

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Charakteristická fázová rozložení výbojové činnosti na
modelových vzorcích mikro dutin v dielektriku**

Vedoucí práce: Ing. Petr Martínek, Ph.D.

Autor: František Rach

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **František RACH**
Osobní číslo: **E10N0192P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Charakteristická fázová rozložení výbojové činnosti na modelových vzorcích mikro dutin v dielektriku**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Vypracujte teoretický úvod do problematiky částečných výbojů v izolačních systémech elektrických strojů.
2. Navrhněte a vytvořte modelové vzorky dutin v dielektriku.
3. Na vyrobených modelech pořídte charakteristické záznamy fázového rozložení výbojové aktivity.
4. Získané záznamy analyzujte a zpracujte do podoby katalogu částečných výbojů.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Martínek, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**


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




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Charakteristická fázová rozložení výbojové činnosti na modelových vzorcích mikroductin v dielektriku.

Tato diplomová práce se zabývá měřením výbojové činnosti na navržených modelových vzorcích dielektrika. Pozornost je věnována zejména částečným výbojům v dutinách vzorků. V první kapitole jsou zmíněny typy částečných výbojů a jejich vznik. V druhé kapitole je proveden návrh modelových vzorků a elektrodového systému. Další kapitola se zabývá metodami měření částečných výbojů a aplikací mnou použité měřicí metody. V následující části je uveden chronologický postup měření jednotlivých vzorků a popis chování modelů i elektrodového systému během měření. V navazující kapitole jsou záznamy výbojové činnosti jednotlivých typů vzorků porovnány mezi sebou. V této kapitole jsou také popsány a zdůvodněny úpravy navrženého elektrodového systému, ke kterým v průběhu měření došlo. V závěru jsou zdůrazněna nejzajímavější porovnání modelových vzorků, je shrnut průběh měření a jeho výsledky.

Klíčová slova

Částečné výboje, klouzavé výboje, korona, měření výbojů, dutina v dielektriku, MKP (metoda konečných prvků), femm (SW), fázové rozložení částečných výbojů, katalog částečných výbojů.

Abstract

Characteristic discharge activity phase distribution acquired by measuring on models of microvoids in dielectric.

This master thesis deals with measurement of discharges on designed models of the dielectric. It focuses mainly on partial discharges in the cavities of the dielectric. The first chapter mentions different types of partial discharges. The second chapter describes design of dielectric specimens and design of electrode system. Next part deals with methods of measurement of partial discharges and the method used in this thesis is described in detail. The following part includes chronological report of measurements and description of specimen behavior during measurement. In the subsequent section the recordings of discharge activity are compared. In this section, the modifications of the electrode system made during the measurement are described and explained. In the last part the most interesting results are highlighted and the measurement process and its results are summarized.

Key words

Partial discharges, sliding discharges, corona discharges, measurement of discharges, cavity in dielectric, FEM (Finite element method), femm (SW), discharge activity phase distribution, catalog of partial discharges patterns.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 18. 5. 2012

Jméno Příjmení

.....

Poděkování

Na tomto místě bych rád vyjádřil poděkování vedoucímu mé diplomové práce Ing. Petru Martínkovi, Ph.D., za užitečné rady, za ochotu a za čas, který mi věnoval při konzultacích.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek	9
Úvod	10
1. Teorie částečných výbojů	11
1.1. Vnitřní a povrchové částečné výboje.....	11
1.2. Vnější částečné výboje	13
1.3. Základní parametry částečných výbojů	13
1.4. Obrazce částečných výbojů	15
1.5. Měření částečných výbojů	16
1.5.1. Galvanická metoda měření částečných výbojů	16
2. Návrh modelů	18
2.1. Elektrodotový systém	18
2.2. Měřené vzorky a přípravky.....	18
3. Postup měření	21
4. Výsledky měření.....	28
4.1. Elektrodotový systém	28
4.2. Trafoboard	33
4.3. Deska plošného spoje	36
4.4. Transformátorový papír.....	39
4.5. Klouzavé uspořádání a keramická průchodka	43
4.6. Koronující uspořádání	44
4.7. Plexiskla	46
5. Simulace elektrostatického pole	48
6. Závěr.....	49
7. Seznam použité a citované literatury.....	51
8. Seznam obrázků.....	52
9. Seznam tabulek.....	52
10. Seznam příloh.....	54

Seznam použitých symbolů a zkratek

Napětí	U [V]
Zdánlivý náboj	q_i [pC]
Četnost impulzů	n [s^{-1}]
Střední proud částečných výbojů	I [μA]
Součtový náboj	Q [pC]
Výkon částečných výbojů	P [mW]
Střední kvadratický součet	D [$A^2 \cdot s$]
Zapalovací napětí částečných výbojů	U_i [kV]
Zhášecí napětí částečných výbojů	U_e [kV]
Kapacita	C [F]
ČV	Částečné výboje
ELD systém	Elektrodový systém

Úvod

V současné době jsou v energetice kladeny velké nároky na bezporuchový chod elektrických strojů. To se týká jak strojů točivých, tak netočivých. Se vzrůstajícím instalovaným výkonem tato potřeba dále roste.

Základním předpokladem vysoké spolehlivosti elektrického stroje je kvalitní izolační systém. Celou dobu praktické výroby stroje se výrobce zabývá kvalitním provedením izolačního systému. Pro výrobu elektrických strojů jsou za léta výroby vyvinuty důmyslné technologie, jak kvalitu izolačního systému zajistit. Od postupů izolace jednotlivých vodičů, až po závěrečné impregnační technologie jako resin rich (bohatý na pryskyřici) či VPI (vacuum press impregnation – vaukově tlaková impregnace).

Přes všechnu snahu může (a dochází) ve výrobě k nepřesnostem a v izolačním systému stroje se objevují malé dutinky naplněné vzduchem. Degradací izolačního systému během provozu stroje se pak tento defekt dále zvyšuje. Živé části el. stroje, uzemněné části el. stroje a mezi nimi izolace se vzduchovými dutinkami – to je typické uspořádání pro vznik částečných výbojů.

Částečný výboj pak vytvoří tzv. částečný průraz, kdy je výbojem překlenuta jen část izolace, ta uvnitř ní je dutinka. Tento jev dále zhoršuje degradaci izolačního systému. Proto je třeba částečné výboje měřit a monitorovat jejich činnost v izolačních systémech. Určitá malá úroveň ČV bude naměřena vždy. Případný rostoucí trend vývojové činnosti uvnitř stroje je však zapotřebí včas podchytit, neboť v důsledku by mohl vést úplnému proražení izolace.

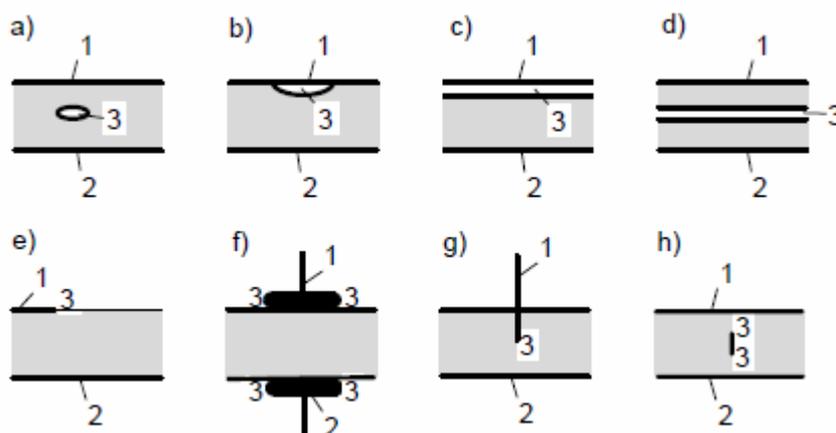
Tato diplomová práce se zabývá měřením částečných výbojů na modelech dielektrika. Měření bylo provedeno na malých vzorcích a v laboratorních podmínkách. Výsledkem tohoto měření bude katalog záznamů výbojové činnosti. Úkolem katalogu výbojové činnosti je v ideálním případě umožnit identifikaci „neznámého“ částečného výboje podle již naměřených a analyzovaných záznamů. Tyto záznamy jsou pořízeny na modelech izolantu se známým typem defektu a je známo jaký typ výboje mají záznamy zobrazovat.

1. Teorie částečných výbojů

V technice vysokých napětí se rozlišují dvě základní namáhání izolace. Úplný přeskok a neúplný přeskok. Při úplném výboji jsou elektrody propojeny nízkoodporovým výbojem a izolace je tomto místě překlenuta – proražena. Při neúplném přeskoku je takto překlenuta pouze část izolačního systému. Tomuto stavu se říká částečný průraz. Zbytek izolace je zdravý a namáhání vydrží. V plynných izolantech se tomuto jevu říká částečný výboj. Částečné výboje dělíme na vnější, vnitřní a povrchové.

1.1. Vnitřní a povrchové částečné výboje

Na následujícím obrázku (Obrázek 1) jsou zobrazena typická uspořádání, při kterých vznikají částečné výboje. Jsou zde výboje v dutině uprostřed izolantu (a) a u elektrody (b), dále mezery vzniklé delaminací izolace (c, d), pak klouzavá uspořádání (e, f) a uspořádání s jehlovou elektrodou (g, h).

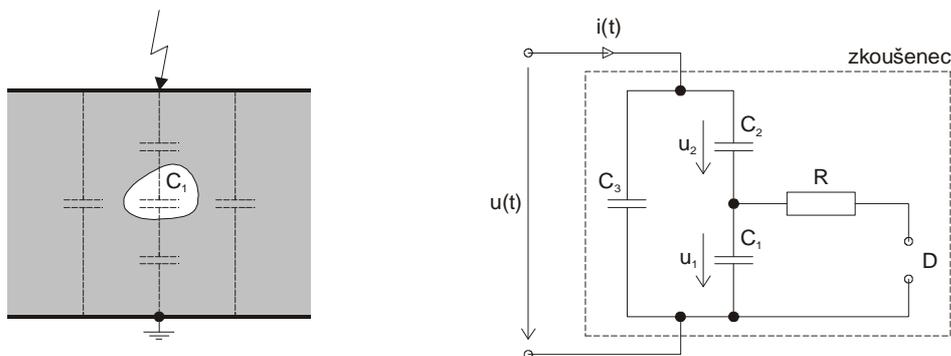


Obrázek 1 Typická elektrodová uspořádání pro vznik ČV [1]

Na následujícím obrázku vidíme tzv. trojkapacitní model dielektrika s dutinou. Kondenzátor C_1 vyjadřuje kapacitu plynové dutinky. Kondenzátory C_2 v sérii s C_1 vyjadřují zdravou část izolace, ve které k průrazu nedošlo. Paralelní kondenzátory C_3 znázorňují kapacitu zbytku izolantu. Kulové jiskřiště symbolizuje přeskok, ke kterému dojde po překročení zapalovacího napětí částečných výbojů. Rezistor R vyjadřuje odpor výbojového kanálu.

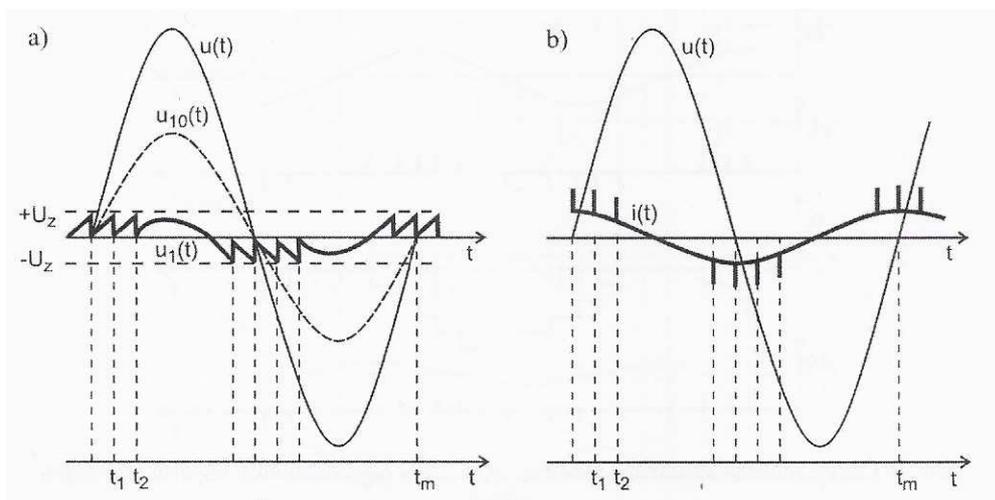
Pokud na svorky obvodu na následujícím obrázku (Obrázek 2) přivedeme střídavé napětí $u(t)$ a pokud nedojde k přeskočení na dutince, je průběh napětí na kondenzátoru $u_{10}(t)$ následující:

$$u_{10}(t) = \frac{C_2}{C_1 + C_2} \cdot u(t).$$



Obrázek 2 Trojkapacitní model [1]

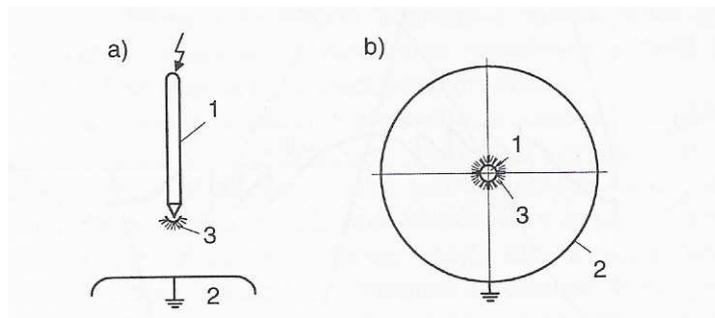
Průběh napětí přiloženého na zkoušenec $u(t)$ a napětí na dutince $u_{10}(t)$ je na následujícím obrázku (Obrázek 3a). Při dosažení zapalovacího napětí na dutince dojde uvnitř k průrazu plynného izolantu. Za předpokladu stále stejného zapalovacího napětí a nulového zhašecího napětí, je průběh napětí na dutince znázorněn na obrázku (Obrázek 3a) jako průběh $u_1(t)$.



Obrázek 3 Časové průběhy napětí a proudů vnitřních částečných výbojů [1]

1.2. Vnější částečné výboje

Tyto výboje se vyskytují nejčastěji na hranách nebo na elektrodách s malým poloměrem. Klasická uspořádání vnějšího výboje je hrot – deska, zde se částečné výboje objevují na konci ostrého hrotu (Obrázek 4a). Dalším typickým příkladem je koaxiální uspořádání elektrod (Obrázek 4b).



Obrázek 4 Typická uspořádání vnějších výbojů [1]

1.3. Základní parametry částečných výbojů

Zdánlivý náboj (apparent charge)

Podle normy [4] je to 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 částečného výboje. Značí se q a udává se v [C], prakticky spíše v [pC] popř. [nC].

Četnost impulzů (pulse repetition rate)

Dle normy [4] je to poměr mezi celkovým počtem impulzů částečných výbojů zaznamenaných za daný časový interval a dobou trvání daného intervalu. Značí se n , udává se v [s^{-1}].

Střední proud částečných výbojů (average discharge current)

Představuje součet absolutních jednotlivých úrovní zdánlivého náboje q_i během zvoleného intervalu T_{REF} dělený tímto intervalem, m je počet výbojů během intervalu. Značí se I , udává se v [C/s] nebo [μA]. Mají-li všechny výboje stejnou velikost, lze vztah zjednodušit.

$$I = \frac{1}{T_{REF}} \sum_{i=1}^m |q_i|, \text{ zjednodušeně } I = n \cdot q$$

Součtový náboj (cumulative charge)

Je to součet absolutních hodnot jednotlivých úrovní zdánlivých výbojů během daného intervalu – obvykle během periody napájecího napětí. Označuje se jako Q , je udáván v [C] prakticky spíše v [pC] a [nC]. Dnes je tento parametr nahrazován středním proudem částečných výbojů.

Výkon částečných výbojů (discharge power)

Je to střední výkon impulzu dodaného na svorky zkoušence. Tento výkon je způsoben zdánlivým nábojem q_i během daného časového intervalu. Výkon ČV se značí P a udává se ve [W], či spíše v [mW]. Výkon ČV lze určit přímým měřením nebo výpočtem z naměřených hodnot zdánlivého náboje q_i a okamžitých hodnot napětí u_i dle následujícího vztahu

$$P = \frac{1}{T_{REF}} \sum_{i=1}^m |q_i \cdot u_i|.$$

Střední kvadratický součet (quadratic rate)

Tento parametr je dán součtem ploch jednotlivých úrovní zdánlivých výbojů q_i během daného intervalu T_{REF} dělený tímto intervalem. Označuje se D , udává se v [$A^2 \cdot s$] nebo [$C^2 \cdot s^{-1}$]. Střední kvadratický součet lze určit přímým měřením, nebo výpočtem podle vzorce:

$$D = \frac{1}{T_{REF}} \sum_{i=1}^m q_i^2.$$

V případě, že jsou všechny zdánlivé náboje stejné, vztah se zjednoduší na:

$$D = n \cdot q^2.$$

Počátečná napětí částečných výbojů (partial discharge inception voltage)

Je takové napětí přiložené na zkoušenec, při kterém jsou ve zkoušenci pozorovány opakující se částečné výboje, když je napětí postupně zvyšováno z nižší hodnoty, na které výboje pozorovány nebyly. Značí se U_i udává se ve [V], prakticky v [kV].

Zhášecí napětí částečných výbojů (partial discharge extinction voltage)

Představuje napětí, při kterém se ve zkoušenci přestávají objevovat opakující se částečné výboje, pokud je napětí postupně snižováno z vyšší hodnoty, při které částečné výboje byly pozorovány. Toto napětí se označuje U_e a udává se v [V] nebo spíše v [kV].

1.4. Obrazce částečných výbojů

Fázové rozložení výbojové činnosti na záznamech z detektoru částečných výbojů jsem vyhodnocoval pomocí následující tabulky (Tabulka 1) převzaté z [1]. Dále jsem se orientoval podle typických záznamů ze zdrojů [3] a [5].

Typ	Osciloskopický obraz	Popis výboje	Typ výboje
A		Pulzy stejné velikosti v jedné půlperiodě, symetricky okolo maxima napětí Se zvyšujícím se napětím roste počet pulzů, ale velikost se nemění. Pulzy v druhé půlperiodě se vyskytují pouze při vyšším napětí.	Uspořádání hrot – deska v plynech. Pokud se pulzy objevují v záporné půlperiodě, je hrot na vysokém potenciálu. Když jsou pulzy v kladné půlperiodě, je hrot na potenciálu země.
B		Pulzy v obou půlperiodách symetricky okolo napěťových maxim. V jedné půlperiodě pulzy větší, v druhé půlperiodě větší počet menších pulzů. Se zvyšováním napětí počet pulzů roste.	Uspořádání hrot – deska v kapalných izolantech. Pokud se velké pulzy objevují v kladné půlperiodě, je hrot na vysokém potenciálu. Pokud se velké pulzy objevují v záporné půlperiodě, je hrot na zemním potenciálu.
C		Pulzy mezi průchody napětí nulou a vrcholy v obou půlperiodách. Pulzy v obou půlperiodách mají přibližně stejnou velikost.	Dutinky v pevném izolantu. Vzduchové dutinky v kapalném izolantu. Dotyk izolovaných vodičů. Výboje na povrchu bez galvanického spojení. Neuzemněné kovové části měřicího obvodu.
D		Pulzy mezi průchody napětí nulou a vrcholy v obou půlperiodách. Pulzy v jedné půlperiodě jsou vyšší než pulzy v druhé půlperiodě.	Dutinky v pevném izolantu u elektrod. Vzduchové dutinky v kapalném izolantu u elektrod. Pokud se velké pulzy opakují v kladné půlperiodě, jsou výboje na vysokém potenciálu. Pokud se velké pulzy objevují v záporné půlperiodě, je hrot na zemním potenciálu.
E		Pulzy symetricky kolem obou průchodů nulovým napětím.	Špatný kontakt mezi kovovými částmi nebo mezi polovodivými (odporovými) vrstvami.

Tabulka 1 Typické obrazce částečných výbojů (převzato z [1])

1.5. Měření částečných výbojů

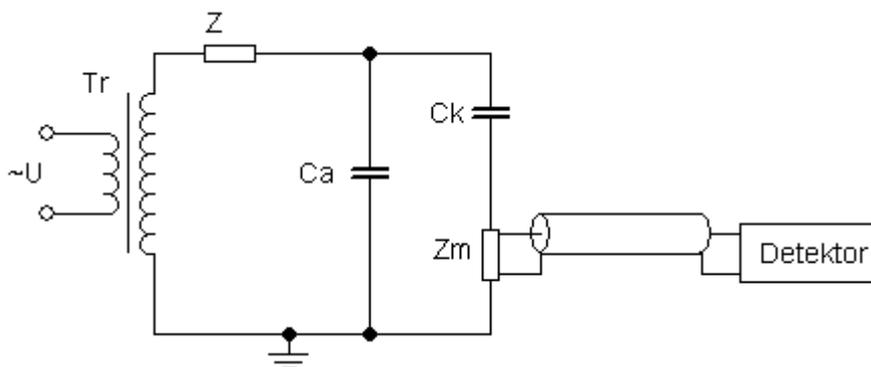
Existují různé metody měření, neelektrické i elektrické. Metody měření částečných výbojů se stále rozvíjejí. Trendem pak jsou metody umožňující měřit bez odstavky, či nejlépe přímo on-line. V následující kapitole se budu věnovat elektrické metodě měření ČV, a to sice Galvanické metodě, kterou jsem při měření ČV použil já pro účely této práce.

1.5.1. Galvanická metoda měření částečných výbojů

Dle [1] je tato metoda v současnosti jednou z nejmodernějších metod pro měření částečných výbojů v zařízeních vysokého a velmi vysokého napětí. Princip této metody je založen na přímém snímání impulzů částečných výbojů připojeným měřidlem (detektorem).

K oddělení impulzů ČV superponovaných na napájecí napětí je použita měřicí impedance obsahující rezistor s odporem řádu $10^2 \Omega$. Měřicí impedance je většinou realizována jako RLC obvod, který tvoří nízkofrekvenční propust. Tato impedance tedy propustí nízkofrekvenční napájecí napětí dále do obvodu a vysokofrekvenční nasuperponované impulsy ČV nasměruje do detektoru.

Důležitým prvkem je také vazební kondenzátor C_v , který je navržen pro příslušné testovací napětí. Jeho kapacita by měla být co nejvyšší ve srovnání s rozptylovou kapacitou měřicího obvodu. To zajistí dostatečnou citlivost měření.



Obrázek 5 Schéma zapojení

Měření v této práci bylo provedeno na zapojení na předchozím obrázku (Obrázek 5). V tomto případě je měřicí impedance zapojena do větve vazebního kondenzátoru. Pulzy částečných výbojů se v tomto případě dostávají z měřeného objektu C_a na měřicí impedanci Z_m přes vazební kondenzátor C_v . Toto zapojení umožňuje měřit uzemněné objekty. Výhodně ho tedy lze použít tam, kde měřené zařízení nelze odzemnit.

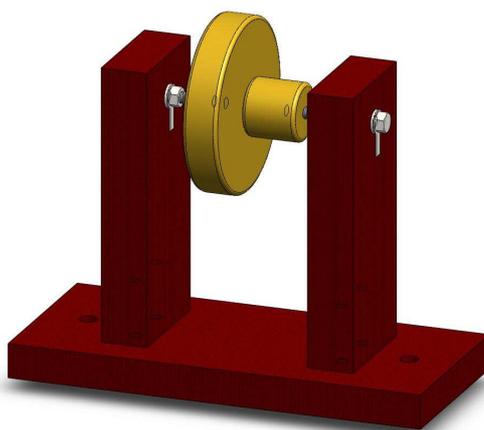
Informace uvedené v kapitole 1. Teorie částečných výbojů jsem čerpal ze zdrojů [1], [2], [3], [4], [6] a [8]

2. Návrh modelů

V této kapitole budou popsány elektrodotový systém použitý k upínání vzorků a použité modely. Některé z nich byly v laboratoři měření částečných výbojů již k dispozici. Vzorky dielektrika byly vyrobeny z materiálu dostupného v laboratoři a v dílně.

2.1. Elektrodotový systém

Základ elektrodotového systému byl v laboratoři k dispozici. Kostra elektrodotového systému je zhotovena z tvrzeného papíru (též texgumoid, pertinax), což je osvědčený materiál s dobrými mechanickými i elektrickými vlastnostmi. Na elektrodotový systém jsem upevnil dvě mosazné elektrody. Velká elektroda byla našroubována na závitové tyči, menší elektrodu jsem připevnil pomocí šroubu. Vzdálenost elektrod tohoto systému se nastavuje otáčením elektrod po závitu.



Obrázek 6 Elektrodotový systém

2.2. Měřené vzorky a přípravky

Model klouzavého uspořádání a keramické průchodky byly již hotové a byly měřeny zejména pro úplnost (naměřeno více typů výbojů). Vzorky z organického skla byly zapůjčeny z katedry technologií a měření. Modely dielektrika z trafoboardu, trafopapíru a kuprextitu byly zhotoveny nově (kuprextit jen upraven).

Klouzavé uspořádání

Tento model je tvořen mosaznou trubkou, na které je navlečena trubka z tvrzeného papíru (pentinax). Na tuto izolaci je nanesen polovodivý lak (šedý pruh) a ten je překryt vrstvou hliníkové fólie. Po připojení vysokého potenciálu na vnitřní mosaznou trubku a uzemnění hliníkové fólie vzniká elektrostatické pole. Siločáry tohoto pole vstupují šikmo na rozhraní izolantu a hliníkové fólie. To je základní podmínka pro vznik klouzavých výbojů. Na tomto uspořádání elektrod a izolace se tedy klouzavé výboje budou vyskytovat.



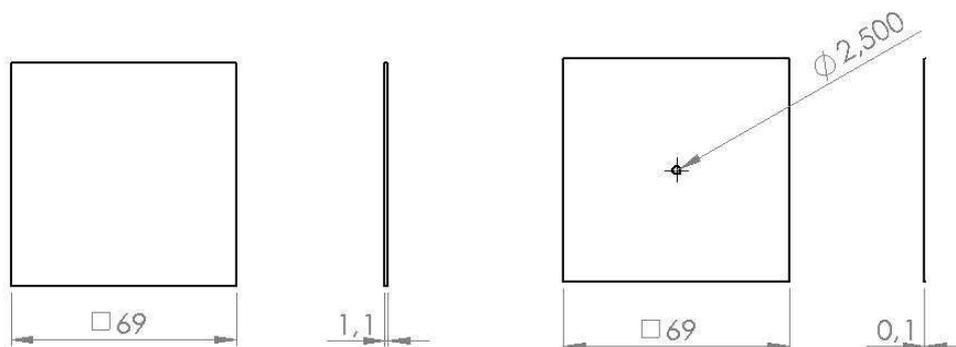
Obrázek 7 Klouzavé uspořádání

Průchodka

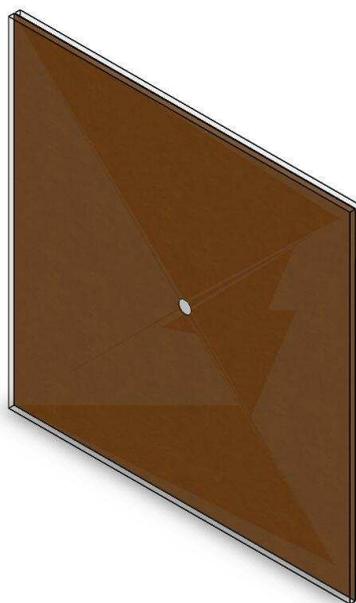
Jednalo se o klasickou keramickou průchodku pro napětí 22 kV. Těleso průchodky bylo namontováno na hliníkovém plechu, který představoval procházenou přepážku a zároveň umožňoval připojení uzemnění.

Trafoboard

Tento vzorek byl zhotoven podle následujícího výkresu. Do trafoboardu jsem vyvrtal otvor průměru 2,5 mm (a 4 mm). Tento přípravek již byl upnut do elektrodového systému a ponořen do oleje. K zamezení průniku oleje do otvoru byl použit osvědčený způsob. Vzorek trafoboardu byl upnut mezi dvě skla (skla pro diapozitivy formátu 6x6). Ještě bylo zapotřebí zamezit prosáknutí oleje mezi sklem a trafoboardem až do dutiny. Toho bylo dosaženo nanesením tenké vrstvy silikonové vazelíny na vzorek. Vzorek trafoboardu byl takto opatřen skly z obou stran a byl již připraven k měření.



Obrázek 8 Výkres vzorku s trafopapírem



Obrázek 9 Vzorek s trafo papírem

Deska plošného spoje (kuprextit) a Transformátorový papír

Tyto vzorky byly připraveny naprosto shodným způsobem jako vzorky trafoboadu. Čtverce papíru rozměru 6,9x6,9cm byly potřeny silikonovou vazelínou a upnuty mezi skla.

Koronující uspořádání

Model se skládal opět z pertinaxové kostry a dvou elektrod. Jednu elektrodu tvořil hrot, druhou pak sférická plocha s nekonstantním poloměrem (přibližně 15 mm).

Plexisklo

Tento vzorek byl do elektrodového systému upnut přímo, bez skel. Vzorky se skládaly ze tří vrstev, v prostřední byl vyvrtán otvor. Z obou stran byly přilepeny zbývající dvě vrstvy.

3. Postup měření

V této kapitole jsou chronologicky popsána měření jednotlivých vzorků. Dále jsou zde popsány úpravy elektrodového systému a změny schématu zapojení provedené během měření. Pořadí měřených vzorků je uvedeno v následující tabulce (Tabulka 2).

Číslo měření	Číslo záznamu	Popis měřeného vzorku	
1	142	Klouzavé uspořádání – tyč s polovodivým nátěrem	42
2	154	Porcelánová průchodka.....	45
3	001	Samotný elektrodový systém bez oleje	1
4	002	Olej, dutina $d = 1\text{ mm}$, trafoboard $t = 1\text{ mm}$	1
5	019	Olej, bez dutiny, bez vzorku, zkouška elektrodového systému	5
6	026	Elektrodový systém v oleji, staniol z + pryč, Cu fólie na -	7
7	028	Olej, bez dutiny, trafoboard $t = 1\text{ mm}$	8
8	036	Olej, bez dutiny, trafoboard $t = 1\text{ mm}$, týden namočeno v oleji	10
9	042	Olej, kuprexit, dutina $d = 2,5\text{ mm}$	12
10	050	Olej, kuprexit, dutina $d = 2,5\text{ mm}$, připojeno přes druhou vazební kapacitu.....	14
11	052	Olej, dutina $d = 2,5\text{ mm}$, trafoboard $t = 2\text{ mm}$, připojeno přes druhou vazební kapacitu	15
12	058	Olej, kuprexit bez otvoru, připojeno přes druhou vazební kapacitu	17
13	065	Kontrola obvodu na klouzavé výboje/koronu – měřeno bez vzorku	19
14	066	Olej, kuprexit s dutinou $d = 2,5\text{ mm}$, připojeno přes druhou vazební kapacitu – 2.pokus	19
15	073	Olej, 3 vrstvy papíru, v každé otvor $d = 2\text{ mm}$, připojeno přes druhou vazební kapacitu.....	21
16	078	Měření korony, přes první kapacitu, hrot	23
17	084	Měření korony, přes první kapacitu, hrot	25
18	088	Olej, dutina $d = 4\text{ mm}$, trafoboard $t = 2\text{ mm}$, připojeno přes druhou vazební kapacitu	26
19	096	Olej, tvrdý papír - přešpán, otvor $d = 2,5\text{ mm}$, připojeno přes druhou vazební kapacitu	28
20	104	Olej, tenký papír bez otvoru, připojeno přes druhou vazební kapacitu	30
21	112	Olej, tvrdý papír - přešpán, bez otvoru, připojeno přes druhou vazební kapacitu.....	32
22	118	Olej, tenký papír 1 vrstva, otvor $2,5\text{ mm}$, připojeno přes druhou vazební kapacitu	34
23	127	Olej, plexisklo_1, připojeno přes druhou vazební kapacitu	37
24	131	Olej, plexisklo_2, připojeno přes druhou vazební kapacitu	38
25	136	Olej, elektrody bez vzorku - $d = 4,7\text{ mm}$, připojeno přes druhou vazební kapacitu	40

Tabulka 2 Chronologické pořadí měřených vzorků

1 Klouzavé uspořádání – tyč s polovodičným nátěrem, 2 Porcelánová průchodka

Nejdříve jsem měřil klouzavé výboje na přípravku klouzavého uspořádání a na průchodce. Tyto přípravky již byly v laboratoři částečných výbojů k dispozici a na nich jsem si vyzkoušel postup měření. Obvod jsem zapojil dle schématu a použil jsem vazební kapacitor a měřicí impedanci Biddle (1 500 pF/150 kV).

Po zapojení přípravků jsem vždy zkalibroval detektor částečných výbojů. U klouzavého uspořádání jsem zkalibroval na 10 pC a zesílení 10/20, u porcelánové průchodky na 100 pC a zesílení 10/10. Z kvantitativního hlediska tedy bylo první měření přesnější pro nižší hodnoty napětí a tedy nižší hodnoty náboje a druhé naopak. Maximální hodnota zdánlivého výboje pro měření se zkalibrovaným detektorem činila v případě klouzavého uspořádání 67,5 pC a v případě průchodky 126 pC. To jsou však hodnoty odpovídající počátečním fázím klouzavých výbojů. S rostoucím napětím jsem musel zesílení snižovat a měřit s nezkalibrovaným detektorem. Předmětem mého měření bylo fázové rozložení výbojové činnosti, na které kalibrace nemá prakticky vliv, a tudíž jsem kalibroval u každého dalšího měření pouze na začátku.

Výbojovou činnost klouzavého uspořádání jsem začal zaznamenávat od napětí 2,8 kV, kdy se objevily výboje o velikosti cca 1,8 pC. Ke zvýšení výbojové činnosti došlo na 7 kV, dále se velikost ČV nezvyšovala a jen rostla četnost. Měřil jsem do 13 kV. Zhášecí napětí klouzavých výbojů činilo 1,4 kV.

Výbojovou činnost na porcelánové průchodce jsem měřil od 23,4 kV, kdy jsem zaznamenal zdánlivý náboj cca 10 pC. Zapalovací napětí klouzavých výbojů jsem naměřil na hodnotě 32 kV, kdy vzrostla výbojová činnost z cca 10 pC do řádů jednotek nC. Od 32 kV se dále hodnota zdánlivého náboje nezvyšovala a fázové rozložení se neměnilo, pouze rostla četnost. Měřil jsem do 40 kV. Zhášecí napětí klouzavých výbojů činilo 32 kV.

3 Samotný elektrodový systém bez oleje

Výbojovou činnost elektrodového systému jsem nejprve změřil bez oleje a bez přípravku mezi elektrodami. V zapojení jsem použil opět vazební kapacitor a měřicí impedanci Biddle (1 500 pF/150 kV). V této konfiguraci jsem naměřil první známky výbojové činnosti na 11,5 kV, jednalo se o výboje s hodnotou zdánlivého náboje 2 pC.

4 Olej, dutina $d = 1\text{ mm}$, trafoboard $t = 1\text{ mm}$

Při tomto měření již byl elektrodový systém ponořen v oleji a mezi elektrody byl upnut přípravek s trafoboardem tloušťky 1mm a kruhovým otvorem průměru 1mm uprostřed. Opět použit vazební kapacitor a měřicí impedance Biddle (1 500 pF/150 kV). Naměřené záznamy mají charakter vnitřních částečných výbojů až do cca 18 kV. Zde se již začíná projevovat vliv klouzavých výbojů samotného elektrodového systému, jak bude vysvětleno později. Opakující se výbojová činnost byla naměřena od napětí 6,9 kV, tuto hodnotu lze tedy stanovit jako zapalovací napětí.

5 Olej, bez dutiny, bez vzorku, zkouška elektrodového systému

Zde jsem měřil výbojovou činnost samotného elektrodového systému bez vzorku. ELD systém byl ponořen v transformátorovém oleji. Opět použit vazební kapacitor a měřicí impedance Biddle (1 500 pF/150 kV). Výbojová činnost výrazně vzrostla na 15 kV, zdánlivý náboj vzrostl z cca 1 pC na 500 pC, po minutě však klesl opět na 1 pC. Bylo to zřejmě způsobeno bublinou v oleji, která po čase praskla. Až do 15 kV hodnota zdánlivého náboje výbojů nepřesahuje 2 pC, až do tohoto napětí má v dané konfiguraci měřicího obvodu smysl měřit. Nad 15 kV se začíná projevovat vliv klouzavých výbojů a počátečních fází přeskočení mezi elektrodami.

6 Elektrodový systém v oleji, staniol z + pryč, Cu fólie na –

Při tomto měření byl upraven elektrodový systém umístěním Cu fólie na ostré hrany šroubu velké (zemní) elektrody. Bylo to z důvodu podezření na koronu na tomto místě. Podezření se však nepotvrdilo a měřené uspořádání se chovalo stejně jako v předchozím případě. Opět byl použit vazební kapacitor a měřicí impedance Biddle (1 500 pF/150 kV).

7 Olej, bez dutiny, trafoboard $t = 1\text{ mm}$

V tomto případě byl měřen stejný typ trafoboardu jako v případě 4, avšak tentokrát bez dutiny. Za zapalovací napětí ČV lze považovat 5,6 kV. Vzorek vykazoval výbojovou činnost stejného charakteru a srovnatelné velikosti zdánlivých nábojů až do napětí 14,1 kV. Poté se projevil vliv ELD systému. Obvod byl opět zapojen s vazebním kapacitorem a měřicí impedancí Biddle (1 500 pF/150 kV).

8 Olej, bez dutiny, trafoboard $t = 1$ mm, týden namočeno v oleji

Byl měřen totožný vzorek trafoboardu jako v předchozím případě. Týdenní impregnace v oleji se pozitivně projevila na výbojové činnosti. Zapalovací napětí v tomto případě činí 14,4 kV, kdy výbojová činnost vzrostla z cca 0,3 pC na 9 pC. Při napětí 17,1 kV se již projevil vliv ELD systému. Obvod byl opět zapojen s vazebním kapacitorem a měřicí impedancí Biddle (1 500 pF/150 kV).

9 Olej, kuprextit, dutina $d = 2,5$ mm

V tomto případě byl měřen vzorek sklotextitové desky tloušťky 1,5 mm pro výrobu plošných spojů. Uprostřed vzorku byl vyvrtán otvor průměru 2,5 mm. Obvod byl opět zapojen s vazebním kapacitorem a měřicí impedancí Biddle (1 500 pF/150 kV). Za počáteční napětí ČV lze považovat 9,5 kV. Po této hodnotě však zdánlivý náboj klesl, což mohlo být způsobeno částečným zalitím dutinky olejem. Napětí 17,2 kV lze označit za druhé zapalovací napětí ve zbylé dutince. Vliv ELD systému se tentokrát projevil až při 20,2 kV. To mohlo být způsobeno větší plochou vzorku, který přesahoval skleněné desky, v kterých byl upnut.

10 Olej, kuprextit, dutina $d = 2,5$ mm, připojeno přes druhou vazební kapacitu

Měřil jsem ten samý vzorek jako v předchozím případě. V obvodě byl použit vazební kapacitor a měřicí impedance výrobce Power Diagnostix Systems (dále jen PD). Tento kapacitor umožnil jiné připojení napájení ELD systému. U předchozího připojení s kapacitou Biddle bylo podezření na povrchové výboje způsobující nižší maximální napětí, s kterým se dalo měřit. Zapalovací napětí ČV v tomto případě mělo hodnotu 16,5 kV. Při 21,9 kV se projevil vliv ELD systému.

11 Olej, dutina $d = 2,5$ mm, trafoboard $t = 2$ mm, připojeno přes druhou vazební kapacitu

Jako další jsem měřil vzorek trafoboardu tloušťky 2 mm s dutinou průměru 2,5 mm. V zapojení byl použit kapacitor PD. Zapalovací napětí ČV tohoto modelu mělo hodnotu 5,7 kV. Hodnota zdánlivého náboje významně vrostla při 8,9 kV. Dále se charakter, četnost a velikost výbojové činnosti výrazně neměnily až do 20,1, kde se projevil vliv ELD systému.

12 Olej, kuprextit bez otvoru, připojeno přes druhou vazební kapacitu

V tomto případě jsem měřil vzorek sklotextitu bez otvoru. V zapojení byl použit vazební kapacitor PD. Vzorek nevykazoval téměř žádnou výbojovou činnost až do 18,7 kV. Tato činnost již probíhala patrně mezi skly a sklotextitem. Od 22,3 kV se projevil vliv ELD systému.

13 Kontrola obvodu na klouzavé výboje/korunu – měřeno bez vzorku

Při tomto měření byla provedena kontrola měřicího obvodu s kapacitorem PD na výbojovou činnost. Před měřením byla provedena úprava ELD systému zařízením šroubu u zemní elektrody. Až do 23,1 kV výbojová činnost elektrodového systému dosahovala hodnot zdánlivého náboje maximálně cca 1 pC. To jsou výrazně lepší hodnoty, než při měření s kapacitorem Biddle. Nadále jsem tedy už měřil pouze s kapacitorem PD.

14 Olej, kuprextit s dutinou $d = 2,5$ mm, připojeno přes druhou vazební kapacitu – 2.pokus

Měření č. 14 je opakováním měření č. 10. Rozhodl jsem se měření opakovat, protože při měření 10 byla dutina po vyjmutí již zalita olejem. V tomto případě lze jednoznačně za zapalovací napětí ČV považovat 9,4 kV, kdy hodnota zdánlivého výboje vzrostla z cca 1 pC až na 1,7 nC. Při zvyšování napětí velikost i četnost výbojové činnosti rostla, charakter fázového rozložení se však neměnil. Měřil jsem do 20,1 kV, vliv ELD systému se neprojevil, pořízené záznamy mají charakter vnitřních částečných výbojů.

15 Olej, 3 vrstvy papíru, v každé otvor $d = 2$ mm, připojeno přes druhou vazební kapacitu

Dalším materiálem pro modelové vzorky dielektrika byl transformátorový papír. První měřený vzorek tohoto typu byl zhotoven ze tří vrstev tenkého trafopapíru, v každé vrstvě byl otvor průměru 2 mm. Jednoznačné zapalovací napětí modelu činilo 6,9 kV, kdy již byly naměřeny hodnoty zdánlivého náboje kolem 40 pC. Fázové rozložení se významně neměnilo až do 20,2 kV. Zde se projevil vliv ELD systému.

16 Měření korony, přes první kapacitu, hrot + (napájení)

Toto měření bylo provedeno na speciálním přípravku koronujícího uspořádání. V případě měření s hrotem na vysokém potenciálu jsem zaznamenal první výbojovou činnost při 5,1 kV. Za skutečné počáteční napětí korony však lze považovat až 8,8 kV. Poslední záznam jsem pořídil při 12,2 kV. Při 13 kV došlo k přeskoku.

17 Měření korony, přes první kapacitu, hrot – (zem)

Při měření s hrotem na potenciálu země jsem zaznamenal první výbojovou činnost při napětí 4,2 kV. Za počáteční napětí korony lze v tomto případě považovat 13 kV. Do tohoto napětí jsem měřil a na něm po cca 2 min. došlo k přeskoku.

Při měření korony bylo připojení přípravku zcela odlišné od připojení ELD systému a mohl být použit kapacitor Biddle.

18 Olej, dutina $d = 4$ mm, trafoboard $t = 2$ mm, připojeno přes druhou vazební kapacitu

V tomto případě jsem měřil vzorek trafoboardu tloušťky 2 mm s otvorem průměru 4 mm. V obvodu byl standardně použit kapacitor PD. Počátek výbojové činnosti jsem naměřil při 5,3 kV. Od 12 kV výbojová činnost vzrostla na hodnoty zdánlivého náboje kolem 3 nC. Dále se charakter ani velikost výbojové činnosti neměnily, četnost vzrůstala. Měřil jsem do 22,5 kV.

19 Olej, tvrdý trafopapír, otvor $d = 2,5$ mm, připojeno přes druhou vazební kapacitu

U vzorku z tvrdého transformátorového papíru jsem zaznamenal počátek výbojové činnosti při 4,9 kV a toto napětí lze považovat za zapalovací. Fázové rozložení má charakter vnitřních výbojů a jeho charakter se až do 22,9 kV neměnil, pouze rostla četnost. Při 22,9 kV došlo k projevu výbojové činnosti ELD systému a k přehlcení detektoru. Záznam z 22,9 kV jsem tedy nestihl pořídít.

20 Olej, tenký papír bez otvoru, připojeno přes druhou vazební kapacitu

Při měření na tomto vzorku jsem zaznamenal první výbojovou činnost při 3,2 kV, při 10,1 kV zdánlivé výboje vzrostly na cca 200 pC. Vzhledem k tomu, že šlo o vzorek bez otvoru, domnívám se, že k výbojům docházelo ve vzduchové bublině v oleji. Od 18,1 kV se začal projevovat vliv ELD systému na naměřenou výbojovou činnost, od 20 kV se projevil naplno.

21 Olej, tvrdý trafopapír, bez otvoru, připojeno přes druhou vazební kapacitu

Měřil jsem model tvrdého transformátorového papíru bez dutiny. První výbojová činnost v řádu jednotek pC byla zaznamenána při 4 kV. Tato velikost výbojové činnosti, četnost i fázové rozložení se nezměnily až do 17,6 kV. Při dalším měřeném záznamu na napětí 22 kV došlo k projevu výbojové činnosti ELD systému a zahlcení detektoru a PC. Tento záznam tedy nebyl uložen.

22 Olej, tenký papír 1 vrstva, otvor 2,5 mm, připojeno přes druhou vazební kapacitu

Tento model byl tvořen tenkým trafopapírem s otvorem 2,5 mm. Zapalovací napětí tohoto vzorku lze jednoznačně stanovit na 4,4 kV. Až do 18 kV se fázové rozložení výbojové činnosti významně neměnilo. Od 18 kV se začal projevovat vliv ELD systému

23 Olej, plexisklo_1, připojeno přes druhou vazební kapacitu a

24 Olej, plexisklo_2, připojeno přes druhou vazební kapacitu

Tyto dva vzorky byly upnuty mezi elektrody bez skel, neboť dutina byla umístěna uvnitř materiálu. Toho bylo docíleno slepením 3 vrstev, kde v prostření byl vyvrtán otvor. Ani v jednom z těchto vzorků se nepodařilo zapálit v dutině částečný výboj. Naměřený zdánlivý náboj dosahoval hodnot maximálně cca. 0,5 pC. Při napětí přes 20 kV se pak začal projevovat vliv ELD systému.

25 Olej, elektrody bez vzorku - $d = 4,7\text{mm}$, připojeno přes druhou vazební kapacitu

Při tomto měření byla znovu zkontrolována výbojová činnost elektrodového systému. Mezi elektrody nebyl upnut žádný model a jejich vzdálenost činila 4,7 mm, což je tloušťka modelu skládajícího se ze dvou skel a slabého trafoboardu. První výbojová činnost na hranici šumu se objevila při 10,1 kV. Minimální výbojovou činnost jsem naměřil až do 22 kV, hodnota zdánlivého náboje většiny výbojů stále nepřesahovala 4 pC. Ve 22 kV se projevila výbojová činnost samotného elektrodového systému. Ve 24 kV došlo k přeskoku.

4. Výsledky měření

V předchozí kapitole jsem pořízené záznamy výbojové činnosti komentoval jen stručně. V této kapitole se budu zabývat komentářem naměřených záznamů výbojové činnosti na jednotlivých vzorcích. V této kapitole bude také provedena řada porovnání záznamů výbojové činnosti na porovnatelných vzorcích (zejména s dutinou a bez dutiny).

4.1. Elektrodový systém

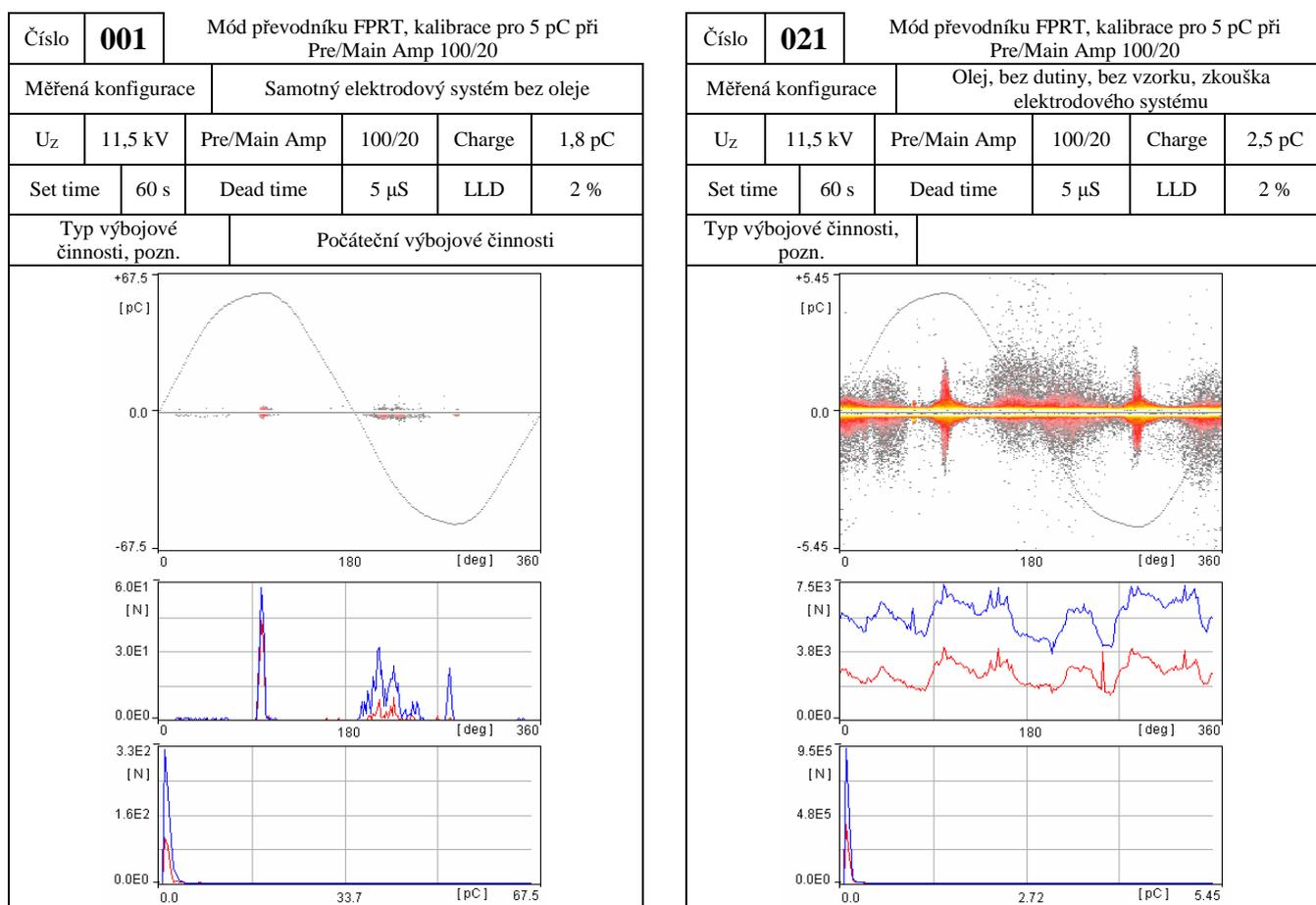
V této části porovnám záznamy měřené na samotném elektrodovém systému. Bude znázorněno, že jeho úpravou a úpravou zapojení jsem dosáhl vyššího napětí, do kterého lze měřit, aniž by ELD systém ovlivňoval měření svou vlastní výbojovou činností.

Číslo měření	Číslo záznamu	Popis měřeného vzorku	
3	001	Samotný elektrodový systém bez oleje.....	1
5	019	Olej, bez dutiny, bez vzorku, zkouška elektrodového systému	5
6	026	Elektrodový systém v oleji, staniol z + pryč, Cu fólie na -	7
13	065	Kontrola obvodu na klouzavé výboje/koronu – měřeno bez vzorku	19
25	136	Olej, elektrody bez vzorku - $d = 4,7\text{mm}$, připojeno přes druhou vazební kapacitu	40

Tabulka 3 Měření na elektrodovém systému bez vzorků

Porovnání měření 3 vs. 5

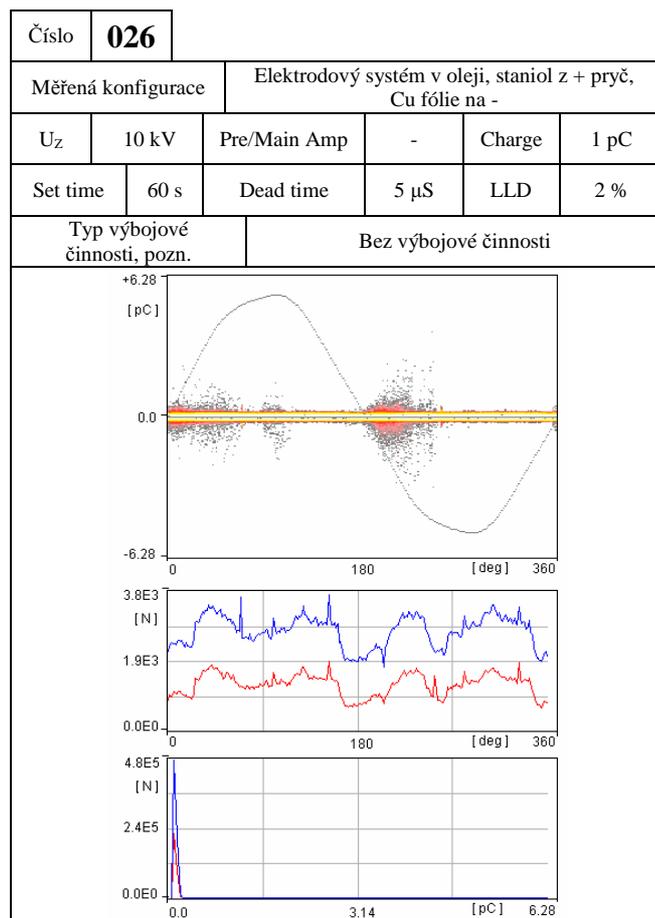
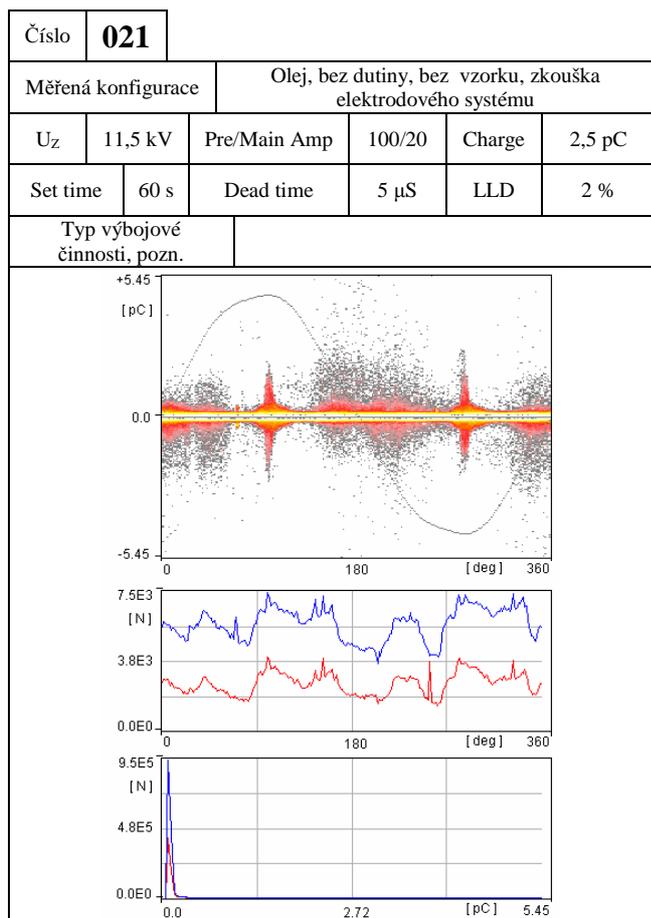
Jedná se o porovnání měření elektrodového systému na suchu a v oleji. V obou případech je použit vazební kapacitor Biddle. K porovnání těchto dvou měření jsem vybral záznamy 001 a 021, které můžeme vidět v následující tabulce (Tabulka 4). Při 11,5 kV je vidět, že systém v oleji vykazuje vyšší výbojovou činnost, což bylo zřejmě způsobeno malými bublinkami vzniklými naléváním oleje do nádoby.



