlperiodách.</p> <p>Pulzy v jedné půlperiodách jsou vyšší než pulzy v druhé půlperiodě.</p>	<p>Dutinky v pevném dielektriku u elektrod.</p> <p>Vzduchové dutinky v kapalném dielektriku u elektrod.</p> <p>Jestliže se velké pulzy objevují v kladné půlperiodě, jsou výboje na vysokém potenciálu; jestliže se velké pulzy objevují v záporné půlperiodě, jsou výboje na zemním potenciálu.</p>
E		<p>Pulzy symetricky kolem obou průchodů nulou napětí.</p>	<p>Špatný kontakt mezi kovovými částmi nebo mezi polovodivými (odporovými) vrstvami.</p>

**Typ A:** Výboje tohoto typu (obr.6a) vznikají tehdy, je-li přítomna vnější koróna v okolí ostrých kovových hrotů nebo hran. Jedná se o jeden z nejdůležitějších typů obrazců ČV, protože je typický pro mnoho druhů málo nebezpečné výbojové činnosti, především pro ČV ve vzduchu (koróna). Tyto ČV se v detektoru projevují jako pulsy stejné velikosti v jedné půlperiodě, symetricky okolo napěťového maxima. Se zvyšováním napětí počet pulsů narůstá, ale jejich velikost se nemění.

**Typ B:** Vzory těchto výbojů se objevují na hrotu tyčové elektrody (uspořádání hrot-deska, tyč-deska) ponořené v kapalném dielektriku. Oproti typu A se v tomto případě objevují pulsy ČV současně i v kladné půlperiodě napětí, přičemž mají poněkud větší velikost a menší opakovací frekvenci než pulsy v záporné půlperiodě.

**Typ C:** Tento druh výbojové činnosti (obr.6b) má charakteristické dva rysy, a to, že pulsy ČV se objevují v obou polaritách napájecího napětí a průměrné velikosti pulsů jsou v obou půlperiodách přibližně stejné. Druhým znakem je, že se výboje objevují v oblastech od průchodu nulou do maximální hodnoty, tj. v oblastech nárůstu napájecích napětí. Takový obraz se objevuje právě tehdy, když nosiče nábojů obou polarit se nedostanou jak na vysokonapěťovou, tak na uzemněnou elektrodu. Tento typ výbojů je pro izolační systém velmi nebezpečný a nastávají v případech, jimiž jsou např. dutinka (defekt) v pevném izolantu, plynová bublinka v kapalném izolantu, klouzavé výboje na povrchu pevných izolantů apod.

**Typ D:** Tento typ výbojové činnosti je speciálním případem typu C, kdy velikost pulsů v jedné půlperiodě je větší než v druhé. Toto je způsobeno odsátím nábojů z jedné strany dutinky, tzn., že dutinka je buď přímo na povrchu elektrody pevného izolantu, v případě klouzavých výbojů začínají ČV přímo u elektrody. V případě, že jsou větší pulsy v kladné půlperiodě, pak je dutinka na vysokonapěťové elektrodě. Jestliže jsou větší pulsy v záporné půlperiodě, pak je dutinka na uzemněné elektrodě. Stejně jako typ C jsou i ČV tohoto typu velmi nebezpečné pro izolační systém, např. může docházet k delaminaci, či degradaci izolace.

**Typ E:** Tyto výboje jsou charakteristické tím, že pulsy ČV jsou seskupeny symetricky v oblastech kolem obou průchodů napájecího napětí nulou. Tyto obrazce bývají způsobeny nedokonalým (odporovým) kontaktem mezi kovovými částmi nebo mezi dvěma vrstvami stínění.

## 2 Metody pro měření ČV

Výbojovou činnost v dielektriku doprovází celá řada fyzikálních jevů. Jedná se o jevy elektrického i neelektrického typu. Mimo vzniku proudových pulzů se může také jednat o generování vysokofrekvenčního elektromagnetického pole, světelné záření jak viditelného, tak ultrafialového spektra, nebo např. zvukové vlny ve slyšitelném či ultrazvukovém pásmu.[3]

Díky existenci právě těchto projevů, lze detekovat přítomnost výbojové činnosti, případně určovat její rozsah, nebo najít místo jejího vzniku.[3]

Měření ČV lze provádět různými metodami. Jedná se jak o metody neelektrické (jako např. akustické, optické, či chemické), tak metody elektrické (měřením ztrátového činitele, metodami postupné vlny, měřením rušivých elektrických polí, metodami se snímací impedancí, kapacitními či induktivními sondami apod.). Tyto metody se neustále vyvíjí, jak po stránce teoretické, tak technické. Každá z metod má také své výhody a nevýhody. Do popředí se v dnešní době dostávají hlavně on-line měření, které umožňují měřit ČV za provozu stroje, bez nutnosti odstávky zařízení.[2]

### 2.1 Neelektrické metody měření ČV

Princip metody je založen na snímání neelektrických projevů ČV, jako je vznik chemických zplodin výbojové činnosti, světelné záření viditelného i ultrafialového spektra, zvukové vlny (slyšitelné i ultrazvukové pásmo) či teplený ohřev okolí. Tyto projevy je možno vhodným způsobem detekovat, lokalizovat a kvantifikovat míru rozvinutí výbojové činnosti.[3]

Pro měření těchto veličin se užívají speciální měřicí zařízení, jako jsou směrové mikrofony v různém frekvenčním pásmu, přístroje pro noční vidění, termovize či plynová chromatografie apod.[3]

#### 2.1.1 Akustická detekce

Tato metoda měření výbojové činnosti je založena na detekci akustické emise, která je doprovázena každým ČV. Akustické vlny vyvolávají mechanické impulsy, velkého spektra

frekvencí, které se šíří od místa svého vzniku do okolí, a které pomocí vhodných měřících zařízení, jako jsou např. mikrofony, či jiné akustické detektory, lze zachytit.

Akustické (ultrazvukové) metody se používají především pro určení místa vzniku ČV a největší uplatnění nachází v měření výbojové činnosti na transformátorech v provozu, a to především z důvodu, že vlivem velkých elektromagnetických rušení, které nelze odstranit, se elektrické metody nedají dost dobře uplatnit.

### 2.1.2 Optická detekce

Použitím vhodných optických metod (kamera, fotoaparát), případně i pouhým okem je možné pozorovat výbojovou činnost jak ve viditelném, tak v infračerveném i ultrafialovém spektru. Přítomnost ČV na zkoušeném zařízení ovšem také zanechává viditelné stopy poškození, které mohou vypovídat o rozsahu působení výbojové činnosti, nebo lze určit místo vzniku ČV. Tyto stopy je možné pozorovat přímo, popřípadě po osvětlení ultrafialovým světlem. Tato metoda je vhodná pouze u přístupných částí zkoušeného zařízení, nebo u částí, které jsou demontovány po odstavení od provozu.

Ve zdrojových lokalitách ČV se tyto výboje projevují také svými tepelnými účinky, kdy tuto lokalitu svým působením částečně ohřívají. Vhodnou termovizní kamerou s velkou citlivostí je potom možné výbojovou činnost také zachytit.

### 2.1.3 Chemická detekce

Tato metoda je založena na principu detekce a následné analýze vzniklých produktů při reakcích ČV s plynem v dutinkách izolantu. Tato detekce je především prováděna v oleji či plynem izolovaných přístrojích a následná analýza vzniklých produktů, udává míru degradace zkoušeného zařízení.

Metoda zabývající se zjišťováním obsahu plynů rozpuštěných v oleji se nazývá plynová chromatografie a tato metoda je velmi citlivá (hodnoty jsou v miliontinách objemu) a není ovlivňována elektromagnetickým rušením v provozu zařízení. Při plynové analýze transformátorových olejů se standardně detekuje přítomnost pěti rozpustných plynů, tedy spíše jejich poměrů, a to vodíku  $H_2$ , etylenu  $C_2H_4$ , acetyleny  $C_2H_2$ , propylenu  $C_3H_6$  a metanu  $CH_4$ . Díky výskytu těchto plynů lze určit druh výbojové činnosti a typických závad izolačních

systemů s kapalným izolačním olejem. Rozšířeným kritériem pro posuzování poruch transformátorů jsou poměry plynů z plynové analýzy podle IEEE-IEC [2], viz tab. 2.

Tabulka 2 Vyhodnocování poruchy z chromatografických měření [2]

Rozsah poměrů	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
< 0,1	0	1	0
0,1 ÷ 1	1	0	0
1 ÷ 3	1	2	1
> 3	2	2	2
Charakteristika poruchy			
bez poruchy	0	0	0
ČV s malou hustotou náboje	0	1	0
ČV s velkou hustotou náboje	1	1	0
nízkoenergetické výboje	1-2	0	1-2
vysokoenergetické výboje	1	0	2
lokální přehřátí 150 °C	0	0	1
lokální přehřátí 150 ÷ 300 °C	0	2	0
lokální přehřátí 300 ÷ 700 °C	0	2	1
lokální přehřátí 740 °C	0	2	2

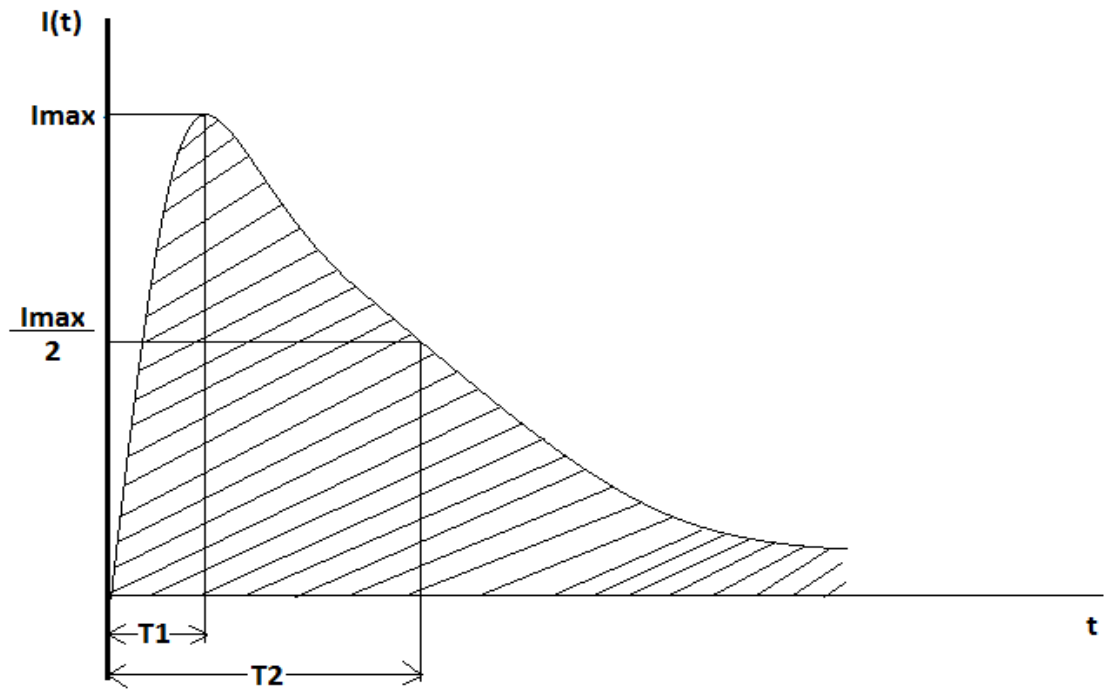
## 2.2 Elektrické metody měření ČV

Vlivem ČV jsou patrné v napájecí síti malé proudové impulsy a jejich vyhodnocováním je základem všech elektrických metod pro určení intenzity výbojové činnosti. Na rozdíl od neelektrických metod, jsou tyto metody mnohem více rozšířeny zejména pro svou lepší kvantifikovatelnost a citlivost. Mezi elektrické metody se řadí mimo jiné měření ztrátového činitele, metoda postupné vlny, měření rušivých el. polí, metody se snímací impedancí, kapacitní, induktivní sondy apod. Tyto metody lze dělit do kategorií globální měření či měření lokalizační. Globální měření ČV spočívá v získávání hodnot naměřených údajů z celého zařízení, případně z jedné jeho fáze a hlavním cílem je sledovat především celkový stav izolace. Lokalizační měření má za cíl především určení místa výskytu ČV. Obě metody se v praxi navzájem doplňují, kdy např. globálním měřením zjistíme stroj s vysokou hladinou výskytu ČV a následně lokalizačním měřením určíme místo vzniku výbojové činnosti na tomto stroji.

V pevných izolantech mají impulsy ČV dobu čela  $T_1$  (doba do maxima) několik ns a dobu půl týlu  $T_2$  (doba poklesu na poloviční hodnotu) několik desítek ns. V kapalných izolantech jsou impulsy ČV delší a dobu  $T_1$  mají okolo 1  $\mu$ s a dobu  $T_2$  několik  $\mu$ s. Na obr. 6 je možno vidět ideální tvar proudového pulsu ČV a velikost náboje  $Q$  tohoto pulsu je pak plocha pod křivkou  $i(t)$



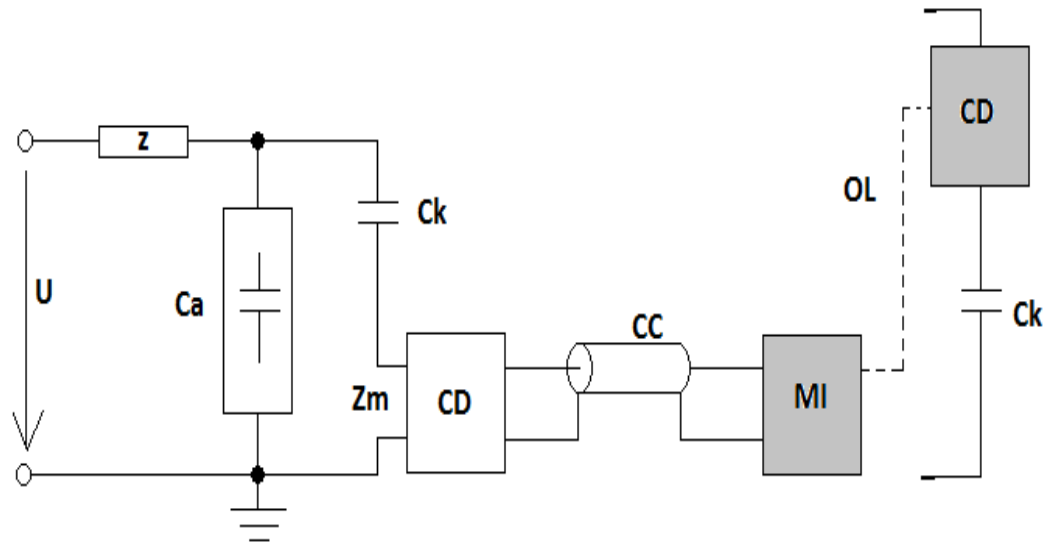
$$Q = \int_0^{\infty} i(t) dt \quad (7)$$



Obr. 6 Tvar proudového impulsu ČV [5]

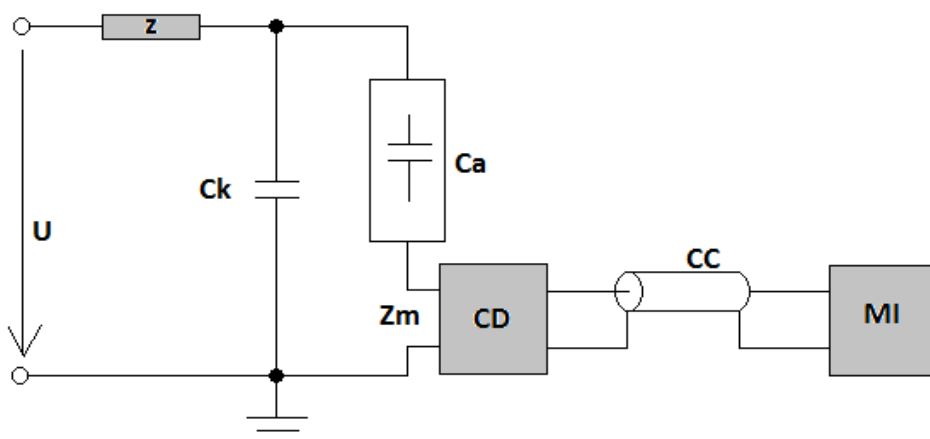
### 2.2.1 Globální metoda měření ČV

Tato nejrozšířenější metoda je založena na principu sledování impulsů ČV pomocí měřicí impedance, která je většinou realizována jako RLC člen s ochrannými prvky proti přepětí a mimo jiné slouží také k odfiltrování superponovaných pulzů ČV od napájecí frekvence. Podle normy [1] existují tři základní zapojení pro měření ČV, jejichž základní zapojení jsou uvedené na obr. 7, obr. 8, obr. 9.

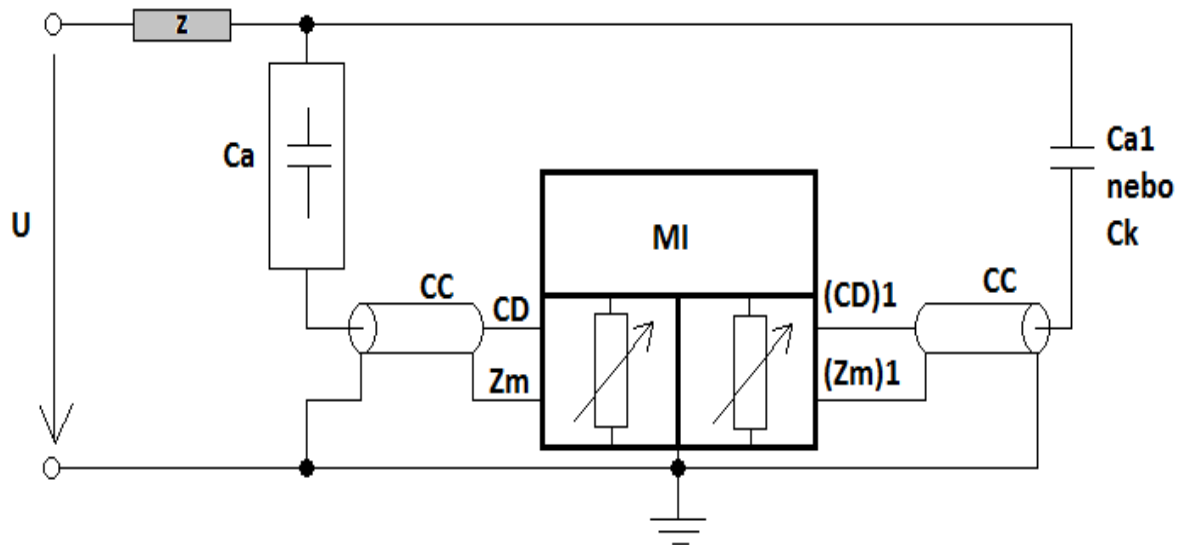


- $U$  - napájecí napětí,  
 $Z$  - filtr rušení, zábrana vybíjení ČV přes impedanci zdroje,  
 $Ca$  - testovaný objekt,  
 $Ck$  - vazební kondenzátor,  
 $Zm$  - snímací impedance,  
 $CD$  - vazební zařízení  
 $CC$  - spojovací stíněný kabel,  
 $MI$  - detektor  
 $OL$  - optický kabel

Obr. 7 Zkušební obvod s paralelní snímací impedancí[3]



Obr. 8 Zkušební obvod se sériovou snímací impedancí[3]



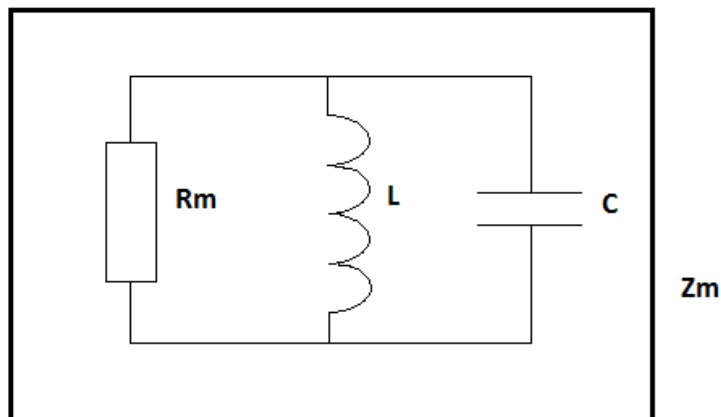
Obr. 9 Zkušební obvod v můstkovém zapojení[3]

Vysokonapěťový vazební kondenzátor, který tvoří důležitou součást všech tří typů snímacích obvodů, by měl mít obecně nízkou indukčnost, vysokou kapacitu v porovnání s rozptylovou kapacitou obvodu a dále by neměl tento vazební kondenzátor vykazovat jakékoliv významné ČV v rozsahu měřících napětí[5].

Mezi výhody galvanických metod měření ČV patří velká citlivost měření, díky možnosti regulace velikostí vazební kapacity, bezpečí zkoušeného objektu bez nutnosti nadměrného přetěžování a především možnosti použití této metody za chodu zařízení (on-line). Mezi nevýhody patří především velká náchylnost na rušivé vlivy jako, jsou např. vnější vlivy elektromagnetických vln rádiových vysílačů apod.

### 2.2.2 Měřicí impedance pro snímání ČV

Měřicí impedance ve snímacím obvodu je obvykle tvořena čtyřpólem s frekvenční citlivostí takovou, aby frekvence napětí zdroje neovlivnila měřicí přístroj. Tato impedance slouží k převádění proudových pulzů způsobených ČV na výstupní napěťové pulzy, které se následně přivádí k měřicímu zařízení. Měřicí impedance bývá obecně tvořena rezistorem, paralelním zapojením odporu a kondenzátoru, rezonančním obvodem (obr. 9).[3]



Obr. 10 Měřicí impedance[3]

Podle druhu snímací impedance a podle druhu použitého měřicího přístroje rozdělujeme měřicí obvody (dle frekvenčního rozsahu měření) na širokopásmové a úzkopásmové.

