



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## ÚSTAV SOUDNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF FORENSIC ENGINEERING

## ODBOR INŽENÝRSTVÍ RIZIK

DEPARTMENT OF RISK ENGINEERING

## MODELOVÁNÍ RIZIK V INŽENÝRSKÝCH APLIKACÍCH

RISK MODELLING IN ENGINEERING APPLICATIONS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Antonín Konečný

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

RNDr. Pavel Popela, Ph.D.

BRNO 2022



# Zadání diplomové práce

Student: **Ing. Antonín Konečný**  
Studijní program: Řízení rizik technických a ekonomických systémů  
Studijní obor: Řízení rizik technických systémů  
Vedoucí práce: **RNDr. Pavel Popela, Ph.D.**  
Akademický rok: 2021/22  
Ústav/odbor: Odbor inženýrství rizik

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Modelování rizik v inženýrských aplikacích

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student využije osvojené poznatky rizikového inženýrství a aplikované matematiky (statistiky a optimalizace). Dále si prohloubí znalosti vybrané aplikační inženýrské problematiky a vhodných přístupů operačního výzkumu.

Student bude aplikovat vybrané přístupy operačního výzkumu pro sestavení modelů řešené problematiky zohledňujících vybraná rizika. Pro softwarovou implementaci připraví testovací data a získané výsledky bude interpretovat a dále analyzovat.

### Cíle diplomové práce:

1. Formulovat reálný inženýrský problém.
2. Sestavit a popsat vhodný matematický model s využitím poznatků operačního výzkumu.
3. Zaměřit se na modelování rizik.
4. Shromáždit testovací vstupní data a zpracovat je.
5. Vybrat a implementovat vhodné postupy řešení s využitím metod operačního výzkumu.
6. Získané výsledky analyzovat a formulovat závěry a doporučení.

### Seznam literatury:

Klapka, J. a kol.: Metody operačního výzkumu, Brno 2000.

Pardalos P., Resende M. Handbook of Applied Optimization, Oxford University Press, 2002.

Williams, H.P: Model Building for Mathematical Programming, 5th edition, Wiley and Sons, 2013.

Nash, S. et al. (1995): Linear and nonlinear programming. McGraw-Hill.

Andel, J.: Statistické metody. 2. vyd., Matfyzpress, Praha, 1998.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Karel Pospíšil, Ph.D., LL.M.  
ředitel

### **Abstrakt**

Diplomová práce je zaměřena na modelování rizik v inženýrské aplikaci. Využity jsou poznatky získané ze statistických metod operačního výzkumu, konkrétně regresní analýzy. Analyzovány jsou elektrické veličiny, měřené na statorovém vinutí elektrického stroje (generátoru). Regresní analýza a testování statistických hypotéz je provedeno v softwaru Statgraphics.

Výsledky úspěšnosti regresní analýzy snižující související rizika jsou podrobně dokumentovány a regresní křivky vizualizovány v grafech. Jsou formulovány závěry a doporučení k jednotlivým generátorům, ale i obecného charakteru.

### **Klíčová slova**

operační výzkum, statistické metody, regresní analýza, technická diagnostika, elektrodiagnostika, izolační odpor, polarizační index, ztrátový činitel, kapacita, rizikové inženýrství, management rizik, Statgraphics

### **Abstract**

The diploma thesis focuses on risk modelling in engineering applications. The knowledge obtained from statistical methods of operational research, specifically regression analysis, is used. Electrical quantities measured on the stator winding of an electrical machine (generator) are analyzed. Regression analysis and statistical hypothesis testing is performed in Statgraphics software.

The success results of the regression analysis for risk reduction are documented in detail and the regression curves are visualized in graphs. Conclusions and recommendations for each generator, as well as general ones, are formulated.

### **Keywords**

Operation research, Statistical methods, Regression analysis, Technical diagnostics, Electrodiagnostics, Isolation resistance, Polarization index, Dielectric loss, Capacitance, Risk engineering, Risk management, Statgraphics



### ***Bibliografická citace***

KONEČNÝ, Antonín. Modelování rizik v inženýrských aplikacích. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129946>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, Odbor inženýrství rizik. Vedoucí práce RNDr. Pavel Popela, Ph.D.





# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení autora:</b>	Ing. Antonín Konečný
<b>VUT ID autora:</b>	191435
<b>Typ práce:</b>	Diplomová práce
<b>Akademický rok:</b>	2021/2022
<b>Téma závěrečné práce:</b>	Modelování rizik v inženýrských aplikacích

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

Podpis autora\*

---

\* Autor se podepisuje pouze v tištěné verzi



### *PODĚKOVÁNÍ*

Dík náleží těm, kteří mi pomáhali při tvorbě této práce! Jejich trpělivost, vstřícnost, znalosti a laskavost jsou mi vzorem. Ztotožňuji se s výrokem Tomáš Sedláčka: „Největší dík náleží tomu, jehož skutečné jméno neznám.“



# OBSAH

OBSAH .....	13
1 ÚVOD.....	15
2 PROBLÉM A JEHO NÁVRH ŘEŠENÍ.....	17
3 SOUČASNÝ STAV .....	19
3.1 Generátor.....	19
3.2 Technická diagnostika .....	20
3.3 Elektrodiagnostika.....	21
3.3.1 Polarizační index.....	22
3.3.2 Ztrátový činitel $\tan \delta$ a kapacita $C$ .....	24
3.4 Statistické metody operačního výzkumu .....	26
3.4.1 Regresní analýza.....	27
3.4.2 Testování statistické hypotézy – optimalizace počtu měření.....	30
3.4.3 Predikce – placebo efekt.....	32
3.5 Rizikologie .....	33
3.6 SW prostředky .....	36
4 ANALYZOVANÁ DATA .....	37
5 VLASTNÍ ŘEŠENÍ.....	39
5.1 Analýza generátorů G1 a G2 .....	39
5.1.1 Generátor G1.....	40
5.1.2 Generátor G2.....	44
5.1.3 Porovnání generátorů G1 a G2 .....	48
5.2 Analýza generátorů G3 a G4.....	50
5.2.1 Generátor G3.....	50
5.2.2 Generátor G4.....	54
5.2.3 Porovnání generátorů G3 a G4 .....	59
5.3 Predikce hodnoty polarizačního indexu .....	60
5.3.1 Generátor G1.....	60
5.3.2 Generátor G2.....	61
5.3.3 Generátor G3.....	62
5.3.4 Generátor G4.....	63
5.4 Optimalizace počtu měření .....	64
5.4.1 Kapacita .....	64
5.4.2 Ztrátový činitel.....	66

6 VLASTNÍ ZÁVĚR A DOPORUČENÍ .....	69
7 ZÁVĚR .....	71
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	73
SEZNAM TABULEK.....	77
SEZNAM GRAFŮ.....	79
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	81
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	83
SEZNAM PŘÍLOH .....	85

# 1 ÚVOD

V současné době prochází odvětví průmyslu výroby elektrické energie těžkými zkouškami, ať už s příchodem politických iniciativ Zelená dohoda pro Evropu (angl. – *European Green Deal*) nebo konstantním zvyšování poptávky po elektrické energii. V této souvislosti provozovatele zajisté zajímá spolehlivost strojů a zařízení, kde jsme schopni se dostat od kvality produktu, přes spolehlivost, až k požadavkům na diagnostikovatelnost<sup>1</sup>. I v souvislosti s moderními přístupy Průmyslu 4.0 a zapojení on-line diagnostických systémů, stojí technická diagnostika a údržba zařízení na předních místech zájmu managementu společností. Údržba a technická diagnostika ovlivňují zisk společností a také jejich konkurenceschopnost.

Výše uvedené se v energetice týká významné komponenty pro výrobu elektrické energie – generátoru. Na nashromážděných datech z provedené technické diagnostiky za sledované období, budou aplikovány statistické metody operačního výzkumu. Jednou z metod operačního výzkumu je regresní analýza, která má za cíl nalezení vhodné křivky, která bude popisovat závislost měřených veličin. Po úspěšném nalezení takovéto křivky se budeme snažit předpokládat vývoj sledované veličiny v následujícím roce. V práci bude provedeno testování statistických hypotéz, které budou podkladem pro rozhodnutí, zdali můžeme snížit celkový počet prováděných měření veličin v závislosti na zkušebním napětí. Tímto by bylo možné snížit cenu za provedenou technickou diagnostiku bez zvýšení rizik.

V praktické části se postupně aplikují všechny metody popsané v teoretické rešerši statistických metod operačního výzkumu a vytvoří se dílčí závěry, které budou srovnávat jednotlivé generátory se shodným konstrukčním výkonem. V závěru práce budou formulovány závěry a doporučení. Přílohy budou obsahovat kompletní dokumentaci všech provedených regresních analýz a výpočtů.

---

<sup>1</sup> Poutavě je toto téma zpracováno v druhé kapitole autorovy práce viz. [31]





## 2 PROBLÉM A JEHO NÁVRH ŘEŠENÍ

Cílem je na shromážděných datech z reálného provozu elektrických generátorů aplikovat metody operačního výzkumu a poznatků z inženýrství rizik. Data jsou konkrétně pořízená při provádění technické diagnostiky na vinutí statorů generátorů v ČR za období přibližně 17 let. K dispozici jsou celkem čtyři generátory ze dvou různých výkonostních řad (konstrukční výkon generátoru). Z důvodu uchování důvěrných firemních informací zdroj není uveden.

V teoretické části bude provedena rešerše současného stavu s popisem technické diagnostiky, kapitola bude věnována elektrodiagnostice a veličinám, které jsou měřeny a vyhodnocovány v rámci praktické části předložené práce. Regresní analýza bude řešena pomocí vybraného počítačového softwaru, který by měl zvládnout i testování statistických hypotéz.

Těžiště praktické části bude ve zpracování regresní analýzy sledovaných, diagnostických veličin a za pomoci matematického aparátu bude navržen způsob, jakým by bylo možné prognózovat vývoj měřené veličiny v následujících letech. Dále se práce bude věnovat možnostem ušetření finančních prostředků za prováděnou technickou diagnostiku. Testována bude možnost snížení doby potřebné k provedení technické diagnostiky pomocí snížení celkového počtu provedených měření sledovaných veličin. Z obdržených výsledků praktické části formulovat závěry a navrhnout doporučení k řešeným problémům. Kompletní dokumentace praktické části bude součástí příloh.

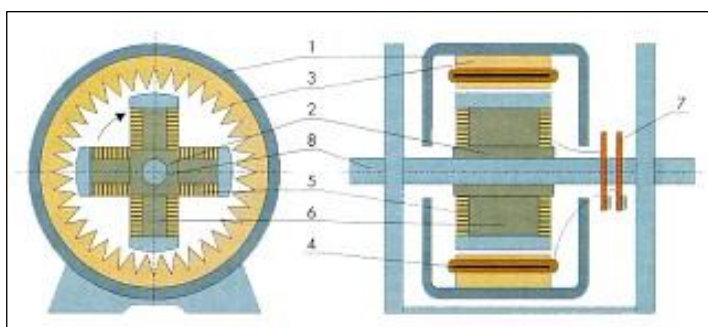


## 3 SOUČASNÝ STAV

V následujících kapitolách bude shrnuta podstatná rešerše související se současným stavem problematiky, které se věnuje tato práce. Pozornost je věnována objektu diagnostiky – generátoru, dále je popsán současný stav technické diagnostiky s důležitými definicemi a pojmy. Rozebrány jsou elektrické veličiny, které mají zásadní vliv na hodnocení stavu vinutí izolace generátoru. V závěru této kapitoly jsou popsány a vysvětleny aplikované metody operačního výzkumu, respektive regresní analýzy a testování statistické hypotézy.

### 3.1 GENERÁTOR

Obecně lze tvrdit, že generátory jsou elektrické točivé stroje, které přeměňují mechanickou energii na energii elektrickou. V opačném případě by se jednalo o elektrický motor. Prakticky se tedy jedná o elektrický stroj, zapojený v generátorickém<sup>1</sup> režimu. Generátory (i motory) mají dvě hlavní části, jedná se o stator a rotor, schéma je na **obr. č. 3.1**. Stator je pevná část stroje, připevněná k základům, a rotor je pohyblivá část (rotující kolem své osy). Rotor vytváří magnetické pole, které se otáčí, a ve statoru je umístěno vinutí (cívky), ve kterých se indukuje elektrické napětí. Problematikou elektrických pohonů a generátorů se zabývá velké množství literatury, např.: [1].



Obr. č. 3.1: Konstrukce synchronního stroje [2]

1) stator, 2) rotor, 3) magnetický obvod statoru, 4) statorové vinutí, 5) rotorové vinutí, 6) póly, 7) sběrací kroužky, 8) hřídel

<sup>1</sup> Termín používaný v elektrotechnice.

## 3.2 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA

V současné době je znatelný stálý trend neustálého zvyšování požadavků napříč všemi oblastmi, technického světa nevyjímaje. Důraz je kladen zejména na přesnost, kvalitu a spolehlivost za odpovídající cenu a nesmíme opomenout i rostoucí požadavky na šetrnost a přístup k životnímu prostředí. Všechny tyto aspekty s sebou nesou požadavky na obdržení informací a způsoby jejich získávání. Každý výrobní podnik, v energetickém odvětví je toto velké téma, v rámci zájmu zachování konkurenceschopnosti a udržení se na trhu musí splňovat základní požadavky na výrobky nebo poskytování služeb daných např. normami ČSN EN ISO 9001:2016 Systémy managementu kvality – Požadavky nebo ČSN EN ISO 14001:2016 Systémy environmentálního managementu – Požadavky s návodem pro použití. [3]

Vědní oblast, která posuzuje stav zařízení, se nazývá technická diagnostika. Zabývá se metodami a prostředky zjišťování skutečného technického stavu objektů, bez jejich demontáže nebo destrukce. Dále se zabývá možnostmi nahrazení intuitivního a individuálního přístupu k určování technického stavu, přístupem exaktním a systematickým, s maximálním využitím všech dostupných informací o diagnostikovaném objektu nebo produktu. Cílem technické diagnostiky je i stanovení kritických míst u objektů. Tyto objekty sledujeme v provozu vhodnými senzory, které zaznamenávají fyzikální veličiny. Tyto zaznamenané (obdržené) diagnostické veličiny nějakým způsobem charakterizují poruchy, resp. jejich vznik a vývoj. Dle změn jedné nebo více fyzikálních veličin se můžeme snažit stanovit kritérium vzniku a vývoje poruchy až do mezního stavu. Mezním stavem je například havárie či vlastní porucha. Po celou dobu sledování můžeme stroj plně využívat a plánovat dopředu zásah údržby, respektive opravu, případně výměnu degradovaných a neopravitelných částí zařízení, na základě pozorovaných změn v technickém stavu. [3], [4]

Pro technickou diagnostiku jsou důležité tyto pojmy: [5]

- **Diagnostický systém** – je tvořen diagnostickými prostředky, diagnostikovaným objektem, metodikou a obsluhou.
- **Diagnostická veličina** – nejčastěji bývá jednoduchá, měřitelná fyzikální veličina, která charakterizuje stav objektu (tlak, teplota, hluk, vibrace, proud, napětí, odpor apod.).
- **Diagnóza** – zjišťování technického stavu objektu v reálném čase (detekce poruchy, lokalizace poruchy).
- **Prognóza** – předpovídání stavu objektu.
- **Geneze** – určení technického stavu, ve kterém se objekt nacházel v určitém čase v minulosti.

Diagnostické systémy dělíme na: [6]

- **On-line** systémy vyhodnocují technický stav diagnostikovaného objektu při provozu. Rozšířenou podskupinou jsou tzv. *monitorovací systémy*, které jsou trvale připojeny k diagnostikovanému objektu a trvale sledují technický stav objektu a průběžně vyhodnocují mezní stavy objektu. Podstatnou část dnes tvoří tzv. *automatické diagnostické systémy*, které mají počítačovou podporu a jsou zpravidla napojeny na expertní diagnostické systémy.
- **Off-line** diagnostikování se provádí, když je diagnostikovaný objekt mimo provoz. Dělí se dále na *nezávislé* – sled jednotlivých kroků je nezávislý na výsledcích předcházejících kroků, hodnocení je podmíněno provedením všech kroků testu, a *závislé* – realizuje kroky testu v závislosti na výsledcích předcházejících kroků.
- **Pokročilé diagnostické systémy** jsou kombinací *on-line* a *off-line* diagnostických systémů, v současné době nejvíce se rozšiřující systémy.

### 3.3 ELEKTRODIAGNOSTIKA

Elektrodiagnostika je jedna z mnoha druhů diagnostik, pokud budeme technickou diagnostiku rozdělovat podle typu zaznamenávané a vyhodnocované diagnostické veličiny<sup>2</sup>. V této práci jde o vyhodnocování elektrických veličin, jako jsou odpor, kapacita nebo veličiny odvozené např. ztrátový činitel a polarizační index. Elektrodiagnostika je velmi široký pojem, respektive umožňuje diagnostikování technického stavu mnoha zařízení. Mezi tato zařízení můžeme zařadit: čerpadla, ventilátory, obráběcí stroje, prakticky všechna zařízení, která disponují elektrickým pohonem. Elektrická energie u technického zařízení může způsobit ve specifických případech i degradaci maziva nebo poškození ložisek – zdánlivě by se tento problém nemusel spojovat s elektrickou energií.

Elektrodiagnostika patří k základním diagnostikám u elektrických točivých strojů, mezi které bezpochyby patří i generátory. Tato práce se zaměřuje na veličiny: polarizační index, kapacita a ztrátový činitel. Tyto veličiny charakterizují a popisují stav izolace vinutí generátoru. Navíc, jsou to takové veličiny, které se vždy měří při provádění elektrodiagnostiky u generátorů, protože velmi dobře popisují fyzikální principy a jsou schopny ideálně popsat stav zařízení. Proto na hodnocení tohoto stavu mají zásadní vliv. Pokud se zjistí, že stav izolace vinutí neodpovídá předepsaným požadavkům, může dojít k proražení izolace a zničení generátoru.

---

<sup>2</sup> Mezi další druhy diagnostiky patří např.: diagnostika deformace, diagnostika tlaku, termodiagnostika, vibrodiagnostika, hluková diagnostika, tribodiagnostika, ... , tento výčet bychom mohli uzavřít pojmem multiparametrická diagnostika.

### 3.3.1 Polarizační index

Polarizační index, respektive polarizační indexy jsou jedním z parametrů, které lze obdržet z tzv. absorpčních charakteristik. Časová závislost absorpčního proudu je velmi dobře využitelná pro zjištění stavu elektrických zařízení. Změny stavu a struktury dielektrika s sebou nesou i změny časového průběhu absorpčního proudu. Strmost časového průběhu absorpčního proudu je charakteristická pro aktuální stav daného dielektrika. Jak je zobrazeno na **obrázcích č. 3.2 a 3.3**. Používané diagnostické metody svými principy spočívají buď na přímém využití absorpčních křivek (přímé integrování plochy pod křivkou) nebo ve stanovení různých druhů indexů. V praxi se často využívá tzv. minutový polarizační index<sup>3</sup>  $pi60$ , což je podíl naměřené hodnoty izolačního odporu  $R_{iz60}$  [MΩ] v 60. sekundě měření a  $R_{iz15}$  [MΩ] v 15. sekundě měření po připojení napětí. Ve skutečnosti se vychází z podílu dobíjecího proudu, ale úpravou lze obdržet náš vztah dle rovnice **(1)**<sup>4</sup>. Tento vztah lze přepsat i do podoby, kdy se vypočítá tzv. desetiminutový polarizační index  $pi600$ . Ten však nebyl po celou dobu sledování generátorů zaznamenáván, a tak mu není dále věnována pozornost. Problematice měření izolačního odporu a polarizačního indexu se věnuje norma ČSN EN IEC 60034-27-4:2018 Točivé elektrické stroje – Část 27-4: Měření izolačního odporu a polarizačního indexu izolace vinutí točivých elektrických strojů. [3], [7], [8], [9]

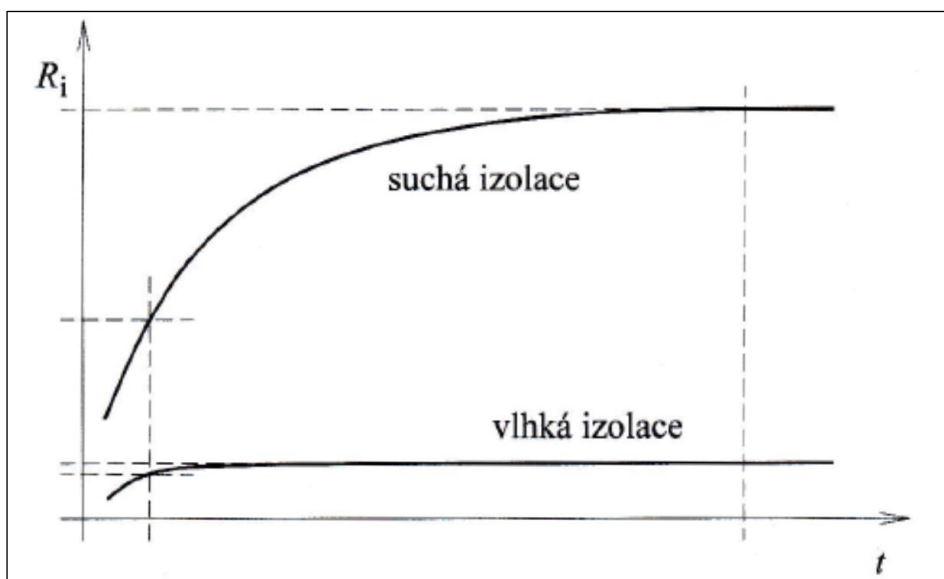
$$pi60 = \frac{i_d 15}{i_d 60} = \frac{R_{iz60}}{R_{iz15}} [-] \quad (1)$$

kde  $i_d 15$  a  $i_d 60$  jsou hodnoty dobíjecího proudu v 15. a 60. sekundě po připojení napětí,  $R_{iz15}$  a  $R_{iz60}$  jsou příslušné hodnoty izolačního odporu, minutový polarizační index je bezrozměrný, proto je v hranatých závorkách uvedena pomlčka.

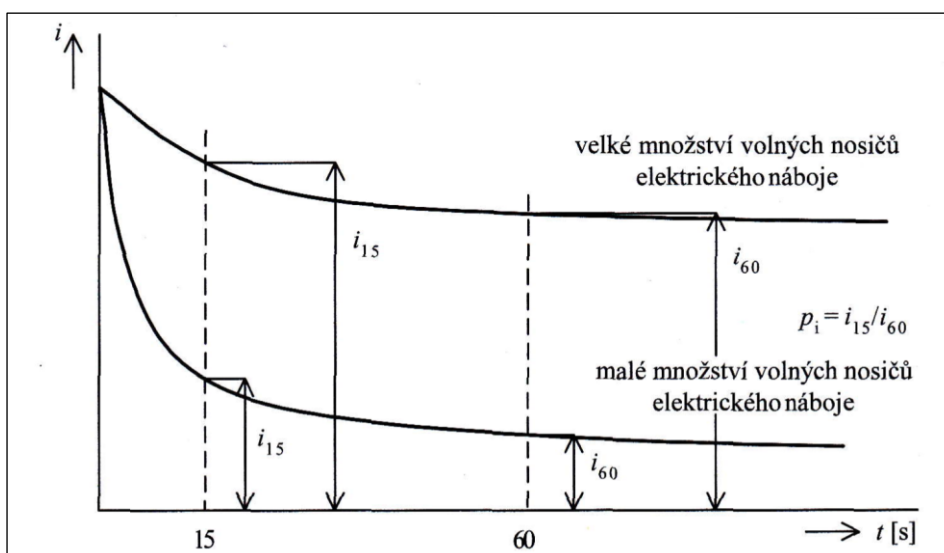
---

<sup>3</sup> Literatura v tomto směru není jednotná ve značení této veličiny. Někde můžeme objevit číselnou hodnotu minutového polarizačního indexu (60) v dolním indexu, nebo dokonce číselnou hodnotu jedna (1) na tomto místě. V některých pramenech se také uvádí polarizační index jako  $\pi_{60}$ . V zahraniční literatuře pak nalezneme pouhý odkaz na PI (anglicky – *Polarization Index*) a následné vysvětlení o jaký index se vlastně jedná.

<sup>4</sup> Z důvodu zvýraznění jsou odkazy na rovnice v textu této práce zobrazeny tučně.



Obr. č. 3.2: Časová závislost izolačního odporu suché a vlhké izolace [7]



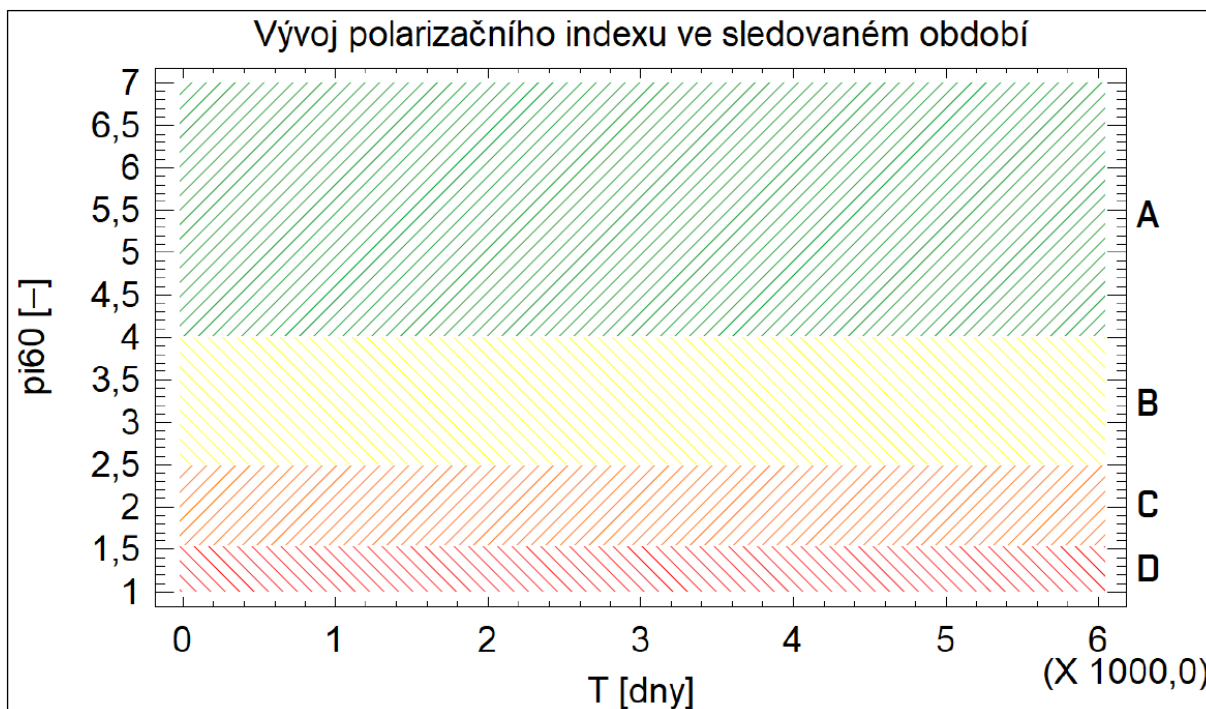
Obr. č. 3.3: Průběh absorpčních charakteristik pro suchý a navlhlý materiál [7]

Hodnocení stavu izolace se provádí posouzením vypočítaného minutového polarizačního indexu. Dle literatury rozlišujeme tyto stavy izolace vinutí v **tab. č. 1**: [3], [7], [8]

Tab. č. 1: Velikost minutového polarizačního indexu v závislosti na stavu izolace

Stav izolace vinutí	$pi_{60}$
A – velmi suchá a čistá izolace	>4,0
B – izolace suchá a čistá	2,5 – 4,0
C – izolace navlhlá nebo znečištěná	1,5 – 2,5
D – velmi špatná (silné znečištění/stáří)	<1,5

Díky takto vytvořené škále jsme schopni posoudit stav izolace vinutí u pozorovaných generátorů v průběhu jejich doby provozu a následně i zhodnotit predikovanou hodnotu polarizačního indexu pro následující rok. Více k predikci a aplikaci u jednotlivých pozorovaných generátorů v **kapitole 5.3**. Graficky lze tyto škály zakreslit v prázdném grafu, do kterého se budou vynášet hodnoty polarizačního indexu jednotlivých generátorů ve sledovaném období na **obr. č. 4**. Více v **kapitolách 5.1 a 5.2**.



Obr. č. 4: Zobrazení polí škál A – D pro hodnocení  $\pi_{60}$

### 3.3.2 Ztrátový činitel $tg \delta$ a kapacita $C$

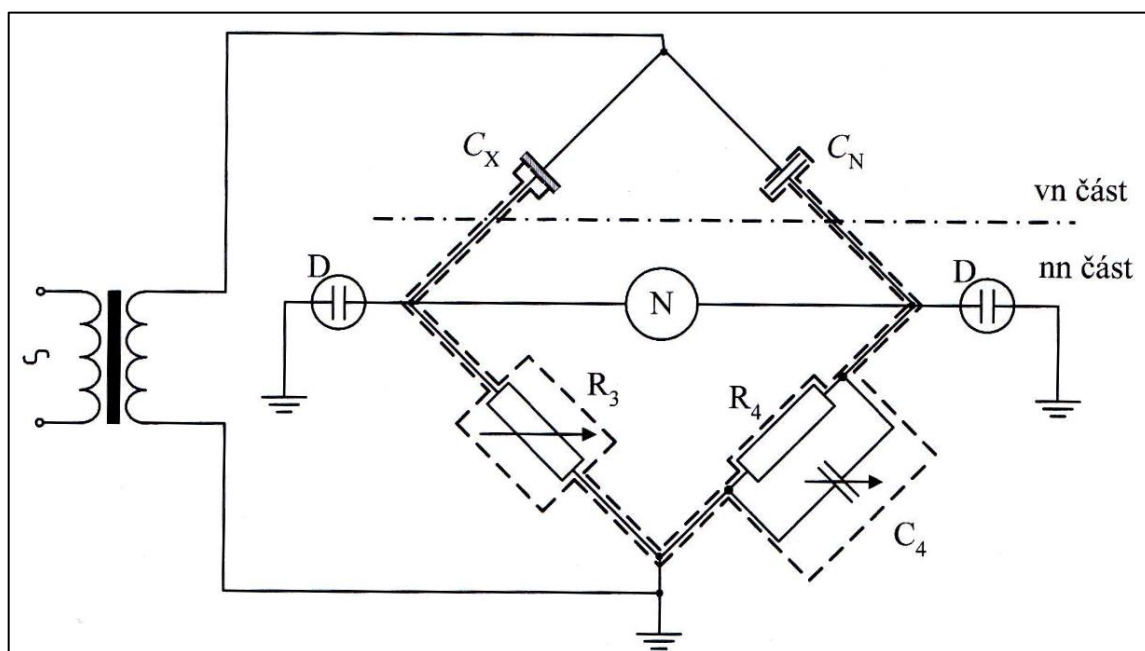
Principem měření ztrátového činitele a dalších podobných veličin, je určení prvků náhradního schématu dielektrika. Ztrátový činitel spadá do oblasti dielektrických ztrát, kde lze obecně tvrdit, že pro použití izolantu je rozhodující, kolik elektrické energie se změní v jeho objemu za jednotku času v jinou, v elektrotechnice např. na nechtěnou tepelnou energii. Této změně energie říkáme dielektrické ztráty. V tomto případě se jedná o jev, ve kterém se izolant zahřívá<sup>5</sup>. Během chodu elektrického zařízení je nezbytné zajistit, aby takto vzniklé teplo bylo odvedeno do okolí a nedocházelo k lokálnímu přehřátí dielektrika. Pokud by nebyl zajištěn dostatečný odvod tepla, mělo by to za následek další zvyšování ztrát a tím i nárůst teploty. To by v konečném důsledku mohlo vést i k tepelnému průrazu a destrukci izolantu. [7]

<sup>5</sup> V některých případech se tohoto jevu využívá – dielektrický ohřev.



Správné měření ztrátového činitele je velmi ovlivněno napětím, teplotou a frekvencí. Této problematice se podrobně věnuje norma ČSN EN 60034-27-3:2016 Točivé elektrické stroje - Část 27-3: Měření dielektrického ztrátového činitele na izolaci statorového vinutí točivých elektrických strojů. Dále již metodika nebude rozebírána. Pro praktické měření v průmyslových aplikacích jsou používány tzv. můstkové metody, pro vyšší kmitočty (řádově nad desítky kHz) pak metody rezonanční. Nejpoužívanější princip tzv. Scheringova můstku je zobrazen na **obr. č. 5**. [7], [10]

Veličina, která je vhodná ke sledování kondice statorové izolace, je kapacita. Samotné hodnoty měření kapacity nemají vypovídající význam o stavu statorové izolace, a je proto nezbytné sledovat změny kapacity v závislosti na době provozu stroje. Náhlé změny této veličiny znamenají, že izolační soustava může být značně poškozena. Měření kapacity je prováděno současně s měřením ztrátového činitele. [8]



Obr. č. 5: Scheringův vysokonapěťový můstek [7]

Hodnoty ztrátového činitele, vyskytující se v této práci, jsou bezrozměrné (nemají jednotku), ale jejich hodnotu je nezbytné vynásobit koeficientem  $\times 10^{-2}$ .

## 3.4 STATISTICKÉ METODY OPERAČNÍHO VÝZKUMU

Operační výzkum je vědecká disciplína, která se zabývá analýzou operací spojených s řízením, fungováním a navrhováním komplexních společensko-ekonomicko-technických systémů, tj. organizačních jednotek, v nichž jsou propojeni lidé a technická zařízení. Takováto propojení jsou: ekonomická, sociální, technická, materiálová a psychologická. Příkladem těchto systémů mohou být průmyslové podniky (jakéhokoliv provozu), systémy veřejné dopravy, zdravotních služeb a mnohé další. Počátky operačního výzkumu můžeme datovat od r. 1909 – dánský matematik Erlang, který se zabýval úlohami, metodami a modely, které bychom dnes řadili mezi teorii hromadné obsluhy. Přes první výskyt sousloví *Operační výzkum*, které bylo použito v r. 1940 skupinou Roberta Watsona-Watta zabývajících se rozvojem radaru. Až po současnost, kdy se metody operačního výzkumu používají v řízení státní správy, k řešení vztahu mezi ekonomickým růstem a kvalitou životního prostředí nebo při pomoci rozvojovým zemím. Systémy na podporu rozhodování jsou čím dál dokonalejší s nástupem moderních technologií a za pomoci metod umělé inteligence. Ty se například v průmyslové praxi používají při strategickém i operativním plánování výrobních procesů, ve všech fázích projektového řízení nebo v prognózování i navrhování postupů a zásahů údržby. [11], [12], [13]

Modely operačního výzkumu jsou ve své podstatě systémy, které jsou zjednodušeným obrazem reality. V základu mají matematický charakter, tj. obsahují rovnice, nerovnice, funkce. Modelování, prováděné prostřednictvím operačního výzkumu se řadí do matematického modelování. Matematické modely, s nimiž je pracováno v operačním výzkumu, mohou z hlediska způsobu výskytu neurčitých veličin patřit do některých z těchto kategorií: [11]

- **Deterministické modely** – jsou takové modely, v nichž se vyskytují pouze deterministické (pevně dané) veličiny a vztahy.
- **Stochastické modely** – v nichž se vyskytuje alespoň jedna veličina, která je náhodnou proměnnou, přičemž rozdělení pravděpodobnosti všech náhodných proměnných v modelu je známé.
- **Strategické modely** – (modely s nestochastickými neurčitostmi), v nichž se vyskytuje alespoň jedna veličina, jejíž rozdělení pravděpodobnosti není známé, známe pouze dolní a horní mez její hodnoty.
- **Adaptivní modely** – u nichž o rozdělení pravděpodobnosti některých veličin máme pouze neúplné informace, které se postupně zpřesňují učením se z průběhu reálného procesu.
- **Fuzzy modely** – v nichž se vyskytují veličiny, jejichž hodnoty jsou tzv. fuzzy množiny nebo prvky fuzzy množin.

Řešení problému, definovaného modelem operačního výzkumu, často spočívá v nalezení extrémů u tzv. *kritériální (účelové) funkce*. Tato funkce reprezentuje míru zhodnocení dosažení cíle,

který systému vytyčil operační analytik (specialista na operační výzkum). Mezi matematické metody, schopné řešit problémy operačního výzkumu patří: [11]

- **Klasická matematická analýza** – metody, založené na diferenciálním a integrálním počtu, používají se většinou k řešení problémů malého rozsahu (malý soubor zpracovávaných údajů) a k výpočtu mezí, v nichž leží řešení problémů velkého rozsahu.
- **Matematické programování** – metody, jejichž vznik byl podpořen vznikem optimalizačních problémů velkého rozsahu.
- **Matematické teorie procesů** – metody založené na dynamickém programování.
- **Teorie her** – jsou metody, které používají maticovou algebru (slouží k řešení konfliktních situací).
- **Simulační metody** – (někdy také jako metody Monte Carlo), využívají generování náhodných čísel k dosažení žádoucího rozdělení pravděpodobnosti vstupních veličin modelu.
- **Teorie front** – generující soubor metod pro tvorbu časových rozvrhů obsluhy, nebo výrobních procesů s omezenými zdroji.
- **Síťová analýza** – jsou metody, které využívají topologii a teorii grafů k tvorbě časových rozvrhů.
- **Statistické metody** – kupříkladu regresní analýza, která provádí statistickou analýzu tvaru vzájemné závislosti veličin, nebo korelační analýza, která provádí statistickou analýzu významnosti (těsnosti) této závislosti.

Dále se v teoretické rešerši a podkladech pro tuto práci bude věnovat pozornost regresní analýze, statistické inferenci (matematické statistice) a popisu přístupu pro predikci hodnot pomocí tzv. placebo efektu.

### 3.4.1 Regresní analýza

Mezi důležité statistické úlohy patří hledání a zkoumání závislostí proměnných, jejichž hodnoty obdržíme např. při realizaci experimentu. Z manažerské oblasti a pro podporu rozhodování nás zajímá, jak se např. mění poptávka v závislosti na změně ceny, jak různé faktory působí na změnu ceny. Nebo z průmyslové aplikace, jak se mění pevnost oceli v závislosti na množství různých přísad (legur). Zkoumání závislostí a vztahů mezi různými jevy a veličinami se zabývá regresní a korelační analýza. [14], [15]

Uvažujeme dvě části: [14], [16]

- **Regresní analýza** – jejím cílem je kvantitativně popsat zkoumaný vztah mezi veličinami, to za pomoci tzv. regresní křivky, která nejlépe modeluje (popisuje) naměřená empirická data a na základě takovéto regresní křivky lze pak provádět odhady změn závisle proměnné-

- **Korelační analýza** – jejím cílem je vyjádřit tzv. míru těsnosti korelační závislosti. Podstatné je to, jak daleko leží naměřené hodnoty od regresní křivky. Čím blíže, tím je míra těsnosti vyšší.