Tabulka 4 Porovnání měření 3 vs. 5

Porovnání měření 5 vs. 6

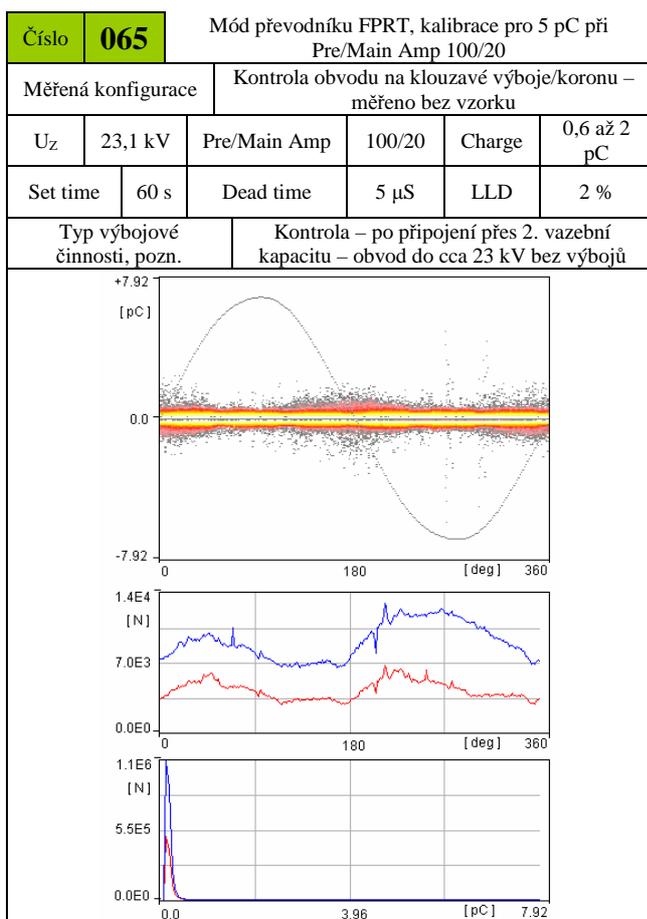
Zde se jedná o porovnání měření ELD systému v oleji a ELD systému v oleji s měděnou fólií na šroubu u zemní elektrody. Pro toto srovnání jsem vybral záznamy 021 a 026, které můžeme vidět v následující tabulce (Tabulka 5). Z těchto záznamů vyplývá, že výbojová činnost má stejný charakter, avšak u upraveného ELD systému je nižší. Záznamy jsou pořízeny při napětí 11,5 kV a 10 kV.



Tabulka 5 Porovnání měření 5 vs. 6

Porovnání měření 5 vs. 6 vs. 13

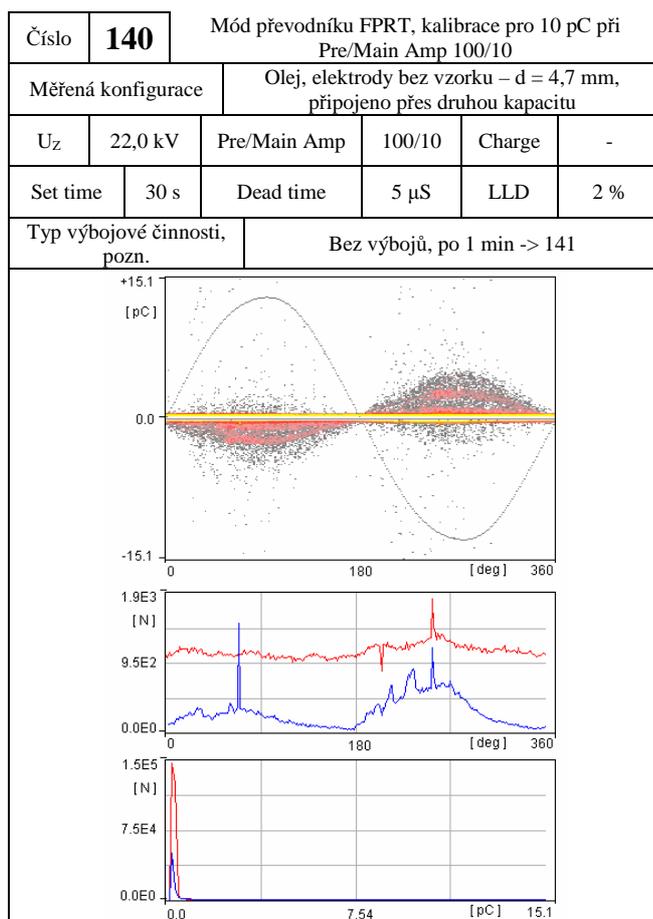
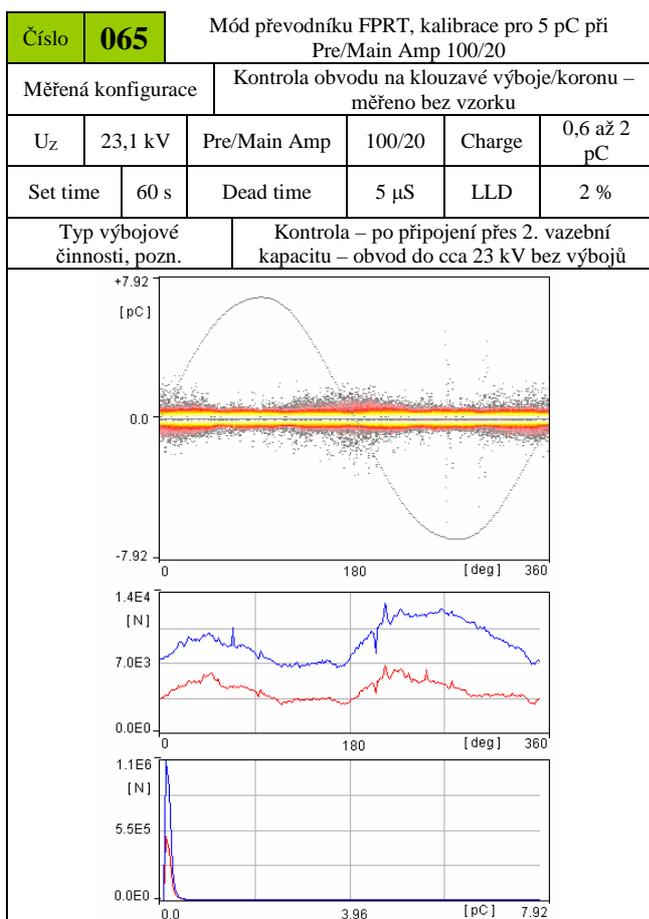
V tomto případě budu porovnávat ELD systém s ELD systémem upraveným Cu fólií na zemní elektrodě a ELD systémem upraveným zaříznutím šroubu na zemní elektrodě. K porovnání jsem vybral záznamy 021, 026 a 065, které jsou v tabulkách Tabulka 5 a Tabulka 6. Ze záznamů je vidět, že ELD systém se zaříznutým šroubem je i při 23,1 kV lepší než ELD systém se šroubem při 11,5 kV. Je také lepší než a ELD systém s fólií na šroubu při 10 kV. Vliv na nižší výbojovou činnost na záznamu 065 mělo také použití vazebního kapacitoru PD místo kapacitoru Biddle.



Tabulka 6 Porovnání měření 65

Porovnání měření 13 vs. 25

V tomto případě jsou porovnávána měření ELD systému, kde u obou už byl zaříznutý šroub a v zapojení obvodu byl použit vazební kapacitor PD. V případě měření 13 však byly elektrody vzdáleny přibližně 1 cm a u měření 25 byly elektrody vzdáleny 4,7 mm. Pro porovnání jsem vybral záznamy 065 a 140. Záznam 140 vykazuje vyšší výbojovou činnost. Záznamy jsou pořízeny při napětí 23,1 kV a 22 kV.



Tabulka 7 Porovnání měření 13 vs. 25

4.2. Trafoboard

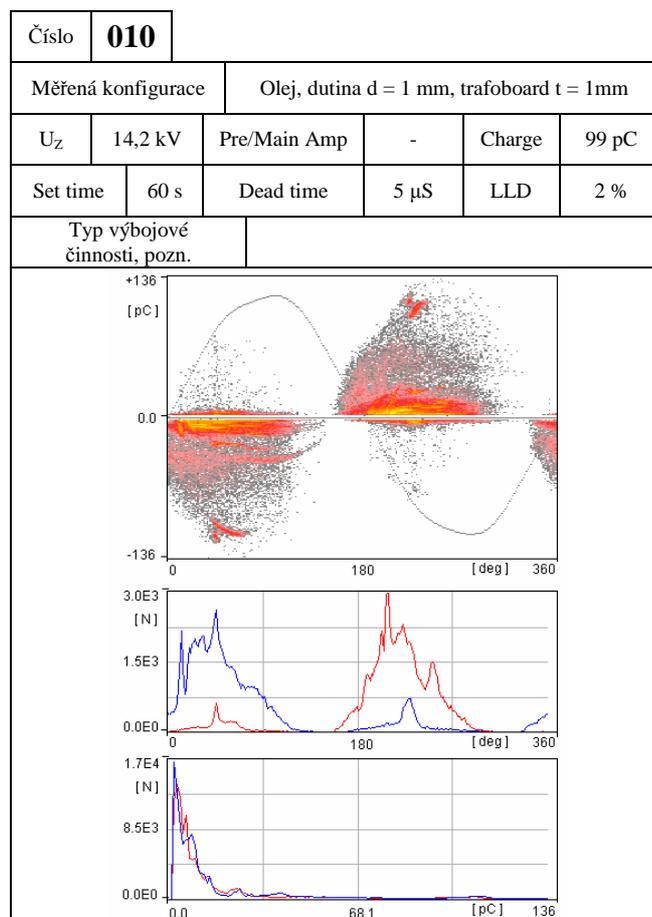
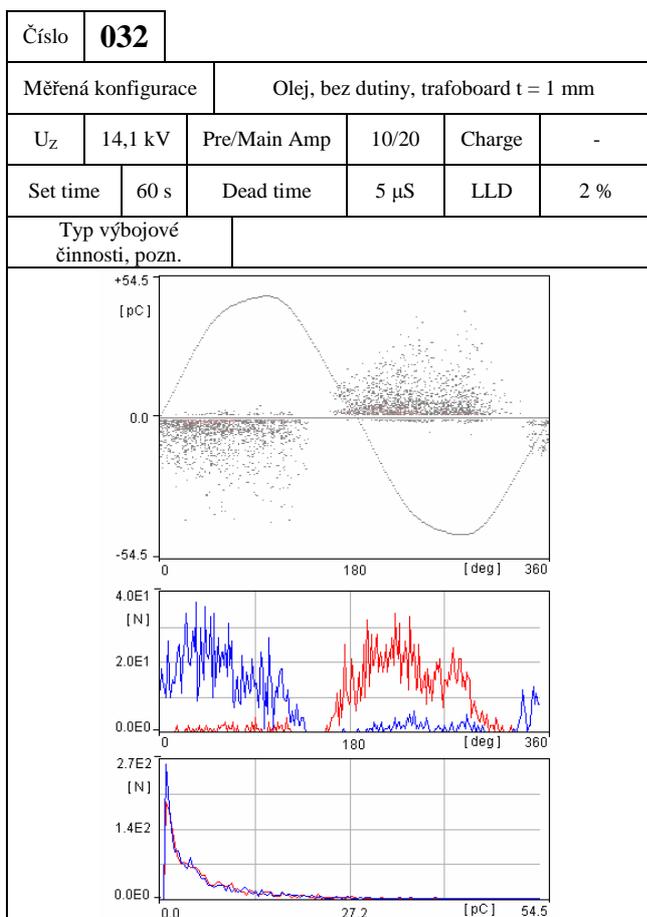
Číslo měření Číslo záznamu Popis měřeného vzorku

4	002	Olej, dutina d = 1mm, trafoboard t = 1 mm	1
7	028	Olej, bez dutiny, trafoboard t = 1 mm.....	8
8	036	Olej, bez dutiny, trafoboard t = 1 mm, týden namočeno v oleji	10
11	052	Olej, dutina d = 2,5mm, trafoboard t = 2 mm, připojeno přes druhou vazební kapacitu	15
18	088	Olej, dutina d = 4 mm, trafoboard t = 2 mm, připojeno přes druhou vazební kapacitu	26

Tabulka 8 Měření vzorků s trafoboardem

Porovnání měření 7 vs. 4

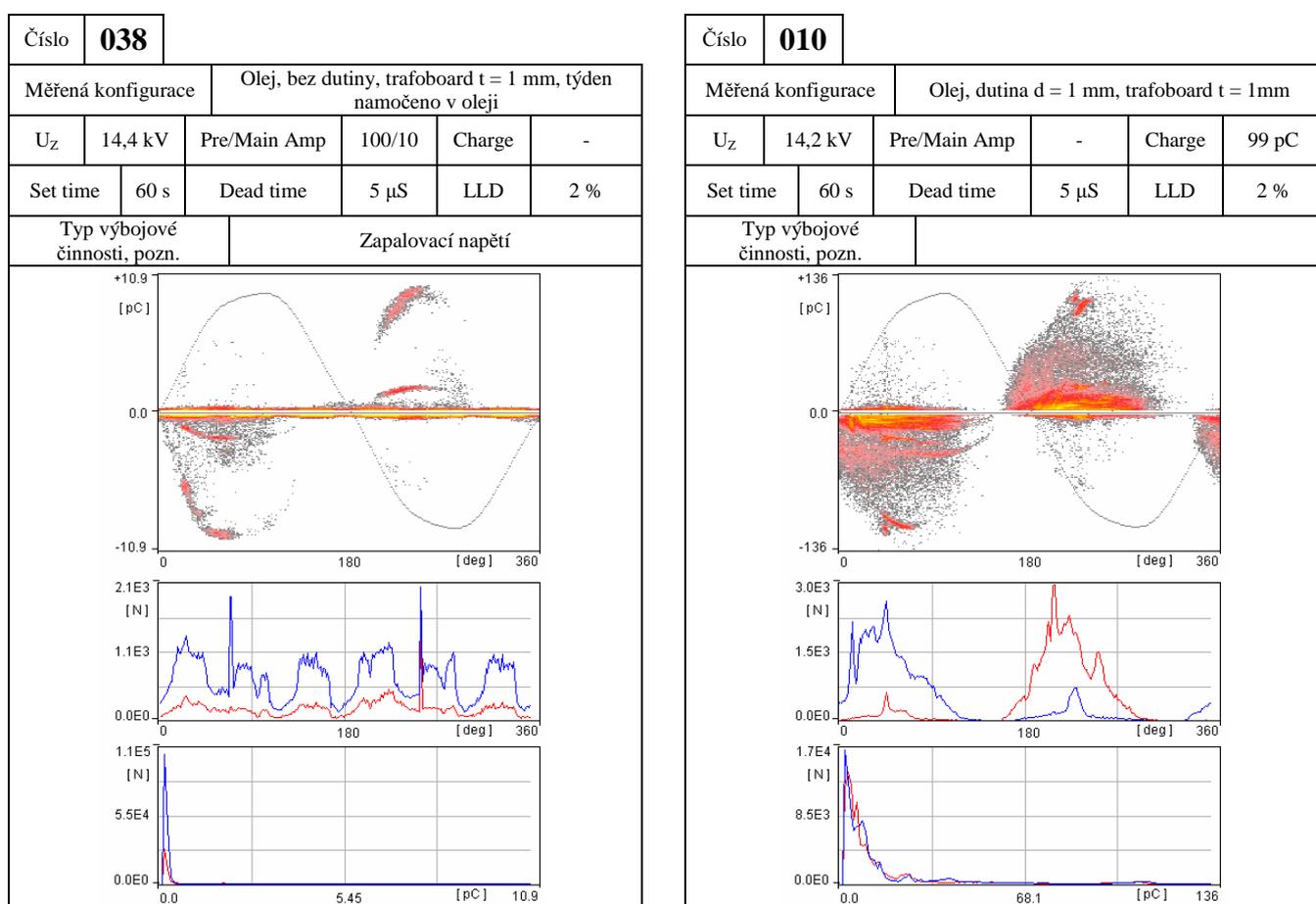
V tomto případě jsou porovnávána měření trafoboardu tloušťky 1 mm bez otvoru a s otvorem průměru 1mm. K porovnání jsem vybral záznamy 032 a 010. Záznamy jsou pořízeny při napětí 14,1 kV a 14,2 kV. Při srovnatelném napětí model bez otvoru vykazuje zanedbatelnou výbojovou činnost. Záznam 010 má charakter vnitřních výbojů v dutině dielektrika.



Tabulka 9 Porovnávání měření 7 vs. 4

Porovnání měření 7 vs. 8

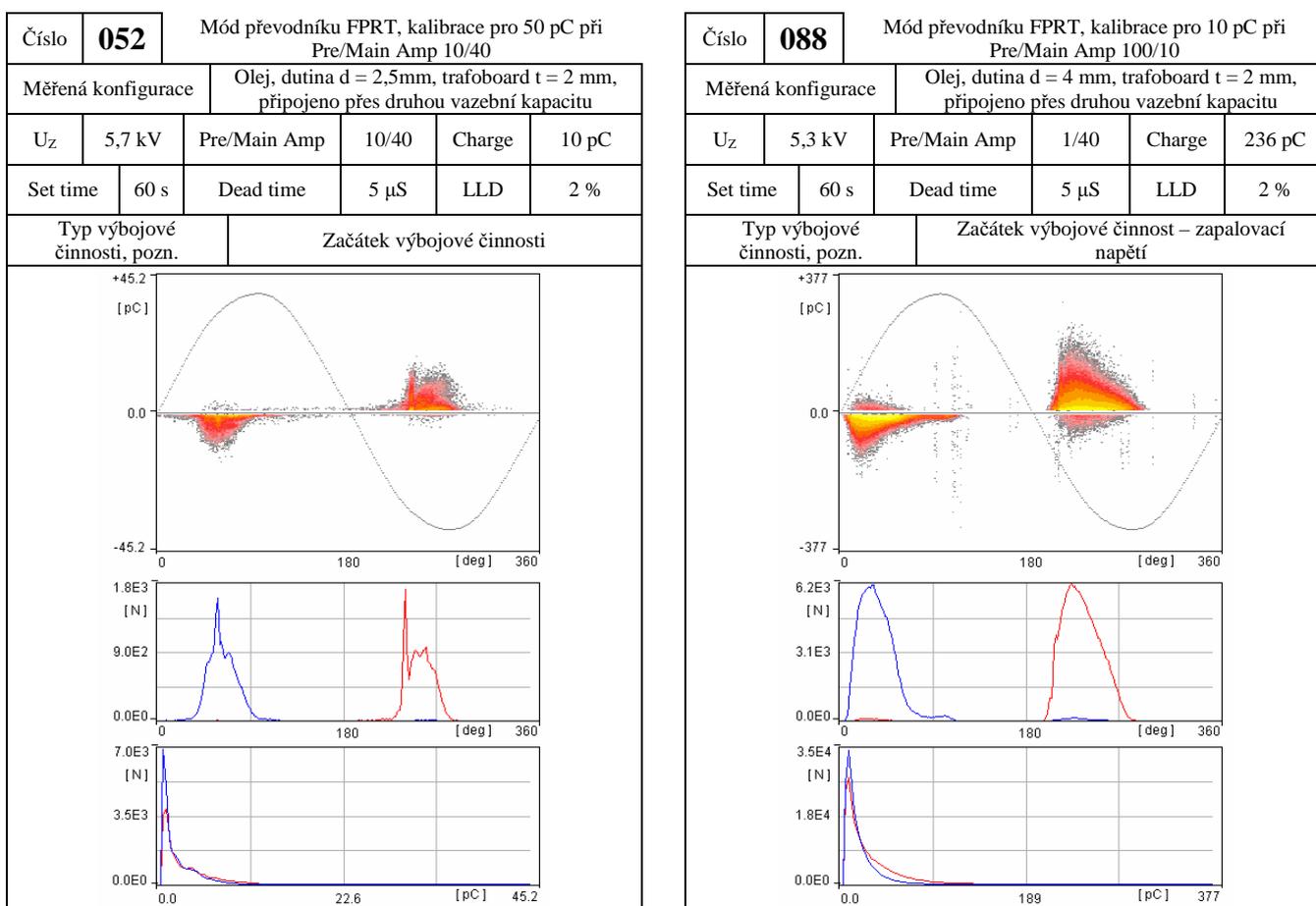
Zde jsou porovnány záznamy z měření trafoboardů bez dutin. Záznam 010 byl pořízen na vzorku, který byl čerstvě ponořen do oleje, záznam 038 byl pořízen na vzorku, který byl týden v oleji. Model na záznamu 038 vykazuje menší částečné výboje a tedy lepší izolační schopnosti. To je v souladu s tím, že byl lépe impregnován. Výbojová činnost na záznamu 038 má však také charakter vnitřních výbojů. Může se jednat o výboje přímo uvnitř trafoboardu, nebo o výboje v dutinkách mezi skly a trafoboardem.



Tabulka 10 Porovnávání měření 7 vs. 8

Porovnání měření 11 vs. 18

Zde jsou porovnávány dva modely s trafoboardem tloušťky 2 mm. První je s otvorem o průměru 2 mm, druhý má otvor o průměru 4 mm. Oba záznamy mají dle předpokladu podobný charakter výbojové činnosti odpovídající vnitřním výbojům. Model s větší dutinou má mírně nižší zapalovací napětí a výbojová činnost v něm byla naměřena intenzivněji. S rostoucím napětím se však rozdíl mezi vzorkem otvorem 2 mm a otvorem 4 mm ztrácí.



Tabulka 11 Porovnání měření 11 vs. 18

4.3.Deska plošného spoje

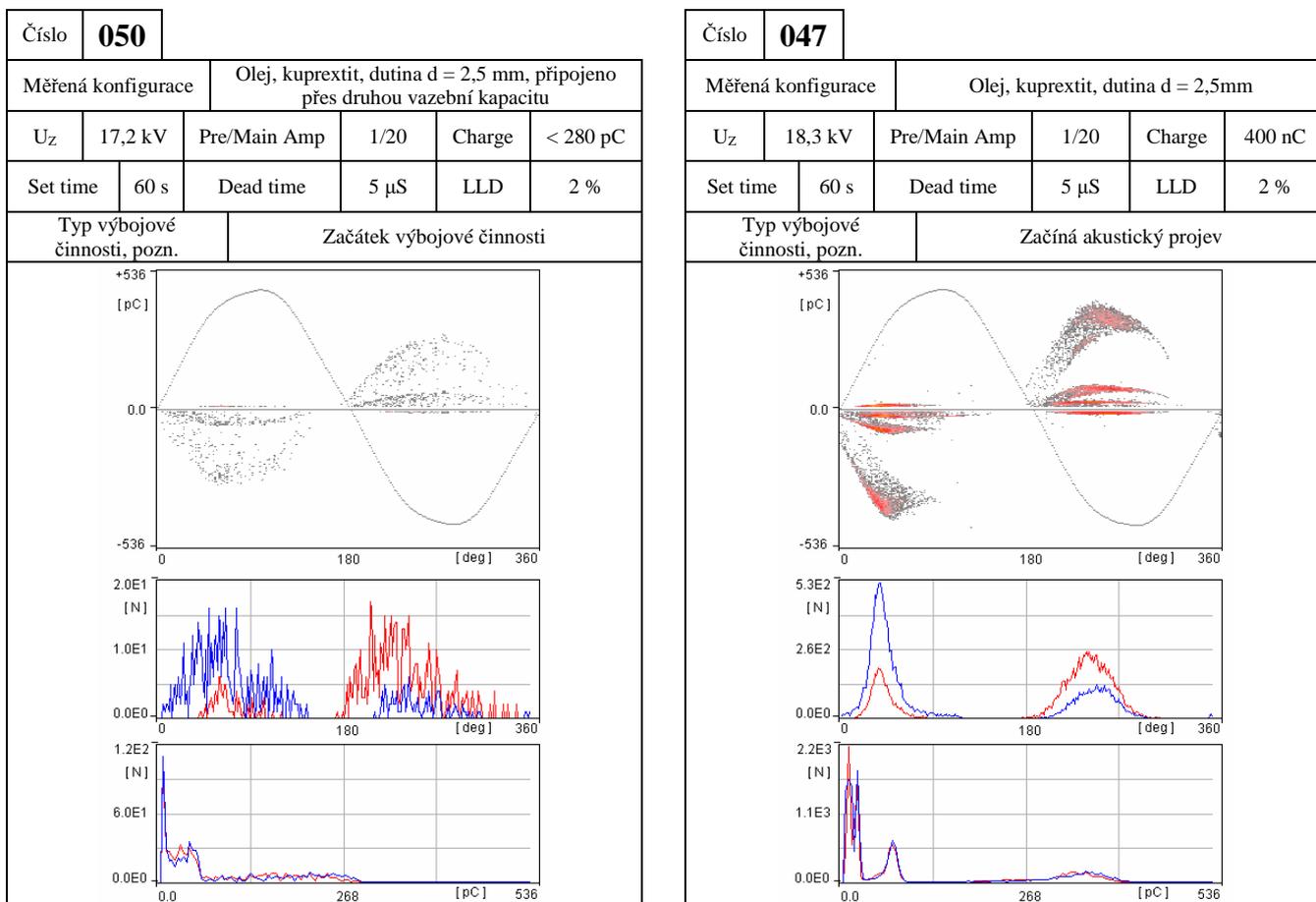
Číslo měření Číslo záznamu Popis měřeného vzorku

9	042	Olej, kuprextit, dutina d = 2,5mm	12
10	050	Olej, kuprextit, dutina d = 2,5mm, připojeno přes druhou vazební kapacitu	14
12	058	Olej, kuprextit bez otvoru, připojeno přes druhou vazební kapacitu	17
14	066	Olej, kuprextit s dutinou d = 2,5mm, připojeno přes druhou vazební kapacitu – 2.pokus	19

Tabulka 12 Měření vzorků s kuprextitem

Porovnání měření 10 vs. 9

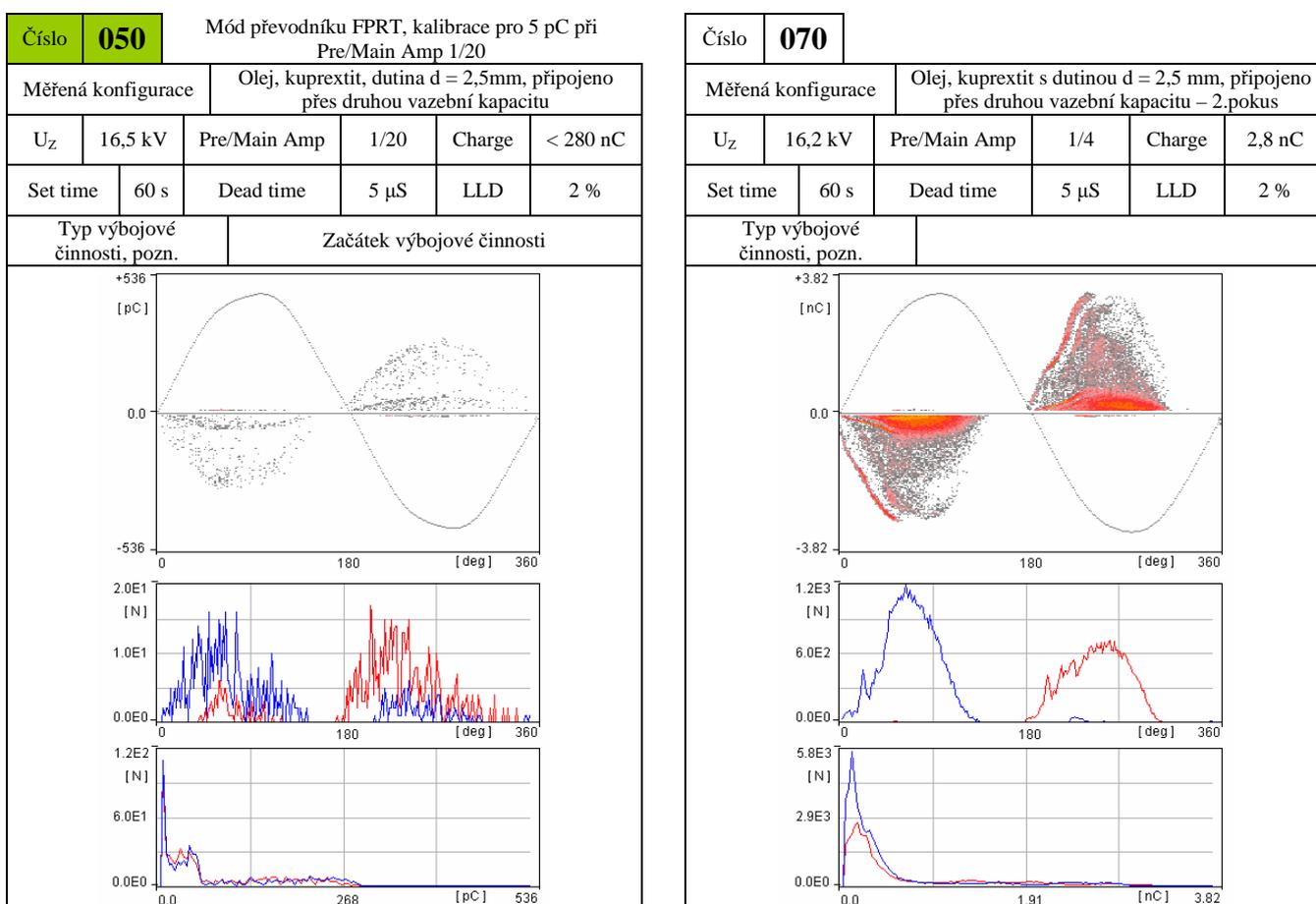
V tomto případě jsou porovnávány záznamy z měření kuprextitu s otvorem 2,5 mm. V případě měření 10, je v obvodu použit vazební kapacitor PD, v případě měření 9 kapacitor Biddle. Z následující tabulky (Tabulka 13) plyne, že vzorek na záznamu 50 vykazuje nižší výbojovou činnost. Tento záznam byl však pořízen při nižším napětí než záznam 047. Výbojová činnost při měření 9 a 10 byla srovnatelná, vliv připojení přes kapacitor PD se neprojevil.



Tabulka 13 Porovnání měření 10 vs. 9

Porovnání 10 vs. 14

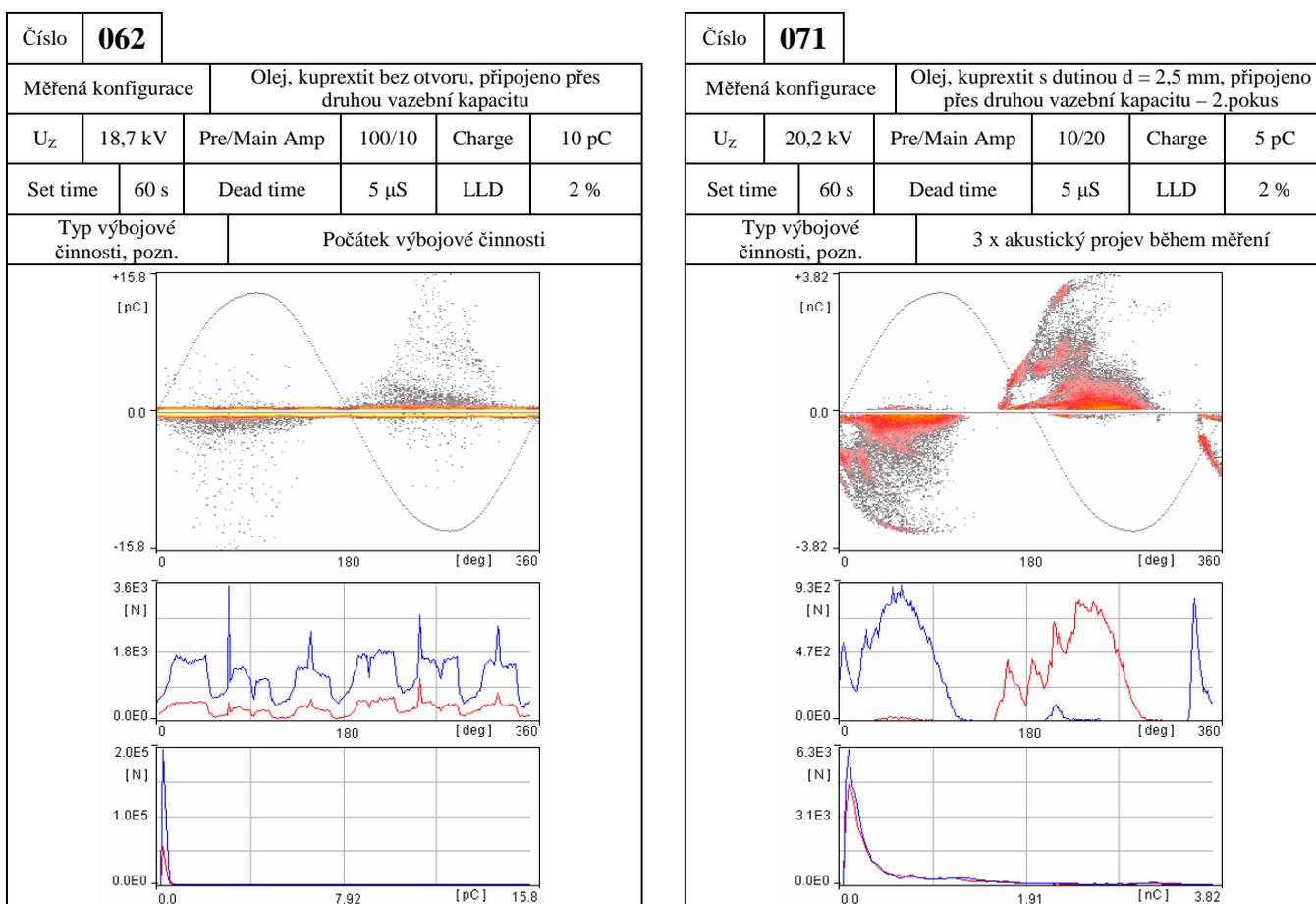
Zde jsou porovnávány dva modely kuprextitu s otvorem 2,5 mm. U záznamu 050 z měření 10 byl otvor po skončení měření zalit olejem. U záznamu 070 z měření 14 zůstal otvor jednoznačně nezalitý. U měření 10 je taktéž patrné nižší zapalovací napětí – už při 9,4 kV jsou zaznamenány zdánlivé náboje o velikosti skoro 2 nC (záznam 067). Z následující tabulky (Tabulka 14) je patrné, že při srovnatelném napětí je výbojová činnost záznamu 070 mnohem výraznější, než u záznamu 050. V případě měření 14 tedy zůstal otvor nezalitý olejem a probíhala v něm výbojová činnost.



Tabulka 14 Porovnání měření 10 vs. 14

Porovnání 12 vs. 14

V tomto odstavci porovnávám záznamy z měření vzorků kuprexitu bez otvoru a s otvorem o průměru 2,5 mm. Oba vzorky byly měřeny v zapojení s vazebním kapacitorem PD. Zapalovací napětí vzorku bez otvoru činilo 18,7 kV. U vzorku s otvorem bylo zapalovací napětí 9,4 kV. Po vyjmutí vzorku s otvorem z oleje nebyla dutina zalita, naměřené výboje tedy opravdu hořely uvnitř ní. V následující tabulce (Tabulka 15) je porovnání výbojové činnosti při napětí 18,7 kV. Dle předpokladu je výbojová činnost vzorku s dutinou výrazně vyšší. Vliv ELD systému se při měření s dutinou neprojevil. U měření bez dutiny lze výbojovou činnost při 22,3 kV považovat dle záznamu 141 za vliv ELD systému.



Tabulka 15 Porovnání měření 12 vs. 14

4.4. Transformátorový papír

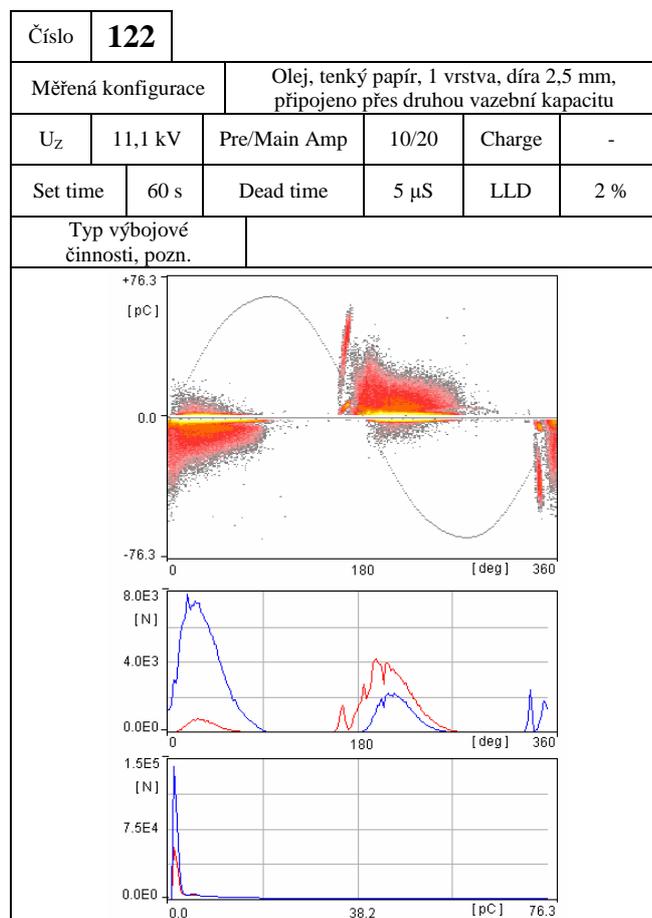
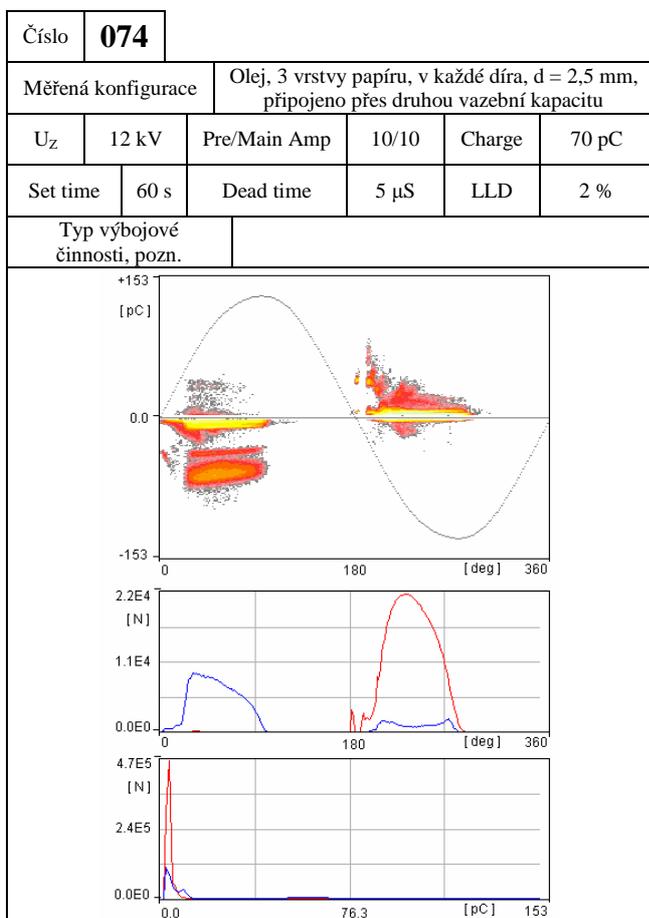
Číslo měření Číslo záznamu Popis měřeného vzorku

15	073	Olej, 3 vrstvy papíru, v každé otvor d = 2mm, připojeno přes druhou vazební kapacitu	21
19	096	Olej, tvrdý papír - přešpán, otvor d = 2,5 mm, připojeno přes druhou vazební kapacitu	28
20	104	Olej, tenký papír bez otvoru, připojeno přes druhou vazební kapacitu	30
21	112	Olej, tvrdý papír - přešpán, bez otvoru, připojeno přes druhou vazební kapacitu	32
22	118	Olej, tenký papír 1 vrstva, otvor 2,5 mm, připojeno přes druhou vazební kapacitu	34

Tabulka 16 Měření vzorků s transformátorovým papírem

Porovnání 15 vs. 22

Zde jsou porovnávána měření vzorků tenkého transformátorového papíru s otvorem 2,5 mm. U měření 15 byly měřeny tři vrstvy, u měření 22 jedna vrstva. Zapalovací napětí vzorku s třemi vrstvami činilo 6,9 kV. Ve vzorku s jednou vrstvou zapálily výboje při 4,4 kV.

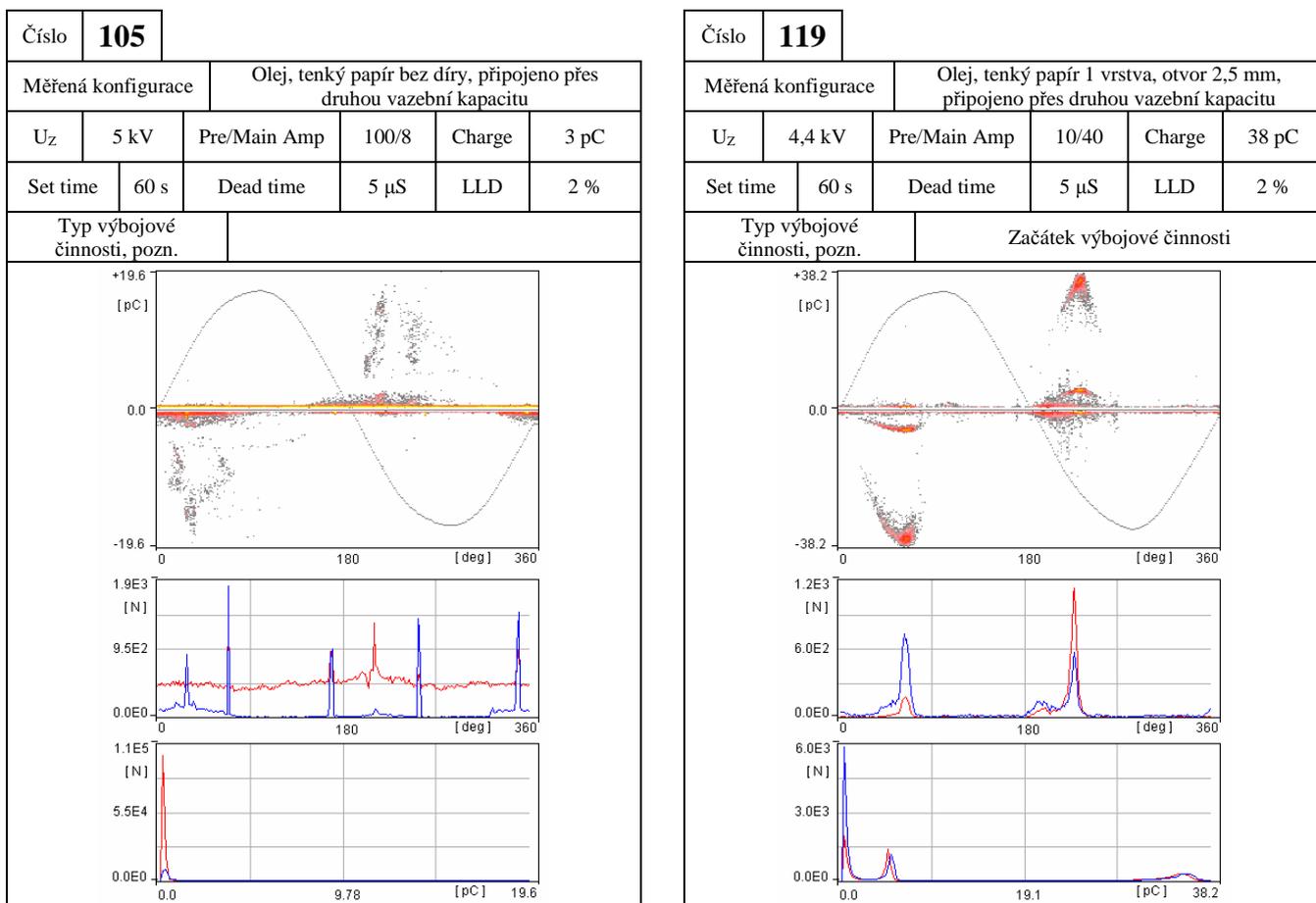


Tabulka 17 Porovnání měření 15 vs. 22

V tabulce (Tabulka 17) jsou záznamy při srovnatelném napětí (12 kV a 11,1 kV). Z nich je vidět, že výbojová činnost v menší dutině jednovrstvého vzorku je intenzivnější, než ve větší dutině vzorku třívrstvého. Vliv ELD systému se u těchto dvou měření objevil při téměř stejném napětí – měření 15 20,2 kV a měření 22 20,5 kV. Výbojovou činnost při tomto napětí lze dle záznamu 141 pokládat za vliv ELD systému.

Porovnání 20 vs. 22

V tomto případě jsou vyhodnocovány záznamy z měření vzorků tenkého transformátorového papíru bez otvoru a s otvorem 2,5 mm. Zapalovací napětí vzorku bez otvoru bylo dle předpokladu naměřeno vyšší (10,1 kV) než u vzorku s otvorem (4,4 kV).



Tabulka 18 Porovnání měření 20 vs. 22

V následující tabulce (Tabulka 17) jsou porovnány záznamy 105 a 119. Záznamy byly pořízeny při srovnatelném napětí. Fázové rozložení výbojů na záznamu 105 odpovídá vzorku bez díry, výboje jsou v průběhu fáze rozloženy převážně rovnoměrně, jednoznačně převažují výboje malé velikosti. U záznamu 119 jsou výboje soustředěny do fází od 0° do 90° , což odpovídá vnitřním částečným výbojům v dutině dielektrika. Velikost nejčtetnějších výbojů je na záznamu 119 cca 35 pC. To je výrazně více než u záznamu 105. Zde mají nejčtetnější výboje velikost zdánlivého náboje kolem 0,5 pC. Vzorek bez otvoru jsem měřil do 20,0 kV, kdy se již projevil vliv ELD systému. Vzorek s otvorem byl měřen do 18 kV, zde se vliv ELD systému ještě neprojevil.

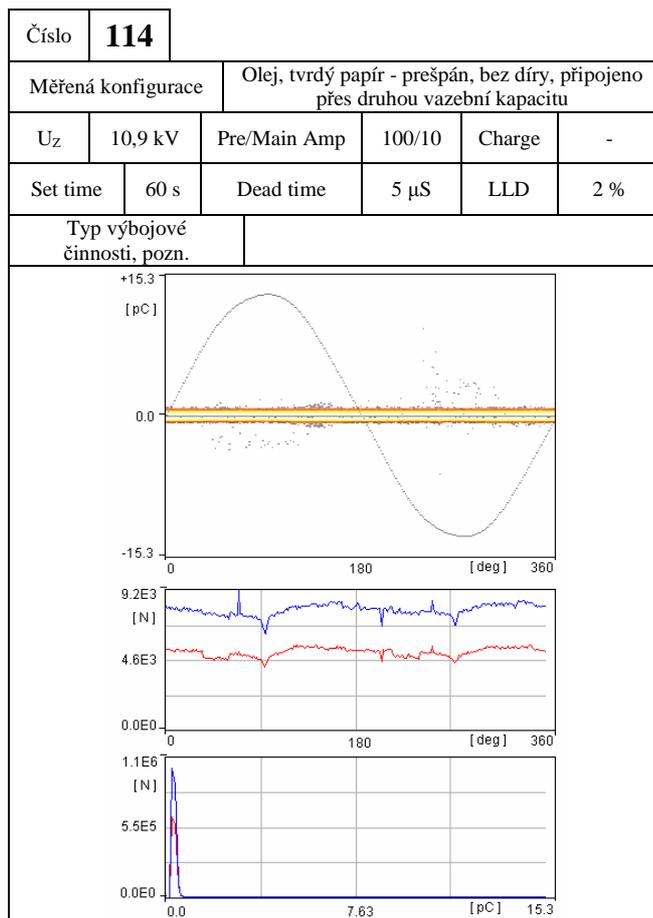
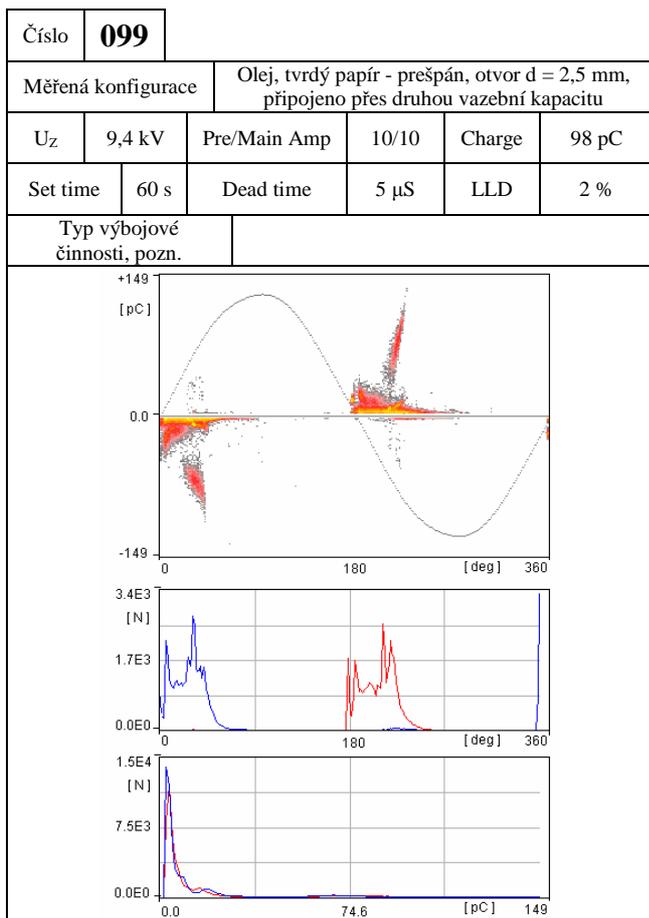
Zde bych chtěl ještě zmínit, že u měření bez otvoru (záznamy 104 až 111) odpovídají záznamy předpokladům (minimální výbojová činnost) pouze do 10,1 kV (záznam 107). Napětí 10,1 kV bylo zapalovací napětí částečných výbojů, po jehož dosažení byly naměřeny zdánlivé výboje hodnot kolem 100 pC, tyto hodnoty byly naměřeny i ve zbývajících záznamech z měření 20. Teto jev, kdy vlastně vzorek bez otvoru byl od 10,1 kV „horší“ než ten s otvorem, si lze vysvětlit zapálením částečných výbojů ve vzduchových dutinkách ve vazelně mezi transformátorovým papírem a sklem.

Porovnání 19 vs. 21

Materiálem pro zhotovení modelů pro měření 19 a 21 byl tvrdý transformátorový papír (někteří výrobci – lepenka, prešpán, presspan). Porovnávány jsou dva vzorky s jednou vrstvou papíru. První vzorek s otvorem průměru 2,5 mm, druhý bez otvoru. Vzorek bez otvoru byl měřen do 17,6 kV. Po celou dobu se v naprosté většině naměřené hodnoty zdánlivého náboje pohybovaly do 1 pC a byly rovnoměrně fázově rozloženy. To odpovídá šumu v obvodu a lze tedy říci, že ve vzorku bez otvoru k prakticky v žádné výbojové činnosti nedocházelo. Při 22 kV se projevil vliv ELD systému a došlo k zahlcení detektoru, záznam při tomto napětí tedy nebyl pořízen.

Fázové rozložení výbojové činnosti vzorku s otvorem odpovídá vnitřním částečným výbojům. Nejčtetnější a nejsilnější výboje se vyskytují ve fázi od 0° do 90° . Charakter fázového rozložení se neměnil až do 15,4 kV. Při 17,1 kV došlo k prvním akustickým projevům výbojů. Po vyjmutí vzorku z oleje bylo zjištěno, že tato výbojová činnost byla způsobena přeskoky mezi elektrodami, které po sobě zanechaly viditelné stopy.

V následující tabulce je porovnání záznamů při srovnatelných napětích, u vzorku s otvorem je to 9,4 kV a u vzorku bez otvoru 10,9 kV. Z těchto záznamů je vidět diametrální rozdíl mezi fázovým rozložením na vzorku s otvorem (099) a bez něj (114). Také ve velikosti naměřených zdánlivých nábojů je značný rozdíl. Vzorek s otvorem vykazuje zdánlivé náboje kolem 100 pC. Na vzorku bez dutiny byly naměřeny zdánlivé náboje kolem 1pC.



Tabulka 19 Porovnání měření 19 vs. 21

4.5. Klouzavé uspořádání a keramická průchodka

Číslo měření	Číslo záznamu	Popis měřeného vzorku	
1	142	Klouzavé uspořádání – tyč s polovodivým nátěrem	42

Tabulka 20 Měření vzorku klouzavého uspořádání

Číslo měření	Číslo záznamu	Popis měřeného vzorku	
2	154	Porcelánová průchodka	45

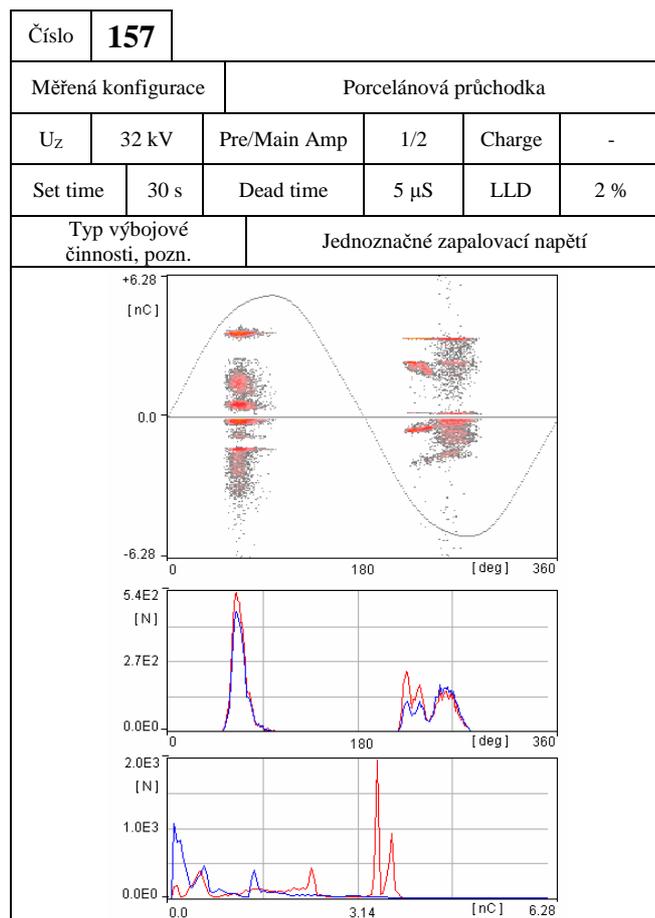
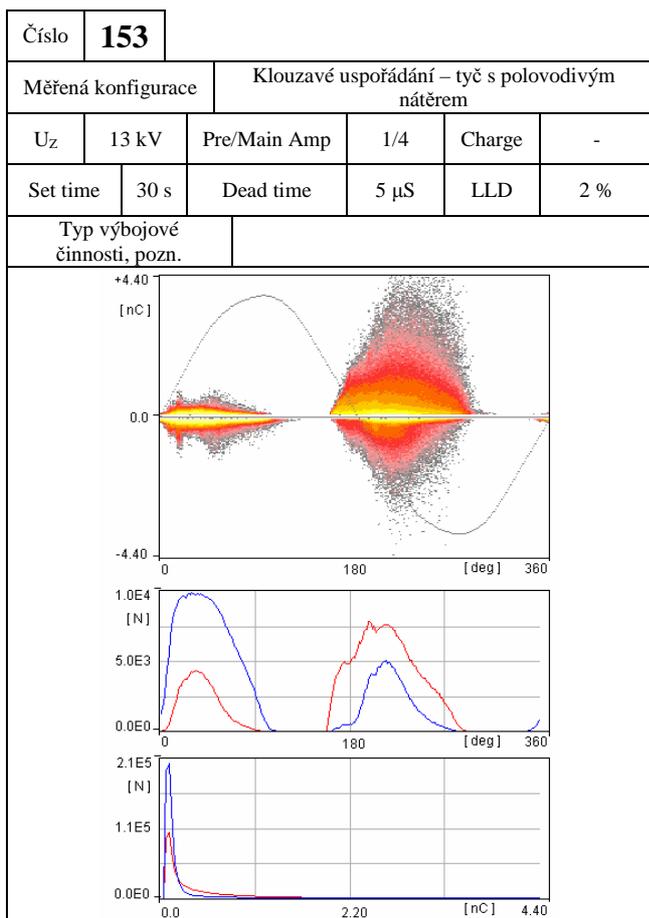
Tabulka 21 Měření na keramické průchodce

Výsledky měření 1 a 2

Výsledky těchto měření nebudou porovnávány mezi sebou. Byly to sice typické vzorky, na kterých vznikají klouzavé výboje, ale počáteční napětí těchto výbojů bylo u obou přípravků značně rozdílné.

V případě klouzavého uspořádání byla do 13 kV velikost výbojové činnosti v obou půlperiodách přibližně stejná. Zapalovací napětí klouzavých výbojů činilo 3,1 kV. Od 13 kV (záznam 153) vzrůstá četnost v záporné půlperiodě. To mohlo být způsobeno vlivem korony, neboť vysoký potenciál byl přiveden na tyč a vodivý pásek byl uzemněn (fázové rozložení korony dle [1]). Při napětí 13 kV bylo možno pozorovat svítící kroužek na okraji měděného pásu na přípravku.