Úzkopásmové měřicí systémy jsou typické malou šířkou pásma  $\Delta f$ , kde tato hodnota leží v rozsahu od 9 do 30 kHz. Častěji se pro měření výbojové činnosti používají širokopásmová zařízení s doporučenými hodnotami dolní a horní mezní frekvence  $f_1$  a  $f_2$  a šířky pásma  $\Delta f$ , podle [1] jsou:

$$30 \text{ kHz} \leq f_1 \leq 100 \text{ kHz},$$

$$f_2 \leq 500 \text{ kHz},$$

$$100 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 400 \text{ kHz},$$

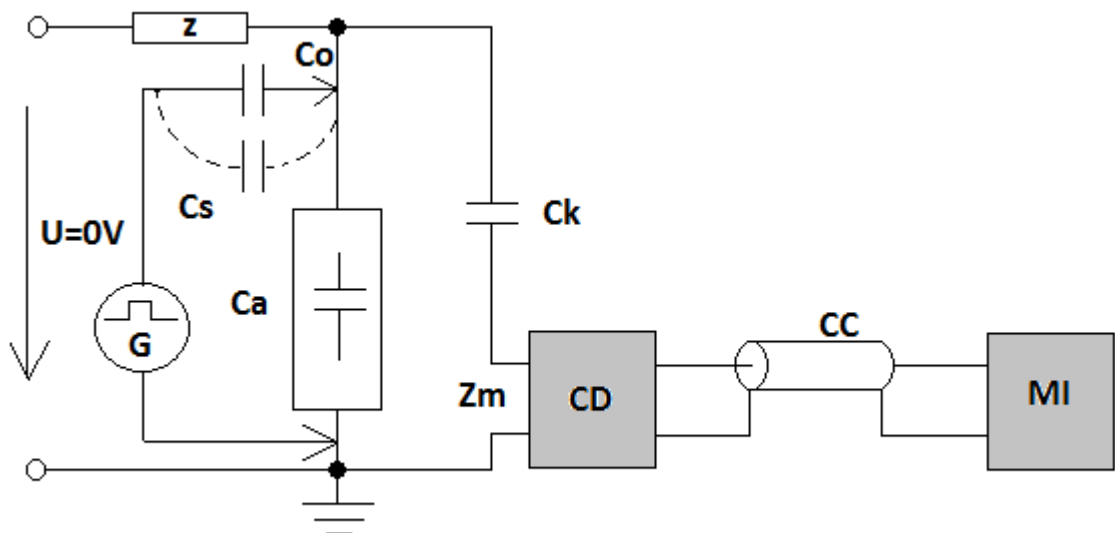
### 2.3 Kalibrace

Jednou z velmi důležitých činností pro měření ČV a zajištění její dostatečné reprodukovatelnosti je kalibrace měřicího obvodu. V závislosti na kapacitách měřicího obvodu dochází při cestě od měřicích svorek na zkoušeném objektu ke vstupu do měřicího zařízení ČV ke zkreslení pulsů ČV a vlivem ztrát při impedančním nepřizpůsobení i ke zmenšení přeneseného náboje. Celý měřicí obvod je tedy nutné před samotným měřením

kalibrovat a následně vlastní měření potom k těmto kalibračním hodnotám vztahovat. Kalibrace se provádí při každém měření ČV obvykle před započítáním vlastního měření a je založena na injektování kalibračních pulzů o známé velikosti do zkoušeného obvodu. Důležitou vlastností kalibračních zařízení je schopnost vytvořit impuls o podobném frekvenčním spektru jako je frekvenční spektrum částečných výbojů.

Komerčně vyráběné a používané kalibrační zařízení používají většinou kalibrační pulsy jedné polaritě a synchronizace těchto pulzů se obvykle provádí pomocí fotodiody a světelného zdroje na střídavé napětí tak, že opakovací frekvence pulsů je  $n = 100 \text{ s}^{-1}$ . Výstupem z těchto kalibračních zařízení bývají obvykle náboje v rozsahu hodnot 2 až 1000 pC.

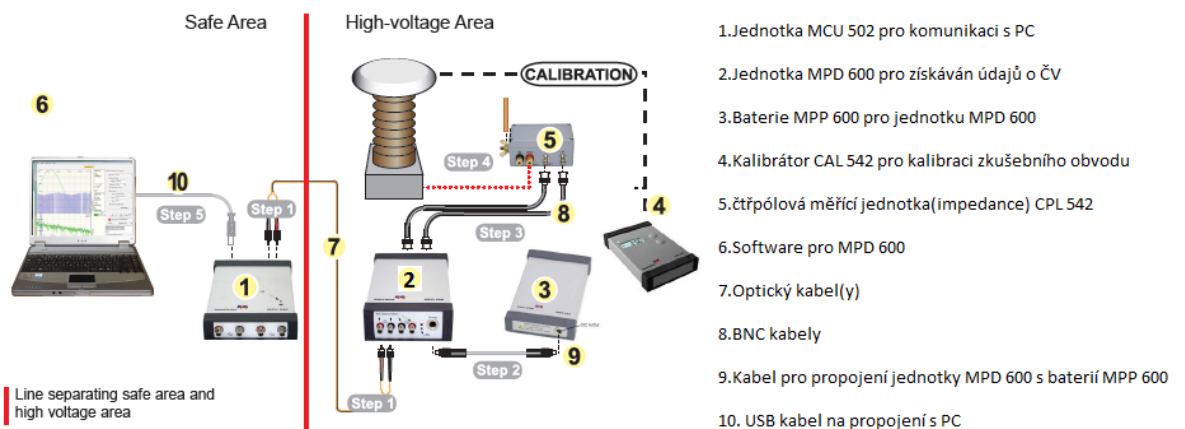
Kalibrace měřicího obvodu se provádí do kompletně zapojeného měřicího obvodu, pokud možno co nejbližší ke svorkám zkoušeného zařízení, z důvodů omezení parazitních kapacit (obr.11). Celý proces kalibrace se provádí při nulovém napájecím napětí, tzn., že celý objekt není napájen zkušebním napětím, v jiném případě by mohlo dojít k poškození kalibračního zařízení. Po jejím ukončení a následném odpojení kalibračního zařízení, můžeme celý kalibrační faktor zkoušeného obvodu určit jako poměr kalibračního náboje  $k_c$  k údajem na detektoru  $q_0$  (ve zkoušeném objektu). V průběhu následného vlastního měření musí být aktuální hodnota změřená na detektoru tímto koeficientem vynásobena, aby byla získána přesná hodnota zdánlivého náboje. Pro dosažení co největší odolnosti na rušení a citlivosti měření by měl být kalibrační náboj  $k_c$  co nejmenší. K zajištění dobré přesnosti měření by podle [1] měla být kalibrace provedena na jedné hladině zdánlivého náboje v odpovídajícím rozsahu očekávaných úrovní.



Obr. 11 Kalibrace měřicího obvodu s uzemněným zkušebním obvodem[3]

## 2.4 Měřicí metoda a zařízení pro měření ČV používaná ve firmě EGE

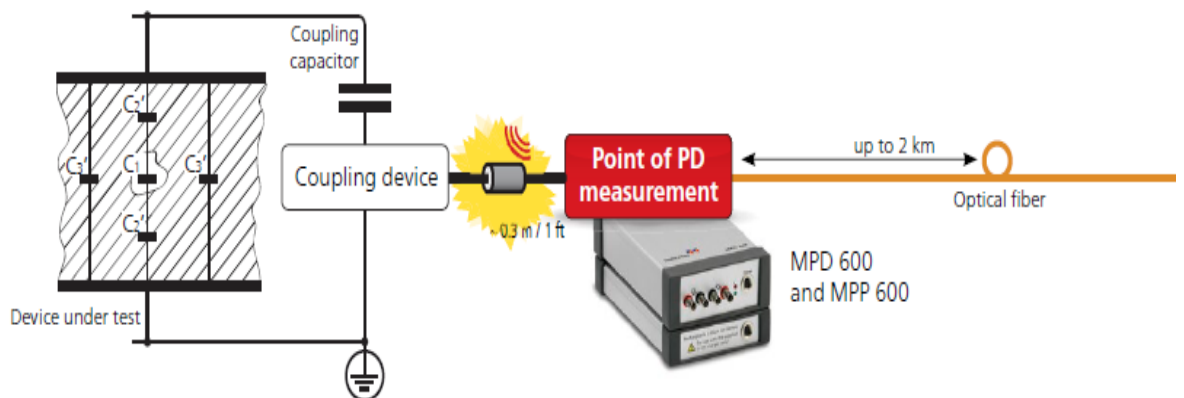
Jelikož se měření ČV stalo v posledních letech velice aktuálním diagnostickým nástrojem, a v sortimentu výrobků firmy EGE, je několik produktů s vyšší izolační hladinou, pro které norma [1] předepisuje měření ČV formou kusové zkoušky, rozhodlo se vedení společnosti, na základně stále stoupajících nároků zákazníků, kde se již měření ČV subdodavatelským způsobem jevílo jako nevýhodné, pro zakoupení vlastního měřicího systému od rakouské firmy OMICRON.



Obr. 12 Schéma zapojení měření ČV používané firmou EGE[6]

Toto zařízení se skládá z několika komponentů, které po správném propojení a správně provedené kalibraci udávají velice kompaktní celek informací o výbojové činnosti zkoušeného zařízení. Na obr. 12 je možné vidět schéma pro měření, jehož sestavení se skládá z několika kroků. Nejprve jsou pomocí optického kabelu propojeny jednotky MCU 502 a MPD 600 (na obr. 12 - Step 1). Propojení není obzvlášť složité, i když pro jeho správnost je nutné dodržet barevné označení na koncích optického kabelu s oběma jednotkami. V druhém kroku (Step 2) je připojena jednotka MPD 600 k baterii MPP 600 pomocí speciálního kabelu výrobce OMICRON. Následuje propojení jednotky MPD 600 s měřicí impedancí CPL 542 (Step 3) pomocí BNC kabelů. I zde je nutné dodržet správnost zapojení a jeden kabel připojit k výstupu U a druhý kabel k výstupu PD. V dalším kroku (Step 4) se propojí vazební kapacita s jednotkou CPL 542. Kabely na propojení by měli být pokud možno co nejkratší. V posledním kroku (Step 5) se propojí jednotka MCU 502 s počítačem, kde je nainstalován obslužný software pro měření ČV, pomocí klasického USB kabelu.

Měřicí metoda je použita s paralelní snímací impedancí (obr. 13), kde jsou obrazce ČV snímány přes vazební kondenzátor, nebo v případě VVN strojů, z kapacitních vývodů průchodek, zařízením MPD 600 a pomocí optického kabelu následně přenesena do počítače, kde již naměřená data zpracovává velice sofistikovaný software.



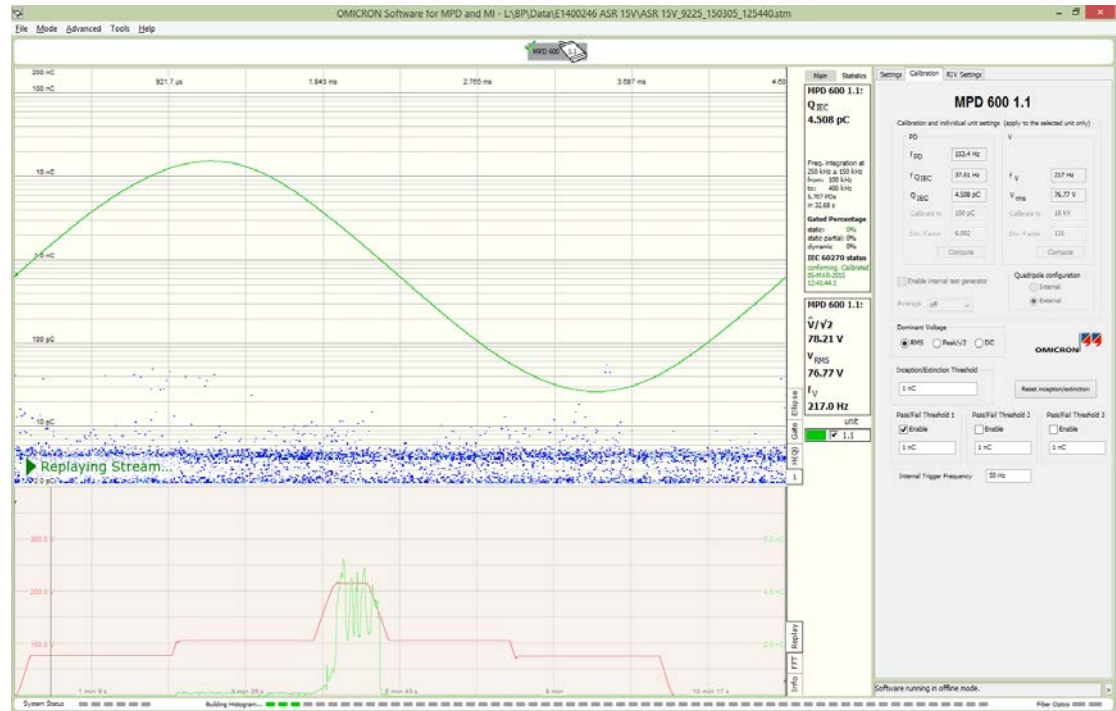
Obr. 13 Schéma zapojení zařízení pro měření ČV používané firmou EGE[6]

Podle zobrazovacího režimu by se tento software pro měření mohl rozdělit na dvě části a to na jednoduchý (Basic) mód, kdy většina parametrů pro měření není třeba nějak složitě nastavovat a tyto parametry jsou nastaveny automaticky, dle normy[1], a druhý, rozšířený (Expert) mód, kde je možno nastavovat mnoho dalších parametrů. Pro základní změřením, či zjištění výbojové činnosti ve stroji, je ale jednoduchý (Basic) mód naprosto dostačující a není

třeba užití složitějšího nastavení. V případě, kdybychom nechtěli měřit výbojovou činnost a chtěli bychom např. pouze analyzovat dříve změřená data, lze spustit měřicí software v režimu off-line, bez jakéhokoliv připojení důležitých komponentů (viz obr. 14). V tomto režimu, který se svým vzhledem neliší od standardního zobrazení, můžeme dříve uložená měření přehrávat znova a výbojovou činnost následně lépe a detailně analyzovat, včetně tvorby např. protokolů, či jiných záznamů a exportů.

Pokud je vše korektně zapojeno, běží systém ve standardním režimu a o správnosti zapojení se lze též dovědět ze spodního stavového řádku, kde obrazovka ukazuje několik základních informací o stavech systému, nebo propojení optickými kabely, kde zelená signalizuje, že je vše v pořádku a červená opak. Pakliže jsme zvolili základní (Basic) mód lze na obrazovce v pravé části vidět tři přepínatelné záložky s názvy (Settings, Calibration a RIV Settings) z níž je nejdůležitější záložka pro kalibrování měřeného objektu, tedy Calibration. Zde se před započítím každého měření nastaví kalibrační hodnota (obvykle 100 pC) shodná s kalibrátorem a po stisknutí tlačítka Compute určíme systému referenční hodnotu kalibračního náboje. Pokud vše proběhne v pořádku, signalizuje systém informaci o přesném datu a času kalibrace. Následně je zapotřebí kalibrovat systém na napětí, které se provede ve stejné záložce podobným způsobem. Nejprve se zvolí hodnota, na kterou je zapotřebí zařízení kalibrovat (např. 10kV), ta se potvrdí do systému a následně se zkušebním zařízením a známým měřičem napětí nastaví požadovaná hodnota, která po jejím najetí opět stiskem tlačítka Compute určí hodnotu násobící konstanty pro měření napětí. Toto je pro měření ČV velmi důležité, neboť díky napěťovému koeficientu lze ČV měřit v celém rozsahu zkoušek, které je u VVN strojů daleko za hranicemi měřitelných způsobů měření ve firmě EGE. Navíc by připojené měřicí zařízení vnášelo do obvodu určité rušení, které je nežádoucí. V ostatních záložkách lze nastavovat další parametry, jako je šířka měřicího pásma či jiné, které však není nutné nastavovat, je-li zapotřebí držet se standardu normy.





Obr. 14 Základní obrazovka a průběh měření v off-line módu

### 3 Naměřená data ze vzorku měření zhášecích tlumivek vyráběné firmou EGE

#### 3.1 Úvod

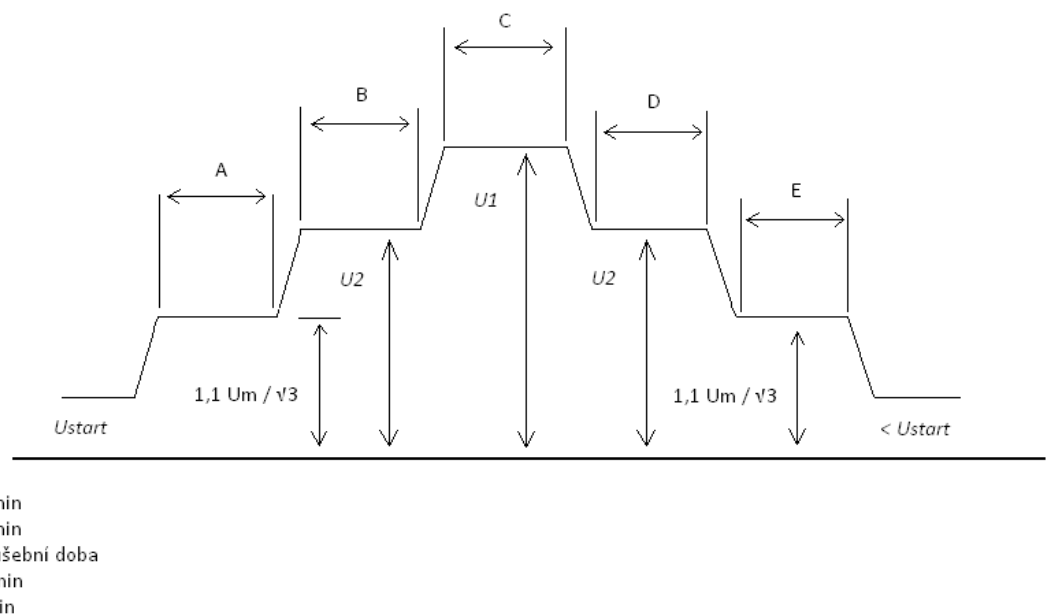
Pro svou práci jsem se rozhodl analyzovat 5 vzorků, které jsem vybral z několika zakázek v rozsahu několika posledních měsíců roku 2014 a letošního roku 2015. Jedná se především o zařízení podobného typu, tedy zhášecí tlumivky, se stejnou izolační hladinou, použité do stejné jmenovité napětí sítě 110 kV. Tlumivky jsem se snažil záměrně vybírat, co možná nejpodobnějšího typu tak, aby bylo možné porovnat dané zařízení co nejlépe.

#### 3.2 Zkušební metodika pro vyhodnocení ČV

Norma[7] předepisuje pro stroje s  $U_m > 72,5$  kV zkoušku krátkodobým střídavým indukovaným napětím (ACSD), která se normálně provádí s měřením ČV. Měření ČV po celou dobu zkoušky je cenným poznatkem jak pro dodavatele, tak pro odběratele. Dle této normy[7] se střídavé napětí přivádí na svorky hlavního vinutí. Tvar vlny by se měl co nejvíce blížit sinusovému průběhu a jeho kmitočet by měl dostatečně převyšovat jmenovitý kmitočet,

aby se vyloučil nadměrný magnetizační proud během zkoušky. Měří se vrcholová hodnota indukovaného napětí. Při plném zkušebním napětí musí zkouška trvat 60 s při jakémkoliv kmitočtu rovném dvojnásobku jmenovitého kmitočtu nebo nižším, pokud není předepsáno jinak. Převyšuje-li zkušební kmitočet dvojnásobek jmenovitého kmitočtu, musí být zkušební doba v sekundách podle vzorce:

$$120 \times \frac{\text{jmenovitý kmitočet}}{\text{zkušební kmitočet}}, \text{ avšak ne méně než } 15 \text{ s} \quad (8)$$



Obr. 15 Časový průběh změn zkušebního napětí proti zemi [7]

Na obr. 15 je zobrazen časový průběh změn zkušebního napětí proti zemi. Firma EGE používá na zkoušku indukovaným napětím frekvenční měnič, který je schopen měnit frekvenci v rozsahu 50 ÷ 250 Hz, takže dle výše zmíněného vzorce (8) a při zkušební frekvenci 200 Hz trvá zkušební doba C = 30 sekund. Podle normy [7] vychází velikost zkušebních napětí, pro vyhodnocování výbojové činnosti, v efektivních hodnotách pro  $U_m = 123 \text{ kV}$ ,  $U_1 = 230 \text{ kV}$  a  $U_2 = 1,5U_m/\sqrt{3}$ , z čehož vyplývá, že pro časové úseky A a E z obr. 15, je hodnota pro vyhodnocování výbojové činnosti rovna 78 kV, pro úseky B a D je to hodnota 107 kV a pro úsek C je to 230 kV, avšak pro tuto hladinu není nutné výbojovou činnost vyhodnocovat. Pro vyhodnocení výbojové činnosti jsou tak nejdůležitější úseky ABDE.

### 3.3 Přehled zkoušených zařízení

V tabulce 3 je možno vidět porovnání základních parametrů měřených zhášecích tlumivek.