Vzhledem k náhodnému charakteru proměnných získaných z měření, reprezentuje nezávisle proměnné náhodný vektor  $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_k)$  a závisle proměnnou náhodná veličina  $Y$ . K popisu a vyšetřování závislosti  $Y$  na  $\mathbf{X}$  užíváme, již zmiňovanou, regresní analýzu, přičemž tuto závislost vyjadřuje regresní funkce ve tvaru [15]:

$$y = \varphi(\mathbf{x}, \boldsymbol{\beta}) = E(Y|\mathbf{X} = \mathbf{x}) \quad (2)$$

kde  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_k)$  je vektor nezávisle proměnných (hodnota náhodného vektoru  $\mathbf{X}$ ),  $y$  je závisle proměnná (hodnota náhodné veličiny  $Y$ ) a  $\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \dots, \beta_m)$  je vektor parametrů, tzv. regresních koeficientů  $\beta_j$ ,  $j = 1, \dots, m$  [15].

Pro určení odhadů neznámých regresních koeficientů  $\beta_j$  minimalizujeme tzv. reziduální součet čtverců [15]:

$$S^* = \sum_{i=1}^n [y_i - \varphi(\mathbf{x}_i, \boldsymbol{\beta})]^2 \quad (3)$$

a hovoříme o metodě nejmenších čtverců. Poznamenejme, že před výpočtem regresních koeficientů musíme stanovit tvar regresní funkce a volíme takový, který co nejvíce odpovídá vyšetřované nebo uvažované závislosti. Bývá zvykem volit regresní funkci s co nejmenším počtem regresních koeficientů, avšak dostatečně flexibilní a s požadovanými vlastnostmi: monotonie, předepsané hodnoty, asymptoty, aj. Vychází se přitom povětšinou ze zkušeností, avšak v současné době se při realizaci používají databáze regresních funkcí v různých matematicko-statistických softwarech. Nutno podotknout, že stále záleží na zkušenostech a vhodné volbě od uživatele výpočetního softwaru (SW). [15]

Orientační mírou vhodnosti vypočtené regresní funkce pro získaná data je koeficient vícenásobné korelace resp. index (koeficient) determinace  $R^2$ , nabývající hodnot z intervalu  $<0; 1>$ . Číslo  $R^2$  100 % vyjadřuje procentuální podíl rozptylu hodnot  $y_i$  „vysvětlený“ vypočtenou regresní funkcí. Hodnoty  $R$  (a tím také  $R^2$ ) blízké 1 naznačují vhodnost zvoleného tvaru regresní funkce [15].

Příklad uveďme pro speciální lineární regresní funkci (lineární vzhledem k regresním koeficientům), tedy přímku, kde obecně platí předpis:

$$y = \beta_1 + \beta_2 \cdot x \quad (4)$$

Tab. č. 2: Modelovaná data pro vstup do regresní analýzy [15]

$x_i$	3	5	5	8	9	11	12	15
$y_i$	0,8	1,2	1,5	1,9	1,8	2,4	2,5	3,1

Tento soubor dat byl vložen do SW Statgraphics a výsledná regresní křivka, popsána rovnicí (5) má tyto koeficienty, viz dokumentace k softwaru [17]:

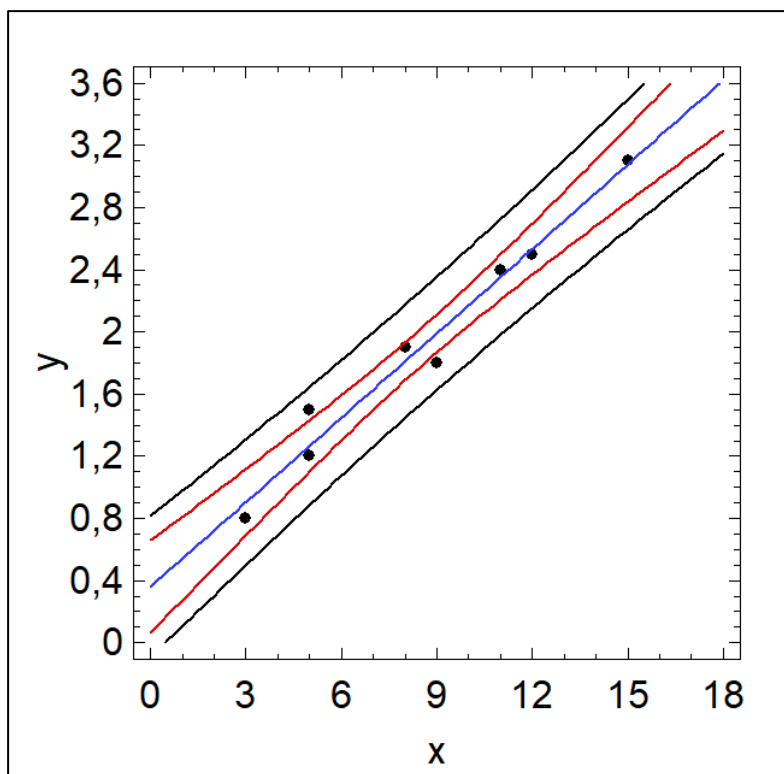
- Bodový odhad  $\beta_1$  je  $b_1 = 0,361207$
- Bodový odhad  $\beta_2$  je  $b_2 = 0,181034$
- Koeficient determinace  $R^2 = 96,98 \%$

$$y = 0,361207 + 0,181034 \cdot x \quad (5)$$

Výsledná regresní křivka (přímka modrou barvou) je zobrazena na **grafu č. 3.1**. Dále jsou zde dva pásy spolehlivosti a to: užší pás kolem regresní přímky (červená barva) je **pás spolehlivosti pro střední hodnotu** a širší pás kolem regresní přímky (černá barva) je **pás spolehlivosti pro individuální hodnotu**. Pokud by nějaké hodnoty, ze kterých byl graf vytvořen, zasahovaly mimo pás spolehlivosti pro individuální hodnotu<sup>6</sup>, musíme o těchto bodech rozhodnout, jestli je pro vytvoření regresního modelu zachováme, či nikoliv. Takovéto odlehlé body mohou představovat ojedinělé chyby měření, a pak je zpravidla vyloučíme, regresní křivku vytvoříme znovu a dále s vyloučenými hodnotami nepokračujeme v analýze.

---

<sup>6</sup> Důvod proč posuzujeme hodnoty vzhledem k pásu spolehlivosti pro individuální hodnoty, je možné přirovnat k situaci, kdy pojedeme pro benzín – bude nás zajímat individuální hodnota, nikoliv střední. Sledovaným faktorem bude individuální cena vzhledem k ujeté vzdálenosti, nikoliv střední cena v závislosti na vzdálenosti.



Graf č. 3.1: Graf závislosti  $y$  na  $x$

### 3.4.2 Testování statistické hypotézy – optimalizace počtu měření

Při sledování náhodných veličin a náhodných vektorů je někdy zapotřebí ověření určitých předpokladů nebo domněnek o jejich vlastnostech pomocí jejich pozorovaných hodnot. Může se jednat např. o rozhodnutí, zda nová technologie, seřízení stroje, reklama, změna financování, řízení firmy apod. vedly ke změně ve sledovaných parametrech výrobku, obratu, zisku apod., anebo zda jakost dodávky výrobků nebo surovin má dohodnutou třídu. Statistická hypotéza  $H$  je tvrzení o vlastnostech rozdělení pravděpodobnosti pozorované náhodné veličiny  $X$  s distribuční funkcí  $F(x, \vartheta)$  nebo náhodného vektoru  $(X, Y)$  se simultánní distribuční funkcí  $F(x, y, \vartheta)$  apod. Postup, jímž ověřujeme danou hypotézu, se nazývá test statistické hypotézy. Proti testované hypotéze  $H$ , která se také označuje jako nulová hypotéza, se postaví tzv. alternativní hypotéza  $\bar{H}$ , kterou volíme dle požadavků úlohy. Jestliže  $H$  je hypotéza, že parametr  $\vartheta$  má hodnotu  $\vartheta_0$ , píšeme  $H : \vartheta = \vartheta_0$ . Případ  $\bar{H} : \vartheta \neq \vartheta_0$  je dvoustranná alternativní hypotéza a  $\bar{H} : \vartheta > \vartheta_0$ , resp.  $\bar{H} : \vartheta < \vartheta_0$ , je jednostranná alternativní hypotéza. Testovaná hypotéza je někdy označována jako  $H_0$  a alternativní hypotéza  $\bar{H}$  jako  $H_1$  nebo  $H_A$ , viz [15].

Pro testování hypotézy  $H : \vartheta = \vartheta_0$  se konstruuje vhodná statistika  $T(X_1, \dots, X_n)$ , tzv. testové kritérium. Obor hodnot testového kritéria  $T(X_1, \dots, X_n)$  se za předpokladu, že platí hypotéza  $H : \vartheta = \vartheta_0$ , rozdělí na dvě disjunktní podmnožiny: kritický obor  $W_\alpha$  a jeho doplněk  $\bar{W}_\alpha$ . Kritický obor  $W_\alpha$  se vzhledem k alternativní hypotéze  $\bar{H}$  stanoví tak, aby pravděpodobnost toho, že testové kritérium  $T(X_1, \dots, X_n)$  nabude hodnotu z kritického oboru  $W_\alpha$ , byla  $\alpha$  (přesněji pro diskrétní náhodnou veličinu  $T$  nejvýše  $\alpha$ ). Číslo  $\alpha > 0$

je hladina významnosti testu a volíme ji blízkou nule, obvykle 0,05 anebo 0,01. Hladina významnosti se také může uvádět v %, tedy obvykle 5 % nebo 1 %, viz [15].

Rozhodnutí o hypotéze  $H$  pomocí pozorovaných hodnot náhodné veličiny  $X$  je pak založeno na následující konvenci. Jestliže tzv. pozorovaná hodnota testového kritéria  $t = T(x_1, \dots, x_n)$  na získaném statistickém souboru  $(x_1, \dots, x_n)$  padne do kritického oboru, tedy  $t \in W_\alpha$ , zamítáme hypotézu  $H$  a současně nezamítáme hypotézu  $\bar{H}$  na hladině významnosti  $\alpha$ . Jestliže naopak nepadne  $t$  do kritického oboru, tedy  $t \in \bar{W}_\alpha$ , nezamítám hypotézu  $H$ , respektive  $\bar{H}$ . To však neznamená prokázání její platnosti, protože jsme na základě realizace náhodného výběru získali pouze informace, které nestačí na její zamítnutí, viz [15].

Optimalizace počtu měření je v této práci založena na principu testování statistické hypotézy. Obecně se chce zjistit, zdali jsme schopni dosáhnout „stejných“ výsledků, respektive informací obsažených z naměřených dat, i při jiném (menším) počtu měření jedné veličiny, viz [15].

Při testování hypotézy  $H$  mohou nastat čtyři možnosti. Pokud zamítneme neplatnou hypotézu nebo nezamítneme platnou hypotézu, je vše v pořádku. Avšak při rozhodnutí o hypotéze  $H$  se můžeme dopustit jedné ze dvou chyb: [14], [15]

1. **K chybě 1. druhu s pravděpodobností  $\alpha$**  – dochází, zamítáme-li hypotézu  $H$  v případě, že je správná. To znamená, že jsme náhodou vybrali výběrový soubor, který měl velmi malou pravděpodobnost ( $\alpha$ ) být vybrán. V  $1 - \alpha$  procentech případů bychom hypotézu  $H$  zamítli.
2. **K chybě 2. druhu s pravděpodobností  $\beta$**  – dochází, přijmeme-li hypotézu  $H$  v případě, že je nesprávná.

Tab. č. 3: Možnosti rozhodnutí o hypotéze  $H$  [15]

$H$	Platí	Neplatí
Zamítáme	Chyba 1. druhu	-----
Nezamítáme	-----	Chyba 2. druhu

Pokud budeme zmenšovat  $\alpha$ , zmenšuje se chyba 1. druhu, ale současně se zvyšuje chyba 2. druhu, tj. pravděpodobnost přijetí nesprávné hypotézy – test je méně citlivý. Snažíme se, aby test měl co největší citlivost, tj. abychom měli největší pravděpodobnost padnutí hodnoty našeho testového kritéria do kritické oblasti, kdy je správná (pravdivá) hypotéza. Tato pravděpodobnost  $1 - \beta$  se nazývá síla nebo mohutnost testu. Čím větší je síla testu, tím menší je pravděpodobnost, že uděláme chybu 2. druhu. Na sílu testu má vliv:  $\alpha$ , velikost souboru  $n$ , rozptyl hodnot, velikost odchylky nulové a alternativní hypotézy. [14]

### 3.4.3 Predikce – placebo efekt

Pro predikci hodnot polarizačního indexu, tj. předpokládaný výsledek z technické diagnostiky provedené v následujících letech na generátorech G1 – G4, bude použit tzv. placebo efekt<sup>7</sup>. Základem tohoto přístupu bude regresní analýza provedená na hodnotách z měření polarizačního indexu během sledovaného období. Jednoduchou možností, jak predikovat vývoj jakékoliv hodnoty, pokud máme k dispozici regresní křivku, je obyčejné „protáhnutí“ jejího konce za poslední zaznamenaná měření a z takto vzniklých hodnot učinit závěr. Problémem tohoto přístupu je dostatečná věrohodnost a smysluplnost aplikace. Regresní analýza není uzpůsobena k tomu, aby takové informace poskytovala. Proto byl zvolen následující sled kroků k prokázání vhodnosti takového postupu.

<sup>7</sup> Tento termín není statistickou společností obecně používán. Výstižně jej však formulovat doc. RNDr. Zdeněk Karpišek, CSc. během diskusí o regresní analýze v době autorova studia na VUT.



- V prvním kroku bude vypočítána hodnota polarizačního indexu na regresní křivce v roce 2021, při známých hodnotách polarizačního indexu v tomto roce.
- Ve druhém kroku zakryjeme (schováme) hodnoty naměřeného polarizačního indexu v roce 2021 a data proložíme novou regresní křivkou (bude mít jiné koeficienty, ale stále se bude jednat o stejný typ křivky). Vypočítáme zdánlivě neznámou hodnotu polarizačního indexu na této regresní křivce v roce 2021. Tato vypočtená hodnota nám bude sloužit k rozhodnutí, jestli je regresní křivka vhodná k predikování hodnot, které neleží v jejím rozsahu.
- V poslední fázi výsledek z prvního a druhého kroku porovnáme. Zaměříme se na „smysluplnost“ takto vzniklého rozdílu – kdy nás zajímá, zda není výsledná hodnota z druhého výpočtu odchylená příliš mimo pás spolehlivosti pro individuální hodnotu. Pokud prohlásíme odchylku za přijatelnou, tedy že nám regresní křivka vhodně popisuje vývoj polarizačního indexu, můžeme provést predikci pro následující provedení technické diagnostiky, respektive měření polarizačního indexu, na generátoru.

## 3.5 RIZIKOLOGIE

Věda o riziku se nazývá rizikologie [18], zabývá se uvědomělým a řízeným konáním směřujícím k optimalizaci života osob. Cílem rizikologie je nahradit intuitivní rozhodování, rozhodováním založeném na systematickém přístupu k jevům, dějům a událostem, které se staly nebo se očekávají. Každý člověk se s rizikologií, i když ne přímo s tímto pojmem, setká v ekonomii (zejména v bankovníctví a pojišťování). Rizikologii se věnujeme i v technice (průmyslových oborech, tj. stavebním inženýrství, strojírenství, elektrotechnice, chemickém průmyslu, v logistice atd.). Postupem času rizikologie proniká do mnoha dalších oborů, např. do lékařství, biologie a aktuálně silně do ekologie. [18]

Rizikologie je tvořena dvěma disciplínami, které mají mnoho společného, ale liší se v náplni a cílech: [18]

- **Rizikové inženýrství** – převládají technické prvky, matematické modelování, pravděpodobnostní analýzy a jiné převážně exaktní vědní disciplíny. Rizikové inženýrství se zabývá technickými stránkami problémů rizik a jejich hodnocení, součástí rizikového inženýrství je analýza rizik.
- **Management rizik** – zabývá se ekonomickým přístupem k problémům vystaveným nejistotám nebo neurčitostem. Je za zaměřen stránky řízení a ekonomiky organizací.

Nelze nadřazovat jeden obor druhému, bez rizikového inženýrství by nebylo možné analyzovat rizika a naopak bez rizikového managementu by práce rizikových inženýrů neměla smysl. Management rizik přejímá od rizikového inženýrství výsledky a rizikové inženýrství bere z managementu rizika podněty

a požadavky. V tomto syслу lze formulovat cíle rizikového inženýrství jako poskytování podkladů pro rozhodování o riziku a management rizik se snaží riziko ovládat a rozhodovat o něm. [18]

Na management rizika lze nahlížet z pohledu projektového managementu, jehož je nedílnou součástí. V takovémto případě je jeho cílem chránit současný a budoucí majetek nebo lze tvrdit, že je souhrnem činností cílených na rozpoznávání a minimalizaci možných ztrát. Zásadou managementu rizika musí být především proaktivní ovládání možných ztrát, směřující k omezení četnosti realizací nebezpečí a zmenšení jejich závažnosti. Náplní jakéhokoliv managementu rizika je: [18]

- Zjišťování pasivních a aktivních nebezpečí;
- Odhad rizik;
- Rozhodování o riziku;
- Identifikace celkového rizikového zatížení;
- Ovládání nebezpečí a rizik;
- Sledování realizací nebezpečí;
- Vykazování nákladů spojených s realizací nebezpečí;
- Informační podpora rozhodování.

V moderním pojetí managementu rizika je dnes již vše prakticky kodifikováno, a to především v rámci projektového managementu dle normativní literatury PMBOK (2017) a definuje se výčtem sedmi na sebe navazujících kroků: [19]

1. Plánování řízení rizika
2. Identifikace (rozpoznání) rizika
3. Kvalitativní analýza rizika
4. Kvantitativní analýza rizika
5. Plánování reakcí na rizika
6. Realizace reakcí na rizika
7. Sledování rizik

Definice samotného pojmu riziko, se mění v závislosti na oboru a problematice, co se pod tímto pojmem rozumí. Existují skupiny definic technických, ekonomických a sociálních. Ze všech definic je ale celkově patrné, že riziko není veličina, která vede k exaktním hodnotám, nýbrž je jeho hodnota tvořena odhadem (empirickým nebo analytickým). S definicí, se kterou se autor nejvíce shoduje, je tato: riziko  $R$  je hodnota vzniklá vynásobením pravděpodobnosti vzniku ztráty  $p$  a hodnoty reprezentující tuto ztrátu  $D$  (dopad). Poznamenejme, že otázkami rizik se z podobných hledisek aktuálně zabývají, a také je historicky řešily další obory (např. stochastické programování v operačním výzkumu, spolehlivost konstrukcí v inženýrských aplikacích mechaniky, aj.) a bylo by jistě srovnat tyto přístupy a jejich terminologii

(viz např. střední hodnota náhodné veličiny s alternativním rozdělením a výše uvedená definice preferovaná autorem), ale to není předmětem této práce. Dále jsou uvedeny některé obecně uznávané definice rizika dle literatury: [18], [20]

- Pravděpodobnost či možnost vzniku ztráty, obecně nezdaru.
- Variabilita možných výsledků nebo nejistota jejich dosažení.
- Odchýlení skutečných a očekávaných výsledků.
- Nebezpečí chybného rozhodnutí.
- Možnost vzniku ztráty nebo zisku.
- Střední hodnota ztrátové funkce.
- Možnost, že specifická hrozba využije specifickou zranitelnost systému.
- Kombinace pravděpodobnosti události a jejího následku.
- Nebezpečí psychické, fyzické nebo ekonomické újmy.
- Osoba vystavená újmě.
- Kumulativní účinek pravděpodobnosti nejisté události, která může pozitivně nebo negativně ovlivnit cíle projektu.
- Odchylky od očekávaných ztrát.
- Pravděpodobná hodnota ztráty vzniklé nositeli, popř. příjemci rizika realizací scénáře nebezpečí, vyjádřená v peněžních nebo jiných jednotkách.

Riziko může být bezrozměrné, nebo mu často bývá (zejména v ekonomické oblasti) přiřazena jednotka korun (reprezentující měnu). Další možností využití stanovení rizik je např. u hodnocení, respektive při tvorbě analýzy rizik u informačních systémů. Riziko je zde kombinací Hrozby a Zranitelného místa, dále po připočítání Hodnoty aktiva, je možné spočítat tzv. *ALE* (anglicky – Annual Loss Expectation) očekávané roční ztráty. [21]

Závěrem k problematice o riziku uveďme, že z technického pohledu je riziko vnímáno jako čistě negativní jev. Rizika v této oblasti se snažíme minimalizovat na přijatelnou úroveň nebo odstraňovat zdroje těchto rizik. Norma, která se věnuje posouzení a snižování rizika u strojních zařízeních je: ČSN EN ISO 12100:2011. Ekonomicko-manažerský pohled umožňuje na riziko nahlížet i jako možnost zisku nebo kladný účinek na cíle projektu. Literatura, zabývající se touto problematikou je rozsáhlá: [20], [22], [23], [24]. Ze zahraniční literatury technického směru uveďme např.: [25], [26], v případě zmíněných matematických přístupů uveďme např.: [11], [27], [28], [29], [30]

## 3.6 SW PROSTŘEDKY

V předchozích kapitolách byly popsány přístupy k problémům, kterým se tato práce věnuje. Problematiku operačního výzkumu v inženýrské praxi není možné řešit jen pomocí tužky a papíru. Řešení problémů optimalizačních algoritmů se složitou strukturou, anebo vytváření komplexní regresní analýzy, si vyžaduje použití speciálních programů. Existuje široké portfolio nejrůznějších programových nástrojů, mezi kterými lze vybírat. V současné době zažívá relativně velkou oblibu programovací jazyk Python, který svojí jednoduchostí a všestranností umožňuje být použit k řešení různých problémů, a to díky svým otevřeným knihovnám, které jsou dostupné pro všechny. Nutné je pouze mít k dispozici programovací prostředí, které umožňuje práci s tímto programovacím jazykem. [11]

Nezpracovaná data, respektive záznamy z provedených technických diagnostik jsou k dispozici v souboru .xlsx, tedy se jedná o soubor vhodný k otevření v programu MS EXCEL. V tomto tabulkovém procesoru je sice k dispozici základní nástroj pro zobrazení dat v grafu, nicméně není pro uživatele dále v provádění regresní analýzy vhodný.

Mezi SW ve kterých lze provádět regresní analýzu a pokud možno také testování statistických hypotéz patří:

- STATISTICA<sup>8</sup> – je analytický program, který se podobá tabulkovému procesoru MS EXCEL s širokým portfoliem matematických operací.
- MATHEMATICA<sup>9</sup>, MAPLE<sup>10</sup>, MATHCAD<sup>11</sup> – tyto softwary patří do skupiny programů, které pracují se symbolickými výrazy pro numerické výpočty.
- MATLAB<sup>12</sup> – při použití rozsáhlých knihoven z jejich Toolboxu lze provádět regresní analýzu a testování statistických hypotéz, problém pro uživatele může být ten, že se jedná o skriptovací software, tedy je nezbytné si podstatnou část kódu napsat sám.
- STATGRAPHICS<sup>13</sup> – program, který lze zařadit mezi tabulkové procesory, umožňuje jednoduché a intuitivní zpracování a analýzu dat. V tomto SW byla tato práce zpracována.

---

<sup>8</sup> <http://www.statsoft.cz/>

<sup>9</sup> <https://www.wolfram.com/mathematica/>

<sup>10</sup> <https://www.maplesoft.com/>

<sup>11</sup> <https://www.mathcad.com/en/>

<sup>12</sup> <https://www.mathworks.com/>

<sup>13</sup> <https://www.statgraphics.com/>

## 4 ANALYZOVANÁ DATA

Tato kapitola stručně popisuje nashromážděná data za sledované období generátorů, kdy bylo shromáždění údajů z diagnostiky „automatizováno“<sup>1</sup> a ukládáno v digitální podobě, pro jednoduchý přístup a případné počítačové zpracování. Tato data tedy nejsou kompletní, protože chybí záznamy, které byly uchovávané pouze v tištěné verzi. I přesto se jedná o velmi rozsáhlou databázi co do délky sledování záznamů z diagnostiky a jednotlivých elektrických veličin.

Datové soubory, ze kterých budou vycházet jednotlivé analýzy v této práci obsahují vždy datum měření se specifickým identifikátorem daného záznamu, rozšířené o podmínky<sup>2</sup>, za kterých byla diagnostika prováděna, konkrétně pak: teplotu stroje, teplotu okolí a relativní vlhkost okolí. U každého záznamu jsou uvedeny jednotky, ve kterých byly veličiny měřeny, respektive zaznamenávány do protokolu. Následuje pak záznam o odečtu jednotlivých měřených veličin na každé fázi. Fáze jsou označeny písmeny *U*, *V* a *W*. Pokud bylo nezbytné nastavit např. jmenovité napětí u měření ztrátového činitele a kapacity, pak je pro záznam v protokolu uvedená hladina nastaveného jmenovitého napětí a k němu odpovídající odečtená hodnota sledované veličiny. Pro vypočítání hodnoty polarizačního indexu je sledovanou veličinou na fázích generátorů odpor, jehož hodnota je odečtená po určitém čase (který slouží jako vstup k výpočtu polarizačního indexu). Pro odečet odporu vinutí je nezbytné nastavit hodnotu měřícího napětí. Hodnota nastaveného měřícího napětí je u každého záznamu v protokolu taktéž uvedena.

Pro regresní analýzu, prováděnou v programu Statgraphics, je časový údaj, uvedený v záznamech jako konkrétní den (datum), převeden na počet dnů od prvního záznamu v databázi. Např. pokud byl první záznam proveden 6. 4. 2005 v grafu bude mít na ose X hodnotu 0, následující rok bude provedena diagnostika např. 27. 2. 2006, tedy v grafu bude mít na ose X hodnotu 327. Jedná se o převod datumové proměnné na reálnou proměnnou (reálná čísla). Tento převod byl proveden pro lepší práci se SW a časovou řadou, na výsledky a hodnocení tento krok nemá žádný vliv.

---

<sup>1</sup> Registr protokolů z diagnostiky není v současné době plně automatizován, myšleno, přesně specifikovaná pole v dokumentu jsou manuálně vyplňovaná podle zadaných údajů od technického diagnostika, který provádí diagnostikování na zařízení. Bohužel z tohoto důvodu může docházet k hrubým chybám např. špatný opis hodnoty naměřené na přístroji do protokolu, špatný odečet hodnoty, špatné přiřazení jednotek měřené veličiny atd.

<sup>2</sup> Především teplota stroje a okolí má velmi velký vliv na výsledky měření elektrických veličin. Bohužel z uvedených záznamů není patrné, zdali existuje vnitřní doporučení pro velikost těchto naměřených hodnot v okolí stroje. Toto autor považuje za jeden z úkazů odvěkého sporu teorie a praxe. Není nutné, s nadsázkou, přesně specifikovat, kterou rukou se bude nastavovat rozsah na stupnici měřidla, ale podmínky, za kterých je měření prováděno by měly být dle možností konstantní a neměnné. Takovéto změny mohou vnést do měření nevynucené chyby, které mohou mít za následek zmaření celého procesu diagnostiky, a především pak hodnocení výsledků.

Při vytváření regresní analýzy v SW Statgraphics bylo nahlíženo na dva faktory, které mohou výrazně ovlivnit kvalitu použitého regresního modelu a to: analýza reziduí (anglicky – *Residual Analysis*) a vlivné body (anglicky – *Influential Points*). Oba faktory poskytují informaci o vhodnosti použitého modelu, viz dokumentace k softwaru [17].

U analýzy reziduí je v SW Statgraphics uvedena tabulka neobvyklých reziduí (anglicky – *Unusual Residuals*), jejichž absolutní hodnota studentizovaného rezidua (anglicky – *Studentized Residual*) je větší než 2. Studentizovaná rezidua představují, o kolik směrodatných odchylek se každá pozorovaná hodnota (na ose y) odchyluje od modelu sestaveného s použitím všech dat kromě daného pozorování. Pokud je hodnota studentizovaného rezidua větší než 3, je potřeba se rozhodnout, zdali se nejedná o odlehlý bod (odlehlá hodnota – anglicky – *Outlier*), který by měl být z modelu vyloučen<sup>3</sup>, viz dokumentace k softwaru [17].

Vlivné body<sup>4</sup> mají v SW Statgraphics také svoji tabulku s komentářem a doporučením. V tomto případě se jedná o hodnotu tzv. pákového efektu (anglicky – *Leverage*), který popisuje míru vzdálenosti hodnot nezávislé proměnné od ostatních pozorování. Body, které mají vysokou hodnotu pákového efektu, mohou být odlehlými body. Za takové body jsou označeny ty, které mají hodnotu pákového efektu větší, než je trojnásobek průměrného pákového efektu jednotlivých dat (bodů). Pro každý model je tato průměrná hodnota pákového efektu vypočítána a lze ji označit za jedinečnou pro daný model, viz dokumentace k softwaru [17].

---

<sup>3</sup> Všechna taková pozorování, respektive měření, byla odstraněna z regresního modelu, protože vykazovala výrazné odchylky. Tyto body neodpovídají statistickému zpracování a k jejich výskytu mohlo přispět vnější zavinění (chyba zápisu, chybný odečet hodnoty aj.). Pokud by autor takové body v modelu ponechal, dopustil by se „nerespektování náhody“, protože statistiku lze použít pouze tam, kde zasahuje náhoda, nikoliv vnější vliv! Dle přednášek z lit. [15].

<sup>4</sup> Na rozdíl od neobvyklých reziduí se vlivné body s trojnásobkem hodnoty průměrného pákového efektu v žádném modelu nevyskytovaly. Pro úplnost je zde ale tato statistická metoda, která má své uplatnění v regresní analýze, uvedena.

## 5 VLASTNÍ ŘEŠENÍ

Celá následující kapitola obsahuje praktickou část předkládané diplomové práce. Analyzované generátory jsou vzájemně posuzovány podle shodné výkonnostní řady (generátory G1 a G2 jsou téhož výkonu, stejně tak G3 a G4, ale jiného než G1 a G2). Regresní analýza polarizačního indexu je kompletně uvedena u každého generátoru. Následující analýzy ztrátového činitele a kapacity jsou demonstrativně provedeny na jednom z provedených měření ve sledovaném období u každého generátoru. Z důvodů velkého množství provedených analýz, jsou ostatní analýzy a výsledky matematických operací s těmito veličinami přiloženy v **přílohách A – F**.

Při vytváření regresních křivek se vychází z přehledové části **kapitoly 3.4.1: Regresní analýza** a tam citovaných klasických zdrojů. Základem je obecný předpis pro regresní funkci. Rovnice **(4)** v téže kapitole reprezentuje regresní přímku. U tohoto předpisu dochází ke změně značení nezávisle proměnné  $x$  na  $T$  a závisle proměnné  $y$  na  $pi60$ ,  $tg\delta$  a  $C$  (podle analyzované veličiny). Tvar, respektive předpis těchto křivek se také mění podle výsledného typu (přímka, polynom, exponenciála, parabola, logaritmická křivka).

### 5.1 ANALÝZA GENERÁTORŮ G1 A G2

Generátory G1 a G2 mají shodný konstrukční výkon, výrobce, rok výroby a další parametry. Proto je na ně nahlíženo jako na zástupce jedné „skupiny“, u které budou porovnávány průběhy a regresní analýza ztrátového činitele, kapacity anebo časová řada polarizačního indexu během sledovaného období.

Sledovaný vývoj polarizačního indexu u obou generátorů je realizován „pouze“ na tzv. minutovém polarizačním indexu  $pi60$ , protože měření odporu vinutí fází statoru po deseti minutách skončilo přibližně po 10 letech „automatizovaného“ zaznamenávání diagnostických veličin. Tuto hodnotu potřebujeme pro výpočet tzv. desetiminutového polarizačního indexu  $pi600$ . Těchto údajů tak máme, v poměru s ostatními, málo a nebude jim věnována pozornost<sup>1</sup>. Ztrátový činitel i kapacita jednotlivých fází je zaznamenávána u obou generátorů po celou dobu sledovaného období.

---

<sup>1</sup> Lze pouze spekulovat proč společnost provozující tyto generátory, respektive část společnosti, která má na starosti provádění technické diagnostiky, vyřadila sledování tohoto parametru. Možná došlo k přehodnocení diagnostické strategie nebo k prokázání, že minutový polarizační index je dostatečně vypovídající o kvalitě termoplastické izolace.

## 5.1.1 Generátor G1

Pro tento generátor jsou data automatizovaně ukládána od roku 2005 až po poslední měření provedené v roce 2021 s ročním intervalem provádění diagnostiky. V nezpracovaném, datovém souboru by mělo být 17 záznamů o provedených diagnostikách. V některých letech docházelo k zopakování diagnostického měření na generátoru, a tak je tento datový soubor rozšířen o více měření, nejvíce však na dva záznamy provedené v jednom roce. Na druhou stranu v roce 2015 není záznam o provedení elektrodiaagnostiky. S těmito informacemi je celkový počet provedených a zaznamenaných diagnostik 18. Z praktického hlediska to na aplikované statistické metody a regresní analýzu nemá negativní vliv<sup>2</sup>.

### **Polarizační index**

Na **grafu č. 5.1** jsou zobrazeny vypočtené hodnoty minutového polarizačního indexu [dále jen polarizačního indexu<sup>3</sup> – pozn. aut.] jednotlivých fází *U*, *V* a *W* na ose *Y*, v závislosti na datu (dnu) měření na ose *X*. Regresní křivka (modré barvy) má předpis dle rovnice **(6)** (jedná se o lineární regresní funkci [14]), dále je zde přerušovanou čarou znázorněný (vymezený) intervalový odhad střední hodnoty a tlustou (černou) čarou je zobrazen (vymezen) intervalový odhad individuální hodnoty [15]. Tomuto intervalovému odhadu také říkáme pás spolehlivosti<sup>4</sup>. Oba intervalové odhady jsou se spolehlivostí 95 %.

$$pi60 = 3,8748 - 0,0000897919 \cdot T \quad (6)$$

kde  $pi60$  je (minutový) polarizační index a  $T$  je reálná časová proměnná.

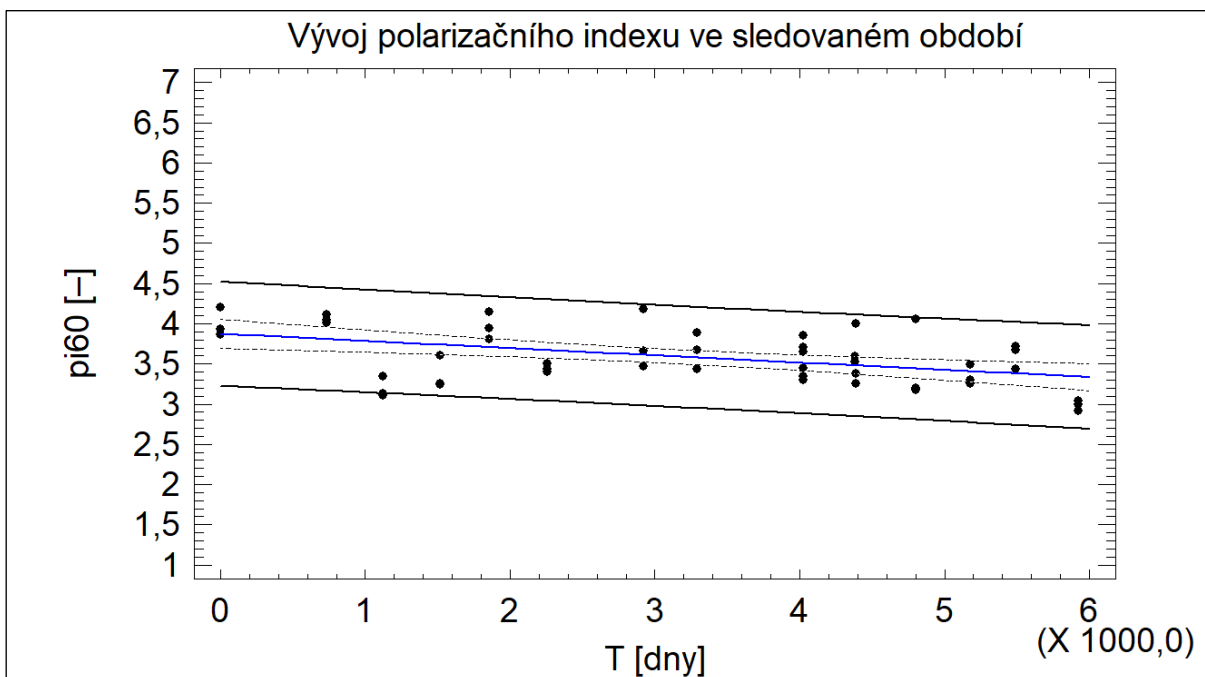
---

<sup>2</sup> Bohužel není přístup ke komentáři nebo důvodům proč byla diagnostika v daných letech zopakována, zdali nedošlo k nějaké závažné poruše, výměně nebo velkého zásahu údržby. Tyto faktory by měly zásadní vliv na zaznamenávané diagnostické veličiny a bylo by nezbytné tento jejich vývoj zohlednit při hodnocení statistické analýzy nebo tvaru regresních křivek. Této problematice „nevědomostí“ nebo neúplnosti informací bude věnován prostor v závěru a doporučení. – pozn. aut.

<sup>3</sup> Jak již bylo zmíněno v **kapitole 5.1** u generátoru G1 není uveden desetiminutový polarizační index.

<sup>4</sup> Pokud má pás spolehlivosti spolehlivost 95 %, pak to znamená, že při opakovaných statistických souborech 95 % souborů bude obsahovat tento výsledek a pouze 5 % jich bude jinak.





Graf č. 5.1: Regrese polarizačního indexu fází generátoru G1

Všechny zaznamenané hodnoty polarizačního indexu jednotlivých fází generátoru v průběhu sledovaného období mají hodnotu vyšší než 2,5. Tomu odpovídají i teoreticky spočítané hodnoty na regresní křivce, která vznikla proložením naměřených hodnot. Tedy můžeme prohlásit, že elektrická izolace statoru generátoru G1 byla po celou dobu suchá a čistá až velmi suchá a čistá.