Zapalovací napětí klouzavých výbojů na keramické průchodce mělo velikost 32 kV. Měřil jsem do 40 kV. Velikost a četnost ČV do této hodnoty mírně rostla, fázové rozložení se neměnilo. Naměřené výboje byly rozloženy symetricky v obou půlperiodách. V následující tabulce (Tabulka 22) jsou záznamy z těchto měření.



Tabulka 22 Záznamy z měření 1 a 2

4.6. Koronující uspořádání

Číslo měření Číslo záznamu Popis měřeného vzorku

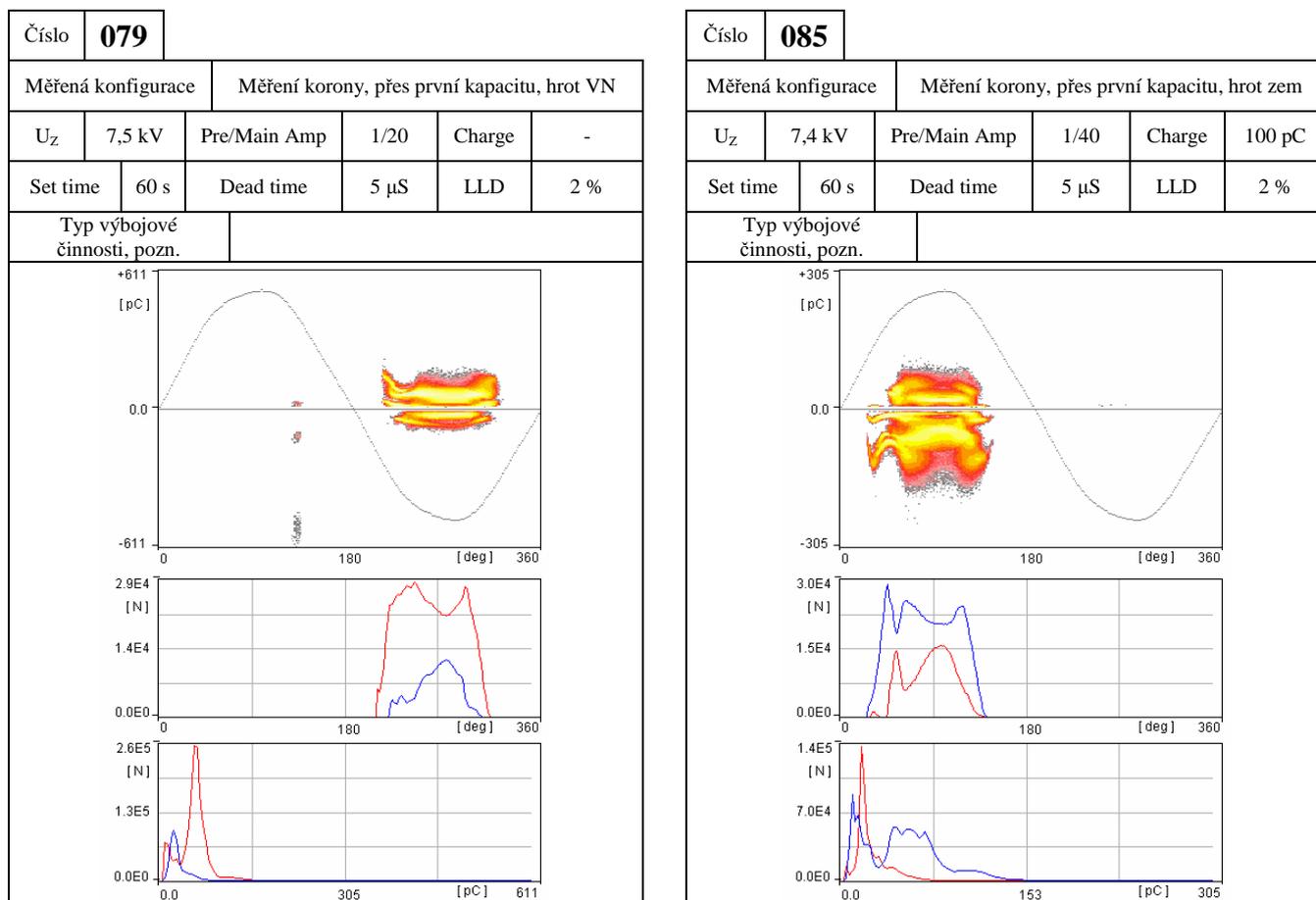
16	078	Měření korony, přes první kapacitu, hrot	23
17	084	Měření korony, přes první kapacitu, hrot	25

Porovnání 16 vs.17

Měření bylo provedeno na přípravku korony popsaném v kapitole 18. Porovnávána budou měření, kdy hrot byl připojen na vysoký potenciál a druhá elektroda na zem a opačné uspořádání.

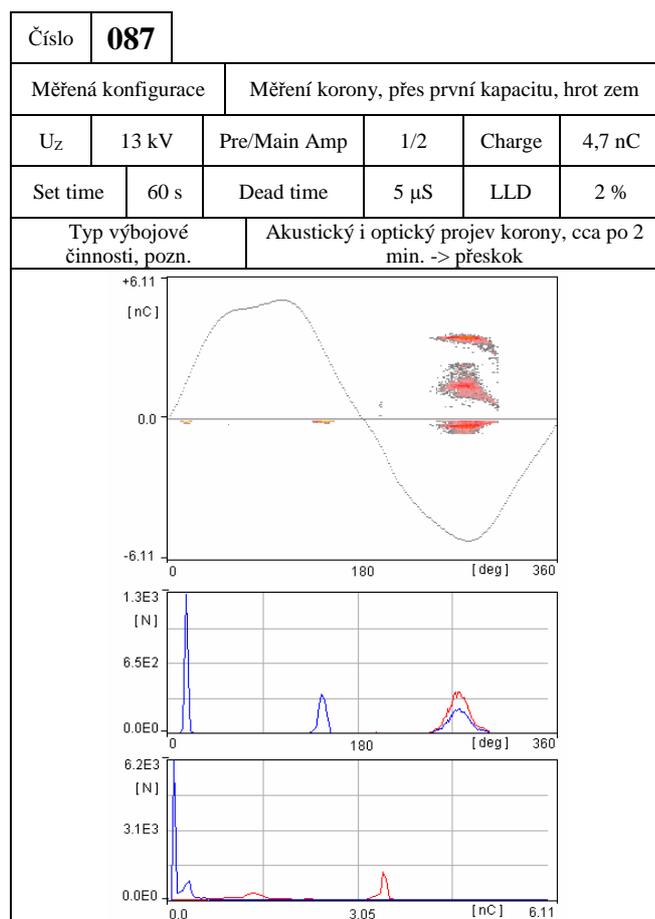
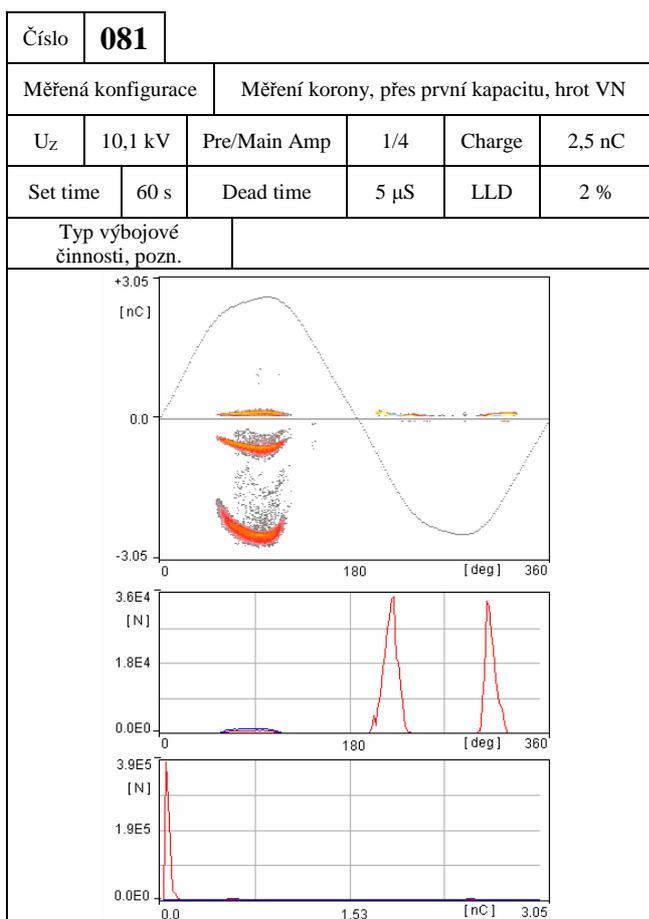
Dle zdroje [1] se uspořádání hrot – deska při připojeném střídavém napětí chová následovně. Pokud je hrot na vysokém potenciálu, objevují se ČV v záporné půlperiodě napájecího napětí. Pokud je hrot na potenciálu země, objevují se ČV v kladné půlperiodě. Při rostoucím napětí pak vznikají o několik řádů větší pulzy v opačných periodách.

Počáteční napětí korony u zapojení hrot na VN, jsem naměřil 5,1 kV. U zapojení hrot na zemi bylo počáteční napětí korony 4,2 kV. V tabulce (Tabulka 23) jsou porovnány záznamy pořízené při přibližně stejném napětí. Impulzy ČV jsou zde rozloženy kolem vrcholu průběhu napětí, v půlperiodách dle předpokladu – hrot na VN záporná půlperioda, hrot na zemi kladná půlperioda.



Tabulka 23 Porovnání měření 16 a 17 – nižší napětí

V další tabulce (Tabulka 24) jsou záznamy výbojové činnosti koronujícího uspořádání na vyšším napětí. Zde se potvrzuje předpoklad výskytu impulzů ČV v opačné periodě než při nižším napětí. Tyto výboje také mají dle předpokladu řádově větší velikost. Napětí, kdy korona na vzorku přešla do „druhé fáze“ činilo u uspořádání hrot na VN 8,8 kV. V případě zapojení hrot na zem bylo toto napětí 13 kV. Rozdílný tvar obrazců v půlperiodách je zřejmě způsoben tím, že přípravek nebyl typickým uspořádáním hrot – deska a hrot byl nejspíše příliš blízko. Jednu elektrodu tvořil klasický hrot, druhá však byla tvořena sférickou plochou se zaoblenými okraji. Na těchto okrajích tak vznikal v podstatě další hrot, i když s relativně velkým poloměrem zakřivení.



Tabulka 24 Porovnání měření 16 a 17 – vyšší napětí

4.7.Plexiskla

Číslo měření Číslo záznamu Popis měřeného vzorku

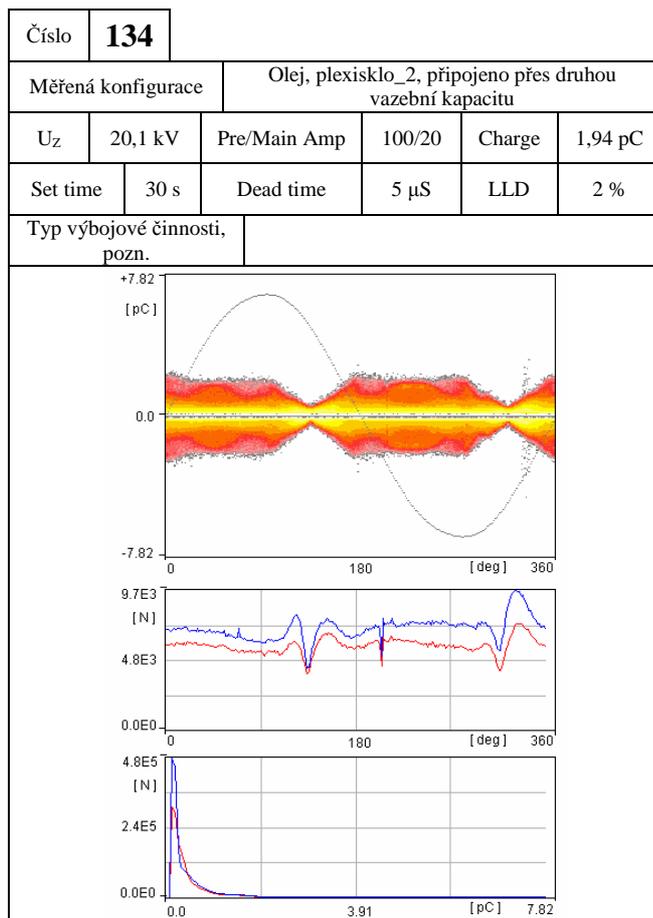
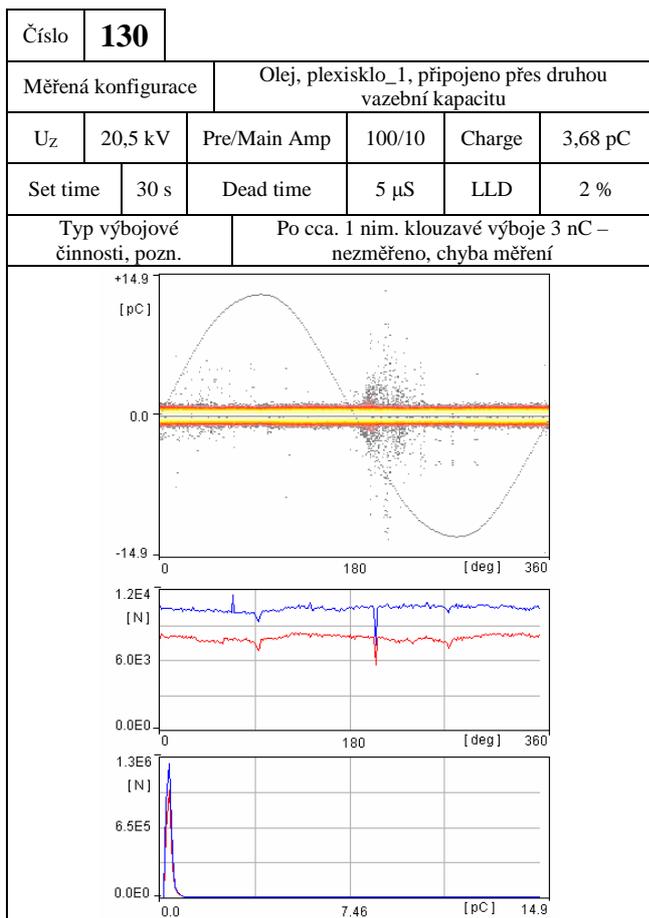
23	127	Olej, plexisklo_1, připojeno přes druhou vazební kapacitu	37
24	131	Olej, plexisklo_2, připojeno přes druhou vazební kapacitu	38

Tabulka 25 Měření vzorku plexiskel s dutinami

Výsledky měření 23 a 24

Tyto vzorky jsem měřil upnuté přímo mezi elektrody, bez skel a bez impregnace vazelínou. Vzorek prvního plexiskla jsem měřil do 20,5 kV. Do této hodnoty se nepodařilo částečné výboje v dutince zapálit. Výbojová činnost při 20,5 kV na tomto vzorku je znázorněna v levé části následující tabulky (Tabulka 26).

V pravé části následující tabulky (Tabulka 26) je výbojová činnost ve druhém vzorku plexiskla. Ani v dutině tohoto vzorku se nepodařilo zapálit vnitřní částečný výboj. Do 15,1 kV byla výbojová činnost na hranici šumu. Při 20,1 kV vzrostla na hodnotu max. 2 pC. To byl zřejmě počátek vlivu výbojů samotného ELD systému na měření. Na napětí 24,3 kV se pak tento vliv projevil naplno.



Tabulka 26 Výsledky měření 23 a 24

5. Simulace elektrostatického pole

K simulaci rozložení elektrostatického pole jsem použil nástroj femm (finite element method magnetics). Jedná se o snadno ovladatelný a praktický software použitelný k řešení problémů elektrostatického pole, magnetického pole, proudového pole a k úlohám o přestupu tepla.

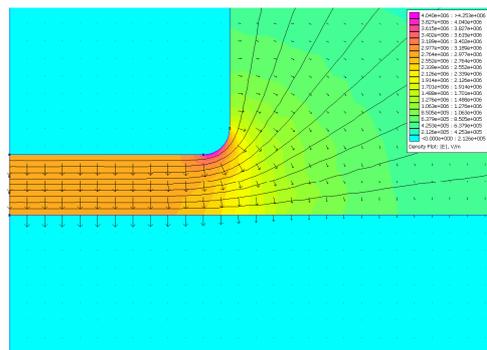
Při modelování jsem postupoval následujícím způsobem. Zvolil jsem řešení elektrostatického problému, dále jsem zadal příslušnou geometrii. Ta se zadává prostřednictvím bodů, které se poté propojí. Lze propojovat čarami a oblouky.

Dále jsem definoval elektrody a jejich potenciál. Materiálové vlastnosti jednotlivých částí jsou určeny jejich relativní permitivitou. Permitivitu skla jsem nastavil na 3,6, vzorek (trafoboard) na 3, pokud bych modeloval také okolí, nastavil bych jeho permitivitu na 2,2 (transformátorový olej), permitivitu v dutině jsem nastavil na 1 (vzduch).

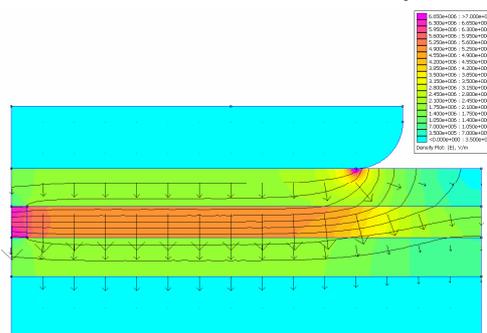
Nyní již bylo možné model vysíťovat a vytvořit tak konečné prvky, v kterých bude elektrostatické pole počítáno. V postprocesoru jsem pak zvolil zobrazení příslušných veličin. Lze zvolit zobrazení potenciálu U [V], intenzity elektrického pole E [V/m], elektrické indukce D [C/m²]. Lze také zvolit zobrazení ekvipotenciál a vektorů intenzity elektrického pole, popř. vektorů elektrické indukce.

Okolí simulovaného problému jsem uvažoval pouze pro samotný model elektrodového systému bez vzorku. Pro model se vzorem a okolím byl počet elementů po vysíťování příliš vysoký.

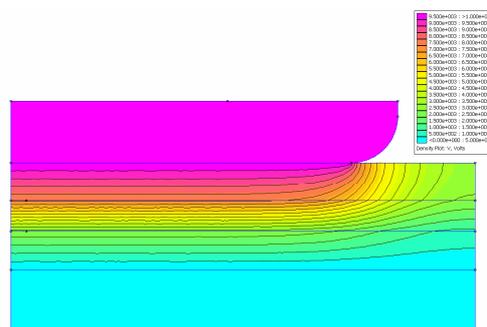
Informace použité v této kapitole jsem čerpal ze zdroje [7] a z manuálu k programu femm.



Obrázek 10 Rozložení E na ELD systému



Obrázek 11 Rozložení E na vzorku s dutinou



Obrázek 12 Rozložení E na vzorku bez dutiny

6. Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout a vytvořit modelové vzorky dielektrika, naměřit na nich záznamy výbojové činnosti a tyto záznamy vyhodnotit. Částečné výboje jsem měřil galvanickou metodou, jako měřidlo částečných výbojů jsem použil detektor ČV výrobce Power Diagnostix. Měřil jsem celkem 16 různých vzorků a přípravků. Jednalo se o přípravek klouzavého uspořádání, keramickou průchodku, přípravek pro měření korony a 13 vzorků dielektrika zhotovených z trafoboadu, kuprextitu, transformátorového papíru a plexiskla. Tyto vzorky byly měřeny většinou ve dvou verzích. S otvorem uprostřed a bez otvoru (popř. s více vrstvami materiálu).

Výsledkem měření průchodky a klouzavého uspořádání jsou záznamy klouzavých výbojů. Fázové rozložení výbojové činnosti na těchto záznamech je symetrické v obou půlperiodách napájecího napětí. Velikost a četnost výbojů je v obou půlperiodách u většiny měření přibližně stejná.

Záznamy výbojové činnosti naměřené na přípravku pro měření korony odpovídají teoretickým předpokladům o fázovém rozložení výbojové činnosti korony. Měření korony bylo provedeno ve dvou konfiguracích. Pro připojení hrotu na vysoký potenciál a druhé elektrody na zem a pro opačné zapojení. Při připojení hrotu na vysoký potenciál byly impulzy částečných výbojů naměřeny v záporné půlperiodě napájecího napětí. V zapojení s hrotem na potenciálu země a s druhou elektrodou na vysokém potenciálu byly částečné výboje naměřeny v kladné půlperiodě napájecího napětí. Při dále rostoucím napětí pak byly naměřeny řádově větší impulzy částečných výbojů v opačných půlperiodách. Naměřené průběhy výbojové činnosti korony neměly úplně typické fázové rozložení, tj. výhradně úzce kolem příslušných maxim vlny napájecího napětí. To bylo pravděpodobně způsobeno tím, že druhou elektrodu přípravku (tu proti hrotu) netvořila skutečná deska, ale sférická plocha. Pro typičtější průběh fázového rozložení korony by zřejmě bylo zapotřebí elektrody umístit dále od sebe.

Na modelech dielektrik s dutinou a bez dutiny byly naměřeny záznamy výbojové činnosti, které odpovídají předpokladům o fázovém rozložení impulzů vnitřních výbojů. Pokud daný vzorek vykazoval výraznou výbojovou činnost, pak byly impulzy částečných výbojů ve většině rozloženy ve fázi od 0° do 90° a symetricky od 180° do 270° na vlně napájecího napětí. U některých vzorků jsou ze záznamů patrné charakteristické „trsy“ částečných výbojů. Toto se týká zejména vzorků z měření 4, 9, 10, 11, 14, 15, 19 a 22 (viz kapitola 4 a katalog v příloze). Vzorky bez dutiny z měření 8 a 20 od určitého napětí také

vykazovaly výbojovou činnost odpovídající vnitřním výbojům. Bylo to zřejmě způsobeno překročením zapalovacího napětí v dutinkách vzniklých ve vazelině mezi příslušným vzorkem a sklem, které oddělovalo vzorek o olejové lázně.

Lepené vzorky z organického skla byly již hotové zapůjčeny z katedry technologií a měření. V dutinách těchto vzorků se do napětí cca 24kV nepodařilo vnitřní výboje zapálit. Napětí 24 kV bylo limitující pro použitou vazební kapacitu výrobce PD (Power Diagnostix) a také pro elektrodový systém, do kterého byly vzorky upínány. Od napětí cca 20 kV se začínaly projevovat jednotlivé přeskoky mezi elektrodami. K úplnému přeskoku došlo několikrát během měření.

Výhodou měření galvanickou metodou je jednoduchost a relativní rychlost měření, z kterého jsou jasné záznamy výbojové činnosti. Nevýhodou této metody je nízká reprodukovatelnost, kdy jeden vzorek měřen dvakrát po sobě už může vykazovat jiné hodnoty. Izolační vlastnosti vzorků během měření degradují, také vlastnosti oleje se při větším počtu měření mění. Zvláště dochází-li často k přeskokům.

7. Seznam použité a citované literatury

- [1] ZÁLIŠ, Karel. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. Praha: Academia, 2005, 140 s. ISBN 80-200-1358-X.
- [2] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí*. 2. přepracované vydání. Praha: SNTL, 1978.
- [3] KÖNIG, Dieter a Y.Narayana RAO. *Partial Discharges in Electrical Power Apparatus*. Berlín: Offenbach: vde-verlag, 1993. ISBN 3-8007-1760-3.
- [4] ČSN EN 60270. *Technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů*. Praha: ČNI, 2001.
- [5] Power Diagnostix Systems GmbH. *Partial Discharge Diagnosis, Teilentladung, Detector, Analysis, Monitoring* [online]. 2012 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: http://www.pd-systems.com/pdf/brochure_870_small.pdf
- [6] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [7] Metoda konečných prvků - Wikipedie. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_konečných_prvků
- [8] KEE ZČU, Podklady pro měření částečných výbojů k předmětu KEE/TVN.
- [9] KEE ZČU, Podklady pro měření korony k předmětu KEE/TVN

8. Seznam obrázků

Obrázek 1 Typická elektrodová uspořádání pro vznik ČV [1].....	11
Obrázek 2 Trojkapacitní model [1]	12
Obrázek 3 Časové průběhy napětí a proudů vnitřních částečných výbojů [1].....	12
Obrázek 4 Typická uspořádání vnějších výbojů [1].....	13
Obrázek 5 Schéma zapojení	16
Obrázek 6 Elektrodový systém.....	18
Obrázek 7 Klouzavé uspořádání.....	19
Obrázek 8 Výkres vzorku s trafopapírem.....	20
Obrázek 9 Vzorek s trafo papírem.....	20
Obrázek 10 Rozložení E na ELD systému	48
Obrázek 11 Rozložení E na vzorku s dutinou	48
Obrázek 12 Rozložení E na vzorku bez dutiny	48

9. Seznam tabulek

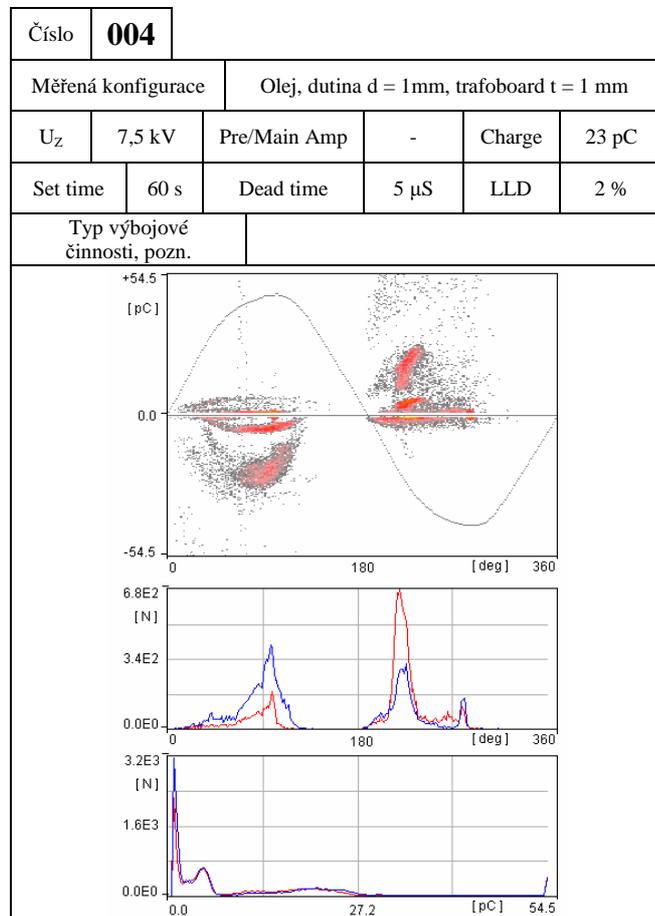
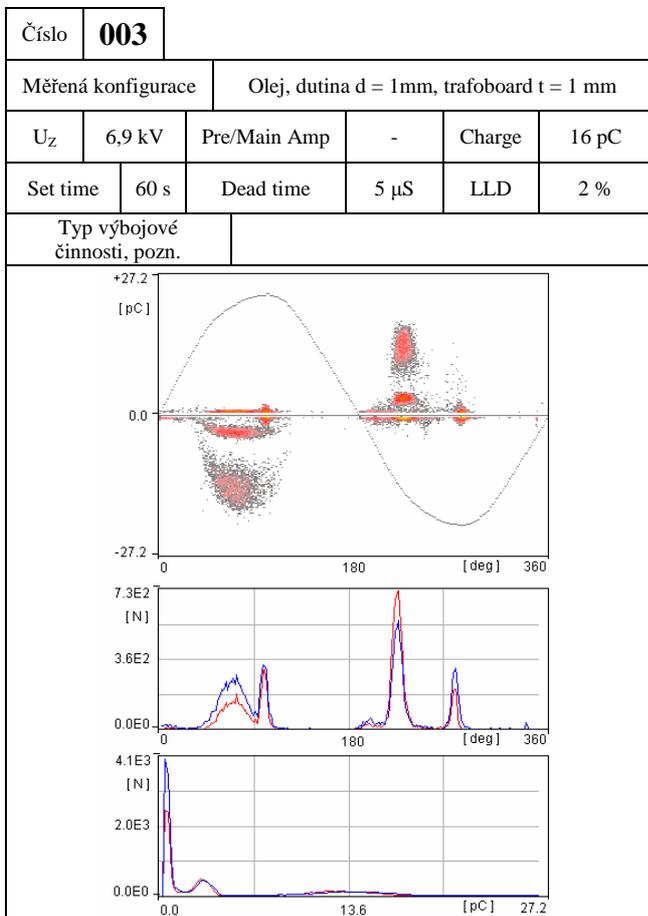
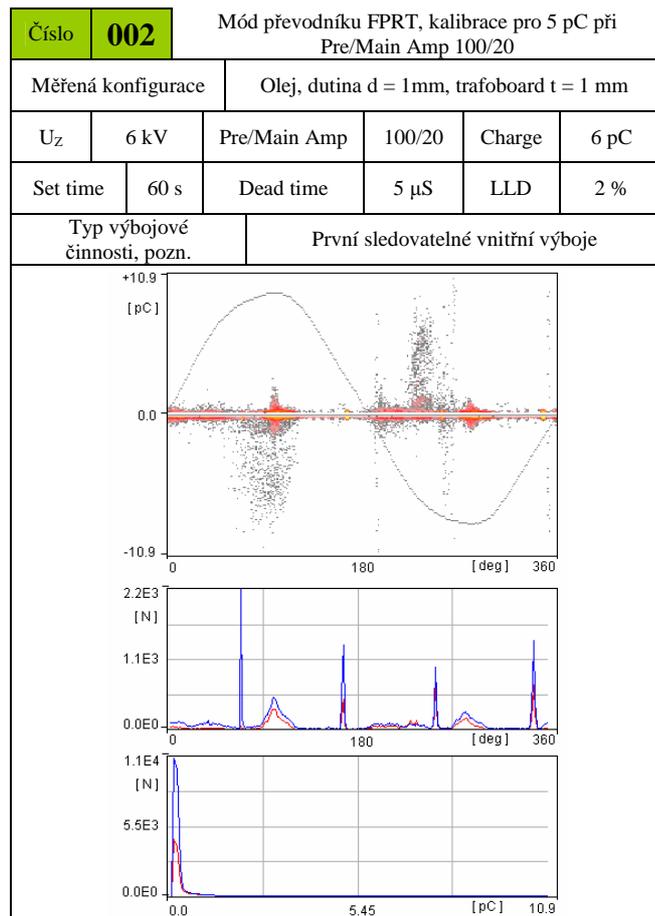
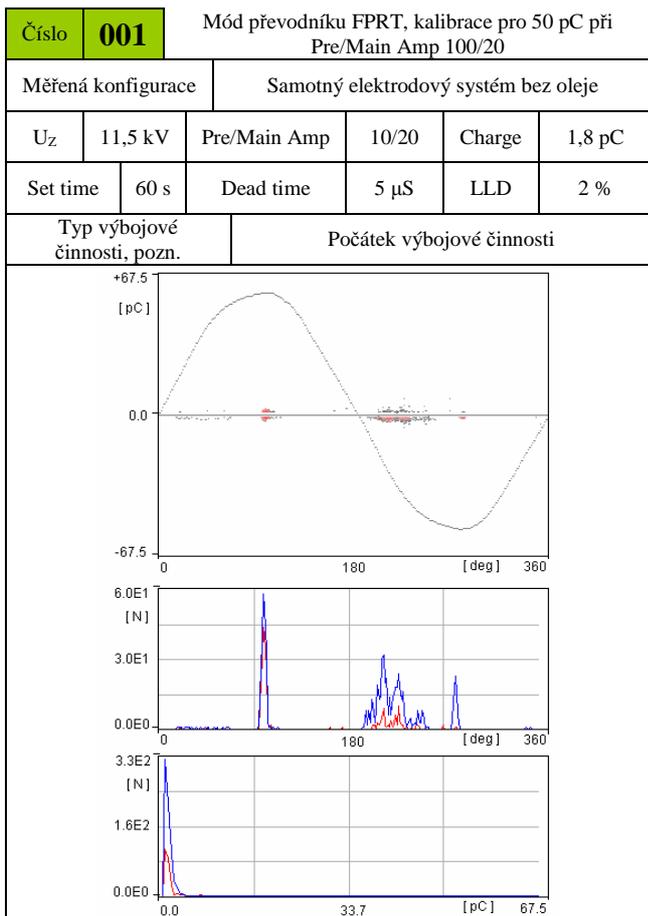
Tabulka 1 Typické obrazce částečných výbojů (převzato z [1]).....	15
Tabulka 2 Chronologické pořadí měřených vzorků	21
Tabulka 3 Měření na elektrodovém systému bez vzorků.....	28
Tabulka 4 Porovnání měření 3 vs. 5	29
Tabulka 5 Porovnání měření 5 vs. 6.....	30
Tabulka 6 Porovnání měření 65	31
Tabulka 7 Porovnání měření 13 vs. 25	32
Tabulka 8 Měření vzorků s trafoboardem	33
Tabulka 9 Porovnávání měření 7 vs. 4	33
Tabulka 10 Porovnávání měření 7 vs. 8	34

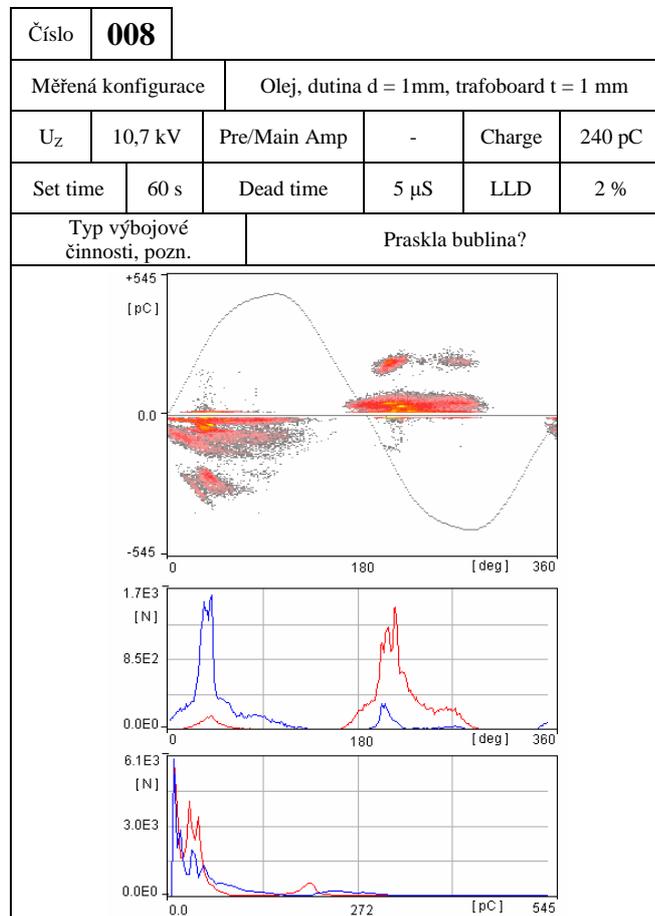
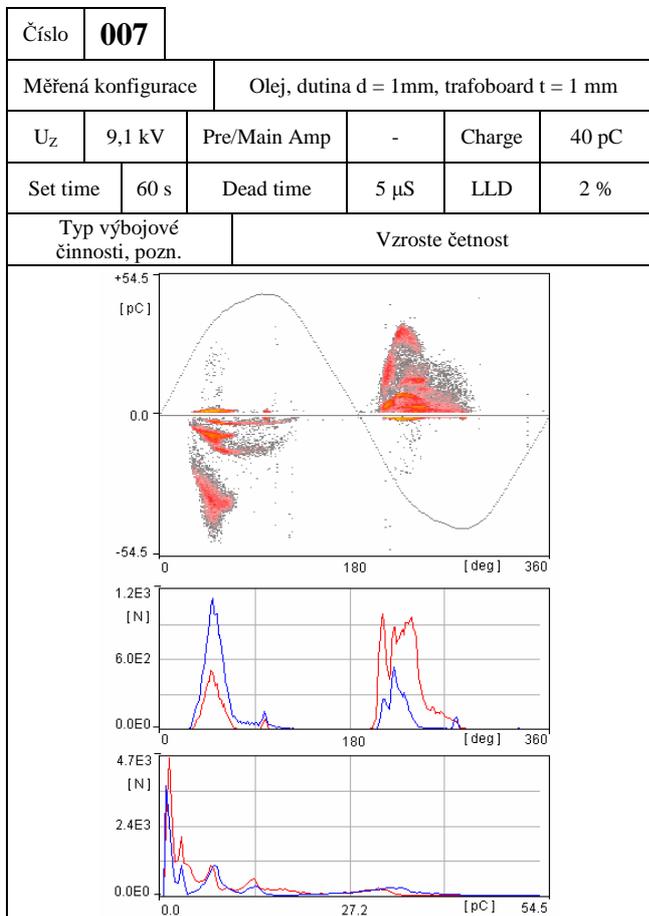
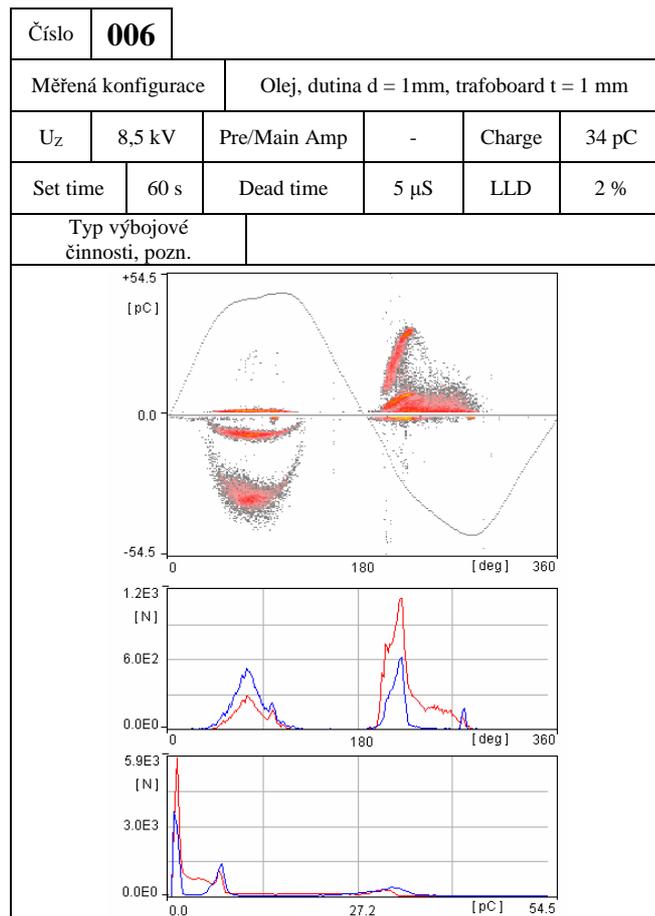
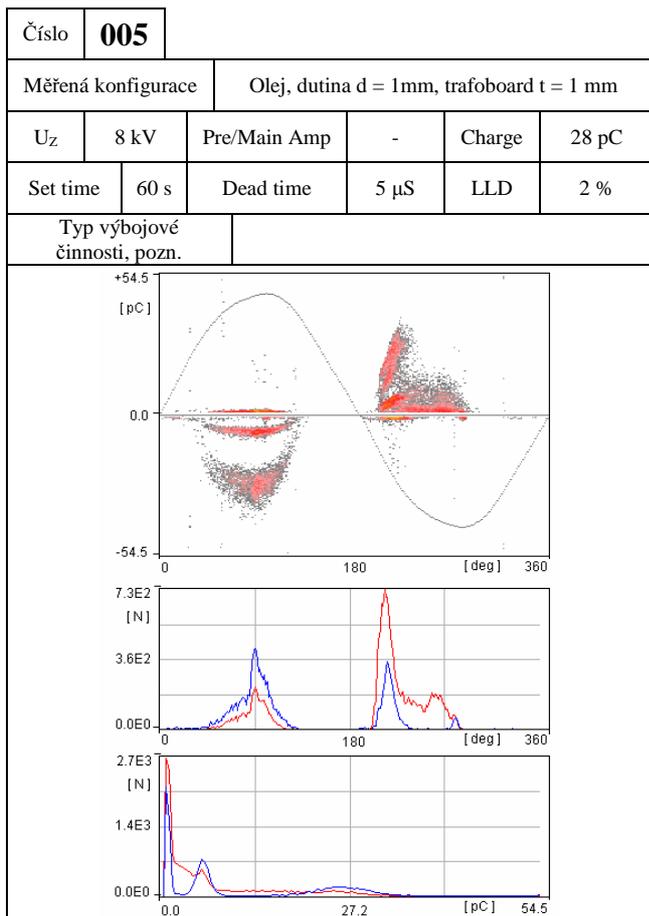
Tabulka 11 Porovnávání měření 11 vs. 18	35
Tabulka 12 Měření vzorků s kuprextitem	36
Tabulka 13 Porovnání měření 10 vs. 9	36
Tabulka 14 Porovnání měření 10 vs. 14	37
Tabulka 15 Porovnání měření 12 vs. 14	38
Tabulka 16 Měření vzorků s transformátorovým papírem	39
Tabulka 17 Porovnání měření 15 vs. 22	39
Tabulka 18 Porovnání měření 20 vs. 22	40
Tabulka 19 Porovnání měření 19 vs. 21	42
Tabulka 20 Měření vzorku klouzavého uspořádání	43
Tabulka 21 Měření na keramické průchodce	43
Tabulka 22 Záznamy z měření 1 a 2	44
Tabulka 23 Porovnání měření 16 a 17 – nižší napětí	45
Tabulka 24 Porovnání měření 16 a 17 – vyšší napětí	46
Tabulka 25 Měření vzorku plexiskel s dutinami	46
Tabulka 26 Výsledky měření 23 a 24	47

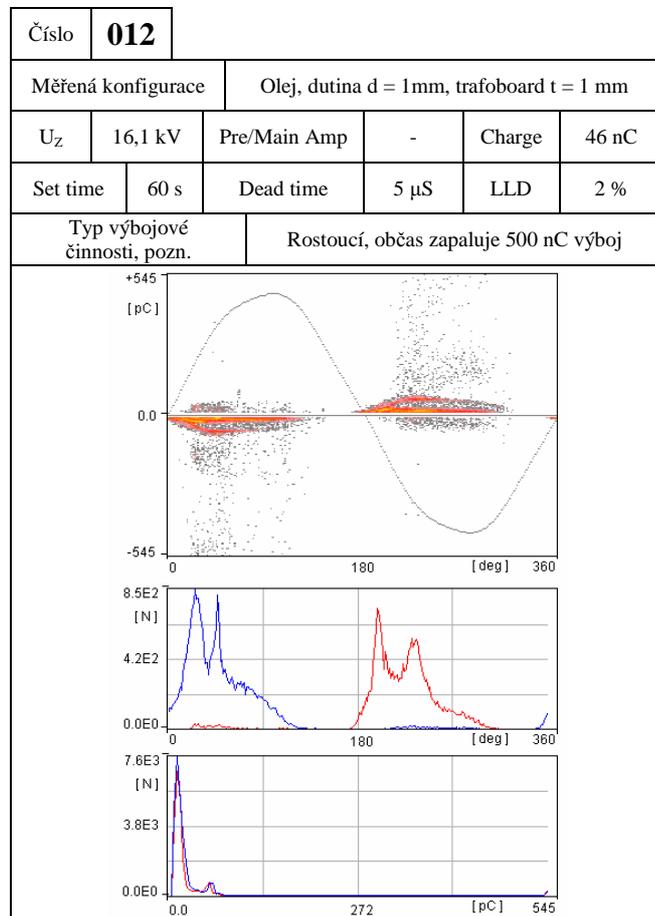
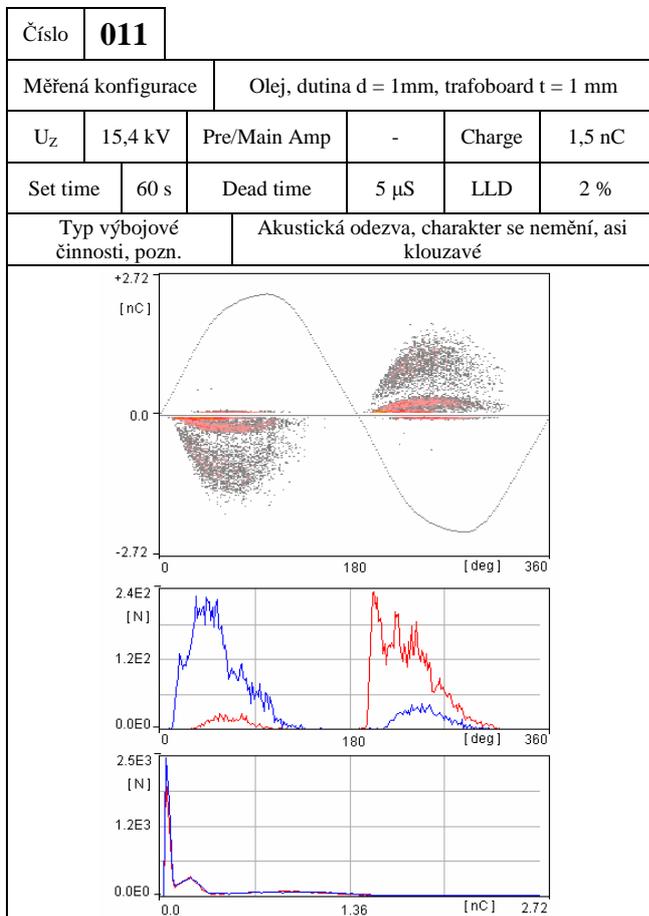
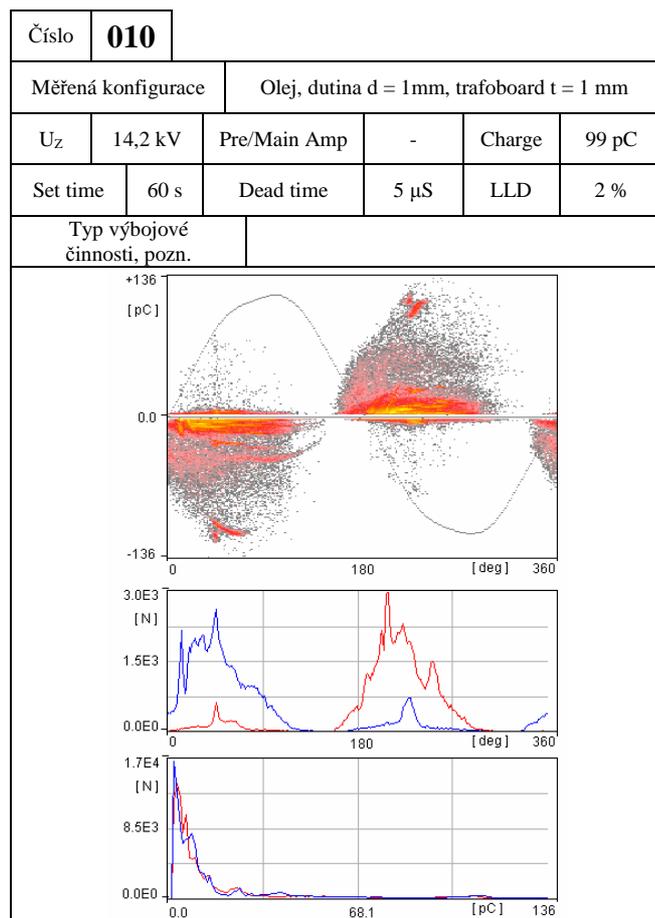
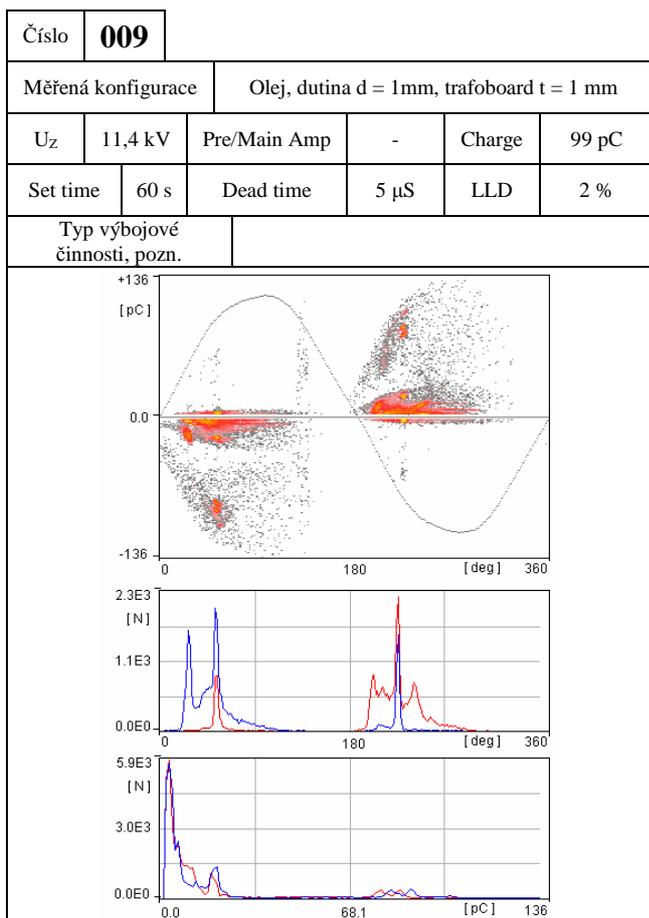
10. Seznam příloh

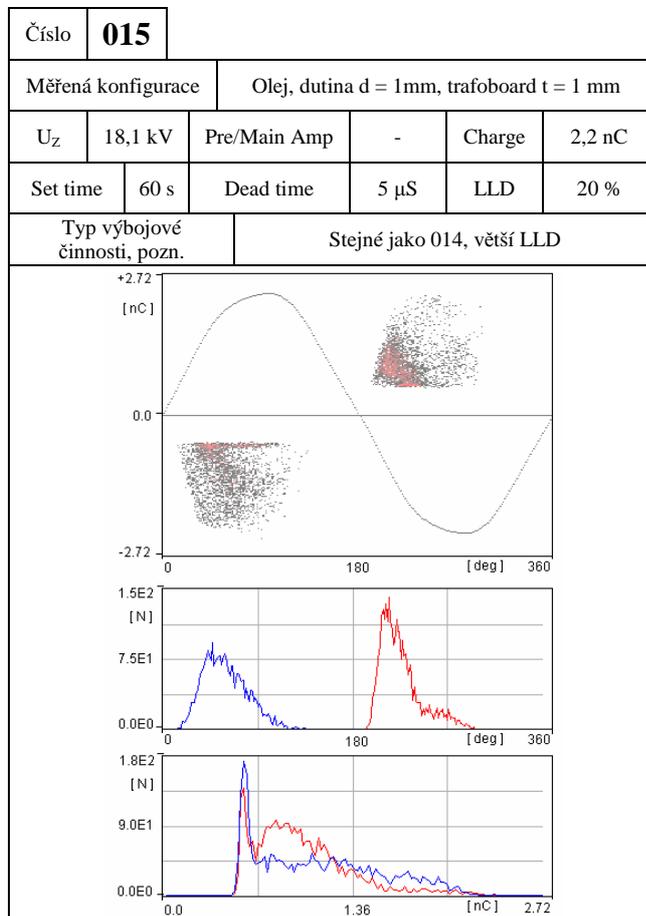
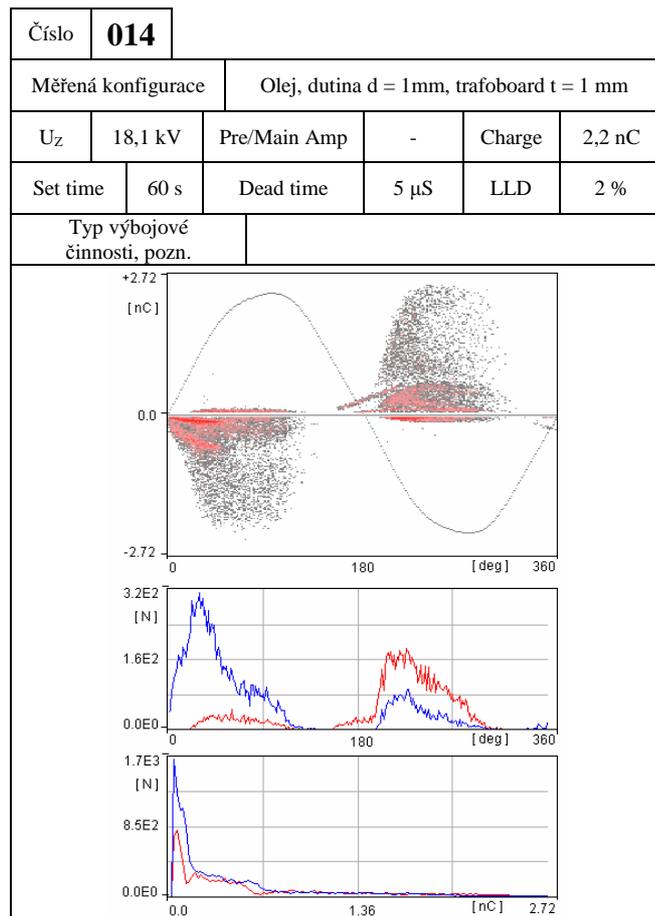
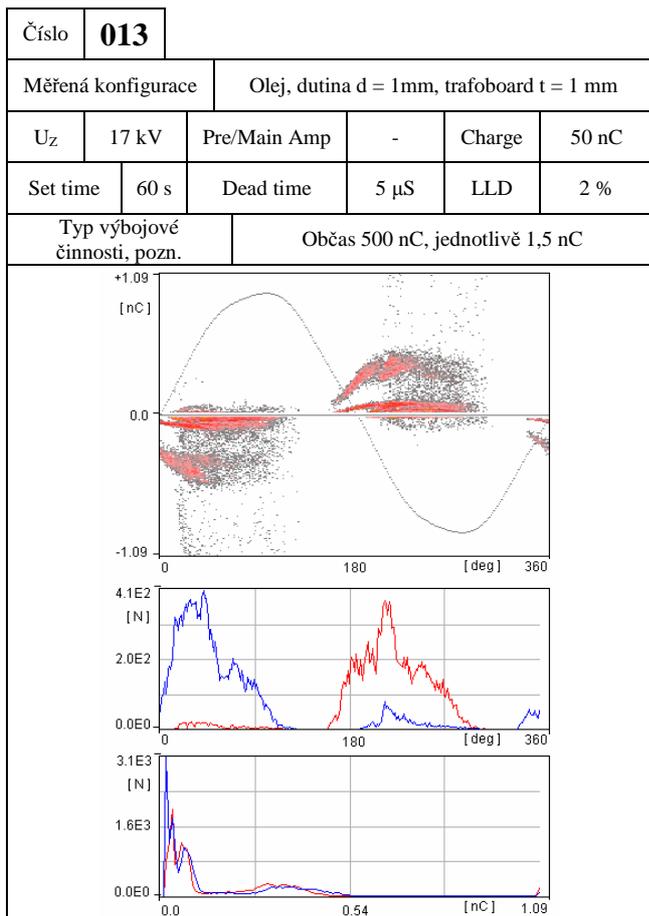
Číslo záznamu	Popis měřeného vzorku	
001	Samotný elektrodový systém bez oleje.....	1
002	Olej, dutina $d = 1\text{ mm}$, trafoboard $t = 1\text{ mm}$	1
019	Olej, bez dutiny, bez vzorku, zkouška elektrodového systému	5
026	Elektrodový systém v oleji, staniol z + pryč, Cu fólie na -.....	7
028	Olej, bez dutiny, trafoboard $t = 1\text{ mm}$	8
036	Olej, bez dutiny, trafoboard $t = 1\text{ mm}$, týden namočeno v oleji.....	10
042	Olej, kuprextit, dutina $d = 2,5\text{ mm}$	12
050	Olej, kuprextit, dutina $d = 2,5\text{ mm}$, připojeno přes druhou vazební kapacitu	14
052	Olej, dutina $d = 2,5\text{ mm}$, trafoboard $t = 2\text{ mm}$, připojeno přes druhou vazební kapacitu	15
058	Olej, kuprextit bez otvoru, připojeno přes druhou vazební kapacitu.....	17
065	Kontrola obvodu na klouzavé výboje/korunu – měřeno bez vzorku	19
066	Olej, kuprextit s dutinou $d = 2,5\text{ mm}$, připojeno přes druhou vazební kapacitu – 2.pokus	19
073	Olej, 3 vrstvy papíru, v každé otvor $d = 2\text{ mm}$, připojeno přes druhou vazební kapacitu....	21
078	Měření korony, přes první kapacitu, hrot VN	23
084	Měření korony, přes první kapacitu, hrot zem	25
088	Olej, dutina $d = 4\text{ mm}$, trafoboard $t = 2\text{ mm}$, připojeno přes druhou vazební kapacitu	26
096	Olej, tvrdý papír - přešpán, otvor $d = 2,5\text{ mm}$, připojeno přes druhou vazební kapacitu....	28
104	Olej, tenký papír bez otvoru, připojeno přes druhou vazební kapacitu	30
112	Olej, tvrdý papír - přešpán, bez otvoru, připojeno přes druhou vazební kapacitu	32
118	Olej, tenký papír 1 vrstva, otvor $2,5\text{ mm}$, připojeno přes druhou vazební kapacitu	34
127	Olej, plexisklo_1, připojeno přes druhou vazební kapacitu	37
131	Olej, plexisklo_2, připojeno přes druhou vazební kapacitu	38
136	Olej, elektrody bez vzorku - $d = 4,7\text{ mm}$, připojeno přes druhou vazební kapacitu	40
142	Klouzavé uspořádání – tyč s polovodivým nátěrem	42
154	Porcelánová průchodka	45