Tabulka 3 Seznam měřených zařízení a jejich základních technických dat

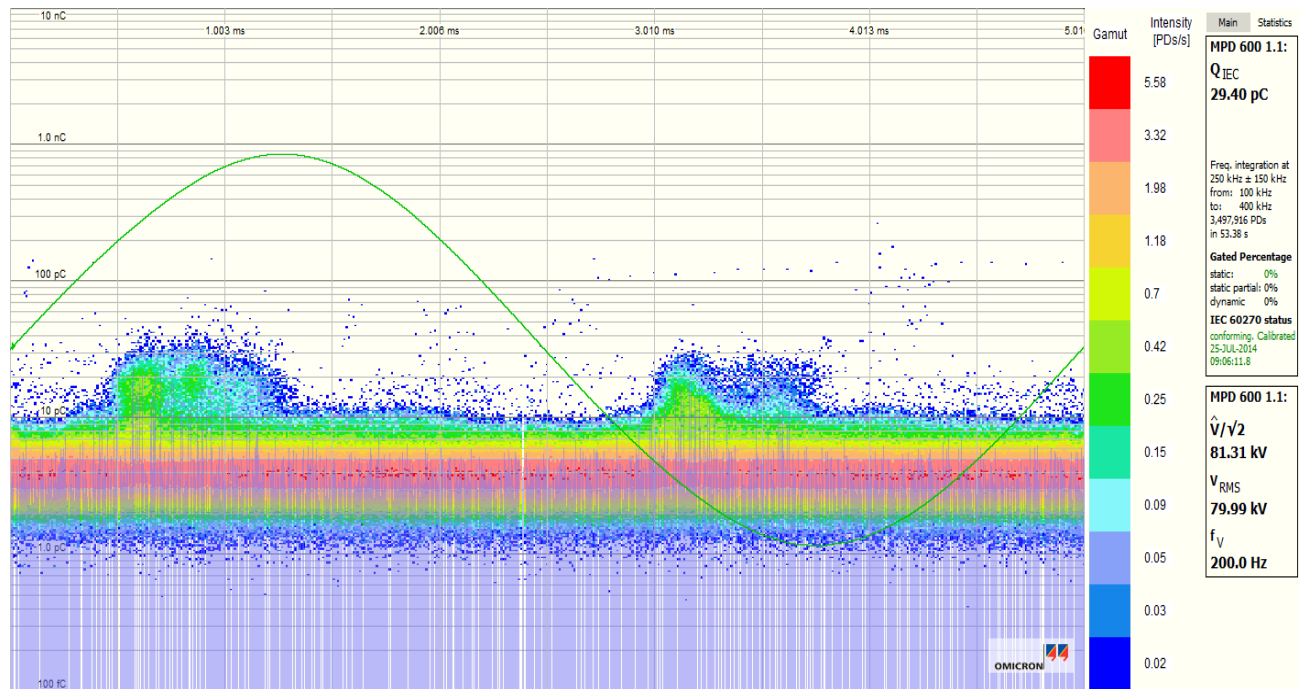
Typ	Jmenovitý výkon [kVA]	Jmenovité napětí [kV]	Maximální napětí [kV]	Jmenovitý proud [A]	Výrobní číslo	Datum zkoušek
ASR 10V	12700	63.5	123	200	8949	25.7.2014
ASR 10V	7938	63.5	123	125	9057	8.10.2014
ASR 6.3V	6350	63.5	123	100	9201	10.3.2015
ASR 6.3V	6350	63.5	123	100	9226	5.3.2015
ASR 15V	19052	63.5	123	300	9225	5.3.2015

### 3.4 Naměřená data

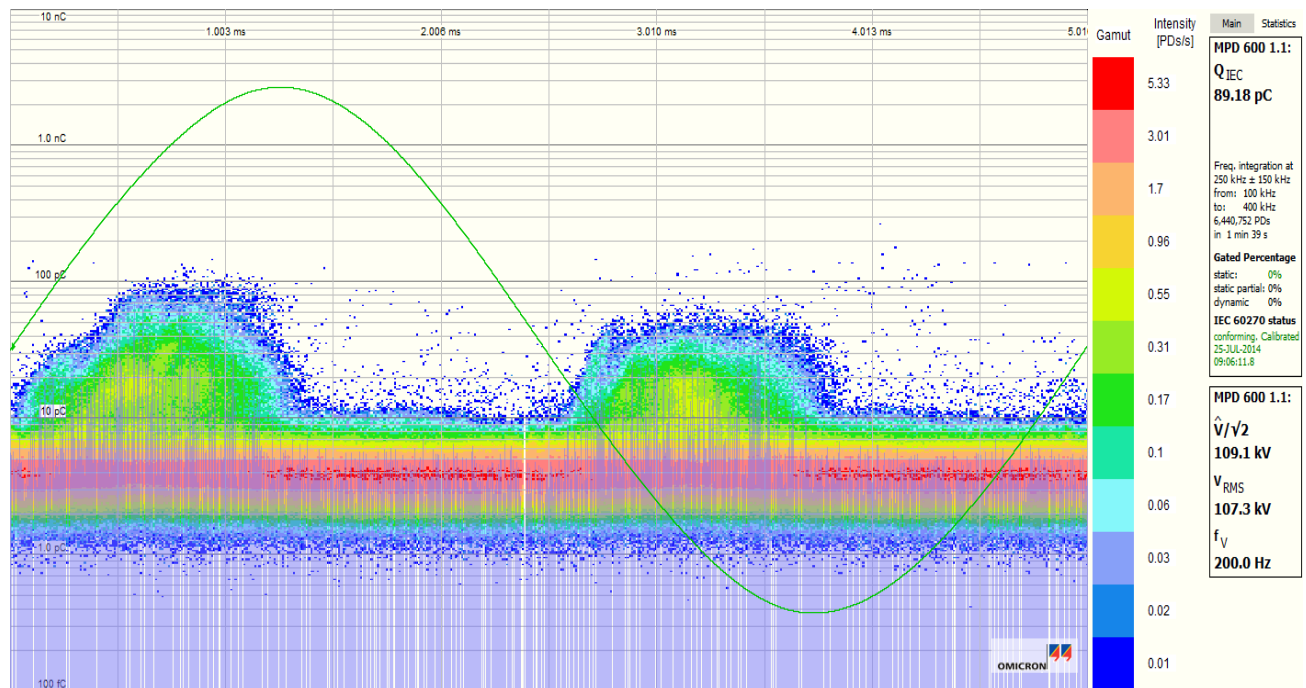
#### 3.4.1 Výsledky měření ze zkoumané tlumivky ASR 10 V, v.č.: 8949

Tabulka 4 Výsledná naměřená data ze zhášecí tlumivky v.č.: 8949

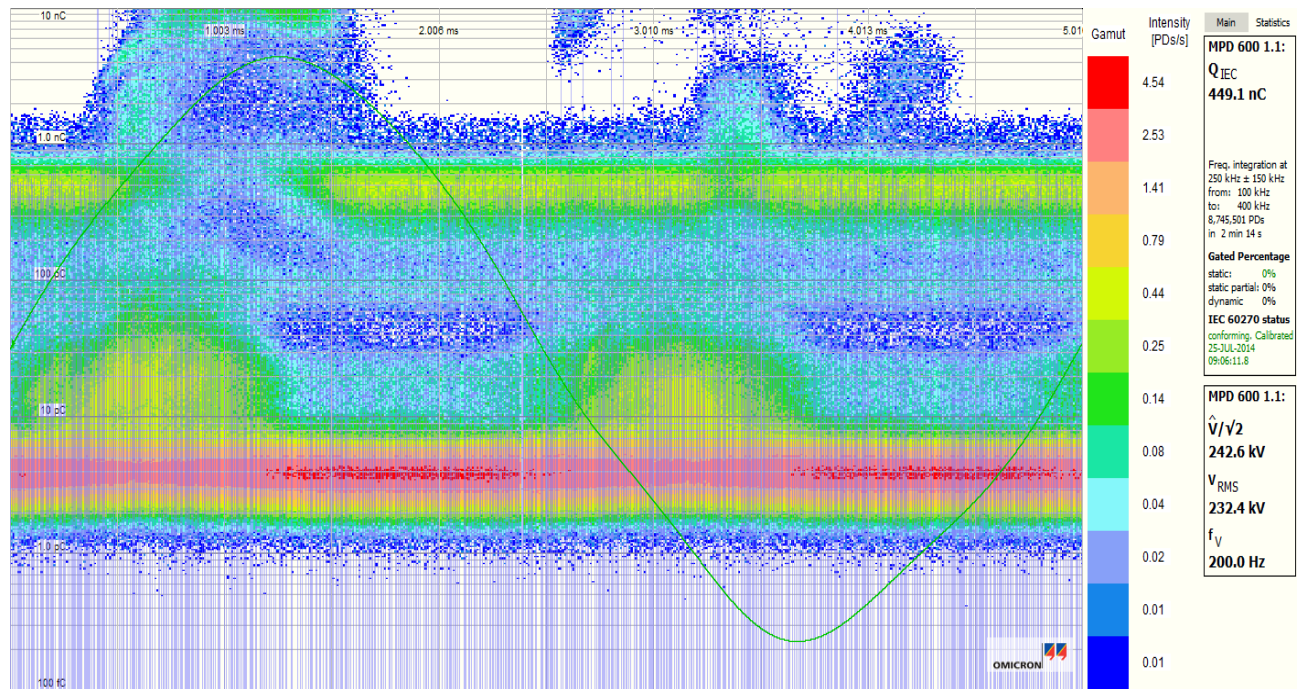
Zkouška krátkodobým střídavým indukovaným napětím ( $f = 200 \text{ Hz}$ )								
Zkušební napětí „fáze – zem“ [kV]			Zkušební postup					Hodnota pozadí ČV
			A	B	C	D	E	
			$1.1U_m/\sqrt{3}$	$1.5U_m/\sqrt{3}$		$1.5U_m/\sqrt{3}$	$1.1U_m/\sqrt{3}$	
Zk.svorka	Uzemněno	Čas [s]	78	107	230	107	78	
D1	D2	Hodnota ČV[pC]	$\leq 30.0$	$\leq 90.0$	-	$\leq 70.0$	$\leq 20.0$	$< 10.0$



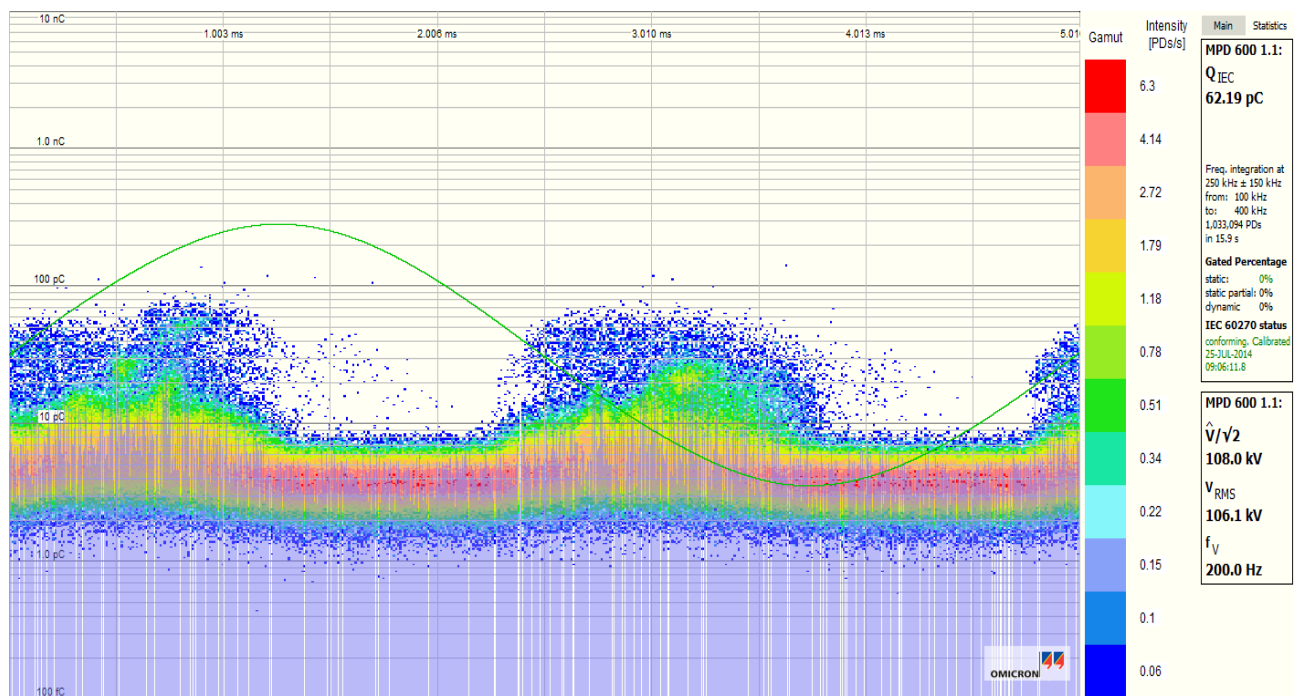
Obr. 16 Záznam z časového úseku A - v.č. 8949



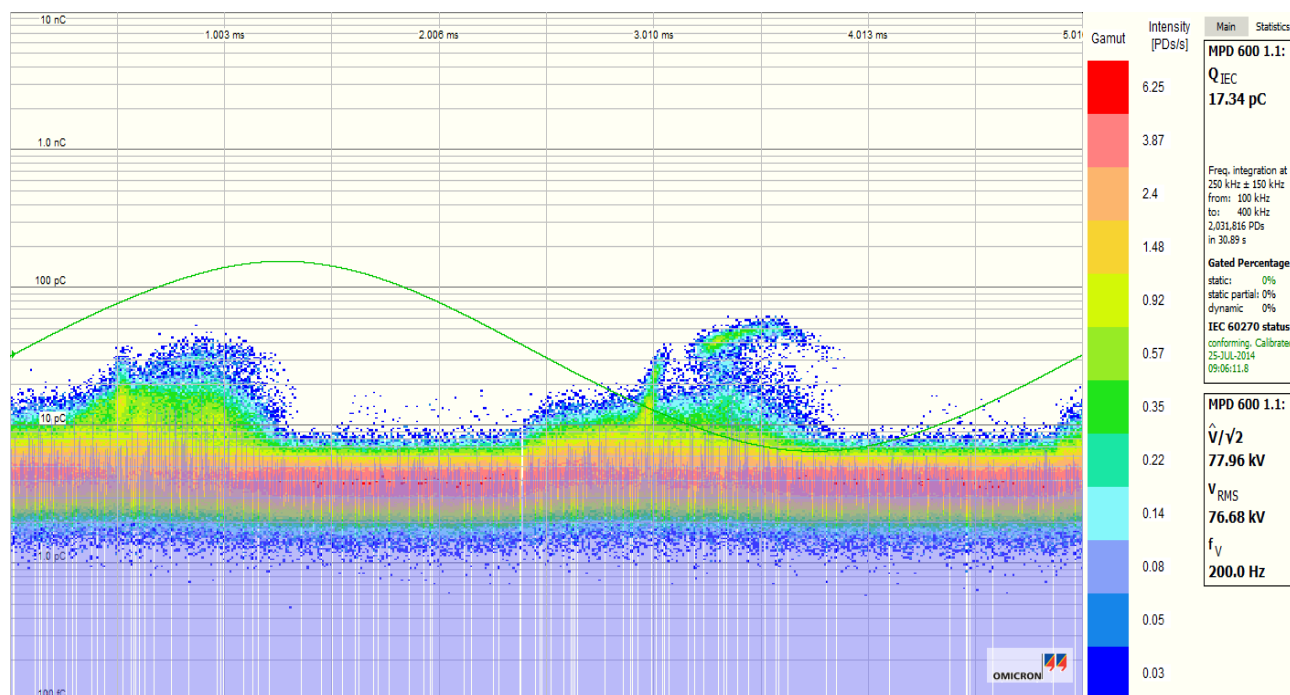
Obr. 17 Záznam z časového úseku B - v.č. 8949



Obr. 18 Záznam z časového úseku C - v.č. 8949



Obr. 19 Záznam z časového úseku D - v.č. 8949

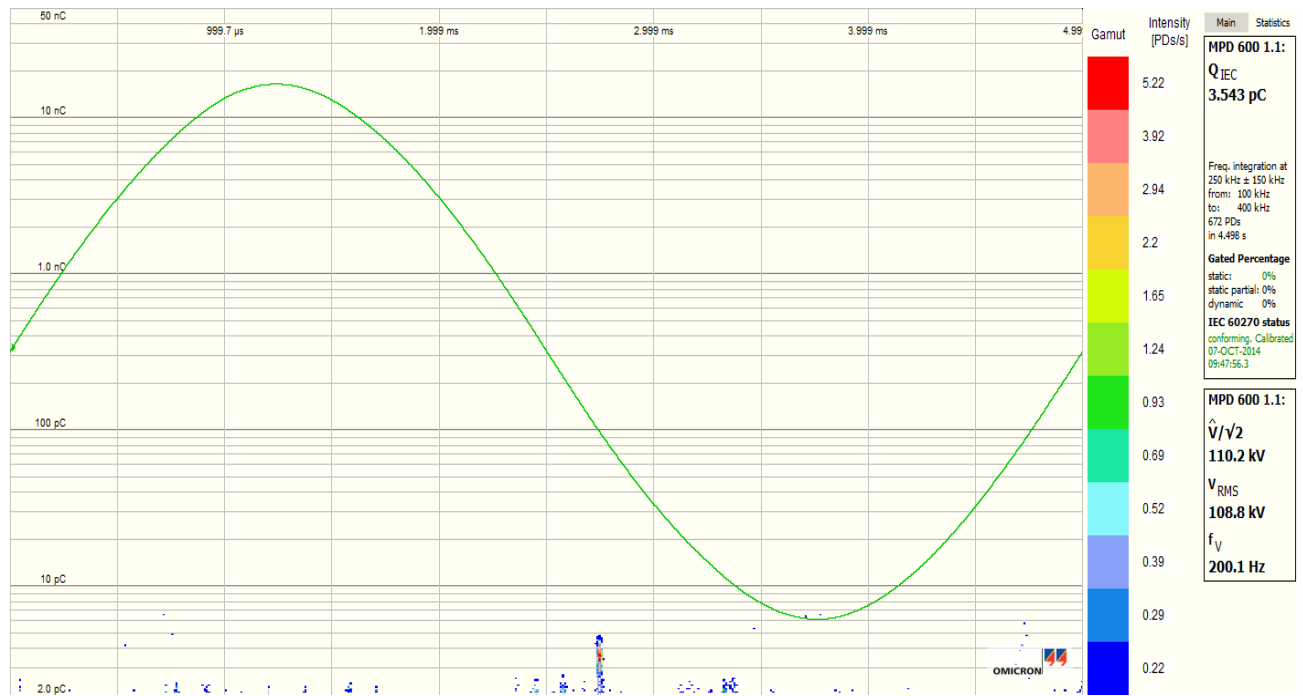


Obr. 20 Záznam z časového úseku E - v.č. 8949

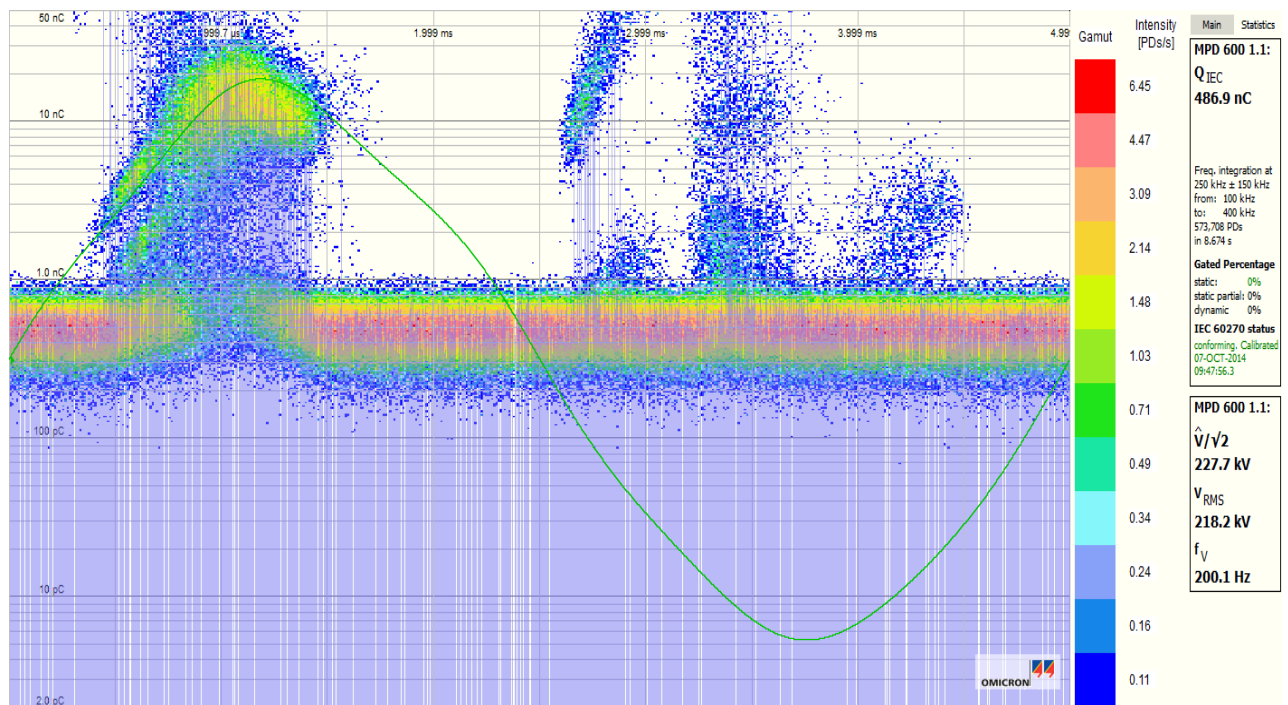
### 3.4.2 Výsledky měření ze zkoumané tlumivky ASR 10 V, v.č.: 9057