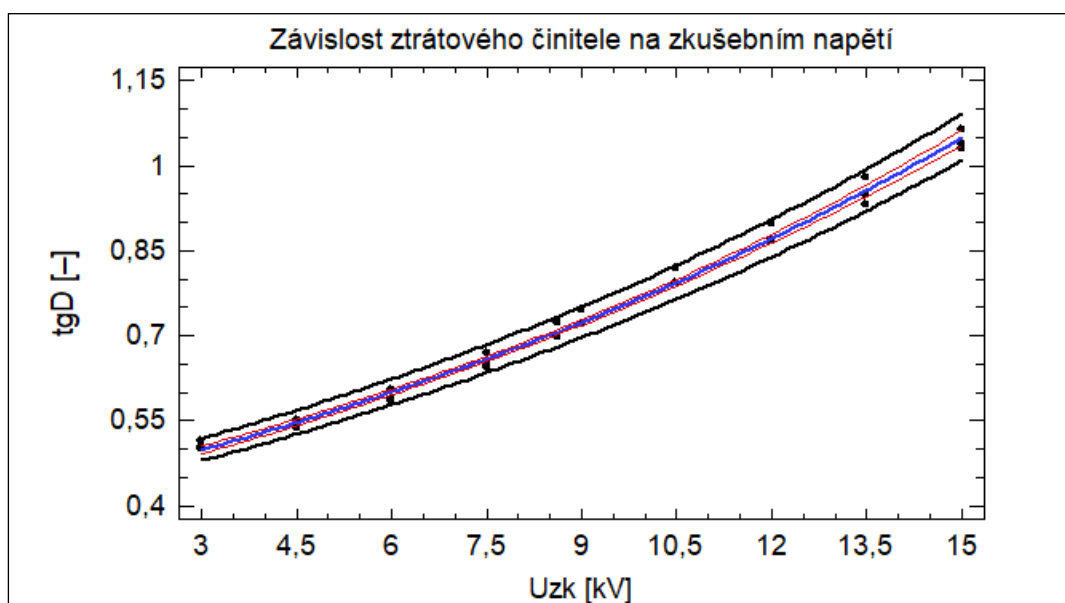
### Ztrátový činitel

Na **grafu č. 5.2** je zobrazena vybraná regrese ztrátového činitele<sup>5</sup> měřeného na všech fázích U, V a W v závislosti na zkušební napětí. Toto měření bylo provedeno v roce 2021. Koeficient determinace [15], který popisuje míru úspěšnosti (kvality) regresního modelu má hodnotu  $R^2 = 99,42\%$ . Regresní křivka (modré barvy) má předpis dle rovnice **(7)** (jedná se o exponenciální regresní funkci [14]), dále je zde červená křivka, která znázorňuje (vymezuje) intervalový odhad střední hodnoty a černou křivkou je zobrazen (vymezen) intervalový odhad individuální hodnoty [15]. Oba intervalové odhady jsou se spolehlivostí 95 %.

$$\operatorname{tg}\delta = \exp(-0,882682 + 0,0620777 \cdot U_{zk}) \quad (7)$$

kde  $\operatorname{tg}\delta$  je ztrátový činitel a  $U_{zk}$  je hodnota zkušební napětí.

<sup>5</sup> Na **grafu č. 5.2** je na ose X popisek  $U_{zk}$ , správný zápis je s indexem  $zk$ , tedy  $U_{zk}$ . Tento údaj reprezentuje nastavené zkušební napětí, na kterém byl měřen ztrátový činitel  $\operatorname{tg}\delta$ , který je opět na ose Y zapsán jako  $\operatorname{tg}D$ . SW Statgraphics neumožňuje zápis indexu a řeckých písmen.



Graf č. 5.2: Regrese ztrátového činitele fází generátoru G1 v roce 2021

Zbylé regresní analýzy s hodnotou koeficientu determinace a předpisem rovnice v jednotlivých letech sledovaného období jsou přiloženy v **příloze A** této práce.

V **tab. č. 4** jsou uvedeny všechny koeficienty determinace exponenciálních regresních funkcí, které byly vytvořeny z dat za sledované období.

Tab. č. 4: Koeficienty determinace regresních modelů  $tg\delta$  generátoru G1 ve sledovaném období

Rok	R <sup>2</sup> [%]	Rok	R <sup>2</sup> [%]
2005	84,14	2013	99,70
2006	98,32	2014 (1)	99,50
2007	97,97	2014 (2)	99,69
2008	95,12	2016	99,41
2009	97,59	2017	99,32
2010 (1)	99,61	2018	97,66
2010 (2)	99,61	2019	99,32
2011	91,59	2020	99,61
2012	99,49	2021	99,42

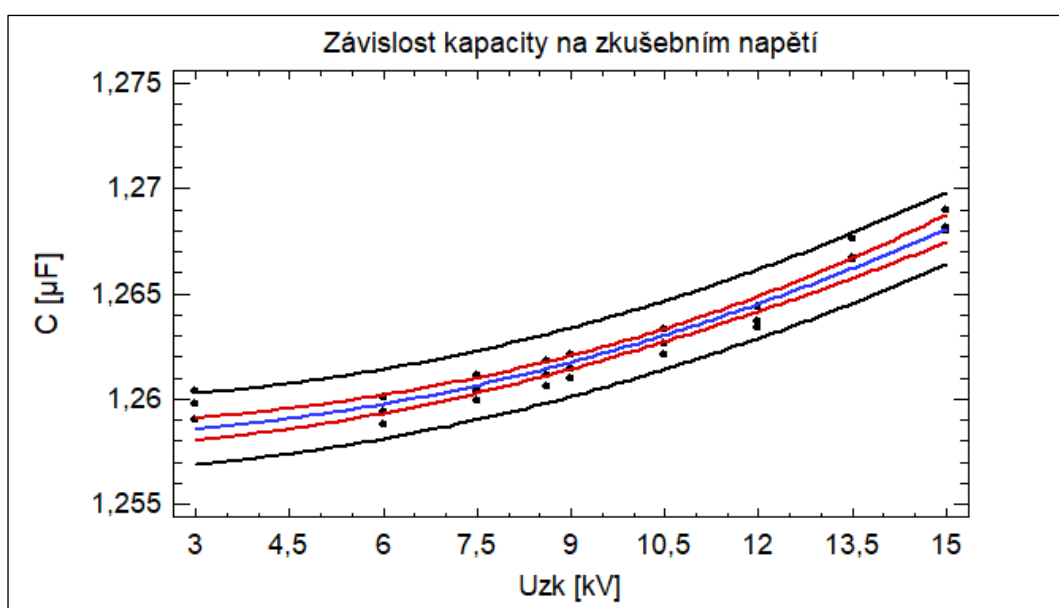
Pozn.: Pokud je za rokem v závorce uvedeno číslo, jedná se o pořadí provedené technické diagnostiky v daném roce.

## Kapacita

Na **grafu č. 5.3** je zobrazena vybraná regrese kapacity<sup>6</sup> měřené na všech fázích U, V a W v závislosti na zkušebním napětí. Toto měření bylo provedeno v roce 2021. Koeficient determinace [15], který popisuje míru úspěšnosti (kvality) regresního modelu má hodnotu  $R^2 = 93,87 \%$ . Regresní křivka (modré barvy) má předpis dle rovnice **(8)** (jedná se o kvadratickou regresní funkci [14]), dále je zde červená křivka, která znázorňuje (vymezuje) intervalový odhad střední hodnoty a černou křivkou je zobrazen (vymezen) intervalový odhad individuální hodnoty [15]. Oba intervalové odhady jsou se spolehlivostí 95 %.

$$C = 1,25819 + 0,0000440279 \cdot U_{zk}^2 \quad (8)$$

kde  $C$  je kapacita a  $U_{zk}$  je hodnota zkušebního napětí.



Graf č. 5.3: Regrese kapacity fází generátoru G1 v roce 2021

Zbylé regresní analýzy s hodnotou koeficientu determinace a předpisem rovnice v jednotlivých letech sledovaného období jsou přiloženy v **příloze A** této práce.

V **tab. č. 5** jsou uvedeny všechny koeficienty determinace kvadratických regresních funkcí, které byly vytvořeny z dat za sledované období.

<sup>6</sup> Na **grafu č. 5.3** je na ose X popisek  $U_{zk}$ , správný zápis je s indexem  $zk$ , tedy  $U_{zk}$ . Tento údaj reprezentuje nastavené zkušební napětí, na kterém byla měřena kapacita  $C$ . SW Statgraphics neumožňuje zápis indexu.

Tab. č. 5: Koeficienty determinace regresních modelů C generátoru G1 ve sledovaném období

Rok	R <sup>2</sup> [%]	Rok	R <sup>2</sup> [%]
2005	93,57	2013	92,71
2006	93,52	2014 (1)	95,56
2007	93,04	2014 (2)	66,84
2008	97,81	2016	92,88
2009	96,84	2017	88,44
2010 (1)	95,35	2018	92,24
2010 (2)	95,35	2019	89,78
2011	93,76	2020	91,58
2012	96,25	2021	93,87

Pozn.: Pokud je za rokem v závorce uvedeno číslo, jedná se o pořadí provedené technické diagnostiky v daném roce.

## 5.1.2 Generátor G2

Pro tento generátor jsou data automatizovaně ukládána od roku 2003 až po poslední měření provedené v roce 2021 s ročním intervalem provádění diagnostiky. V nezpracovaném datovém souboru by mělo být 19 záznamů o provedených diagnostikách. V některých letech docházelo k zopakování diagnostického měření na generátoru, a tak je tento datový soubor rozšířen o více měření, nejvíce však na dva záznamy provedené v jednom roce. Na druhou stranu v roce 2008 není záznam o provedení elektrodiagnostiky. S těmito informacemi je celkový počet provedených a zaznamenaných diagnostik 19. Z praktického hlediska to na aplikované statistické metody a regresní analýzu nemá negativní vliv<sup>7</sup>.

### **Polarizační index**

Na **grafu č. 5.4** jsou zobrazeny vypočtené hodnoty minutového polarizačního indexu [dále jen polarizačního indexu<sup>8</sup> – pozn. aut.] jednotlivých fází  $U$ ,  $V$  a  $W$  na ose  $Y$ , v závislosti na datu (dnu) měření na ose  $X$ . Regresní křivka (modré barvy) má předpis dle rovnice **(9)** (jedná se o polynom 2. stupně [14]), dále je zde přerušovanou čarou znázorněný (vymezený) intervalový odhad střední hodnoty a tlustou (černou)

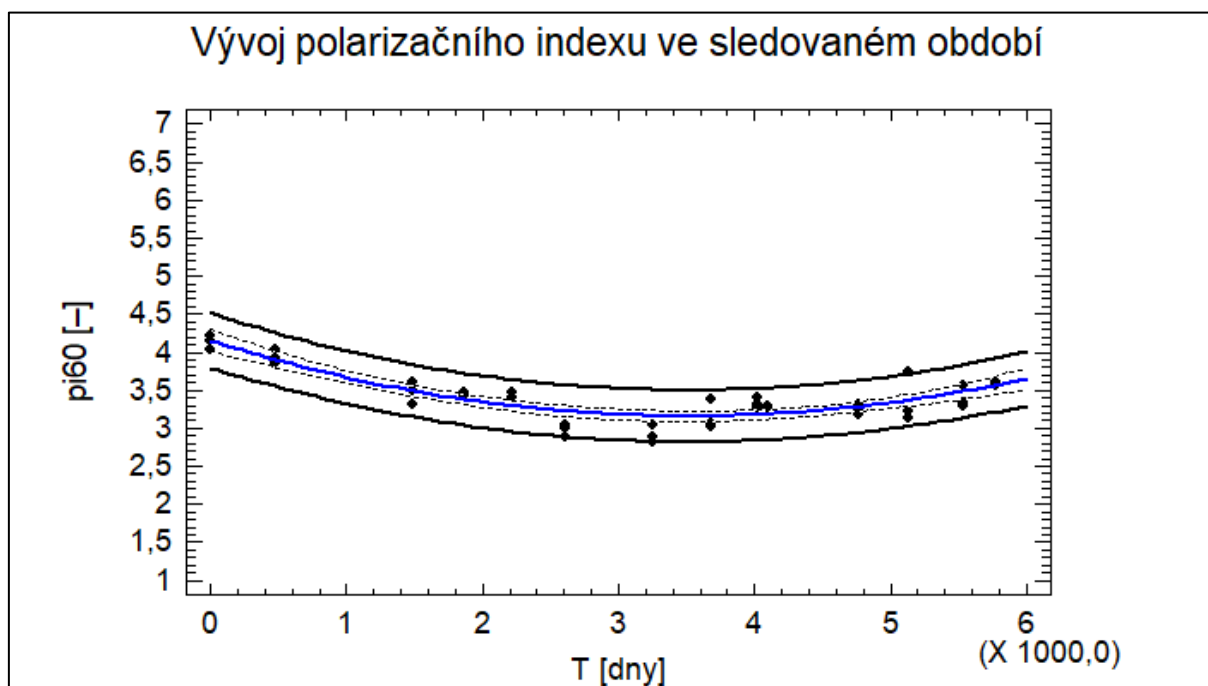
<sup>7</sup> Bohužel není přístup ke komentáři nebo důvodům proč byla diagnostika v daných letech zopakována, zdali nedošlo k nějaké závažné poruše, výměně nebo velkému zásahu údržby. Tyto faktory by měli zásadní vliv na zaznamenané diagnostické veličiny a bylo by nezbytné tento jejich vývoj zohlednit při hodnocení statistické analýzy nebo tvaru regresních křivek. Této problematice „nevědomosti“ nebo neúplnosti informací bude věnován prostor v závěru a doporučení. – pozn. aut.

<sup>8</sup> Jak již bylo zmíněno v **kapitole 5.1** u generátoru G2 není uveden desetiminutový polarizační index.

čarou je zobrazen (vymezen) intervalový odhad individuální hodnoty [15]. Tomuto intervalovému odhadu také říkáme pás spolehlivosti<sup>9</sup>. Oba intervalové odhady jsou se spolehlivostí 95 %.

$$pi60 = 4,15636 - 0,000567801 \cdot T + 8,07158 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 \quad (9)$$

kde  $pi60$  je (minutový) polarizační index a  $T$  je reálná časová proměnná.



Graf č. 5.4: Regrese polarizačního indexu fází generátoru G2

Všechny zaznamenané hodnoty polarizačního indexu jednotlivých fází generátoru v průběhu sledovaného období mají hodnotu vyšší než 2,5. Tomu odpovídají i teoreticky spočítané hodnoty na regresní křivce, která vznikla proložením naměřených hodnot. Tedy můžeme prohlásit, že elektrická izolace statoru generátoru G2 byla po celou dobu suchá a čistá až velmi suchá a čistá.

### Ztrátový činitel

Na **grafu č. 5.5** je zobrazena vybraná regrese ztrátového činitele<sup>10</sup> měřeného na všech fázích U, V a W v závislosti na zkušební napětí. Toto měření bylo provedeno v roce 2021. Koeficient determinace [15], který popisuje míru úspěšnosti (kvality) regresního modelu má hodnotu  $R^2 = 98,94$  %. Regresní křivka (modré barvy) má předpis dle rovnice **(10)** (jedná se o exponenciální regresní funkci [14]), dále je zde

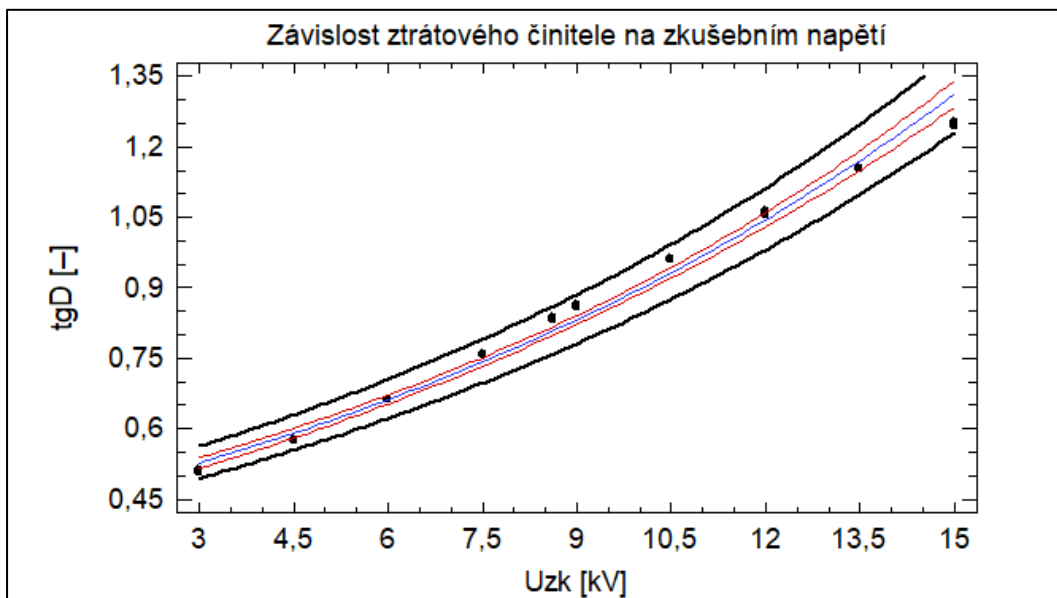
<sup>9</sup> Pokud má pás spolehlivosti spolehlivost 95 %, pak to znamená, že při opakovaných statistických souborech 95 % souborů bude obsahovat tento výsledek a pouze 5 % jich bude jinak.

<sup>10</sup> Na **grafu č. 5.5** je na ose X popisek  $U_{zk}$ , správný zápis je s indexem  $zk$ , tedy  $U_{zk}$ . Tento údaj reprezentuje nastavené zkušební napětí, na kterém byl měřen ztrátový činitel  $tg\delta$ , který je opět na ose Y zapsán jako  $tgD$ . SW Statgraphics neumožňuje zápis indexu a řeckých písmen.

červená křivka, která znázorňuje (vymezuje) intervalový odhad střední hodnoty a černou křivkou je zobrazen (vymezen) intervalový odhad individuální hodnoty [15]. Oba intervalové odhady jsou se spolehlivostí 95 %.

$$\operatorname{tg}\delta = \exp(-0,868382 + 0,0760275 \cdot U_{zk}) \quad (10)$$

kde  $\operatorname{tg}\delta$  je ztrátový činitel a  $U_{zk}$  je hodnota zkušební napětí.



Graf č. 5.5: Regrese ztrátového činitele fáze generátoru G2 v roce 2021

Zbylé regresní analýzy s hodnotou koeficientu determinace a předpisem rovnice v jednotlivých letech sledovaného období jsou přiloženy v **příloze B** této práce.

V **tab. č. 6** jsou uvedeny všechny koeficienty determinace exponenciálních regresních funkcí, které byly vytvořeny z dat za sledované období.

Tab. č. 6: Koeficienty determinace regresních modelů  $\operatorname{tg}\delta$  generátoru G2 ve sledovaném období

Rok	R <sup>2</sup> [%]	Rok	R <sup>2</sup> [%]
2003 (1)	97,91	2013	97,16
2003 (2)	97,91	2014	99,26
2004	97,52	2015	99,26
2005	99,19	2016	99,71
2006	97,82	2017	99,59
2007	99,83	2018	99,46
2009	99,61	2019	99,04
2010	96,95	2020	98,94
2011	82,58	2021	98,94

Rok	R <sup>2</sup> [%]	Rok	R <sup>2</sup> [%]
2012	98,85	---	---

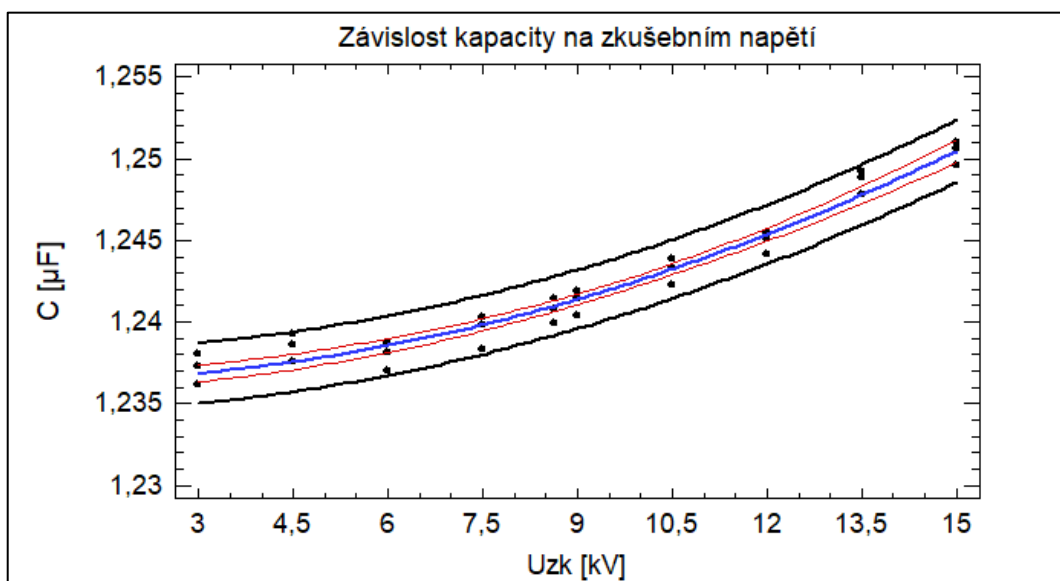
Pozn.: Pokud je za rokem v závorce uvedeno číslo, jedná se o pořadí provedené technické diagnostiky v daném roce.

### Kapacita

Na **grafu č. 5.6** je zobrazena vybraná regrese kapacity<sup>11</sup> měřené na všech fázích U, V a W v závislosti na zkušební napětí. Toto měření bylo provedeno v roce 2021. Koeficient determinace [15], který popisuje míru úspěšnosti (kvality) regresního modelu má hodnotu  $R^2 = 96,29\%$ . Regresní křivka (modré barvy) má předpis dle rovnice **(11)** (jedná se o kvadratickou regresní funkci [14]), dále je zde červená křivka, která znázorňuje (vymezuje) intervalový odhad střední hodnoty a černou křivkou je zobrazen (vymezen) intervalový odhad individuální hodnoty [15]. Oba intervalové odhady jsou se spolehlivostí 95 %.

$$C = 1,23629 + 0,0000630615 \cdot U_{zk}^2 \quad (11)$$

kde  $C$  je kapacita a  $U_{zk}$  je hodnota zkušební napětí.



Graf č. 5.6: Regrese kapacity fází generátoru G2 v roce 2021

Zbylé regresní analýzy s hodnotou koeficientu determinace a předpisem rovnice v jednotlivých letech sledovaného období jsou přiloženy v **příloze B** této práce.

<sup>11</sup> Na **grafu č. 5.6** je na ose X popisek  $U_{zk}$ , správný zápis je s indexem  $zk$ , tedy  $U_{zk}$ . Tento údaj reprezentuje nastavené zkušební napětí, na kterém byla měřena kapacita  $C$ . SW Statgraphics neumožňuje zápis indexu.

V **tab. č. 7** jsou uvedeny všechny koeficienty determinace kvadratických regresních funkcí, které byly vytvořeny z dat za sledované období.

Tab. č. 7: Koeficienty determinace regresních modelů C generátoru G2 ve sledovaném období

Rok	R <sup>2</sup> [%]	Rok	R <sup>2</sup> [%]
2003 (1)	91,26	2013	90,57
2003 (2)	92,48	2014	83,85
2004	93,69	2015	95,55
2005	95,02	2016	94,25
2006	97,00	2017	95,98
2007	93,25	2018	96,14
2009	88,75	2019	96,68
2010	98,50	2020	97,54
2011	98,11	2021	96,29
2012	94,88		

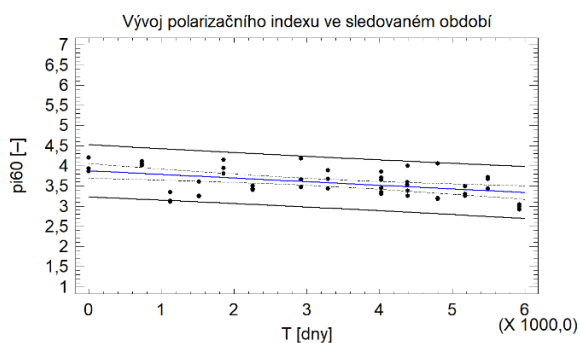
Pozn.: Pokud je za rokem v závorce uvedeno číslo, jedná se o pořadí provedené technické diagnostiky v daném roce.

### 5.1.3 Porovnání generátorů G1 a G2

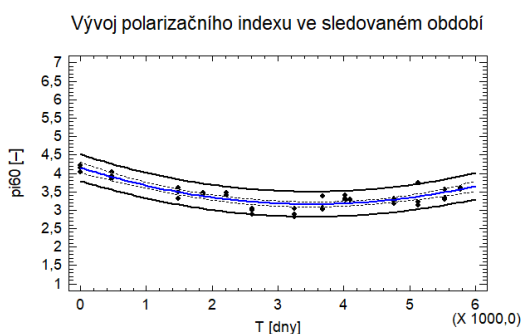
Vzhledem ke shodné výkonnostní řadě, výrobci i roku výroby obou generátorů si v následujících řádcích dovolím srovnat dosažené výsledky z provedených analýz.

$$pi60 = 3,8748 - 0,0000897919 \cdot T \quad (12)$$

$$pi60 = 4,15636 - 0,000567801 \cdot T + 8,07158 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 \quad (13)$$



a) Regresní křivka polarizačního indexu generátoru G1



b) Regresní křivka polarizačního indexu generátoru G2

Graf č. 5.7: Porovnání regresních křivek polarizačního indexu generátorů G1 a G2



První část prováděné analýzy je zaměřená na zpracování regresní analýzy minutového polarizačního indexu a nalezení vhodného předpisu křivky, který tento trend popisuje. Polarizační index generátoru G1 vhodně popisuje lineární regresní funkce s předpisem dle rovnice **(12)**. Výsledná křivka náleží oblasti, kde hodnota polarizačního indexu je vyšší než 2,5, tedy lze tvrdit, že elektrická izolace statoru generátoru byla po celou dobu sledovaného období v pásmu B – suchá a čistá. Pás spolehlivosti pro individuální hodnotu taktéž nezasahuje pod hodnotu polarizačního indexu 2,5. Polarizační index generátoru G2 vhodně popisuje kvadratická regresní funkce s předpisem dle rovnice **(13)**. Výsledná křivka náleží oblasti, kde hodnota polarizačního indexu je vyšší než 2,5, tedy lze tvrdit, že elektrická izolace statoru generátoru byla po celou dobu sledovaného období v pásmu B – suchá a čistá. Pás spolehlivosti pro individuální hodnotu taktéž nezasahuje pod hodnotu polarizačního indexu 2,5. Z trendového pohledu u generátoru G1 dochází k mírnému poklesu tohoto sledovaného parametru (přímka má klesající tendenci), oproti generátoru G2, kde je trendem spíše „zlepšování“ (zvyšování) hodnoty polarizačního indexu – stav izolace zůstává minimálně stejně tak dobrý.

Analyzovaný ztrátový činitele má u obou generátorů shodnou nejvhodnější závislost – popsanou exponenciální regresní funkcí. Míra úspěšnosti regresního modelu, popsaná koeficientem determinace, je v průměru u G1  $R^2 = 97,62 \%$  a u G2  $R^2 = 97,87 \%$ .

Analyzovaná kapacita má u obou generátorů shodnou nejvhodnější závislost – popsanou kvadratickou regresní funkcí. Míra úspěšnosti regresního modelu, popsaná koeficientem determinace, je v průměru u G1  $R^2 = 92,17 \%$  a u G2  $R^2 = 94,20 \%$ .

Veškeré provedené regresní analýzy ztrátového činitele a kapacity v závislosti na zkušebním napětí, jsou s předpisy funkcí a grafickým znázorněním v **přílohách A a B**.

## 5.2 ANALÝZA GENERÁTORŮ G3 A G4

Generátory G3 a G4 mají shodný konstrukční výkon, výrobce, rok výroby a další parametry. Proto je na ně nahlíženo jako na zástupce další „skupiny“, u které budou porovnávány průběhy a regresní analýza ztrátového činitele, kapacity anebo časová řada polarizačního indexu během sledovaného období.

Sledovaný vývoj polarizačního indexu u obou generátorů je realizován „pouze“ na tzv. minutovém polarizačním indexu  $pi60$ , protože měření odporu vinutí fází statoru po deseti minutách nebyl nikdy měřen, respektive záznamy, které jsou k dispozici, tato data neobsahují. Tuto hodnotu potřebujeme pro výpočet tzv. desetiminutového polarizačního indexu  $pi600$ . Ztrátový činitel i kapacita jednotlivých fází je zaznamenávána u obou generátorů po celou dobu sledovaného období.

### 5.2.1 Generátor G3

Pro tento generátor jsou data automatizovaně ukládána od roku 2007 až po poslední měření provedené v roce 2021 s ročním intervalem provádění diagnostiky. V nezpracovaném, datovém souboru by mělo být 15 záznamů o provedených diagnostikách. V některých letech docházelo k zopakování diagnostického měření na generátoru, a tak je tento datový soubor rozšířen o více měření, nejvíce však na dva záznamy provedené v jednom roce. S touto informací je celkový počet provedených a zaznamenaných diagnostik 16. Z praktického hlediska to na aplikované statistické metody a regresní analýzu nemá negativní vliv<sup>12</sup>.

#### **Polarizační index**

Na **grafu č. 5.8** jsou zobrazeny vypočtené hodnoty minutového polarizačního indexu [dále jen polarizačního indexu<sup>13</sup> – pozn. aut.] jednotlivých fází  $U$ ,  $V$  a  $W$  na ose  $Y$ , v závislosti na datu (dnu) měření na ose  $X$ . Regresní křivka (modré barvy) má předpis dle rovnice **(14)** (jedná se o polynom 3. stupně [14]), dále je zde přerušovanou čarou znázorněný (vymezený) intervalový odhad střední hodnoty a tlustou (černou) čarou je zobrazen (vymezen) intervalový odhad individuální hodnoty [15]. Tomuto intervalovému odhadu také říkáme pás spolehlivosti<sup>14</sup>. Oba intervalové odhady jsou se spolehlivostí 95 %.

---

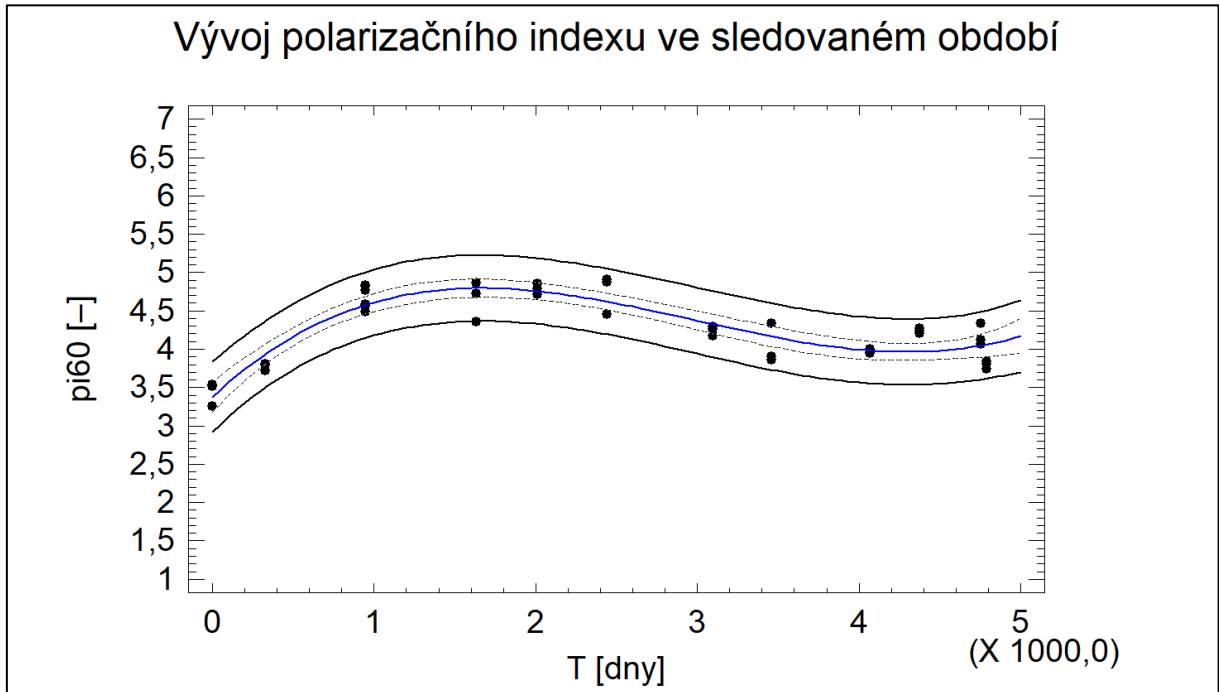
<sup>12</sup> Bohužel není přístup ke komentáři nebo důvodům proč byla diagnostika v daných letech zopakována, zdali nedošlo k nějaké závažné poruše, výměně nebo velkého zásahu údržby. Tyto faktory by měli zásadní vliv na zaznamenávané diagnostické veličiny a bylo by nezbytné tento jejich vývoj zohlednit při hodnocení statistické analýzy nebo tvaru regresních křivek. Této problematice „nevědomostí“ nebo neúplnosti informací bude věnován prostor v závěru a doporučení. – pozn. aut.

<sup>13</sup> Jak již bylo zmíněno v **kapitole 5.2** u generátoru G3 není uveden desetiminutový polarizační index.

<sup>14</sup> Pokud má pás spolehlivosti spolehlivost 95 %, pak to znamená, že při opakovaných statistických souborech 95 % souborů bude obsahovat tento výsledek a pouze 5 % jich bude jinak.

$$pi60 = 3,37812 + 0,00195404 \cdot T - 8,13653 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 9,09155 \cdot 10^{-11} \cdot T^3 \quad (14)$$

kde  $pi60$  je (minutový) polarizační index a  $T$  je reálná časová proměnná.



Graf č. 5.8: Regrese polarizačního indexu fází generátoru G3

Všechny zaznamenané hodnoty polarizačního indexu jednotlivých fází generátoru v průběhu sledovaného období mají hodnotu vyšší než 2,5. Tomu odpovídají i teoreticky spočítané hodnoty na regresní křivce, která vznikla proložením naměřených hodnot. Tedy můžeme prohlásit, že elektrická izolace statoru generátoru G3 byla po celou dobu suchá a čistá až velmi suchá a čistá.

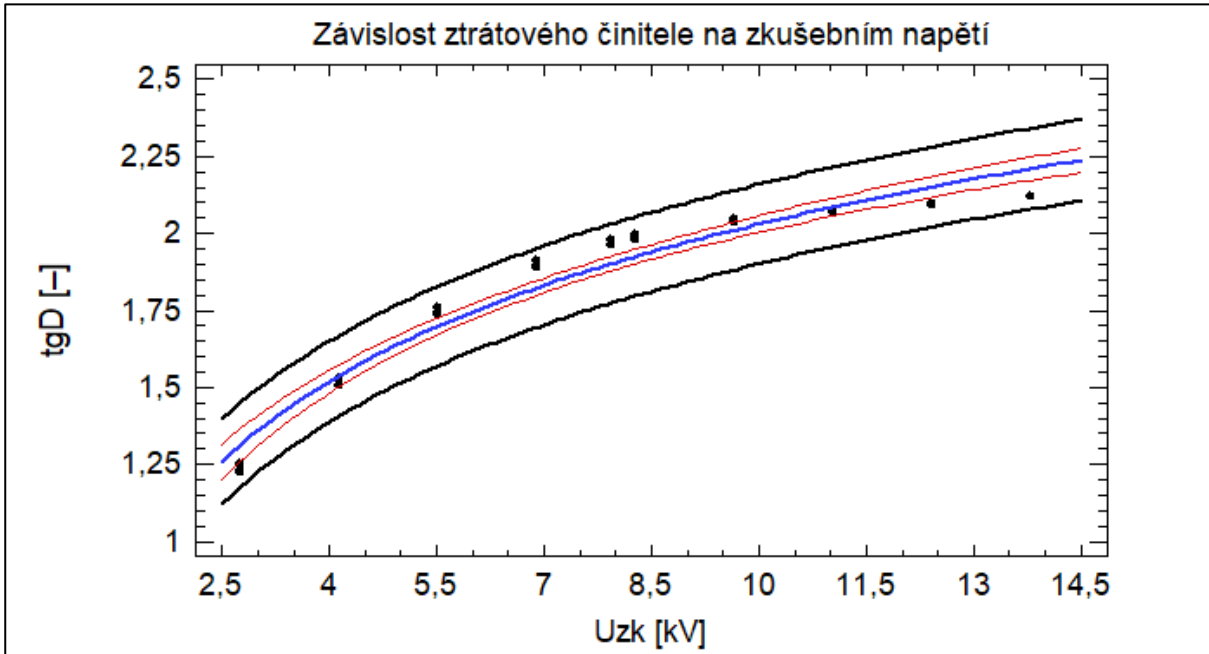
### Ztrátový činitel

Na **grafu č. 5.9** je zobrazena vybraná regrese ztrátového činitele<sup>15</sup> měřeného na všech fázích U, V a W v závislosti na zkušební napětí. Toto měření bylo provedeno v roce 2021. Koeficient determinace [15], který popisuje míru úspěšnosti (kvality) regresního modelu má hodnotu  $R^2 = 95,29 \%$ . Regresní křivka (modré barvy) má předpis dle rovnice **(15)** (jedná se o logaritmickou funkci [14]), dále je zde červená křivka, která znázorňuje (vymezuje) intervalový odhad střední hodnoty a černou křivkou je zobrazen (vymezen) intervalový odhad individuální hodnoty [15]. Oba intervalové odhady jsou se spolehlivostí 95 %.

<sup>15</sup> Na **grafu č. 5.9** je na ose X popisek  $U_{zk}$ , správný zápis je s indexem  $zk$ , tedy  $U_{zk}$ . Tento údaj reprezentuje nastavené zkušební napětí, na kterém byl měřen ztrátový činitel  $tg\delta$ , který je opět na ose Y zapsán jako  $tgD$ . SW Statgraphics neumožňuje zápis indexu a řeckých písmen.

$$\operatorname{tg}\delta = 0,747391 + 0,557246 \cdot \ln(U_{zk}) \quad (15)$$

kde  $\operatorname{tg}\delta$  je ztrátový činitel a  $U_{zk}$  je hodnota zkušební napětí.



Graf č. 5.9: Regrese ztrátového činitele fází generátoru G3 v roce 2021

Zbýlé regresní analýzy s hodnotou koeficientu determinace a předpisem rovnice v jednotlivých letech sledovaného období jsou přiloženy v **příloze C** této práce.