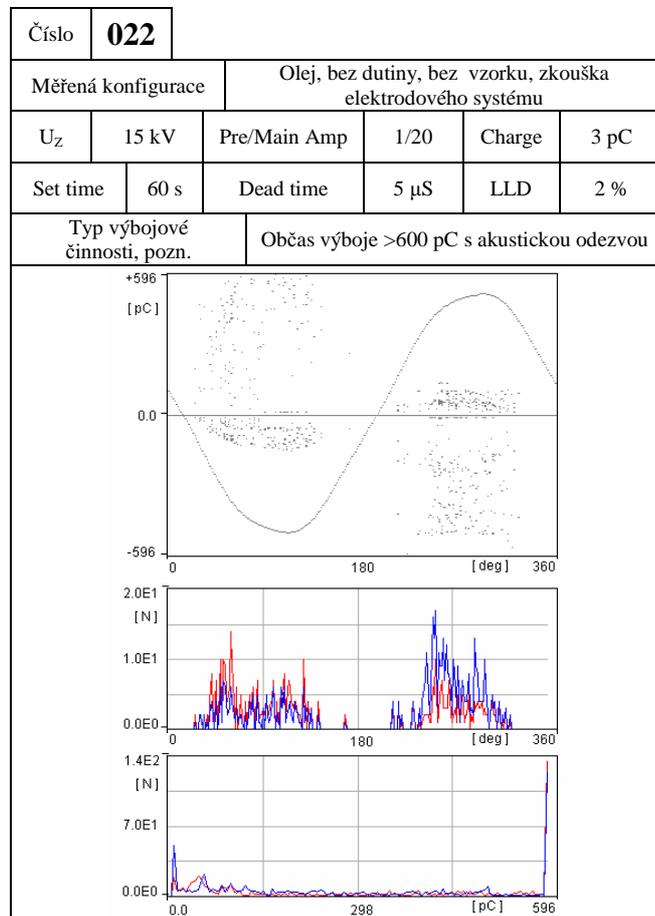
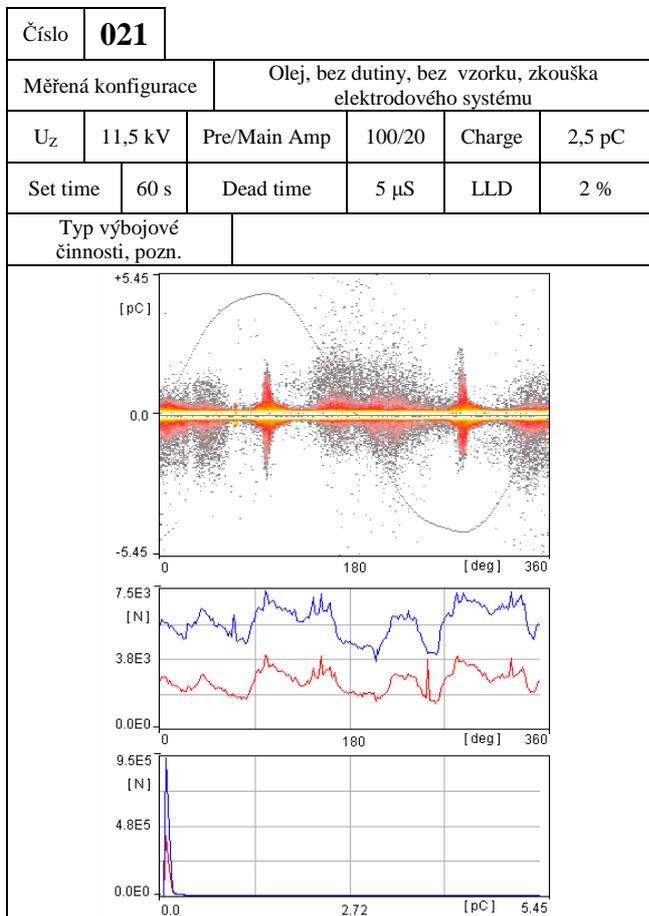
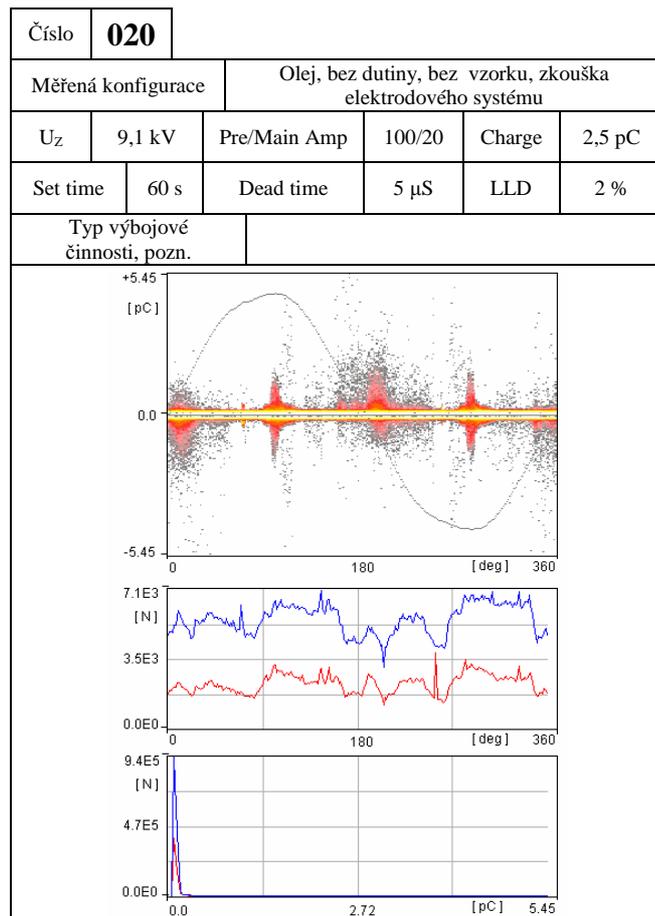
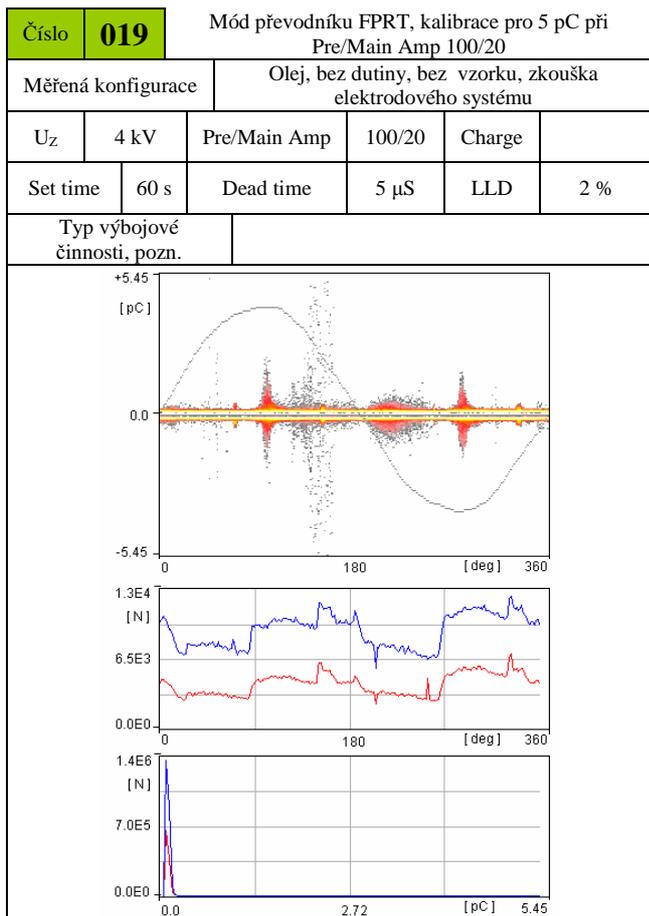
Příloha 1 Rozložení potenciálu na elektrodovém systému.....	48
Příloha 2 Detail rozložení intenzity elektrického pole na elektrodovém systému	48
Příloha 3 Rozložení potenciálu na elektrodovém systému.....	49
Příloha 4 Detail rozložení intenzity elektrického pole na elektrodovém systému	49
Příloha 5 Rozložení potenciálu na elektrodovém systému.....	50
Příloha 6 Detail rozložení intenzity elektrického pole na elektrodovém systému	50
Příloha 7 Pohled elektrodového systému	51

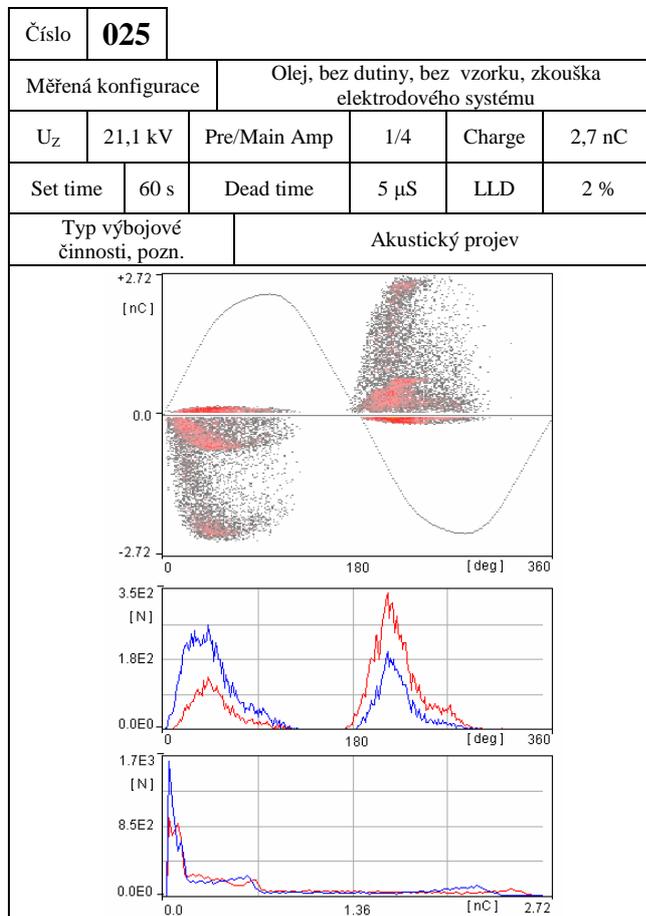
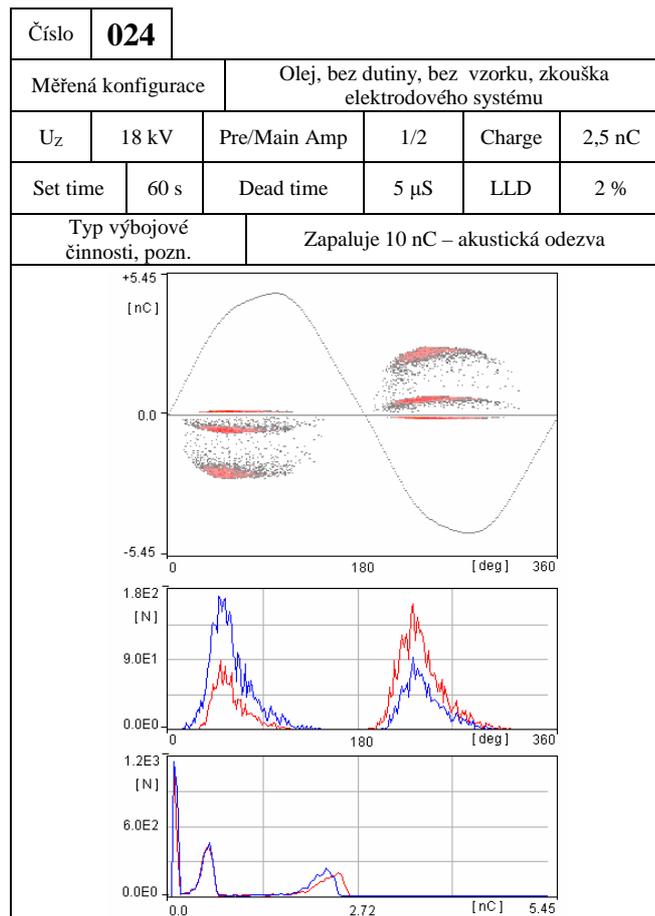
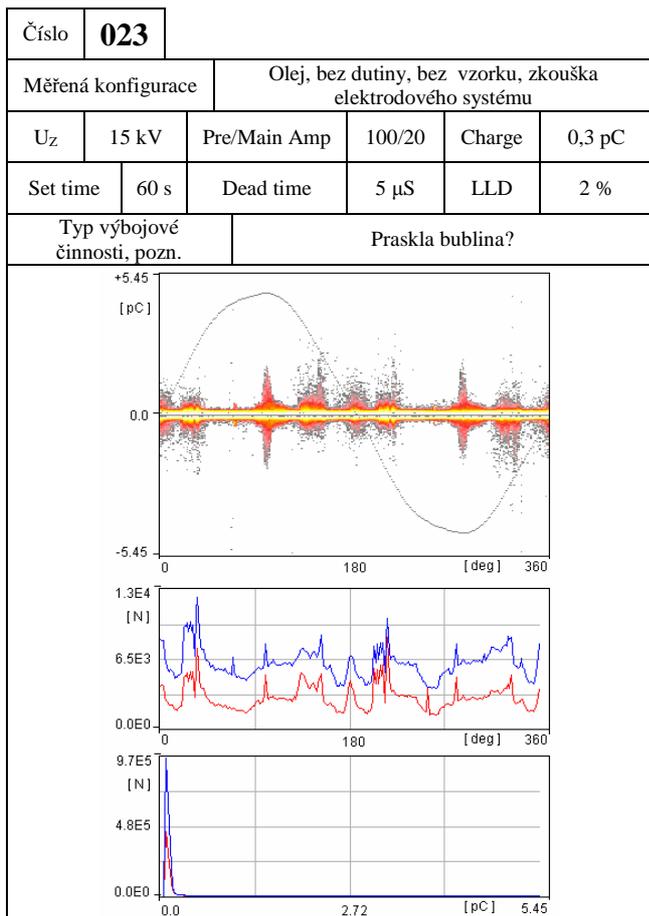


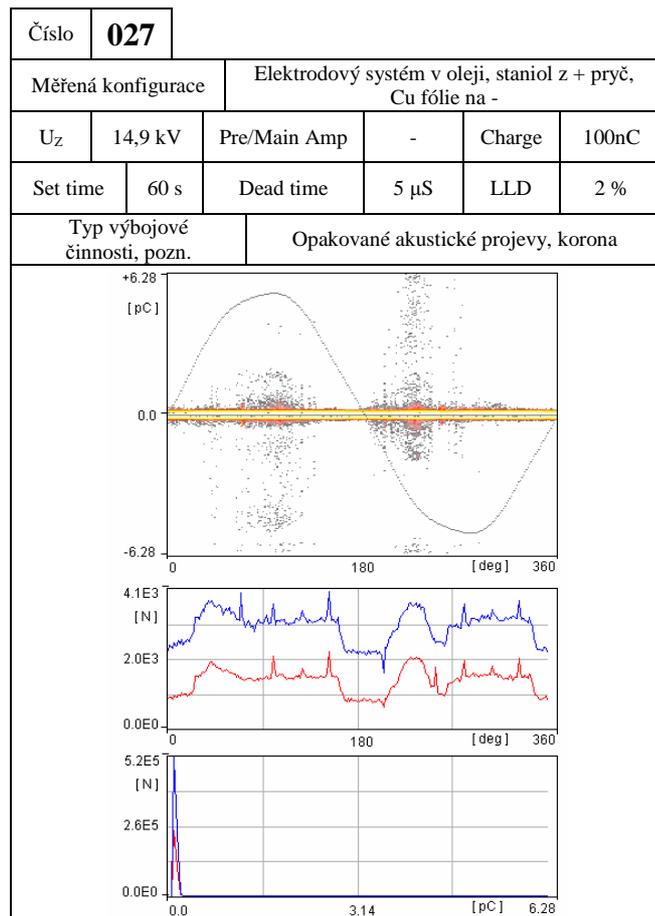
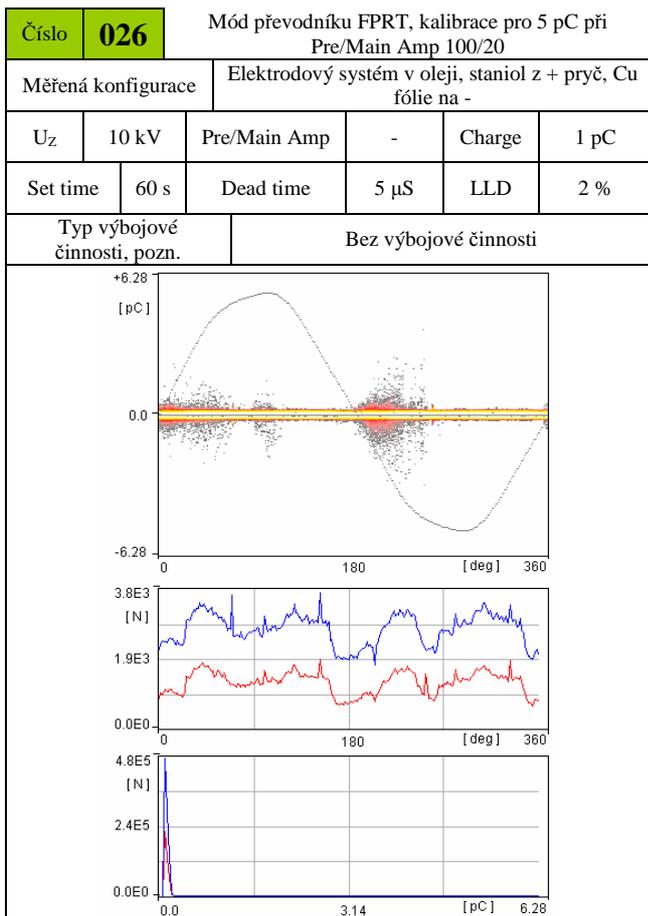


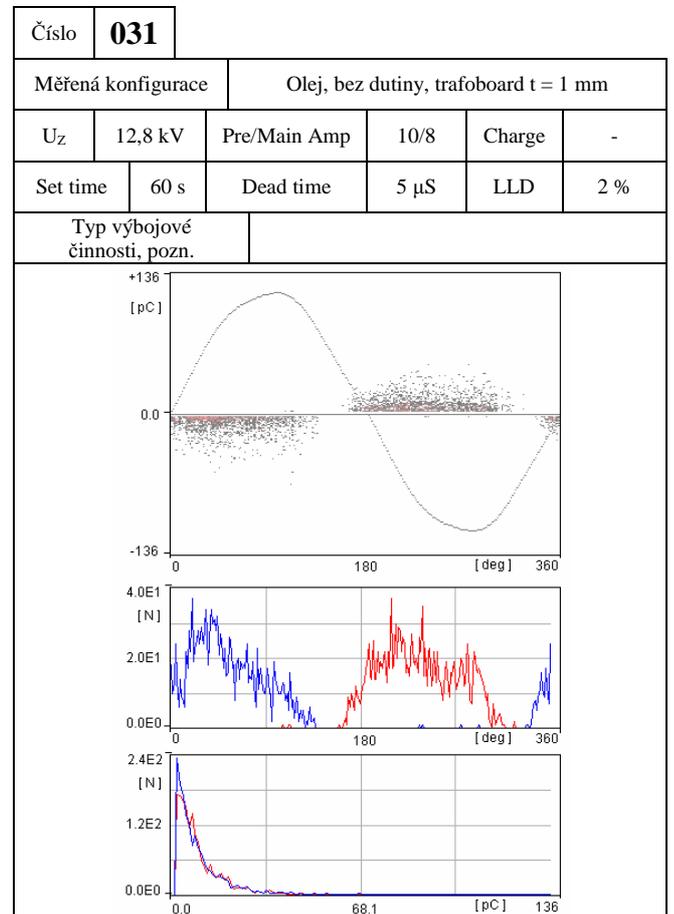
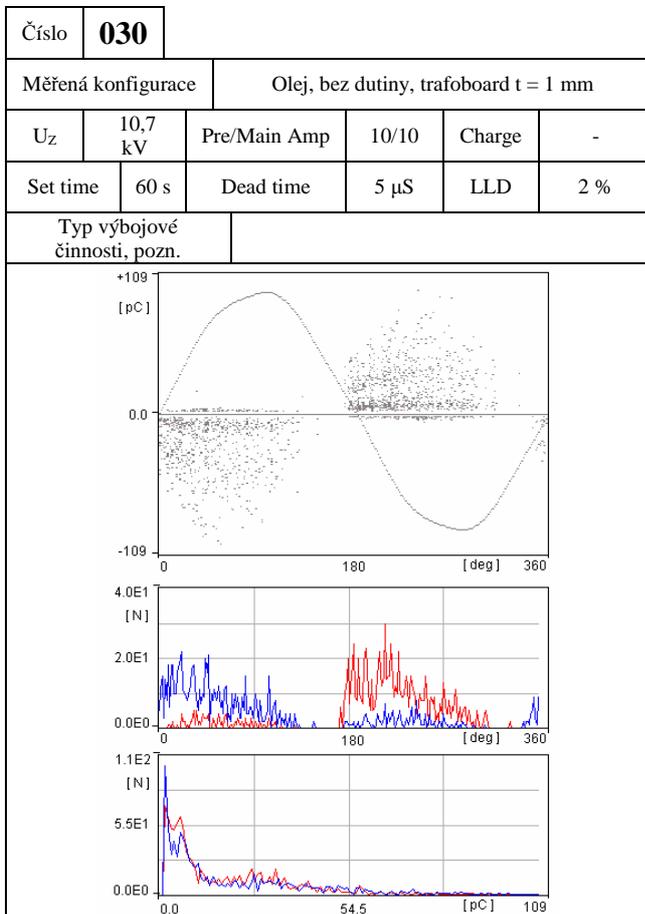
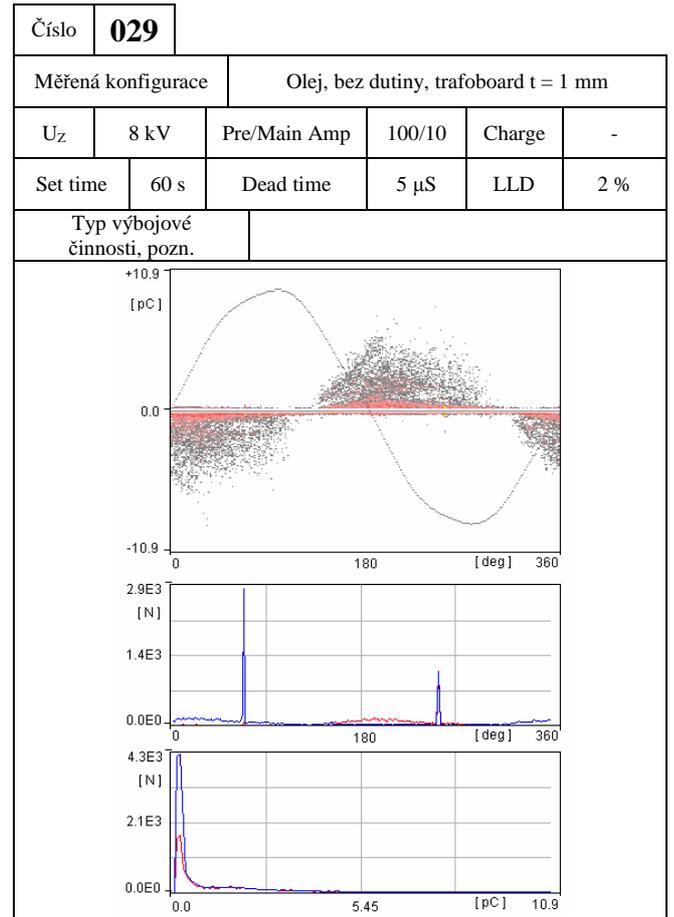
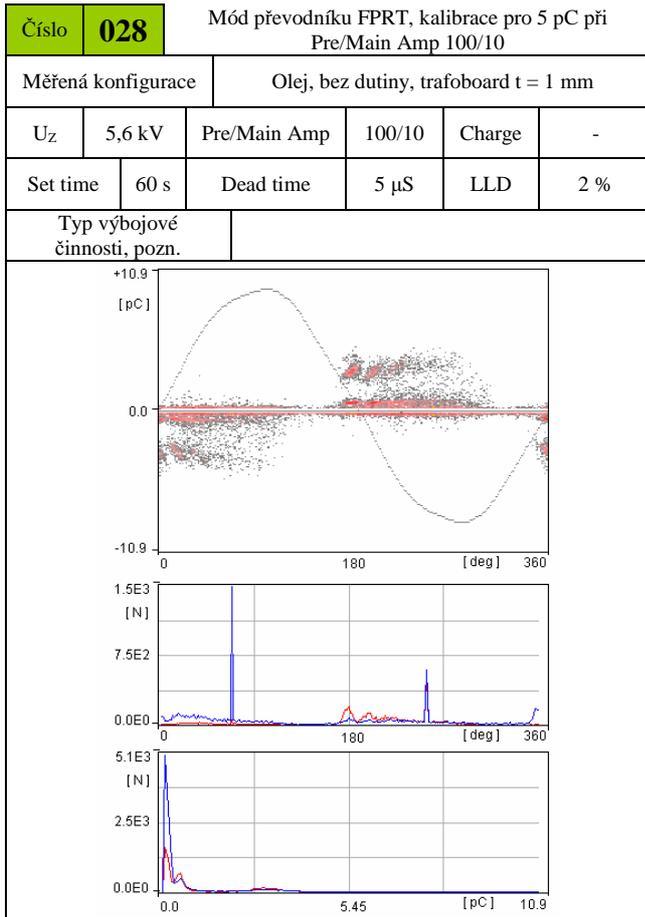


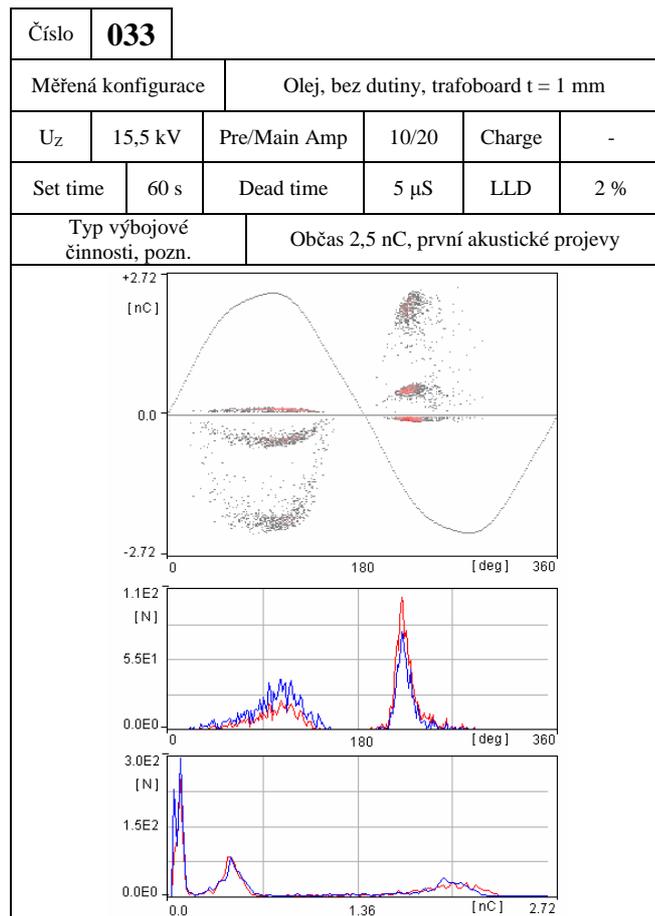
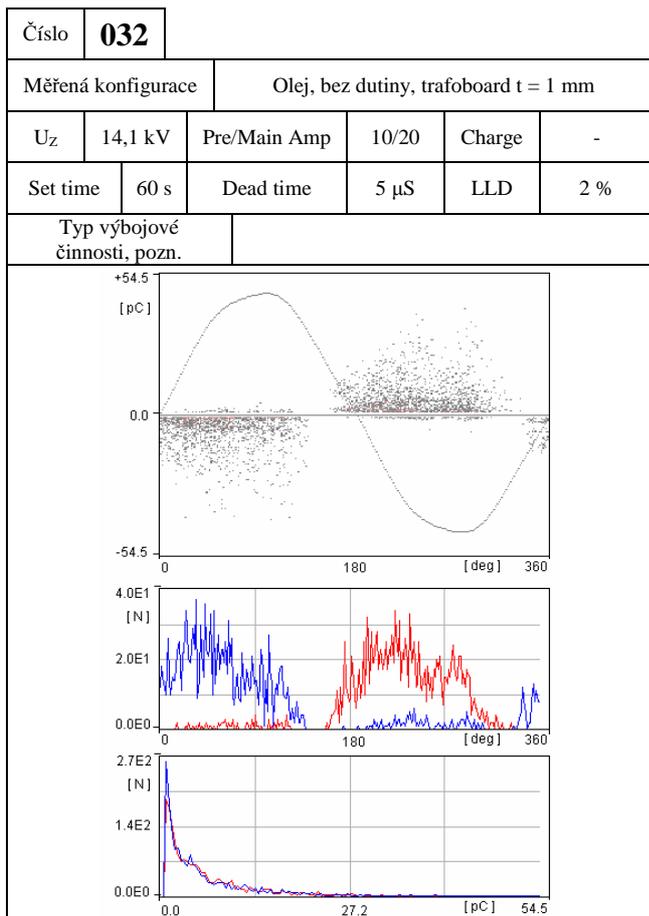


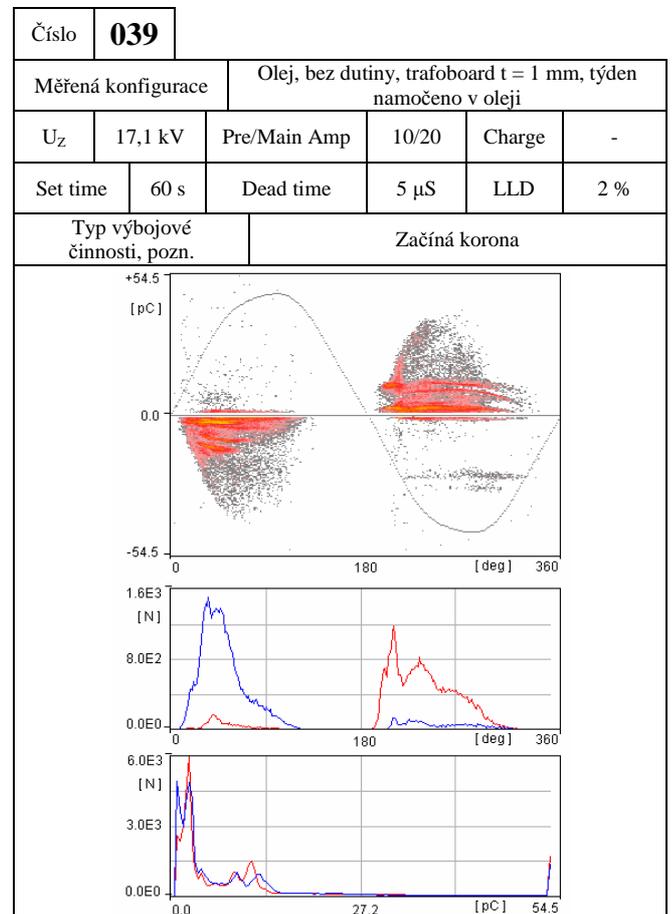
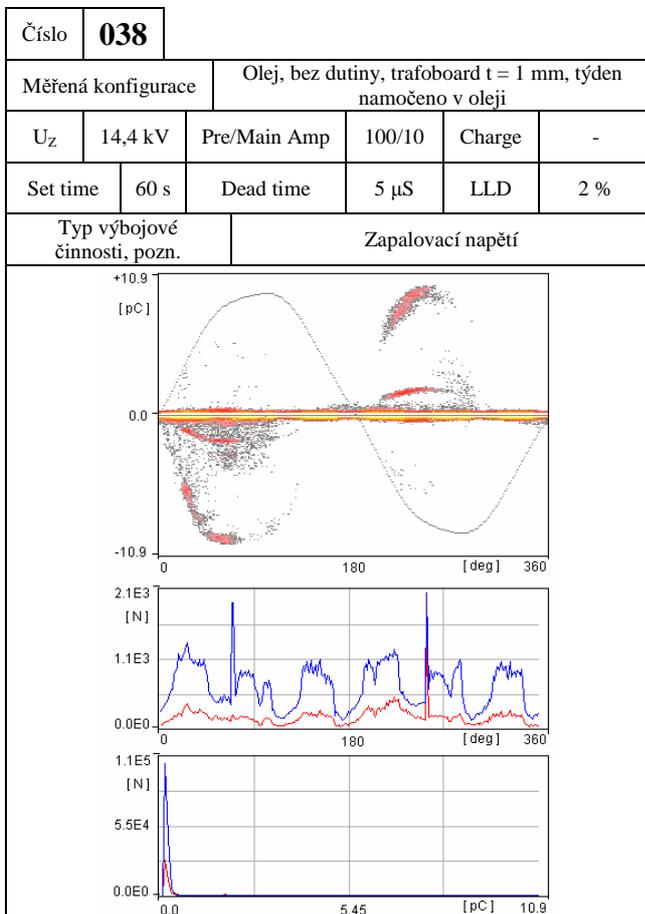
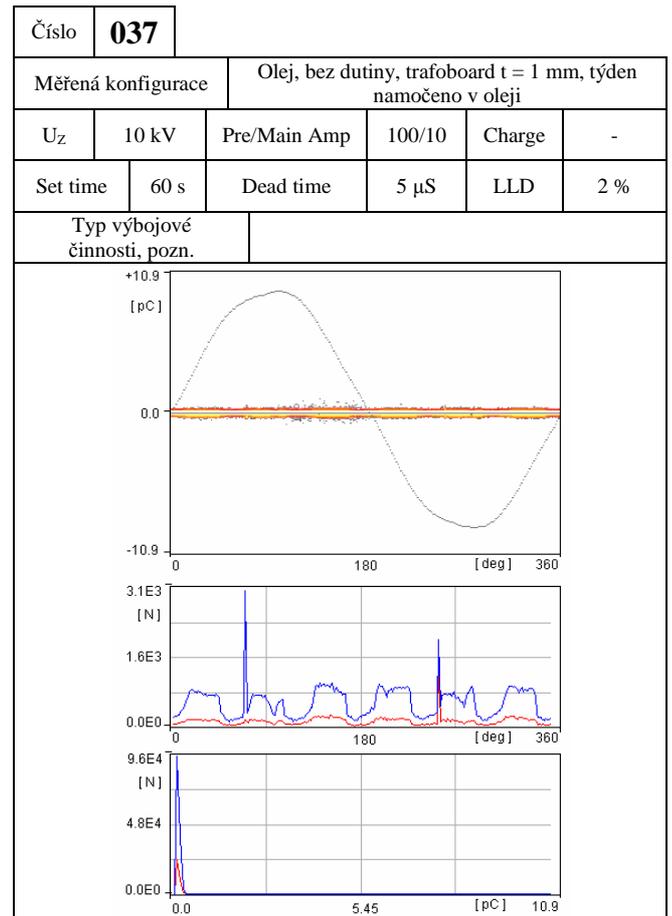
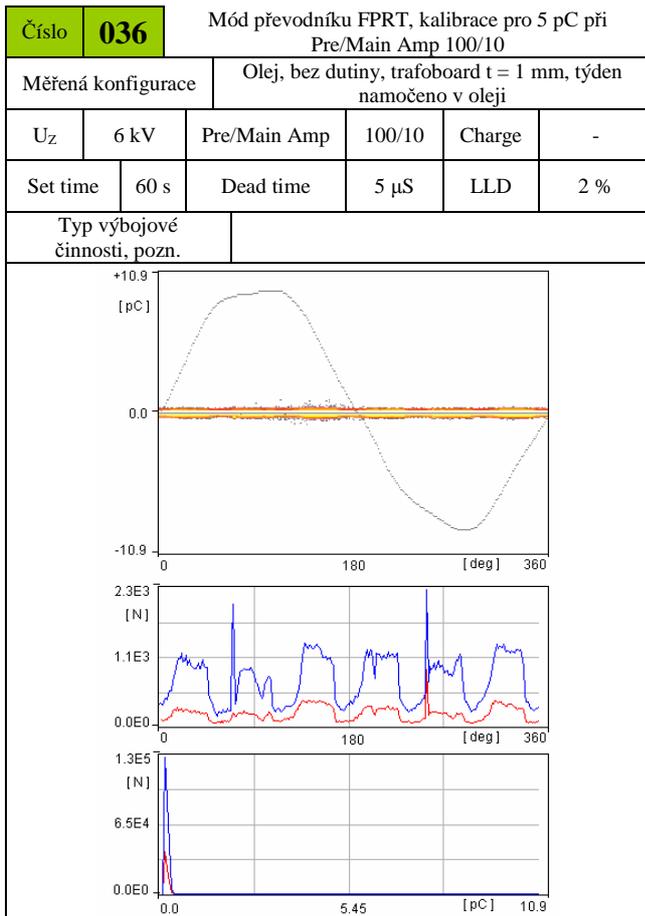


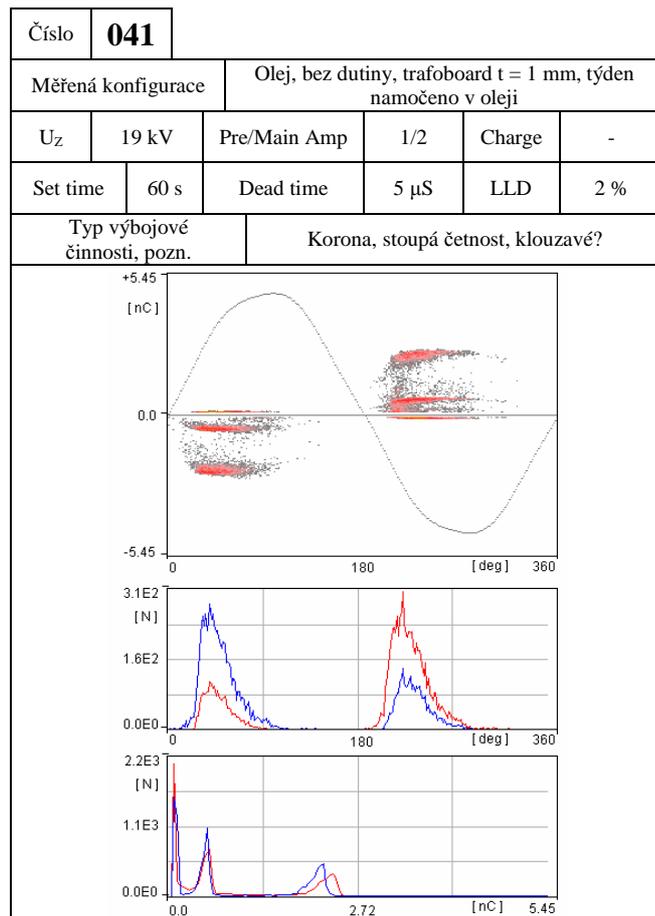
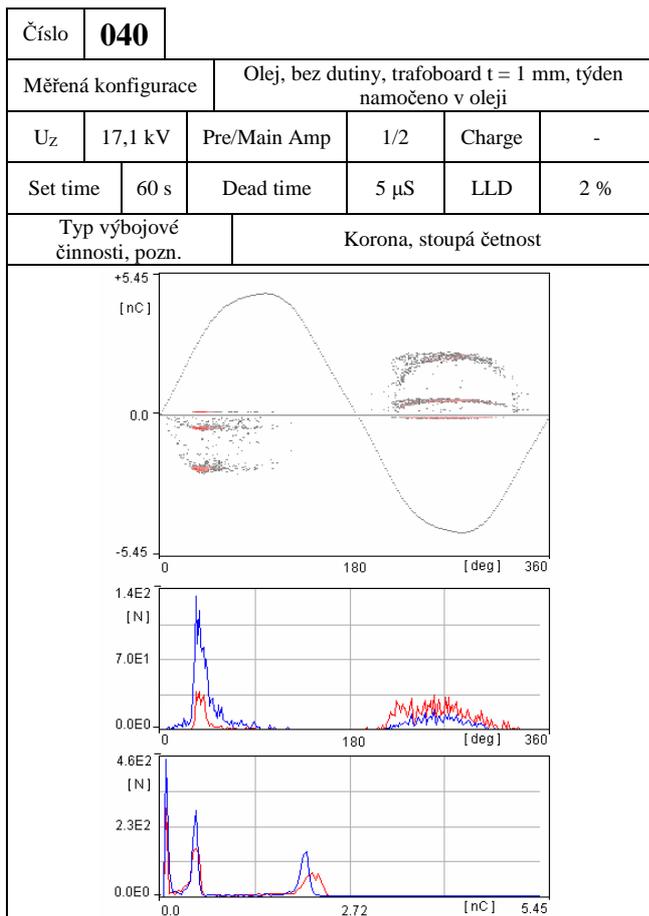


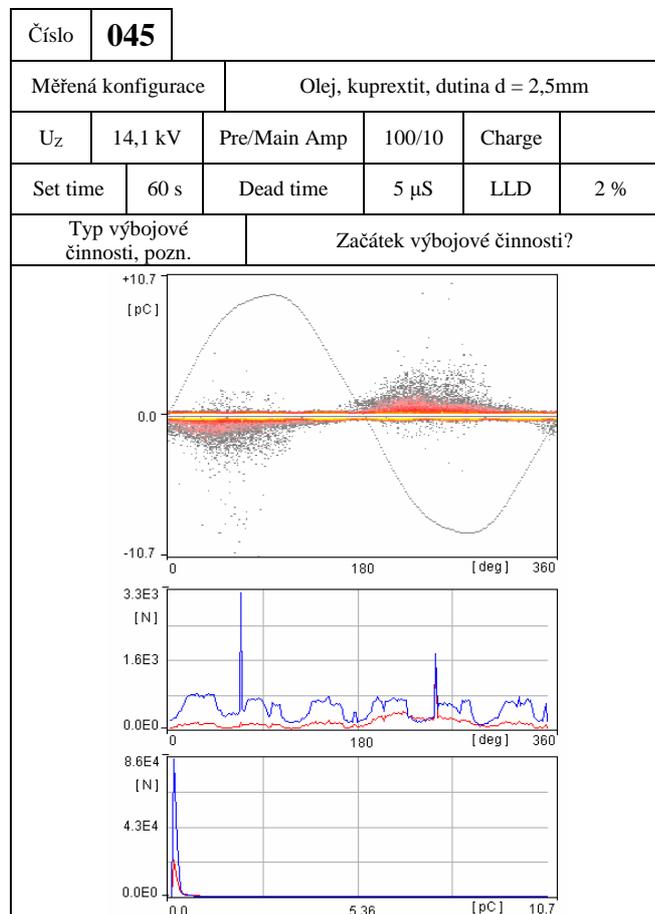
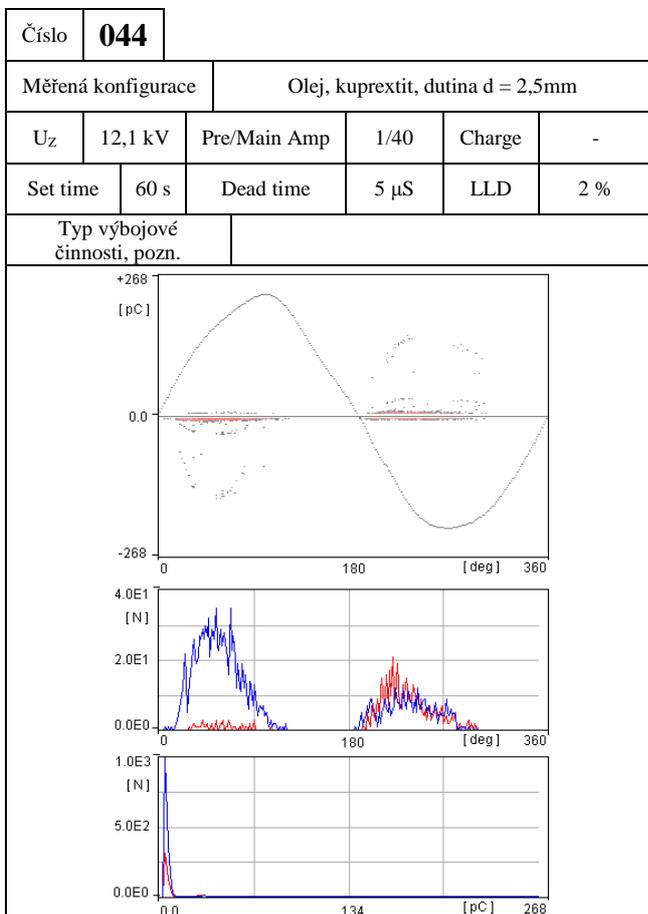
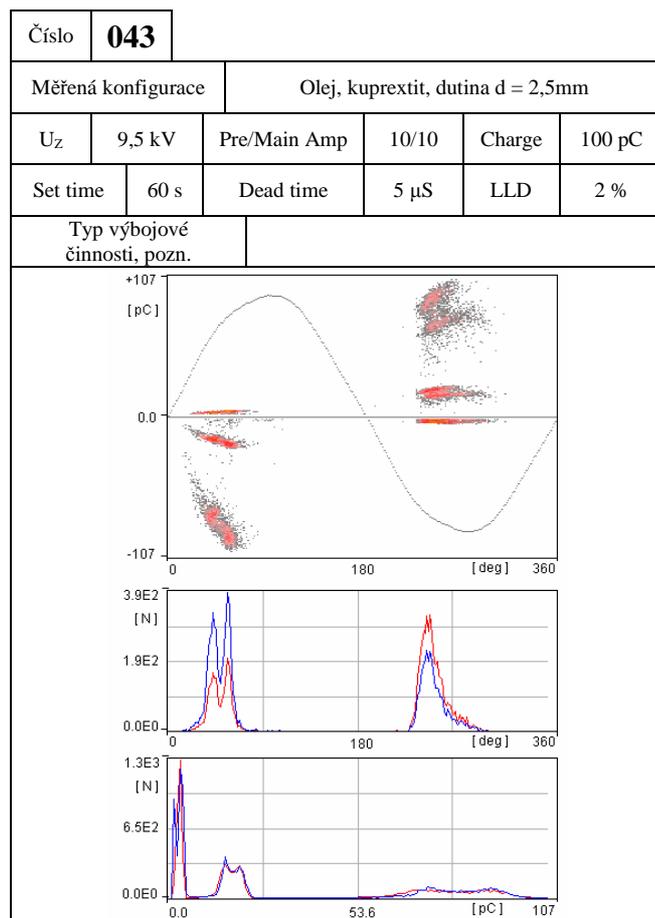
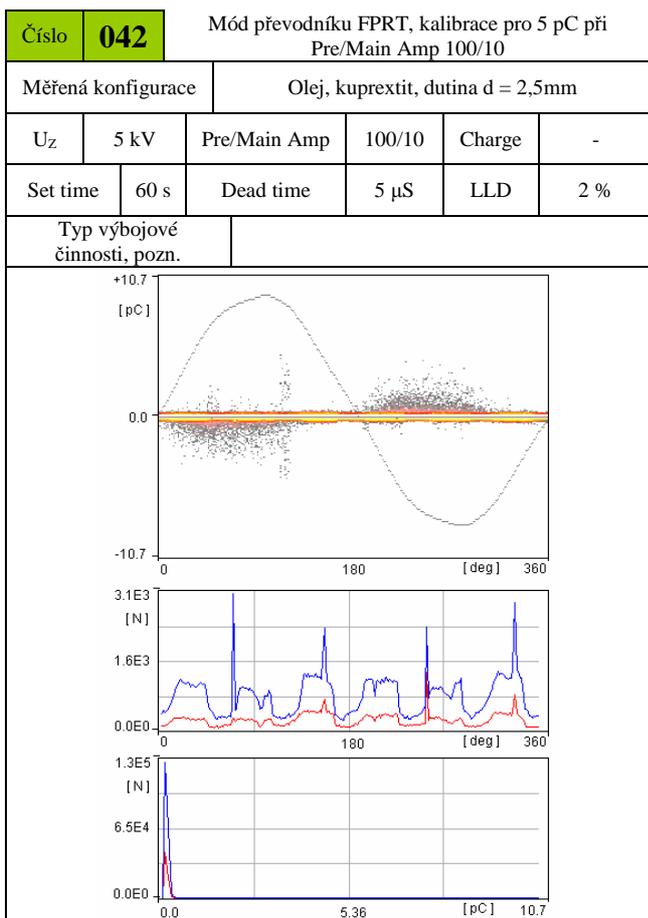


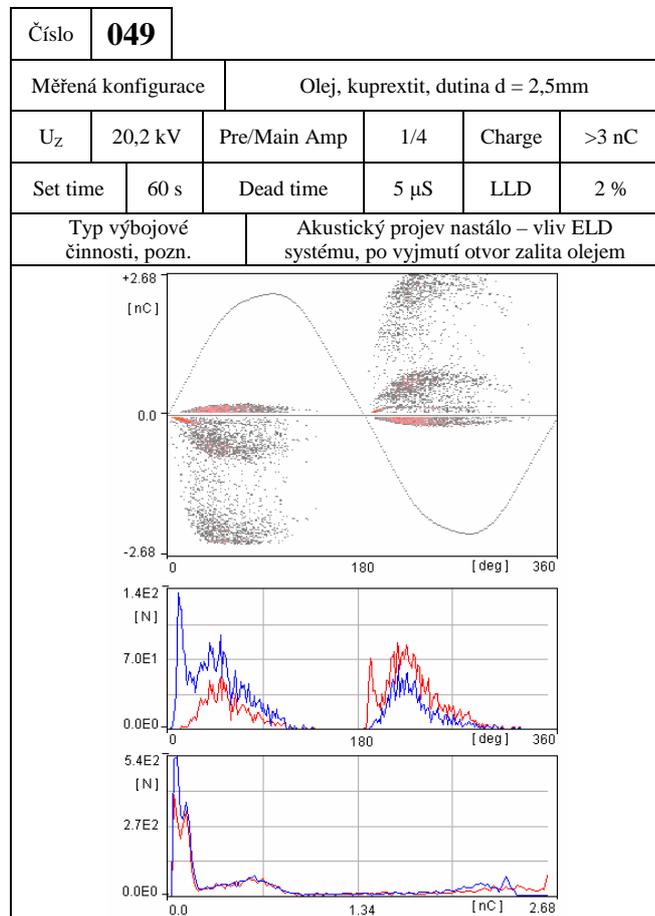
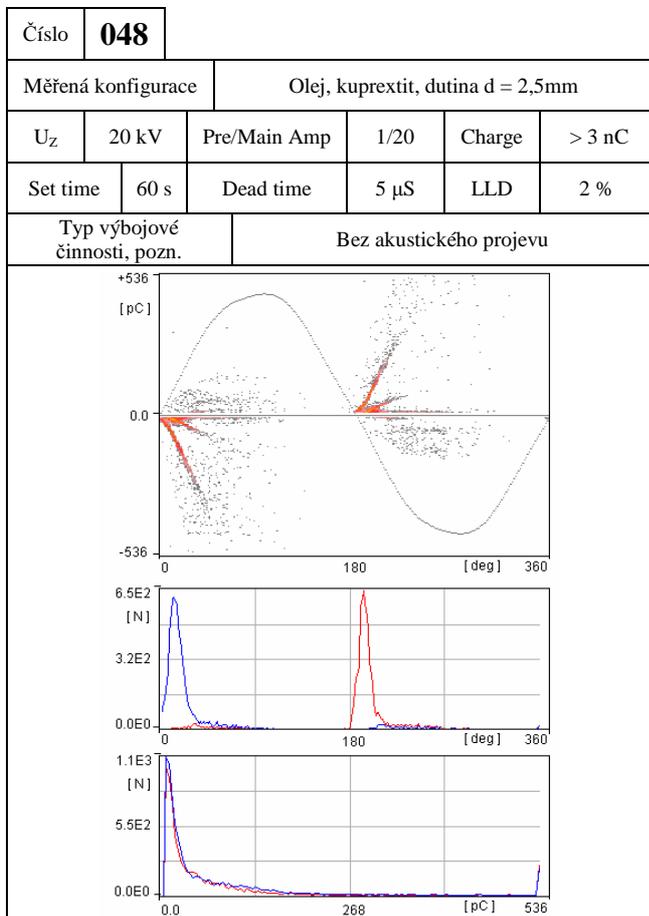
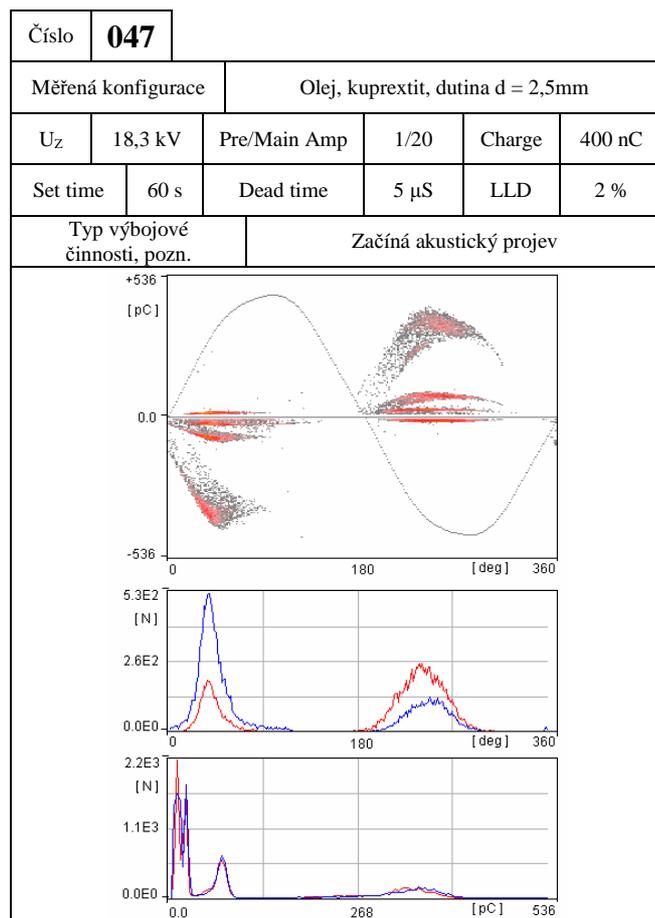
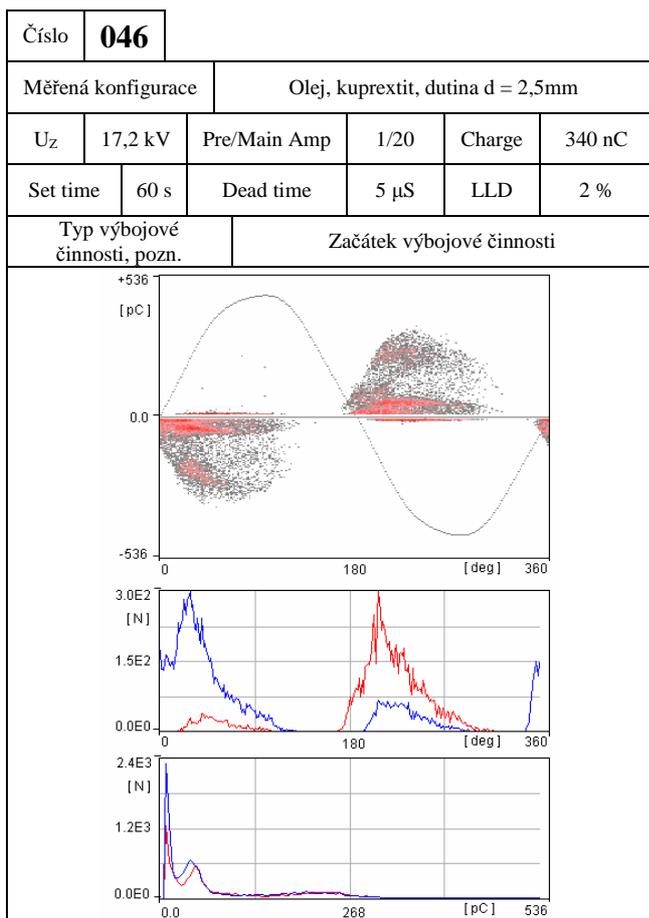