Tabulka 5 Výsledná naměřená data ze zhašecí tlumivky v.č.: 9057

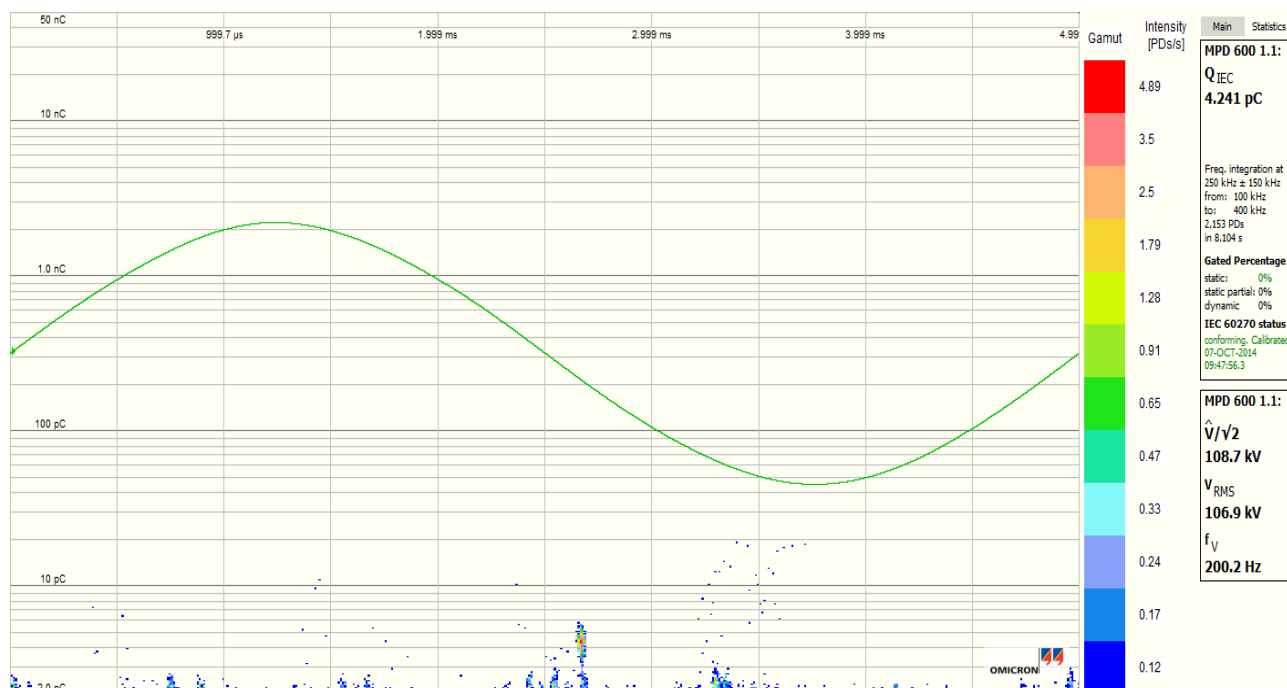
Zkouška krátkodobým střídavým indukovaným napětím ( f = 200 Hz)								
Zkušební napětí „fáze – zem“ [kV]			Zkušební postup					Hodnota pozadí ČV
			A	B	C	D	E	
			$1.1U_m/\sqrt{3}$	$1.5U_m/\sqrt{3}$		$1.5U_m/\sqrt{3}$	$1.1U_m/\sqrt{3}$	
			-	107	230	107	-	
Zk.svorka	Uzemněno	Čas [s]	-	60	30	60	-	
D1	D2	Hodnota ČV[pC]	-	≤ 10.0	-	≤ 70.0	-	< 15.0



Obr. 21 Záznam z časového úseku B - v.č. 9057



Obr. 22 Záznam z časového úseku C - v.č. 9057



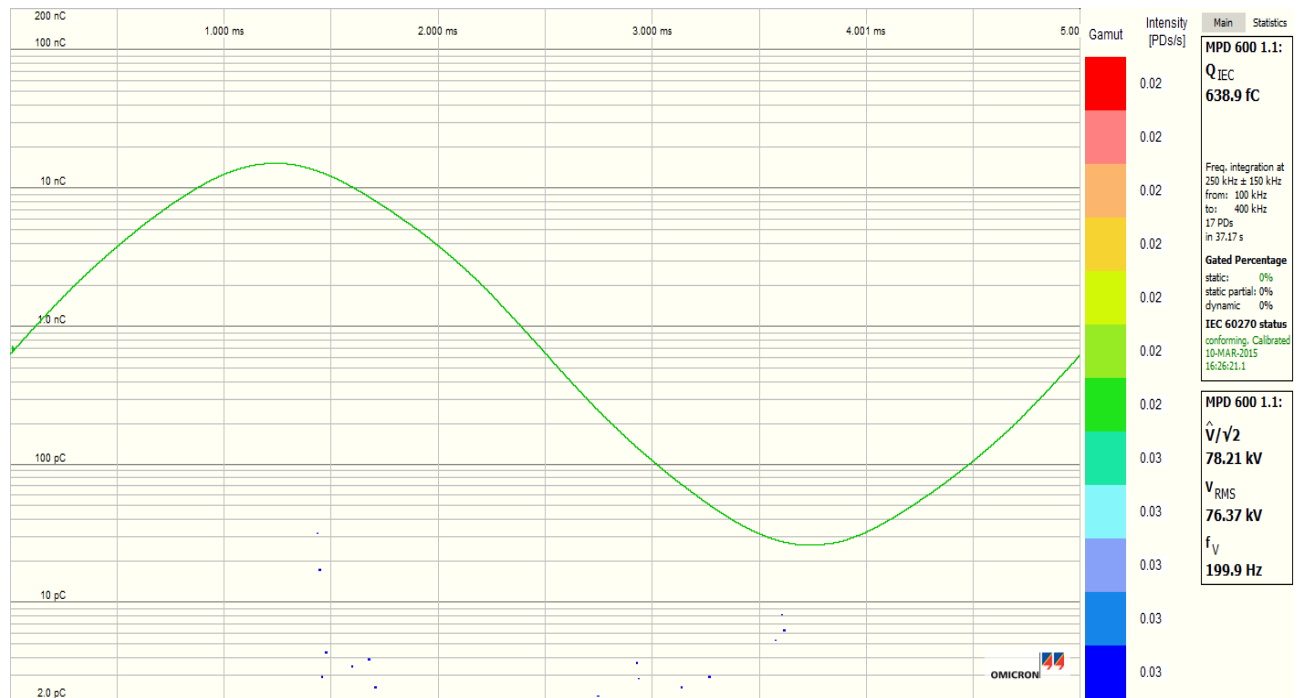
Obr. 23 Záznam z časového úseku D - v.č. 9057

### 3.4.3 Výsledky měření ze zkoumané tlumivky ASR 6.3 V, v.č.: 9201

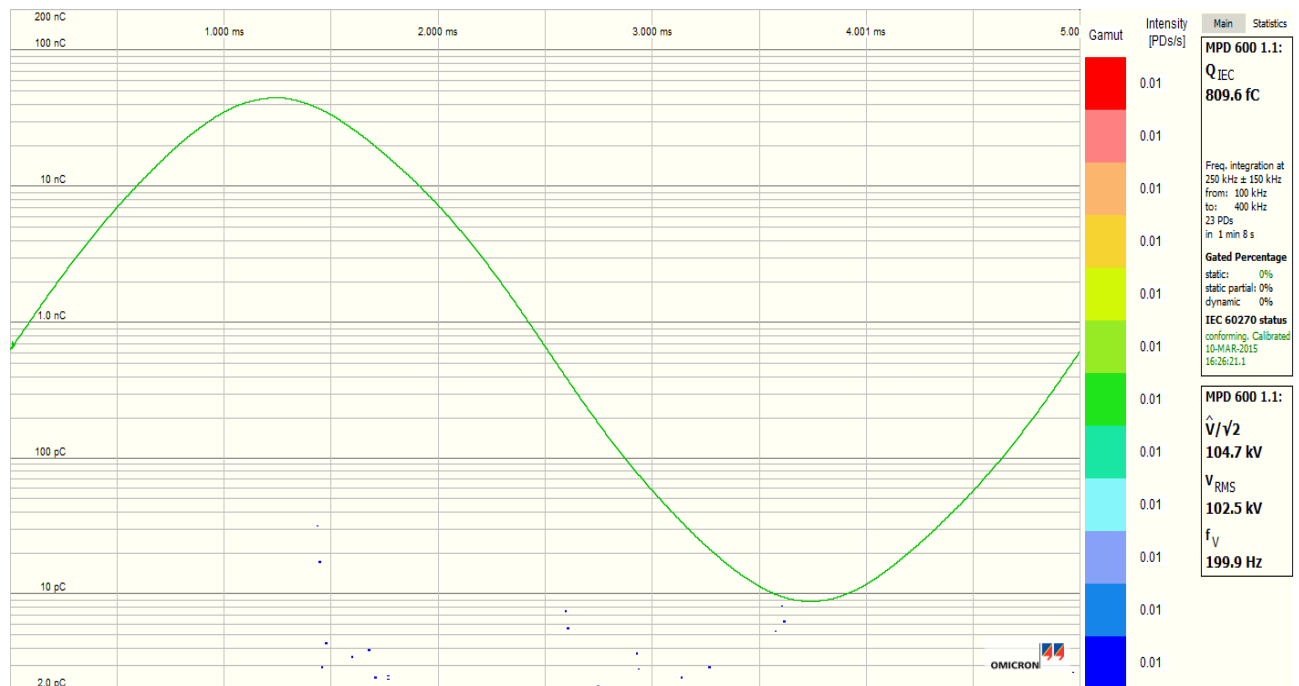
Tabulka 6 Výsledná naměřená data ze zhášecí tlumivky v.č.: 9201

Zkouška krátkodobým střídavým indukovaným napětím ( $f = 200 \text{ Hz}$ )								
Zkušební napětí „fáze – zem“ [kV]			Zkušební postup					Hodnota pozadí ČV
			A	B	C	D	E	
			$1.1 U_m / \sqrt{3}$	$1.5 U_m / \sqrt{3}$		$1.5 U_m / \sqrt{3}$	$1.1 U_m / \sqrt{3}$	
			78	107	230	107	78	
Zk.svorka	Uzemněno	Čas [s]	60	60	30	60	60	
D1	D2	Hodnota ČV [pC]	$\leq 1.0$	$\leq 1.0$	-	$\leq 90.0$	$\leq 20.0$	<12.0

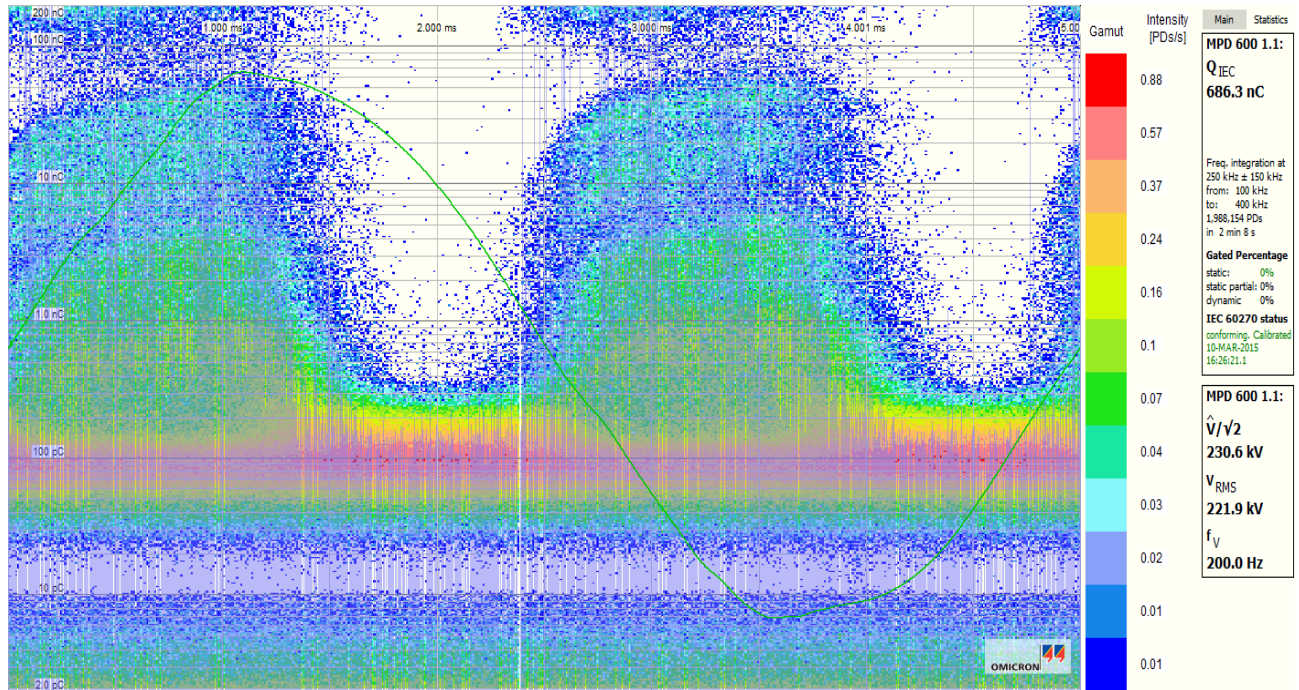




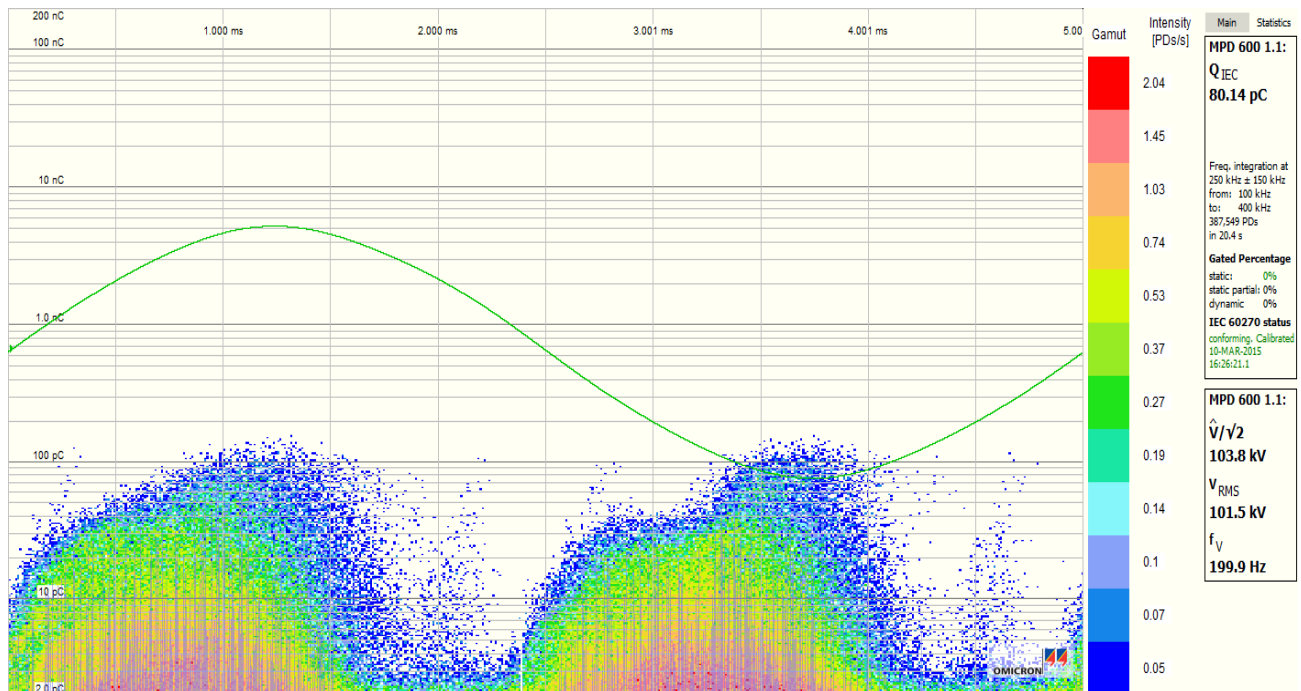
Obr. 24 Záznam z časového úseku A - v.č. 9201



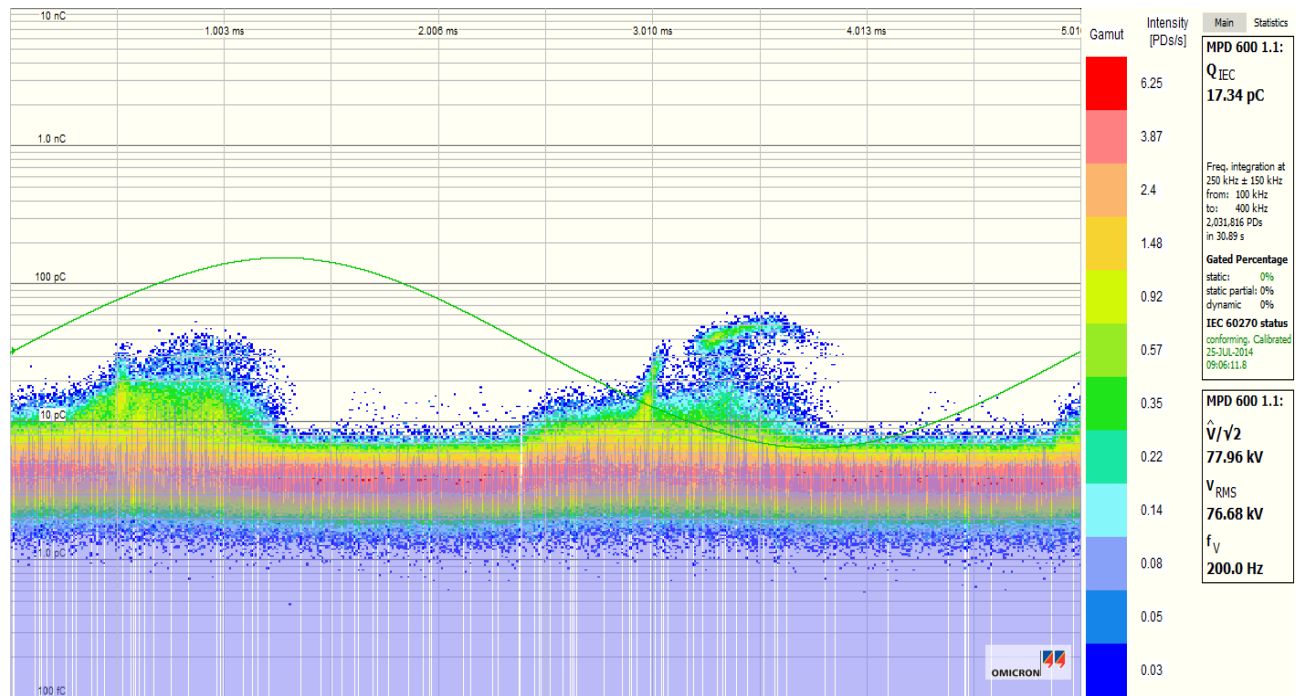
Obr. 25 Záznam z časového úseku B - v.č. 9201



Obr. 26 Záznam z časového úseku C - v.č. 9201



Obr. 27 Záznam z časového úseku D - v.č. 9201

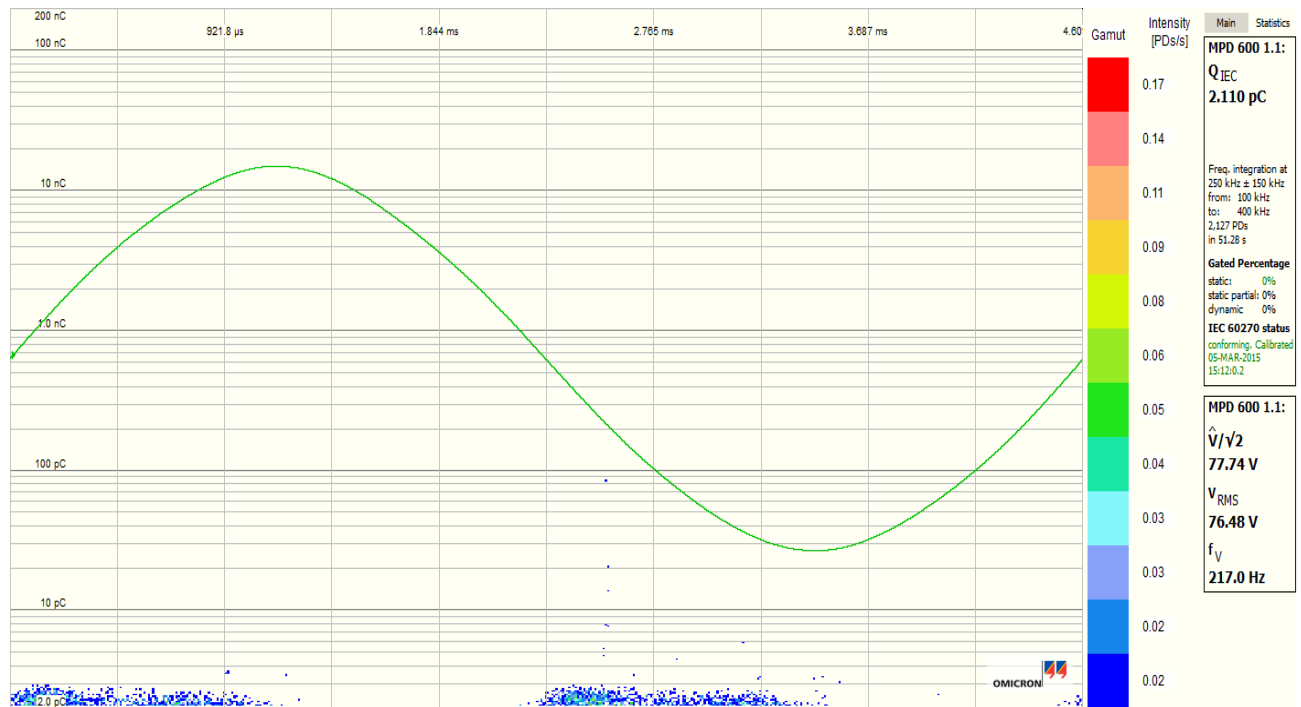


Obr. 28 Záznam z časového úseku E - v.č. 9201

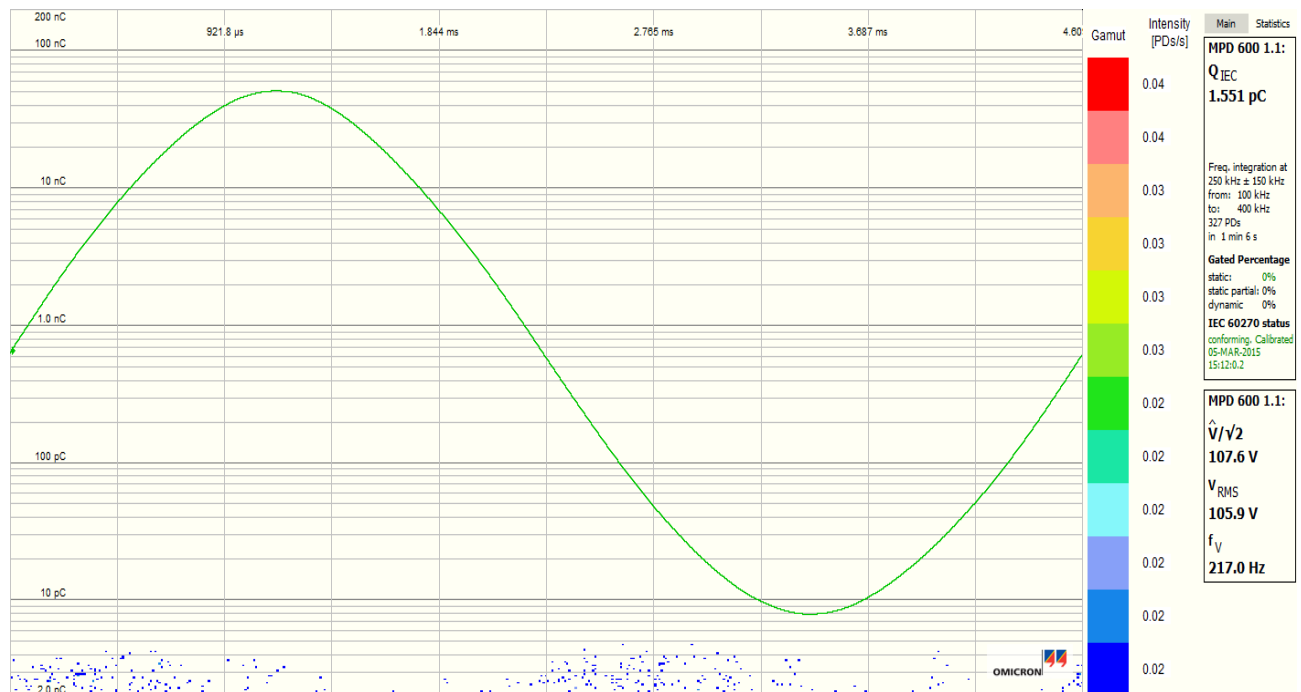
### 3.4.4 Výsledky měření ze zkoumané tlumivky ASR 6.3 V, v.č.: 9226