V **tab. č. 8** jsou uvedeny všechny koeficienty determinace logaritmických regresních funkcí, které byly vytvořeny z dat za sledované období. Vyloučeny byly údaje z let 2007, 2008 a 2009. V prvních dvou případech z důvodu neshodné regresní křivky (parabolický průběh). V roce 2009 jsou zaznamenány hodnoty řádově stokrát nižší, tedy nedávají smysl v porovnání s ostatními záznamy.

Tab. č. 8: Koeficienty determinace regresních modelů  $\operatorname{tg}\delta$  generátoru G3 ve sledovaném období

Rok	R <sup>2</sup> [%]	Rok	R <sup>2</sup> [%]
2010 (1)	99,13	2016	94,99
2010 (2)	97,79	2017	95,02
2011	98,18	2018	96,12
2012	96,03	2019	95,57
2013	95,51	2020	94,92
2014	96,08	2021	95,29
2015	97,11	---	---

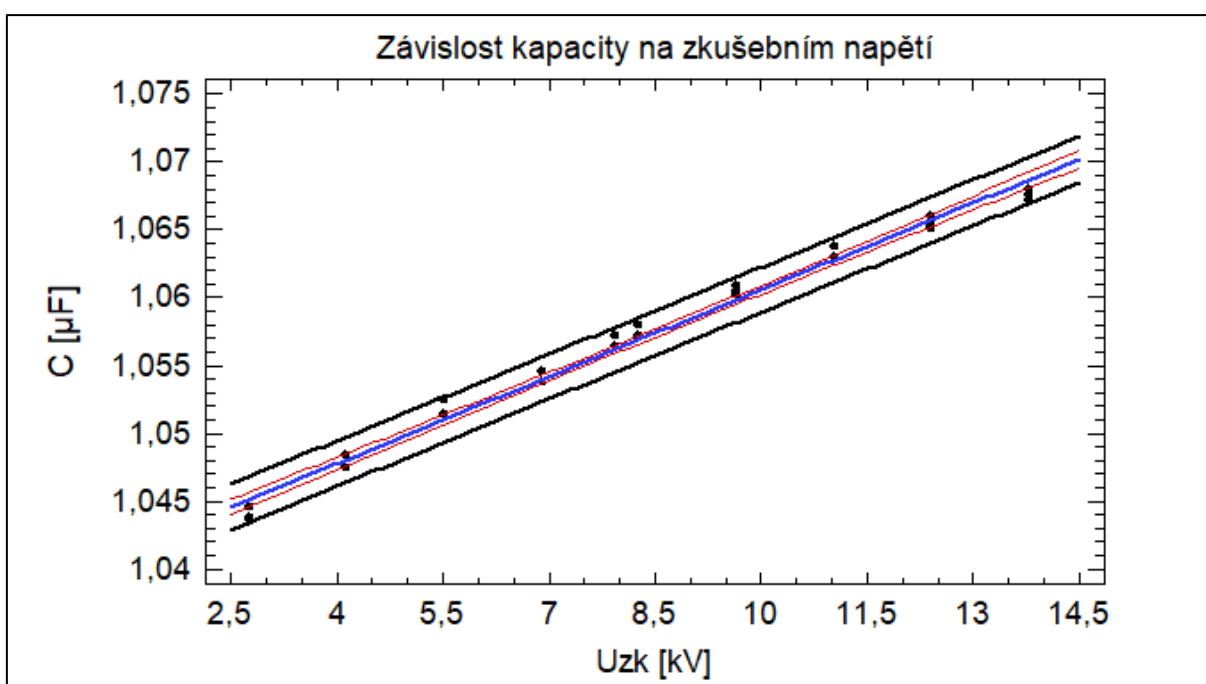
Pozn.: Pokud je za rokem v závorce uvedeno číslo, jedná se o pořadí provedené technické diagnostiky v daném roce.

## Kapacita

Na **grafu č. 5.10** je zobrazena vybraná regrese kapacity<sup>16</sup> měřené na všech fázích U, V a W v závislosti na zkušební napětí. Toto měření bylo provedeno v roce 2021. Koeficient determinace [15], který popisuje míru úspěšnosti (kvality) regresního modelu má hodnotu  $R^2 = 98,89 \%$ . Regresní křivka (modré barvy) má předpis dle rovnice **(16)** (jedná se o lineární regresní funkci [14]), dále je zde červená křivka, která znázorňuje (vymezuje) intervalový odhad střední hodnoty a černou křivkou je zobrazen (vymezen) intervalový odhad individuální hodnoty [15]. Oba intervalové odhady jsou se spolehlivostí 95 %.

$$C = 1,03923 + 0,00213503 \cdot U_{zk} \quad (16)$$

kde  $C$  je kapacita a  $U_{zk}$  je hodnota zkušební napětí.



Graf č. 5.10: Regrese kapacity fází generátoru G3 v roce 2021

Zbylé regresní analýzy s hodnotou koeficientu determinace a předpisem rovnice v jednotlivých letech sledovaného období jsou přiloženy v **příloze C** této práce.

V **tab. č. 9** jsou uvedeny všechny koeficienty determinace lineárních regresních funkcí, které byly vytvořeny z dat za sledované období.

<sup>16</sup> Na **grafu č. 5.10** je na ose X popisek  $U_{zk}$ , správný zápis je s indexem  $zk$ , tedy  $U_{zk}$ . Tento údaj reprezentuje nastavené zkušební napětí, na kterém byla měřena kapacita  $C$ . SW Statgraphics neumožňuje zápis indexu.

Tab. č. 9: Koeficienty determinace regresních modelů C generátoru G3 ve sledovaném období

Rok	R <sup>2</sup> [%]	Rok	R <sup>2</sup> [%]
2007	89,47	2014	98,63
2008	92,84	2015	99,06
2009	97,69	2016	98,77
2010 (1)	98,96	2017	98,34
2010 (2)	99,13	2018	98,55
2011	99,14	2019	98,75
2012	98,75	2020	98,69
2013	98,69	2021	98,89

Pozn.: Pokud je za rokem v závorce uvedeno číslo, jedná se o pořadí provedené technické diagnostiky v daném roce.

## 5.2.2 Generátor G4

Pro tento generátor jsou data automatizovaně ukládána od roku 2004 až po poslední měření provedené v roce 2021 s ročním intervalem provádění diagnostiky. V nezpracovaném datovém souboru tak je 18 záznamů o provedených diagnostikách.

### **Polarizační index**

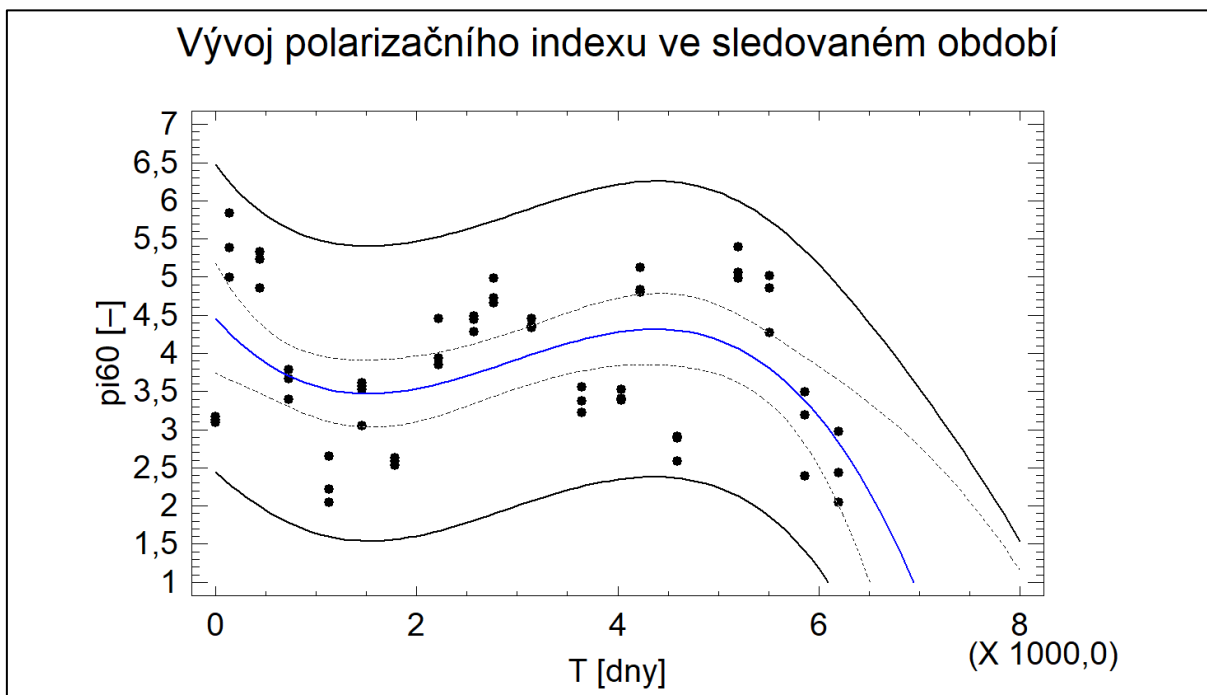
Na **grafu č. 5.11** jsou zobrazeny vypočtené hodnoty minutového polarizačního indexu [dále jen polarizačního indexu<sup>17</sup> – pozn. aut.] jednotlivých fází *U*, *V* a *W* na ose *Y*, v závislosti na datu (dnu) měření na ose *X*. Regresní křivka (modré barvy) má předpis dle rovnice **(17)** (jedná se o polynom 3. stupně [14]), dále je zde přerušovanou čarou znázorněný (vymezený) intervalový odhad střední hodnoty a tlustou (černou) čarou je zobrazen (vymezen) intervalový odhad individuální hodnoty [15]. Tomuto intervalovému odhadu také říkáme pás spolehlivosti<sup>18</sup>. Oba intervalové odhady jsou se spolehlivostí 95 %.

$$pi60 = 4,45566 - 0,00146082 \cdot T + 6,47186 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 7,32417 \cdot 10^{-11} \cdot T^3 \quad (17)$$

kde *pi60* je (minutový) polarizační index a *T* je reálná časová proměnná.

<sup>17</sup> Jak již bylo zmíněno v **kapitole 5.2** u generátoru G4 není uveden desetiminutový polarizační index.

<sup>18</sup> Pokud má pás spolehlivosti spolehlivost 95 %, pak to znamená, že při opakovaných statistických souborech 95 % souborů bude obsahovat tento výsledek a pouze 5 % jich bude jinak.



Graf č. 5.11: Regrese polarizačního indexu fází generátoru G4

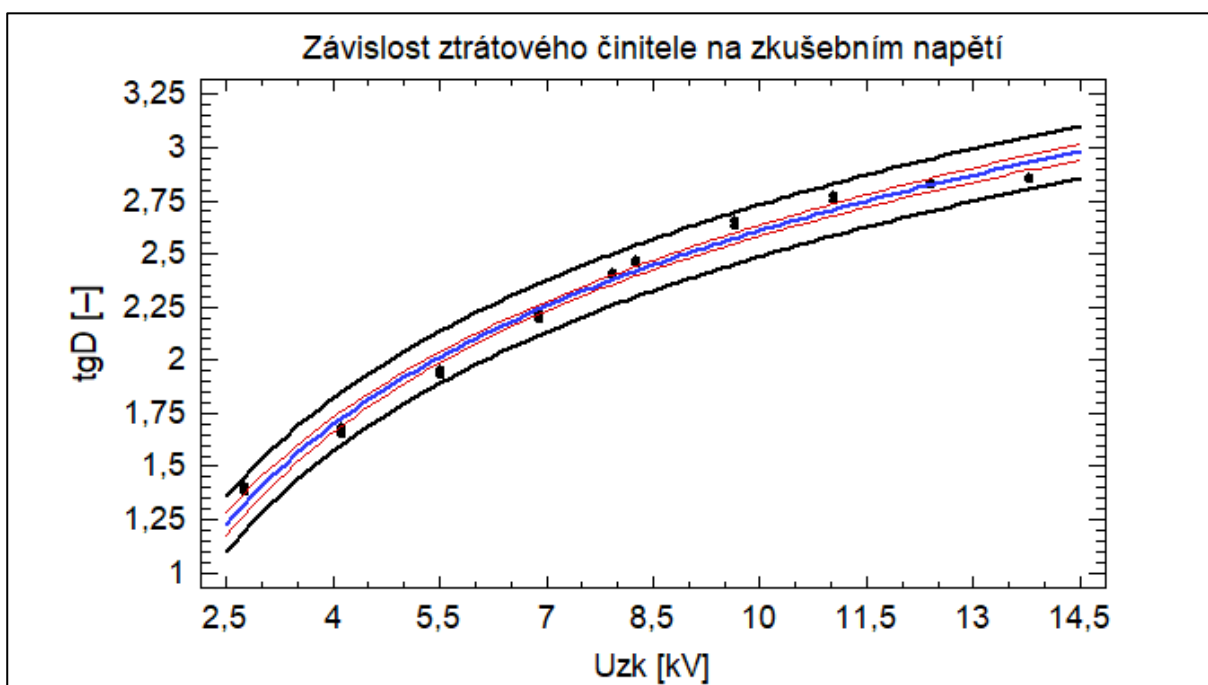
V průběhu zaznamenávaného období byly roky, kdy hodnota měřeného polarizačního indexu klesla pod 2,5, což indikuje elektrickou izolaci, která je navlhla a znečištěná. K těmto podstatným poklesům došlo v roce 2007 a klesající tendenci mají roky 2020 a 2021. Tento trend zapříčiňuje zakřivení polynomu a predikce stavu elektrické izolace na další období provozu tohoto generátoru bude pravděpodobně vyžadovat podrobnější sledování a pozornost. Ostatní měřené hodnoty ve sledovaném období mají velký meziroční rozptyl, a tak lze říci, že stav elektrické izolace statoru generátoru G4 byl minimálně suchý a čistý. Teoreticky vypočítaná hodnota polarizačního indexu z rovnice pro regresní polynom je během sledovaného období vždy vyšší než 2,5. Tato hodnota indikuje shodný závěr jako v předešlé větě. Polynom, který více kopíroval předložená data, měl 5. a vyšší stupeň. Obecně se snažím prokládat data polynomem co nejnižšího stupně. Oproti ostatním analyzovaným generátorům, má generátor G4 podstatně širší pásy spolehlivosti a je zatížen velkou variabilitou v datech. Zpětně ale nelze dokázat, jestli došlo k jakýmkoliv zásahů údržby, nebo dokonce poruše.

## Ztrátový činitel

Na **grafu č. 5.12** je zobrazena vybraná regrese ztrátového činitele<sup>19</sup> měřeného na všech fázích U, V a W v závislosti na zkušební napětí. Toto měření bylo provedeno v roce 2021. Koeficient determinace [15], který popisuje míru úspěšnosti (kvality) regresního modelu má hodnotu  $R^2 = 98,64 \%$ . Regresní křivka (modré barvy) má předpis dle rovnice **(18)** (jedná se o logaritmickou funkci [14]), dále je zde červená křivka, která znázorňuje (vymezuje) intervalový odhad střední hodnoty a černou křivkou je zobrazen (vymezen) intervalový odhad individuální hodnoty [15]. Oba intervalové odhady jsou se spolehlivostí 95 %.

$$\operatorname{tg}\delta = 0,313151 + 0,997513 \cdot \ln(U_{zk}) \quad (18)$$

kde  $\operatorname{tg}\delta$  je ztrátový činitel a  $U_{zk}$  je hodnota zkušební napětí.



Graf č. 5.12: Regrese ztrátového činitele fází generátoru G4 v roce 2021

Zbylé regresní analýzy s hodnotou koeficientu determinace a předpisem rovnice v jednotlivých letech sledovaného období jsou přiloženy v **příloze D** této práce.

V **tab. č. 10** jsou uvedeny všechny koeficienty determinace logaritmických regresních funkcí, které byly vytvořeny z dat za sledované období.

<sup>19</sup> Na **grafu č. 5.12** je na ose X popisek  $U_{zk}$ , správný zápis je s indexem  $zk$ , tedy  $U_{zk}$ . Tento údaj reprezentuje nastavené zkušební napětí, na kterém byl měřen ztrátový činitel  $\operatorname{tg}\delta$ , který je opět na ose Y zapsán jako  $\operatorname{tg}D$ . SW Statgraphics neumožňuje zápis indexu a řeckých písmen.



Tab. č. 10: Koeficienty determinace regresních modelů tgδ generátoru G4 ve sledovaném období

Rok	R <sup>2</sup> [%]	Rok	R <sup>2</sup> [%]
2005	98,77	2014	98,61
2006	96,28	2015	98,64
2007	98,57	2016	98,68
2008	98,44	2017	98,57
2009	98,95	2018	98,66
2010	99,11	2019	98,66
2011	98,81	2020	98,68
2012	98,63	2021	98,64
2013	98,63	---	---

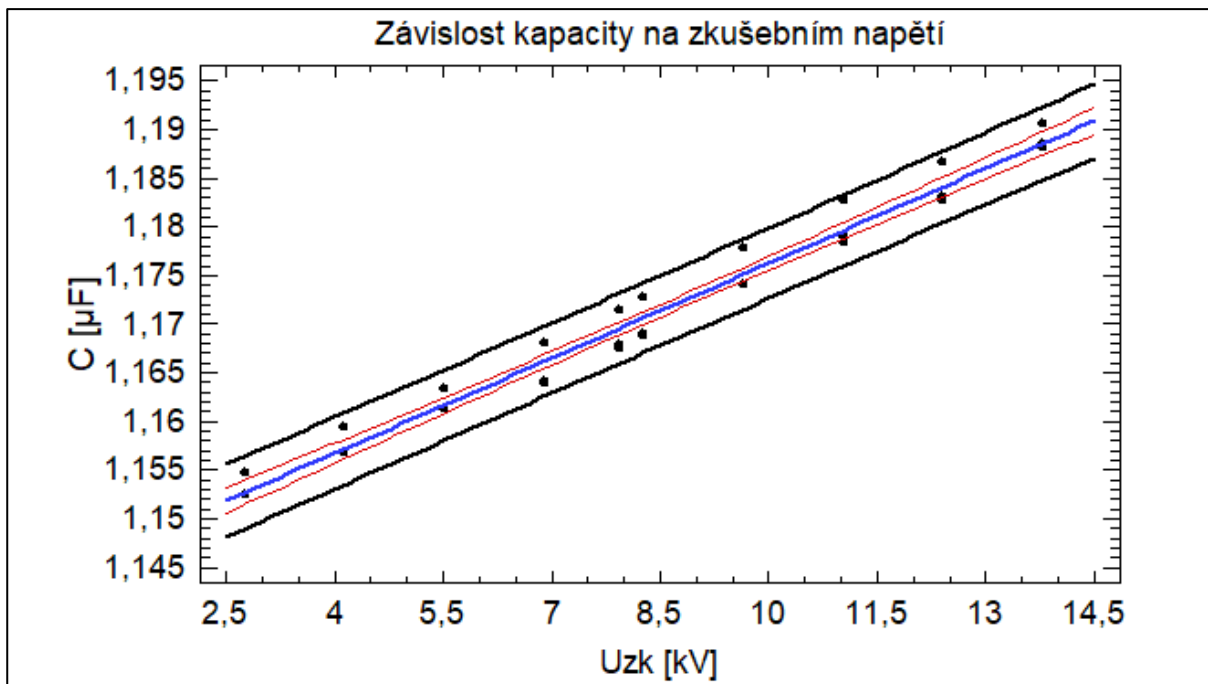
### Kapacita

Na **grafu č. 5.13** je zobrazena vybraná regrese kapacity<sup>20</sup> měřené na všech fázích U, V a W v závislosti na zkušební napětí. Toto měření bylo provedeno v roce 2021. Koeficient determinace [15], který popisuje míru úspěšnosti (kvality) regresního modelu má hodnotu  $R^2 = 97,74$  %. Regresní křivka (modré barvy) má předpis dle rovnice **(19)** (jedná se o lineární regresní funkci [14]), dále je zde červená křivka, která znázorňuje (vymezuje) intervalový odhad střední hodnoty a černou křivkou je zobrazen (vymezen) intervalový odhad individuální hodnoty [15]. Oba intervalové odhady jsou se spolehlivostí 95 %.

$$C = 1,14374 + 0,00325146 \cdot U_{zk} \quad (19)$$

kde  $C$  je kapacita a  $U_{zk}$  je hodnota zkušební napětí.

<sup>20</sup> Na **grafu č. 5.13** je na ose X popisek  $U_{zk}$ , správný zápis je s indexem  $zk$ , tedy  $U_{zk}$ . Tento údaj reprezentuje nastavené zkušební napětí, na kterém byla měřena kapacita  $C$ . SW Statgraphics neumožňuje zápis indexu.



Graf č. 5.13: Regrese kapacity fází generátoru G4 v roce 2021

Zbýlé regresní analýzy s hodnotou koeficientu determinace a předpisem rovnice v jednotlivých letech sledovaného období jsou přiloženy v **příloze D** této práce.

V **tab. č. 11** jsou uvedeny všechny koeficienty determinace lineárních regresních funkcí, které byly vytvořeny z dat za sledované období.

Tab. č. 11: Koeficienty determinace regresních modelů C generátoru G4 ve sledovaném období

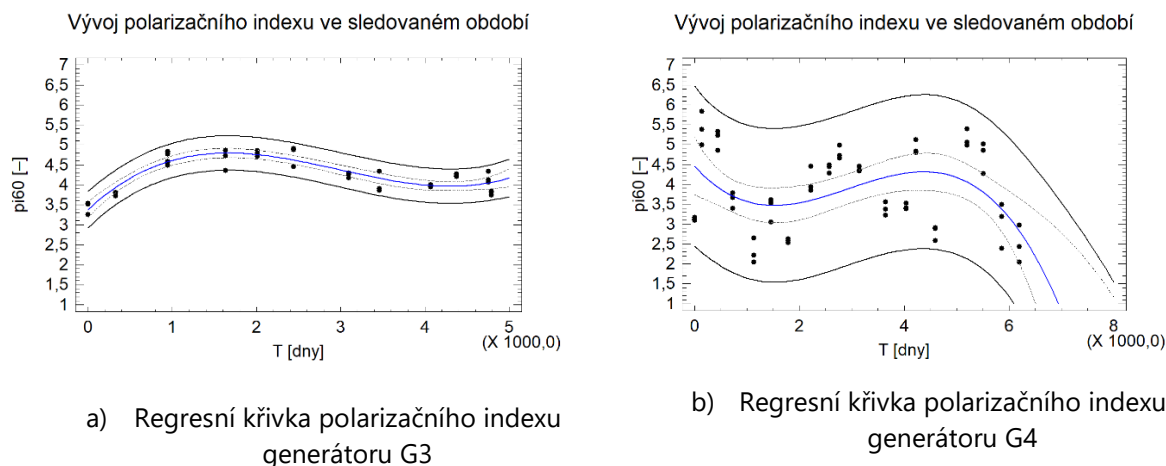
Rok	R <sup>2</sup> [%]	Rok	R <sup>2</sup> [%]
2005	98,75	2014	98,77
2006	98,23	2015	97,91
2007	99,03	2016	98,84
2008	98,85	2017	98,75
2009	98,66	2018	98,99
2010	97,91	2019	98,64
2011	97,55	2020	98,52
2012	98,87	2021	97,74
2013	98,89	---	---

## 5.2.3 Porovnání generátorů G3 a G4

Vzhledem ke shodné výkonnostní řadě, výrobci i roku výroby obou generátorů si v následujících řádcích dovolím srovnat dosažené výsledky z provedených analýz.

$$pi60 = 3,37812 + 0,00195404 \cdot T - 8,13653 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 9,09155 \cdot 10^{-11} \cdot T^3 \quad (20)$$

$$pi60 = 4,45566 - 0,00146082 \cdot T + 6,47186 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 7,32417 \cdot 10^{-11} \cdot T^3 \quad (21)$$



Graf č. 5.14: Porovnání regresních křivek polarizačního indexu generátorů G3 a G4

První část prováděné analýzy je zaměřena na zpracování regresní analýzy minutového polarizačního indexu a nalezení vhodného předpisu křivky, který tento trend popisuje. Polarizační index generátoru G3 vhodně popisuje polynom 3. stupně s předpisem dle rovnice (20). Výsledná křivka náleží oblasti, kde hodnota polarizačního indexu je vyšší než 2,5, tedy lze tvrdit, že elektrická izolace statoru generátoru byla po celou dobu sledovaného období v pásmu B – suchá a čistá. Pás spolehlivosti pro individuální hodnotu taktéž nezasahuje pod hodnotu polarizačního indexu 2,5. Polarizační index generátoru G4 vhodně popisuje taktéž polynom 3. stupně s předpisem dle rovnice (21). Výsledná křivka je po celou dobu sledovaného období v oblasti, kde je hodnota polarizačního indexu vyšší než 2,5, avšak má prudce klesající tendenci a pás spolehlivosti pro individuální hodnotu zasahuje i za tuto oblast, tedy do pásma C – kde může být izolace navlhla a znečištěná. Z trendového pohledu u generátoru G3 dochází k mírnému zvyšování hodnoty polarizačního indexu, tedy stav izolace zůstává minimálně stejně tak dobrý. U generátoru G4 naopak v posledních čtyřech letech (kdy byla provedena a zaznamenána diagnostika), dochází k výraznému poklesu hodnoty polarizačního indexu až k hranici, kdy stav izolace přechází do pásma C – v této oblasti je izolace znečištěná a navlhla.

Analýzovaný ztrátový činitele má u obou generátorů shodnou nejvhodnější závislost – popsanou logaritmickou regresní funkcí. Míra úspěšnosti regresního modelu, popsaná koeficientem determinace, je v průměru u G3  $R^2 = 96,29 \%$  a u G4  $R^2 = 98,55 \%$ .

Analyzovaná kapacita má u obou generátorů shodnou nejvhodnější závislost – popsanou lineární regresní funkcí. Míra úspěšnosti regresního modelu, popsaná koeficientem determinace, je v průměru u G3  $R^2 = 97,77\%$  a u G4  $R^2 = 98,52\%$ .

Veškeré provedené regresní analýzy ztrátového činitele a kapacity v závislosti na zkušebním napětí, jsou s předpisy funkcí a grafickým znázorněním v **přílohách C a D**.

## 5.3 PREDIKCE HODNOTY POLARIZAČNÍHO INDEXU

Pro predikci hodnot polarizačního indexu na další období, tj. předpokládaný výsledek z technické diagnostiky v roce 2022, bude použit tzv. placebo efekt, viz **kapitola 3.4.3**.

V prvním kroku bude vypočítána hodnota polarizačního indexu na regresní křivce v roce 2021, při známých hodnotách polarizačního indexu v tomto roce. Takto vypočítaná hodnota je „teoretická“ a prakticky nemusí být naměřena ani na jedné fázi generátoru. Bude sloužit k ověření vhodnosti této metody a dané regresní křivky u generátoru.

Ve druhém kroku „zakryjeme“ (nezahrneme) hodnoty naměřeného polarizačního indexu v roce 2021 a data proložíme novou regresní křivkou (bude mít jiné koeficienty, ale stále se bude jednat o stejný typ křivky). Vypočítáme zdánlivě neznámou hodnotu polarizačního indexu na této regresní křivce v roce 2021.

V poslední fázi výsledky z prvního a druhého kroku porovnáme. Zaměříme se na „smysluplnost“ takto vzniklého rozdílu – kdy nás zajímá, zda není výsledná hodnota z druhého výpočtu odchylená příliš mimo pás spolehlivosti. Pokud prohlásíme odchylku za přijatelnou, tedy že nám regresní křivka vhodně popisuje vývoj polarizačního indexu, můžeme provést predikci pro rok 2022. Tuto predikci spočítáme na regresní křivce dosazením hodnoty  $T = T(2021) + 365$  a výsledek prohlásíme za predikovaný vývoj polarizačního indexu v roce 2022. Takto vzniklou predikci zhodnotíme a přiložíme soubor doporučení.

### 5.3.1 Generátor G1

Do rovnice **(6)** z **kapitoly 5.1.1** dosadíme za proměnnou T hodnotu 5927 – to je hodnota reálné časové proměnné (datum) pro provedenou technickou diagnostiku v roce 2021. Výsledek 3,3426 dostaneme z rovnice **(22)**.

$$pi60 = 3,8748 - 0,0000897919 \cdot T = 3,8748 - 0,0000897919 \cdot 5927 = 3,3426 \quad (22)$$

Následovat bude výpočet polarizačního indexu v roce 2021 bez známých hodnot v tomto roce. Pak bude mít rovnice regresní křivky předpis dle **(23)** a dosazením hodnoty 5927 za T, dostaneme výsledek 3,4367 z rovnice **(24)**.

$$pi60 = 3,82431 - 0,0000653993 \cdot T \quad (23)$$

$$pi60 = 3,82431 - 0,0000653993 \cdot T = 3,82431 - 0,0000653993 \cdot 5927 = 3,4367 \quad (24)$$

Rozdíl oproti skutečné (známé) hodnotě v roce 2021 je +0,0941. Hodnota polarizačního indexu vypočtená z rovnice **(23)** nezasahuje mimo pás spolehlivosti. Proto si můžeme dovolit predikovat hodnotu polarizačního indexu v následujícím roce 2022.

Do rovnice **(22)** dosadíme za proměnnou T hodnotu 6292 pro provedenou technickou diagnostiku v roce 2022 a obdržíme výsledný predikovaný polarizační index 3,3098.

$$pi60 = 3,8748 - 0,0000897919 \cdot T = 3,8748 - 0,0000897919 \cdot 6292 = 3,3098 \quad (25)$$

Predikovaný polarizační index je vyšší než hodnota 2,5, tedy lze očekávat, že nedojde ke zhoršení stavu elektrické izolace statoru generátoru G1. Dle predikce by měla zůstat suchou a čistou.

## 5.3.2 Generátor G2

Do rovnice **(9)** z **kapitoly 5.1.2** dosadíme za proměnnou T hodnotu 5779 – to je hodnota reálné časové proměnné (datum) data pro provedenou technickou diagnostiku v roce 2021. Výsledek 3,5707 dostaneme z rovnice **(26)**.

$$\begin{aligned} pi60 &= 4,15636 - 0,000567801 \cdot T + 8,07158 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 = \\ &= 4,15636 - 0,000567801 \cdot 5779 + 8,07158 \cdot 10^{-8} \cdot 5779^2 = 3,5707 \end{aligned} \quad (26)$$

Následovat bude výpočet polarizačního indexu v roce 2021 bez známých hodnot v tomto roce. Pak bude mít rovnice regresní křivky předpis dle **(27)** a dosazením hodnoty 5779 za T, dostaneme výsledek 3,5557 z rovnice **(28)**.

$$pi60 = 4,15252 - 0,000561324 \cdot T + 7,92601 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 \quad (27)$$

$$\begin{aligned} pi60 &= 4,15252 - 0,000561324 \cdot 5779 + 7,92601 \cdot 10^{-8} \cdot 5779^2 = \\ &= 4,15252 - 0,000561324 \cdot 5779 + 7,92601 \cdot 10^{-8} \cdot 5779^2 = 3,5557 \end{aligned} \quad (28)$$

Rozdíl oproti skutečné (známé) hodnotě v roce 2021 je -0,0150. Hodnota polarizačního indexu vypočtená z rovnice **(27)** nezasahuje mimo pás spolehlivosti. Proto si můžeme dovolit predikovat hodnotu polarizačního indexu v následujícím roce 2022.

Do rovnice **(26)** dosadíme za proměnnou T hodnotu 6144 pro provedenou technickou diagnostiku v roce 2022 a obdržíme výsledný predikovaný polarizační index 3,7147.

$$pi60 = 4,15252 - 0,000561324 \cdot 6144 + 7,92601 \cdot 10^{-8} \cdot 6144^2 = 3,7147 \quad (29)$$

Predikovaný polarizační index je vyšší než hodnota 2,5, tedy lze očekávat, že nedojde ke zhoršení stavu elektrické izolace statoru generátoru G2. Dle predikce by měla zůstat suchou a čistou.

### 5.3.3 Generátor G3

Do rovnice (14) z kapitoly 5.2.1 dosadíme za proměnnou T hodnotu 4791 – to je hodnota reálné časové proměnné (datum) data pro provedenou technickou diagnostiku v roce 2020 z toho důvodu, že naměřená data z roku 2021 byla vyřazena při matematickém zpracování regresní křivky (polynomu). Toto měření bylo vyloučeno z důvodu příliš velkých odlehlých hodnot. Výsledek 4,0617 dostaneme z rovnice (30).

$$\begin{aligned} pi60 &= 3,37812 + 0,00195404 \cdot T - 8,13653 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 9,09155 \cdot 10^{-11} \cdot T^3 = \\ &= 3,37812 + 0,00195404 \cdot 4791 - 8,13653 \cdot 10^{-7} \cdot 4791^2 + 9,09155 \cdot 10^{-11} \cdot 4791^3 = \quad (30) \\ &= 4,0617 \end{aligned}$$

Následovat bude výpočet polarizačního indexu v roce 2020 bez známých hodnot v tomto roce. Pak bude mít rovnice regresní křivky předpis dle (31) a dosazením hodnoty 4791 za T, dostaneme výsledek 4,2730 z rovnice (32).

$$pi60 = 3,35057 + 0,00208489 \cdot T - 9,06019 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 1,06666 \cdot 10^{-10} \cdot T^3 \quad (31)$$

$$\begin{aligned} pi60 &= 3,35057 + 0,00208489 \cdot 4791 - 9,06019 \cdot 10^{-7} \cdot 4791^2 + 1,06666 \cdot 10^{-10} \cdot 4791^3 = \\ &= 4,2730 \quad (32) \end{aligned}$$

Rozdíl oproti skutečné (známé) hodnotě v roce 2020 je -0,2113. Hodnota polarizačního indexu vypočtená z rovnice (31) nezasahuje mimo pás spolehlivosti. Proto si můžeme dovolit predikovat hodnotu polarizačního indexu v roce 2022.

Do rovnice (30) dosadíme za proměnnou T hodnotu 5434 pro provedenou technickou diagnostiku v roce 2022 a obdržíme výsledný predikovaný polarizační index 4,5586.

$$\begin{aligned} pi60 &= 3,37812 + 0,00195404 \cdot 5434 - 8,13653 \cdot 10^{-7} \cdot 5434^2 + 9,09155 \cdot 10^{-11} \cdot 5434^3 = \\ &= 4,5586 \quad (33) \end{aligned}$$

Predikovaný polarizační index je vyšší než hodnota 2,5, tedy lze očekávat, že nedojde ke zhoršení stavu elektrické izolace statoru generátoru G3. Dle predikce by měla zůstat suchou a čistou.

### 5.3.4 Generátor G4

Do rovnice (17) z kapitoly 5.2.2 dosadíme za proměnnou T hodnotu 6201 – to je hodnota reálné časové proměnné (datum) data pro provedenou technickou diagnostiku v roce 2021. Výsledek 2,8190 dostaneme z rovnice (34).

$$\begin{aligned} pi60 &= 4,45566 - 0,00146082 \cdot T + 6,47186 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 7,32417 \cdot 10^{-11} \cdot T^3 = \\ &= 4,45566 - 0,00146082 \cdot 6201 + 6,47186 \cdot 10^{-7} \cdot 6201^2 - 7,32417 \cdot 10^{-11} \cdot 6201^3 = \end{aligned} \quad (34)$$
$$= 2,8190$$

Následovat bude výpočet polarizačního indexu v roce 2021 bez známých hodnot v tomto roce. Pak bude mít rovnice regresní křivky předpis dle (35) a dosazením hodnoty 6201 za T, dostaneme výsledek 3,2768 z rovnice (36).

$$pi60 = 4,39675 - 0,00125363 \cdot T + 5,35246 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 5,84109 \cdot 10^{-10} \cdot T^3 \quad (35)$$

$$\begin{aligned} pi60 &= 4,39675 - 0,00125363 \cdot 6201 + 5,35246 \cdot 10^{-7} \cdot 6201^2 - 5,84109 \cdot 10^{-10} \cdot 6201^3 = \\ &= 3,2768 \end{aligned} \quad (36)$$

Rozdíl oproti skutečné (známé) hodnotě v roce 2021 je -0,4578. Hodnota polarizačního indexu vypočtená z rovnice (35) nezasahuje mimo pás spolehlivosti. Proto si můžeme dovolit predikovat hodnotu polarizačního indexu v roce 2022.

Do rovnice (34) dosadíme za proměnnou T hodnotu 6566 pro provedenou technickou diagnostiku v roce 2022 a obdržíme výsledný predikovaný polarizační index 2,0327.

$$\begin{aligned} pi60 &= 4,45566 - 0,00146082 \cdot 6566 + 6,47186 \cdot 10^{-7} \cdot 6566^2 - 7,32417 \cdot 10^{-11} \cdot 6566^3 = \\ &= 2,0327 \end{aligned} \quad (37)$$

Predikovaný polarizační index pro rok 2022 je nižší než hodnota 2,5, tedy je nezbytné být na pozoru, protože z matematického hlediska existuje předpoklad snížení, respektive zvýšení vlhkosti a znečištění vinutí statoru generátoru G4.

## 5.4 OPTIMALIZACE POČTU MĚŘENÍ

Optimalizace je v této práci zaměřena na otázku: „Jsme schopni snížit opakovaný počet měření jedné veličiny tak, abychom dosahovali stejných výsledků?“. Např. pokud měříme kapacitu fází statoru 10krát a každé měření je provedeno na jiné hladině zkušebního napětí<sup>21</sup>. Bude testován soubor dat, kde bude zakryta každá druhá měřená hodnota. Tato zakrytá místa budou ale dopočítána z předpisu pro regresní křivku, která vznikne pouze v tomto případě z poloviny naměřených hodnot. Takto vzniklý soubor se vhodně matematicky otestuje a z výsledku takového testu bude učiněn závěr. Testovat se bude optimalizace počtu měření kapacity a ztrátového činitele na všech generátorech. K testování budou sloužit naměřená data z technické diagnostiky v roce 2021. Jedná se o nejaktuálnější data, která máme k dispozici, a proto by měla korespondovat s aktuálním technickým stavem zařízení.

### 5.4.1 Kapacita

Na generátoru G4 bude podrobně rozepsán postup testování optimalizovaného počtu měření kapacity.

Průběh závislosti kapacity na zkušebním napětí generátoru G4 je zobrazen v **kapitole 5.2.2: Kapacita** na **grafu č. 5.13** a má lineární průběh popsany rovnicí **(19)** v téže kapitole. Po dosazení zkušebních napětí do této rovnice, dostaneme hodnoty kapacity na jednotlivých hladinách zkušebního napětí. Tyto výsledky jsou uvedeny v **tab. č. 12** sloupec kapacity. Pro vypočítání hodnot kapacity z optimalizovaného počtu měření je zapotřebí vytvořit novou regresní křivku. Tato křivka vznikne proložením polovičním počtem měření tak, že se zakryjí hodnoty měřené na zkušebních napětí 4,14; 6,90; ...; 13,80 [kV], tedy každé druhé měření. Regresní křivka bude opět přímka popsaná rovnicí **(38)**. Po dosazení zkušebních napětí do této rovnice dostaneme hodnoty kapacity na jednotlivých hladinách zkušebního napětí. Tyto výsledky jsou uvedeny v **tab. č. 12** sloupec optimalizovaná kapacita. Pro srovnání je na **grafu č. 5.15** zobrazeno srovnání regresních křivek před a po optimalizování.

$$C_o = 1,14419 + 0,00319952 \cdot U_{zk} \quad (38)$$

kde  $C_o$  je kapacita a  $U_{zk}$  je hodnota zkušebního napětí.