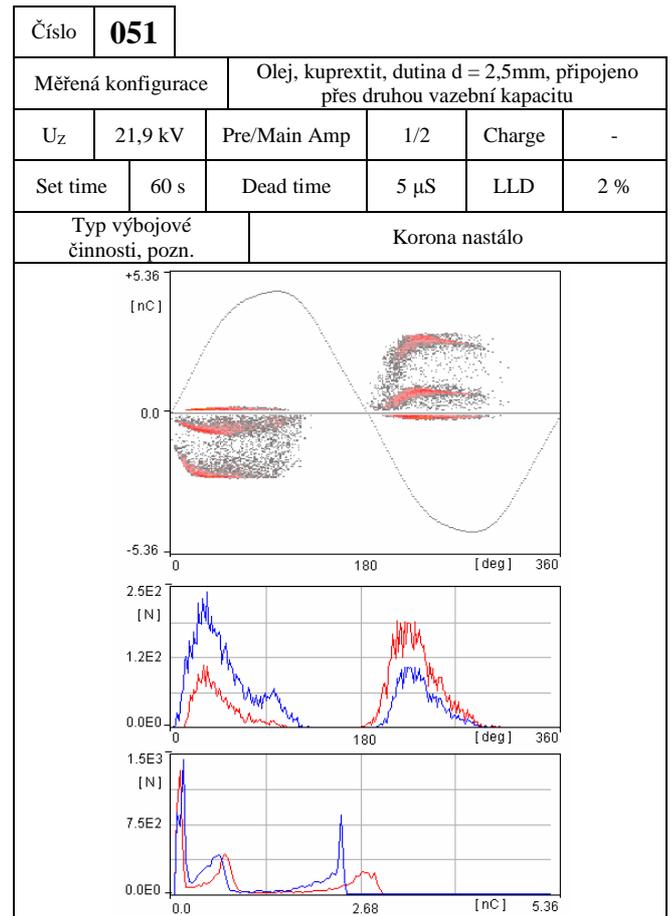
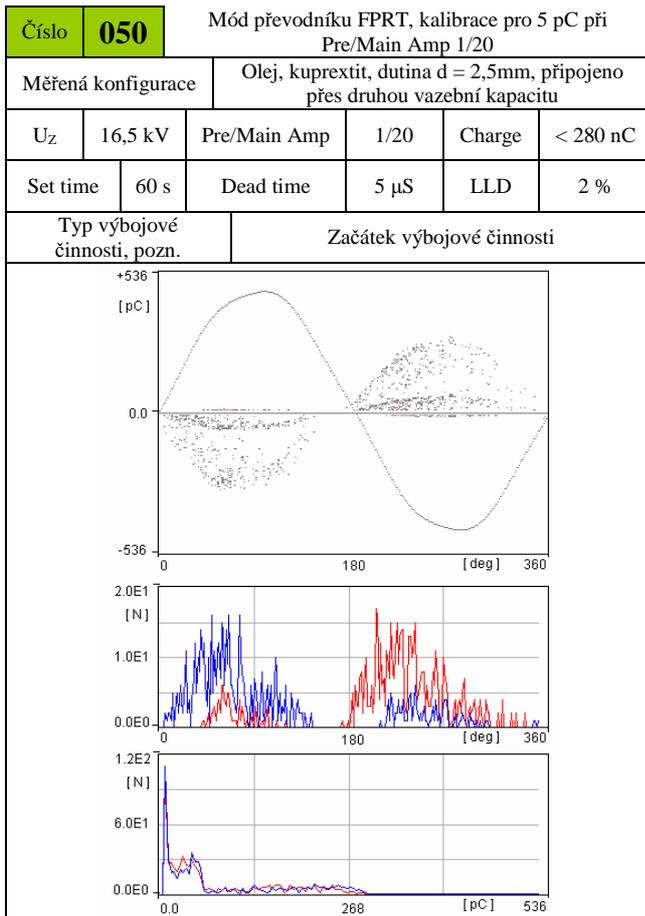


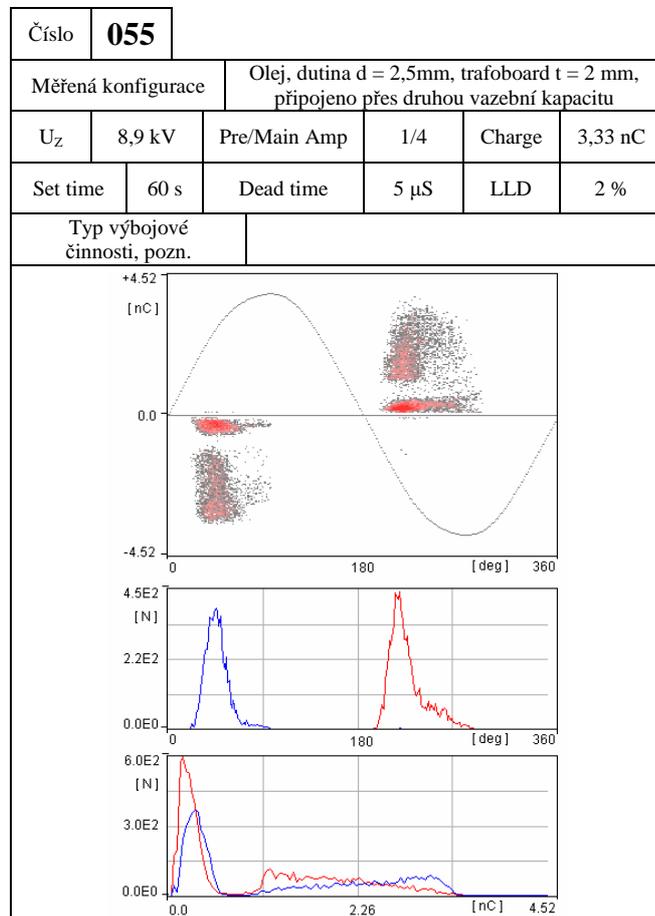
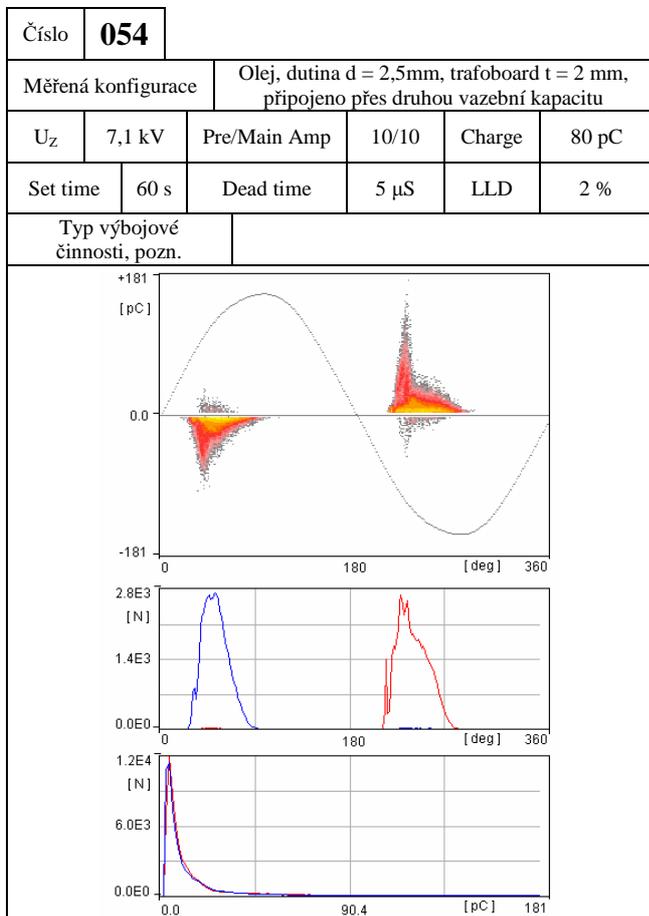
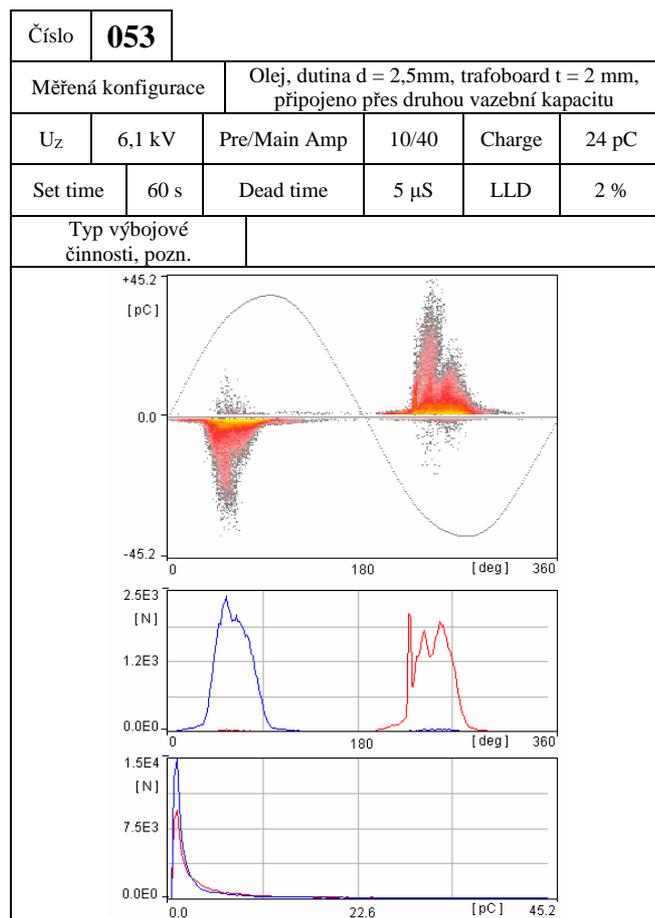
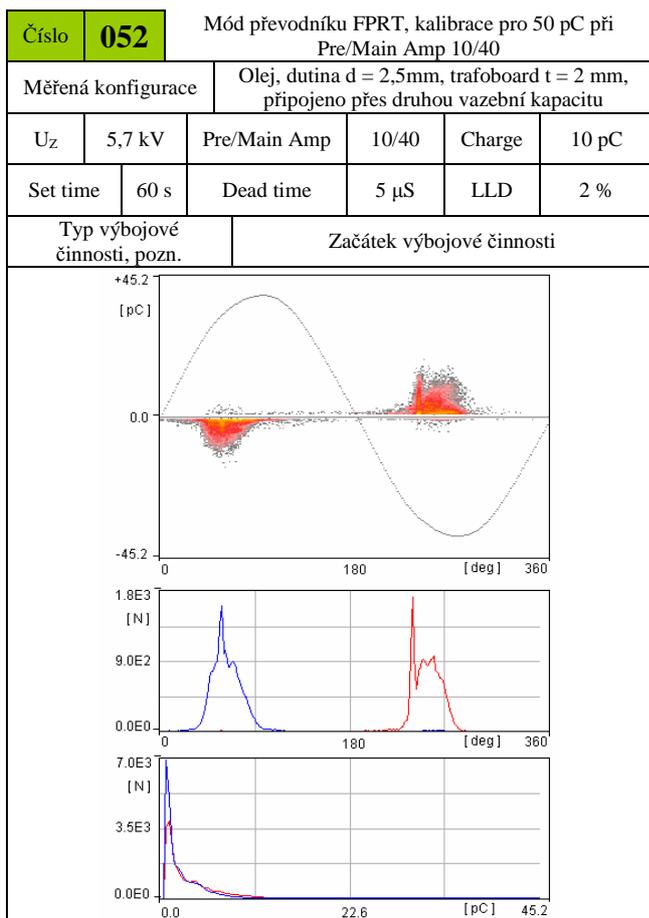


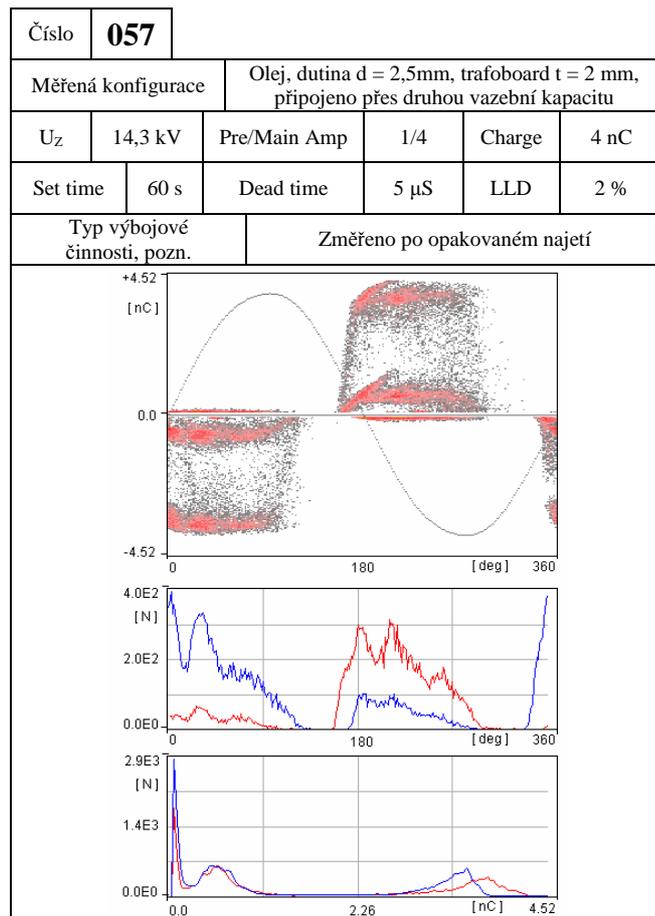
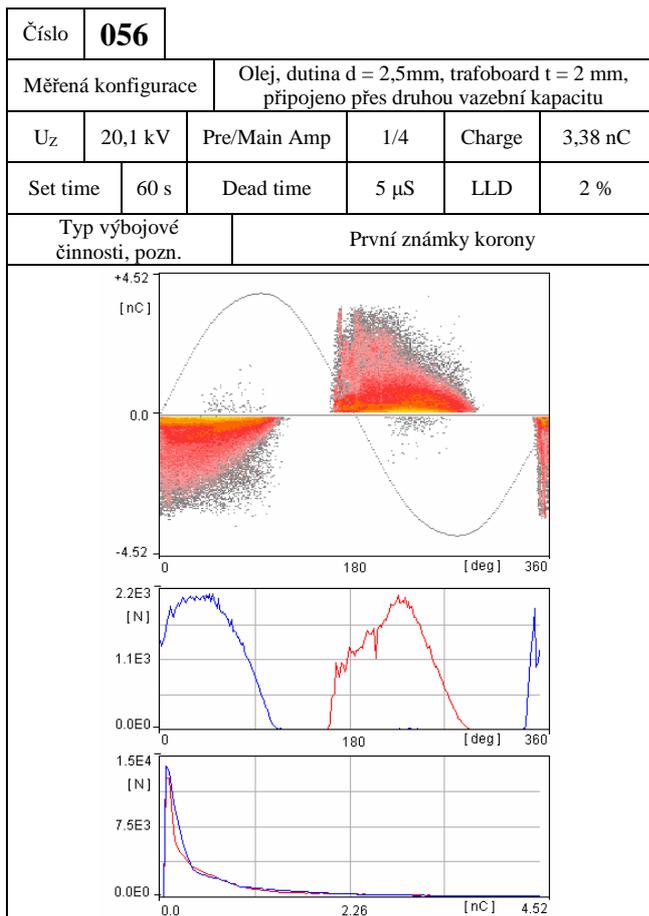


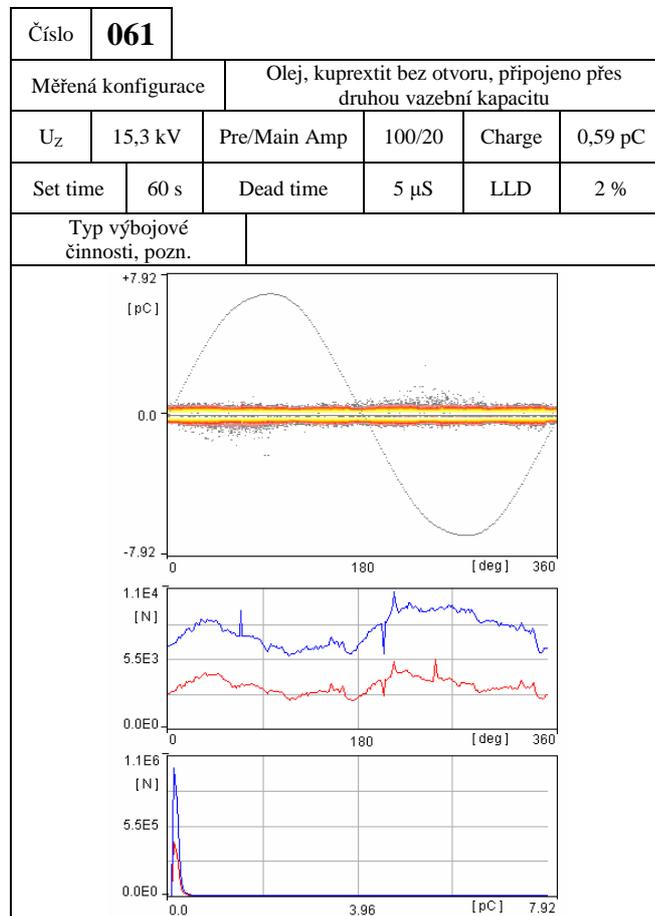
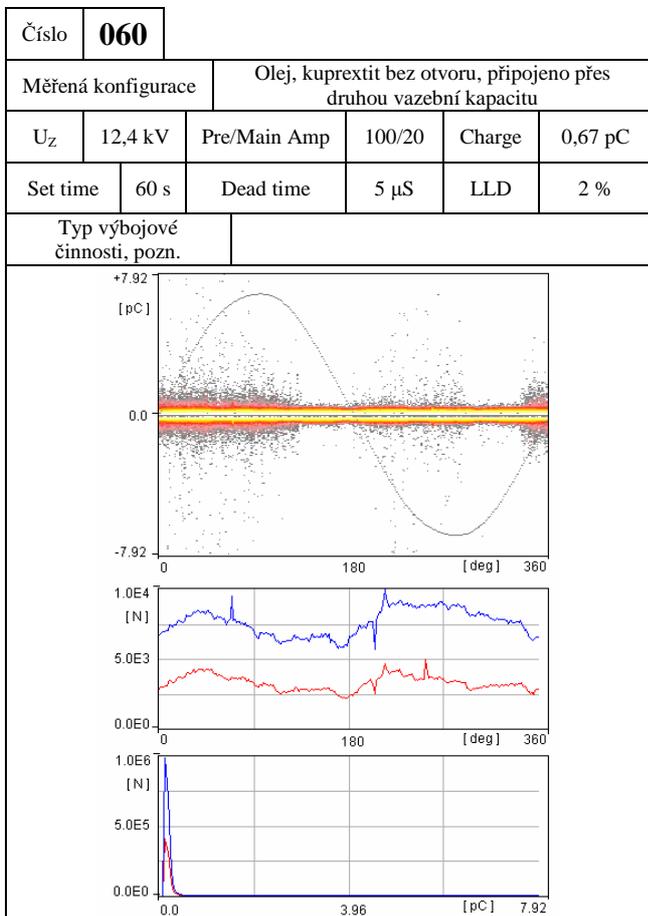
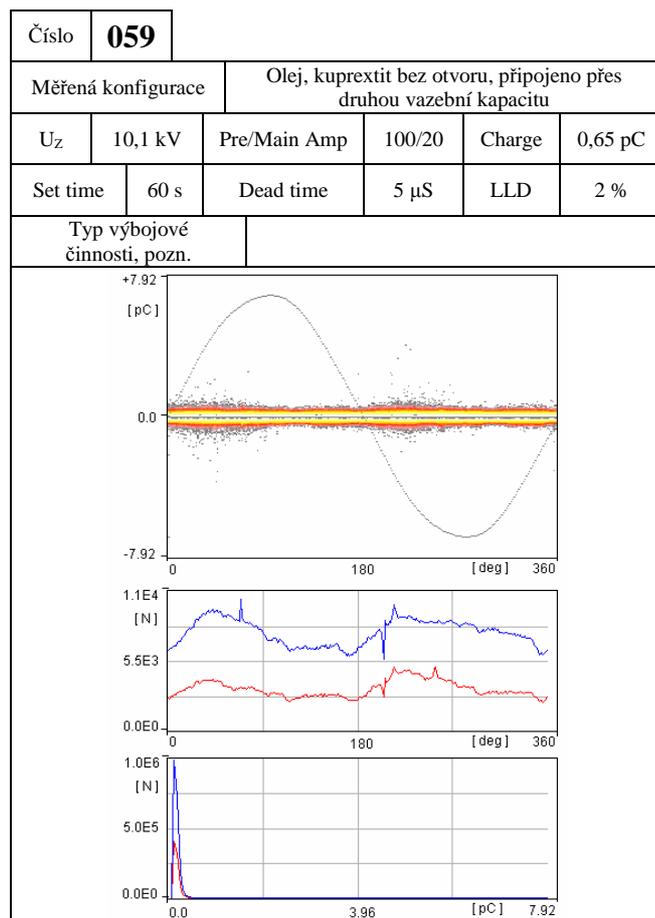
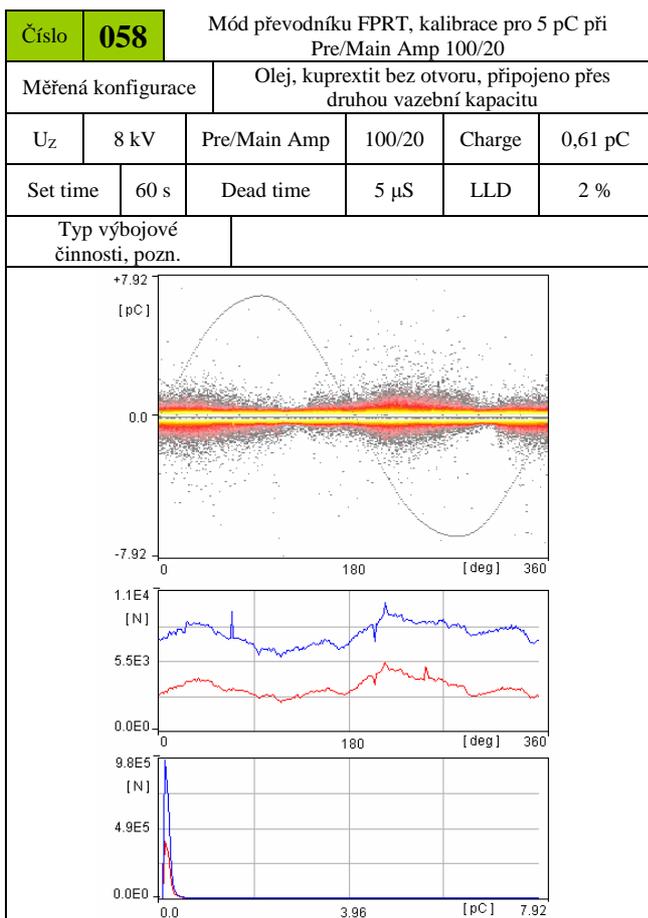


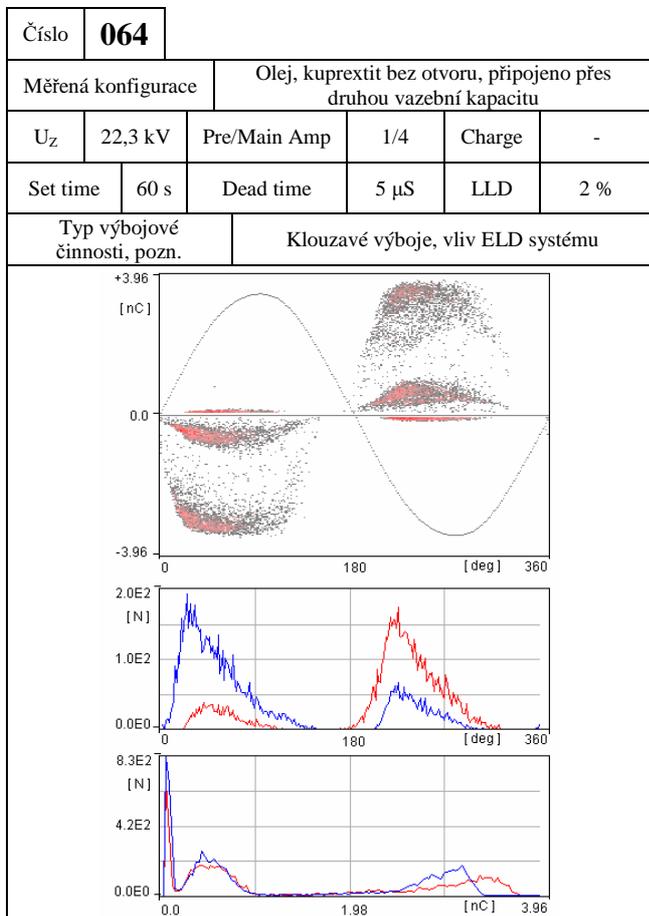
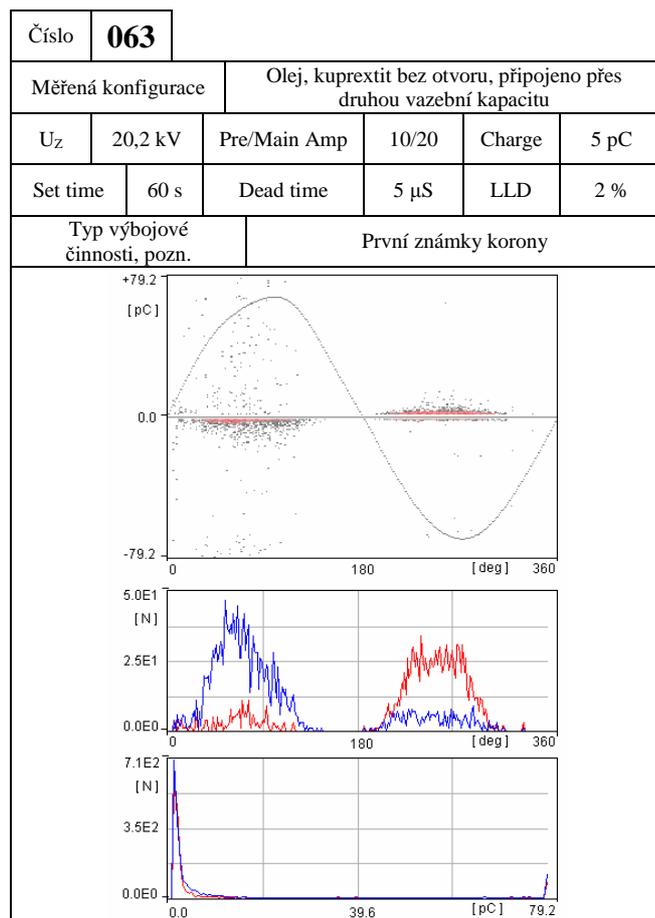
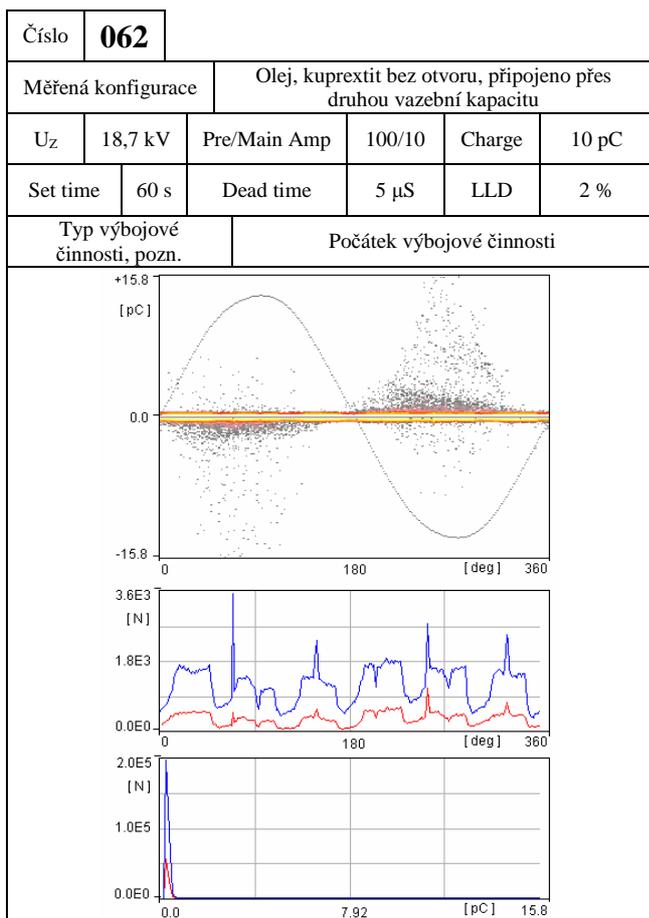


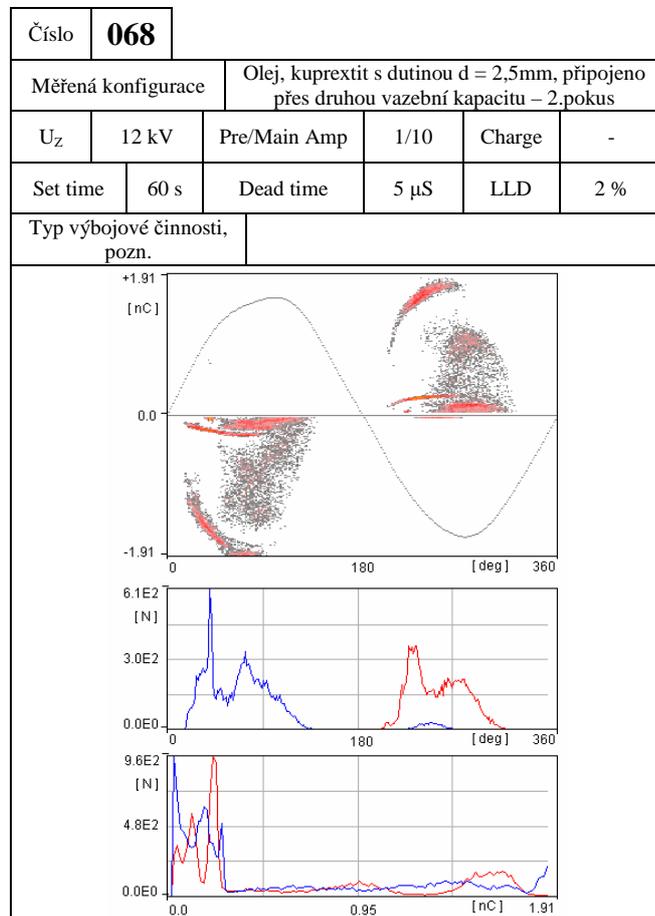
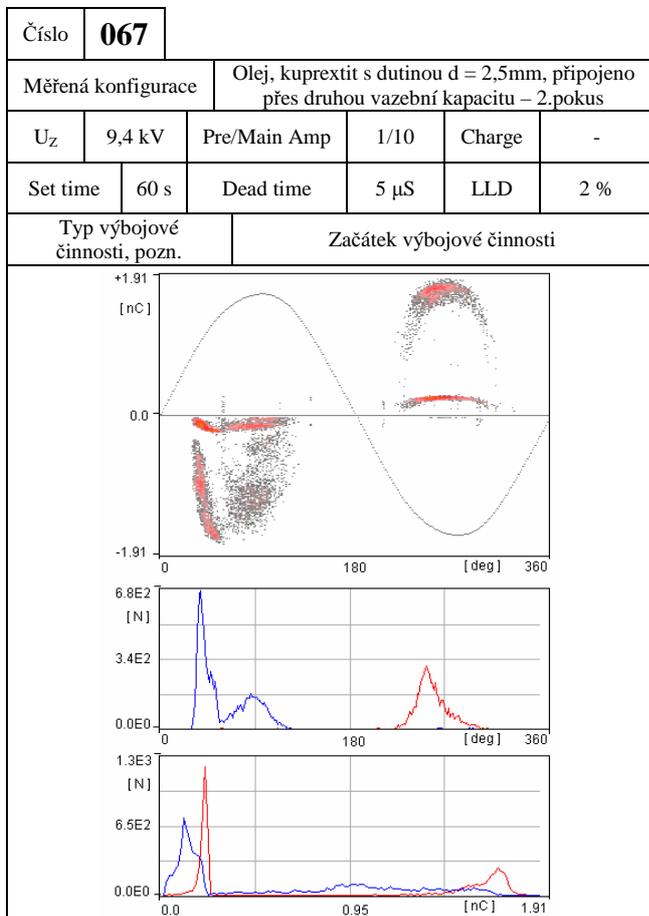
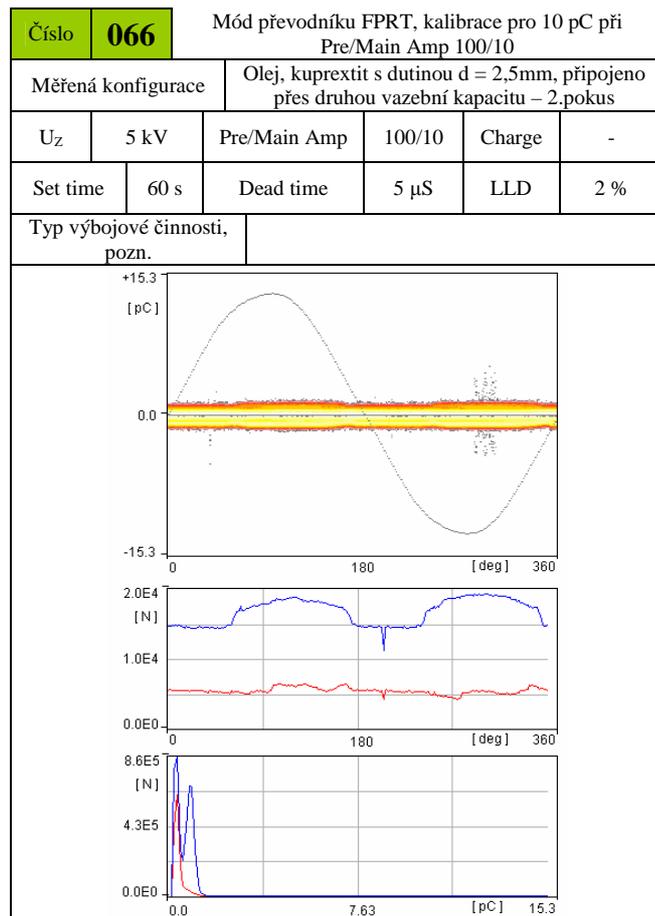
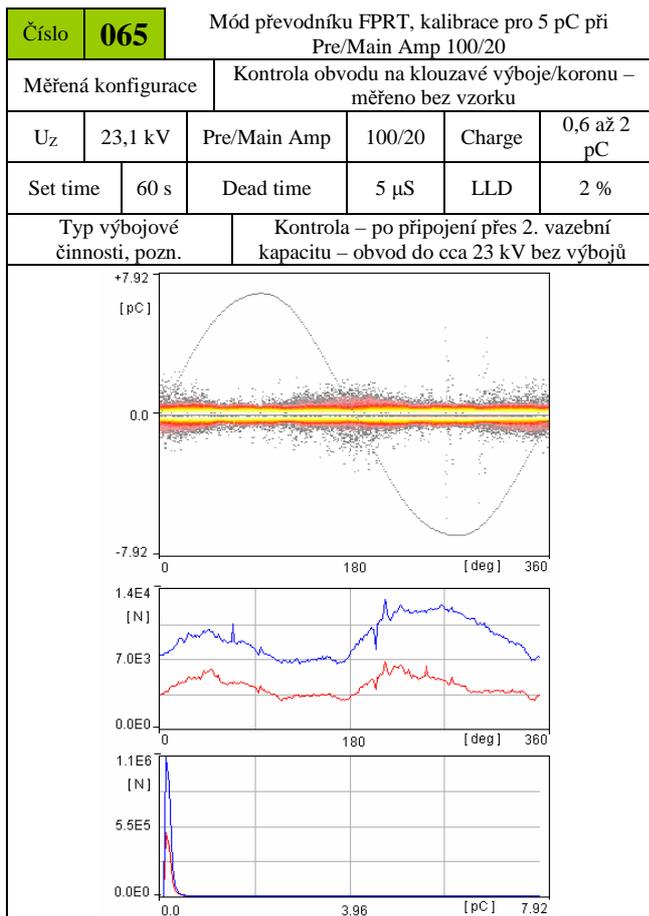


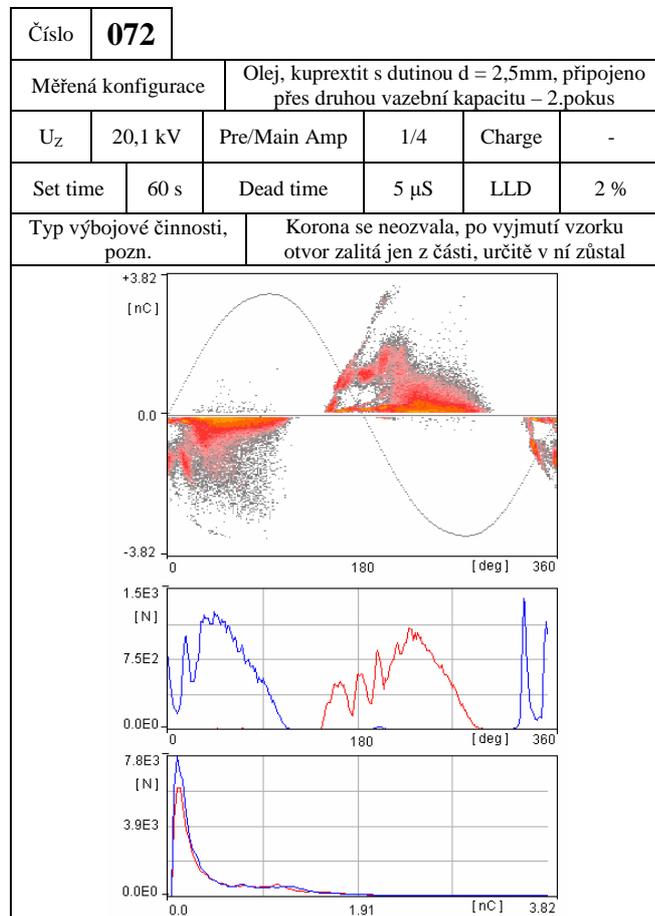
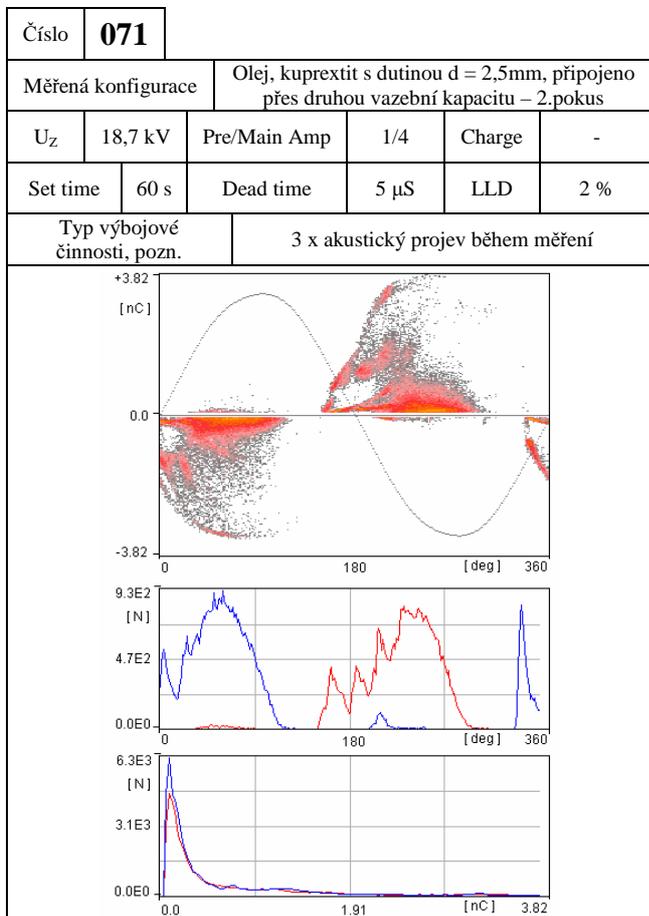
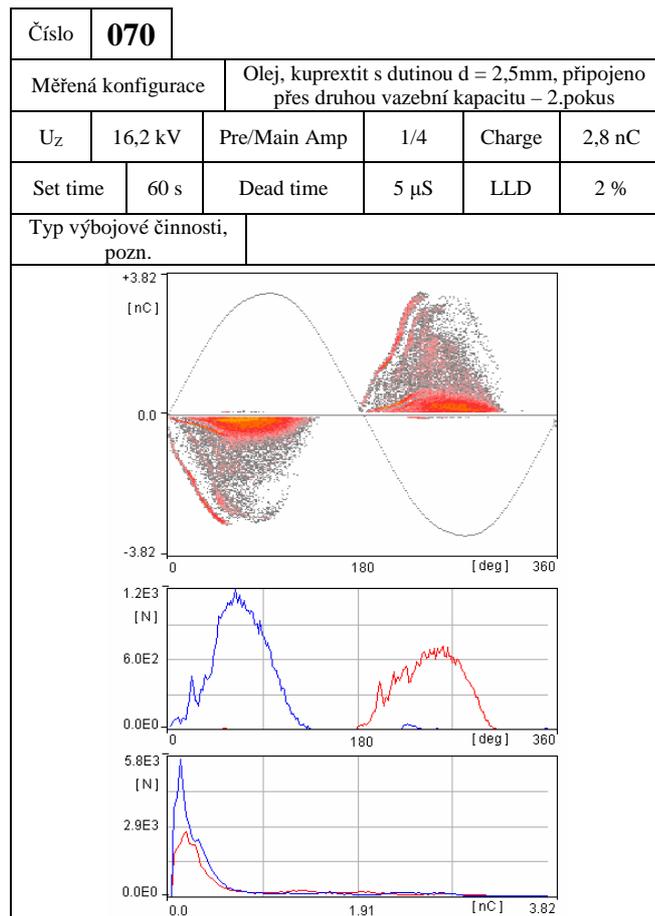
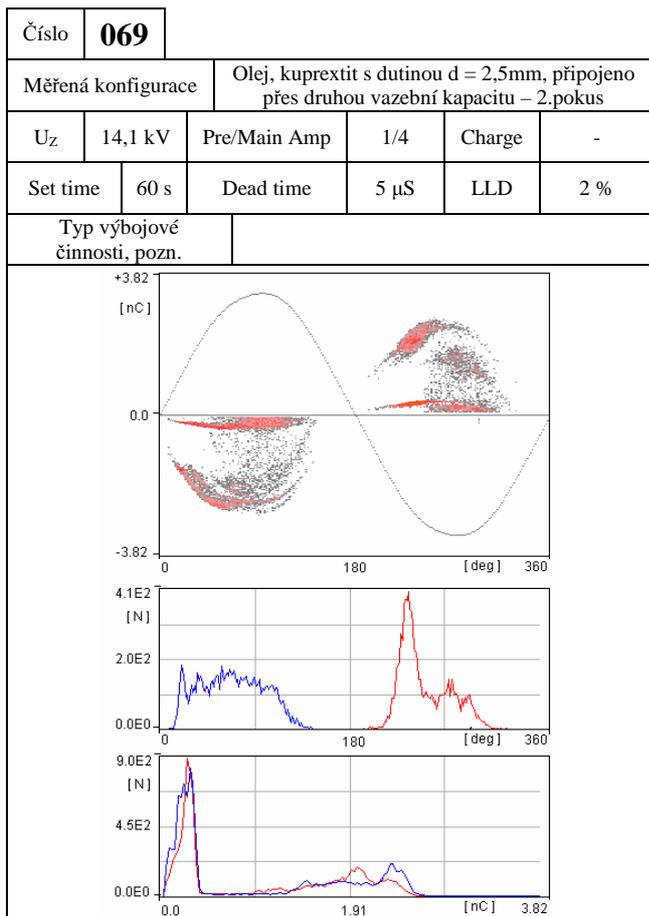


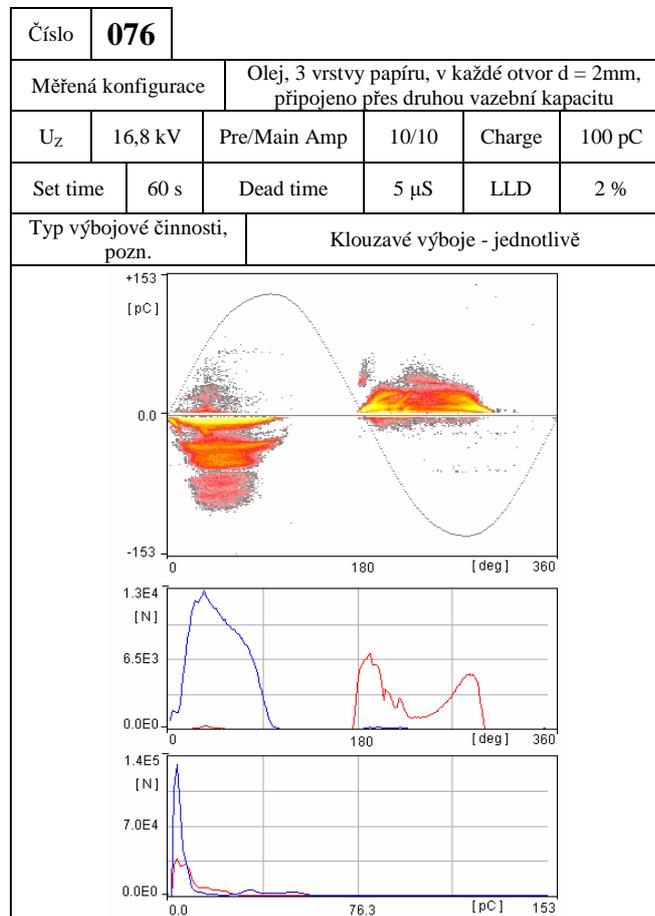
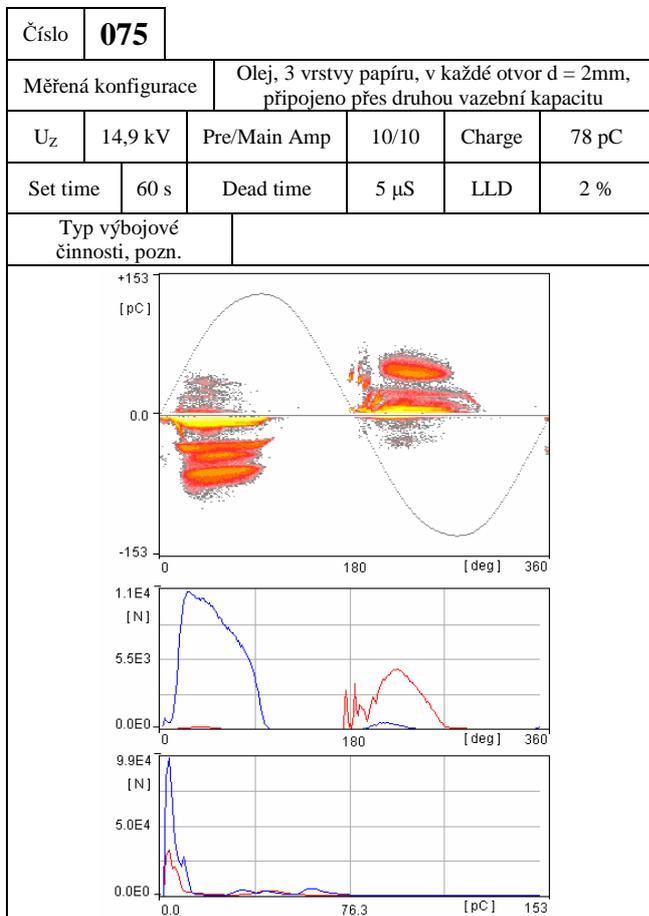
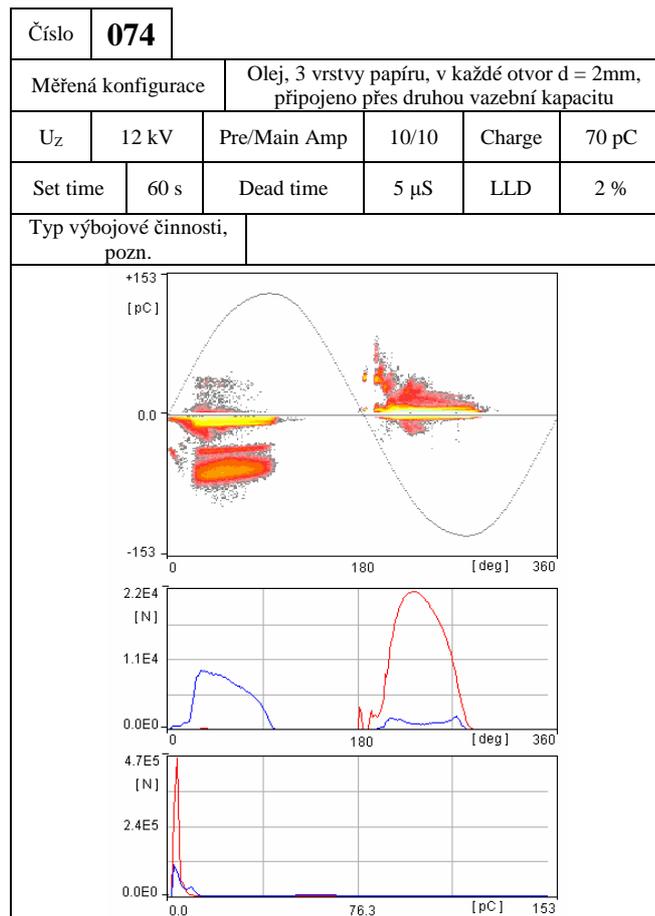
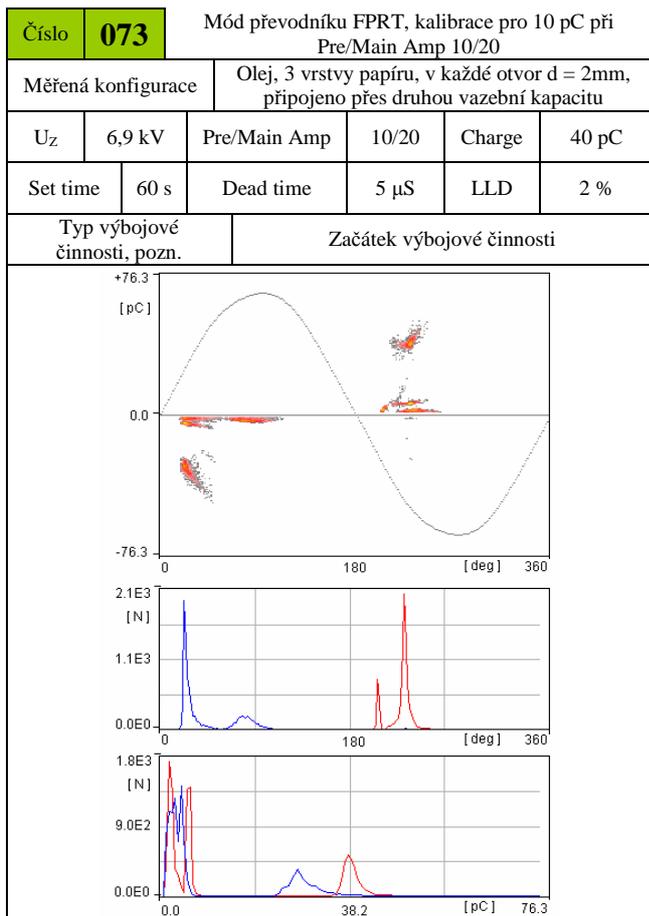


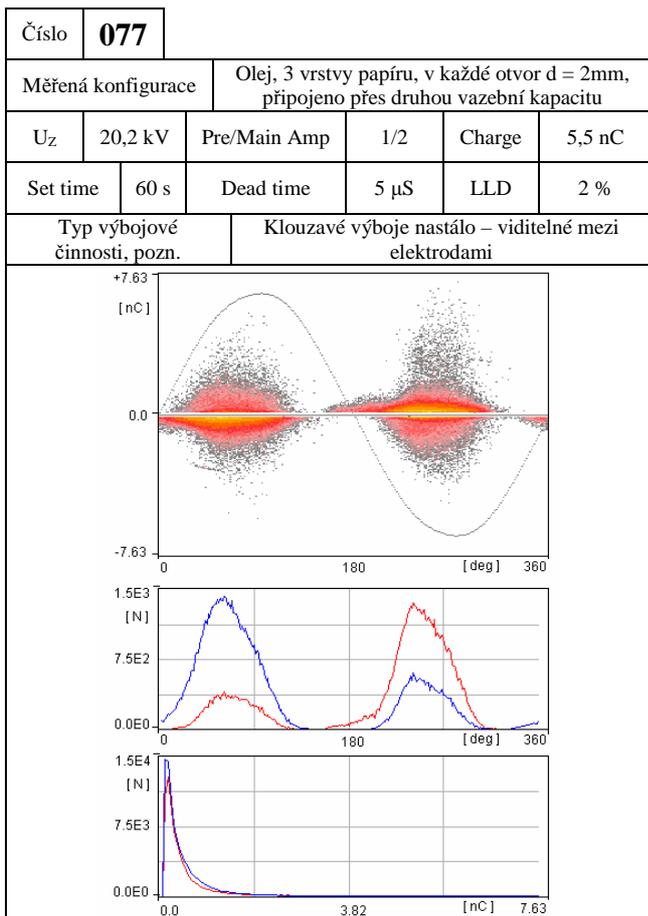


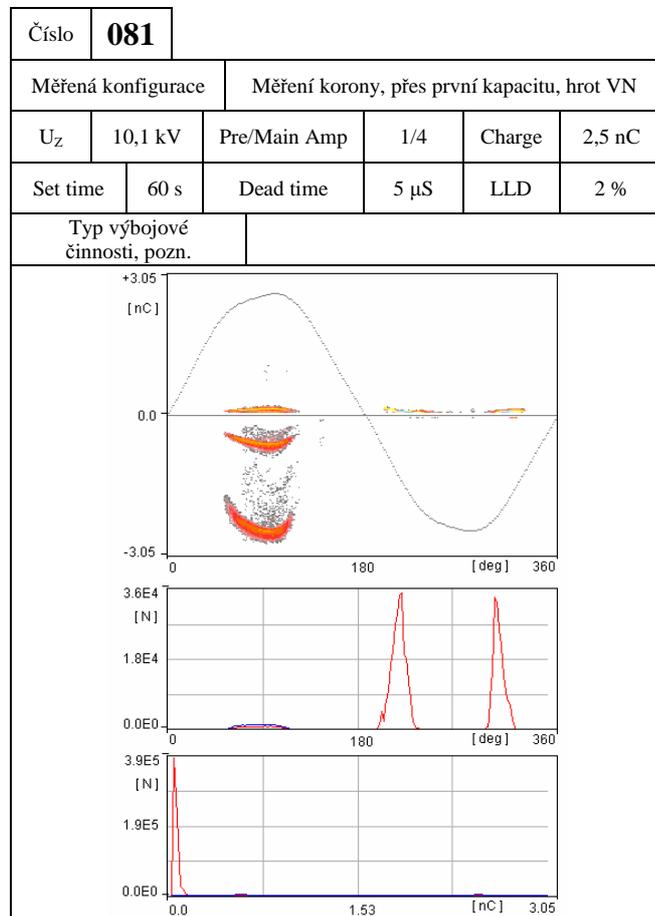
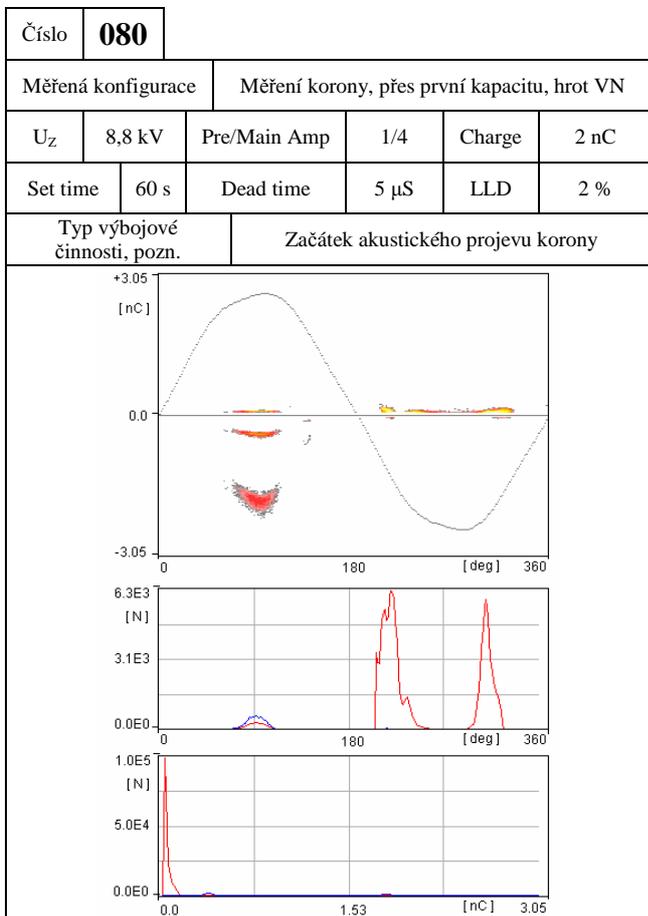
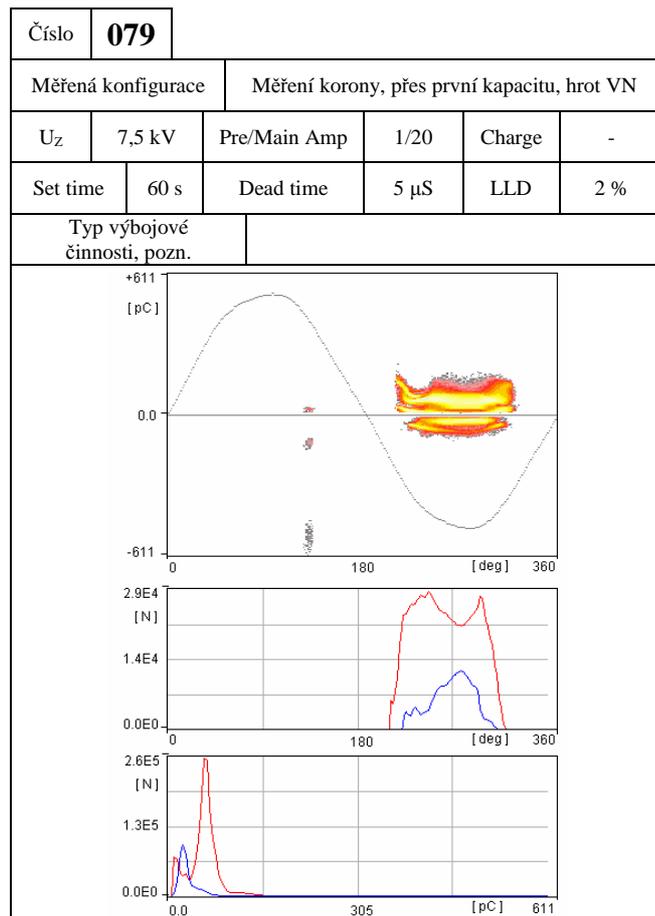
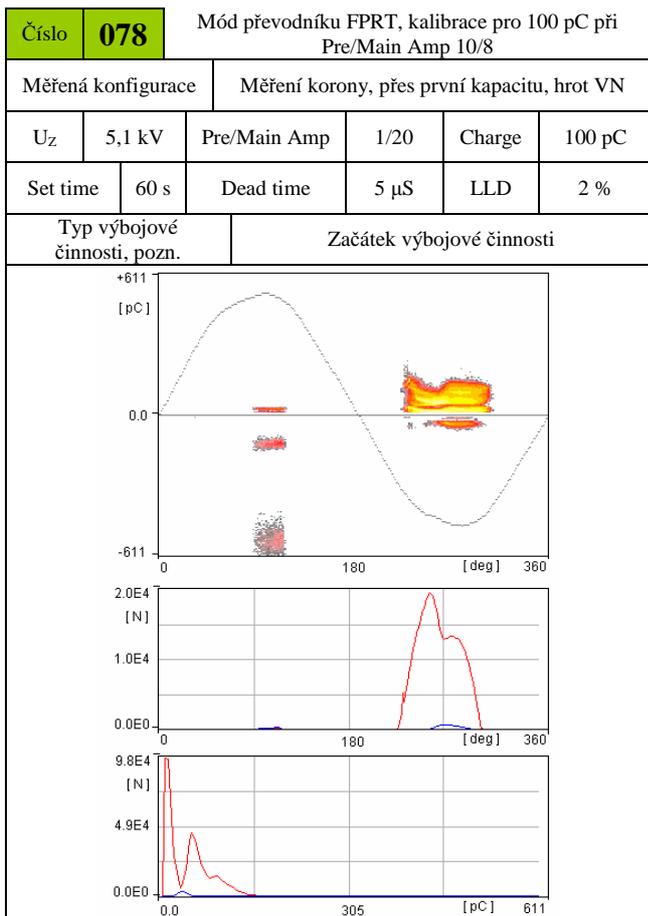