Tabulka 7 Výsledná naměřená data ze zhášecí tlumivky v.č.: 9226

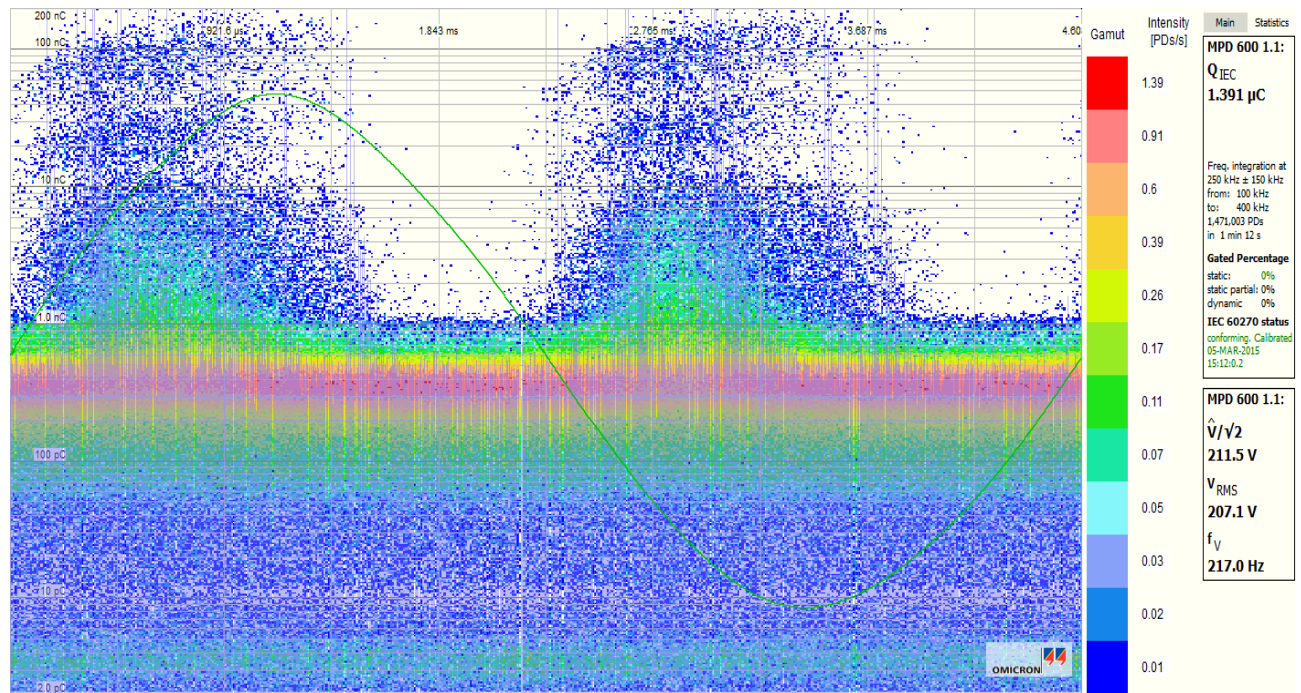
Zkouška krátkodobým střídavým indukovaným napětím ( f = 217 Hz)								
Zkušební napětí „fáze – zem“ [kV]			Zkušební postup					Hodnota pozadí ČV
			A	B	C	D	E	
			$1.1U_m/\sqrt{3}$	$1.5U_m/\sqrt{3}$		$1.5U_m/\sqrt{3}$	$1.1U_m/\sqrt{3}$	
			78	107	230	107	78	
Zk.svorka	Uzemněno	Čas [s]	60	60	28	60	60	
D1	D2	Hodnota ČV[pC]	≤ 5.0	≤ 5.0	-	≤ 20.0	≤ 10.0	< 13.0



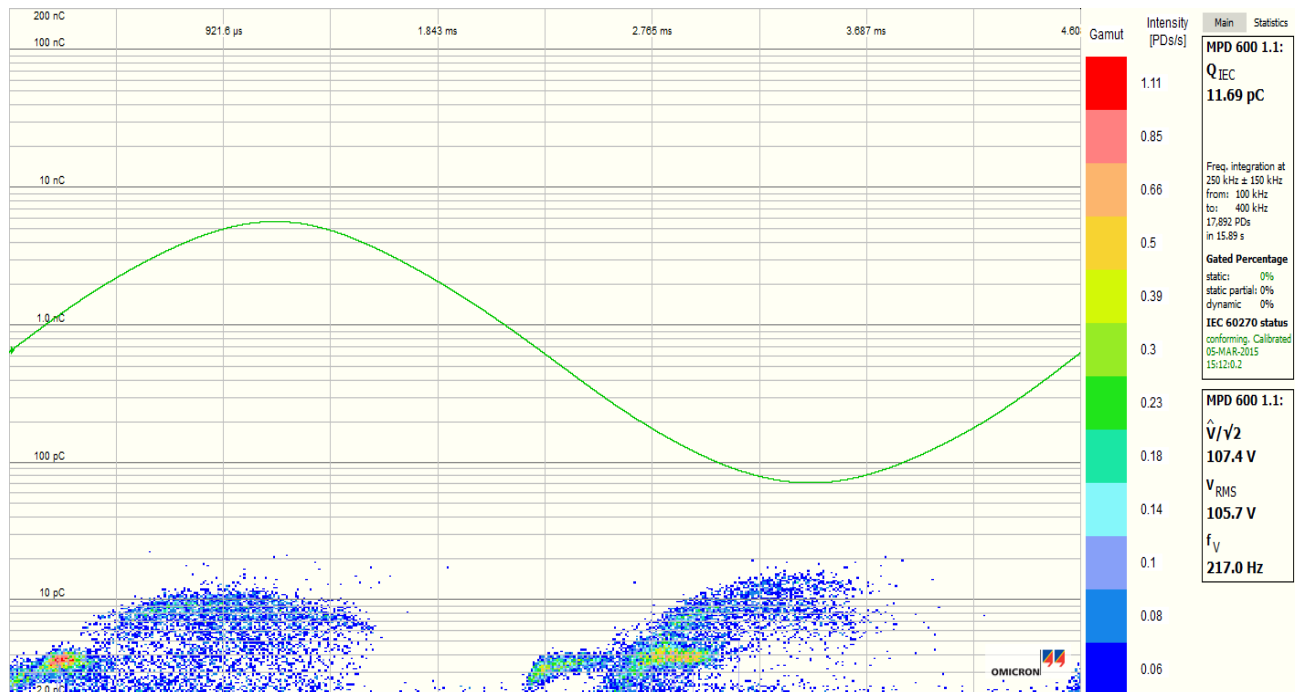
Obr. 29 Záznam z časového úseku A - v.č. 9226



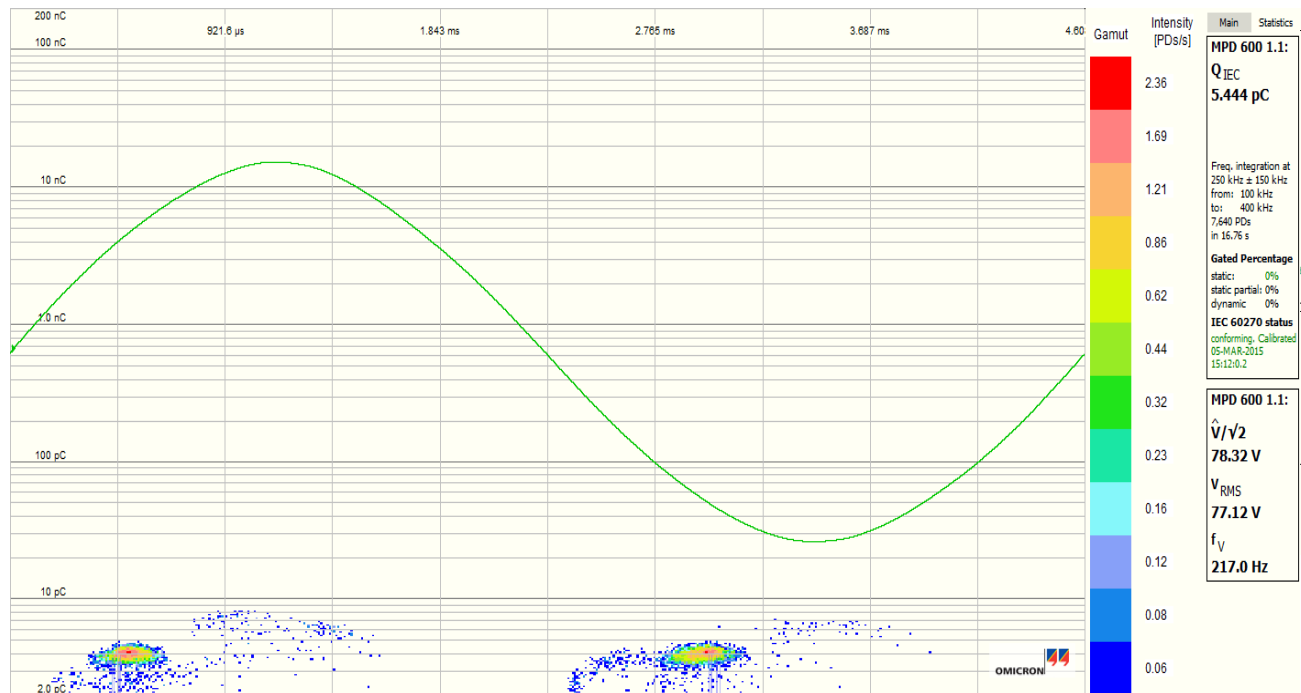
Obr. 30 Záznam z časového úseku B - v.č. 9226



Obr. 31 Záznam z časového úseku C - v.č. 9226



Obr. 32 Záznam z časového úseku D - v.č. 9226

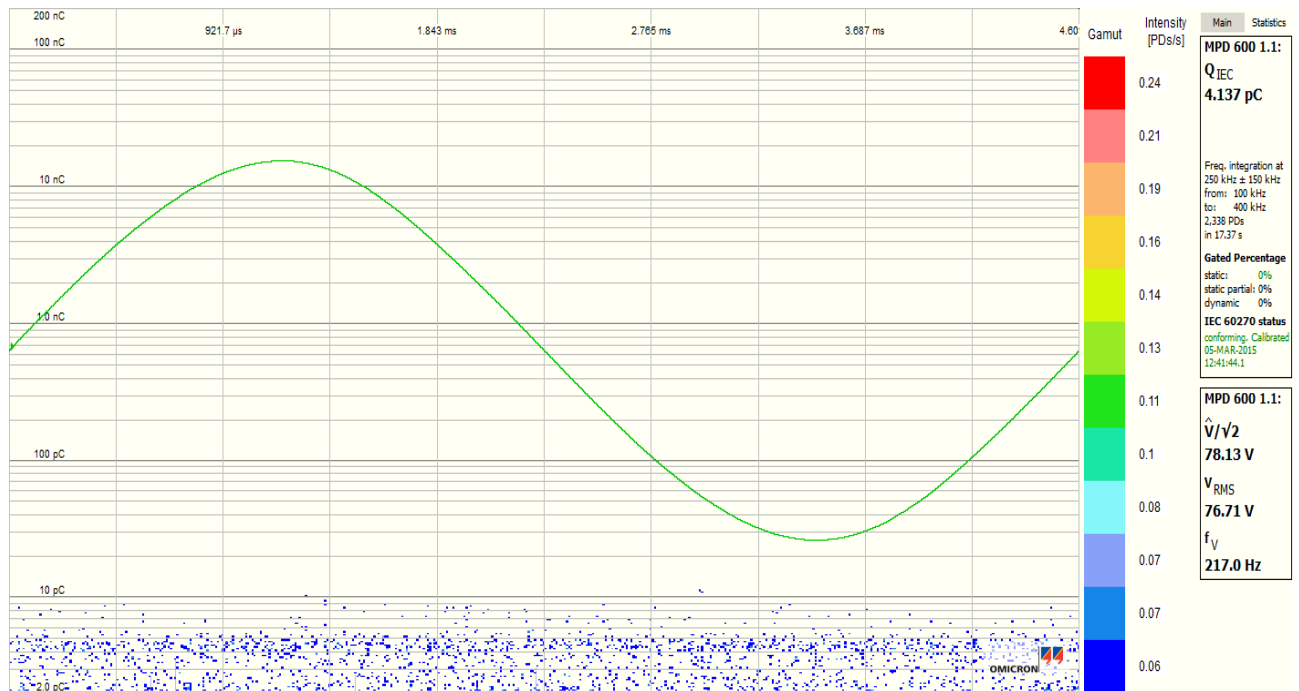


Obr. 33 Záznam z časového úseku E - v.č. 9226

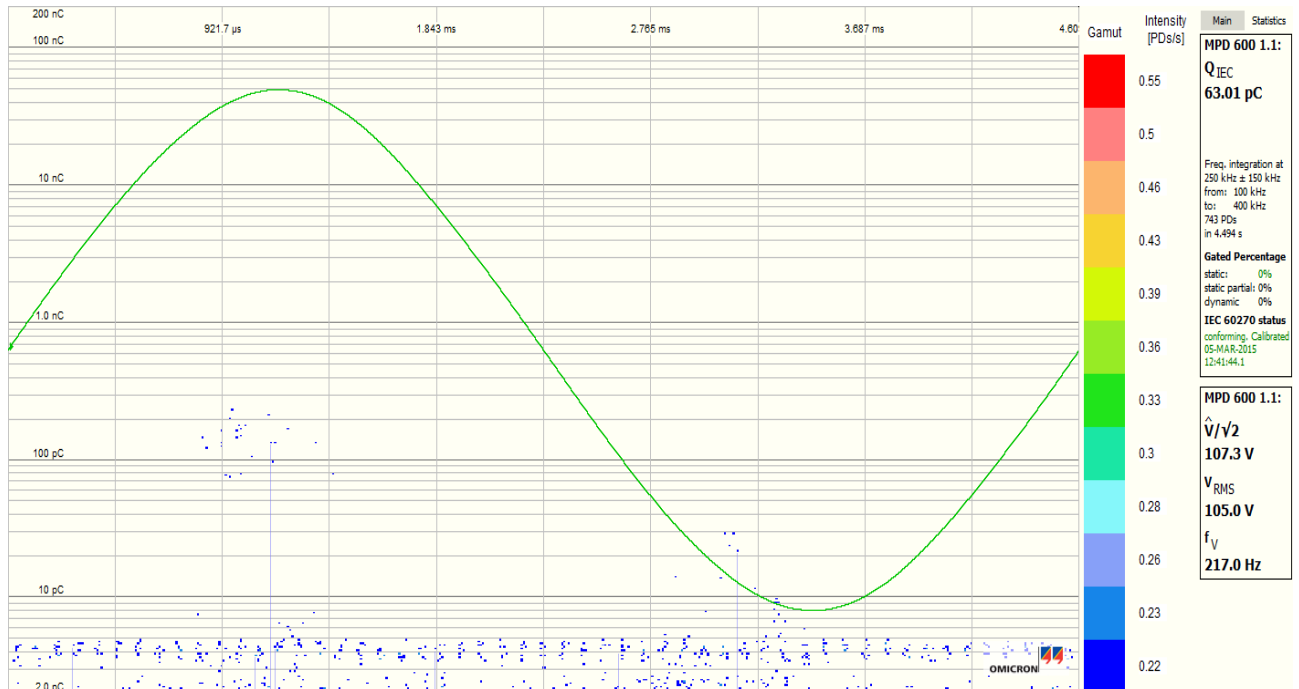
### 3.4.5 Výsledky měření ze zkoumané tlumivky ASR 15 V, v.č.: 9225

Tabulka 8 Výsledná naměřená data ze zhašecí tlumivky v.č.: 9225

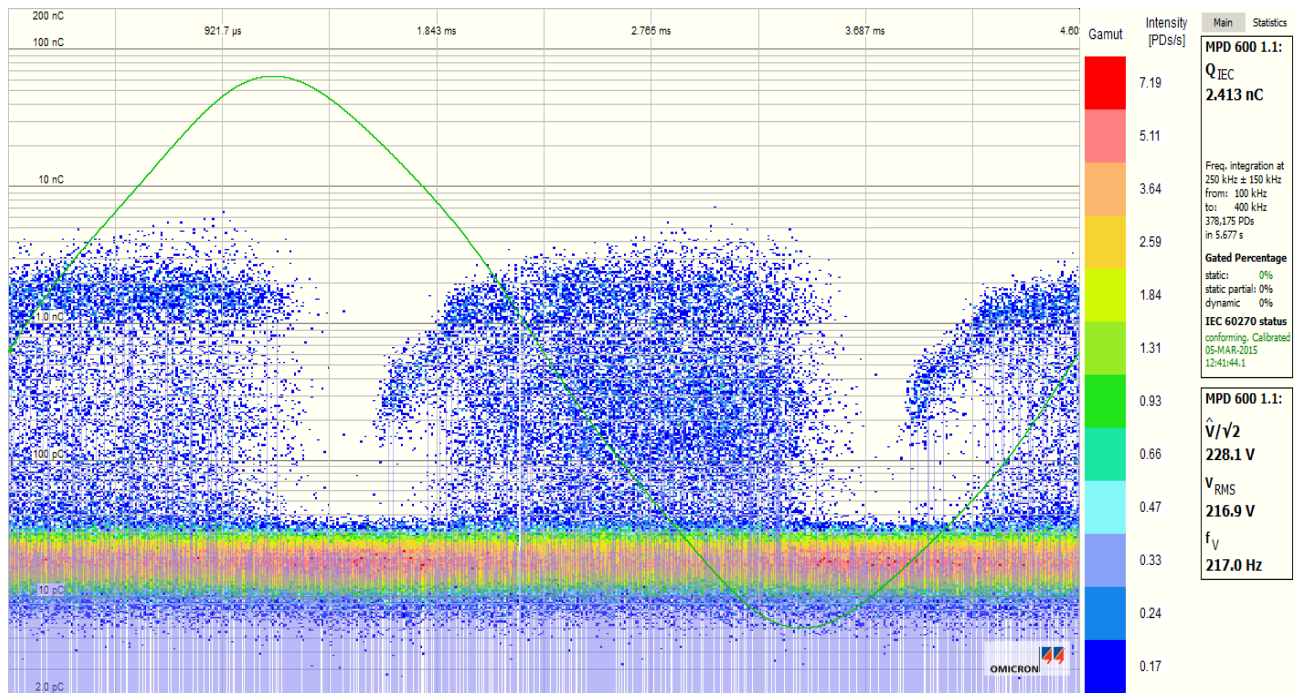
Zkouška krátkodobým střídavým indukovaným napětím ( f = 217 Hz)								
Zkušební napětí „fáze – zem“ [kV]			Zkušební postup					Hodnota pozadí ČV
			A	B	C	D	E	
			$1.1U_m/\sqrt{3}$	$1.5U_m/\sqrt{3}$		$1.5U_m/\sqrt{3}$	$1.1U_m/\sqrt{3}$	
			78	107	230	107	78	
Zk.svorka	Uzemněno	Čas [s]	120	120	28	120	120	
D1	D2	Hodnota ČV[pC]	$\leq 5.0$	$\leq 80.0$	-	$\leq 20.0$	$\leq 5.0$	$< 10.0$