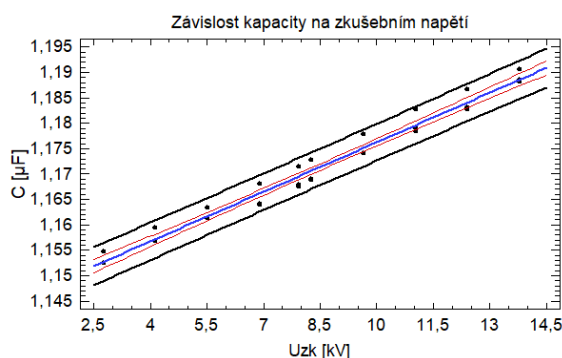
---

<sup>21</sup> Řídícího se empirickým vztahem  $U_{zk} = 0,1 \cdot U_m$ , kde  $U_{zk}$  je hodnota zkušebního napětí a  $U_m$  je hodnota jmenovitého napětí generátoru.

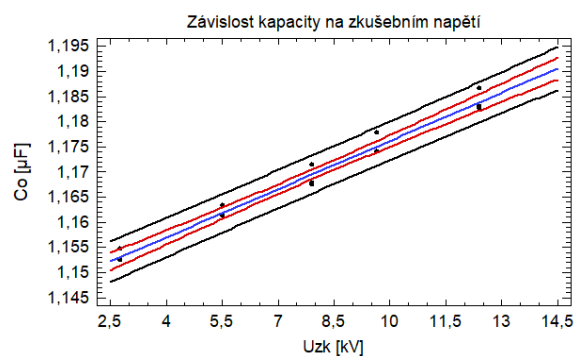


Tab. č. 12: Vypočítané hodnoty kapacity generátoru G4 v roce 2021

Zkušební napětí $U_{zk}$ [kV]	Kapacita $C$ [ $\mu$ F]	Optimalizovaná kapacita $C_o$ [ $\mu$ F]	Rozdíl kapacit $C_d$ [ $\mu$ F]
2,76	1,152714	1,153021	-0,000307
4,14	1,157201	1,157436	-0,000235
5,52	1,161688	1,161851	-0,000163
6,90	1,166175	1,166267	-0,000092
7,93	1,169524	1,169562	-0,000038
8,28	1,170662	1,170682	-0,000020
9,66	1,175149	1,175097	0,000052
11,04	1,179636	1,179513	0,000123
12,42	1,184123	1,183928	0,000195
13,80	1,188610	1,188343	0,000267



c) Regresní křivka s plným počtem měření



d) Regresní křivka s optimalizovaným počtem měření (polovičním)

Graf č. 5.15: Srovnání regresních křivek před a po optimalizování

SW Statgraphics umožňuje aplikovat tzv. Studentův test pro jeden výběr (t-test), kde jedním výběrem budou právě spočítané hodnoty rozdílu kapacit  $C_d$ <sup>22</sup>. Testujeme hypotézu, že střední hodnota je rovna 0 (hypotéza vůči nule – soubory jsou si podobné), tedy  $H_0 : \mu = 0$ . Podle výsledné P-hodnoty, která vyšla 0,718356 můžeme prohlásit, že na hladině významnosti 5 % nezamítáme hypotézu  $H_0$ .

<sup>22</sup> Prakticky byl proveden tzv. Studentův test pro párové hodnoty. Jedná o rozdíl veličin  $C - C_o$ .

Dále je přiložena pouze **tab. č. 13** s výsledky testování hypotézy  $H_0 : \mu = 0$  pro kapacitu generátorů G1 až G4 na hladině významnosti 5 %. Rozepsané tabulky s výpočty a předpisy ostatních křivek pro optimalizovaný počet měření kapacity jsou přiloženy v **příloze E**.

Tab. č. 13: Souhrn testovaných hypotéz pro kapacitu

Generátor	P-hodnota	Rozhodnutí o hypotéze
G1	0,0	Zamítám
G2	0,476378	Nezamítám
G3	0,167052	Nezamítám
G4	0,718356	Nezamítám

## 5.4.2 Ztrátový činitel

Na generátoru G1 bude podrobně rozepsán postup testování optimalizovaného počtu měření ztrátového činitele.

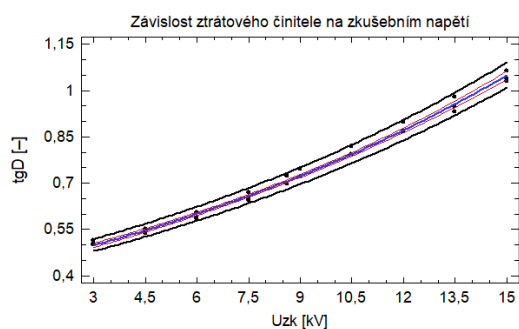
Průběh závislosti ztrátového činitele na zkušební napětí generátoru G1 je zobrazen v **kapitole 5.1.1: Ztrátový činitel** na **grafu č. 5.2** a má exponenciální průběh popsáný rovnicí **(7)** v téže kapitole. Po dosazení zkušebních napětí do této rovnice, dostaneme hodnoty ztrátového činitele na jednotlivých hladinách zkušebního napětí. Tyto výsledky jsou uvedeny v **tab. č. 14** sloupec ztrátový činitel. Pro vypočítání hodnot ztrátového činitele z optimalizovaného počtu měření je zapotřebí vytvořit novou regresní křivku. Tato křivka vznikne proložením polovičním počtem měření tak, že se „zakryjí“ hodnoty měřené na zkušebních napětí 4,50; 7,50; ...; 15,00 [kV], tedy každé druhé měření. Regresní křivka bude opět exponenciála popsána rovnicí **(39)**. Po dosazení zkušebních napětí do této rovnice dostaneme hodnoty ztrátového činitele na jednotlivých hladinách zkušebního napětí. Tyto výsledky jsou uvedeny v **tab. č. 14** sloupec optimalizovaný ztrátový činitel. Pro srovnání je na **grafu č. 5.16** zobrazeno srovnání regresních křivek před a po optimalizování.

$$\operatorname{tg}\delta_o = \exp(-0,876843 + 0,0615168 \cdot U_{zk}) \quad (39)$$

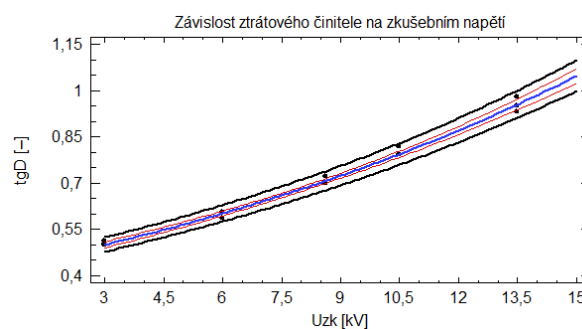
kde  $\operatorname{tg}\delta_o$  je ztrátový činitel a  $U_{zk}$  je hodnota zkušebního napětí.

Tab. č. 14: Vypočítané hodnoty ztrátového činitele generátoru G1 v roce 2021

Zkušební napětí Uzk [kV]	Ztrátový čítel $\text{tg } \delta$ [-]	Optimalizovaný ztrátový čítel $\text{tg } \delta_o$ [-]	Rozdíl ztrátový činitelů $\text{tg } \delta_d$ [-]
3,00	0,498352	0,500427	-0,002076
4,50	0,546986	0,548802	-0,001816
6,00	0,600366	0,601853	-0,001487
7,50	0,658956	0,660032	-0,001076
8,62	0,706401	0,707111	-0,000710
9,00	0,723263	0,723835	-0,000572
10,50	0,793846	0,793806	0,000040
12,00	0,871317	0,870540	0,000777
13,50	0,956348	0,954692	0,001656
15,00	1,049678	1,046979	0,002699



a) Regresní křivka s plným počtem měření



b) Regresní křivka s optimalizovaným počtem měření (polovičním)

Graf č. 5.16: Srovnání regresních křivek před a po optimalizování

SW Statgraphics umožňuje aplikovat tzv. Studentův test pro jeden výběr (t-test), kde jedním výběrem budou právě spočítané hodnoty rozdílu ztrátových činitelů  $\text{tg}(\delta_d)$ <sup>23</sup>. Testujeme hypotézu, že střední hodnota je rovna 0 (hypotéza vůči nule – soubory jsou si podobné), tedy  $H_0 : \mu = 0$ . Podle výsledné P-hodnoty, která vyšla 0,614685 můžeme prohlásit, že na hladině významnosti 5 % nezamítáme hypotézu  $H_0$ .

<sup>23</sup> Prakticky byl proveden tzv. Studentův test pro párové hodnoty. Jedná o rozdíl veličin  $\text{tg}\delta - \text{tg}\delta_o$ .

Dále je přiložena **tab. č. 15** s výsledky testování hypotézy  $H_0 : \mu = 0$  pro ztrátový činitel generátorů G1 až G4 na hladině významnosti 5 %. Rozepsané tabulky s výpočty a předpisy ostatních křivek pro optimalizovaný počet měření ztrátového činitele jsou přiloženy v **příloze F**.

*Tab. č. 15: Souhrn testovaných hypotéz pro ztrátový činitel*

<b>Generátor</b>	<b>P-hodnota</b>	<b>Rozhodnutí o hypotéze</b>
G1	0,614685	Nezamítám
G2	0,141993	Nezamítám
G3	0,534100	Nezamítám
G4	0,0	Zamítám

## 6 VLASTNÍ ZÁVĚR A DOPORUČENÍ

V práci byla provedena rešerše současného stavu technické diagnostiky a elektrodiagnostiky, prováděné na vinutí statoru generátoru. Konkrétně pak sledovaných veličin: minutový polarizační index, ztrátový činitel a kapacita. Bylo uvedeno začlenění regresní analýzy do operačního výzkumu a popsán způsob testování statistické hypotézy, který se v této práci využil pro opodstatnění optimalizace počtu měření ztrátového činitele a kapacity.

Byla provedena regresní analýza sledovaných veličin na čtyřech generátorech z dvou různých výkonnostních řad. Párové porovnání u jednotlivých typů bylo provedeno na konci dílčích kapitol. Dílčí výsledky z regresních analýz naznačují, že generátory se stejným konstrukčním výkonem mají shodný tvar křivky závislosti ztrátového činitele nebo kapacity na jmenovitém napětí. Trend minutového polarizačního indexu se musí posuzovat individuálně.

V **kapitole 5.3**, která se zabývá predikcí polarizačního indexu, byla prokázána vhodnost použití vytvořených regresních modelů pro predikci hodnoty tohoto indexu. U generátorů G1 – G3 byly obdrženy uspokojující informace o vývoji (prognóze) polarizačního indexu v následujícím (2022) roce. Hodnoty tohoto indexu by měly zůstat v pásmu B – izolace vinutí statoru generátoru by měla být suchá a čistá. U generátoru G4, vlivem tvaru regresního polynomu a také faktu, že za poslední čtyři roky docházelo ke konstantnímu poklesu hodnoty polarizačního indexu, dojde při vypočítání předpokládané hodnoty k poklesu pod hranici 2,5 na 2,03, což z matematického hlediska znamená, že existuje předpoklad snížení, respektive zvýšení vlhkosti a znečištění vinutí. Pro tento generátor je možné doporučit zvýšení pozornosti při sledování tohoto parametru a nelze vyloučit nezbytné provedení technické diagnostiky před naplánovanou (roční) odstávkou.

Závěrečným řešeným problémem byla otázka, zdali můžeme snížit počet měření veličin: ztrátového činitele a kapacity, aby nedošlo k naměření hodnot, které nemají dostatečnou výpovědní hodnotu. Testování statistické hypotézy bylo provedeno na naměřených datech z roku 2021. Tyto hodnoty by měly nejvhodněji popisovat technický stav sledovaného zařízení. Testovala se hypotéza vůči nule, tj. že statistické soubory jsou si podobné. Pro kapacitu se testovaná hypotéza zamítla jedenkrát, a to pro generátor G1. K jednomu zamítnutí došlo i u testování hypotézy pro ztrátový činitel, avšak na datech z generátoru G4. Na hladině významnosti 5 % nedošlo k zamítnutí hypotézy v šesti případech. Je možné doporučit snížení počtu celkového měření těchto sledovaných veličin na polovinu. Respektive krok, nastavování jmenovitého zkušebního napětí na  $U_{zk} = 0,2 \cdot U_m$ . Tím dojde ke snížení potřebného času na měření těchto veličin a v konečném důsledku i provedení kompletní diagnostiky zařízení. To povede k ušetření finančních prostředků za provedenou diagnostiku.

Tab. č. 16: Souhrn testovaných hypotéz na kapacitě a ztrátovém činiteli

Generátor	Kapacita		Ztrátový činitel	
	P-hodnota	Rozhodnutí o hypotéze	P-hodnota	Rozhodnutí o hypotéze
G1	0,0	Zamítám	0,614685	Nezamítám
G2	0,476378	Nezamítám	0,141993	Nezamítám
G3	0,167052	Nezamítám	0,534100	Nezamítám
G4	0,718356	Nezamítám	0,0	Zamítám

Dále lze formulovat tato doporučení:

1. Zaměřit se na revidování podnikových norem, dodržování aktuálně platné metodiky a její soustavné upřesňování.
2. U těchto posuzovaných veličin (kapacita, ztrátový činitel a izolační odpor<sup>1</sup>), respektive při jejich měření hraje zásadní roli teplota stroje a okolí. V praxi často bývá tento faktor opomíjen a nejsou dodržovány předepsané doby chladnutí zařízení. Také podmínky, za kterých dochází k chladnutí, mají vliv na výslednou teplotu a rozložení této teploty. Dodržování těchto doporučení, případně postupů v podnikové normě, má zásadní dopad!
3. Pokud personální obsazenost umožňuje zajistit, aby diagnostiku prováděla stále jedna a tatáž osoba. Dále ať jsou vedeny podrobné záznamy o diagnostikovi, který úkony prováděl.
4. Pro statistické zpracování a hodnocení naměřených dat jsou nezbytné záznamy o zásahu údržby nebo výměně prováděné na zařízení. Pokud dojde k náhlé změně hodnoty pozorované veličiny, je nezbytné zjistit bez zbytečného odkladu důvod této skokové změny.
5. Zavedení sledování trendu měřených veličin, nesledovat pouze kritické hodnoty (pro které jsou nastaveny alarmy).

---

<sup>1</sup> Z hodnoty izolačního odporu se vypočítává minutový polarizační index, viz. **kapitola 3.3.1.**

## 7 ZÁVĚR

Předložená diplomová práce se věnuje možnostem využití metod operačního výzkumu v reálném inženýrském problému. Objektem technické diagnostiky byly čtyři generátory, respektive satorová vinutí těchto generátorů. Vstupní data byla shromážděna z reálného provozu elektrických generátorů v ČR. Sledovanými veličinami byly: kapacita, ztrátový činitel a izolační odpor (minutový polarizační index). Jednotlivé veličiny byly postupně analyzovány pomocí regresní analýzy a dále bylo aplikováno testování statistické hypotézy. Bylo posuzováno riziko kritického snížení pozorované veličiny polarizačního indexu, které by v konečném důsledku mohlo vést k proražení izolace generátoru a tím i jeho vyřazení z provozu.

Výsledky z regresní analýzy ukazují na tato fakta: regresní modely (trendy) minutových polarizačních indexů se musí hodnotit nezávisle na typu výkonnostní řady generátoru. Generátory se stejným konstrukčním výkonem mají shodný tvar křivky závislosti ztrátového činitele nebo kapacity na zkušebním napětí. Generátory G1 a G2 mají shodný tvar křivky závislosti ztrátového činitele na zkušebním napětí – exponenciální závislost. Závislost kapacity na zkušebním napětí je pak popsána kvadratickou regresní funkcí. Generátory G3 a G4 mají shodný tvar křivky závislosti ztrátového činitele na zkušebním napětí – logaritmická závislost. Závislost kapacity na zkušebním napětí je pak popsána lineární regresní funkcí.

Predikce hodnoty polarizačního indexu ukazuje na vyhovující stav izolace vinutí satoru generátorů G1 – G3, hodnota je vyšší než 2,5. Generátor G4 vykazuje zhoršující se tendenci tohoto sledovaného parametru. Následující rok je předpokládána hodnota nižší než 2,5 (2,03). To může být důvodem zvýšení vlhkosti a znečištění vinutí.

Na hladině významnosti 5 % nebylo zamítnuto 6 z 8 testovaných hypotéz. Na tomto základu bylo doporučeno snížení počtu celkového měření sledovaných veličin: kapacity a ztrátového činitele o polovinu. Dojde tak ke snížení časové dotace na provádění měření těchto veličin a tím pádem i k ušetření finančních prostředků za provedenou technickou diagnostiku.

V předchozí kapitole byla formulována doporučení autora směrem k provozovateli sledovaných generátorů, která by měla pomoci ke zlepšení kvality sběru a vyhodnocování dat z technické diagnostiky. Nutno dodat, že pro kvalitnější rozbor/analýzu dané problematiky by to chtělo mít k dispozici více údajů z dalších generátorů.

Možností vývoje technické diagnostiky v této oblasti je návaznost na Průmysl 4.0 a jeho moderní přístupy za pomoci metod on-line diagnostiky, které jsou aplikovány na strojních zařízeních a sledování parametrů z: diagnostiky vibrací, teploty, hluku.





# SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BOLDEA, Ion. *Synchronous generators, second edition*. 2015. ISBN 149872356X. Dostupné z: doi:10.1201/b19310
- [2] ELEKTRICKÉ STROJE: Konstrukce *synchronního alternátoru*. In: *Cez.cz* [online]. 2007 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: [https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/images/05/\\_synchronni.jpg](https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/images/05/_synchronni.jpg)
- [3] MENTLÍK, Václav a kol. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. : il. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [4] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006, 406 s. : il. ISBN 80-7300-158-6.
- [5] HAMMER, Miloš. *Senzorika, měření a diagnostika*. 2022. Brno: VUT FSI. [Přednášky].
- [6] ZUTH, Daniel. *Technická diagnostika I*. 2020. Brno: VUT FSI. [Přednášky].
- [7] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. : il. ; 24 cm. ISBN 80-7300-189-6.
- [8] BARTÁK, Alexandr, Luděk MRAVINÁČ, Jacek NEUMAN a Jan VAŘÁK. *Diagnostika poruch izolací elektrických strojů*. Vydání první. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1984, 254 stran : grafy.
- [9] ČSN EN IEC 60034-27-4. *Točivé elektrické stroje - Část 27-4: Měření izolačního odporu a polarizačního indexu izolace vinutí točivých elektrických strojů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. Třídící znak 350000.
- [10] ČSN EN 60034-27-3. *Točivé elektrické stroje - Část 27-3: Měření dielektrického ztrátového činitele na izolaci statorového vinutí točivých elektrických strojů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016. Třídící znak 350000.
- [11] KLAPKA, Jindřich, Jiří DVOŘÁK a Pavel POPELA. *Metody operačního výzkumu*. Vyd. 2. Brno: VUTIUM, 2001, iii, 165 s. ; 30 cm. ISBN 80-214-1839-7.
- [12] RAJU, N. V. S. *Operations Research*. Milton: BSP, 2019. ISBN 9780367365967. Dostupné z: doi:10.1201/9780367366070
- [13] KRAUS, Mathias, Stefan FEUERRIEGEL a Asil OZTEKIN. *Deep learning in business analytics and operations research: Models, applications and managerial implications*. *European journal of operational research* [online]. Elsevier B.V, 2020, 281(3), 628-641 [cit. 2022-05-20]. ISSN 0377-2217. Dostupné z: doi:10.1016/j.ejor.2019.09.018

- [14] KOŽÍŠEK, Jan, *Barbora STIEBEROVÁ a Miroslav ŽILKA*. Rozhodovací modely pro manažery v průmyslové praxi. 1. vydání. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2020, 316 stran : grafy. ISBN 978-80-01-06698-0.
- [15] KARPÍŠEK, Zdeněk. *Matematika IV: statistika a pravděpodobnost*. 4., přeprac. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014, 171 s. : tabulky, grafy. ISBN 978-80-214-4858-2.
- [16] KOŽÍŠEK, Jan a *Barbora STIEBEROVÁ*. *Statistická a rozhodovací analýza*. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2017, 252 stran : ilustrace. ISBN 978-80-01-05509-0.
- [17] Statgraphics Centurion: *User Manual in PDF format*. StatPoint Technologies, Inc., 2009. Dostupné také z: <https://www.statgraphics.com/resources-downloads>
- [18] TICHÝ, Milík. *Ovládání rizika: analýza a management*. Vyd. 1. Praha: C.H. Beck, 2006, xxvi, 396 s. : il., grafy, tab. ISBN 80-7179-415-5.
- [19] *A guide to the project management body of knowledge*. Sixth Edition. Newtown Square: Project Management Institute, 2017, xxix, 756 s. ISBN 978-1-62825-184-5.
- [20] SMEJKAL, Vladimír a *Karel RAIS*. *Řízení rizik ve firmách a jiných organizacích*. 4., aktualiz. a rozš. vyd. Praha: Grada, 2013, 483 s. : portréty, grafy, tab. ISBN 978-80-247-4644-9.
- [21] HANÁČEK, Petr. *Bezpečnost informačních systémů. 2021*. Brno: VUT FIT. [Přednášky].
- [22] SMEJKAL, Vladimír a *Karel RAIS*. *Řízení rizik*. 1. vyd. Praha: Grada, 2003, 270 s. : il. ISBN 80-247-0198-7.
- [23] DOSTÁL, Petr, *Karel RAIS a Zdeněk SOJKA*. Pokročilé metody manažerského rozhodování: konkrétní příklady využití metod v praxi. 1. vyd. Praha: Grada, 2005, 166 s. : il. ISBN 80-247-1338-1.
- [24] DOLEŽAL, Jan. *Projektový management: komplexně, prakticky a podle světových standardů*. První vydání. Praha: Grada Publishing, 2016, 418 stran : ilustrace, portréty. ISBN 978-80-247-5620-2.
- [25] HAIMES, Yacov Y. *Risk modeling, assessment, and management*. Fourth edition. Hoboken: Wiley, 2016, xx, 690 stran : ilustrace ; 29 cm. ISBN 978-1-119-01798-1.
- [26] MODARRES, M, *Mark KAMINSKIY a Vasily KRIVTSOV*. Reliability engineering and risk analysis. Boca Raton: Taylor & Francis, a CRC title, part of the Taylor & Francis imprint, a member of the Taylor & Francis Group, the academic division of T&F Informa, plc, 2017. ISBN 9781498745871. Dostupné také z: <https://doi-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.1201/9781315382425>
- [27] ANDĚL, Jiří. *Statistické metody. 4. upravené vydání*. Praha: Matfyzpress, 2007, 299 stran. : ilustrace ; 24 cm. ISBN 978-80-7378-003-6.
- [28] PARDALOS, Panos M a *Mauricio G. C RESENDE*. Handbook of Applied Optimization. Oxford: Oxford University Press, 2002, 1095 s. ISBN 0-19-512594-0.

- [29] WILLIAMS, H. P. *Model building in mathematical programming*. Fifth edition. Chichester: Wiley, 2013, xx, 411 stran. ISBN 978-1-118-44333-0.
- [30] NASH, Stephen G a Ariela SOFER. *Linear and Nonlinear Programming*. New York: McGraw-Hill, 1996, 692 s. ISBN 0-07-114537-0.
- [31] KONEČNÝ, Antonín. *Využití umělé inteligence v technické diagnostice*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2021, 77 s. Dostupné také z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=225301](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=225301). Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Daniel Zuth, Ph.D.



# SEZNAM TABULEK

Tab. č. 1: Velikost minutového polarizačního indexu v závislosti na stavu izolace .....	23
Tab. č. 2: Modelovaná data pro vstup do regresní analýzy [15] .....	29
Tab. č. 3: Možnosti rozhodnutí o hypotéze H [15] .....	32
Tab. č. 4: Koeficienty determinace regresních modelů $\text{tg}\delta$ generátoru G1 ve sledovaném období .....	42
Tab. č. 5: Koeficienty determinace regresních modelů C generátoru G1 ve sledovaném období .....	44
Tab. č. 6: Koeficienty determinace regresních modelů $\text{tg}\delta$ generátoru G2 ve sledovaném období .....	46
Tab. č. 7: Koeficienty determinace regresních modelů C generátoru G2 ve sledovaném období .....	48
Tab. č. 8: Koeficienty determinace regresních modelů $\text{tg}\delta$ generátoru G3 ve sledovaném období .....	52
Tab. č. 9: Koeficienty determinace regresních modelů C generátoru G3 ve sledovaném období .....	54
Tab. č. 10: Koeficienty determinace regresních modelů $\text{tg}\delta$ generátoru G4 ve sledovaném období .....	57
Tab. č. 11: Koeficienty determinace regresních modelů C generátoru G4 ve sledovaném období .....	58
Tab. č. 12: Vypočítané hodnoty kapacity generátoru G4 v roce 2021 .....	65
Tab. č. 13: Souhrn testovaných hypotéz pro kapacitu .....	66
Tab. č. 14: Vypočítané hodnoty ztrátového činitele generátoru G1 v roce 2021 .....	67
Tab. č. 15: Souhrn testovaných hypotéz pro ztrátový činitel .....	68
Tab. č. 16: Souhrn testovaných hypotéz na kapacitě a ztrátovém činiteli .....	70



# SEZNAM GRAFŮ

Graf č. 3.1: Graf závislosti y na x .....	30
Graf č. 5.1: Regrese polarizačního indexu fází generátoru G1 .....	41
Graf č. 5.2: Regrese ztrátového činitele fází generátoru G1 v roce 2021 .....	42
Graf č. 5.3: Regrese kapacity fází generátoru G1 v roce 2021 .....	43
Graf č. 5.4: Regrese polarizačního indexu fází generátoru G2 .....	45
Graf č. 5.5: Regrese ztrátového činitele fází generátoru G2 v roce 2021 .....	46
Graf č. 5.6: Regrese kapacity fází generátoru G2 v roce 2021 .....	47
Graf č. 5.7: Porovnání regresních křivek polarizačního indexu generátorů G1 a G2 .....	48
Graf č. 5.8: Regrese polarizačního indexu fází generátoru G3 .....	51
Graf č. 5.9: Regrese ztrátového činitele fází generátoru G3 v roce 2021 .....	52
Graf č. 5.10: Regrese kapacity fází generátoru G3 v roce 2021 .....	53
Graf č. 5.11: Regrese polarizačního indexu fází generátoru G4 .....	55
Graf č. 5.12: Regrese ztrátového činitele fází generátoru G4 v roce 2021 .....	56
Graf č. 5.13: Regrese kapacity fází generátoru G4 v roce 2021 .....	58
Graf č. 5.14: Porovnání regresních křivek polarizačního indexu generátorů G3 a G4 .....	59
Graf č. 5.15: Srovnání regresních křivek před a po optimalizování .....	65
Graf č. 5.16: Srovnání regresních křivek před a po optimalizování .....	67





# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. č. 3.1: Konstrukce synchronního stroje [2].....	19
Obr. č. 3.2: Časová závislost izolačního odporu suché a vlhké izolace [7] .....	23
Obr. č. 3.3: Průběh absorpčních charakteristik pro suchý a navlhlý materiál [7].....	23
Obr. č. 4: Zobrazení polí škál A – D pro hodnocení pi60.....	24
Obr. č. 5: Scheringův vysokonapěťový můstek [7].....	25



# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

ČSN EN ISO	Česká verze mezinárodní normy převzaté evropskou komisí pro normalizaci
ČSN EN IEC	Česká verze mezinárodní elektrotechnické normy převzaté evropskou komisí pro normalizaci
ČSN EN	Česká verze evropské normy
U, V, W	Fáze vinutí generátoru
$U_m$	Jmenovité napětí
$U_{zk}$ [V]	Zkušební napětí
$pi$	Polarizační index
$pi60$ ( $pi600$ )	Minutový (desetiminutový) polarizační index
$PI$	<i>Polarization index</i> (Polarizační index)
$R_{iz}$	Izolační odpor
$R_{iz60}$ , $R_{iz15}$ [ $\Omega$ ]	Izolační odpor naměřený v 60. sekundě měření (15. sekundě měření)
$i_d60$ , $i_d15$ [A]	Dobíjecí proud naměřený v 60. sekundě měření (15. sekundě měření)
$tg \delta$	Ztrátový činitel
C [F]	Kapacita
T [dny]	Časová (reálná) proměnná
$exp()$	e (Eulerovo číslo) umocněné na hodnotu argumentu
X (x)	Nezávisle proměnná
Y (y)	Závisle proměnná
$R^2$	Index (koeficient) determinace
$H$ , $H_0$	Statistická (testovaná) hypotéza
G1 – G4	Označení generátorů G1, G2, G3, G4
PMBOK	<i>Project Management Body of Knowledge</i>
R	Riziko
p	Pravděpodobnost vzniku ztráty (dopadu)
D	Dopad
ALE	<i>Annual Loss Expectation</i>

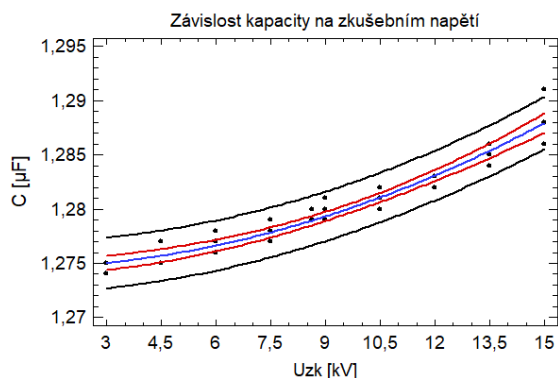


# SEZNAM PŘÍLOH

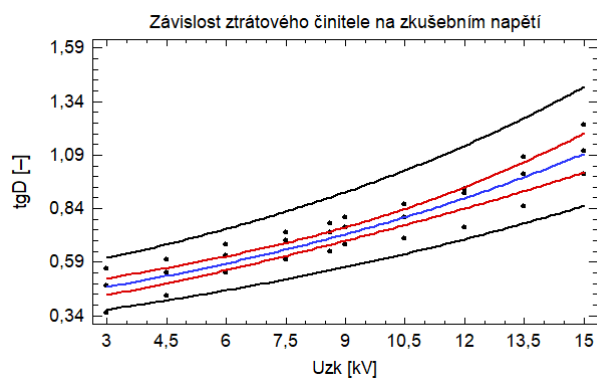
Příloha A	Generátor G1
Příloha B	Generátor G2
Příloha C	Generátor G3
Příloha D	Generátor G4
Příloha E	Optimalizace počtu měření kapacity generátorů
Příloha F	Optimalizace počtu měření ztrátového činitele generátorů



## Příloha A – Generátor G1



Graf 1A – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2005



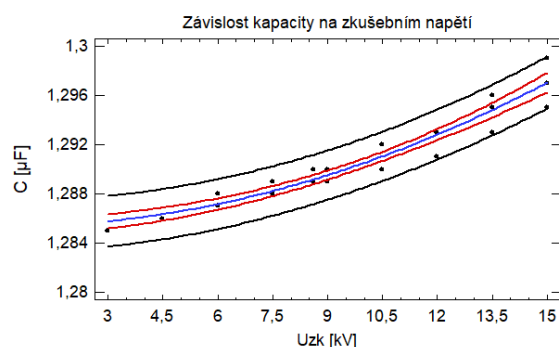
Graf 2A – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2005

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 1A je  $R^2 = 93,55 \%$ .

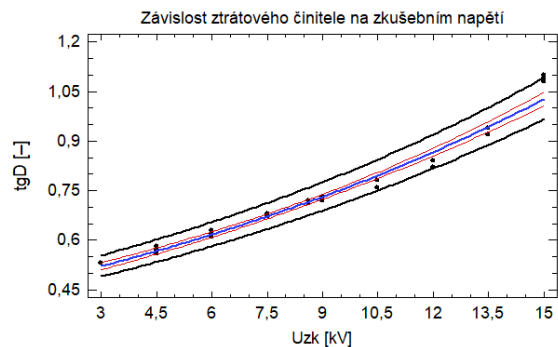
Křivka má předpis  $C = 1,2745 + 0,0000597108 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 2A je  $R^2 = 84,14 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg} \delta = \exp(-0,9578 + 0,069973 \cdot U_{zk})$ .



Graf 3A – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2006



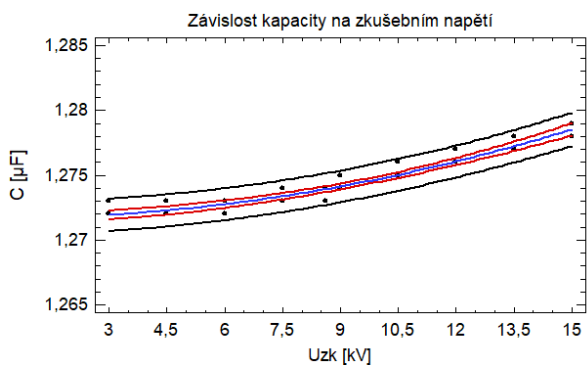
Graf 4A – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2006

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 3A je  $R^2 = 93,52 \%$ .

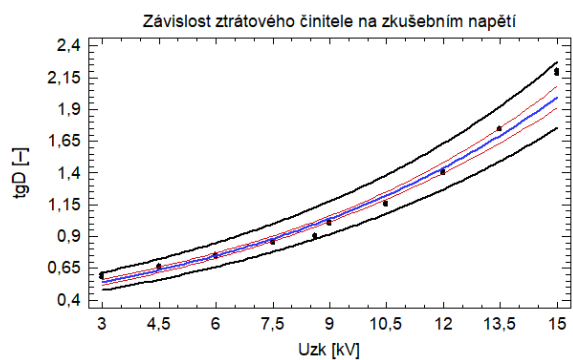
Křivka má předpis  $C = 1,28531 + 0,0000521474 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 4A je  $R^2 = 98,32 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg} \delta = \exp(-0,822386 + 0,0566057 \cdot U_{zk})$ .



Graf 5A – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2007



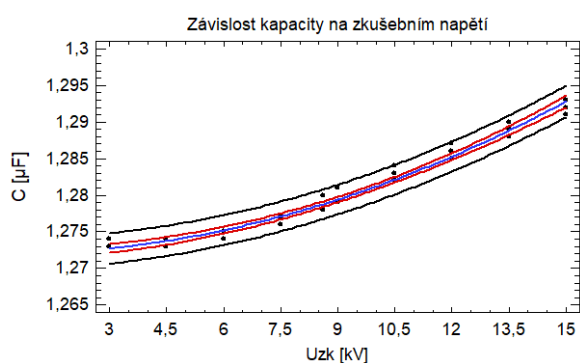
Graf 6A – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2007

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 5A je  $R^2 = 93,04 \%$ .

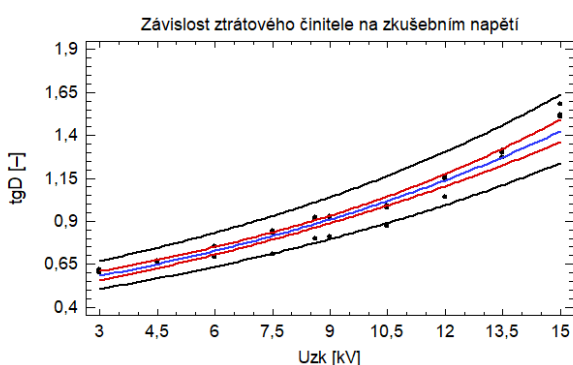
Křivka má předpis  $C = 1,27167 + 0,0000305379 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 6A je  $R^2 = 97,97 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,940161 + 0,108775 \cdot U_{zk})$ .



Graf 7A – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2008



Graf 8A – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2008

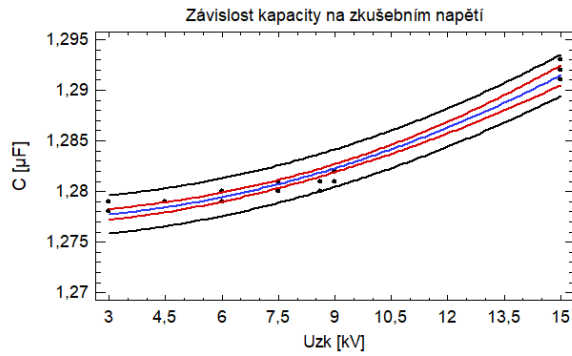
Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 7A je  $R^2 = 97,81 \%$ .

Křivka má předpis  $C = 1,27187 + 0,0000930166 \cdot U_{zk}^2$ .

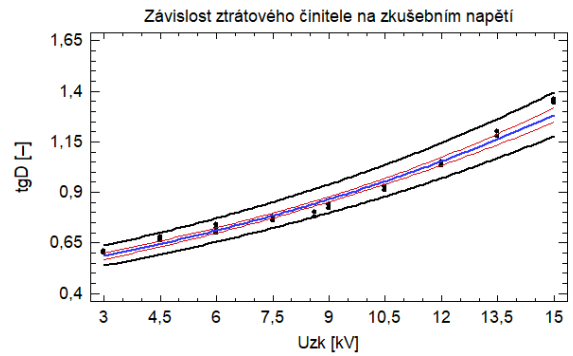
Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 8A je  $R^2 = 95,12 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,765198 + 0,0745909 \cdot U_{zk})$ .





Graf 9A – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2009



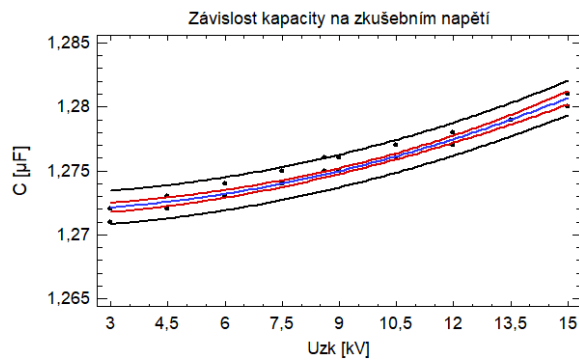
Graf 10A – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2009

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 9A je  $R^2 = 96,46 \%$ .