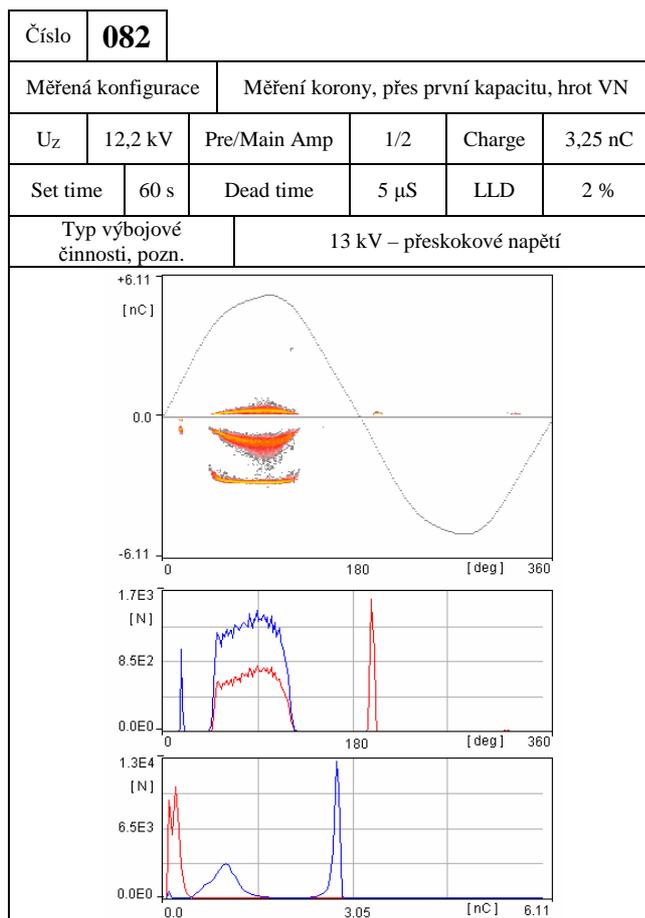


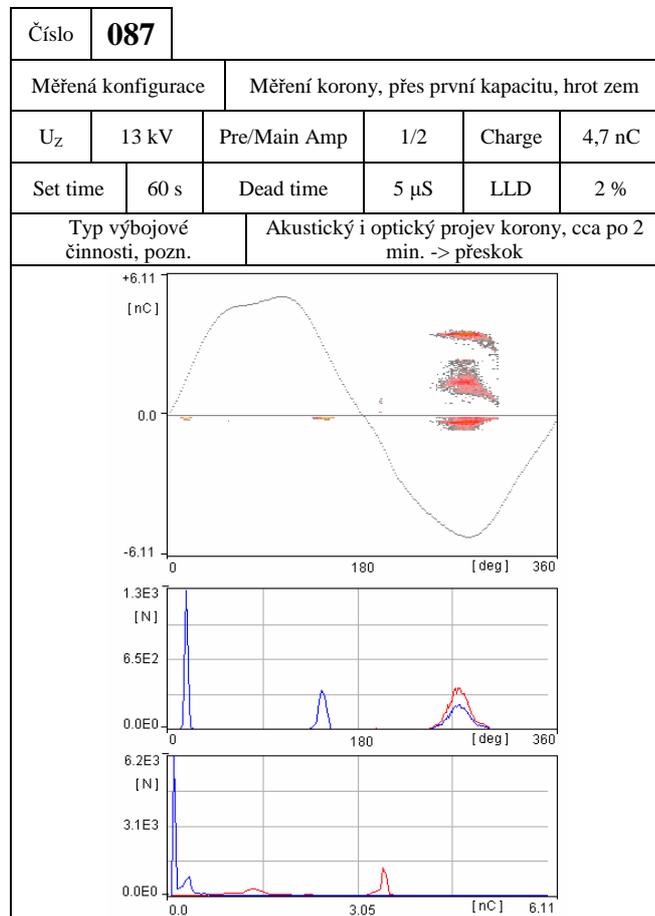
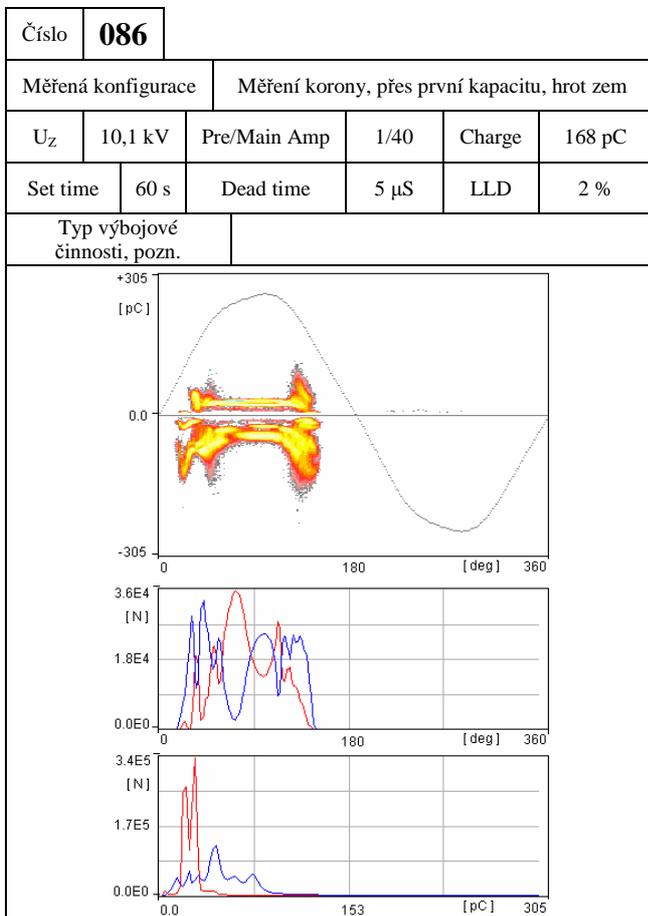
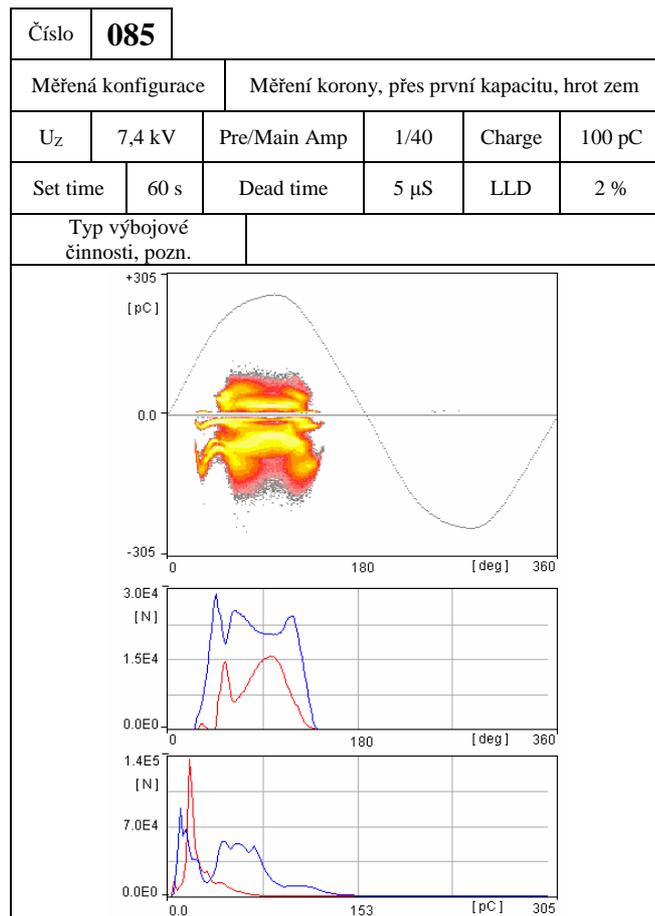
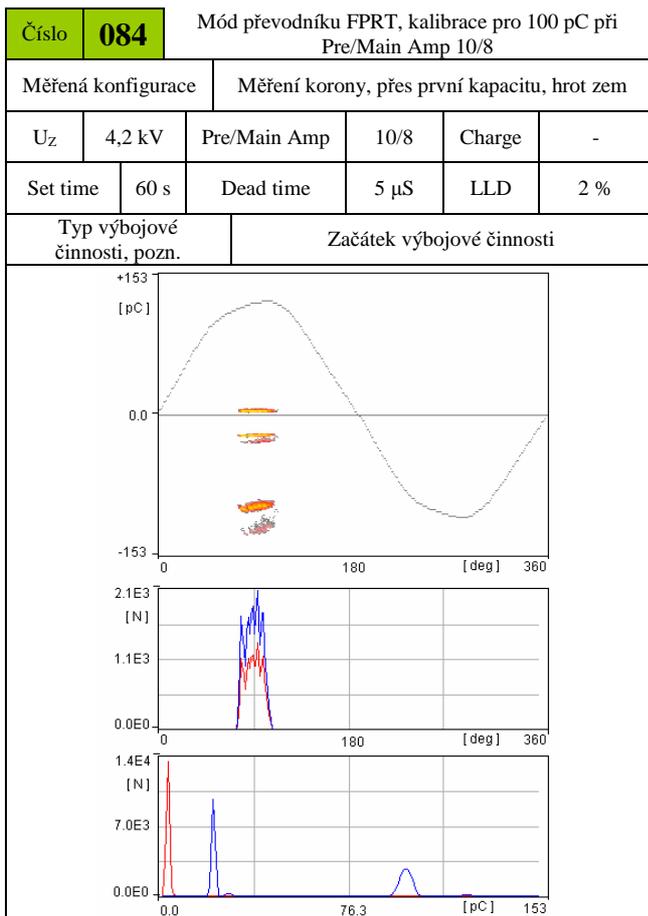


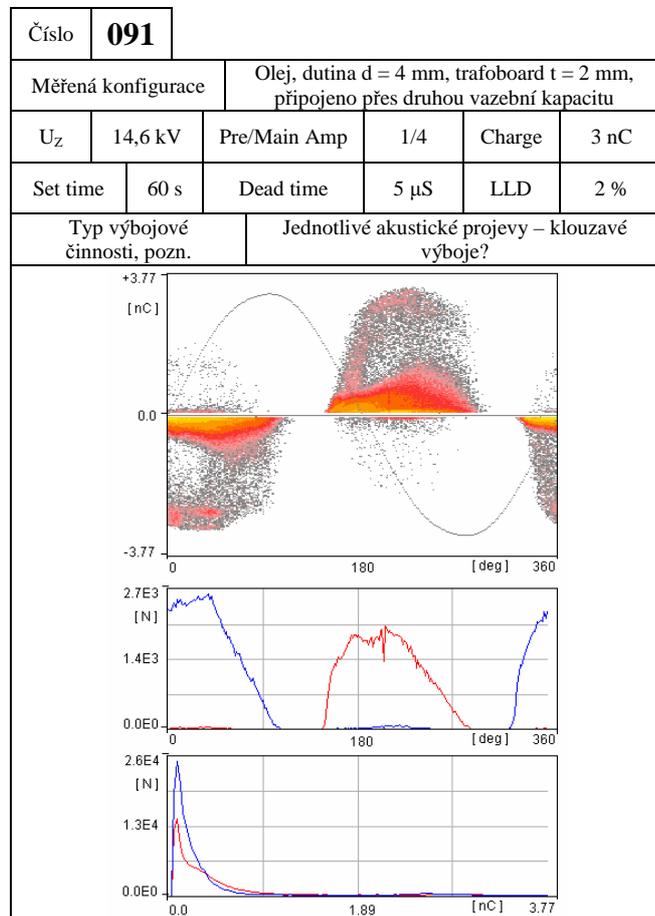
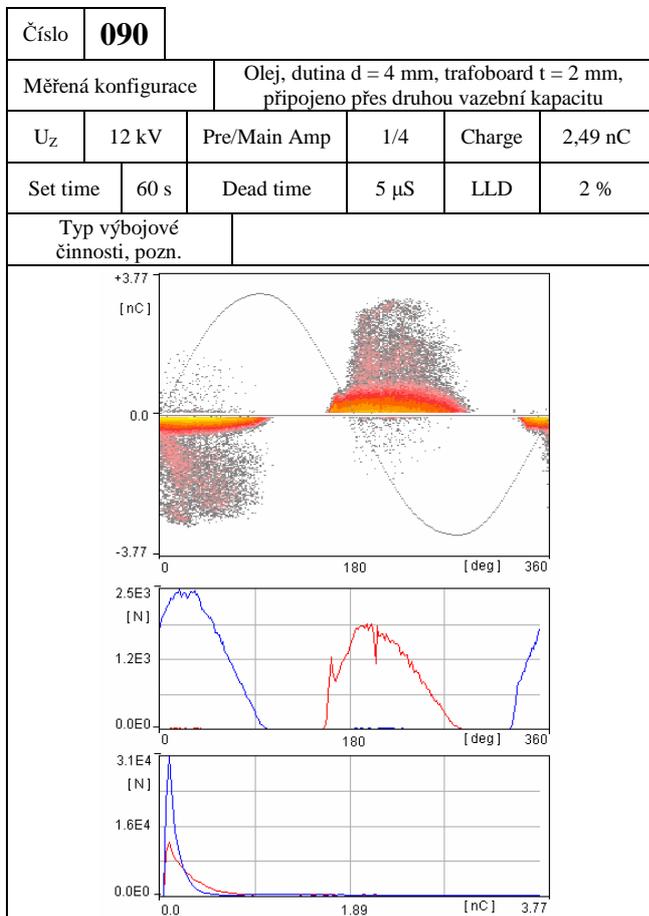
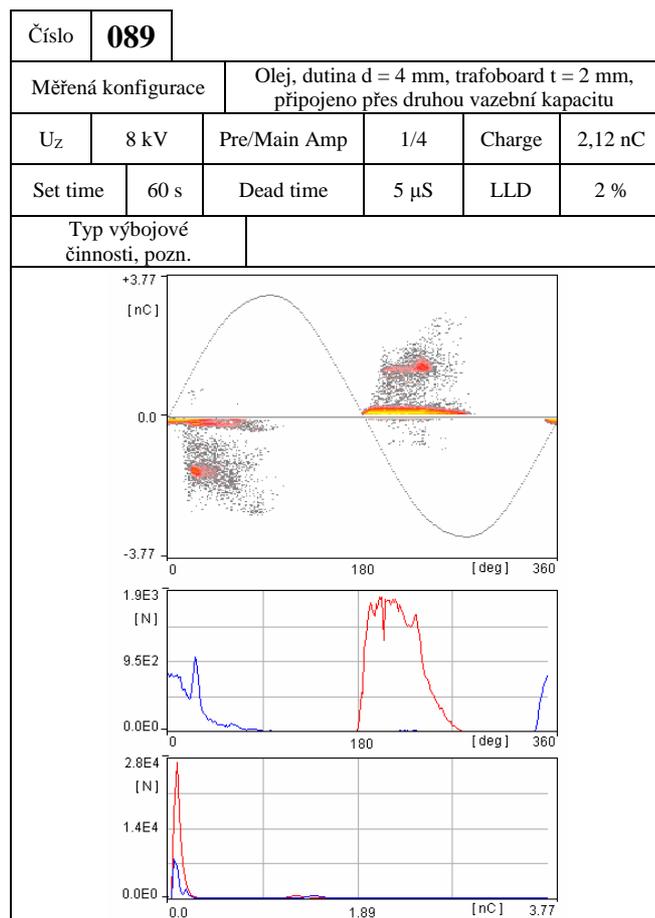
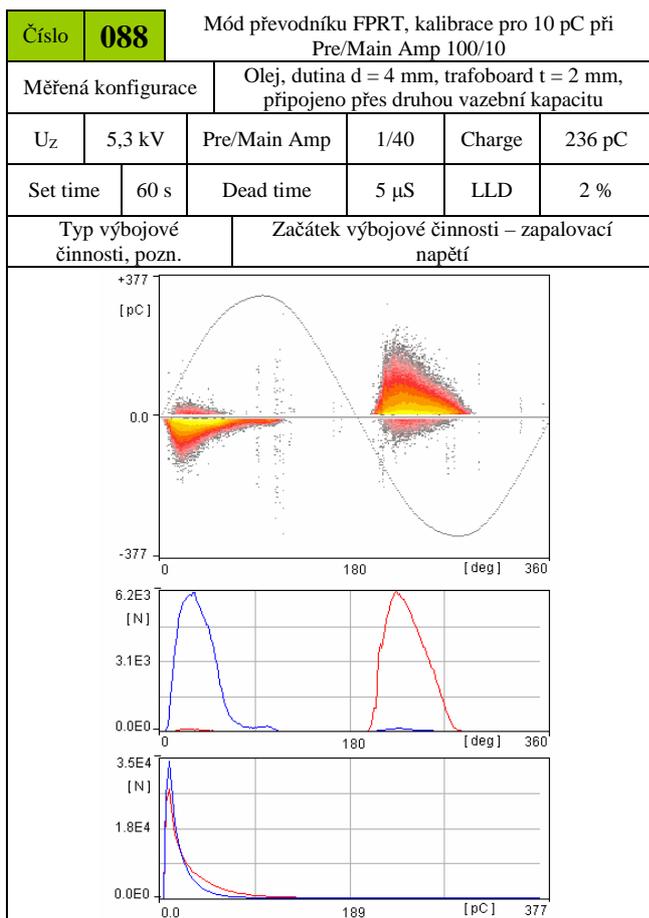


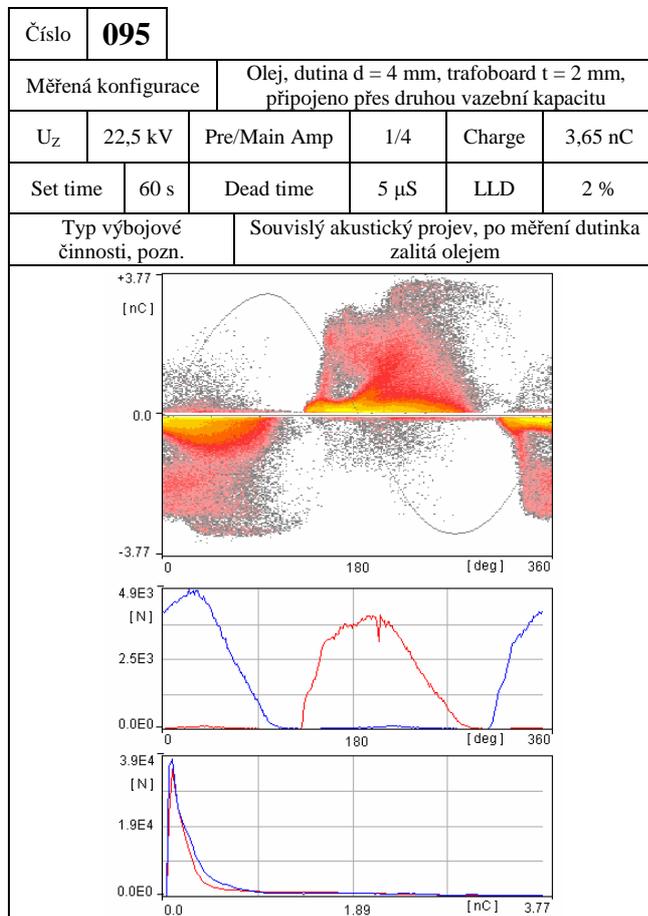
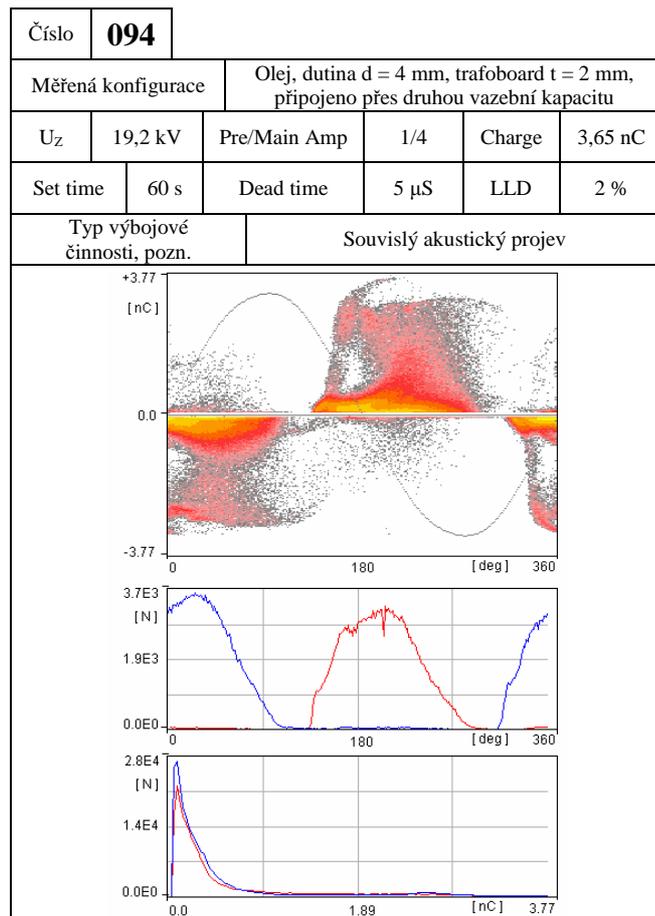
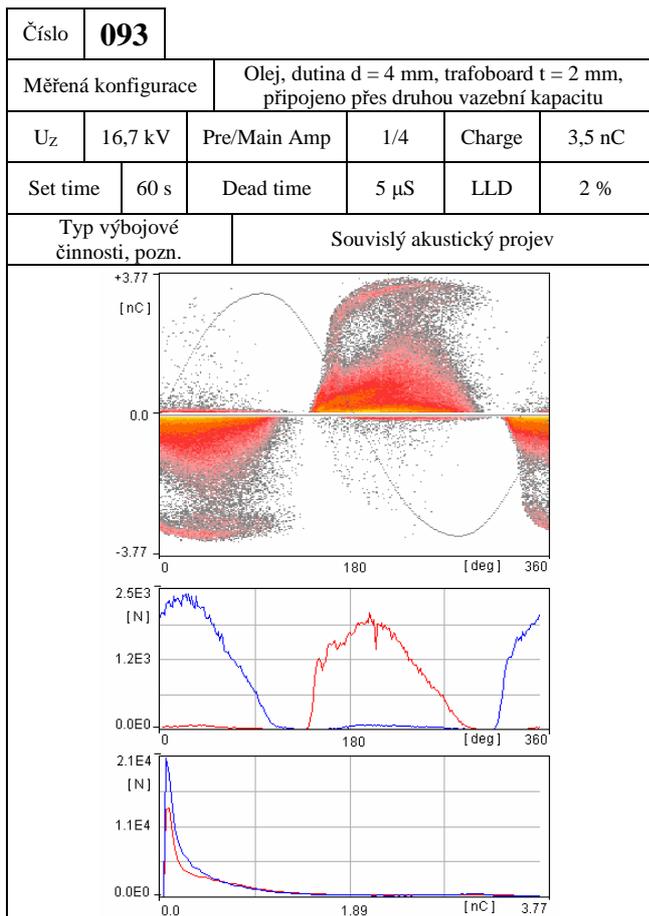


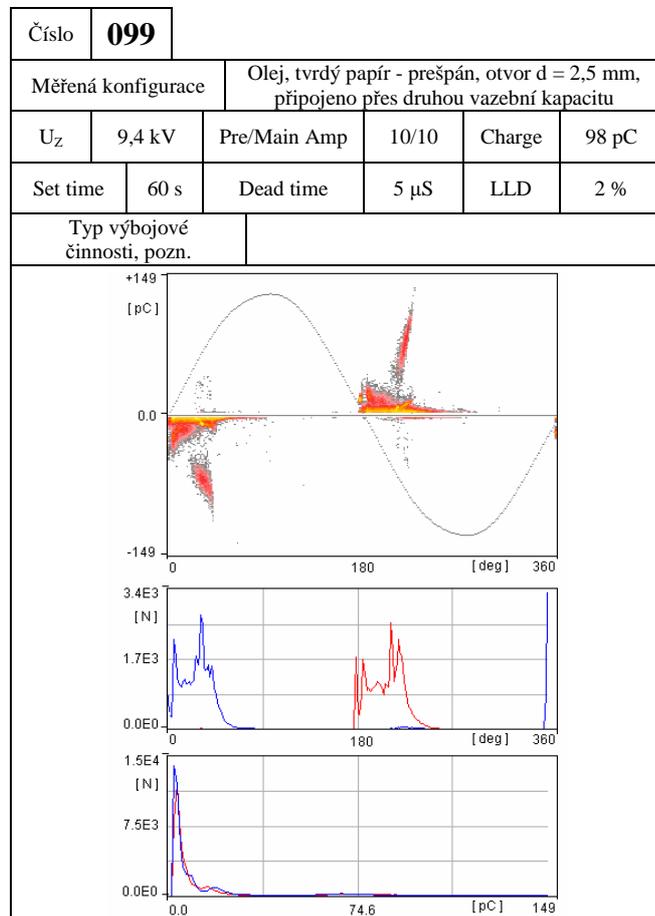
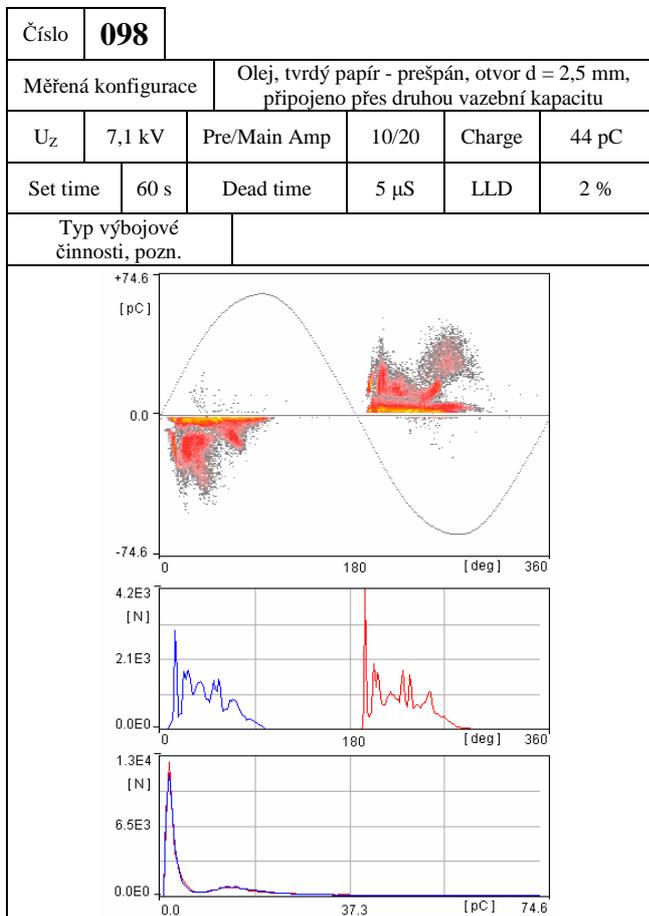
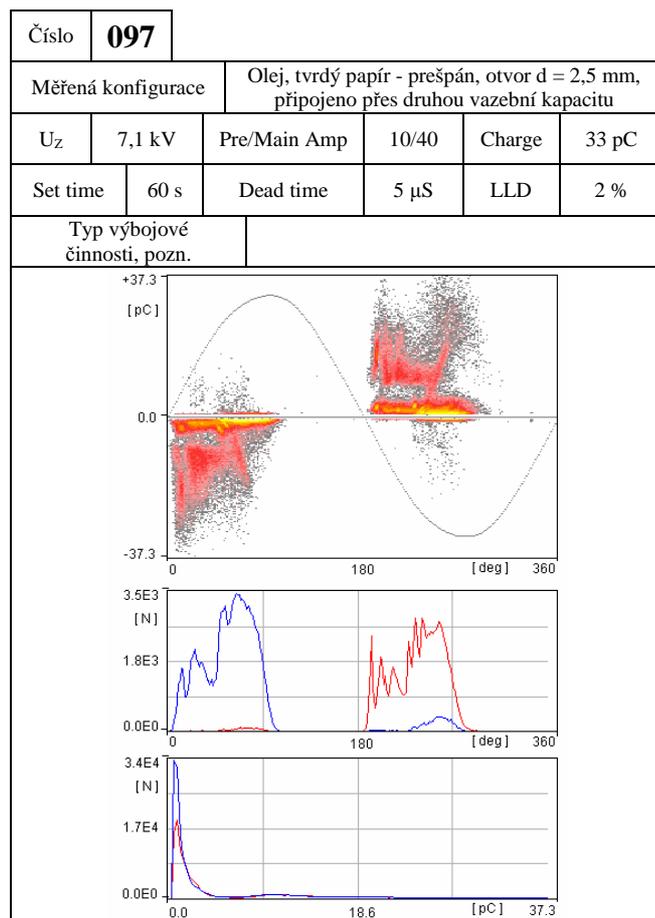
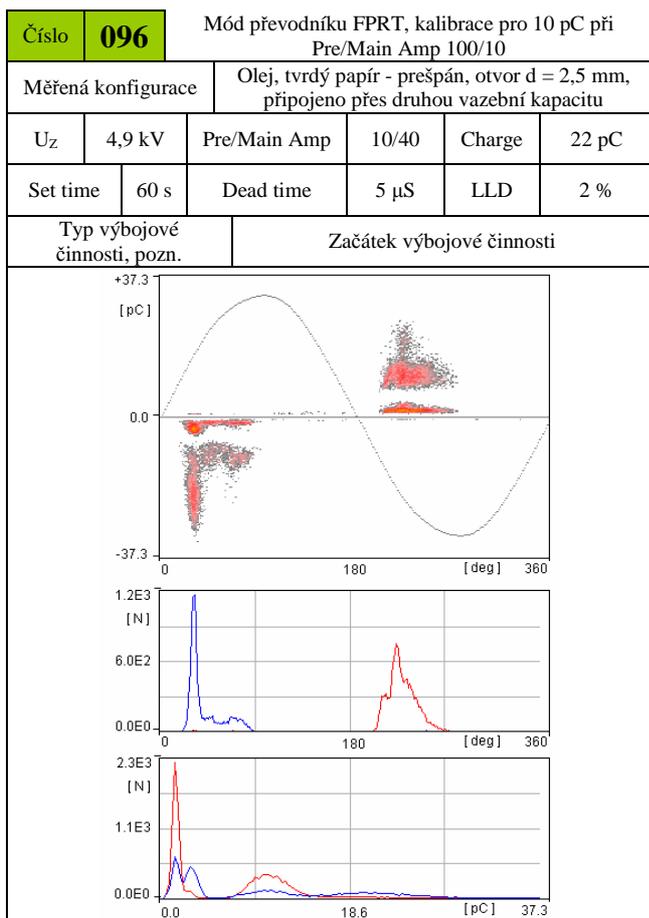


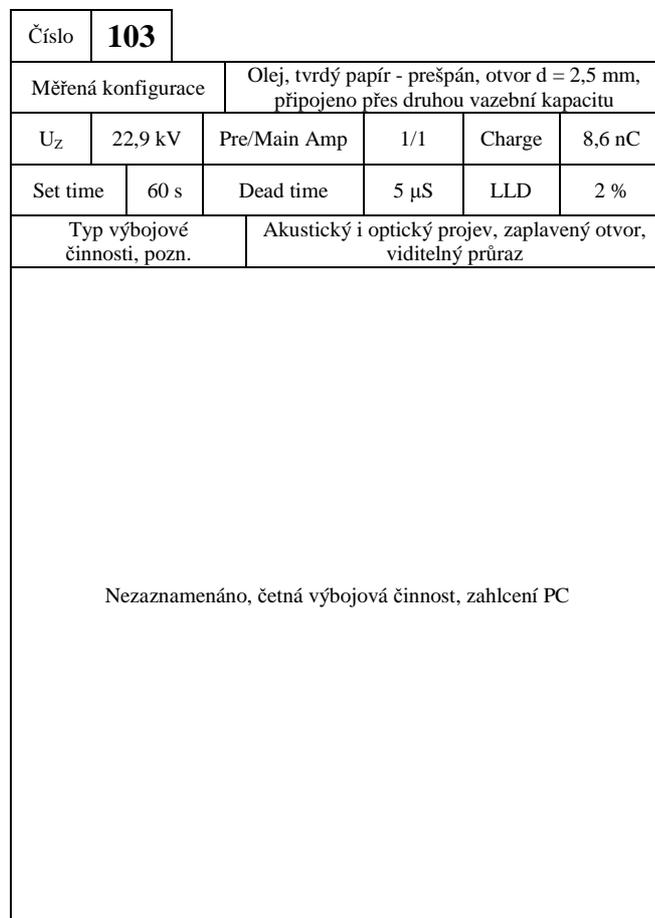
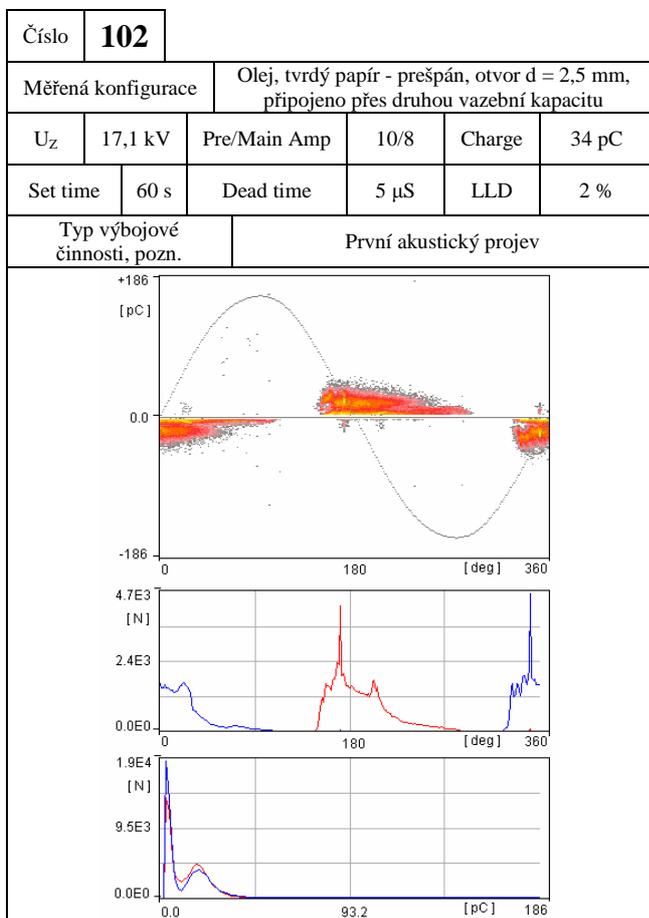
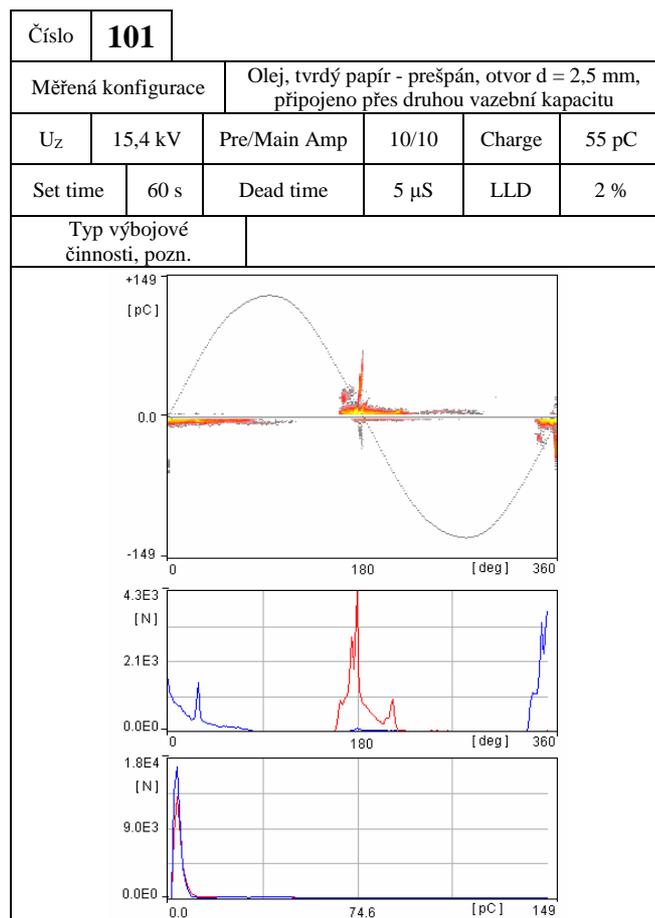
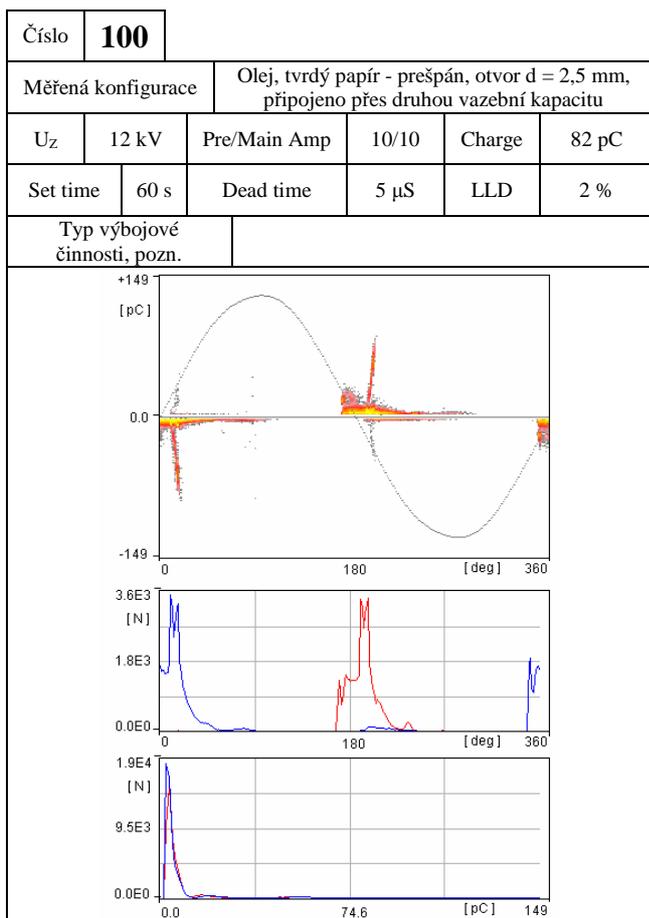


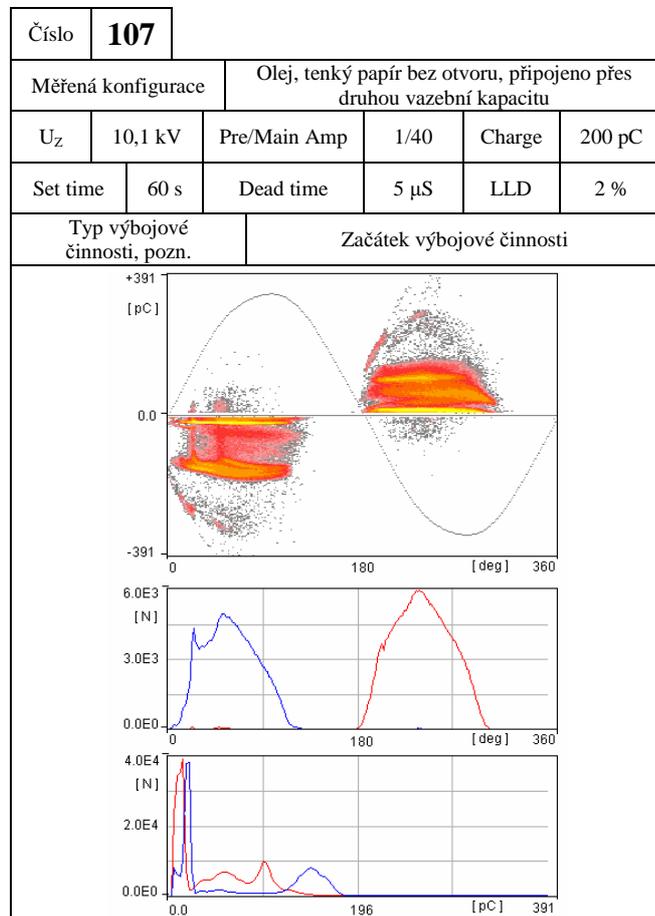
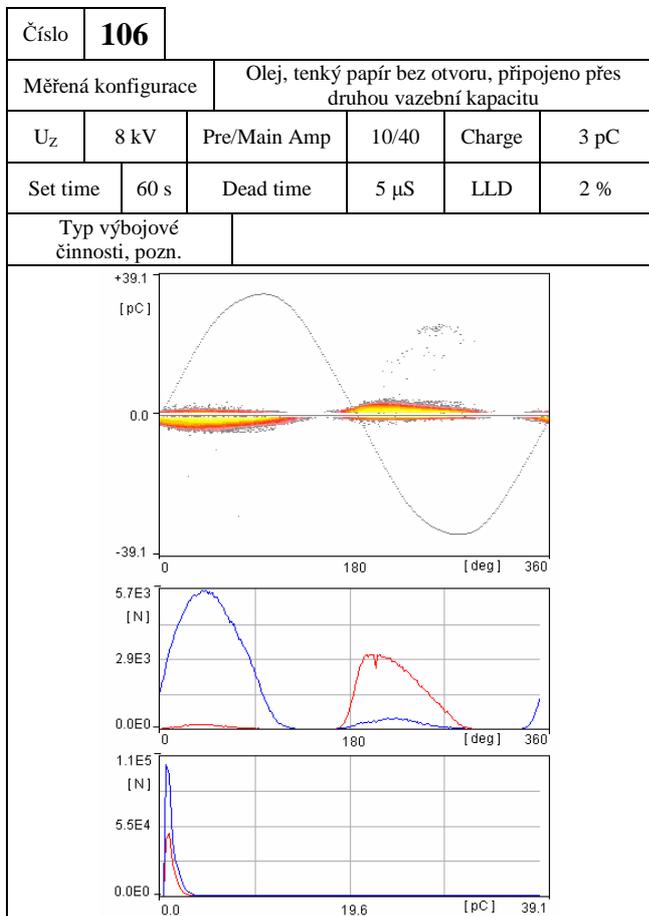
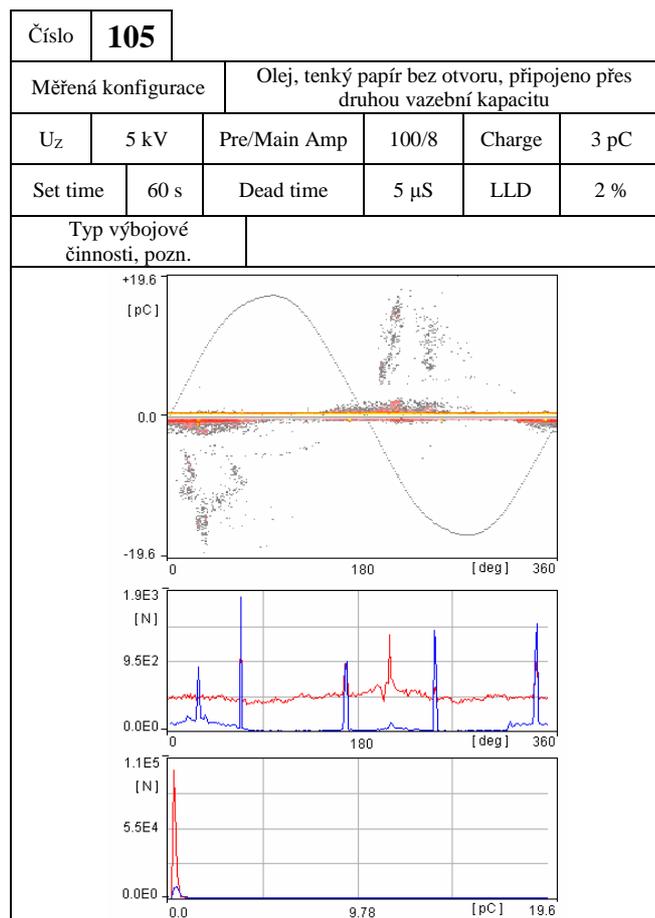
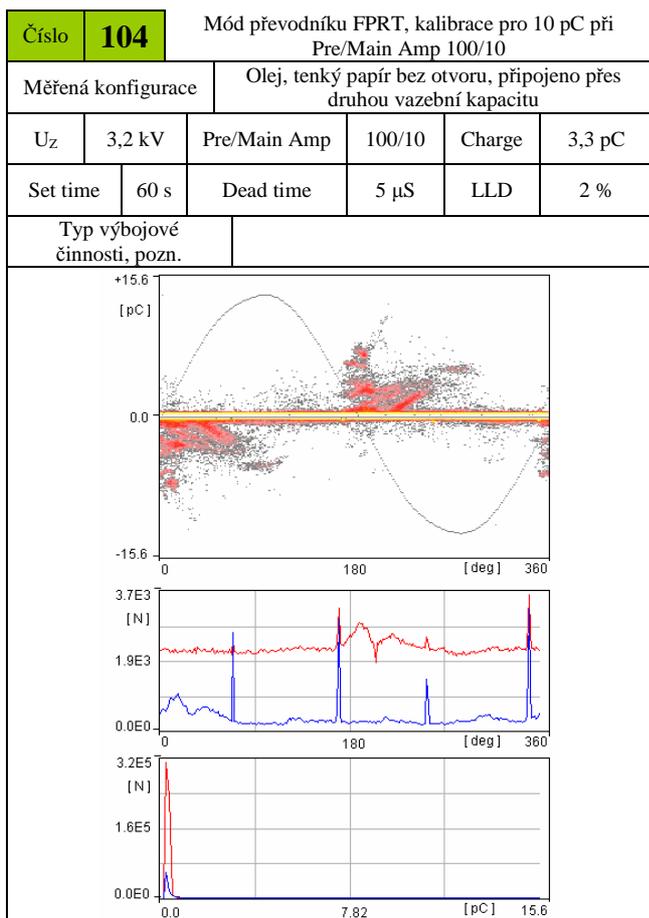


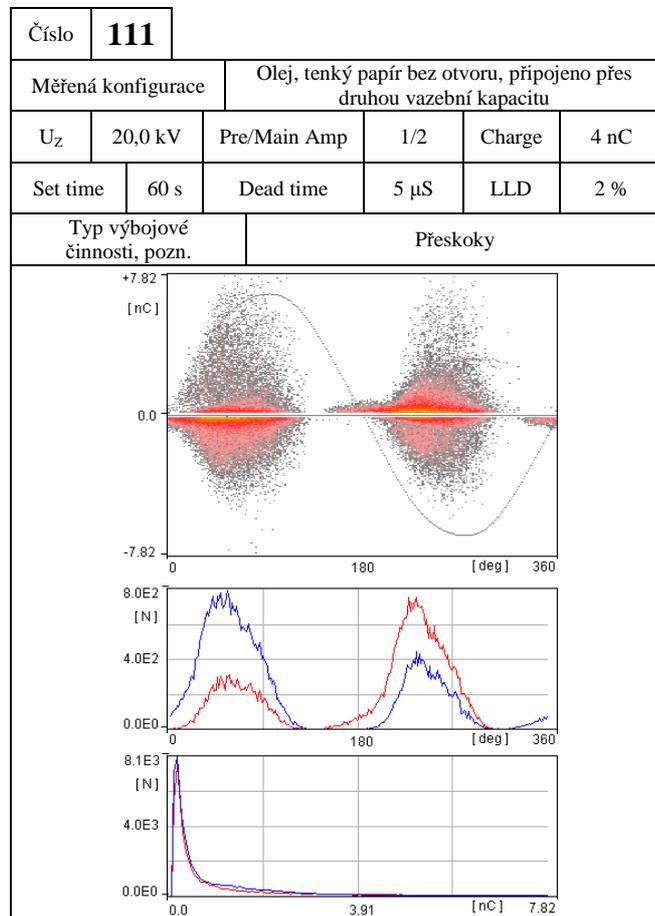
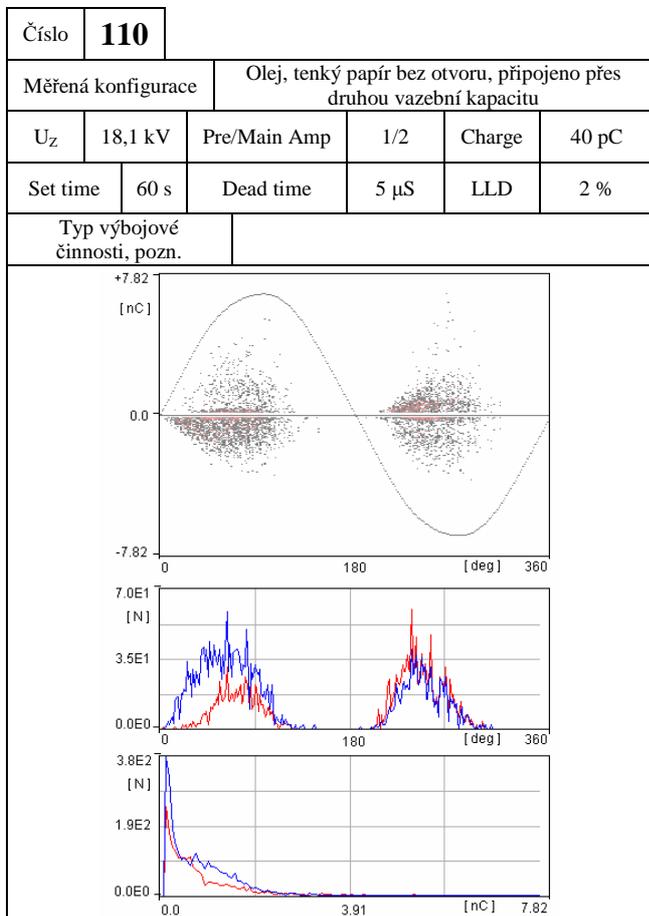
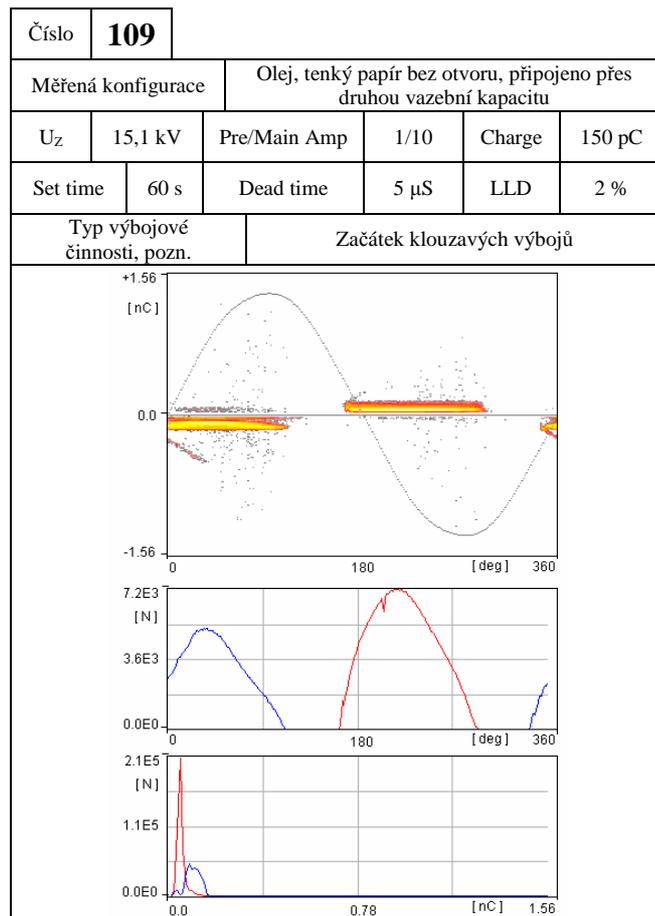
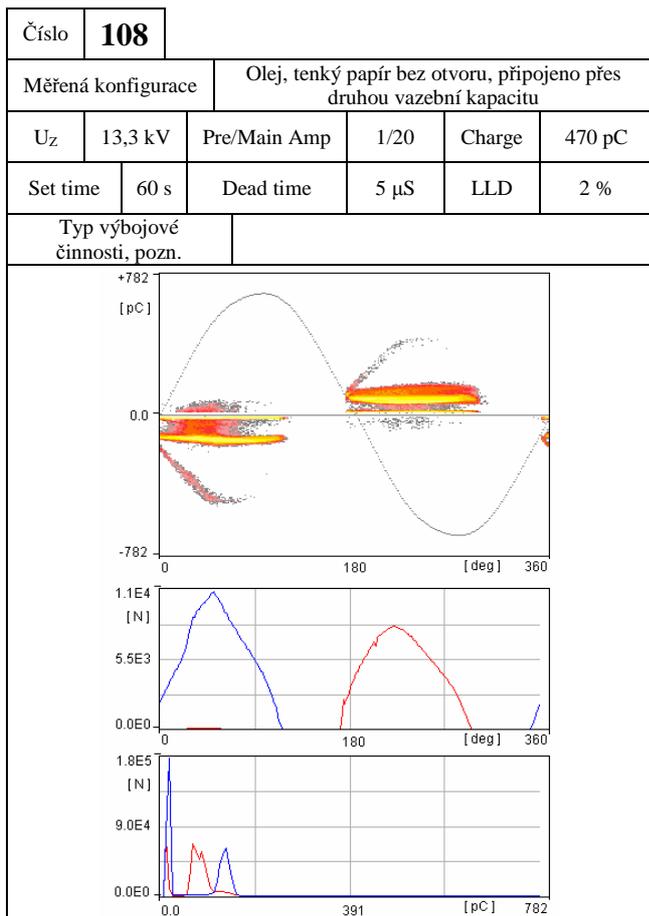