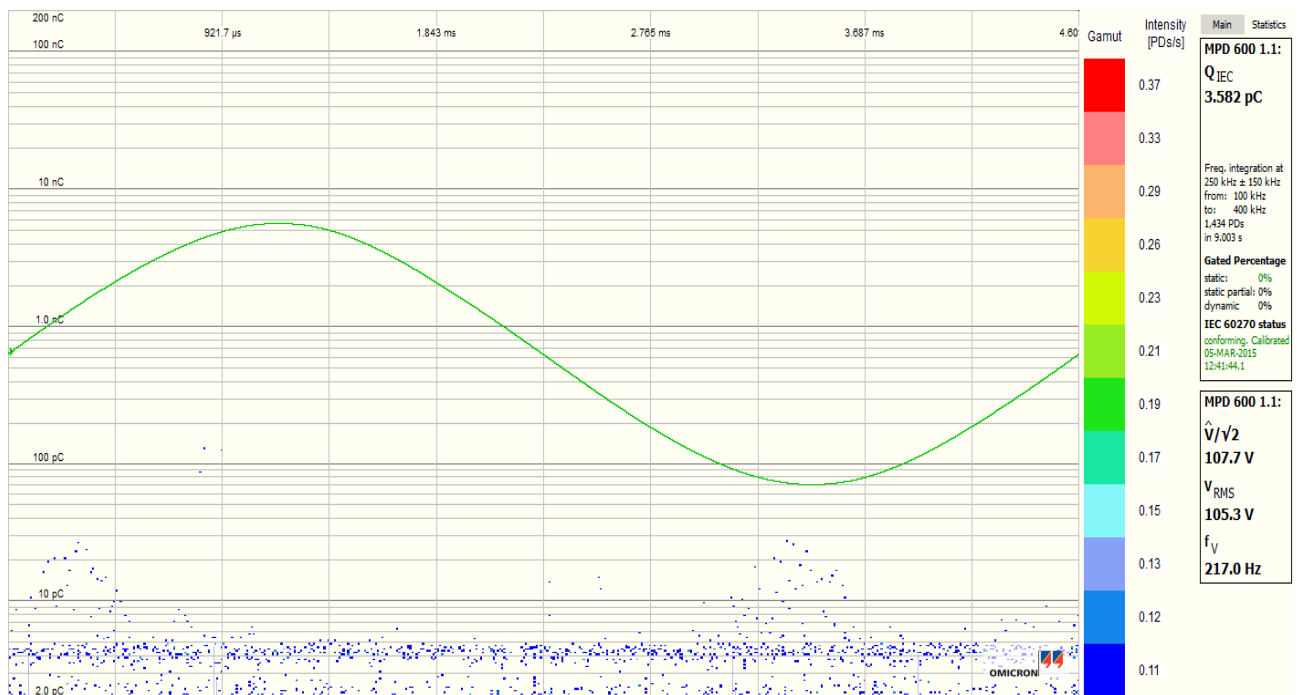
Obr. 34 Záznam z časového úseku A - v.č. 9225



Obr. 35 Záznam z časového úseku B - v.č. 9225

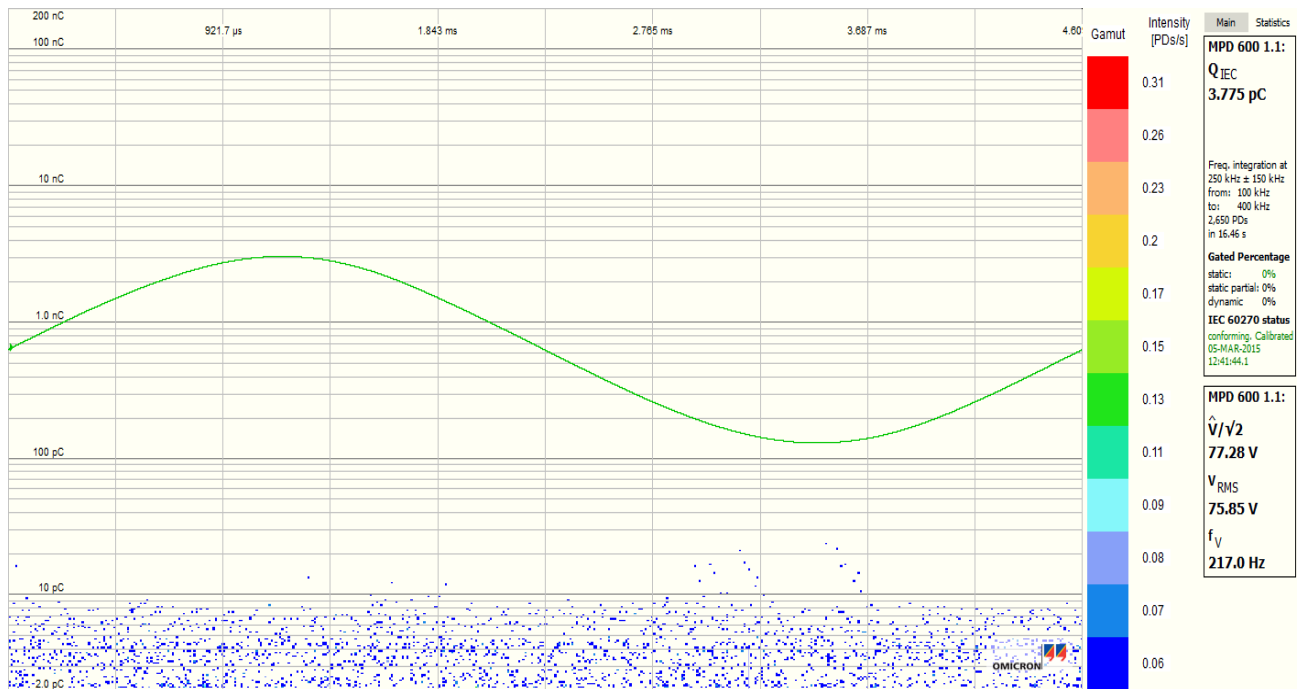


Obr. 36 Záznam z časového úseku C - v.č. 9225



Obr. 37 Záznam z časového úseku D - v.č. 9225





Obr. 38 Záznam z časového úseku E - v.č. 9225

## 4 Vyhodnocení naměřených dat

V první části vyhodnocení jsem se věnoval porovnání naměřených dat u dvou tlumivek typu ASR 10V. V další části jsem porovnal naměřená data u typově o něco méně výkonnějších strojů než v prvním srovnání a jednalo se o zhášecí tlumivky typu ASR 6.3V. Na závěr vyhodnocení jsem uvedl záznam z měření nejvýkonnějšího stroje, který se ve firmě EGE vyrábí a jedná se o zhášecí tlumivku typu ASR 15V.

### 4.1 Vyhodnocení zhášecích tlumivek typu ASR 10 V

Tyto zhášecí tlumivky nebyly pro stejného zákazníka a zkušební postup na měření ČV se pro obě tlumivky neshoduje. Pro výrobní číslo 9057 byla na přání zákazníka vyhodnocena výbojová činnost pouze u hladin  $U_2$  před a po zkušebním napětí. Časy pro vyhodnocení ČV na jednotlivých úrovních (ABDE - 5min., resp. BD - 5min) rovněž neodpovídají časům, které předepisuje norma. Tyto časy byly také po předchozí dohodě se zákazníkem zkráceny na 1 minutu.

Z průběhů vyhodnocení je možné u obou tlumivek pozorovat zvýšenou hodnotu výskytu ČV při plném zkušebním napětí. Tyto hodnoty se však při plném zkušebním napětí podle normy [7] nevyhodnocují a důležité pro vyhodnocení je aby při sjetí na úroveň zkušebního

napětí  $U_2$  tyto ČV poklesly pod požadovanou mez. Zapalovací napětí vyhodnotil měřicí software pro výrobní číslo 9057 s hodnotou 192 kV a zhášecí napětí s hodnotou 195 kV. Pro výrobní číslo 8949 vyhodnotil měřicí systém hodnotu zapalovacího napětí 172 kV a hodnota zhášecího napětí ČV 145 kV. U výrobního čísla 9057 si nejsem jist správností vyhodnocení hodnoty zhášecího napětí na hodnotu 195 kV, neboť tato hodnota bývá obvykle nižší než zapalovací napětí.

Obě tlumivky z hlediska účinků ČV se dají považovat za vyhovující, i když se můžou vyšší hodnoty na zkušební hladině 230kV jevit jako nevyhovující.

#### 4.2 Vyhodnocení zhášecích tlumivek typu 6.3V

Obě tyto tlumivky byly zkoušeny stejným zkušebním postupem, i když u výrobního čísla 9226 nebyla zkušební frekvence 200 Hz, ale 217 Hz, což mělo vliv pouze na čas měření na nejvyšší zkušební hladině 230 kV, kdy se zkrátila doba zkoušky z 30 vteřin na 28 vteřin. Po dohodě se zákazníkem nebyly ani zde dodrženy normou [7] předepsané časy, pro jednotlivé zkušební hladiny (ABDE - 5min.) a tyto časy byly zkráceny na 1 minutu.

Z průběhu zkoušek měřicí systém vyhodnotil zapalovací napětí pro výrobní číslo 9201 s hodnotou 160 kV a zhášecí napětí s hodnotou 140 kV. Pro výrobní číslo 9226 byla hodnota zapalovacího napětí 190 kV a zhášecí napětí 114 kV. Výbojová činnost byla tedy pouze při plném zkušebním napětí 230 kV, i když hodnota zhášecího napětí u tlumivky s výrobním číslem 9226 byla velmi hraniční s hodnotou 107 kV, takže nechybělo mnoho a tlumivka by mohla být brána jako nevyhovující.

Jelikož jsou tyto tlumivky naprosto stejného výkonu a provedení, dalo se očekávat podobných průběhů, a tím i reprodukovatelnosti technologických procesů a postupů při výrobě obou tlumivek. To se také potvrdilo, a i přes velmi vysoké hodnoty ČV na zkušební hladině 230 kV, lze obě tlumivky považovat za vyhovující.

#### 4.3 Vyhodnocení zhášecí tlumivky typu ASR 15V

Tento typ tlumivky byl zkoušen stejně jako předchozí zařízení zkušebním postupem (ABCDE) s předem dohodnutou dobou času na zkušebních hladinách ABDE - 2 minuty. Zkušební frekvence byla zvolena 217 Hz a doba času na plném zkušebním napětí 230 kV byla

tedy 28 vteřin. V příloze A této práce je možné vidět zkušební protokol vygenerovaný měřícím systémem firmy OMICRON. Zde je možné si všimnout, že v kolonce měření napětí jsou uvedené hodnoty v jednotkách Volt, nikoliv kilovolt. Toto nedopatření vzniklo pravděpodobně při kalibraci napětí, kdy se operátor přehlédl a do kolonky se zadávanou kalibrační hodnotou uvedl koeficient v řádech o tisíc menších. Ve skutečnosti ale byly hodnoty zkušebních úrovní v jednotkách kilovolt, takže toto nedopatření nemělo vliv na průběh a výsledky zkoušek.

Zapalovací napětí bylo měřícím systémem vyhodnoceno s hodnotou 181 kV a zhášecí napětí bylo vyhodnoceno s hodnotou 152 kV. Zvýšené hodnoty ČV byly detekovány pouze při plném zkušební napětí 230 kV s nejvyšší naměřenou hodnotou okolo 5 nC.

Tento typ tlumivky je nejvýkonnější zařízení, které se ve firmě EGE vyrábí a při výrobě se klade velký důraz na dodržování technologických procesů v průběhu výroby. V tomto případě bylo potvrzeno, že je stroj dobře navržen a že v průběhu výroby bylo vše vyrobeno podle předepsaných technologických postupů. Výbojová činnost byla detekována při plném zkušebním napětí 230 kV a při snížení zkušebního napětí na hodnotu 107 kV již nebyla zvýšená výbojová činnost detekována. Z tohoto důvodu lze považovat tuto tlumivku za vyhovující.

## Závěr

V úvodní, teoretické části se tato práce obecně zabývala účinky ČV, kde popisovala především vlivy těchto výbojů na izolační systém elektrických strojů. Následně byla popsána měřicí a zkušební metodika, jak obecně, tak v závěru kapitoly, zkušební postupy praktikované ve firmě EGE.

Ve třetí kapitole bylo zanalyzováno pět zhášecích tlumivek vyráběné firmou EGE, kdy byly vybrány co možná nejpodobnější typy zhášecích tlumivek, tak aby bylo možné nejen porovnat reprodukovatelnost technologických postupů a procesů při výrobě zhášecích tlumivek, ale i určit zda tlumivky odpovídají standardům požadovaných norem a jsou schopné dlouhodobému bezpečnému provozu.

V poslední kapitole bylo provedeno vyhodnocení naměřených dat, kde bylo konstatováno, že měřené zhášecí tlumivky měly podobné průběhy a ČV byly detekovány pouze na hladině plného zkušebního napětí 230 kV, což znamená, že podle standardu normy[7] vyhovují a jsou provozuschopné.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ČSN EN 60270 technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů. 2001.
- [2] Záliš K.: *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. 1. vyd. Praha 2005. 139 s. ISBN 80-200-1358-X
- [3] Mentlík V., Pihera J., Polanský R., Prosr P., Trnka P.: *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. BEN-Praha 2008. 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9
- [4] Pihera J., Martínek P., Trnka P., Netolický P.: *Analýza signálů pulzů částečných výbojů*. ElectroScope ISSN 1802-4564[online]. Ročník 2008. 2. vyd. Dostupné z: [http://147.228.94.30/index.php?option=com\\_content&view=frontpage&Itemid=9](http://147.228.94.30/index.php?option=com_content&view=frontpage&Itemid=9)
- [5] Mentlík V.: *Diagnostika izolantů*. VSŠE, Plzeň, 1986, 62 s.
- [6] Brožura Omicron, dostupná z: <https://www.omicron.at/en/products/all/primary-testing-monitoring/mpd-600/#Documents>
- [7] ČSN EN 60076-3 Výkonové transformátory – Izolační hladiny, dielektrické zkoušky a vnější vzdušné vzdálenosti. 2003.

# Přílohy

## Příloha A - Zkušební protokolu generovaný systémem na měření ČV

### PD Measurement Report



Order No. E1400264  
 Specimen No. and Type 9225  
 Customer EGE Deutschland  
 Operator **Václav Vlášek**  
 Test Date 03/05/2015  
 Test Voltage 230.0 kV  
 Test Duration 1 h  
 Custom Field 1 ASR 15V

	measurement duration: 9 m 29.22 s		
	MPD 600 1.1 (S/N: MPD 600-GK288E)		
Time	Q <sub>IEC</sub>	V <sub>RMS</sub>	f <sub>v</sub>
March 5, 2015, 11:54:41 (UTC)	Average: 281.50 pC	Average: 0 V	Average: 217.0 Hz
+ 0.12 s	4.32 pC ✓	26.55 V	217.0 Hz
+ 1.01 s	4.44 pC ✓	30.49 V	217.0 Hz
+ 1.92 s	4.54 pC ✓	36.61 V	217.0 Hz
+ 2.82 s	5.39 pC ✓	42.81 V	217.0 Hz
+ 3.72 s	7.61 pC ✓	49.00 V	217.0 Hz
+ 4.62 s	4.48 pC ✓	55.22 V	217.0 Hz
+ 5.52 s	4.33 pC ✓	61.48 V	217.0 Hz
+ 6.42 s	4.34 pC ✓	67.77 V	217.0 Hz
+ 7.32 s	4.61 pC ✓	72.86 V	217.0 Hz
+ 8.22 s	4.72 pC ✓	75.62 V	217.0 Hz
+ 9.12 s	4.58 pC ✓	77.03 V	217.0 Hz
+ 10.02 s	4.57 pC ✓	77.08 V	217.0 Hz
+ 10.92 s	4.48 pC ✓	76.98 V	217.0 Hz
+ 11.82 s	4.56 pC ✓	76.80 V	217.0 Hz
+ 12.72 s	4.68 pC ✓	76.78 V	217.0 Hz
+ 13.62 s	4.72 pC ✓	76.78 V	217.0 Hz
+ 14.52 s	6.18 pC ✓	76.78 V	217.0 Hz
+ 15.42 s	4.41 pC ✓	76.78 V	217.0 Hz
+ 16.32 s	4.42 pC ✓	76.77 V	217.0 Hz
+ 17.22 s	5.73 pC ✓	76.77 V	217.0 Hz
+ 18.12 s	18.07 pC ✓	76.77 V	217.0 Hz
+ 19.02 s	4.71 pC ✓	76.76 V	217.0 Hz
+ 19.92 s	4.73 pC ✓	76.75 V	217.0 Hz
+ 20.82 s	4.68 pC ✓	76.76 V	217.0 Hz
+ 21.72 s	6.14 pC ✓	76.76 V	217.0 Hz
+ 22.62 s	4.66 pC ✓	76.77 V	217.0 Hz
+ 23.52 s	4.85 pC ✓	76.78 V	217.0 Hz
+ 24.42 s	6.50 pC ✓	76.78 V	217.0 Hz
+ 25.32 s	4.41 pC ✓	76.78 V	217.0 Hz
+ 26.33 s	3.33 pC ✓	76.77 V	217.0 Hz
+ 27.23 s	4.46 pC ✓	76.77 V	217.0 Hz
+ 28.13 s	4.30 pC ✓	76.77 V	217.0 Hz
+ 29.03 s	4.70 pC ✓	76.77 V	217.0 Hz

+ 29.93 s	7.20 pC ✓	76.77 V	217.0 Hz
+ 30.83 s	6.54 pC ✓	76.75 V	217.0 Hz
+ 31.73 s	4.63 pC ✓	76.73 V	217.0 Hz
+ 32.63 s	4.76 pC ✓	76.72 V	217.0 Hz
+ 33.53 s	4.46 pC ✓	76.72 V	217.0 Hz
+ 34.43 s	4.36 pC ✓	76.73 V	217.0 Hz
+ 35.33 s	4.37 pC ✓	76.73 V	217.0 Hz
+ 36.23 s	4.30 pC ✓	76.72 V	217.0 Hz
+ 37.13 s	4.40 pC ✓	76.73 V	217.0 Hz
+ 38.03 s	4.43 pC ✓	76.73 V	217.0 Hz
+ 38.93 s	4.53 pC ✓	76.72 V	217.0 Hz
+ 39.83 s	4.54 pC ✓	76.72 V	217.0 Hz
+ 40.73 s	4.57 pC ✓	76.72 V	217.0 Hz
+ 41.63 s	4.28 pC ✓	76.72 V	217.0 Hz
+ 42.53 s	4.11 pC ✓	76.71 V	217.0 Hz
+ 43.43 s	4.20 pC ✓	76.71 V	217.0 Hz
+ 44.33 s	4.35 pC ✓	76.72 V	217.0 Hz
+ 45.23 s	4.43 pC ✓	76.71 V	217.0 Hz
+ 46.13 s	4.13 pC ✓	76.70 V	217.0 Hz
+ 47.03 s	4.30 pC ✓	76.70 V	217.0 Hz
+ 47.93 s	4.60 pC ✓	76.70 V	217.0 Hz
+ 48.83 s	4.75 pC ✓	76.70 V	217.0 Hz
+ 49.73 s	4.83 pC ✓	76.71 V	217.0 Hz
+ 50.63 s	6.06 pC ✓	76.71 V	217.0 Hz
+ 51.53 s	6.10 pC ✓	76.71 V	217.0 Hz
+ 52.43 s	5.83 pC ✓	76.71 V	217.0 Hz
+ 53.33 s	6.74 pC ✓	76.72 V	217.0 Hz
+ 54.23 s	7.76 pC ✓	76.72 V	217.0 Hz
+ 55.13 s	4.29 pC ✓	76.72 V	217.0 Hz
+ 56.03 s	4.28 pC ✓	76.73 V	217.0 Hz
+ 56.93 s	5.59 pC ✓	76.71 V	217.0 Hz
+ 57.83 s	6.11 pC ✓	76.72 V	217.0 Hz
+ 58.73 s	5.05 pC ✓	76.72 V	217.0 Hz
+ 59.63 s	5.21 pC ✓	76.72 V	217.0 Hz
+ 1 m 0.53 s	8.56 pC ✓	76.71 V	217.0 Hz
+ 1 m 1.43 s	7.14 pC ✓	76.70 V	217.0 Hz
+ 1 m 2.33 s	7.53 pC ✓	76.69 V	217.0 Hz
+ 1 m 3.23 s	4.54 pC ✓	76.66 V	217.0 Hz
+ 1 m 4.13 s	4.65 pC ✓	76.65 V	217.0 Hz
+ 1 m 5.03 s	4.44 pC ✓	76.66 V	217.0 Hz
+ 1 m 5.93 s	4.66 pC ✓	76.65 V	217.0 Hz
+ 1 m 6.83 s	4.67 pC ✓	76.64 V	217.0 Hz
+ 1 m 7.73 s	4.60 pC ✓	76.64 V	217.0 Hz
+ 1 m 8.63 s	4.63 pC ✓	76.64 V	217.0 Hz
+ 1 m 9.53 s	4.68 pC ✓	76.64 V	217.0 Hz
+ 1 m 10.43 s	4.52 pC ✓	76.64 V	217.0 Hz
+ 1 m 11.33 s	4.68 pC ✓	76.64 V	217.0 Hz