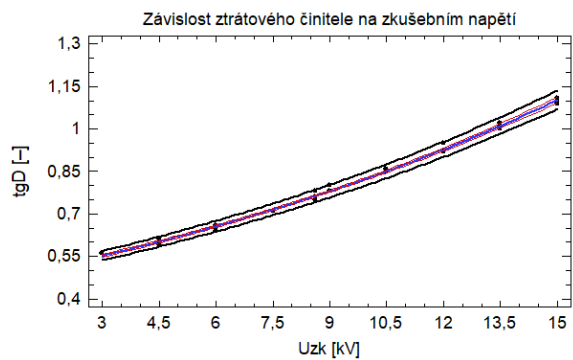
Křivka má předpis  $C = 1,27716 + 0,0000635715 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 10A je  $R^2 = 97,59 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,733073 + 0,0654287 \cdot U_{zk})$ .



Graf 11A – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2010 poprvé



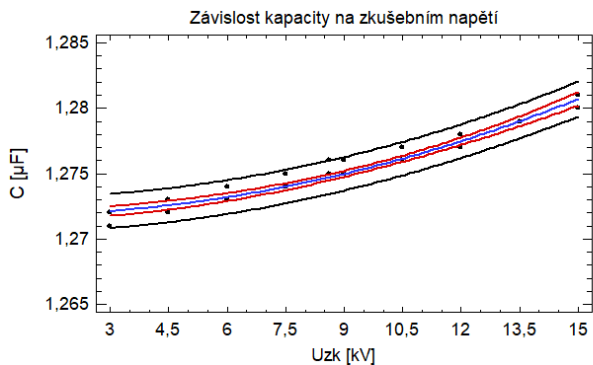
Graf 12A – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2010 poprvé

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 11A je  $R^2 = 95,35 \%$ .

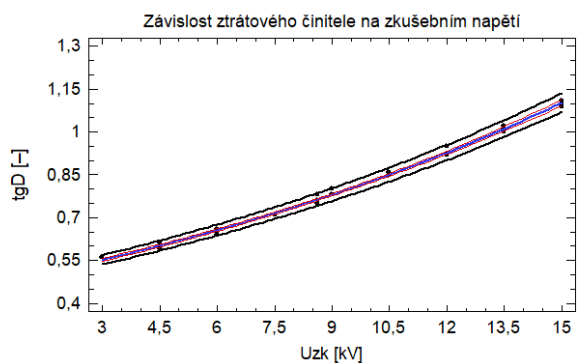
Křivka má předpis  $C = 1,27178 + 0,000039594 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 12A je  $R^2 = 99,61 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,766484 + 0,0576004 \cdot U_{zk})$ .



Graf 13A – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2010 podruhé



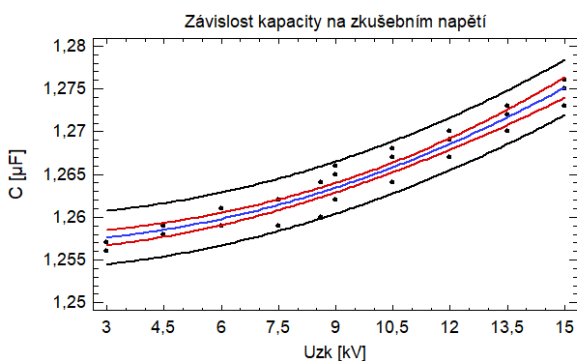
Graf 14A – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2010 podruhé

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 13A je  $R^2 = 95,35 \%$ .

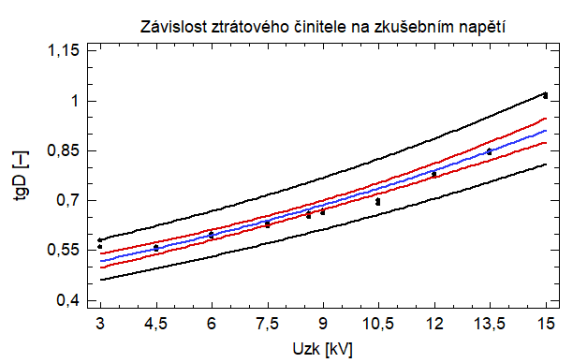
Křivka má předpis  $C = 1,27178 + 0,000039594 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 14A je  $R^2 = 99,61 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,766484 + 0,0576004 \cdot U_{zk})$ .



Graf 15A – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2011



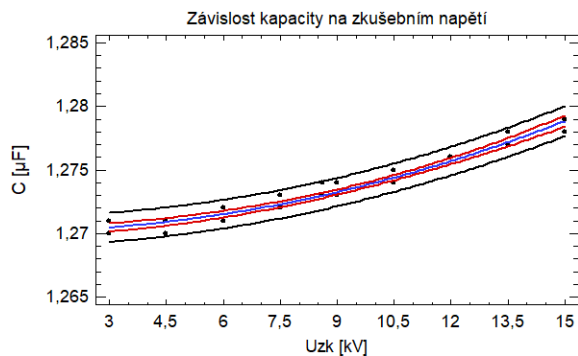
Graf 16A – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2011

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 15A je  $R^2 = 93,76 \%$ .

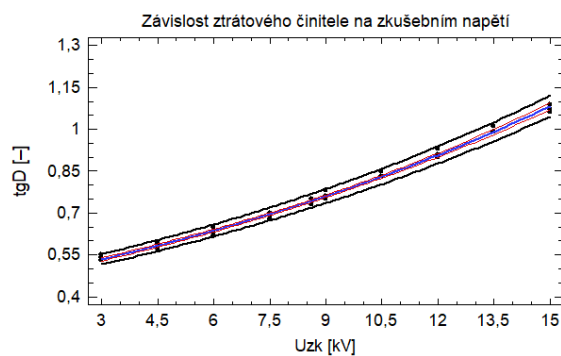
Křivka má předpis  $C = 1,25688 + 0,0000811575 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 16A je  $R^2 = 91,59 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,798815 + 0,0470463 \cdot U_{zk})$ .



Graf 17A – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2012



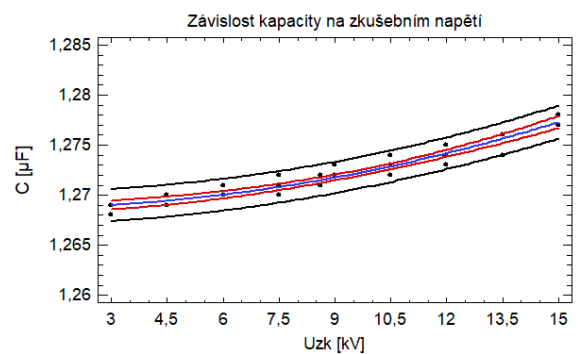
Graf 18A – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2012

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 17A je  $R^2 = 96,25 \%$ .

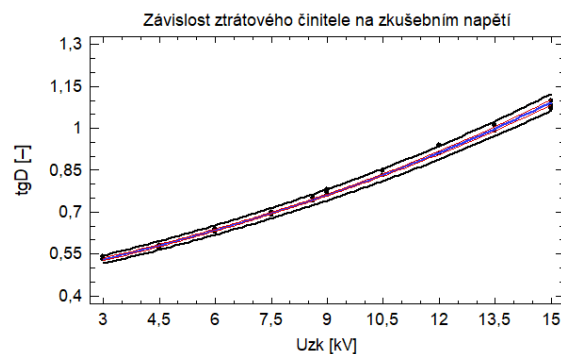
Křivka má předpis  $C = 1,27014 + 0,000038697 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 18A je  $R^2 = 99,49 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,803941 + 0,0588755 \cdot U_{zk})$ .



Graf 19A – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2013



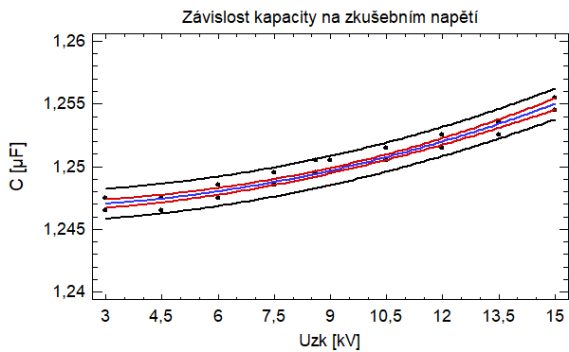
Graf 20A – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2013

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 19A je  $R^2 = 92,71 \%$ .

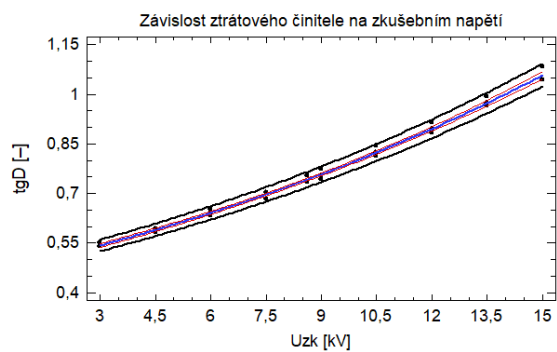
Křivka má předpis  $C = 1,26867 + 0,0000383762 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 20A je  $R^2 = 99,70 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,81517 + 0,0603013 \cdot U_{zk})$ .



Graf 21A – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2014 poprvé



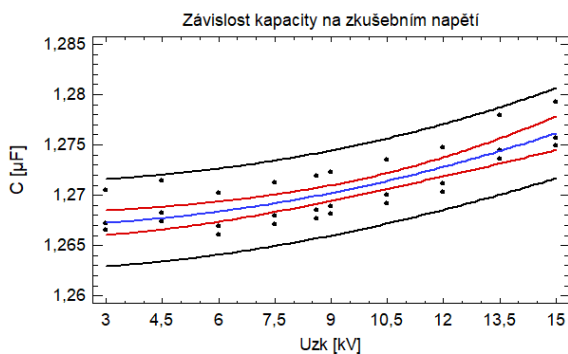
Graf 22A – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2014 poprvé

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 21A je  $R^2 = 95,56 \%$ .

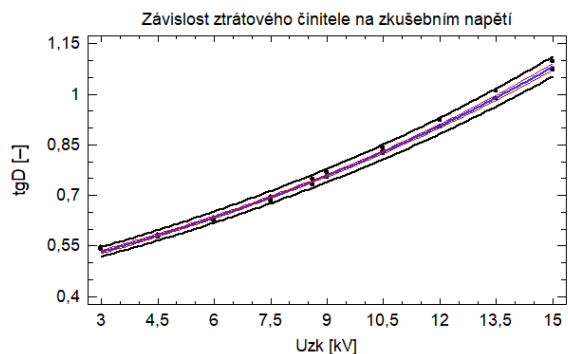
Křivka má předpis  $C = 1,24671 + 0,0000368289 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 22A je  $R^2 = 99,50 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,778505 + 0,0556652 \cdot U_{zk})$ .



Graf 23A – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2014 podruhé



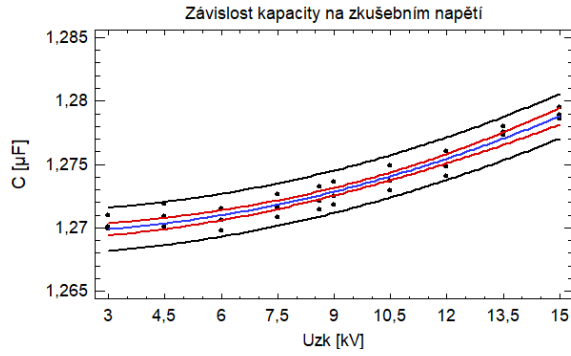
Graf 24A – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2014 podruhé

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 23A je  $R^2 = 66,84 \%$ .

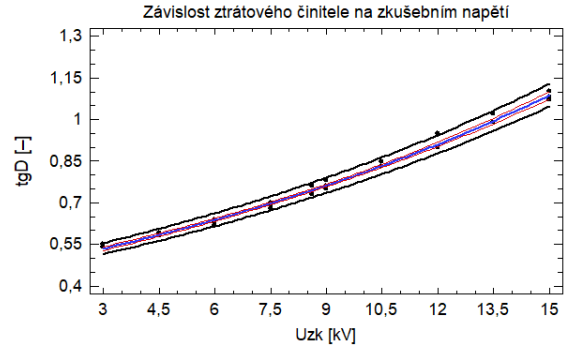
Křivka má předpis  $C = 1,26689 + 0,0000411785 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 24A je  $R^2 = 99,69 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,808562 + 0,0591725 \cdot U_{zk})$ .



Graf 25A – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2016



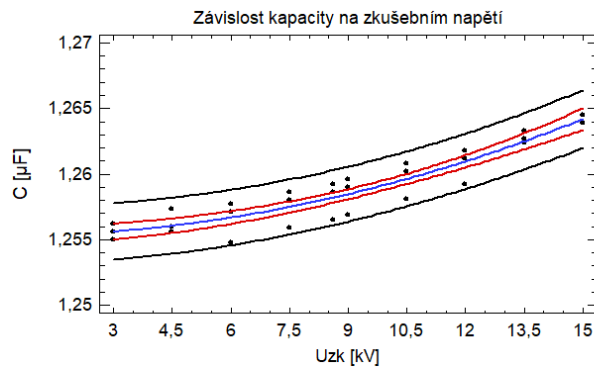
Graf 26A – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2016

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 25A je  $R^2 = 92,88 \%$ .

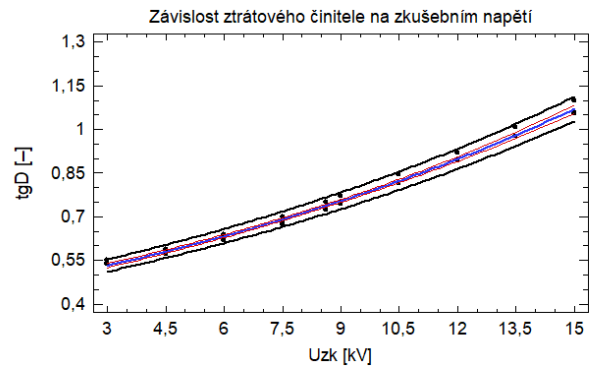
Křivka má předpis  $C = 1,26951 + 0,0000413065 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 26A je  $R^2 = 99,41 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,803616 + 0,0591534 \cdot U_{zk})$ .



Graf 27A – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2017



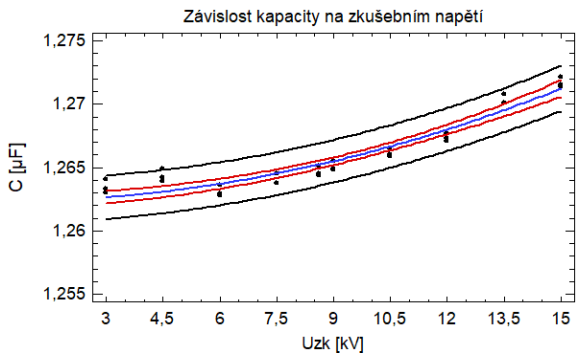
Graf 28A – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2017

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 27A je  $R^2 = 88,44 \%$ .

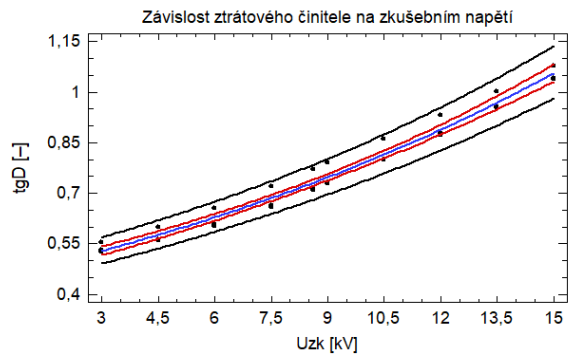
Křivka má předpis  $C = 1,25526 + 0,0000396656 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 28A je  $R^2 = 99,32 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,805997 + 0,0582367 \cdot U_{zk})$ .



Graf 29A – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2018



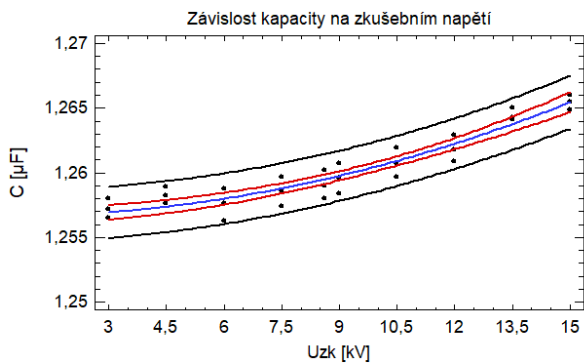
Graf 30A – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2018

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 29A je  $R^2 = 92,24 \%$ .

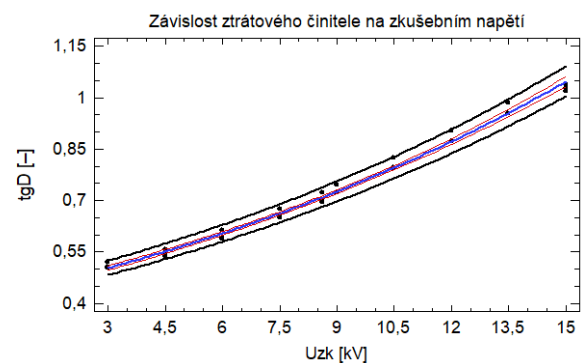
Křivka má předpis  $C = 1,26229 + 0,0000396825 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 30A je  $R^2 = 97,66 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,810643 + 0,0577116 \cdot U_{zk})$ .



Graf 31A – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2019



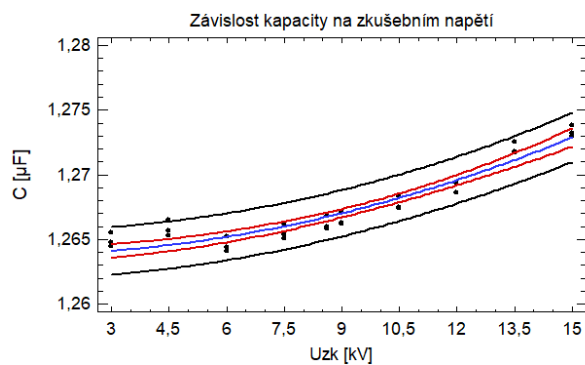
Graf 32A – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2019

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 31A je  $R^2 = 89,78 \%$ .

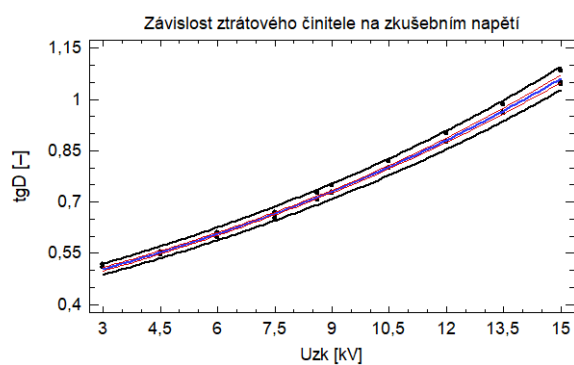
Křivka má předpis  $C = 1,25658 + 0,0000393972 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 32A je  $R^2 = 99,32 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,870804 + 0,0611528 \cdot U_{zk})$ .



Graf 33A – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2020



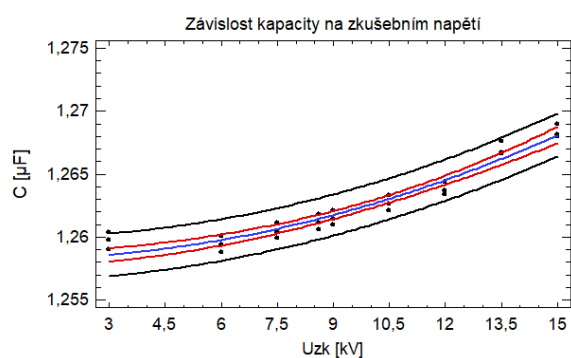
Graf 34A – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2020

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 33A je  $R^2 = 91,58 \%$ .

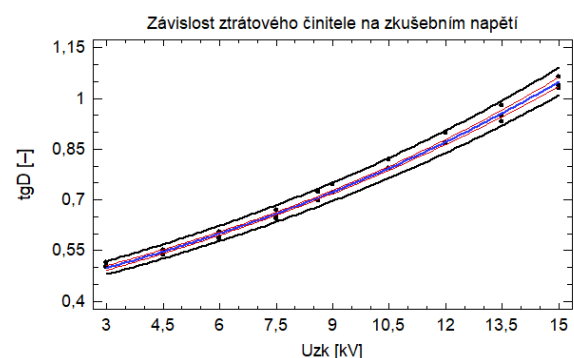
Křivka má předpis  $C = 1,26375 + 0,0000405907 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 34A je  $R^2 = 99,61 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,87306 + 0,0621905 \cdot U_{zk})$ .



Graf 35A – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2021



Graf 36A – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2021

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 35A je  $R^2 = 93,87 \%$ .

Křivka má předpis  $C = 1,25819 + 0,0000440279 \cdot U_{zk}^2$ .

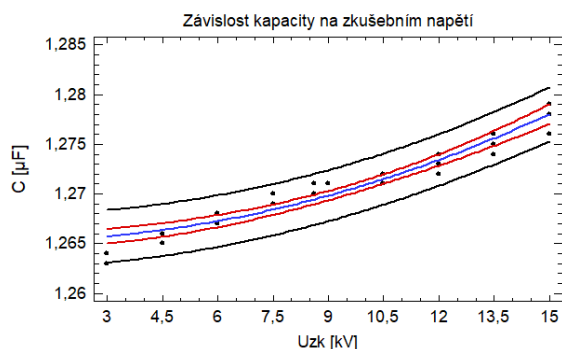
Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 36A je  $R^2 = 99,42 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,882682 + 0,0620777 \cdot U_{zk})$ .

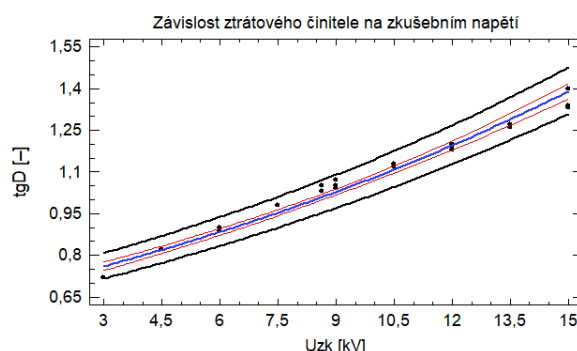




## Příloha B – Generátor G2



Graf 1B – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2003 poprvé



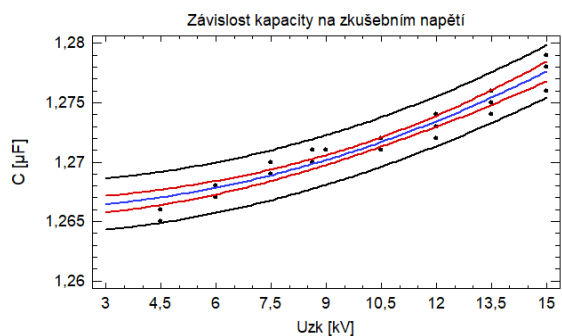
Graf 2B – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2003 poprvé

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 1B je  $R^2 = 91,26 \%$ .

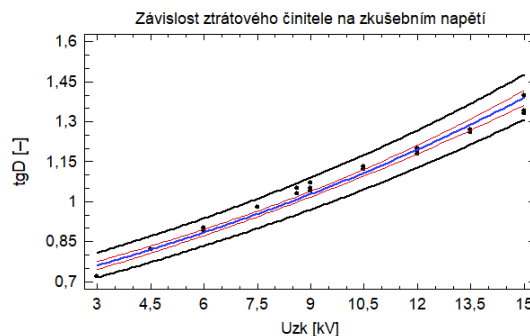
Křivka má předpis  $C = 1,26522 + 0,0000569459 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 2B je  $R^2 = 97,91 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,424668 + 0,050285 \cdot U_{zk})$ .



Graf 3B – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2003 podruhé



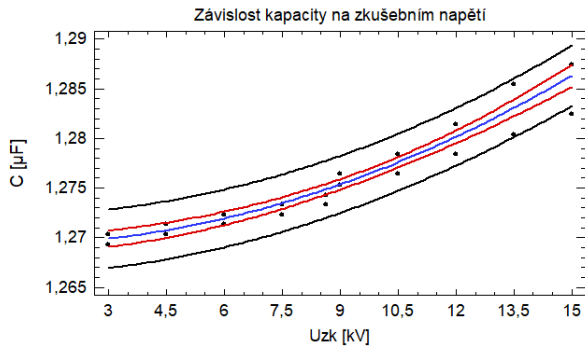
Graf 4B – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2003 podruhé

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 3B je  $R^2 = 92,48 \%$ .

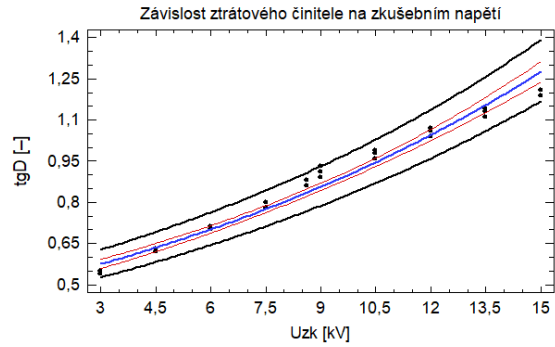
Křivka má předpis  $C = 1,26599 + 0,0000517762 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 4B je  $R^2 = 97,91 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,424668 + 0,050285 \cdot U_{zk})$ .



Graf 5B – Závislost kapacity na zkušebním napětí, měřeno v roce 2004



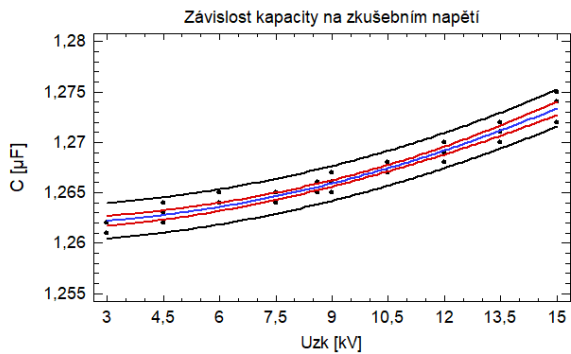
Graf 6B – Závislost ztrátového činitele na zkušebním napětí, měřeno v roce 2004

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 5B je  $R^2 = 93,69 \%$ .

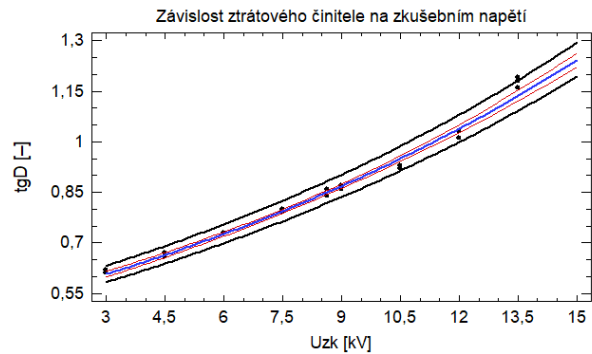
Křivka má předpis  $C = 1,26921 + 0,0000760776 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 6B je  $R^2 = 97,52 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,752971 + 0,0664171 \cdot U_{zk})$ .



Graf 7B – Závislost kapacity na zkušebním napětí, měřeno v roce 2005



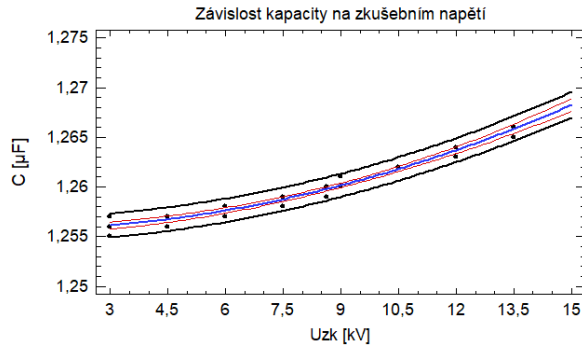
Graf 8B – Závislost ztrátového činitele na zkušebním napětí, měřeno v roce 2005

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 7B je  $R^2 = 95,02 \%$ .

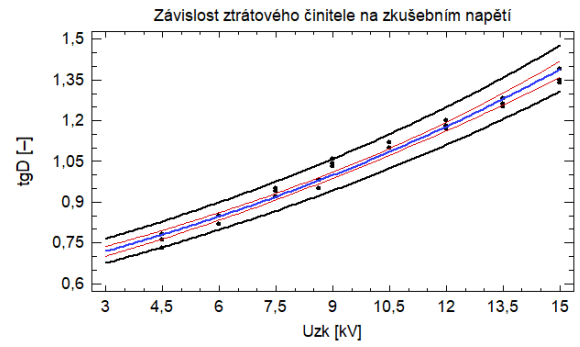
Křivka má předpis  $C = 1,26174 + 0,0000517927 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 8B je  $R^2 = 99,19 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,678627 + 0,059735 \cdot U_{zk})$ .



Graf 9B – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2006



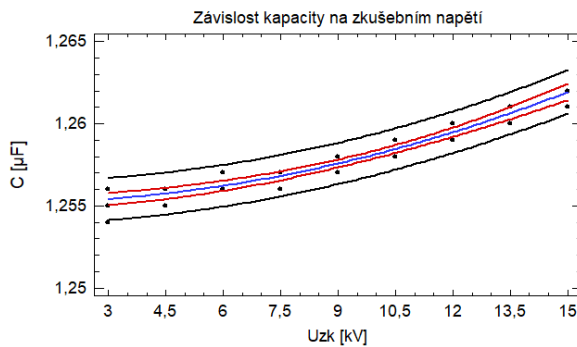
Graf 10B – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2006

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 9B je  $R^2 = 97,00 \%$ .

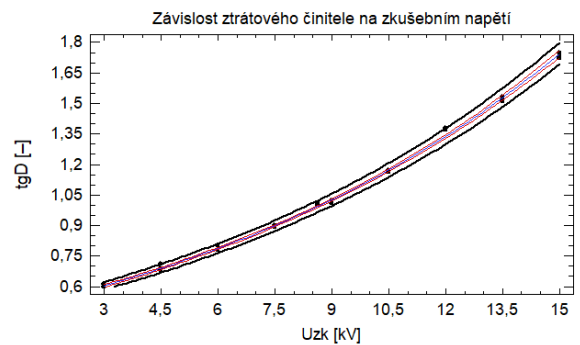
Křivka má předpis  $C = 1,25562 + 0,0000561973 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 10B je  $R^2 = 97,82 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,495071 + 0,0549333 \cdot U_{zk})$ .



Graf 11B – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2007



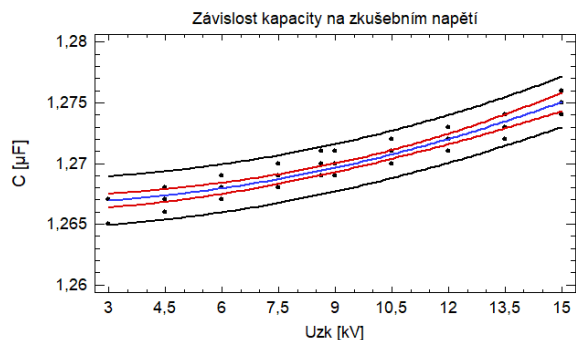
Graf 12B – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2007

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 11B je  $R^2 = 93,25 \%$ .

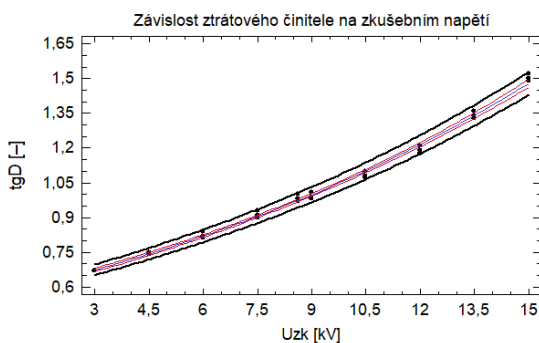
Křivka má předpis  $C = 1,25514 + 0,0000302047 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 12B je  $R^2 = 99,83 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,769091 + 0,0883648 \cdot U_{zk})$ .



Graf 13B – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2009



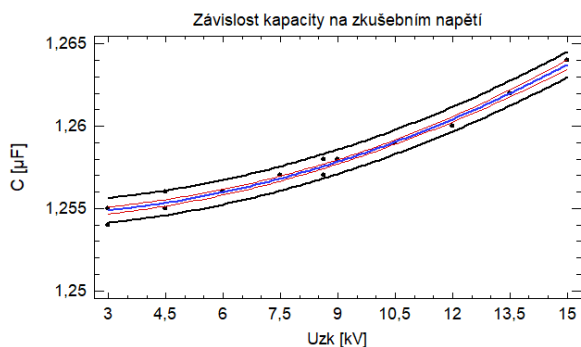
Graf 14B – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2009

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 13B je  $R^2 = 88,75 \%$ .

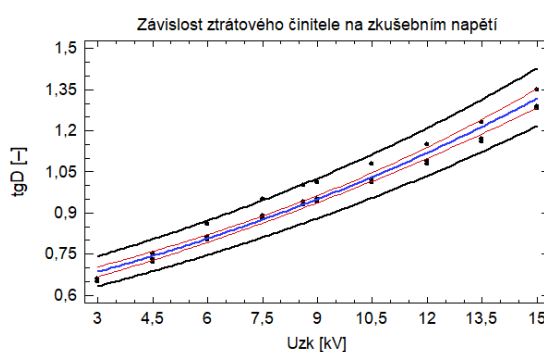
Křivka má předpis  $C = 1,2666 + 0,0000376862 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 14B je  $R^2 = 99,61 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,592302 + 0,0656132 \cdot U_{zk})$ .



Graf 15B – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2010



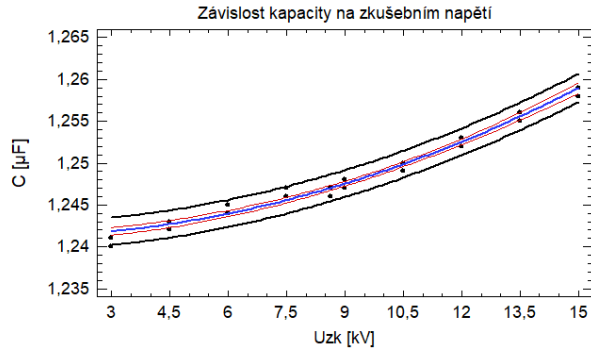
Graf 16B – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2010

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 15B je  $R^2 = 98,50 \%$ .

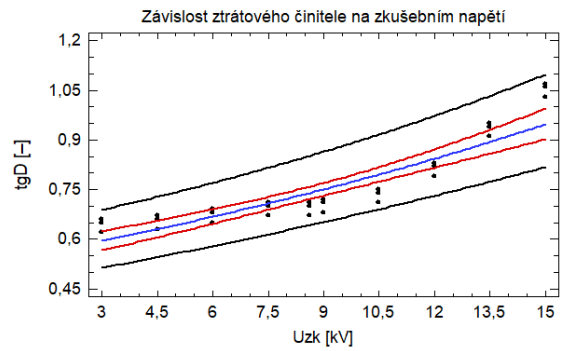
Křivka má předpis  $C = 1,25451 + 0,0000410794 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 16B je  $R^2 = 96,95 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,542275 + 0,0545993 \cdot U_{zk})$ .



Graf 17B – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2011



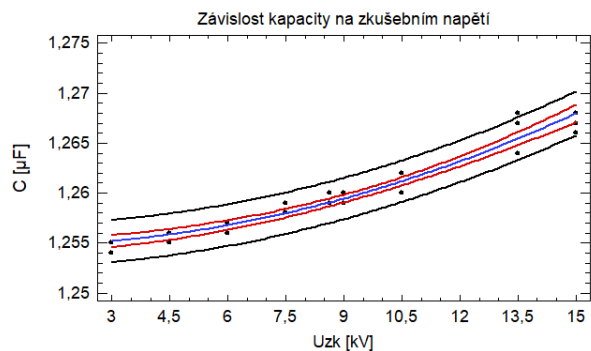
Graf 18B – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2011

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 17B je  $R^2 = 98,11 \%$ .

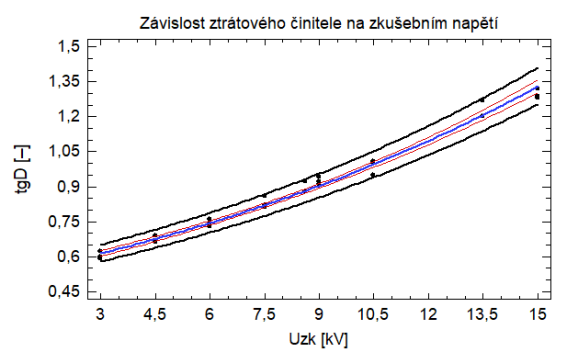
Křivka má předpis  $C = 1,24112 + 0,0000793132 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 18B je  $R^2 = 82,58 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,636271 + 0,0388209 \cdot U_{zk})$ .



Graf 19B – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2012



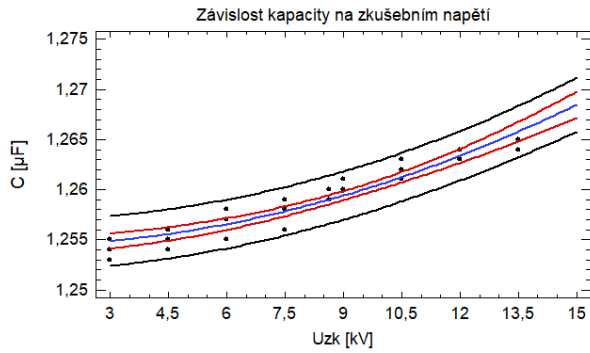
Graf 20B – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2012

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 19B je  $R^2 = 94,88 \%$ .

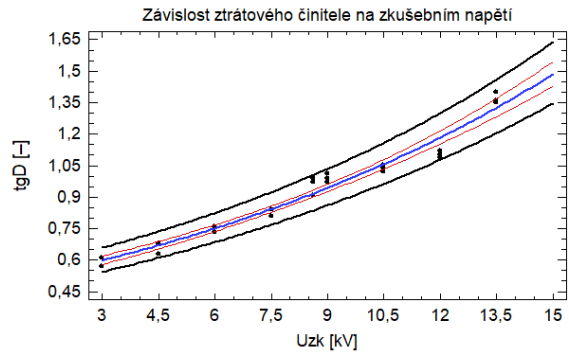
Křivka má předpis  $C = 1,25467 + 0,00005914 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 20B je  $R^2 = 98,85 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,683392 + 0,0646072 \cdot U_{zk})$ .