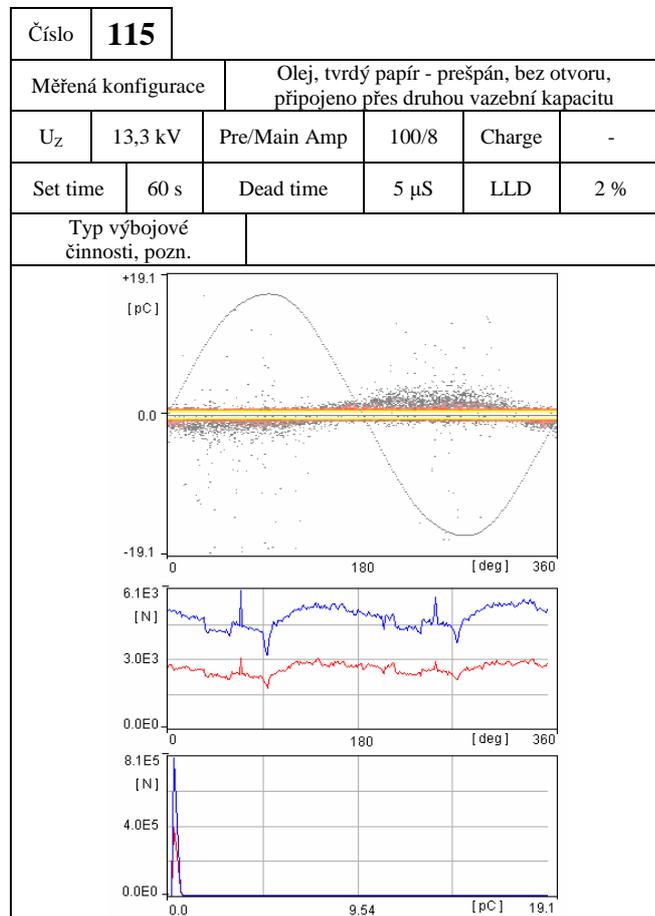
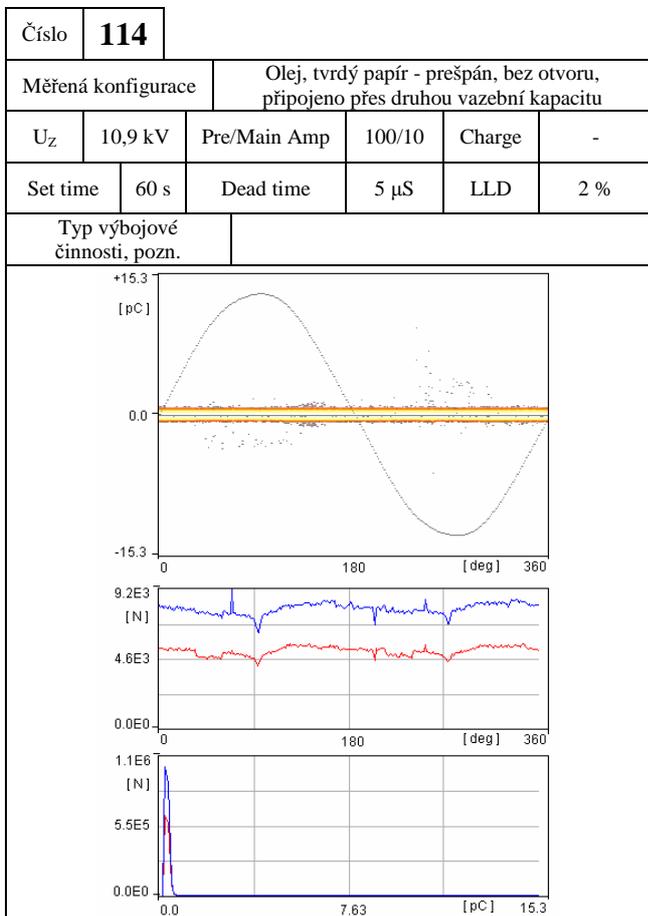
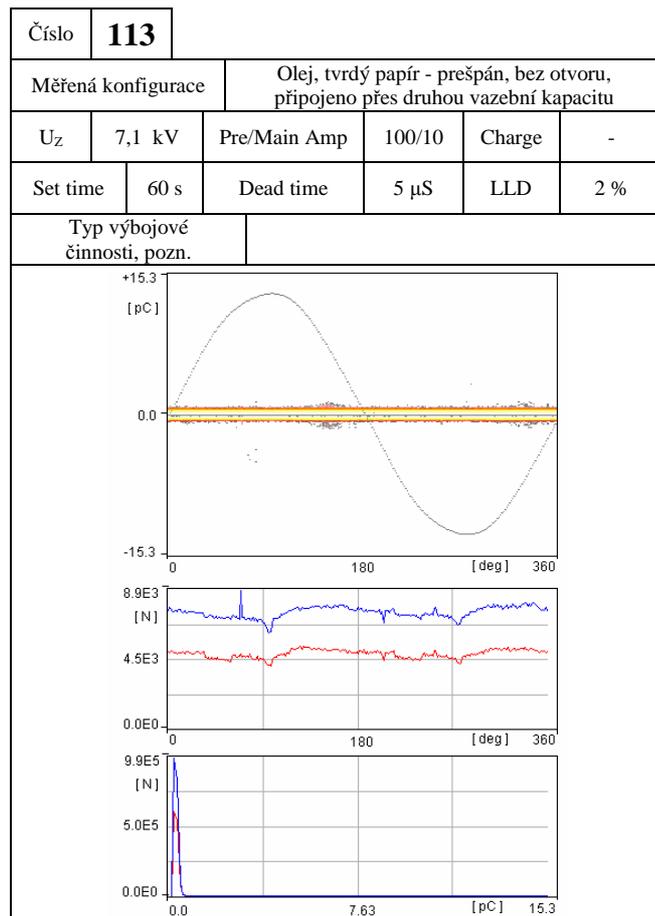
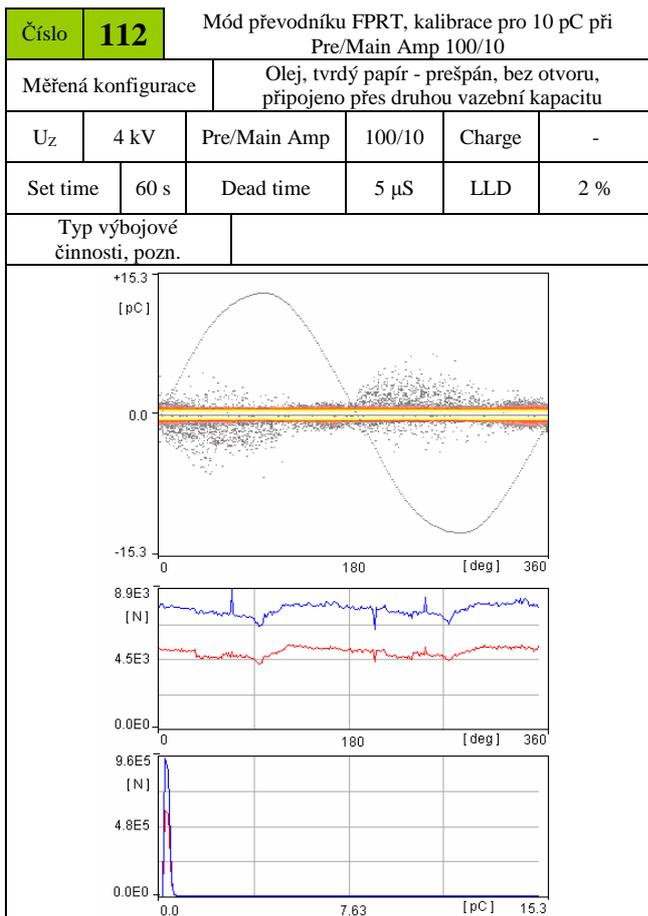


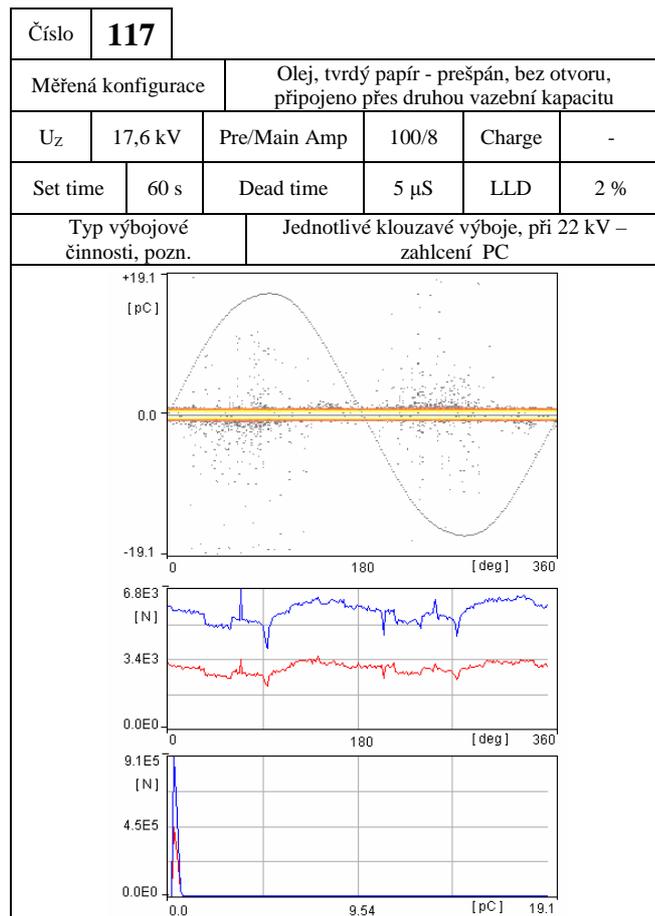
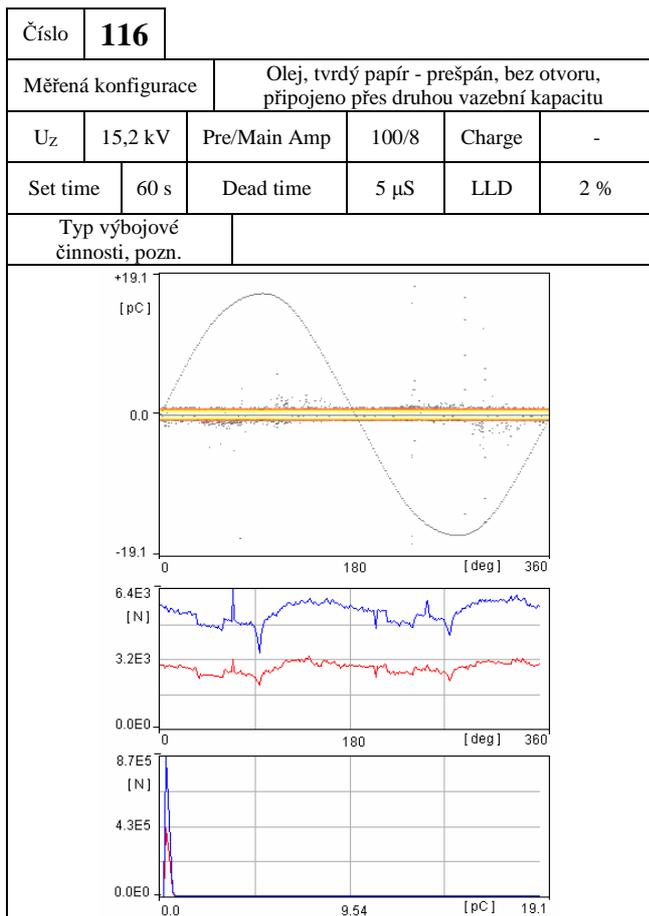


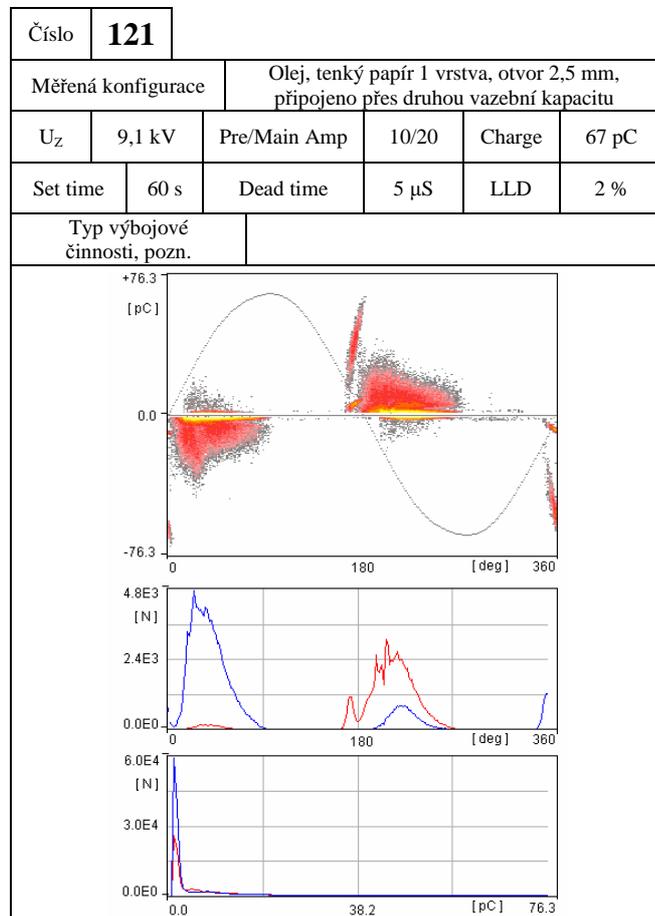
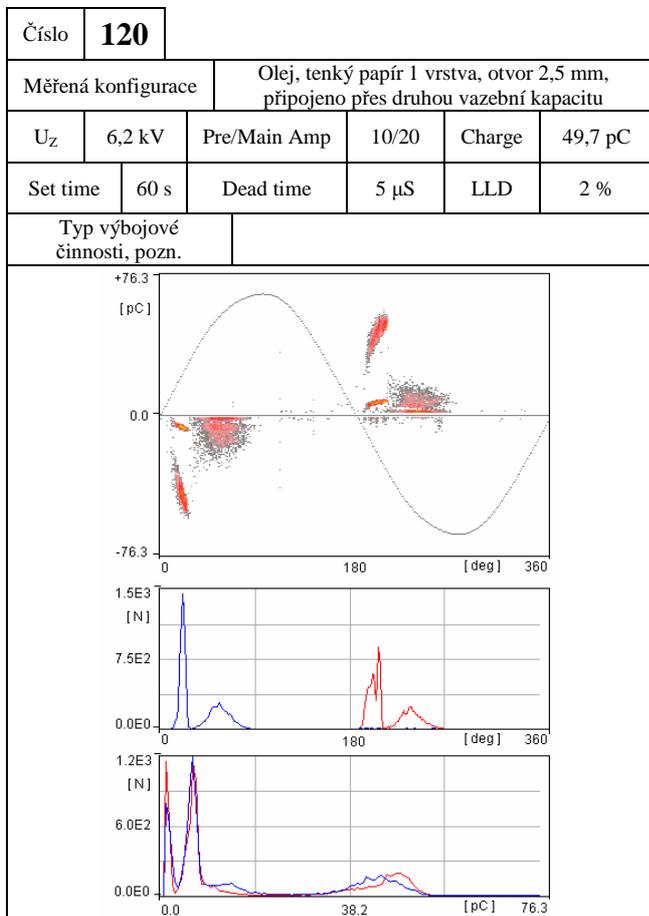
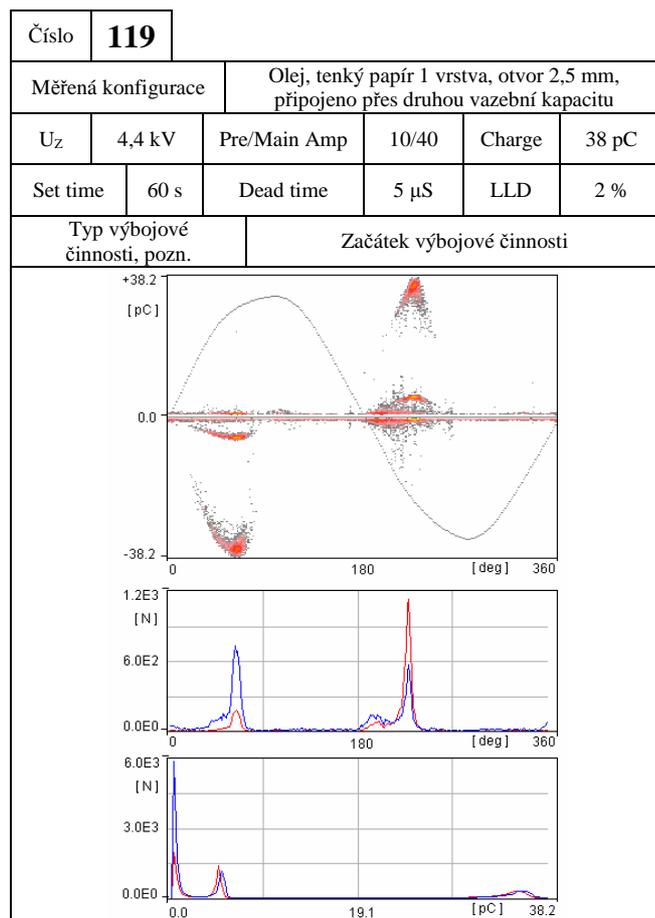
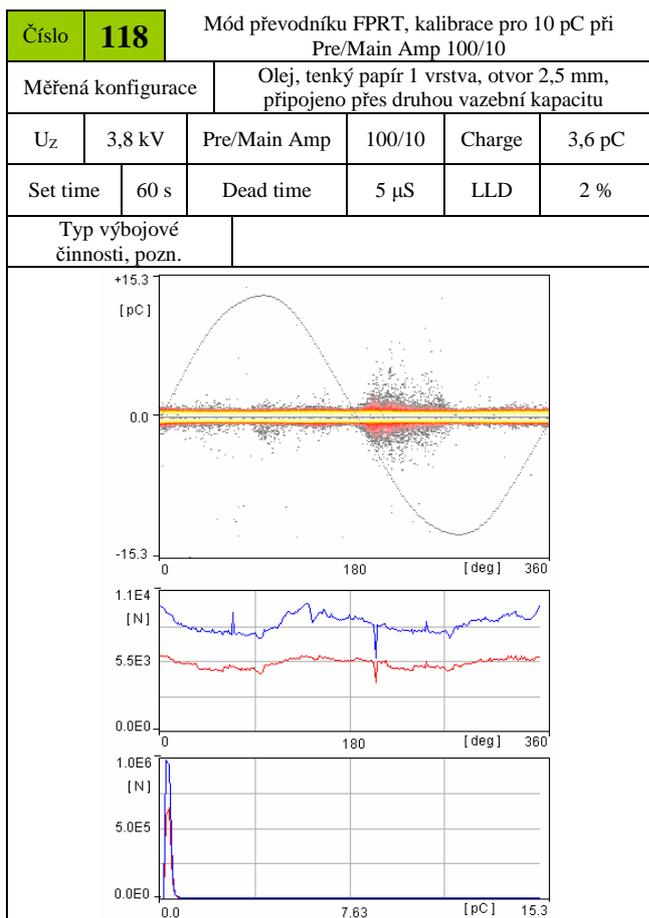


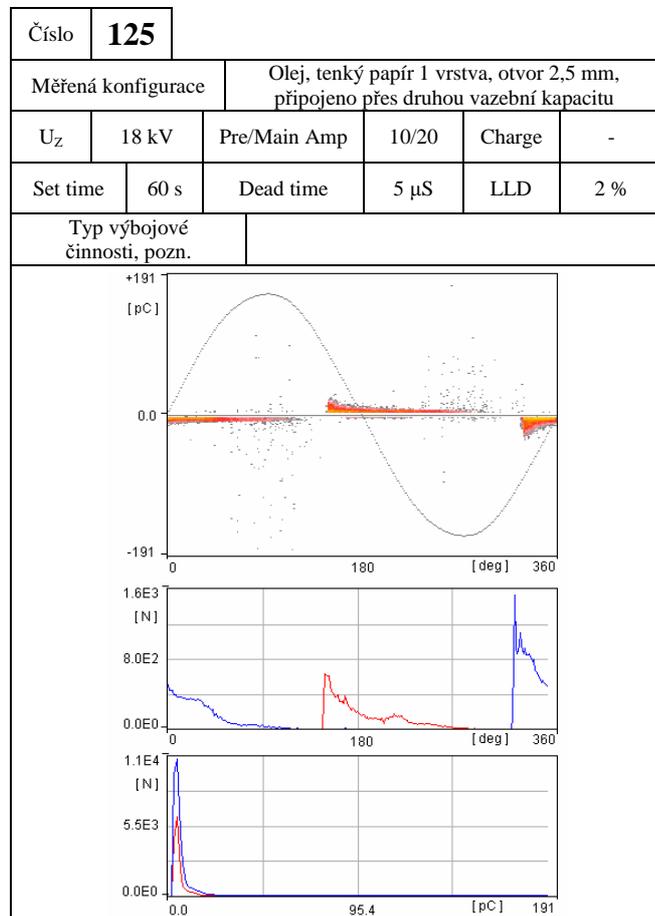
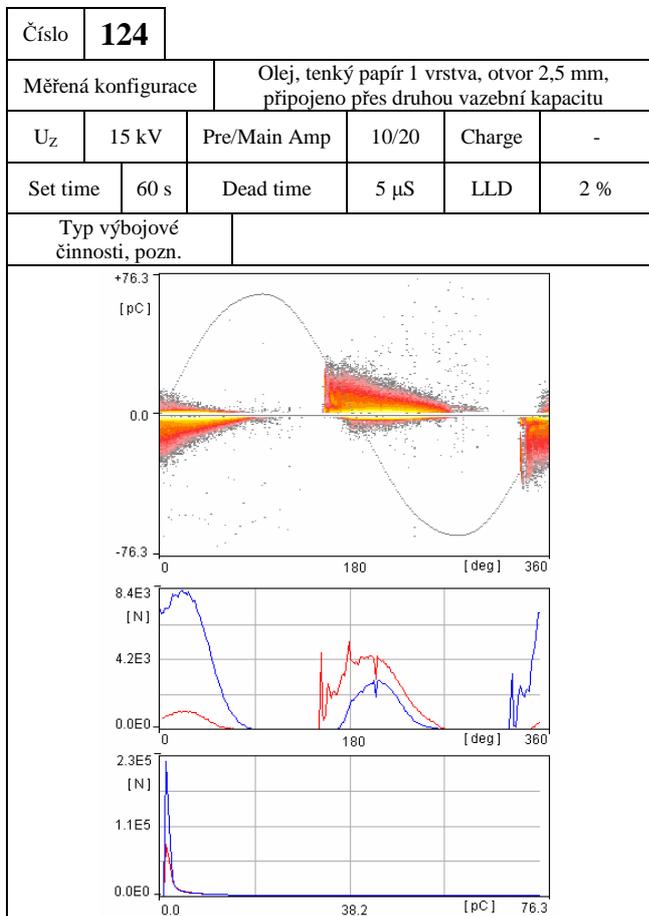
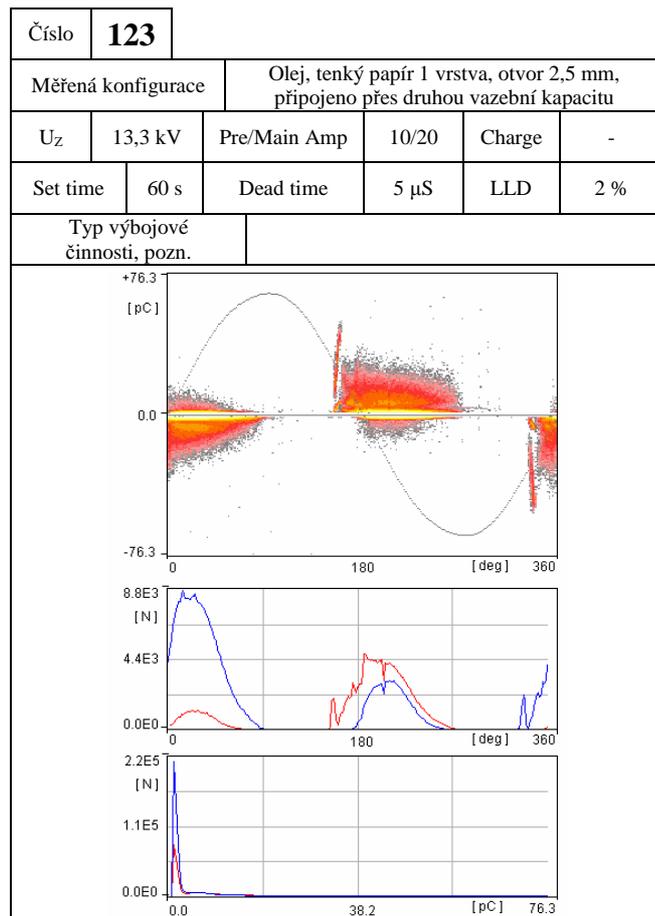
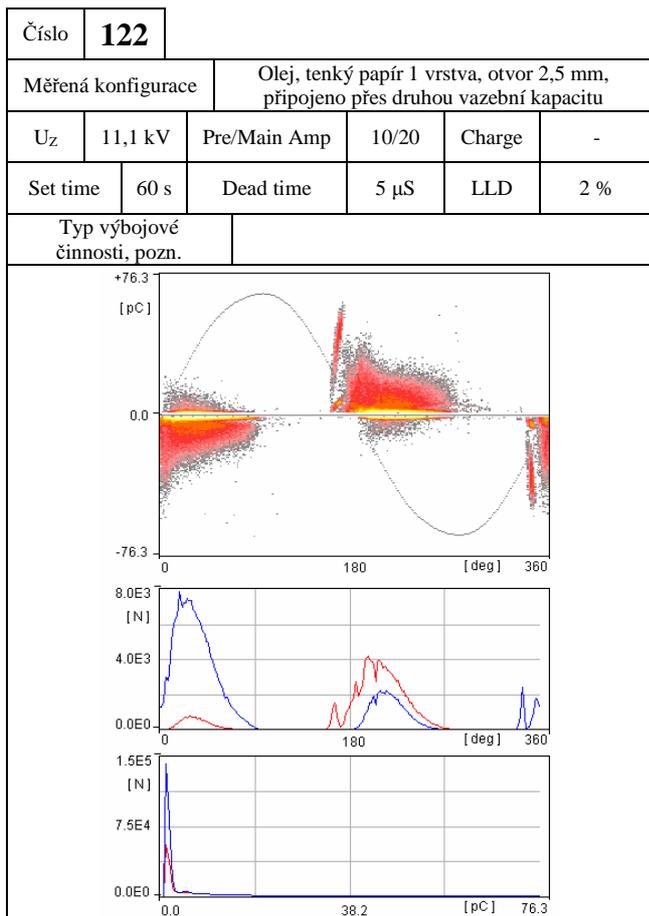


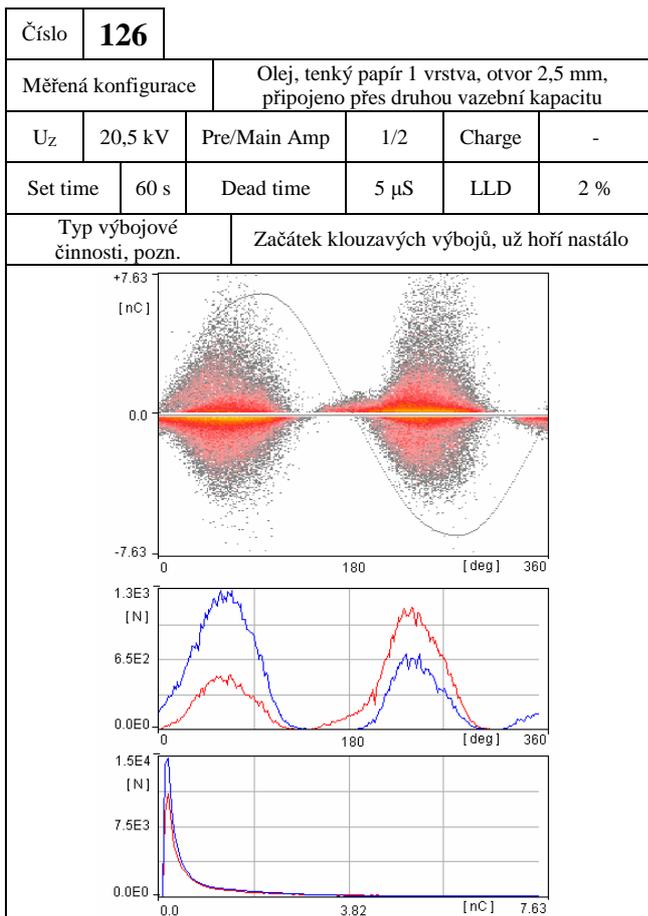


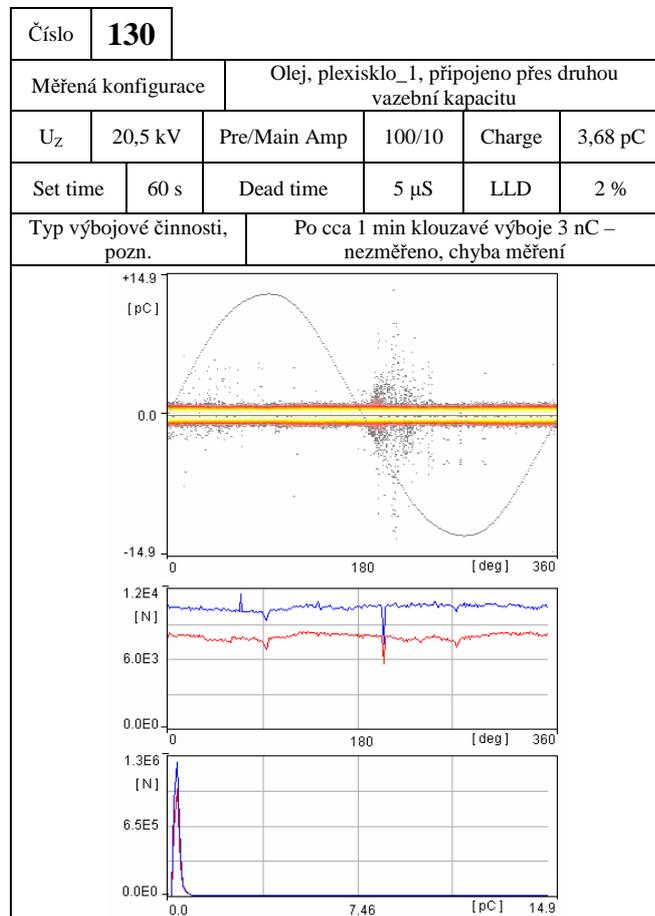
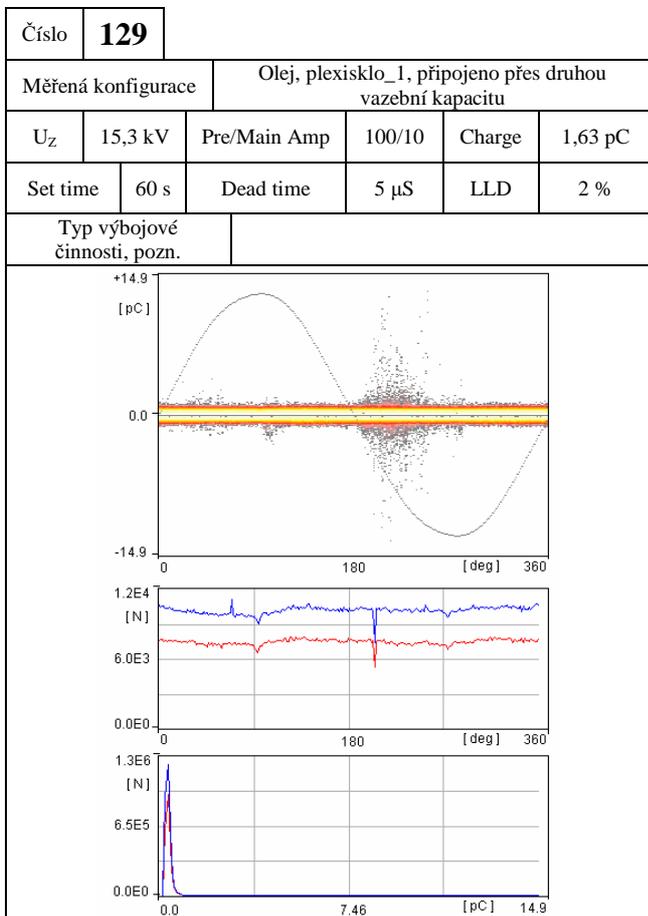
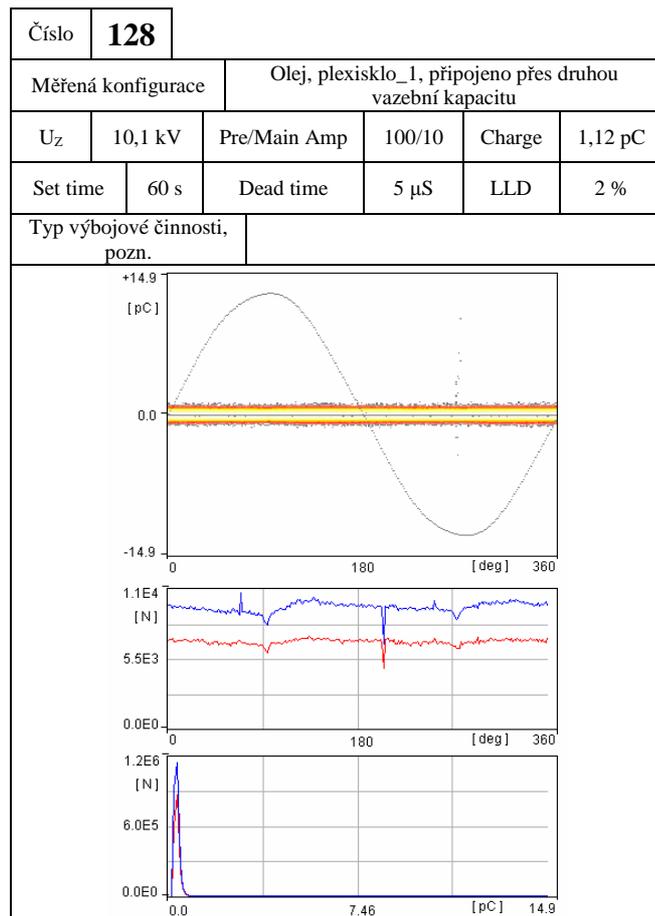
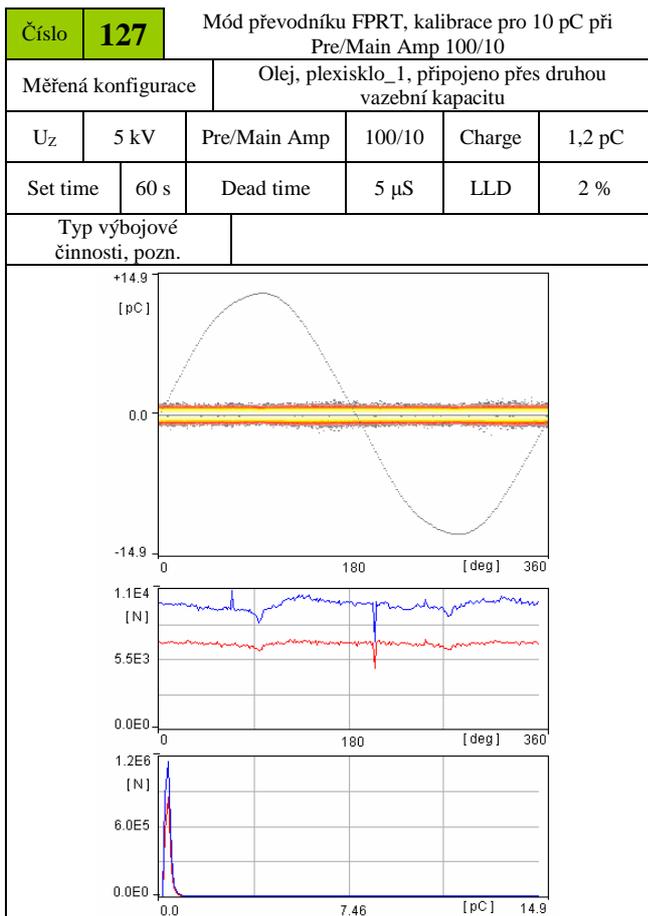


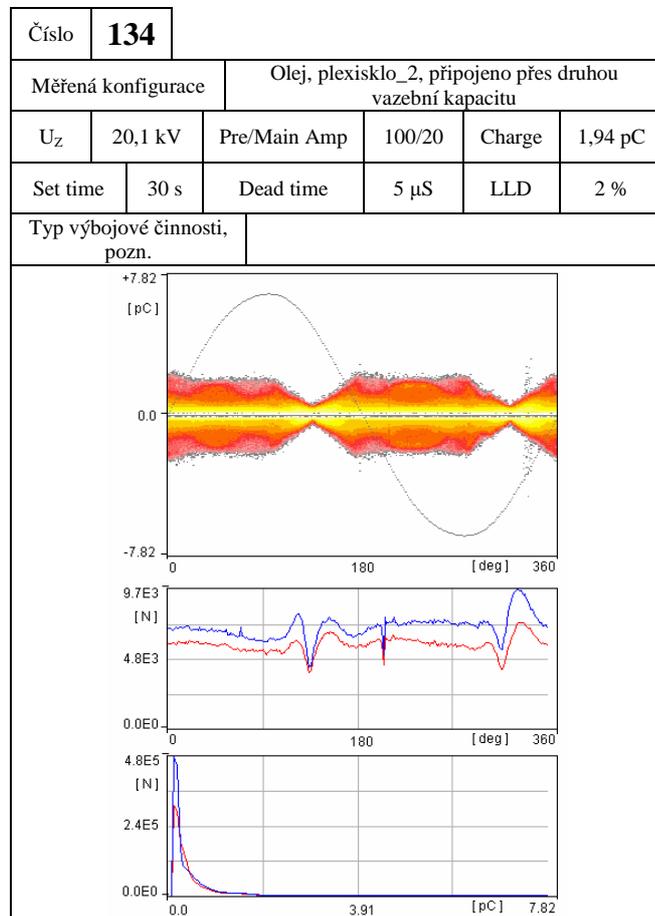
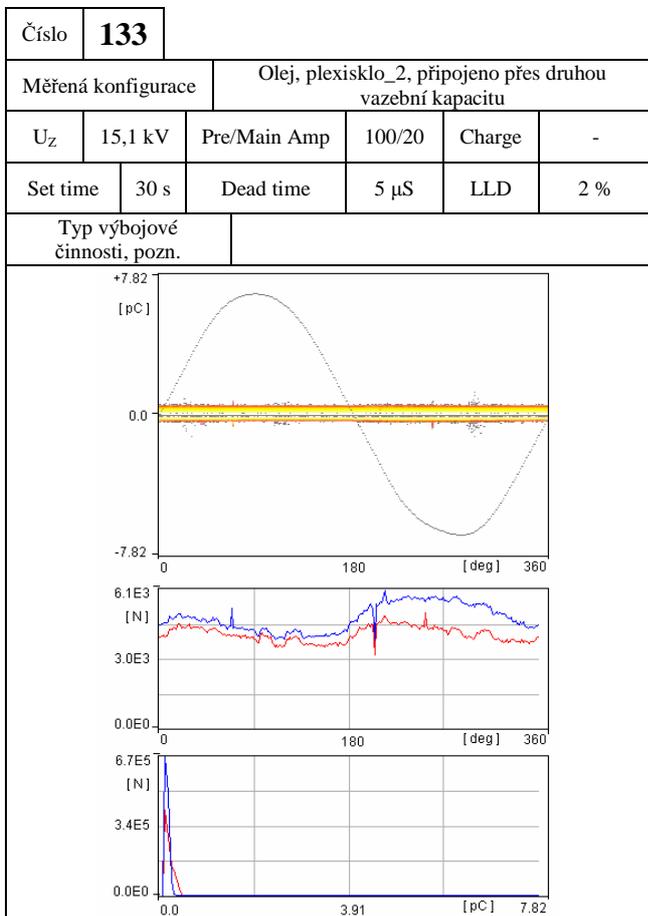
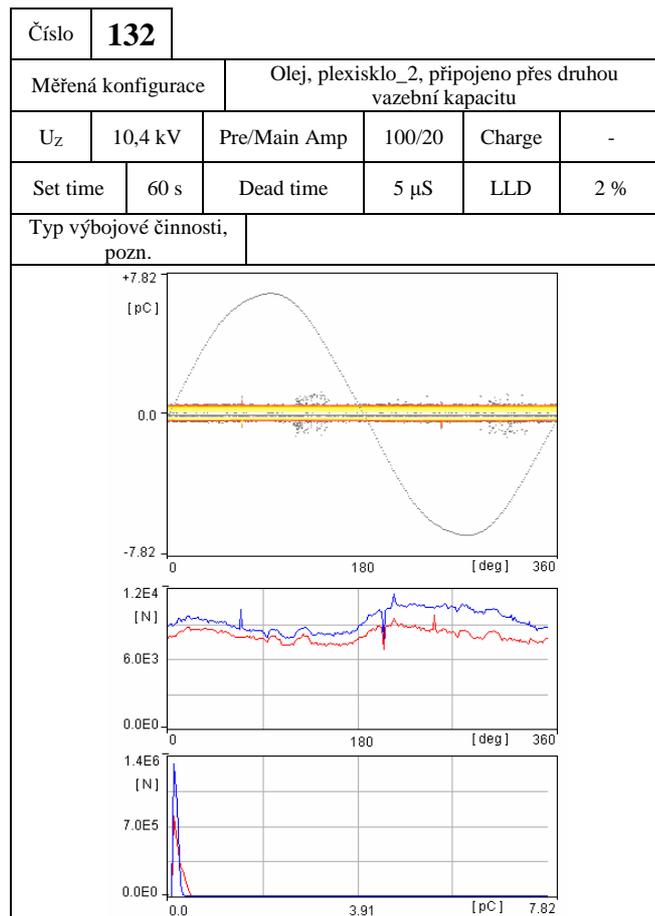
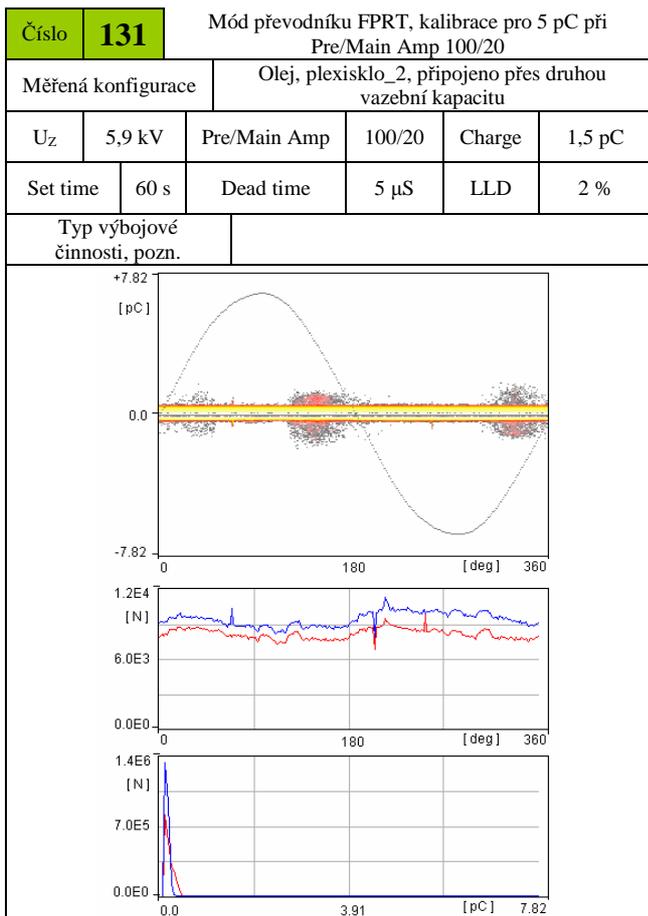


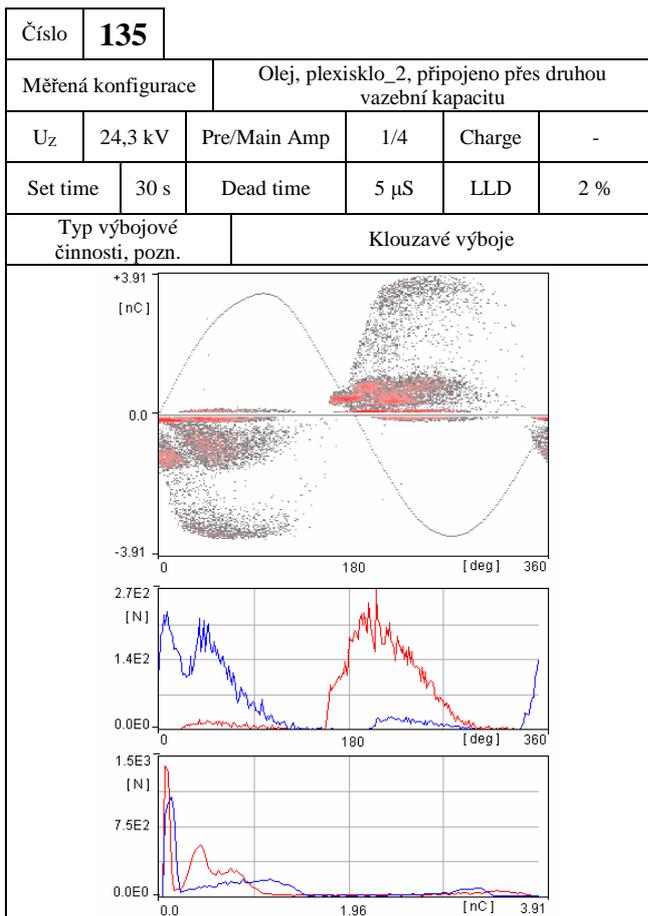


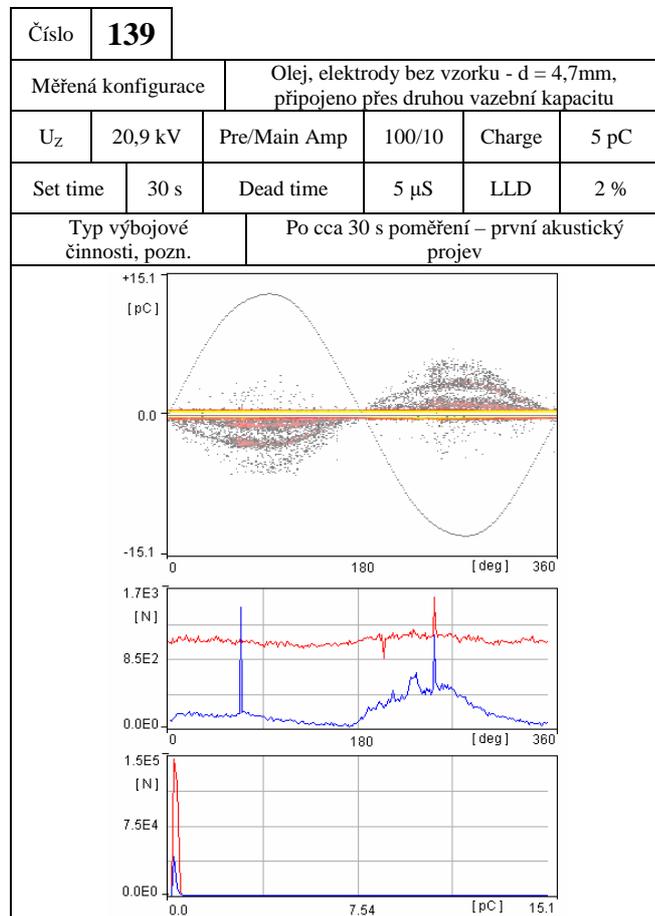
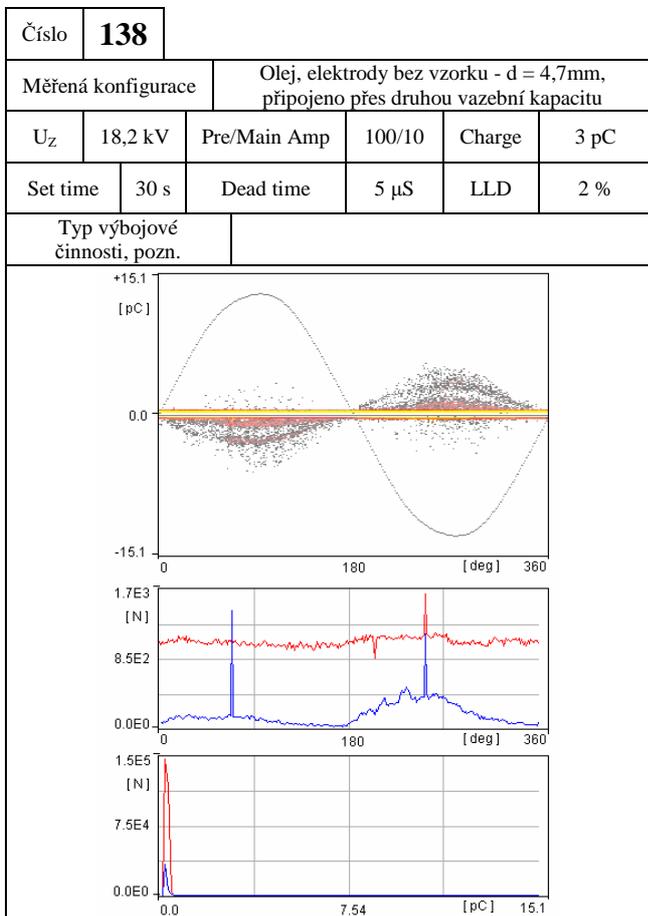
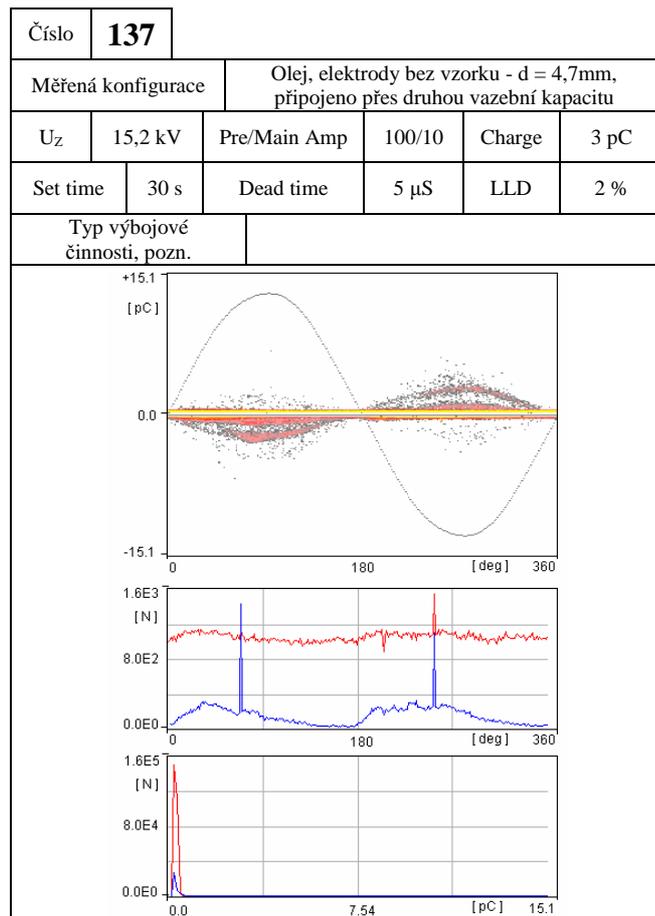
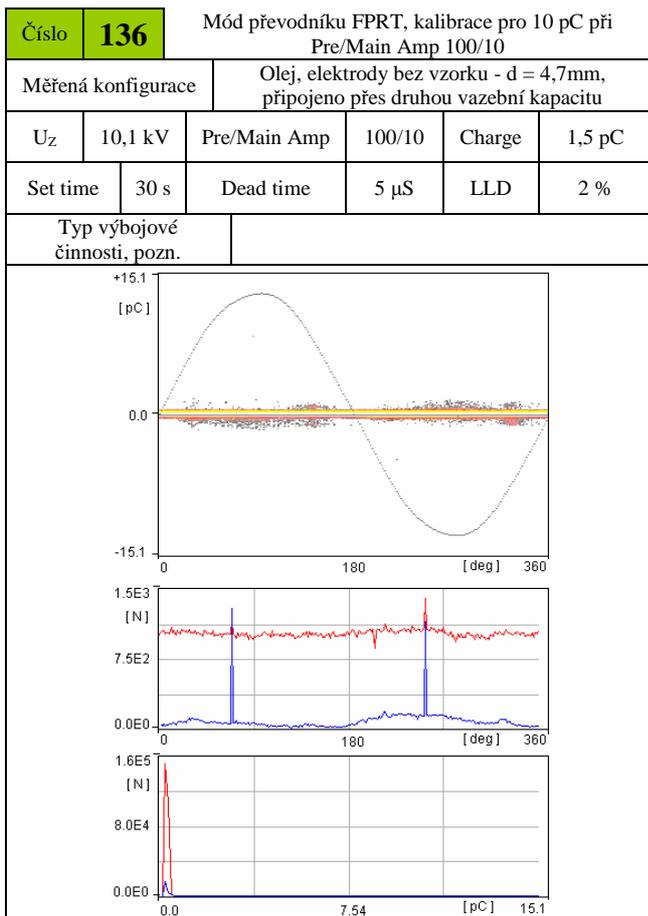


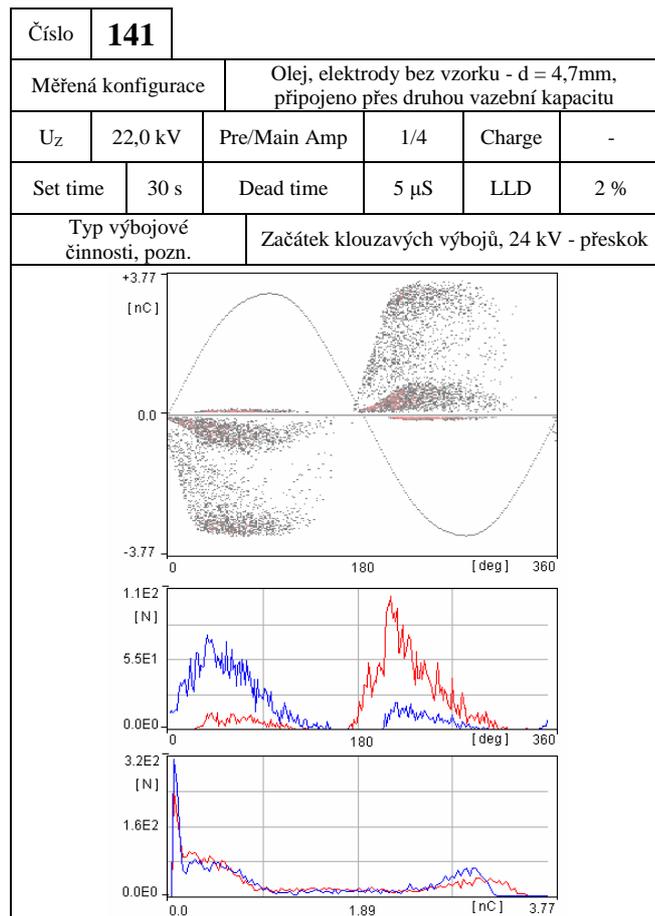
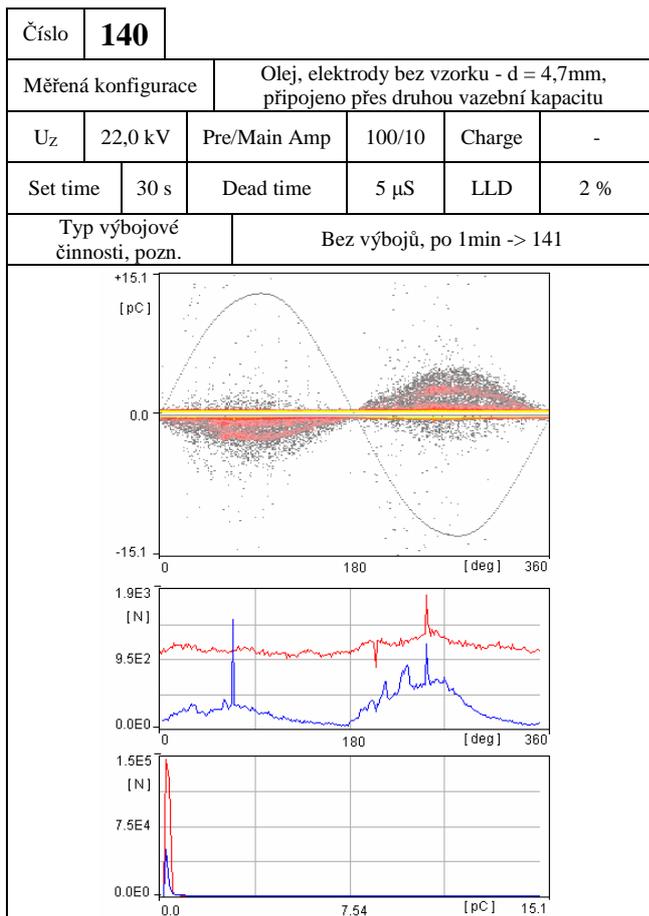