+ 1 m 12.23 s	4.57 pC ✓	76.64 V	217.0 Hz
+ 1 m 13.13 s	4.57 pC ✓	76.64 V	217.0 Hz
+ 1 m 14.03 s	4.67 pC ✓	76.64 V	217.0 Hz
+ 1 m 14.93 s	4.61 pC ✓	76.63 V	217.0 Hz
+ 1 m 15.83 s	4.74 pC ✓	76.63 V	217.0 Hz
+ 1 m 16.73 s	4.74 pC ✓	76.63 V	217.0 Hz
+ 1 m 17.63 s	4.68 pC ✓	76.63 V	217.0 Hz
+ 1 m 18.53 s	4.66 pC ✓	76.63 V	217.0 Hz
+ 1 m 19.43 s	4.38 pC ✓	76.64 V	217.0 Hz
+ 1 m 20.33 s	4.83 pC ✓	76.65 V	217.0 Hz
+ 1 m 21.23 s	5.01 pC ✓	76.65 V	217.0 Hz
+ 1 m 22.13 s	4.87 pC ✓	76.64 V	217.0 Hz
+ 1 m 23.03 s	4.73 pC ✓	76.64 V	217.0 Hz
+ 1 m 23.93 s	4.46 pC ✓	76.63 V	217.0 Hz
+ 1 m 24.94 s	3.19 pC ✓	76.62 V	217.0 Hz
+ 1 m 25.84 s	4.02 pC ✓	76.62 V	217.0 Hz
+ 1 m 26.74 s	4.21 pC ✓	76.62 V	217.0 Hz
+ 1 m 27.64 s	4.50 pC ✓	76.62 V	217.0 Hz
+ 1 m 28.54 s	4.67 pC ✓	76.63 V	217.0 Hz
+ 1 m 29.44 s	5.38 pC ✓	76.62 V	217.0 Hz
+ 1 m 30.34 s	5.01 pC ✓	76.62 V	217.0 Hz
+ 1 m 31.24 s	5.20 pC ✓	76.63 V	217.0 Hz
+ 1 m 32.14 s	4.80 pC ✓	76.64 V	217.0 Hz
+ 1 m 33.04 s	5.04 pC ✓	76.64 V	217.0 Hz
+ 1 m 33.94 s	4.35 pC ✓	76.63 V	217.0 Hz
+ 1 m 34.84 s	4.38 pC ✓	76.62 V	217.0 Hz
+ 1 m 35.74 s	4.34 pC ✓	76.62 V	217.0 Hz
+ 1 m 36.64 s	4.41 pC ✓	76.63 V	217.0 Hz
+ 1 m 37.54 s	4.20 pC ✓	76.63 V	217.0 Hz
+ 1 m 38.44 s	4.14 pC ✓	76.63 V	217.0 Hz
+ 1 m 39.34 s	4.18 pC ✓	76.62 V	217.0 Hz
+ 1 m 40.24 s	4.23 pC ✓	76.63 V	217.0 Hz
+ 1 m 41.14 s	4.24 pC ✓	76.63 V	217.0 Hz
+ 1 m 42.04 s	4.21 pC ✓	76.62 V	217.0 Hz
+ 1 m 42.94 s	4.25 pC ✓	76.62 V	217.0 Hz
+ 1 m 43.84 s	4.25 pC ✓	76.62 V	217.0 Hz
+ 1 m 44.74 s	4.25 pC ✓	76.62 V	217.0 Hz
+ 1 m 45.64 s	4.41 pC ✓	76.62 V	217.0 Hz
+ 1 m 46.54 s	4.59 pC ✓	76.63 V	217.0 Hz
+ 1 m 47.44 s	5.82 pC ✓	76.62 V	217.0 Hz
+ 1 m 48.34 s	7.33 pC ✓	76.62 V	217.0 Hz
+ 1 m 49.24 s	7.21 pC ✓	76.61 V	217.0 Hz
+ 1 m 50.14 s	5.48 pC ✓	76.61 V	217.0 Hz
+ 1 m 51.04 s	4.74 pC ✓	76.60 V	217.0 Hz
+ 1 m 51.94 s	4.64 pC ✓	76.60 V	217.0 Hz
+ 1 m 52.84 s	4.56 pC ✓	76.60 V	217.0 Hz
+ 1 m 53.74 s	4.73 pC ✓	76.59 V	217.0 Hz



+ 1 m 54.64 s	4.69 pC ✓	76.59 V	217.0 Hz
+ 1 m 55.54 s	4.57 pC ✓	76.60 V	217.0 Hz
+ 1 m 56.44 s	4.81 pC ✓	76.58 V	217.0 Hz
+ 1 m 57.34 s	4.26 pC ✓	76.57 V	217.0 Hz
+ 1 m 58.24 s	4.29 pC ✓	76.59 V	217.0 Hz
+ 1 m 59.14 s	4.52 pC ✓	76.59 V	217.0 Hz
+ 2 m 0.04 s	4.52 pC ✓	76.60 V	217.0 Hz
+ 2 m 0.94 s	4.20 pC ✓	76.61 V	217.0 Hz
+ 2 m 1.84 s	5.43 pC ✓	76.61 V	217.0 Hz
+ 2 m 2.74 s	4.74 pC ✓	76.61 V	217.0 Hz
+ 2 m 3.64 s	4.58 pC ✓	76.60 V	217.0 Hz
+ 2 m 4.54 s	10.50 pC ✓	76.60 V	217.0 Hz
+ 2 m 5.44 s	8.16 pC ✓	76.61 V	217.0 Hz
+ 2 m 6.34 s	5.92 pC ✓	76.60 V	217.0 Hz
+ 2 m 7.24 s	5.03 pC ✓	76.62 V	217.0 Hz
+ 2 m 8.14 s	5.02 pC ✓	76.62 V	217.0 Hz
+ 2 m 9.04 s	5.66 pC ✓	76.62 V	217.0 Hz
+ 2 m 9.94 s	4.79 pC ✓	76.62 V	217.0 Hz
+ 2 m 10.84 s	4.78 pC ✓	76.61 V	217.0 Hz
+ 2 m 11.74 s	4.35 pC ✓	76.61 V	217.0 Hz
+ 2 m 12.64 s	4.90 pC ✓	76.61 V	217.0 Hz
+ 2 m 13.54 s	5.47 pC ✓	77.30 V	217.0 Hz
+ 2 m 14.44 s	4.24 pC ✓	81.28 V	217.0 Hz
+ 2 m 15.34 s	4.37 pC ✓	87.30 V	217.0 Hz
+ 2 m 16.24 s	16.17 pC ✓	93.31 V	217.0 Hz
+ 2 m 17.14 s	16.05 pC ✓	99.29 V	217.0 Hz
+ 2 m 18.04 s	84.58 pC ✓	103.22 V	217.0 Hz
+ 2 m 18.94 s	133.23 pC ✓	104.43 V	217.0 Hz
+ 2 m 19.84 s	106.08 pC ✓	104.61 V	217.0 Hz
+ 2 m 20.74 s	119.90 pC ✓	104.72 V	217.0 Hz
+ 2 m 21.64 s	135.96 pC ✓	105.45 V	217.0 Hz
+ 2 m 22.54 s	141.57 pC ✓	105.73 V	217.0 Hz
+ 2 m 23.44 s	131.74 pC ✓	105.66 V	217.0 Hz
+ 2 m 24.34 s	97.37 pC ✓	105.34 V	217.0 Hz
+ 2 m 25.24 s	118.83 pC ✓	105.23 V	217.0 Hz
+ 2 m 26.14 s	136.30 pC ✓	105.23 V	217.0 Hz
+ 2 m 27.04 s	106.06 pC ✓	105.21 V	217.0 Hz
+ 2 m 27.94 s	125.26 pC ✓	105.19 V	217.0 Hz
+ 2 m 28.84 s	124.07 pC ✓	105.18 V	217.0 Hz
+ 2 m 29.74 s	106.34 pC ✓	105.18 V	217.0 Hz
+ 2 m 30.68 s	56.77 pC ✓	105.18 V	217.0 Hz
+ 2 m 31.58 s	83.95 pC ✓	105.17 V	217.0 Hz
+ 2 m 32.48 s	118.52 pC ✓	105.17 V	217.0 Hz
+ 2 m 33.38 s	123.84 pC ✓	105.15 V	217.0 Hz
+ 2 m 34.28 s	103.60 pC ✓	105.13 V	217.0 Hz
+ 2 m 35.18 s	110.69 pC ✓	105.11 V	217.0 Hz
+ 2 m 36.08 s	129.83 pC ✓	105.11 V	217.0 Hz

+ 2 m 36.98 s	140.13 pC ✓	105.10 V	217.0 Hz
+ 2 m 38 s	77.30 pC ✓	105.09 V	217.0 Hz
+ 2 m 38.9 s	121.34 pC ✓	105.08 V	217.0 Hz
+ 2 m 39.8 s	121.43 pC ✓	105.08 V	217.0 Hz
+ 2 m 40.7 s	107.83 pC ✓	105.08 V	217.0 Hz
+ 2 m 41.47 s	84.53 pC ✓	105.08 V	217.0 Hz
+ 2 m 42.37 s	122.64 pC ✓	105.06 V	217.0 Hz
+ 2 m 43.27 s	113.49 pC ✓	105.05 V	217.0 Hz
+ 2 m 44.17 s	114.28 pC ✓	105.06 V	217.0 Hz
+ 2 m 45.07 s	122.00 pC ✓	105.05 V	217.0 Hz
+ 2 m 45.97 s	112.01 pC ✓	105.05 V	217.0 Hz
+ 2 m 46.87 s	120.82 pC ✓	105.05 V	217.0 Hz
+ 2 m 47.77 s	141.13 pC ✓	105.05 V	217.0 Hz
+ 2 m 48.67 s	132.19 pC ✓	105.04 V	217.0 Hz
+ 2 m 49.69 s	95.13 pC ✓	105.05 V	217.0 Hz
+ 2 m 50.59 s	106.27 pC ✓	105.04 V	217.0 Hz
+ 2 m 51.49 s	93.26 pC ✓	105.03 V	217.0 Hz
+ 2 m 52.39 s	93.22 pC ✓	105.02 V	217.0 Hz
+ 2 m 53.29 s	128.63 pC ✓	105.02 V	217.0 Hz
+ 2 m 54.19 s	135.24 pC ✓	105.01 V	217.0 Hz
+ 2 m 55.09 s	148.06 pC ✓	105.01 V	217.0 Hz
+ 2 m 55.99 s	137.67 pC ✓	105.02 V	217.0 Hz
+ 2 m 56.89 s	128.25 pC ✓	105.02 V	217.0 Hz
+ 2 m 57.88 s	75.91 pC ✓	105.00 V	217.0 Hz
+ 2 m 58.78 s	92.54 pC ✓	105.00 V	217.0 Hz
+ 2 m 59.68 s	103.47 pC ✓	105.00 V	217.0 Hz
+ 3 m 0.58 s	108.80 pC ✓	105.00 V	217.0 Hz
+ 3 m 1.48 s	86.64 pC ✓	105.00 V	217.0 Hz
+ 3 m 2.38 s	109.08 pC ✓	105.00 V	217.0 Hz
+ 3 m 3.31 s	68.89 pC ✓	105.00 V	217.0 Hz
+ 3 m 4.21 s	113.84 pC ✓	104.99 V	217.0 Hz
+ 3 m 5.11 s	129.81 pC ✓	104.99 V	217.0 Hz
+ 3 m 6.01 s	113.74 pC ✓	104.99 V	217.0 Hz
+ 3 m 6.91 s	114.81 pC ✓	104.98 V	217.0 Hz
+ 3 m 7.8 s	57.25 pC ✓	104.98 V	217.0 Hz
+ 3 m 8.7 s	142.90 pC ✓	104.98 V	217.0 Hz
+ 3 m 9.6 s	97.20 pC ✓	104.98 V	217.0 Hz
+ 3 m 10.5 s	142.45 pC ✓	104.97 V	217.0 Hz
+ 3 m 11.4 s	125.08 pC ✓	104.97 V	217.0 Hz
+ 3 m 12.3 s	122.31 pC ✓	104.97 V	217.0 Hz
+ 3 m 13.2 s	121.97 pC ✓	105.00 V	217.0 Hz
+ 3 m 14.19 s	70.66 pC ✓	104.99 V	217.0 Hz
+ 3 m 15.09 s	84.04 pC ✓	104.99 V	217.0 Hz
+ 3 m 15.99 s	109.72 pC ✓	104.98 V	217.0 Hz
+ 3 m 16.89 s	114.22 pC ✓	104.96 V	217.0 Hz
+ 3 m 17.79 s	76.33 pC ✓	104.95 V	217.0 Hz
+ 3 m 18.69 s	72.76 pC ✓	104.96 V	217.0 Hz

+ 3 m 19.6 s	96.45 pC ✓	104.96 V	217.0 Hz
+ 3 m 20.59 s	88.60 pC ✓	104.95 V	217.0 Hz
+ 3 m 21.49 s	77.27 pC ✓	104.96 V	217.0 Hz
+ 3 m 22.39 s	83.09 pC ✓	104.97 V	217.0 Hz
+ 3 m 23.29 s	73.20 pC ✓	104.97 V	217.0 Hz
+ 3 m 24.19 s	127.53 pC ✓	104.97 V	217.0 Hz
+ 3 m 25.09 s	137.37 pC ✓	104.99 V	217.0 Hz
+ 3 m 26.05 s	65.60 pC ✓	104.98 V	217.0 Hz
+ 3 m 26.95 s	112.83 pC ✓	104.98 V	217.0 Hz
+ 3 m 27.85 s	113.87 pC ✓	105.00 V	217.0 Hz
+ 3 m 28.75 s	74.69 pC ✓	104.98 V	217.0 Hz
+ 3 m 29.53 s	68.29 pC ✓	104.97 V	217.0 Hz
+ 3 m 30.43 s	101.65 pC ✓	104.97 V	217.0 Hz
+ 3 m 31.33 s	86.11 pC ✓	104.97 V	217.0 Hz
+ 3 m 32.23 s	85.65 pC ✓	104.98 V	217.0 Hz
+ 3 m 33.13 s	81.92 pC ✓	104.98 V	217.0 Hz
+ 3 m 34.09 s	64.69 pC ✓	104.98 V	217.0 Hz
+ 3 m 34.99 s	127.37 pC ✓	104.99 V	217.0 Hz
+ 3 m 35.89 s	133.38 pC ✓	104.98 V	217.0 Hz
+ 3 m 36.79 s	102.93 pC ✓	104.98 V	217.0 Hz
+ 3 m 37.69 s	94.90 pC ✓	104.98 V	217.0 Hz
+ 3 m 38.59 s	118.08 pC ✓	104.99 V	217.0 Hz
+ 3 m 39.49 s	61.11 pC ✓	104.99 V	217.0 Hz
+ 3 m 40.39 s	119.76 pC ✓	104.99 V	217.0 Hz
+ 3 m 41.29 s	106.30 pC ✓	104.99 V	217.0 Hz
+ 3 m 42.19 s	102.75 pC ✓	104.99 V	217.0 Hz
+ 3 m 43.09 s	103.33 pC ✓	104.99 V	217.0 Hz
+ 3 m 44.06 s	91.37 pC ✓	104.97 V	217.0 Hz
+ 3 m 44.96 s	116.49 pC ✓	104.97 V	217.0 Hz
+ 3 m 45.86 s	110.09 pC ✓	104.96 V	217.0 Hz
+ 3 m 46.76 s	84.65 pC ✓	104.95 V	217.0 Hz
+ 3 m 47.53 s	84.46 pC ✓	104.94 V	217.0 Hz
+ 3 m 48.43 s	119.74 pC ✓	104.95 V	217.0 Hz
+ 3 m 49.33 s	119.55 pC ✓	104.94 V	217.0 Hz
+ 3 m 50.23 s	96.36 pC ✓	104.94 V	217.0 Hz
+ 3 m 51.13 s	113.86 pC ✓	104.94 V	217.0 Hz
+ 3 m 52.03 s	126.97 pC ✓	104.94 V	217.0 Hz
+ 3 m 52.93 s	104.48 pC ✓	104.93 V	217.0 Hz
+ 3 m 53.83 s	42.93 pC ✓	104.93 V	217.0 Hz
+ 3 m 54.73 s	139.18 pC ✓	104.96 V	217.0 Hz
+ 3 m 55.63 s	108.91 pC ✓	104.97 V	217.0 Hz
+ 3 m 56.53 s	83.11 pC ✓	104.97 V	217.0 Hz
+ 3 m 57.43 s	103.33 pC ✓	104.97 V	217.0 Hz
+ 3 m 58.33 s	45.92 pC ✓	104.98 V	217.0 Hz
+ 3 m 59.23 s	71.98 pC ✓	104.97 V	217.0 Hz
+ 4 m 0.13 s	132.40 pC ✓	104.95 V	217.0 Hz
+ 4 m 1.03 s	52.60 pC ✓	104.95 V	217.0 Hz

+ 4 m 1.93 s	71.39 pC ✓	104.97 V	217.0 Hz
+ 4 m 2.83 s	108.25 pC ✓	104.98 V	217.0 Hz
+ 4 m 3.73 s	120.96 pC ✓	104.98 V	217.0 Hz
+ 4 m 4.63 s	117.04 pC ✓	104.98 V	217.0 Hz
+ 4 m 5.53 s	132.73 pC ✓	104.98 V	217.0 Hz
+ 4 m 6.43 s	34.73 pC ✓	104.97 V	217.0 Hz
+ 4 m 7.33 s	73.28 pC ✓	104.96 V	217.0 Hz
+ 4 m 8.23 s	76.01 pC ✓	104.96 V	217.0 Hz
+ 4 m 9.13 s	91.98 pC ✓	104.96 V	217.0 Hz
+ 4 m 10.03 s	113.75 pC ✓	104.97 V	217.0 Hz
+ 4 m 10.93 s	117.23 pC ✓	104.97 V	217.0 Hz
+ 4 m 11.83 s	44.08 pC ✓	104.96 V	217.0 Hz
+ 4 m 12.73 s	44.09 pC ✓	104.96 V	217.0 Hz
+ 4 m 13.63 s	24.71 pC ✓	104.97 V	217.0 Hz
+ 4 m 14.53 s	73.94 pC ✓	104.96 V	217.0 Hz
+ 4 m 15.43 s	104.47 pC ✓	104.96 V	217.0 Hz
+ 4 m 16.33 s	95.66 pC ✓	104.96 V	217.0 Hz
+ 4 m 17.23 s	100.58 pC ✓	104.96 V	217.0 Hz
+ 4 m 18.13 s	92.69 pC ✓	104.96 V	217.0 Hz
+ 4 m 19.03 s	104.33 pC ✓	105.23 V	217.0 Hz
+ 4 m 19.93 s	117.85 pC ✓	108.33 V	217.0 Hz
+ 4 m 20.83 s	133.24 pC ✓	114.01 V	217.0 Hz
+ 4 m 21.73 s	111.08 pC ✓	119.68 V	217.0 Hz
+ 4 m 22.63 s	186.17 pC ✓	125.44 V	217.0 Hz
+ 4 m 23.53 s	209.53 pC ✓	131.17 V	217.0 Hz
+ 4 m 24.43 s	214.82 pC ✓	136.95 V	217.0 Hz
+ 4 m 25.33 s	241.63 pC ✓	142.68 V	217.0 Hz
+ 4 m 26.23 s	287.05 pC ✓	148.37 V	217.0 Hz
+ 4 m 27.13 s	299.04 pC ✓	153.99 V	217.0 Hz
+ 4 m 28.03 s	283.69 pC ✓	159.55 V	217.0 Hz
+ 4 m 28.93 s	359.27 pC ✓	165.07 V	217.0 Hz
+ 4 m 29.83 s	411.14 pC ✓	170.50 V	217.0 Hz
+ 4 m 30.73 s	418.14 pC ✓	175.85 V	217.0 Hz
+ 4 m 31.63 s	1.18 nC ✓	181.13 V	217.0 Hz
+ 4 m 32.53 s	527.05 pC ✓	186.36 V	217.0 Hz
+ 4 m 33.43 s	629.00 pC ✓	191.51 V	217.0 Hz
+ 4 m 34.33 s	748.49 pC ✓	196.62 V	217.0 Hz
+ 4 m 35.23 s	780.53 pC ✓	201.67 V	217.0 Hz
+ 4 m 36.13 s	985.26 pC ✗	206.58 V	217.0 Hz
+ 4 m 37.03 s	997.66 pC ✓	210.18 V	217.0 Hz
+ 4 m 37.93 s	958.90 pC ✓	213.25 V	217.0 Hz
+ 4 m 38.83 s	1.12 nC ✗	215.43 V	217.0 Hz
+ 4 m 39.73 s	1.84 nC ✗	217.54 V	217.0 Hz
+ 4 m 40.63 s	3.07 nC ✗	218.23 V	217.0 Hz
+ 4 m 41.53 s	3.78 nC ✗	218.17 V	217.0 Hz
+ 4 m 42.43 s	4.07 nC ✗	217.35 V	217.0 Hz
+ 4 m 43.45 s	3.22 nC ✗	216.97 V	217.0 Hz

+ 4 m 44.35 s	4.63 nC ✘	216.97 V	217.0 Hz
+ 4 m 45.25 s	4.61 nC ✘	216.97 V	217.0 Hz
+ 4 m 46.15 s	5.02 nC ✘	216.97 V	217.0 Hz
+ 4 m 47.05 s	5.31 nC ✘	216.98 V	217.0 Hz
+ 4 m 47.95 s	3.87 nC ✘	216.98 V	217.0 Hz
+ 4 m 48.73 s	1.80 nC ✘	216.98 V	217.0 Hz
+ 4 m 49.63 s	2.29 nC ✘	216.98 V	217.0 Hz
+ 4 m 50.53 s	2.17 nC ✘	216.97 V	217.0 Hz
+ 4 m 51.43 s	2.80 nC ✘	216.97 V	217.0 Hz
+ 4 m 52.33 s	3.94 nC ✘	216.96 V	217.0 Hz
+ 4 m 53.15 s	2.89 nC ✘	216.97 V	217.0 Hz
+ 4 m 54.06 s	4.57 nC ✘	216.96 V	217.0 Hz
+ 4 m 54.95 s	2.66 nC ✘	216.95 V	217.0 Hz
+ 4 m 55.86 s	2.37 nC ✘	216.95 V	217.0 Hz
+ 4 m 56.76 s	3.24 nC ✘	216.94 V	217.0 Hz
+ 4 m 57.66 s	4.12 nC ✘	216.94 V	217.0 Hz
+ 4 m 58.56 s	4.43 nC ✘	216.93 V	217.0 Hz
+ 4 m 59.46 s	2.91 nC ✘	216.93 V	217.0 Hz
+ 5 m 0.36 s	2.28 nC ✘	216.94 V	217.0 Hz
+ 5 m 1.26 s	2.43 nC ✘	216.94 V	217.0 Hz
+ 5 m 2.16 s	3.74 nC ✘	216.92 V	217.0 Hz
+ 5 m 3.06 s	4.03 nC ✘	216.92 V	217.0 Hz
+ 5 m 3.96 s	4.58 nC ✘	216.90 V	217.0 Hz
+ 5 m 4.86 s	4.82 nC ✘	216.90 V	217.0 Hz
+ 5 m 5.76 s	4.34 nC ✘	216.90 V	217.0 Hz
+ 5 m 6.66 s	3.06 nC ✘	216.89 V	217.0 Hz
+ 5 m 7.56 s	2.69 nC ✘	215.80 V	217.0 Hz
+ 5 m 8.46 s	2.42 nC ✘	211.94 V	217.0 Hz
+ 5 m 9.36 s	2.39 nC ✘	207.10 V	217.0 Hz
+ 5 m 10.26 s	2.46 nC ✘	202.16 V	217.0 Hz
+ 5 m 11.16 s	3.29 nC ✘	197.17 V	217.0 Hz
+ 5 m 12.06 s	4.24 nC ✘	192.10 V	217.0 Hz
+ 5 m 12.96 s	3.85 nC ✘	186.97 V	217.0 Hz
+ 5 m 13.86 s	3.56 nC ✘	181.75 V	217.0 Hz
+ 5 m 14.76 s	3.55 nC ✘	176.46 V	217.0 Hz
+ 5 m 15.66 s	3.48 nC ✘	171.16 V	217.0 Hz
+ 5 m 16.56 s	3.53 nC ✘	165.80 V	217.0 Hz
+ 5 m 17.46 s	2.96 nC ✘	160.38 V	217.0 Hz
+ 5 m 18.36 s	2.88 nC ✘	154.91 V	217.0 Hz
+ 5 m 19.26 s	530.03 pC ✔	149.35 V	217.0 Hz
+ 5 m 20.16 s	42.85 pC ✔	143.73 V	217.0 Hz
+ 5 m 21.06 s	58.61 pC ✔	138.08 V	217.0 Hz
+ 5 m 21.96 s	31.03 pC ✔	132.35 V	217.0 Hz
+ 5 m 22.86 s	45.28 pC ✔	126.71 V	217.0 Hz
+ 5 m 23.76 s	14.89 pC ✔	121.30 V	217.0 Hz
+ 5 m 24.66 s	38.34 pC ✔	115.49 V	217.0 Hz
+ 5 m 25.56 s	21.11 pC ✔	110.80 V	217.0 Hz