Graf 21B – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2013



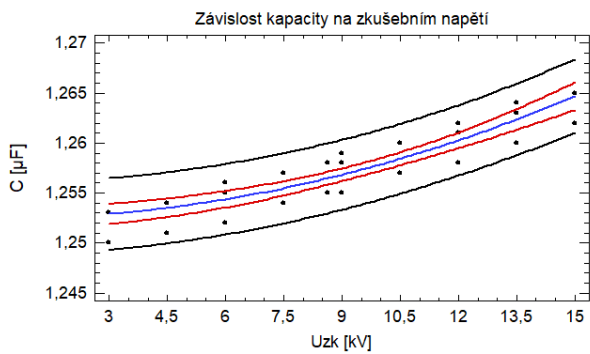
Graf 22B – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2013

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 21B je  $R^2 = 90,57 \%$ .

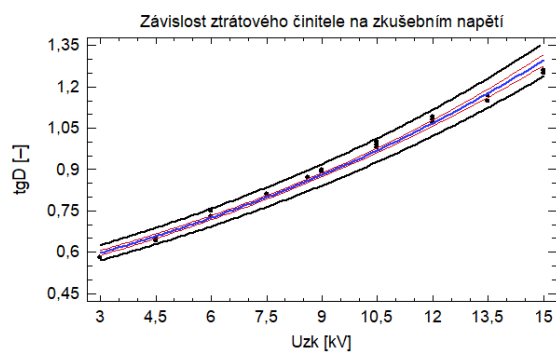
Křivka má předpis  $C = 1,2543 + 0,0000629886 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 22B je  $R^2 = 97,16 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,739698 + 0,0756892 \cdot U_{zk})$ .



Graf 23B – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2014



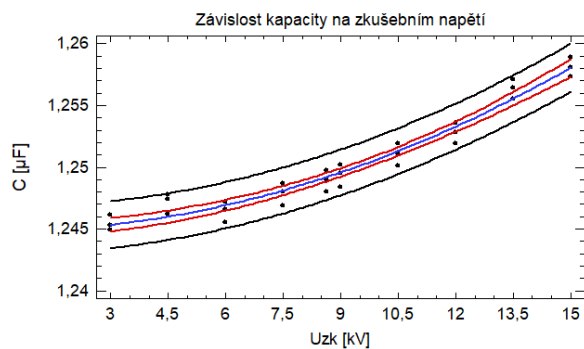
Graf 24B – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2014

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 23B je  $R^2 = 83,85 \%$ .

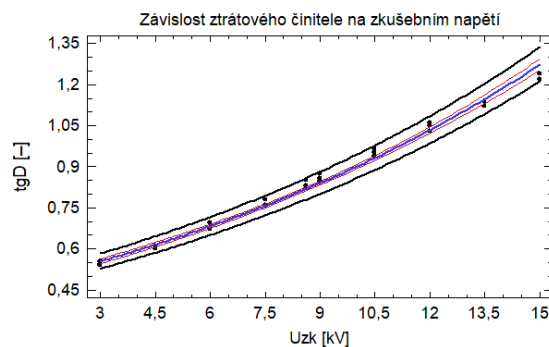
Křivka má předpis  $C = 1,25241 + 0,0000545918 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 24B je  $R^2 = 99,26\%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,709223 + 0,0646362 \cdot U_{zk})$ .



Graf 25B – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2015



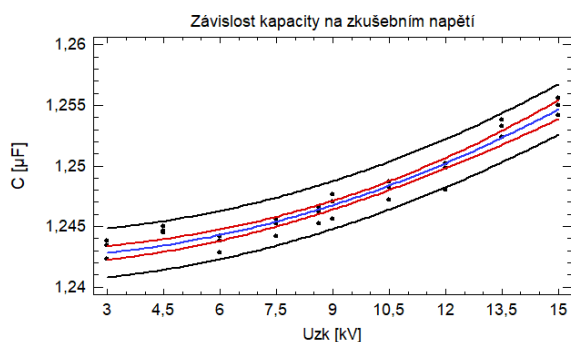
Graf 26B – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2015

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 25B je  $R^2 = 95,55 \%$ .

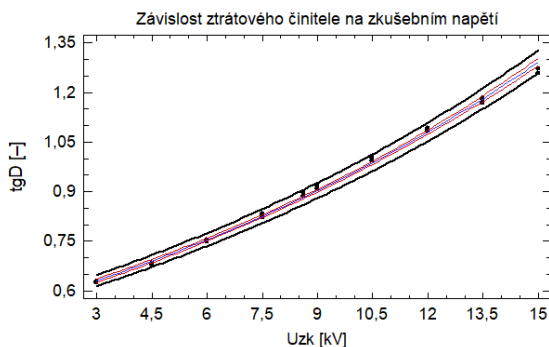
Křivka má předpis  $C = 1,24481 + 0,0000588927 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 26B je  $R^2 = 99,26 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,797119 + 0,0692315 \cdot U_{zk})$ .



Graf 27B – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2016



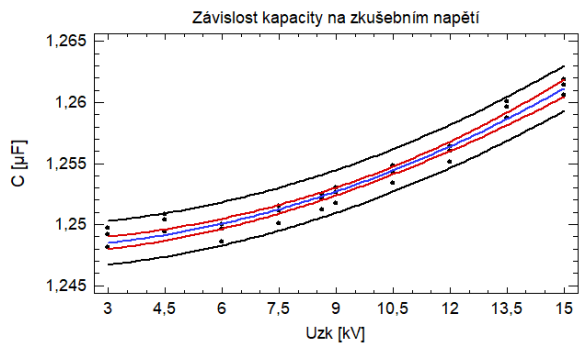
Graf 28B – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2016

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 27B je  $R^2 = 94,25 \%$ .

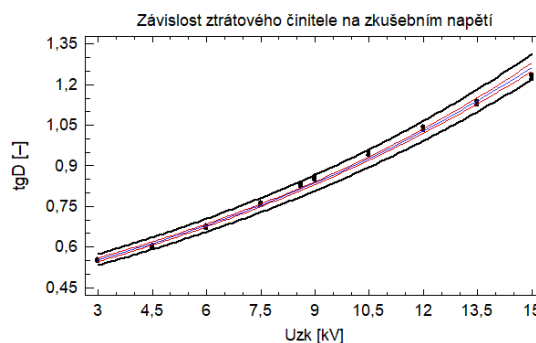
Křivka má předpis  $C = 1,24232 + 0,0000548776 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 28B je  $R^2 = 99,71 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,640446 + 0,0598169 \cdot U_{zk})$ .



Graf 29B – Závislost kapacity na zkušebním napětí, měřeno v roce 2017



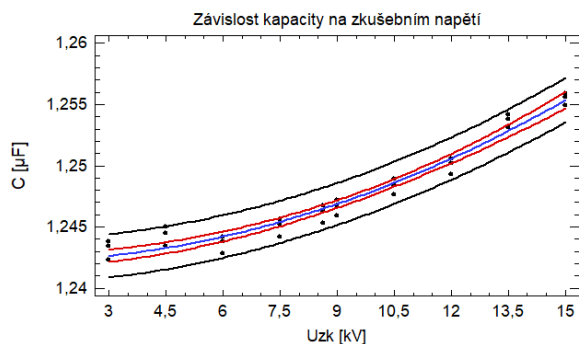
Graf 30B – Závislost ztrátového činitele na zkušebním napětí, měřeno v roce 2017

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 29B je  $R^2 = 95,98 \%$ .

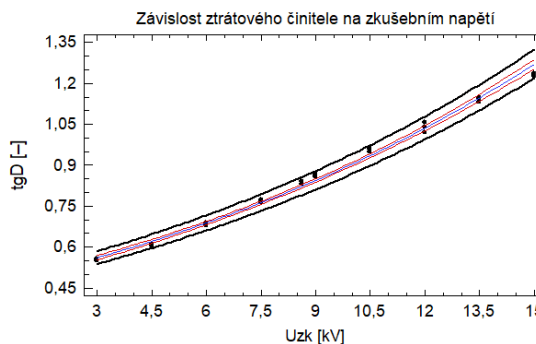
Křivka má předpis  $C = 1,24796 + 0,0000586681 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 30B je  $R^2 = 99,59 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,799549 + 0,0689858 \cdot U_{zk})$ .



Graf 31B – Závislost kapacity na zkušebním napětí, měřeno v roce 2018



Graf 32B – Závislost ztrátového činitele na zkušebním napětí, měřeno v roce 2018

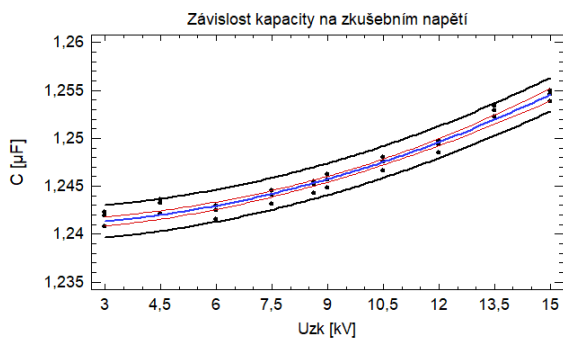
Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 31B je  $R^2 = 96,14 \%$ .

Křivka má předpis  $C = 1,2421 + 0,0000589416 \cdot U_{zk}^2$ .

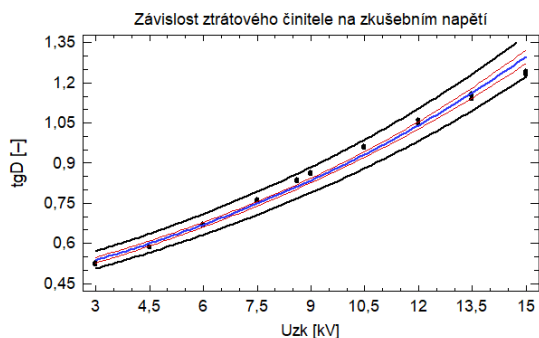
Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 32B je  $R^2 = 99,46 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,782651 + 0,0681684 \cdot U_{zk})$ .





Graf 33B – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2019



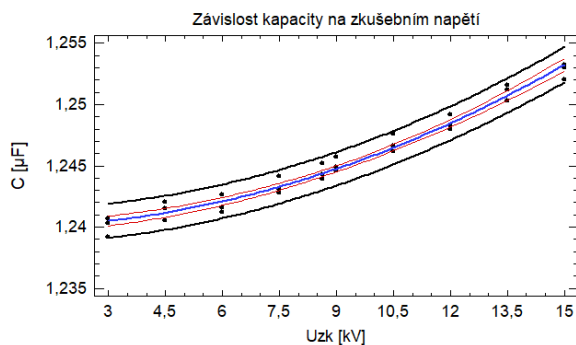
Graf 34B – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2019

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 33B je  $R^2 = 96,68 \%$ .

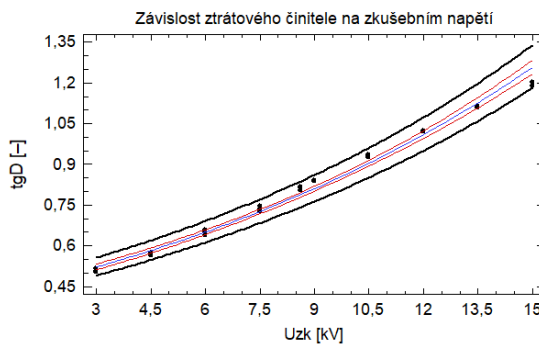
Křivka má předpis  $C = 1,24077 + 0,0000613478 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 33B je  $R^2 = 99,04 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,84174 + 0,0735305 \cdot U_{zk})$ .



Graf 35B – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2020



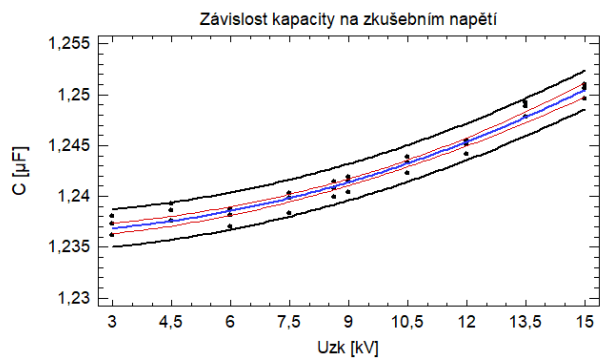
Graf 36B – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2020

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 35B je  $R^2 = 97,54 \%$ .

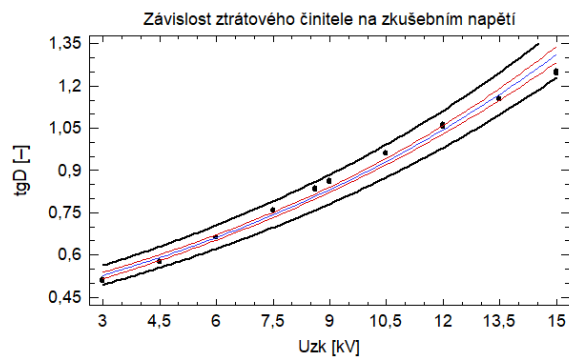
Křivka má předpis  $C = 1,23997 + 0,000059024 \cdot U_{zk}^2$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 34B je  $R^2 = 98,94 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,869985 + 0,0733137 \cdot U_{zk})$ .



Graf 37B – Závislost kapacity na zkušebním napětí, měřeno v roce 2021



Graf 38B – Závislost ztrátového činitele na zkušebním napětí, měřeno v roce 2021

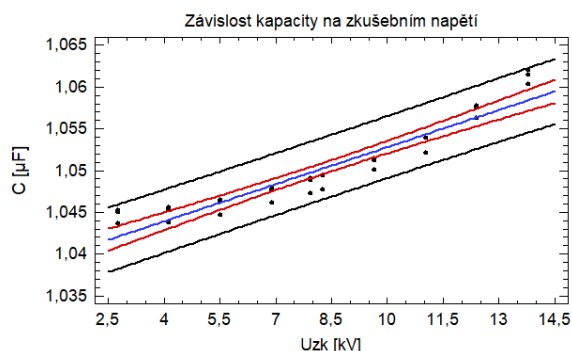
Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 37B je  $R^2 = 96,29 \%$ .

Křivka má předpis  $C = 1,23629 + 0,0000630615 \cdot U_{zk}^2$ .

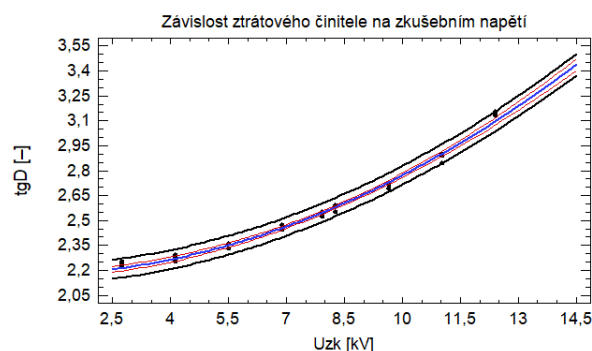
Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 38B je  $R^2 = 98,94 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,868382 + 0,0760275 \cdot U_{zk})$ .

## Příloha C – Generátor G3



Graf 1C – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2007



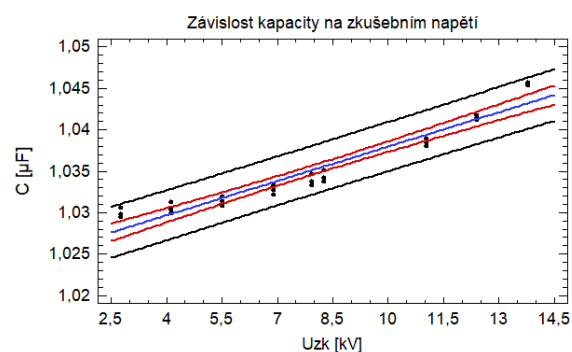
Graf 2C – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2007

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 1C je  $R^2 = 89,47 \%$ .

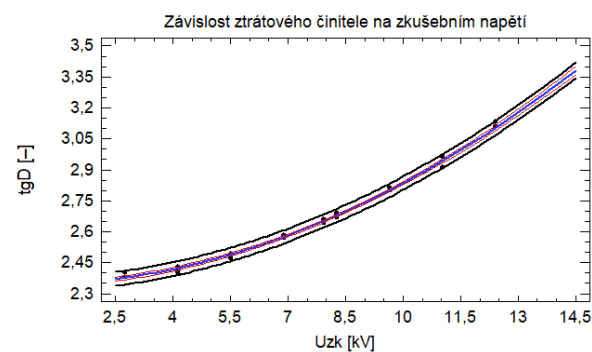
Křivka má předpis  $C = 1,038 + 0,00148089 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 2C je  $R^2 = 99,15 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg} \delta = 2,1683 + 0,00603627 \cdot U_{zk}^2$ .



Graf 3C – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2008



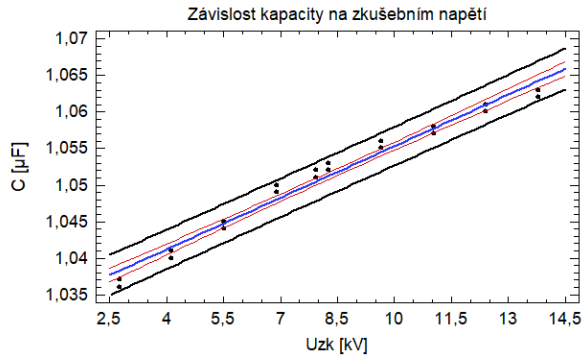
Graf 4C – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2008

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 3C je  $R^2 = 92,84 \%$ .

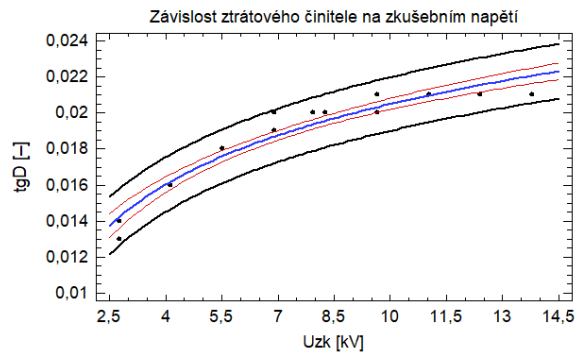
Křivka má předpis  $C = 1,02415 + 0,00138264 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 4C je  $R^2 = 99,57 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg} \delta = 2,33974 + 0,00495512 \cdot U_{zk}^2$ .



Graf 5C – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2009



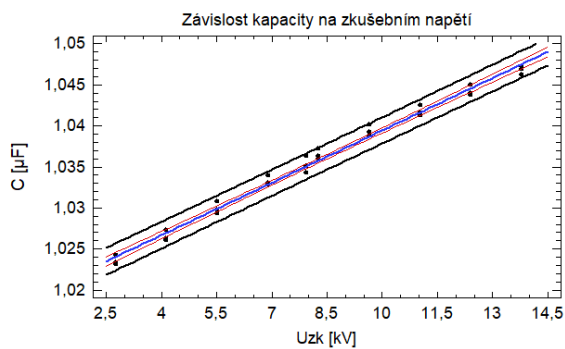
Graf 6C – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2009

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 5C je  $R^2 = 97,69 \%$ .

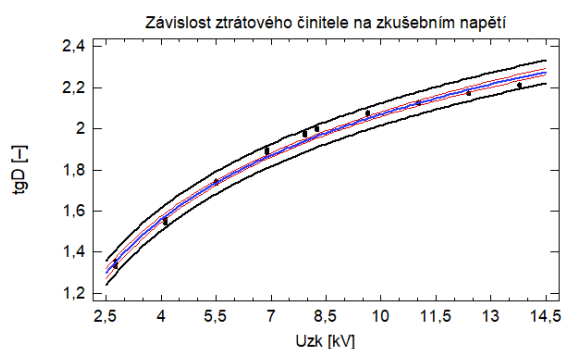
Křivka má předpis  $C = 1,03178 + 0,00235556 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 6C je  $R^2 = 92,09 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg} \delta = 0,00924275 + 0,00489359 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 7C – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2010 poprvé



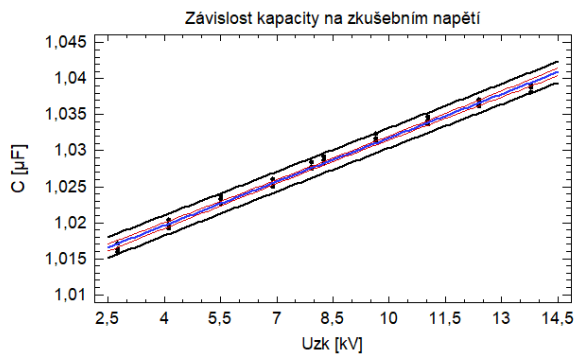
Graf 8C – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2010 poprvé

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 7C je  $R^2 = 98,96 \%$ .

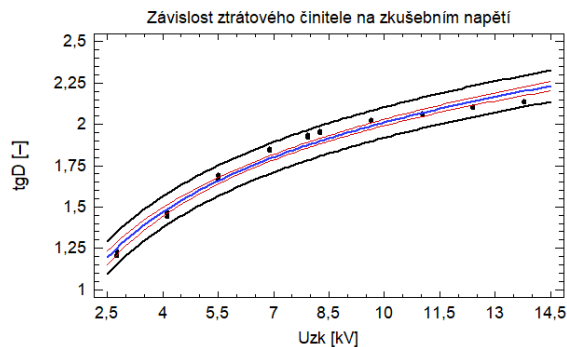
Křivka má předpis  $C = 1,01818 + 0,00212665 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 8C je  $R^2 = 99,13 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg} \delta = 0,784454 + 0,558493 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 9C – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2010 podruhé



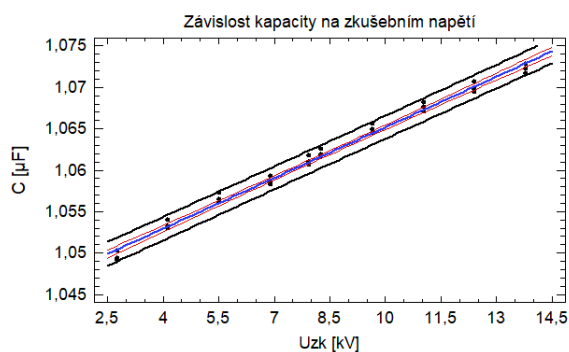
Graf 10C – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2010 podruhé

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 9C je  $R^2 = 99,13 \%$ .

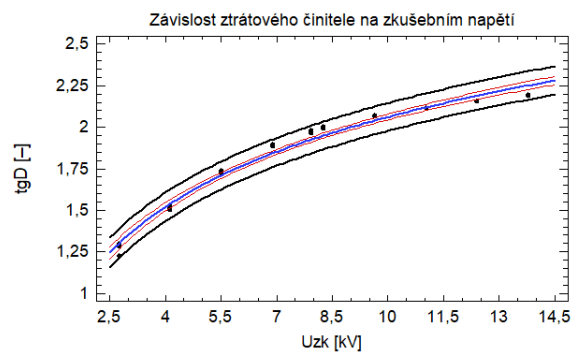
Křivka má předpis  $C = 1,01148 + 0,00203041 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 10C je  $R^2 = 97,79 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,65043 + 0,591083 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 11C – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2011



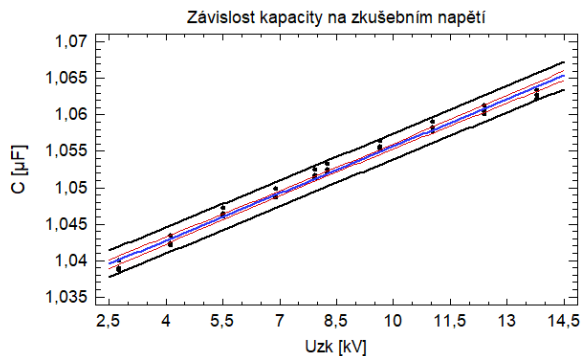
Graf 12C – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2011

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 11C je  $R^2 = 99,14 \%$ .

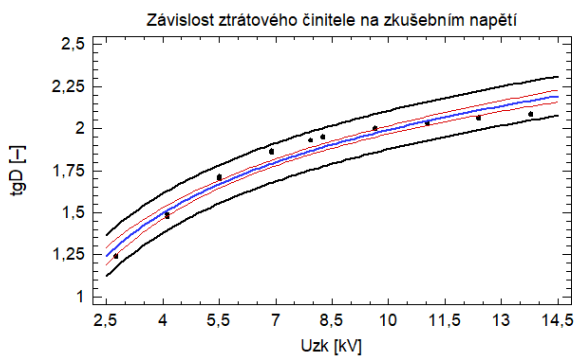
Křivka má předpis  $C = 1,0448 + 0,0020387 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 12C je  $R^2 = 98,17 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,702892 + 0,590238 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 13C – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2012



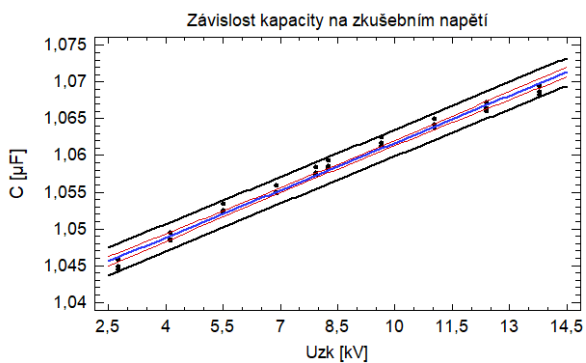
Graf 14C – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2012

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 13C je  $R^2 = 98,75 \%$ .

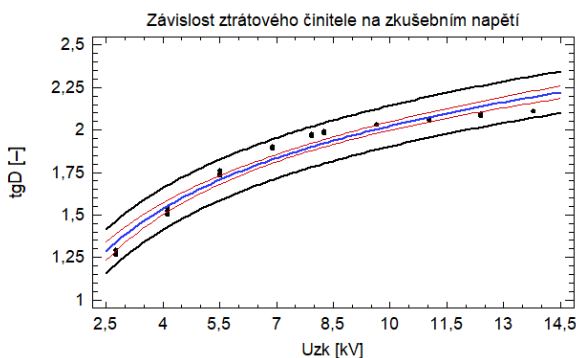
Křivka má předpis  $C = 1,03412 + 0,00215716 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 14C je  $R^2 = 96,03 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,745892 + 0,541322 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 15C – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2013



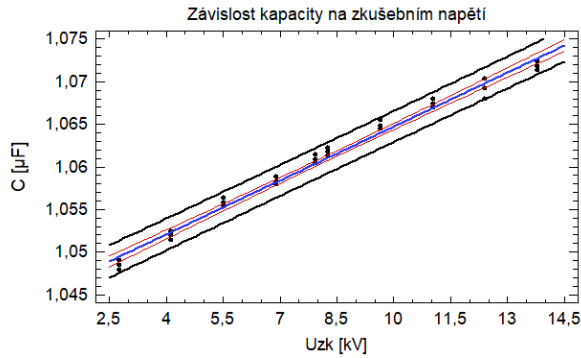
Graf 16C – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2013

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 15C je  $R^2 = 98,69 \%$ .

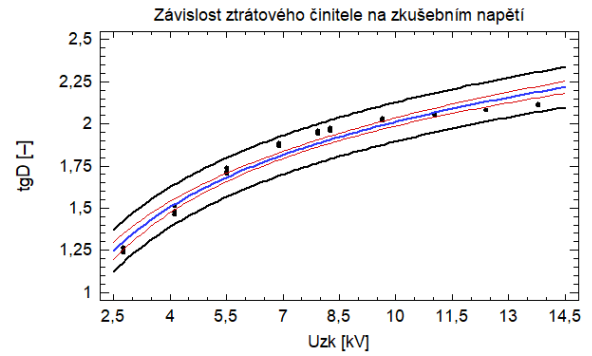
Křivka má předpis  $C = 1,0402 + 0,00215029 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 16C je  $R^2 = 95,51 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,798377 + 0,532147 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 17C – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2014



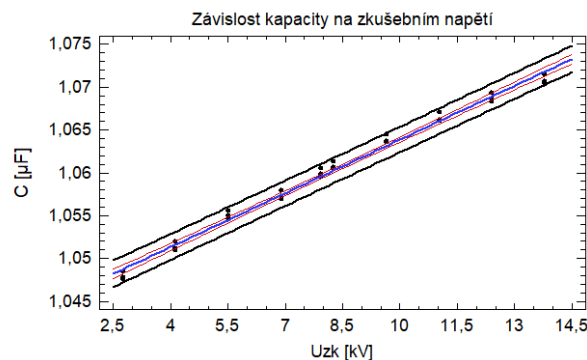
Graf 18C – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2014

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 17C je  $R^2 = 98,63 \%$ .

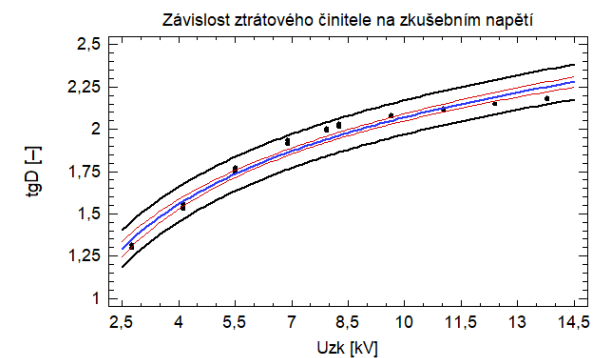
Křivka má předpis  $C = 1,04362 + 0,00211292 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 18C je  $R^2 = 96,08 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,739765 + 0,552527 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 19C – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2015



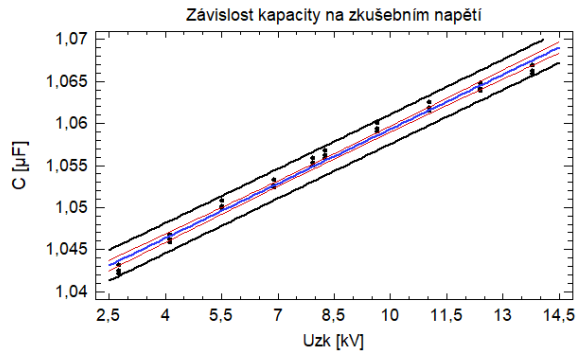
Graf 20C – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2015

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 19C je  $R^2 = 99,06 \%$ .

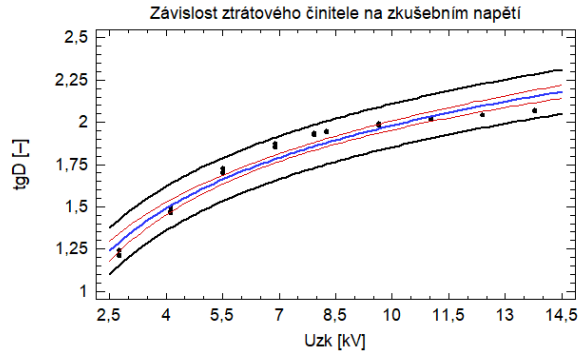
Křivka má předpis  $C = 1,04298 + 0,00209031 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 20C je  $R^2 = 97,11 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,778595 + 0,561179 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 21C – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2016



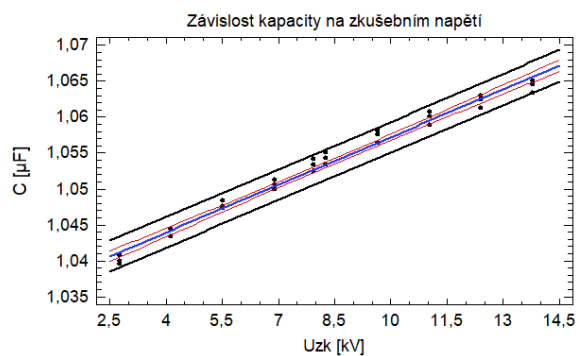
Graf 22C – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2016

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 21C je  $R^2 = 98,77 \%$ .

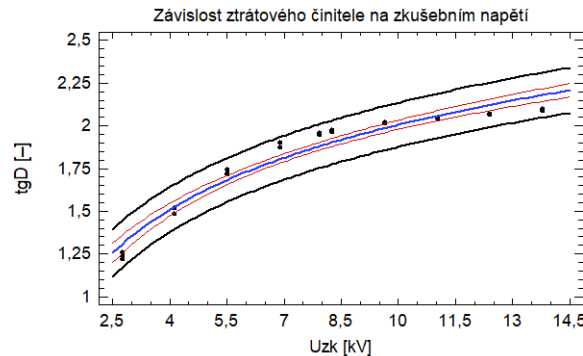
Křivka má předpis  $C = 1,03769 + 0,0021639 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 22C je  $R^2 = 94,99 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,745719 + 0,536693 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 23C – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2017



Graf 24C – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2017

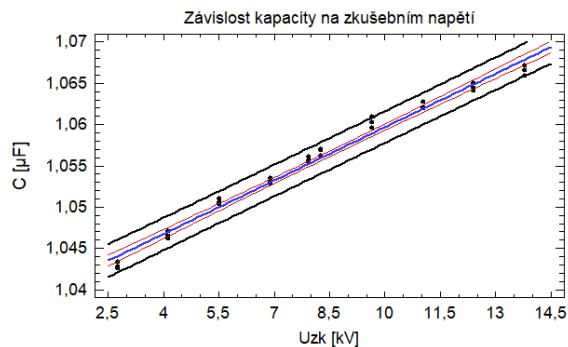
Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 23C je  $R^2 = 98,34 \%$ .

Křivka má předpis  $C = 1,0351 + 0,00221228 \cdot U_{zk}$ .

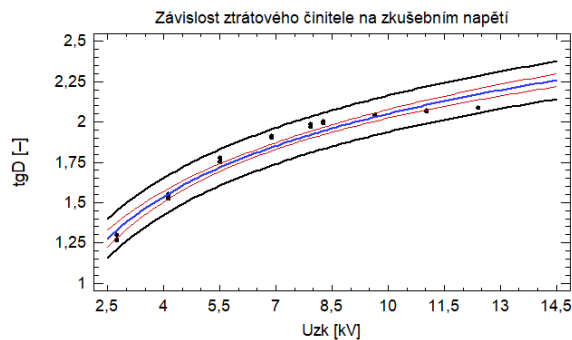
Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 24C je  $R^2 = 95,02 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,758213 + 0,542059 \cdot \ln(U_{zk})$ .





Graf 25C – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2018



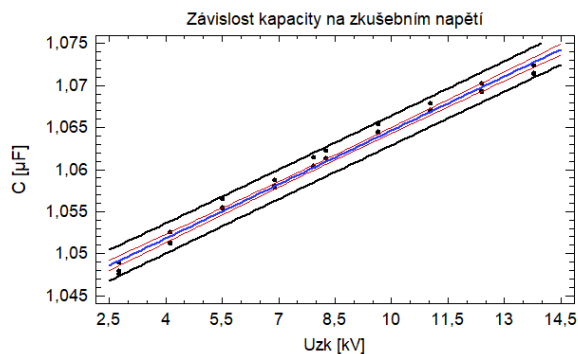
Graf 26C – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2018

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 25C je  $R^2 = 98,55 \%$ .

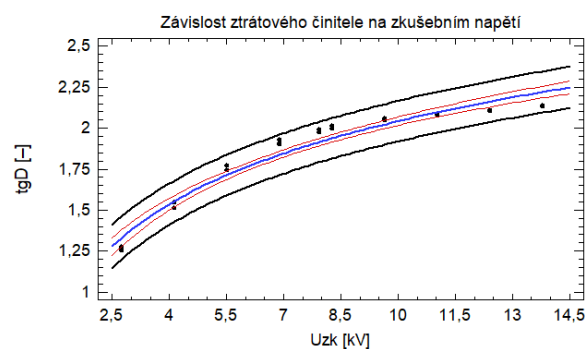
Křivka má předpis  $C = 1,03811 + 0,00215767 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 26C je  $R^2 = 96,12 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,763297 + 0,559184 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 27C – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2019



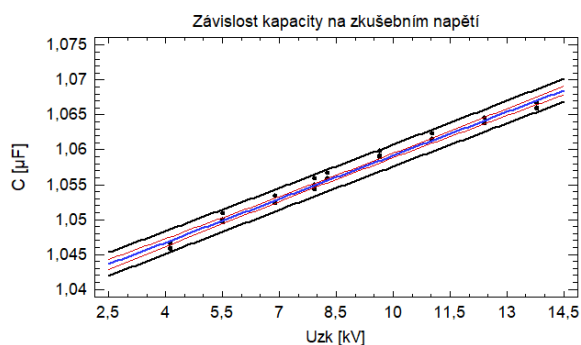
Graf 28C – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2019

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 27C je  $R^2 = 98,75 \%$ .

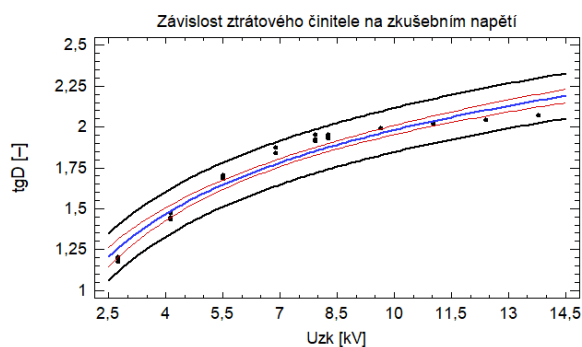
Křivka má předpis  $C = 1,04324 + 0,00214279 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 28C je  $R^2 = 95,57 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,770003 + 0,55284 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 29C – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2020



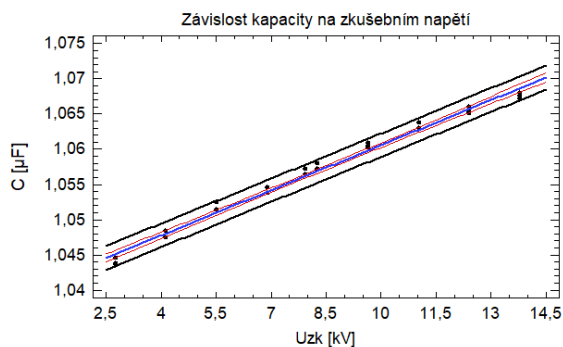
Graf 30C – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2020

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 29C je  $R^2 = 98,69 \%$ .

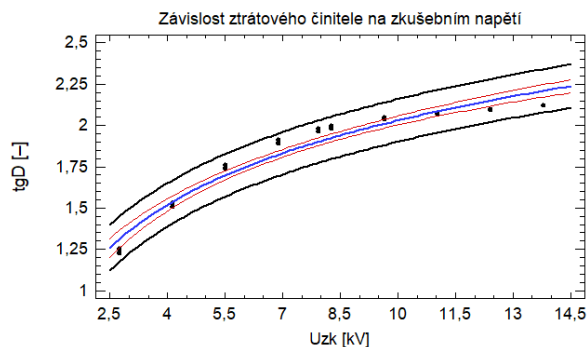
Křivka má předpis  $C = 1,0384 + 0,00207747 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 30C je  $R^2 = 94,92 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,689538 + 0,561125 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 31C – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2021



Graf 32C – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2021

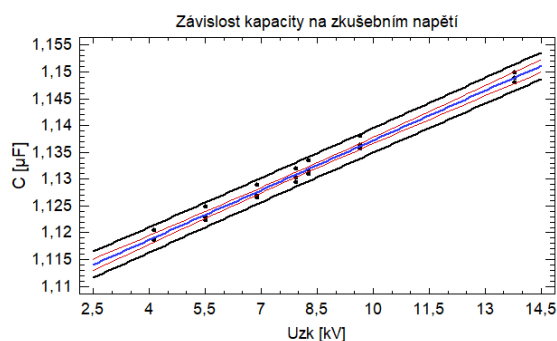
Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 31C je  $R^2 = 98,89 \%$ .