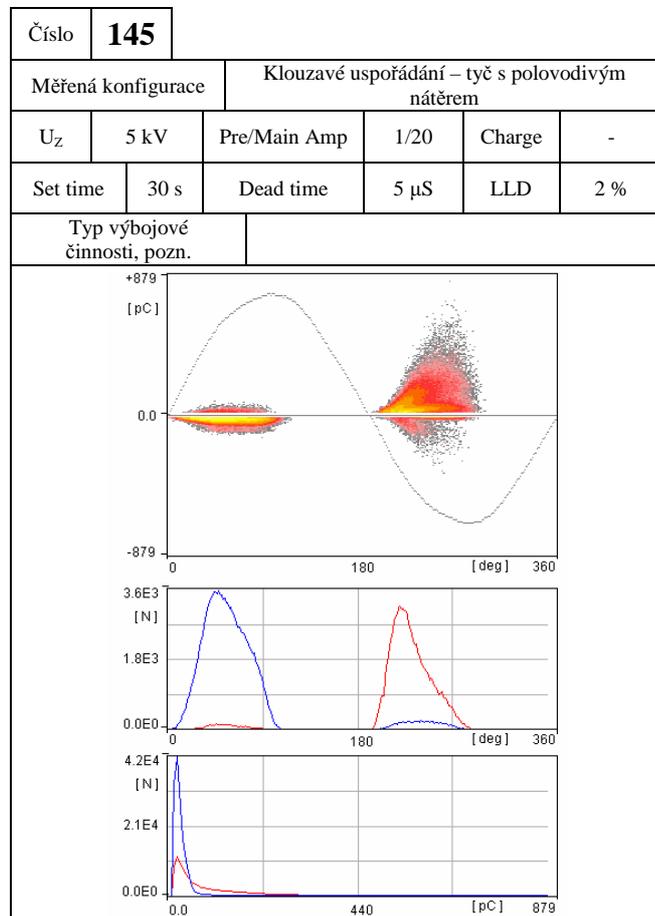
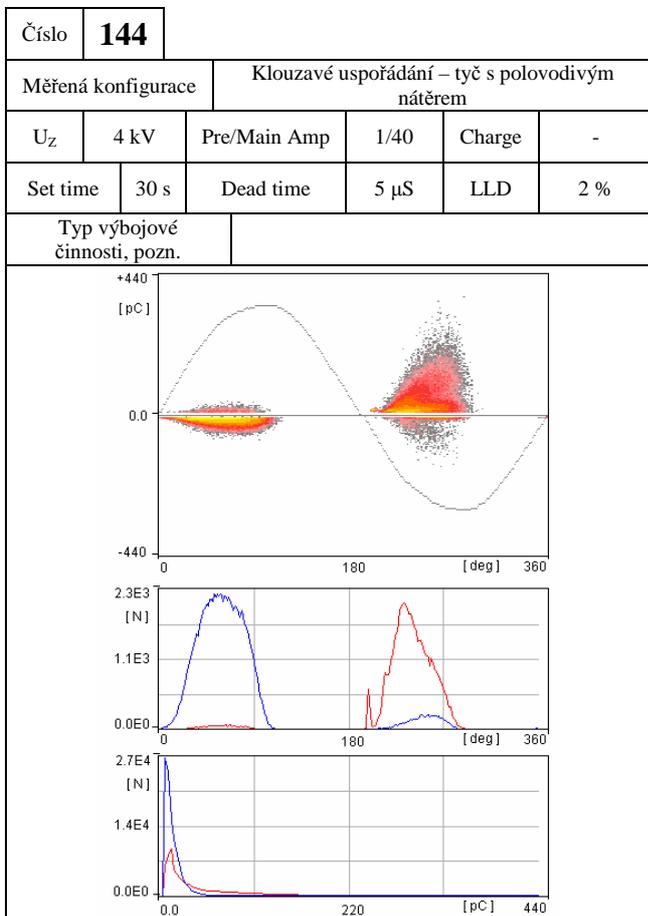
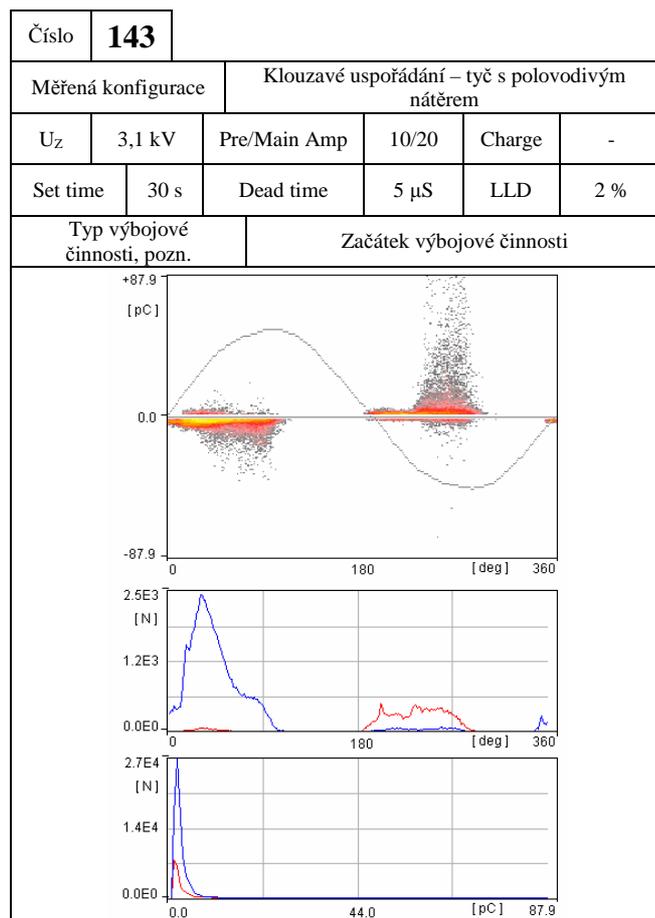
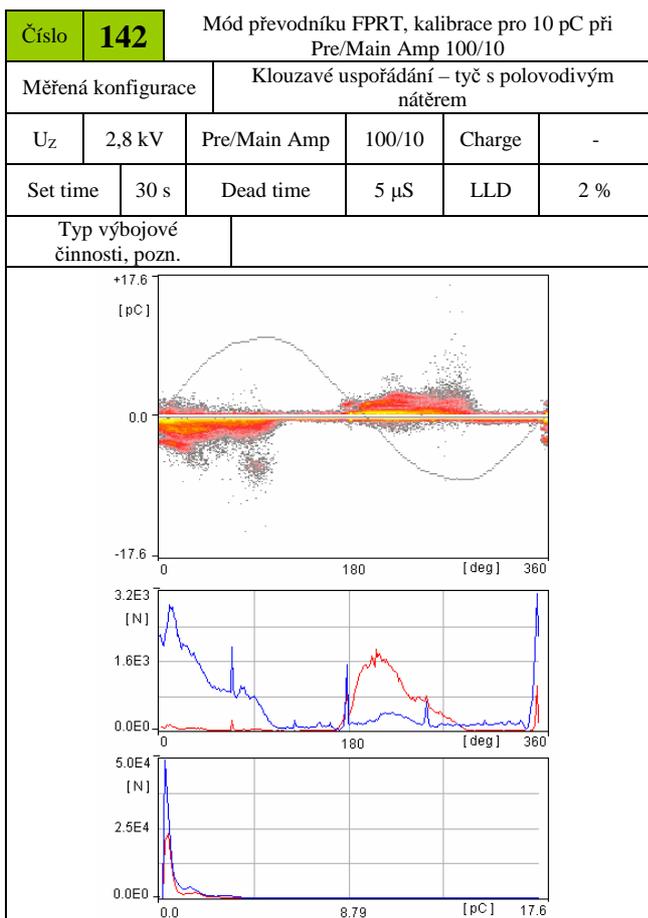


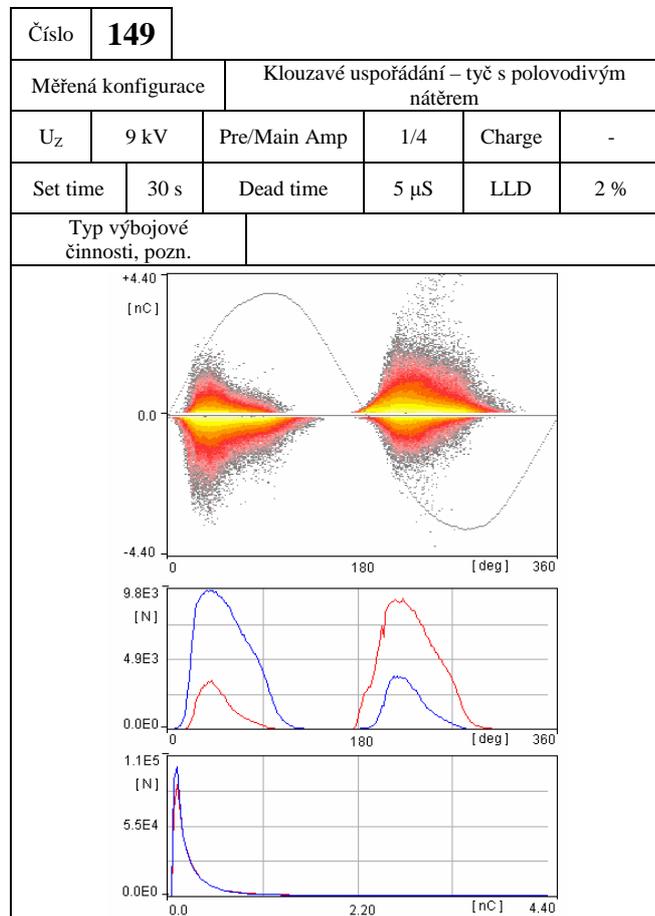
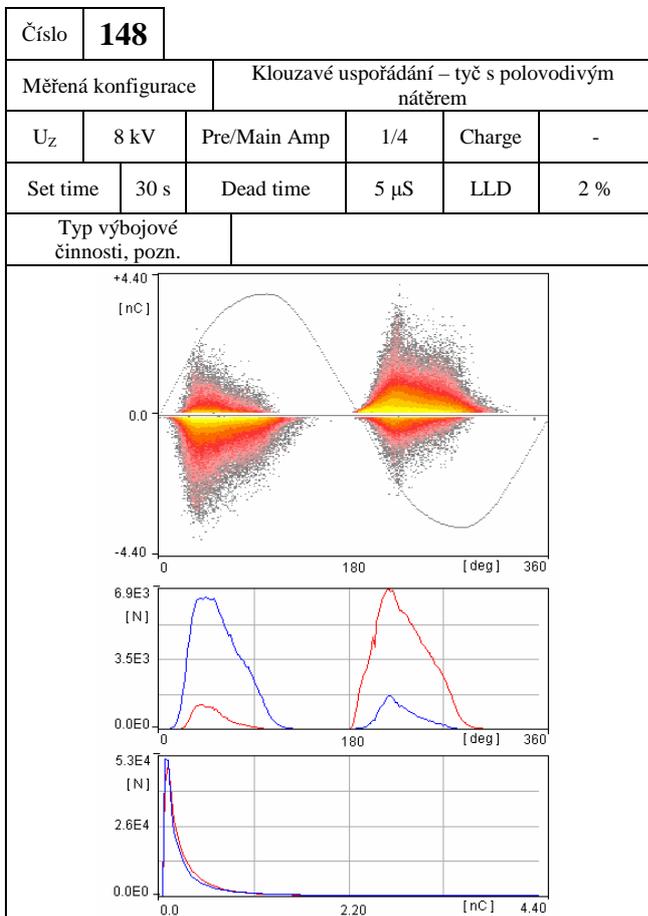
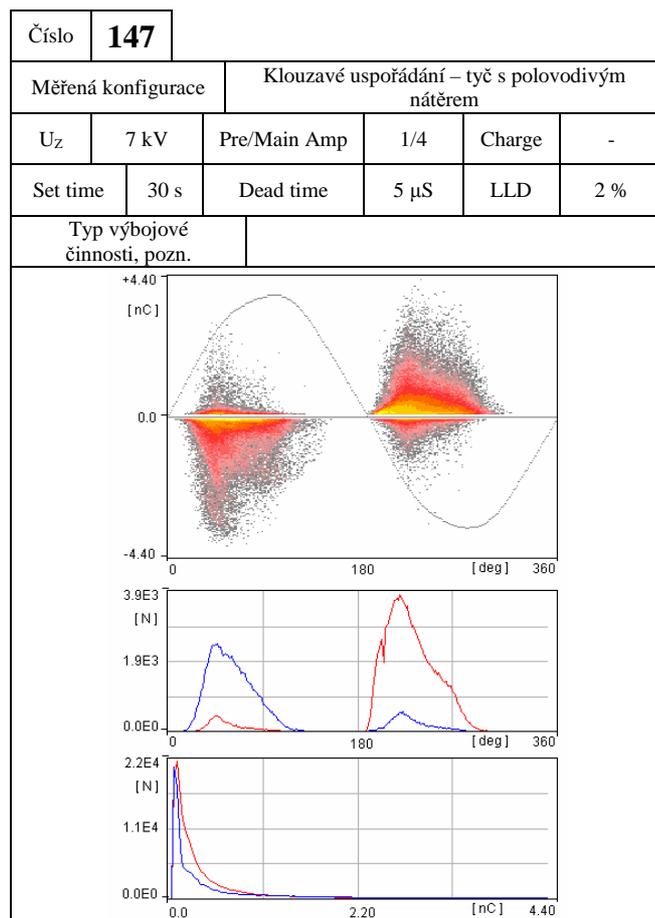
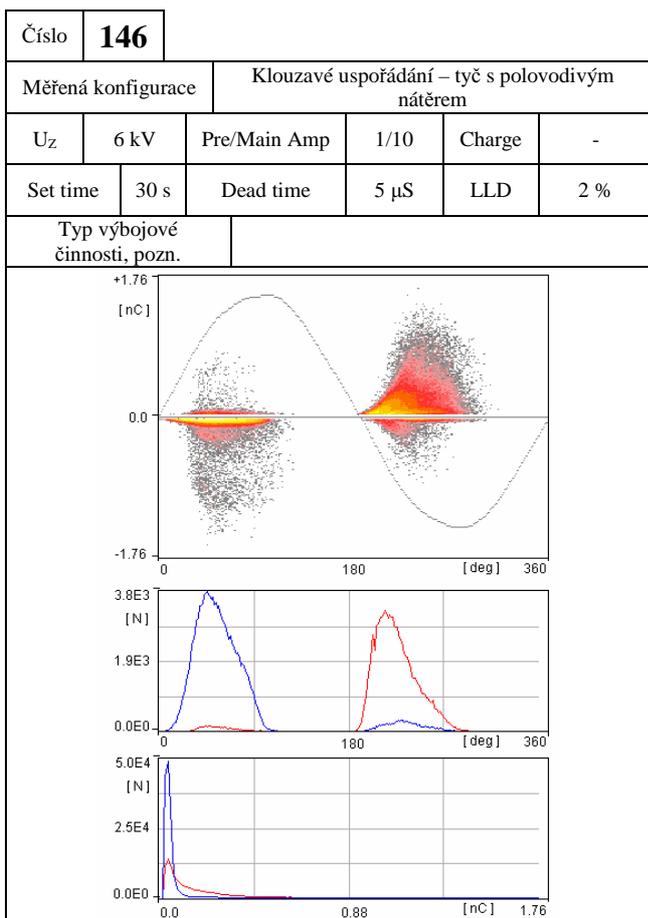


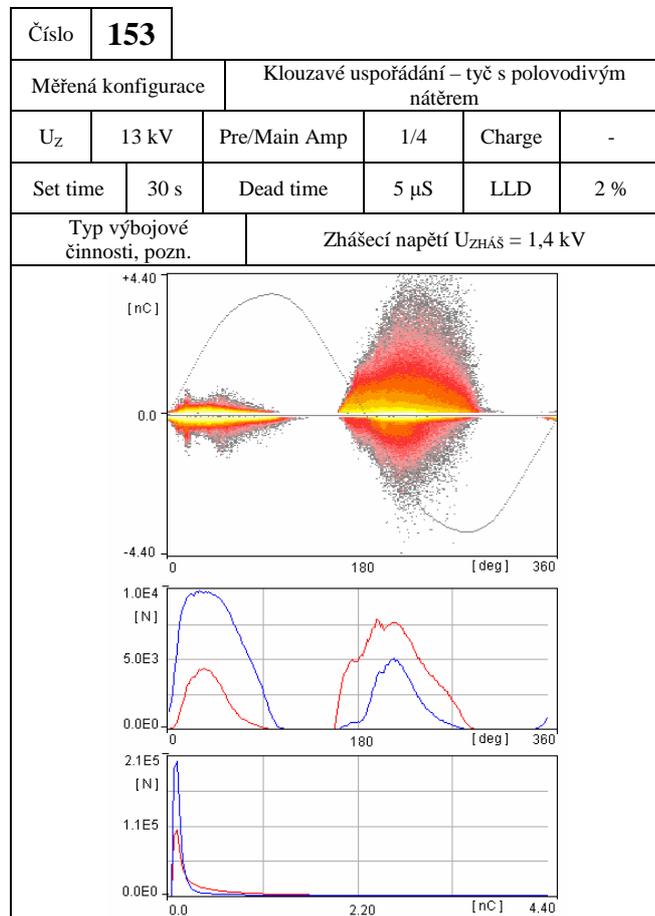
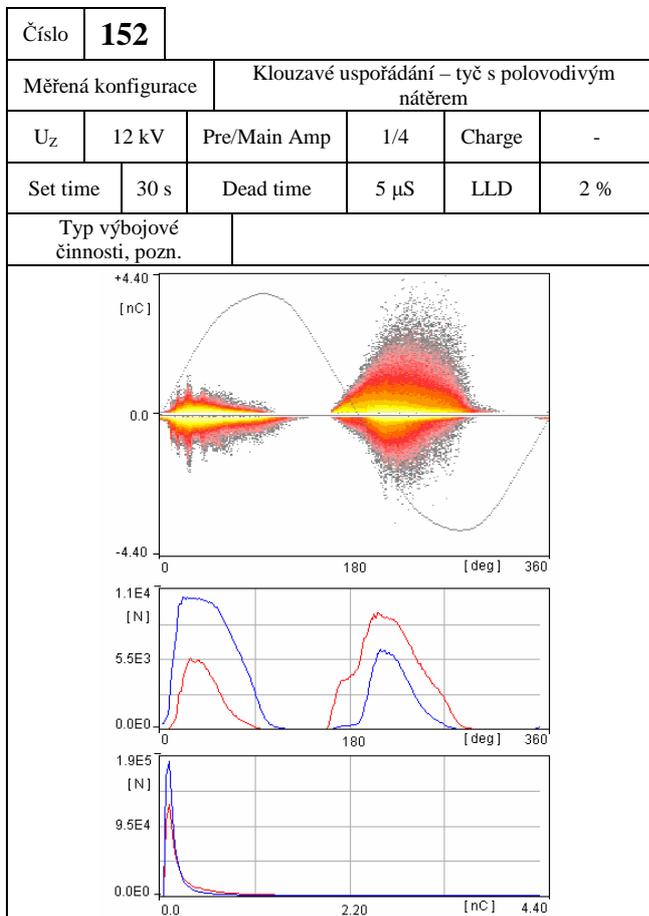
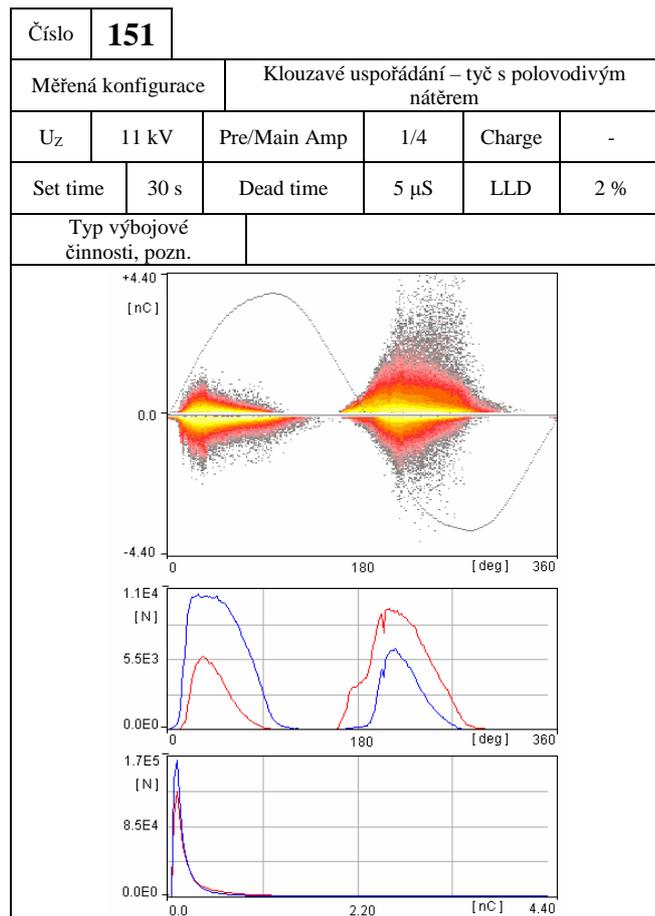
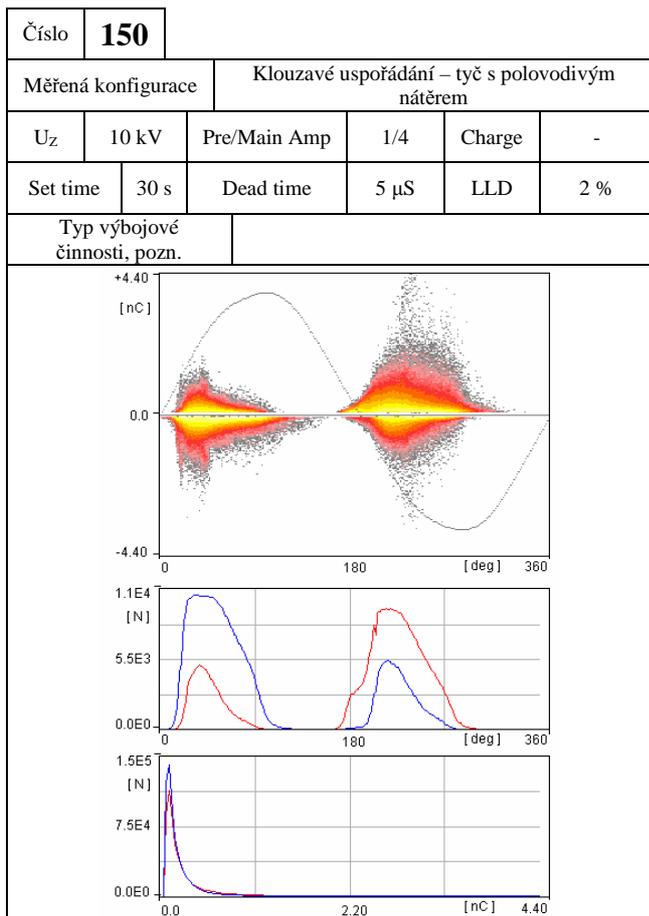


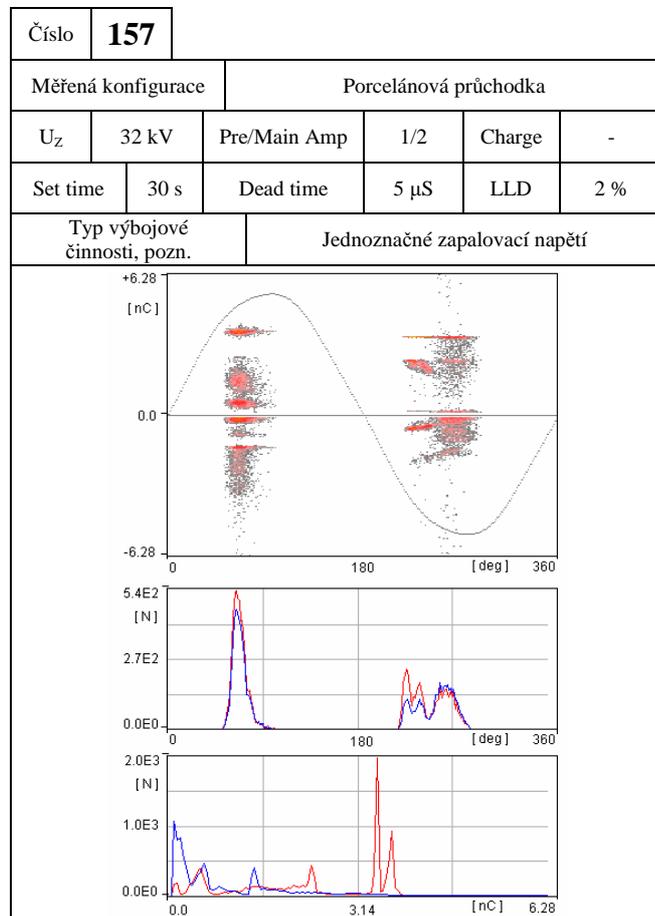
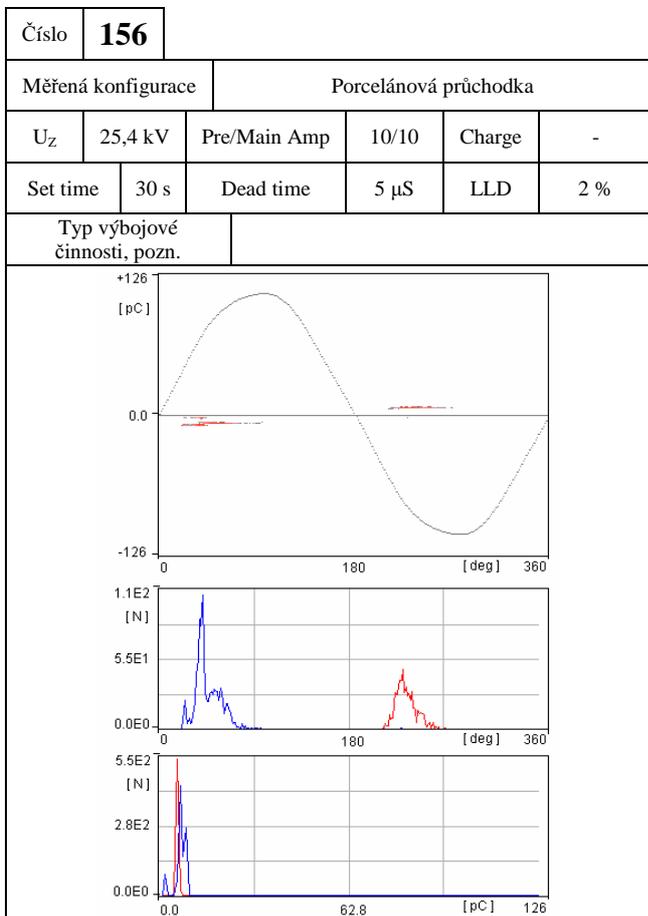
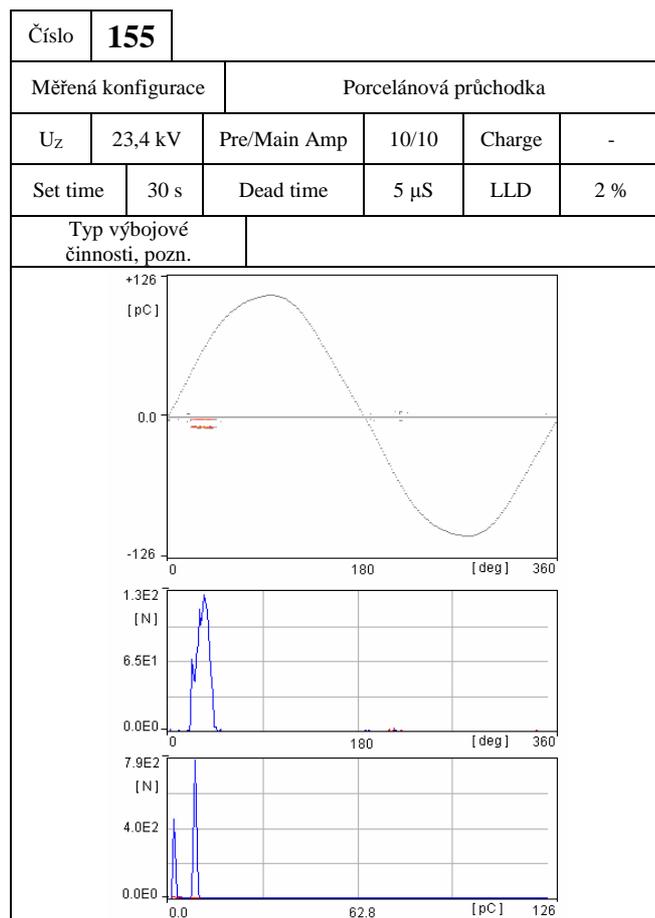
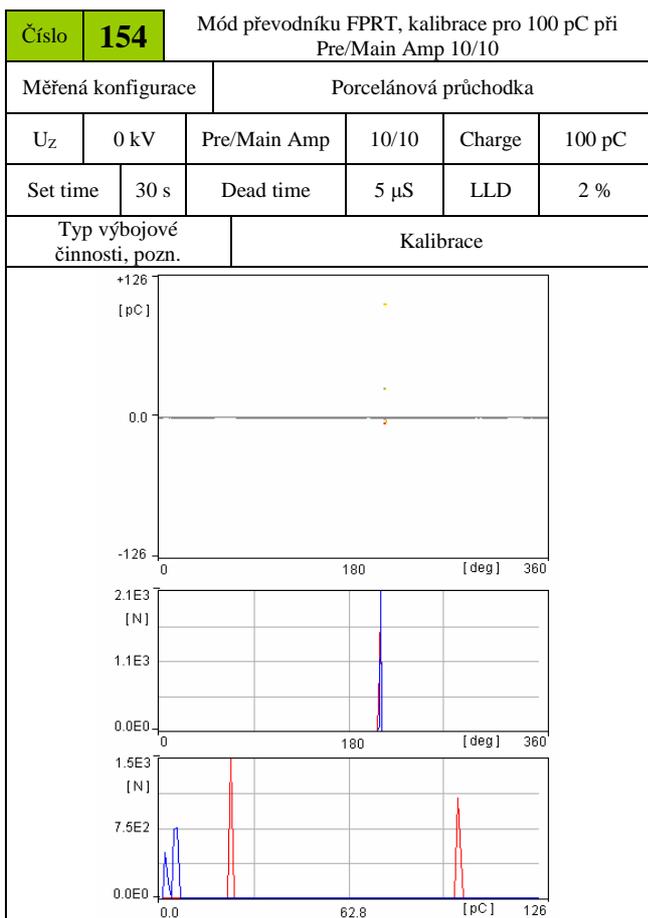


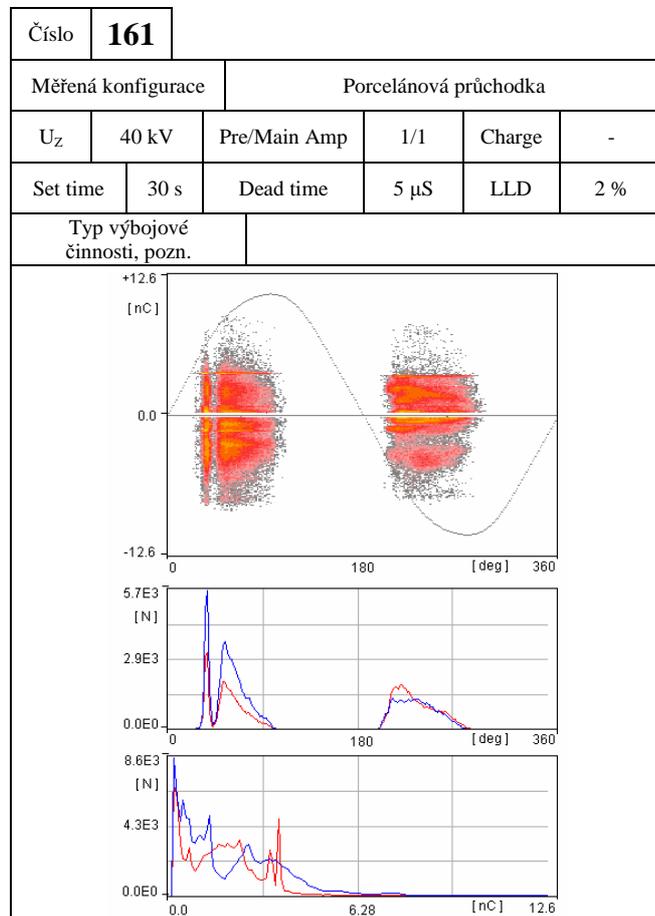
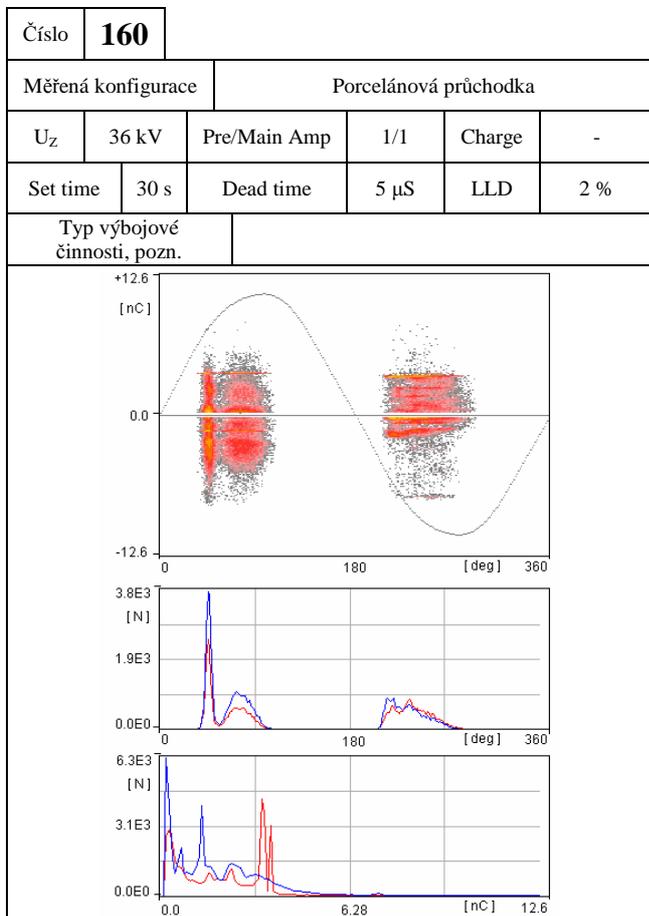
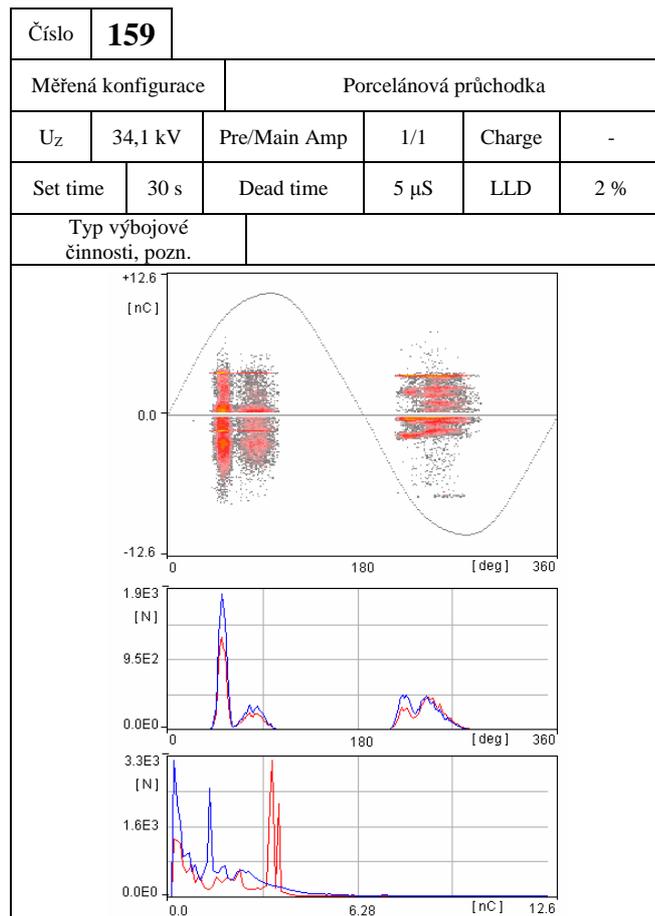
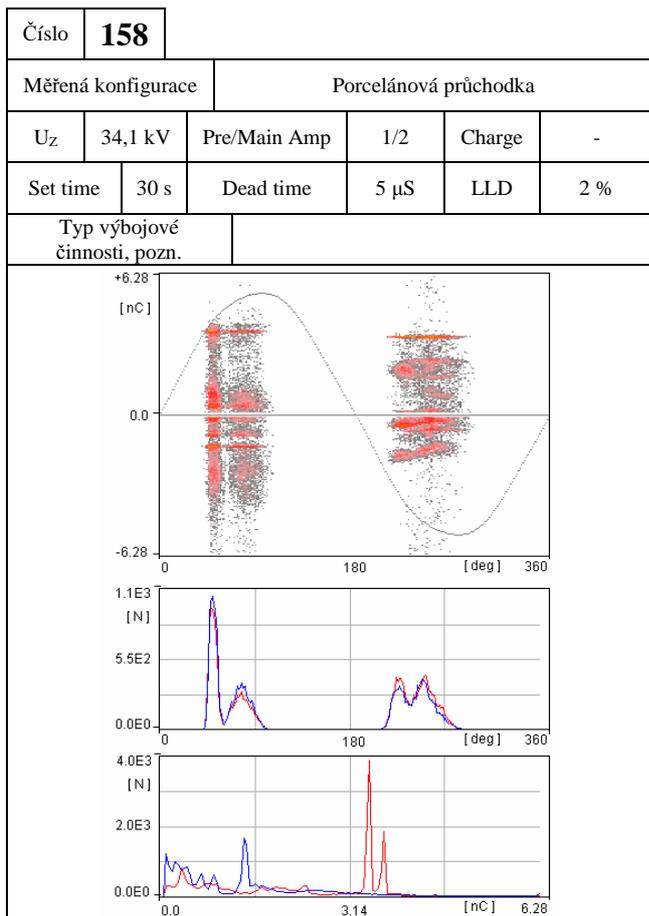


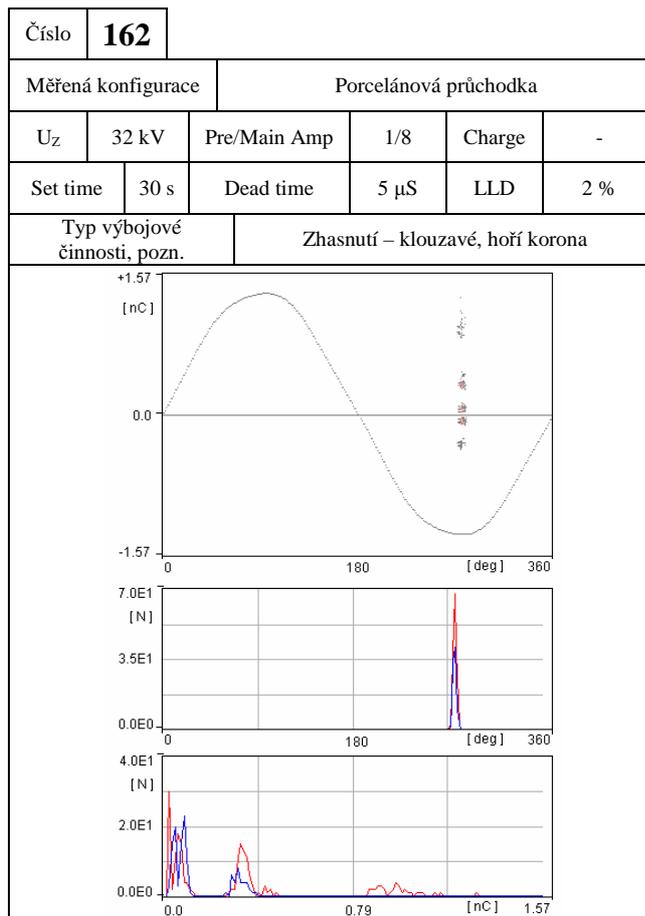






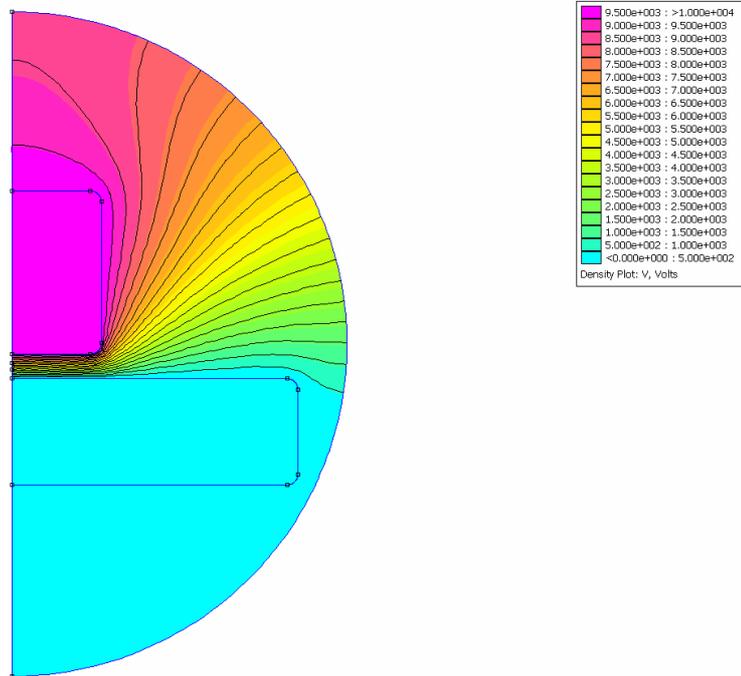




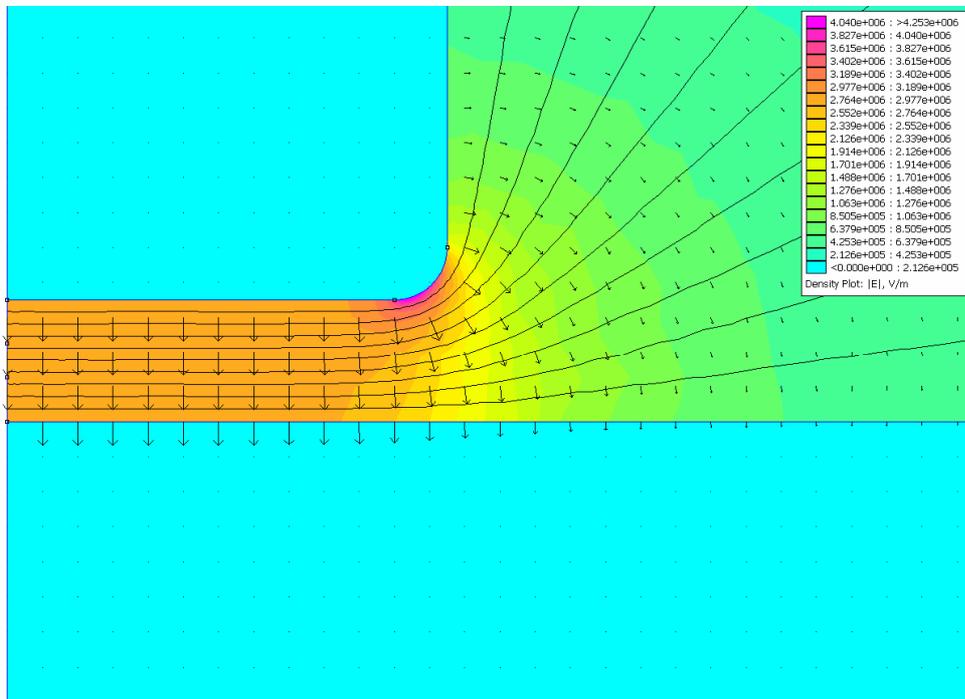


Výsledky simulací

Elektrodotový systém

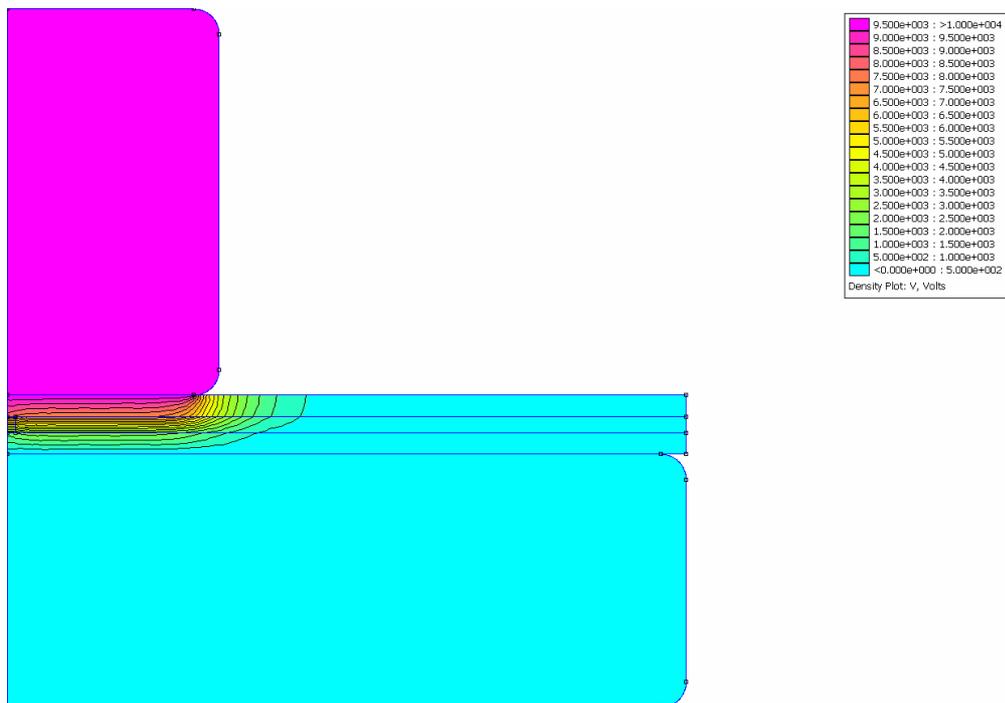


Příloha 1 Rozložení potenciálu na elektrodotovém systému

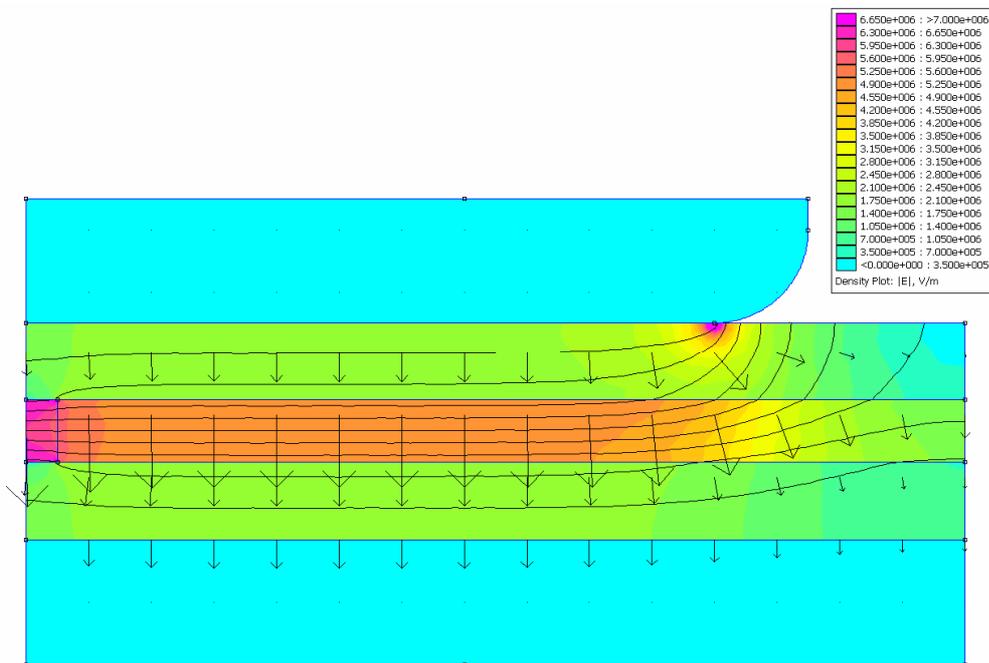


Příloha 2 Detail rozložení intenzity elektrického pole na elektrodotovém systému

Elektrodotý systém s dutinou

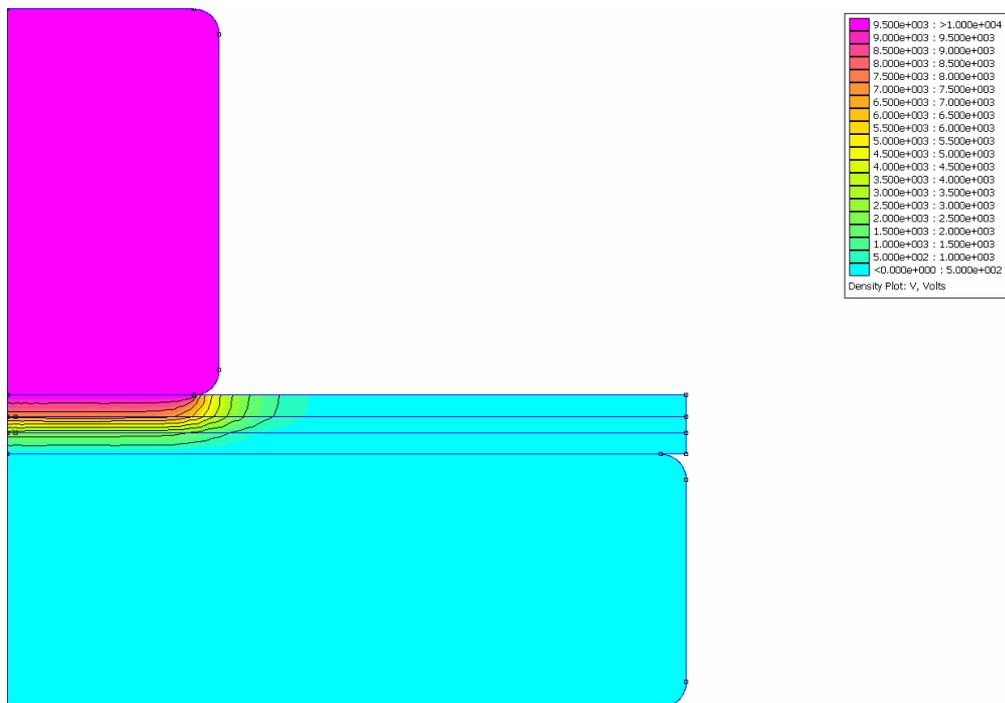


Příloha 3 Rozložení potenciálu na elektrodotém systému

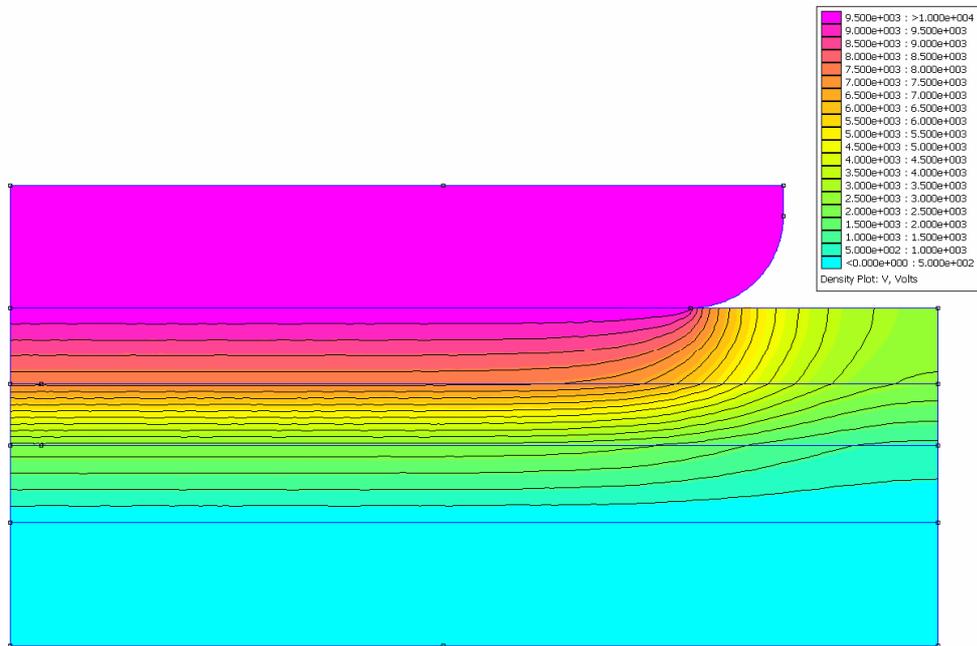


Příloha 4 Detail rozložení intenzity elektrického pole na elektrodotém systému

Elektrodotý systém bez dutiny

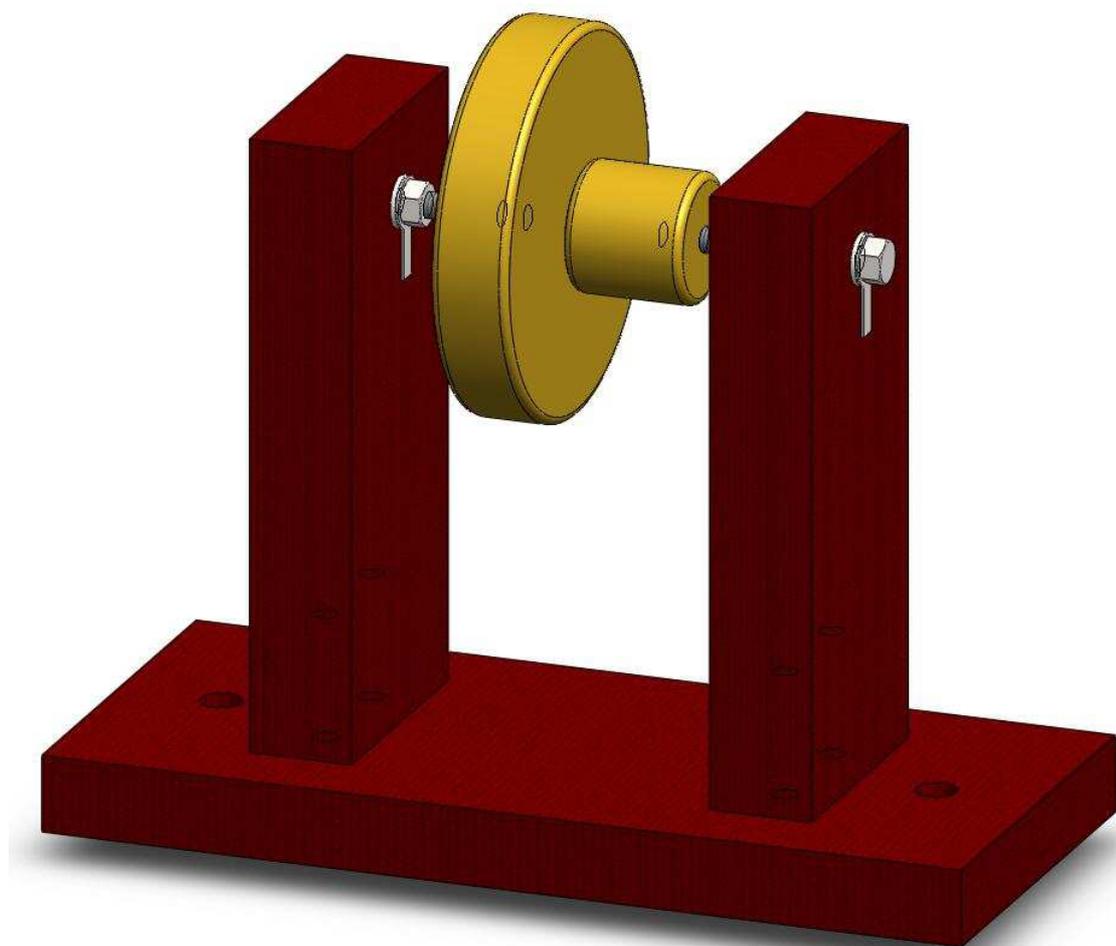


Příloha 5 Rozložení potenciálu na elektrodotém systému



Příloha 6 Detail rozložení intenzity elektrického pole na elektrodotém systému

Pohled elektrodového systému



Příloha 7 Pohled elektrodového systému