+ 5 m 26.46 s	4.19 pC ✓	107.47 V	217.0 Hz
+ 5 m 27.34 s	2.82 pC ✓	105.95 V	217.0 Hz
+ 5 m 28.24 s	18.26 pC ✓	105.74 V	217.0 Hz
+ 5 m 29.14 s	17.95 pC ✓	105.32 V	217.0 Hz
+ 5 m 30.04 s	4.39 pC ✓	105.26 V	217.0 Hz
+ 5 m 30.94 s	4.20 pC ✓	105.26 V	217.0 Hz
+ 5 m 31.84 s	4.31 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 5 m 32.74 s	4.10 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 5 m 33.64 s	4.21 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 5 m 34.54 s	4.22 pC ✓	105.26 V	217.0 Hz
+ 5 m 35.44 s	5.05 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 5 m 36.34 s	4.46 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 5 m 37.24 s	4.73 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 5 m 38.14 s	4.20 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 5 m 39.04 s	4.13 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 5 m 39.94 s	4.24 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 5 m 40.85 s	8.07 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 5 m 41.67 s	3.05 pC ✓	105.26 V	217.0 Hz
+ 5 m 42.57 s	9.46 pC ✓	105.26 V	217.0 Hz
+ 5 m 43.47 s	9.39 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 5 m 44.37 s	4.23 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 5 m 45.27 s	4.38 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 5 m 46.17 s	4.79 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 5 m 47.07 s	4.34 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 5 m 47.97 s	4.18 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 5 m 48.87 s	8.16 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 5 m 49.77 s	7.05 pC ✓	105.29 V	217.0 Hz
+ 5 m 50.67 s	4.54 pC ✓	105.29 V	217.0 Hz
+ 5 m 51.57 s	4.27 pC ✓	105.29 V	217.0 Hz
+ 5 m 52.47 s	4.34 pC ✓	105.28 V	217.0 Hz
+ 5 m 53.37 s	4.41 pC ✓	105.28 V	217.0 Hz
+ 5 m 54.27 s	4.23 pC ✓	105.28 V	217.0 Hz
+ 5 m 55.18 s	4.26 pC ✓	105.29 V	217.0 Hz
+ 5 m 56.07 s	4.56 pC ✓	105.29 V	217.0 Hz
+ 5 m 56.98 s	4.79 pC ✓	105.28 V	217.0 Hz
+ 5 m 57.88 s	11.03 pC ✓	105.28 V	217.0 Hz
+ 5 m 58.77 s	6.37 pC ✓	105.28 V	217.0 Hz
+ 5 m 59.68 s	7.69 pC ✓	105.28 V	217.0 Hz
+ 6 m 0.57 s	4.38 pC ✓	105.29 V	217.0 Hz
+ 6 m 1.48 s	4.83 pC ✓	105.28 V	217.0 Hz
+ 6 m 2.38 s	4.34 pC ✓	105.28 V	217.0 Hz
+ 6 m 3.27 s	5.07 pC ✓	105.28 V	217.0 Hz
+ 6 m 4.18 s	5.05 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 5.08 s	5.59 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 5.98 s	5.39 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 6.88 s	4.13 pC ✓	105.30 V	217.0 Hz
+ 6 m 7.78 s	4.12 pC ✓	105.29 V	217.0 Hz

+ 6 m 8.68 s	4.25 pC ✓	105.29 V	217.0 Hz
+ 6 m 9.58 s	4.24 pC ✓	105.30 V	217.0 Hz
+ 6 m 10.48 s	4.31 pC ✓	105.30 V	217.0 Hz
+ 6 m 11.38 s	4.20 pC ✓	105.28 V	217.0 Hz
+ 6 m 12.28 s	4.28 pC ✓	105.28 V	217.0 Hz
+ 6 m 13.18 s	12.07 pC ✓	105.29 V	217.0 Hz
+ 6 m 14.08 s	4.19 pC ✓	105.29 V	217.0 Hz
+ 6 m 14.98 s	4.28 pC ✓	105.28 V	217.0 Hz
+ 6 m 15.88 s	4.34 pC ✓	105.28 V	217.0 Hz
+ 6 m 16.78 s	4.20 pC ✓	105.28 V	217.0 Hz
+ 6 m 17.68 s	4.21 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 18.58 s	4.19 pC ✓	105.26 V	217.0 Hz
+ 6 m 19.48 s	4.12 pC ✓	105.26 V	217.0 Hz
+ 6 m 20.38 s	7.12 pC ✓	105.26 V	217.0 Hz
+ 6 m 21.28 s	21.34 pC ✓	105.28 V	217.0 Hz
+ 6 m 22.18 s	4.41 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 23.08 s	17.05 pC ✓	105.26 V	217.0 Hz
+ 6 m 23.98 s	4.19 pC ✓	105.25 V	217.0 Hz
+ 6 m 24.88 s	4.14 pC ✓	105.26 V	217.0 Hz
+ 6 m 25.78 s	4.32 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 26.68 s	5.51 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 27.58 s	4.20 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 28.48 s	4.18 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 29.38 s	4.91 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 30.28 s	6.52 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 31.18 s	4.51 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 32.08 s	4.82 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 32.98 s	4.42 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 33.88 s	4.45 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 34.78 s	4.73 pC ✓	105.28 V	217.0 Hz
+ 6 m 35.68 s	4.75 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 36.58 s	5.27 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 37.48 s	5.54 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 38.38 s	4.94 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 39.28 s	4.33 pC ✓	105.28 V	217.0 Hz
+ 6 m 40.18 s	4.31 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 41.08 s	4.48 pC ✓	105.26 V	217.0 Hz
+ 6 m 41.98 s	4.39 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 42.88 s	4.37 pC ✓	105.26 V	217.0 Hz
+ 6 m 43.78 s	4.25 pC ✓	105.26 V	217.0 Hz
+ 6 m 44.68 s	6.29 pC ✓	105.25 V	217.0 Hz
+ 6 m 45.58 s	7.45 pC ✓	105.24 V	217.0 Hz
+ 6 m 46.48 s	7.64 pC ✓	105.25 V	217.0 Hz
+ 6 m 47.38 s	4.96 pC ✓	105.25 V	217.0 Hz
+ 6 m 48.28 s	3.73 pC ✓	105.25 V	217.0 Hz
+ 6 m 49.18 s	4.88 pC ✓	105.25 V	217.0 Hz
+ 6 m 50.08 s	6.95 pC ✓	105.24 V	217.0 Hz

+ 6 m 50.98 s	6.26 pC ✓	105.24 V	217.0 Hz
+ 6 m 51.88 s	4.33 pC ✓	105.24 V	217.0 Hz
+ 6 m 52.78 s	4.07 pC ✓	105.24 V	217.0 Hz
+ 6 m 53.68 s	4.28 pC ✓	105.26 V	217.0 Hz
+ 6 m 54.58 s	4.26 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 55.48 s	4.22 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 56.38 s	4.18 pC ✓	105.26 V	217.0 Hz
+ 6 m 57.28 s	4.23 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 58.18 s	4.18 pC ✓	105.27 V	217.0 Hz
+ 6 m 59.08 s	4.34 pC ✓	105.26 V	217.0 Hz
+ 6 m 59.98 s	5.05 pC ✓	105.26 V	217.0 Hz
+ 7 m 0.88 s	4.33 pC ✓	105.26 V	217.0 Hz
+ 7 m 1.78 s	4.29 pC ✓	105.25 V	217.0 Hz
+ 7 m 2.68 s	4.22 pC ✓	105.25 V	217.0 Hz
+ 7 m 3.58 s	4.24 pC ✓	105.25 V	217.0 Hz
+ 7 m 4.48 s	4.27 pC ✓	105.25 V	217.0 Hz
+ 7 m 5.38 s	4.15 pC ✓	105.25 V	217.0 Hz
+ 7 m 6.28 s	4.09 pC ✓	105.26 V	217.0 Hz
+ 7 m 7.18 s	4.23 pC ✓	105.26 V	217.0 Hz
+ 7 m 8.08 s	4.23 pC ✓	105.25 V	217.0 Hz
+ 7 m 8.98 s	5.77 pC ✓	105.25 V	217.0 Hz
+ 7 m 9.88 s	6.98 pC ✓	105.25 V	217.0 Hz
+ 7 m 10.78 s	4.15 pC ✓	105.25 V	217.0 Hz
+ 7 m 11.68 s	4.28 pC ✓	105.24 V	217.0 Hz
+ 7 m 12.58 s	4.21 pC ✓	105.24 V	217.0 Hz
+ 7 m 13.48 s	4.18 pC ✓	104.61 V	217.0 Hz
+ 7 m 14.38 s	4.13 pC ✓	101.13 V	217.0 Hz
+ 7 m 15.28 s	4.18 pC ✓	95.55 V	217.0 Hz
+ 7 m 16.18 s	4.16 pC ✓	89.49 V	217.0 Hz
+ 7 m 17.08 s	7.20 pC ✓	83.38 V	217.0 Hz
+ 7 m 17.98 s	11.32 pC ✓	77.47 V	217.0 Hz
+ 7 m 18.88 s	14.08 pC ✓	73.53 V	217.0 Hz
+ 7 m 19.78 s	7.39 pC ✓	72.68 V	217.0 Hz
+ 7 m 20.68 s	5.08 pC ✓	75.16 V	217.0 Hz
+ 7 m 21.58 s	4.51 pC ✓	75.82 V	217.0 Hz
+ 7 m 22.48 s	5.47 pC ✓	75.83 V	217.0 Hz
+ 7 m 23.38 s	5.49 pC ✓	75.83 V	217.0 Hz
+ 7 m 24.28 s	6.85 pC ✓	75.84 V	217.0 Hz
+ 7 m 25.18 s	6.32 pC ✓	75.84 V	217.0 Hz
+ 7 m 26.08 s	4.37 pC ✓	75.84 V	217.0 Hz
+ 7 m 26.98 s	4.24 pC ✓	75.84 V	217.0 Hz
+ 7 m 27.88 s	3.91 pC ✓	75.84 V	217.0 Hz
+ 7 m 28.78 s	4.01 pC ✓	75.84 V	217.0 Hz
+ 7 m 29.63 s	2.78 pC ✓	75.84 V	217.0 Hz
+ 7 m 30.53 s	4.08 pC ✓	75.84 V	217.0 Hz
+ 7 m 31.43 s	4.03 pC ✓	75.85 V	217.0 Hz
+ 7 m 32.33 s	6.98 pC ✓	75.86 V	217.0 Hz



+ 7 m 33.23 s	6.88 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 7 m 34.13 s	6.23 pC ✓	75.88 V	217.0 Hz
+ 7 m 35.03 s	6.49 pC ✓	75.88 V	217.0 Hz
+ 7 m 35.93 s	5.94 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 7 m 36.83 s	6.70 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 7 m 37.73 s	7.04 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 7 m 38.63 s	7.11 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 7 m 39.53 s	6.68 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 7 m 40.43 s	3.91 pC ✓	75.85 V	217.0 Hz
+ 7 m 41.33 s	4.58 pC ✓	75.85 V	217.0 Hz
+ 7 m 42.23 s	6.83 pC ✓	75.84 V	217.0 Hz
+ 7 m 43.13 s	4.92 pC ✓	75.85 V	217.0 Hz
+ 7 m 44.03 s	3.77 pC ✓	75.85 V	217.0 Hz
+ 7 m 44.93 s	3.75 pC ✓	75.86 V	217.0 Hz
+ 7 m 45.83 s	3.81 pC ✓	75.85 V	217.0 Hz
+ 7 m 46.73 s	4.04 pC ✓	75.84 V	217.0 Hz
+ 7 m 47.63 s	4.46 pC ✓	75.82 V	217.0 Hz
+ 7 m 48.53 s	4.43 pC ✓	75.83 V	217.0 Hz
+ 7 m 49.43 s	5.22 pC ✓	75.85 V	217.0 Hz
+ 7 m 50.33 s	5.99 pC ✓	75.84 V	217.0 Hz
+ 7 m 51.23 s	4.22 pC ✓	75.85 V	217.0 Hz
+ 7 m 52.13 s	4.18 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 7 m 53.03 s	4.21 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 7 m 53.93 s	4.60 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 7 m 54.83 s	4.61 pC ✓	75.88 V	217.0 Hz
+ 7 m 55.73 s	4.26 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 7 m 56.63 s	4.22 pC ✓	75.86 V	217.0 Hz
+ 7 m 57.53 s	4.23 pC ✓	75.86 V	217.0 Hz
+ 7 m 58.43 s	4.24 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 7 m 59.33 s	4.34 pC ✓	75.88 V	217.0 Hz
+ 8 m 0.23 s	4.43 pC ✓	75.89 V	217.0 Hz
+ 8 m 1.13 s	4.70 pC ✓	75.89 V	217.0 Hz
+ 8 m 2.03 s	3.79 pC ✓	75.89 V	217.0 Hz
+ 8 m 2.93 s	4.07 pC ✓	75.88 V	217.0 Hz
+ 8 m 3.83 s	4.68 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 8 m 4.73 s	5.63 pC ✓	75.85 V	217.0 Hz
+ 8 m 5.63 s	7.02 pC ✓	75.84 V	217.0 Hz
+ 8 m 6.53 s	6.05 pC ✓	75.84 V	217.0 Hz
+ 8 m 7.43 s	6.91 pC ✓	75.86 V	217.0 Hz
+ 8 m 8.33 s	5.13 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 8 m 9.23 s	4.57 pC ✓	75.86 V	217.0 Hz
+ 8 m 10.13 s	4.38 pC ✓	75.86 V	217.0 Hz
+ 8 m 11.03 s	5.47 pC ✓	75.86 V	217.0 Hz
+ 8 m 11.93 s	6.14 pC ✓	75.88 V	217.0 Hz
+ 8 m 12.83 s	4.25 pC ✓	75.86 V	217.0 Hz
+ 8 m 13.73 s	4.53 pC ✓	75.83 V	217.0 Hz
+ 8 m 14.63 s	4.50 pC ✓	75.84 V	217.0 Hz

+ 8 m 15.53 s	3.99 pC ✓	75.86 V	217.0 Hz
+ 8 m 16.43 s	3.84 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 8 m 17.33 s	3.81 pC ✓	75.86 V	217.0 Hz
+ 8 m 18.23 s	3.97 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 8 m 19.13 s	5.56 pC ✓	75.89 V	217.0 Hz
+ 8 m 20.03 s	5.42 pC ✓	75.88 V	217.0 Hz
+ 8 m 20.93 s	4.28 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 8 m 21.83 s	3.82 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 8 m 22.73 s	5.16 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 8 m 23.63 s	6.69 pC ✓	75.89 V	217.0 Hz
+ 8 m 24.53 s	6.80 pC ✓	75.89 V	217.0 Hz
+ 8 m 25.43 s	6.39 pC ✓	75.89 V	217.0 Hz
+ 8 m 26.33 s	4.94 pC ✓	75.88 V	217.0 Hz
+ 8 m 27.23 s	4.10 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 8 m 28.13 s	5.91 pC ✓	75.86 V	217.0 Hz
+ 8 m 29.03 s	6.59 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 8 m 29.93 s	4.34 pC ✓	75.88 V	217.0 Hz
+ 8 m 30.83 s	4.25 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 8 m 31.73 s	4.16 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 8 m 32.63 s	4.49 pC ✓	75.88 V	217.0 Hz
+ 8 m 33.53 s	4.06 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 8 m 34.43 s	3.93 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 8 m 35.33 s	4.20 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 8 m 36.23 s	3.92 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 8 m 37.13 s	3.92 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 8 m 38.03 s	4.17 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 8 m 38.93 s	6.60 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 8 m 39.83 s	4.09 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 8 m 40.73 s	4.28 pC ✓	75.88 V	217.0 Hz
+ 8 m 41.63 s	5.62 pC ✓	75.89 V	217.0 Hz
+ 8 m 42.53 s	4.16 pC ✓	75.89 V	217.0 Hz
+ 8 m 43.43 s	4.25 pC ✓	75.89 V	217.0 Hz
+ 8 m 44.33 s	4.45 pC ✓	75.89 V	217.0 Hz
+ 8 m 45.23 s	4.36 pC ✓	75.89 V	217.0 Hz
+ 8 m 46.13 s	4.03 pC ✓	75.89 V	217.0 Hz
+ 8 m 47.03 s	3.94 pC ✓	75.89 V	217.0 Hz
+ 8 m 47.93 s	4.26 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 8 m 48.83 s	4.20 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 8 m 49.73 s	4.29 pC ✓	75.86 V	217.0 Hz
+ 8 m 50.63 s	4.32 pC ✓	75.86 V	217.0 Hz
+ 8 m 51.53 s	4.14 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 8 m 52.43 s	5.03 pC ✓	75.89 V	217.0 Hz
+ 8 m 53.33 s	7.40 pC ✓	75.90 V	217.0 Hz
+ 8 m 54.23 s	7.53 pC ✓	75.91 V	217.0 Hz
+ 8 m 55.13 s	7.59 pC ✓	75.90 V	217.0 Hz
+ 8 m 56.03 s	5.41 pC ✓	75.91 V	217.0 Hz
+ 8 m 56.93 s	4.20 pC ✓	75.92 V	217.0 Hz

+ 8 m 57.83 s	4.60 pC ✓	75.91 V	217.0 Hz
+ 8 m 58.73 s	4.23 pC ✓	75.91 V	217.0 Hz
+ 8 m 59.63 s	4.34 pC ✓	75.91 V	217.0 Hz
+ 9 m 0.53 s	4.45 pC ✓	75.91 V	217.0 Hz
+ 9 m 1.43 s	4.16 pC ✓	75.92 V	217.0 Hz
+ 9 m 2.33 s	4.19 pC ✓	75.92 V	217.0 Hz
+ 9 m 3.23 s	4.14 pC ✓	75.92 V	217.0 Hz
+ 9 m 4.13 s	4.14 pC ✓	75.92 V	217.0 Hz
+ 9 m 5.03 s	4.24 pC ✓	75.91 V	217.0 Hz
+ 9 m 5.93 s	4.24 pC ✓	75.91 V	217.0 Hz
+ 9 m 6.83 s	4.20 pC ✓	75.91 V	217.0 Hz
+ 9 m 7.73 s	4.57 pC ✓	75.91 V	217.0 Hz
+ 9 m 8.63 s	4.95 pC ✓	75.91 V	217.0 Hz
+ 9 m 9.53 s	4.28 pC ✓	75.91 V	217.0 Hz
+ 9 m 10.43 s	5.11 pC ✓	75.91 V	217.0 Hz
+ 9 m 11.33 s	4.47 pC ✓	75.90 V	217.0 Hz
+ 9 m 12.23 s	5.55 pC ✓	75.91 V	217.0 Hz
+ 9 m 13.13 s	6.38 pC ✓	75.91 V	217.0 Hz
+ 9 m 14.03 s	6.51 pC ✓	75.90 V	217.0 Hz
+ 9 m 14.93 s	5.68 pC ✓	75.89 V	217.0 Hz
+ 9 m 15.83 s	4.47 pC ✓	75.88 V	217.0 Hz
+ 9 m 16.73 s	4.06 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 9 m 17.63 s	4.01 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 9 m 18.53 s	4.24 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 9 m 19.43 s	3.95 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 9 m 20.33 s	4.08 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 9 m 21.23 s	4.83 pC ✓	75.87 V	217.0 Hz
+ 9 m 22.13 s	3.92 pC ✓	75.88 V	217.0 Hz
+ 9 m 23.03 s	4.22 pC ✓	75.86 V	217.0 Hz
+ 9 m 23.93 s	4.21 pC ✓	75.88 V	217.0 Hz
+ 9 m 24.83 s	7.06 pC ✓	75.89 V	217.0 Hz
+ 9 m 25.73 s	7.23 pC ✓	75.88 V	217.0 Hz
+ 9 m 26.63 s	7.03 pC ✓	74.71 V	217.0 Hz
+ 9 m 27.53 s	5.33 pC ✓	69.97 V	217.0 Hz
+ 9 m 28.43 s	6.57 pC ✓	63.94 V	217.0 Hz
+ 9 m 29.33 s	4.97 pC ✓	57.70 V	217.0 Hz
pass/fail threshold: <b>1000.00 pC</b> inception/extinction threshold: <b>1000.00 pC</b>	inception voltage: <b>181.13 V</b>		extinction voltage: <b>151.22 V</b>