Křivka má předpis  $C = 1,03923 + 0,00213503 \cdot U_{zk}$ .

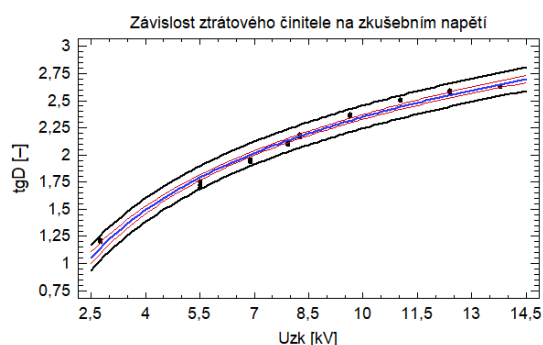
Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 32C je  $R^2 = 95,29 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,747391 + 0,557246 \cdot \ln(U_{zk})$ .

## Příloha D – Generátor G4



Graf 1D – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2005



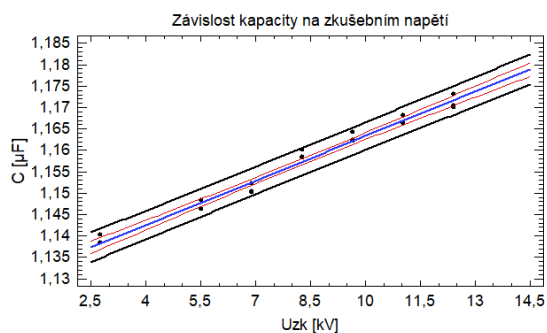
Graf 2D – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2005

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 1D je  $R^2 = 98,75 \%$ .

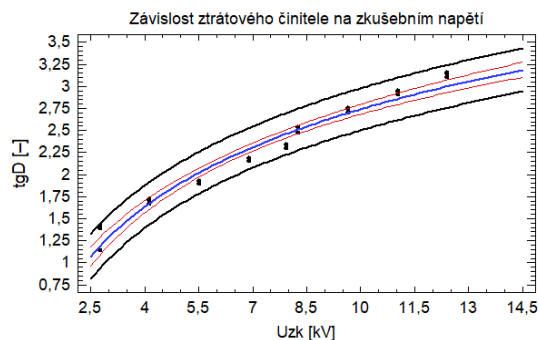
Křivka má předpis  $C = 1,1063 + 0,00309139 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 2D je  $R^2 = 98,77 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,193175 + 0,937282 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 3D – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2006



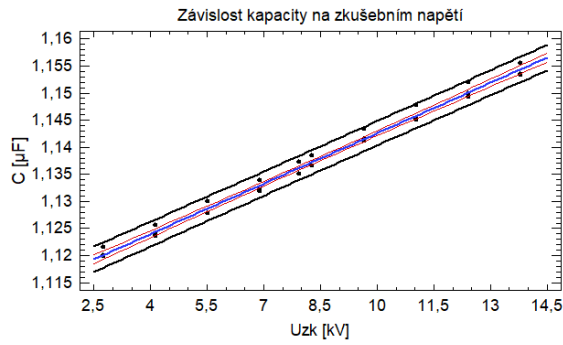
Graf 4D – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2006

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 3D je  $R^2 = 98,23 \%$ .

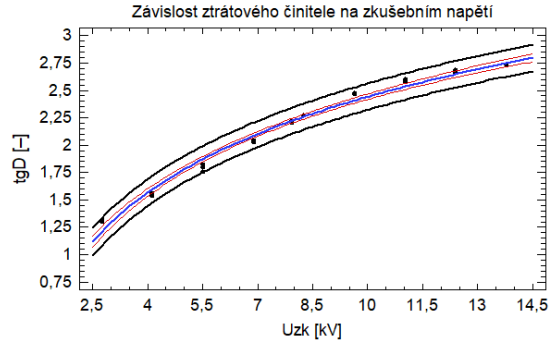
Křivka má předpis  $C = 1,12871 + 0,00345935 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 4D je  $R^2 = 96,28 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = -0,0338596 + 1,20502 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 5D – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2007



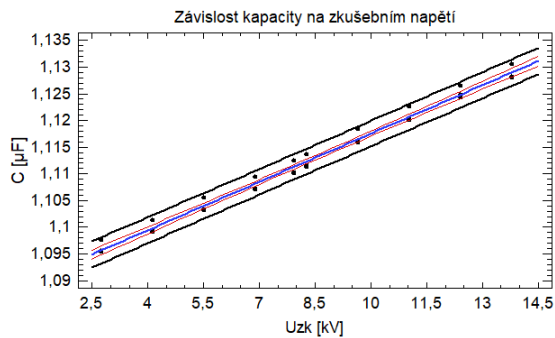
Graf 6D – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2007

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 5D je  $R^2 = 99,03 \%$ .

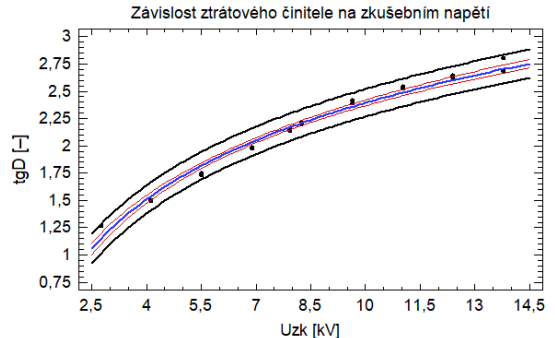
Křivka má předpis  $C = 1,11154 + 0,00310421 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 6D je  $R^2 = 98,57 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,242716 + 0,955621 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 7D – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2008



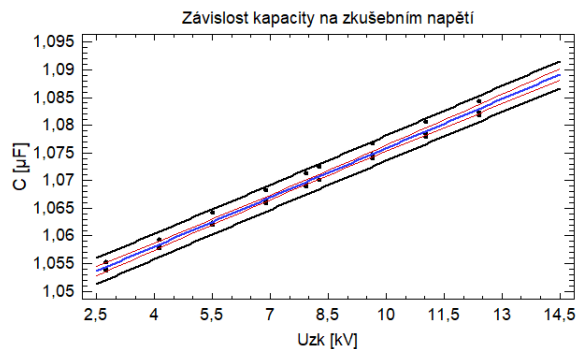
Graf 8D – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2008

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 7D je  $R^2 = 98,85 \%$ .

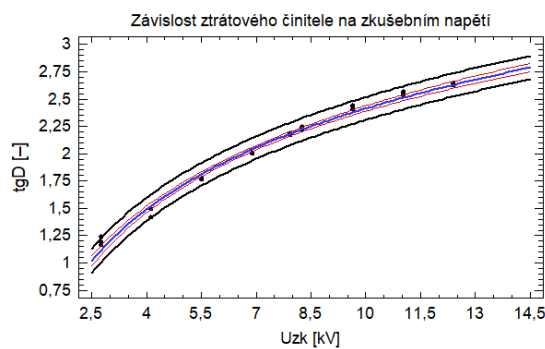
Křivka má předpis  $C = 1,08736 + 0,00301898 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 8D je  $R^2 = 98,44 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,172956 + 0,964734 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 9D – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2009



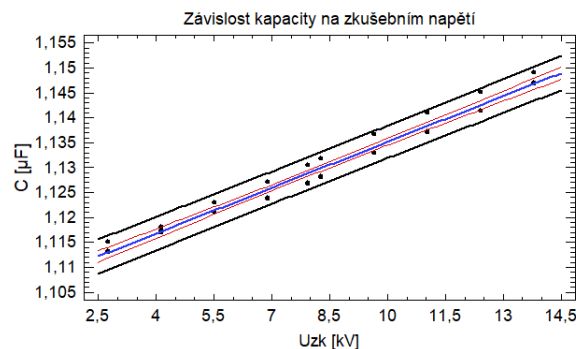
Graf 10D – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2009

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 9D je  $R^2 = 98,66 \%$ .

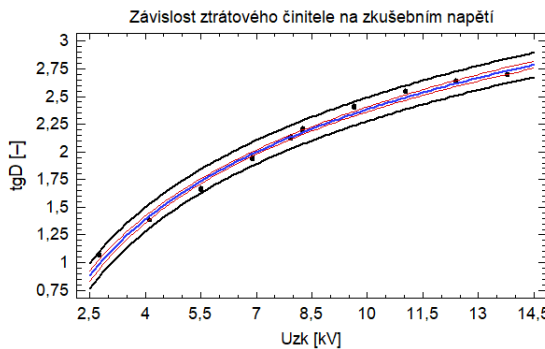
Křivka má předpis  $C = 1,04624 + 0,00295977 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 10D je  $R^2 = 98,95 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,0955691 + 1,00704 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 11D – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2010



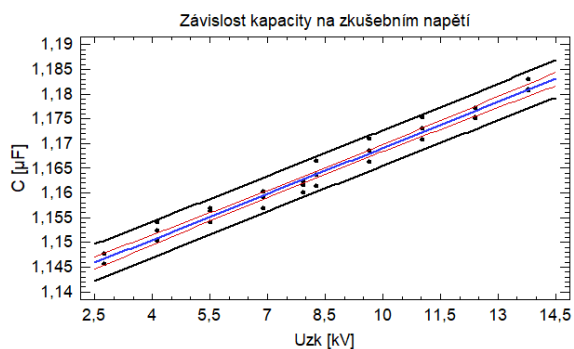
Graf 12D – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2010

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 11D je  $R^2 = 97,91 \%$ .

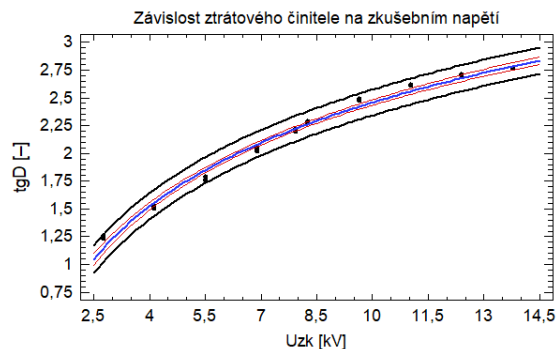
Křivka má předpis  $C = 1,1045 + 0,00306644 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 12D je  $R^2 = 99,11 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = -0,114947 + 1,08565 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 13D – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2011



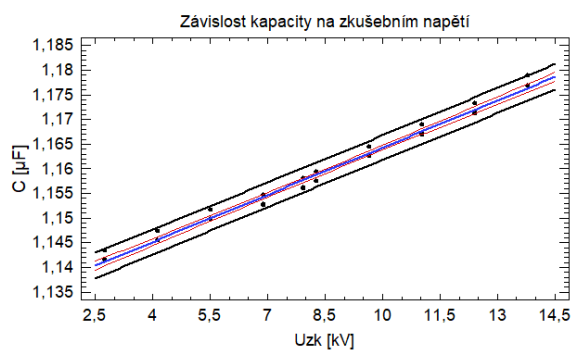
Graf 14D – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2011

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 13D je  $R^2 = 97,55 \%$ .

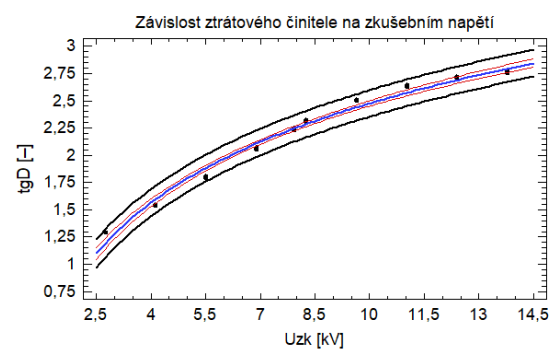
Křivka má předpis  $C = 1,13812 + 0,00309863 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 14D je  $R^2 = 98,81 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,112057 + 1,01905 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 15D – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2012



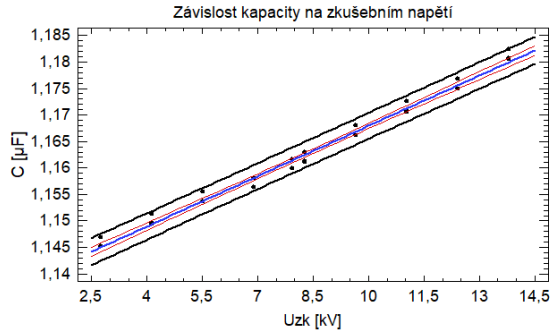
Graf 16D – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2012

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 15D je  $R^2 = 98,87 \%$ .

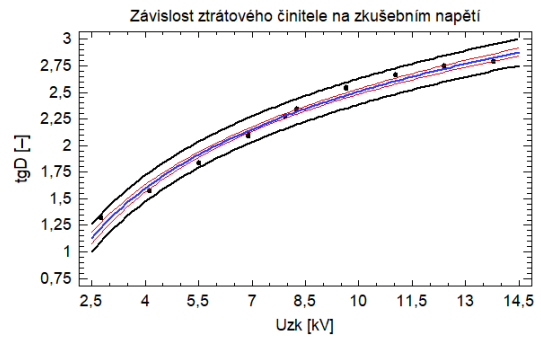
Křivka má předpis  $C = 1,1324 + 0,00318809 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 16D je  $R^2 = 98,63 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,186176 + 0,994579 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 17D – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2013



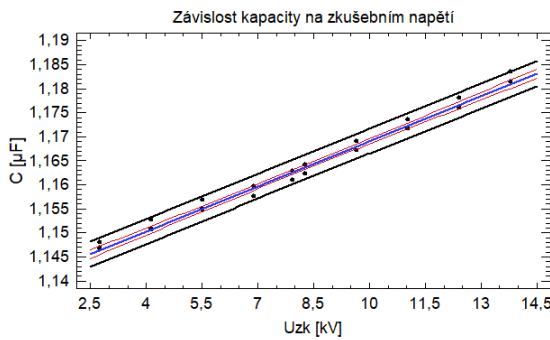
Graf 18D – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2013

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 17C je  $R^2 = 98,89 \%$ .

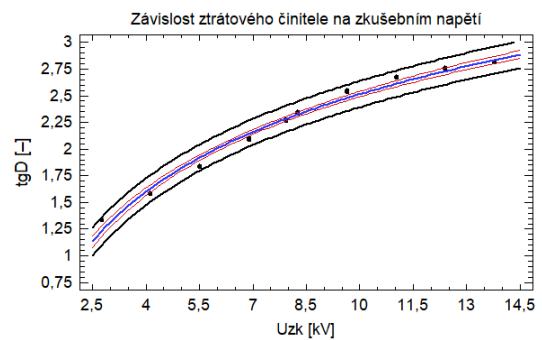
Křivka má předpis  $C = 1,13626 + 0,00316767 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 18C je  $R^2 = 98,63 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg} \delta = 0,217253 + 0,995271 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 19D – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2014



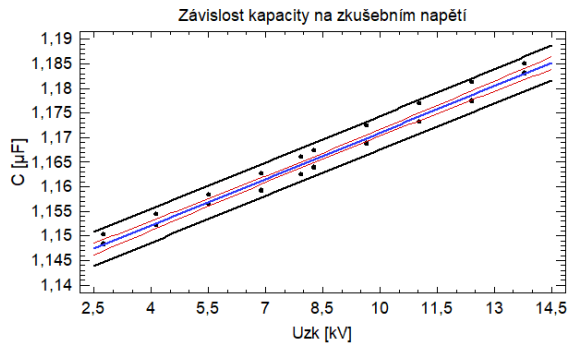
Graf 20D – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2014

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 19D je  $R^2 = 98,77 \%$ .

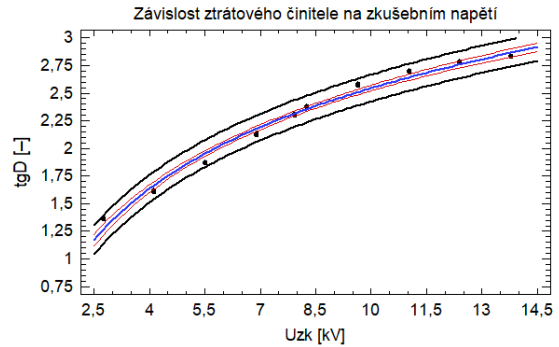
Křivka má předpis  $C = 1,13775 + 0,00313113 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 20D je  $R^2 = 98,61 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg} \delta = 0,218448 + 0,997681 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 21D – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2015



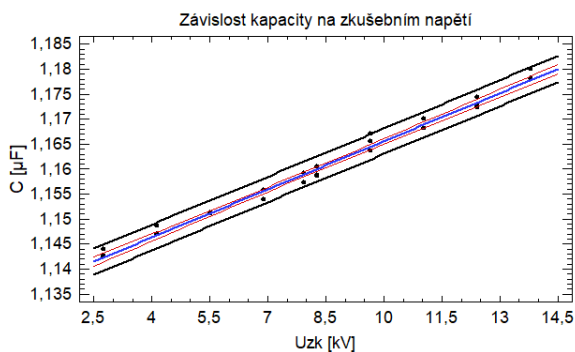
Graf 22D – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2015

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 21D je  $R^2 = 97,91 \%$ .

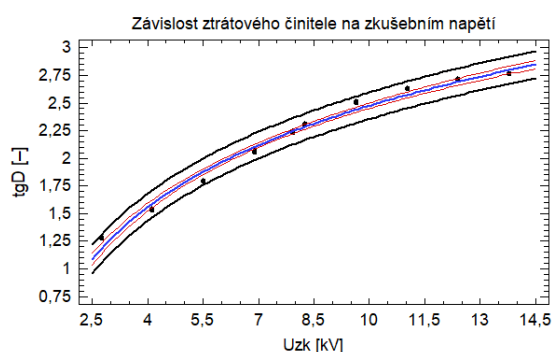
Křivka má předpis  $C = 1,13946 + 0,00315385 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 22D je  $R^2 = 98,64 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,259821 + 0,993195 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 23D – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2016



Graf 24D – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2016

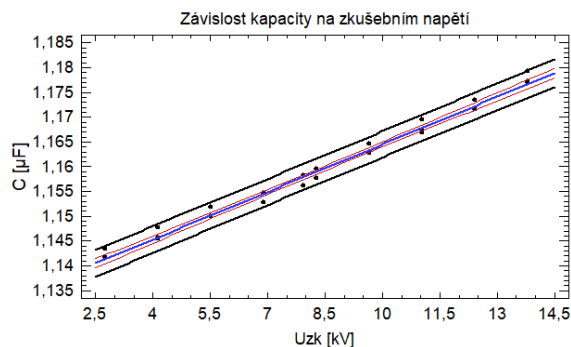
Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 23D je  $R^2 = 98,84 \%$ .

Křivka má předpis  $C = 1,13347 + 0,00321047 \cdot U_{zk}$ .

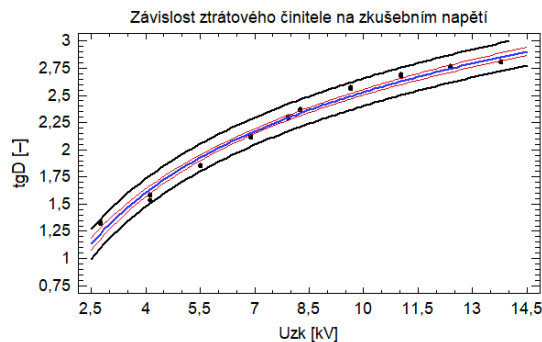
Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 24D je  $R^2 = 98,68 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,169091 + 1,00219 \cdot \ln(U_{zk})$ .





Graf 25D – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2017



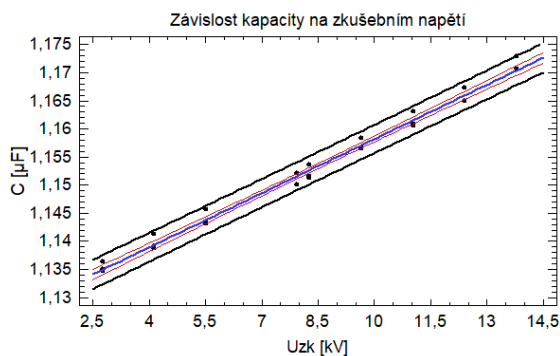
Graf 26D – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2017

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 25D je  $R^2 = 98,75 \%$ .

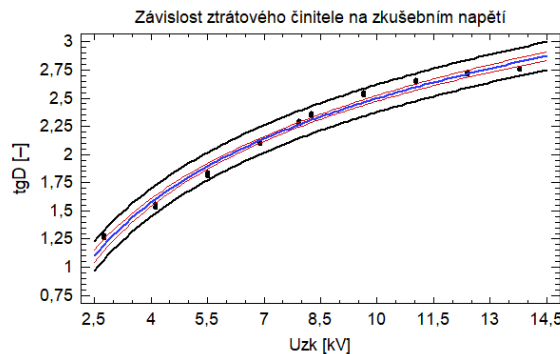
Křivka má předpis  $C = 1,13247 + 0,00320379 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 26D je  $R^2 = 98,57 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,206325 + 1,0093 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 27D – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2018



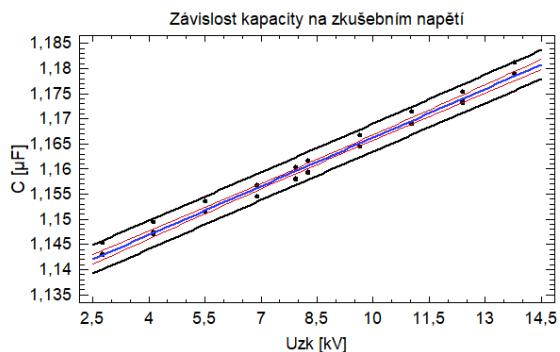
Graf 28D – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2018

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 27D je  $R^2 = 98,99 \%$ .

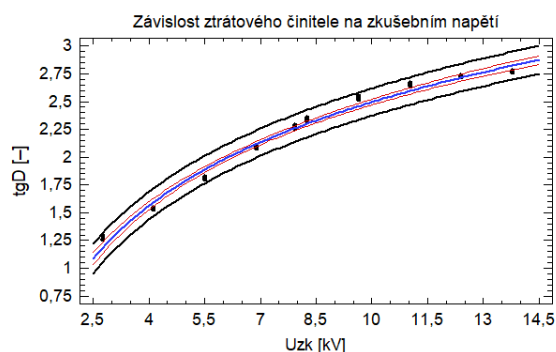
Křivka má předpis  $C = 1,12607 + 0,00321429 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 28D je  $R^2 = 98,66 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,173891 + 1,00991 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 29D – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2019



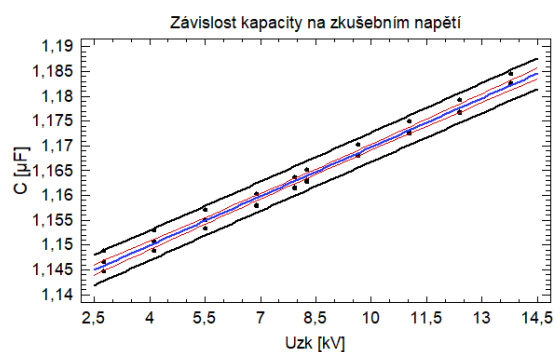
Graf 30D – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2019

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 29D je  $R^2 = 98,64 \%$ .

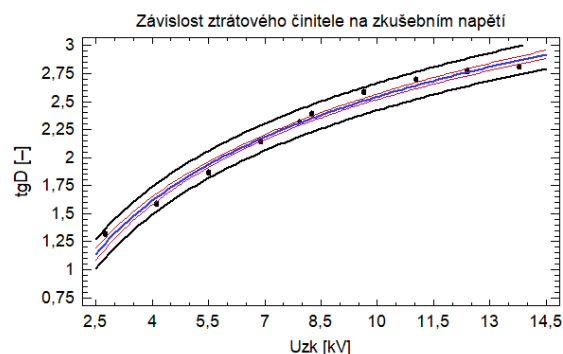
Křivka má předpis  $C = 1,13398 + 0,00322825 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 30D je  $R^2 = 98,66 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,151134 + 1,01878 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 31D – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2020



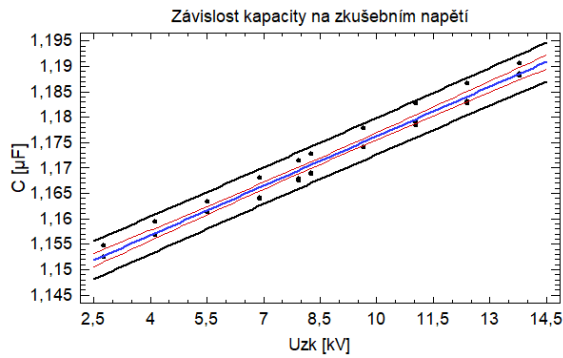
Graf 32D – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2020

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 31D je  $R^2 = 98,52 \%$ .

Křivka má předpis  $C = 1,13672 + 0,00330191 \cdot U_{zk}$ .

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 32D je  $R^2 = 98,68 \%$ .

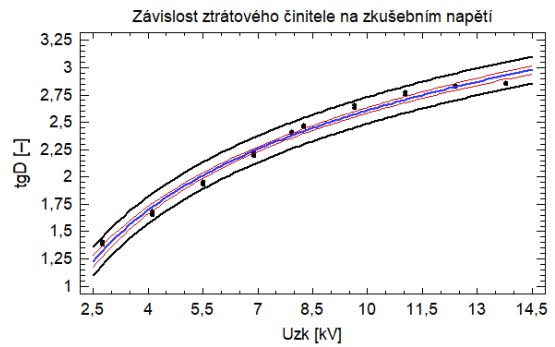
Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,21006 + 1,01375 \cdot \ln(U_{zk})$ .



Graf 33D – Závislost kapacity na zkušební napětí, měřeno v roce 2021

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 33D je  $R^2 = 97,74 \%$ .

Křivka má předpis  $C = 1,14374 + 0,00325146 \cdot U_{zk}$ .



Graf 34D – Závislost ztrátového činitele na zkušební napětí, měřeno v roce 2021

Hodnota koeficientu determinace pro regresní křivku na grafu 34D je  $R^2 = 98,64 \%$ .

Křivka má předpis  $\text{tg } \delta = 0,313151 + 0,997513 \cdot \ln(U_{zk})$



## Příloha E – Optimalizace počtu měření kapacity generátorů

V této příloze jsou uvedeny: rovnice křivek, které vznikly z polovičních záznamů měření kapacity na jednotlivých generátorech G1 – G4, dále tabulky s vypočítanými hodnotami kapacity na jednotlivých měřných hladinách zkušebního napětí a pro srovnání grafy s regresními křivkami před a po optimalizaci počtu měření.

Pro rychlejší orientaci a doplnění je přiložena **tab. E**, která shrnuje rozhodnutí o hypotéze, že střední hodnota je rovna 0 (hypotéza vůči nule – soubory jsou si podobné), tedy  $H_0 : \mu = 0$ , na hladině významnosti 5 %.

*Tab. E: Souhrn testovaných hypotéz pro kapacitu*

<b>Generátor</b>	<b>P-hodnota</b>	<b>Rozhodnutí o hypotéze</b>
G1	0,0	Zamítám
G2	0,476378	Nezamítám
G3	0,167052	Nezamítám
G4	0,718356	Nezamítám

## Generátor G1

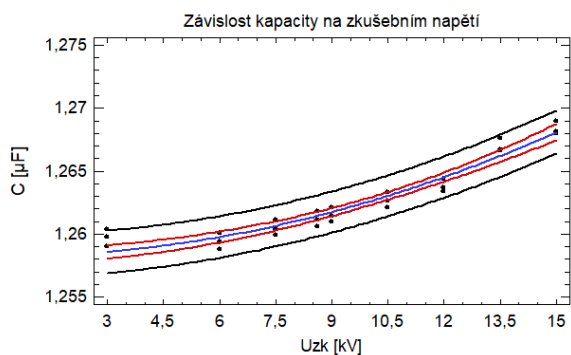
Regresní křivka z plného počtu měření má předpis  $C = 1,25819 + 0,0000440279 \cdot U_{zk}^2$

Regresní křivka z polovičního počtu měření má předpis  $C_o = 1,14419 + 0,00319952 \cdot U_{zk}^2$

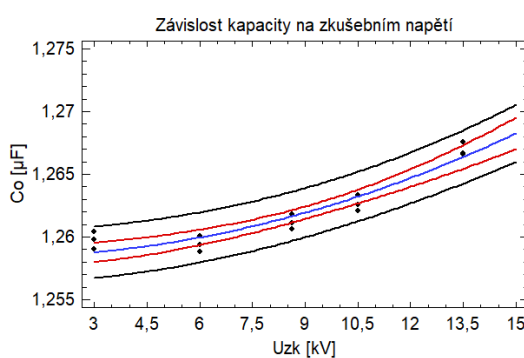
Kde C ( $C_o$ ) je kapacita a  $U_{zk}$  je hodnota zkušební napětí

Tab. č. 1E: Vypočítané hodnoty kapacity generátoru G1 v roce 2021

Zkušební napětí $U_{zk}$ [kV]	Kapacita C [ $\mu$ F]	Optimalizovaná kapacita $C_o$ [ $\mu$ F]	Rozdíl kapacit $C_d$ [ $\mu$ F]
3,00	1,258556	1,258766	-0,000209
4,50	1,259052	1,259260	-0,000209
6,00	1,259745	1,259952	-0,000207
7,50	1,260637	1,260843	-0,000206
8,62	1,261431	1,261636	-0,000205
9,00	1,261726	1,261931	-0,000204
10,50	1,263014	1,263216	-0,000202
12,00	1,264500	1,264700	-0,000200
13,50	1,266184	1,266381	-0,000197
15,00	1,268066	1,268261	-0,000194



a) Regresní křivka s plným počtem měření



b) Regresní křivka s optimalizovaným počtem měření (polovičním)

Graf č. 1E: Srovnání regresních křivek před a po optimalizování měření kapacity generátoru G1 v roce 2021

Výsledná P-hodnota Studentova testu vypočtená v SW Statgraphics je 0,0. Tedy na hladině významnosti 5 % hypotézu  $H_0$  **zamítám**.

## Generátor G2

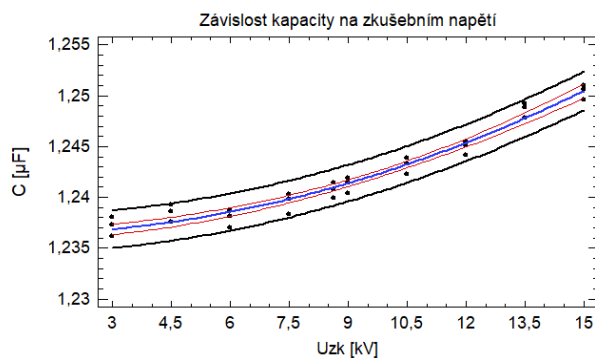
Regresní křivka z plného počtu měření má předpis  $C = 1,23629 + 0,0000630615 \cdot U_{zk}^2$

Regresní křivka z polovičního počtu měření má předpis  $C_o = 1,23592 + 0,0000678624 \cdot U_{zk}^2$

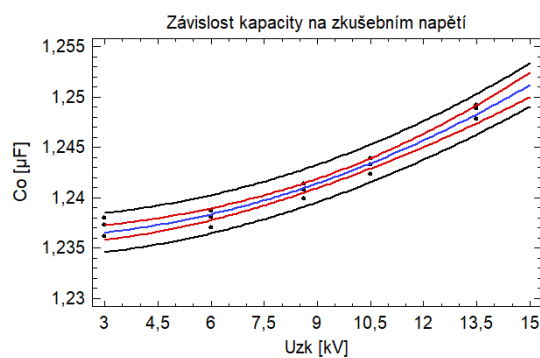
Kde  $C$  ( $C_o$ ) je kapacita a  $U_{zk}$  je hodnota zkušebního napětí

Tab. č. 2E: Vypočítané hodnoty kapacity generátoru G2 v roce 2021

Zkušební napětí $U_{zk}$ [kV]	Kapacita $C$ [ $\mu$ F]	Optimalizovaná kapacita $C_o$ [ $\mu$ F]	Rozdíl kapacit $C_d$ [ $\mu$ F]
3,00	1,236858	1,236531	0,000327
4,50	1,237567	1,237294	0,000273
6,00	1,238560	1,238363	0,000197
7,50	1,239837	1,239737	0,000100
8,62	1,240976	1,240962	0,000013
9,00	1,241398	1,241417	-0,000019
10,50	1,243243	1,243402	-0,000159
12,00	1,245371	1,245692	-0,000321
13,50	1,247783	1,248288	-0,000505
15,00	1,250479	1,251189	-0,000710



a) Regresní křivka s plným počtem měření



b) Regresní křivka s optimalizovaným počtem měření (polovičním)

Graf č. 2E: Srovnání regresních křivek před a po optimalizování měření kapacity generátoru G2 v roce 2021

Výsledná P-hodnota Studentova testu vypočtená v SW Statgraphics je 0,476378. Tedy na hladině významnosti 5 % hypotézu  $H_0$  **nezamítám**.

## Generátor G3

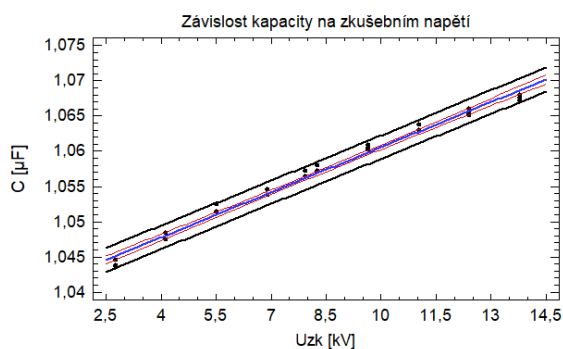
Regresní křivka z plného počtu měření má předpis  $C = 1,03923 + 0,00213503 \cdot U_{zk}$

Regresní křivka z polovičního počtu měření má předpis  $C_o = 1,03873 + 0,00221135 \cdot U_{zk}$

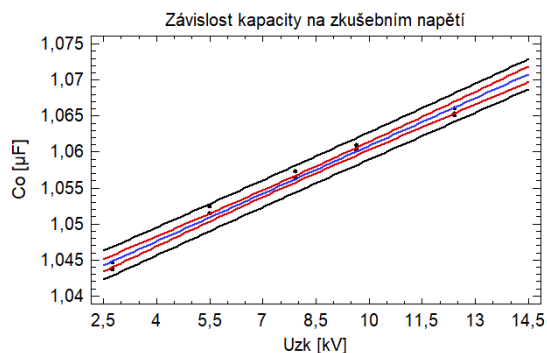
Kde  $C$  ( $C_o$ ) je kapacita a  $U_{zk}$  je hodnota zkušební napětí

Tab. č. 3E: Vypočítané hodnoty kapacity generátoru G3 v roce 2021

Zkušební napětí $U_{zk}$ [kV]	Kapacita $C$ [ $\mu$ F]	Optimalizovaná kapacita $C_o$ [ $\mu$ F]	Rozdíl kapacit $C_d$ [ $\mu$ F]
2,76	1,045123	1,044833	0,000289
4,14	1,048069	1,047885	0,000184
5,52	1,051015	1,050937	0,000079
6,90	1,053962	1,053988	-0,000027
7,93	1,056161	1,056266	-0,000105
8,28	1,056908	1,057040	-0,000132
9,66	1,059854	1,060092	-0,000237
11,04	1,062801	1,063143	-0,000343
12,42	1,065747	1,066195	-0,000448
13,80	1,068693	1,069247	-0,000553



a) Regresní křivka s plným počtem měření



b) Regresní křivka s optimalizovaným počtem měření (polovičním)

Graf č. 3E: Srovnání regresních křivek před a po optimalizování měření kapacity generátoru G3 v roce 2021

Výsledná P-hodnota Studentova testu vypočtená v SW Statgraphics je 0,167052. Tedy na hladině významnosti 5 % hypotézu  $H_0$  **nezamítám**.



## Generátor G4

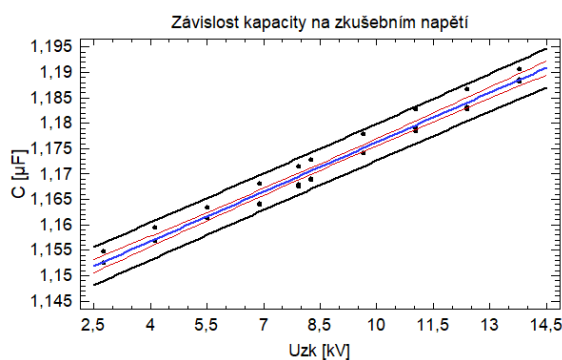
Regresní křivka z plného počtu měření má předpis  $C = 1,14374 + 0,00325146 \cdot U_{zk}$

Regresní křivka z polovičního počtu měření má předpis  $C_o = 1,14419 + 0,00319952 \cdot U_{zk}$

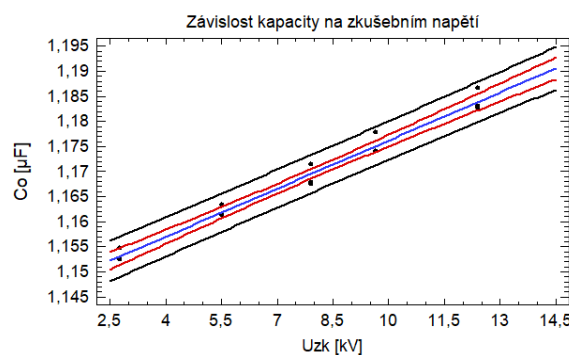
Kde  $C$  ( $C_o$ ) je kapacita a  $U_{zk}$  je hodnota zkušební napětí

Tab. č. 4E: Vypočítané hodnoty kapacity generátoru G4 v roce 2021

Zkušební napětí $U_{zk}$ [kV]	Kapacita $C$ [ $\mu$ F]	Optimalizovaná kapacita $C_o$ [ $\mu$ F]	Rozdíl kapacit $C_d$ [ $\mu$ F]
2,76	1,152714	1,153021	-0,000307
4,14	1,157201	1,157436	-0,000235
5,52	1,161688	1,161851	-0,000163
6,90	1,166175	1,166267	-0,000092
7,93	1,169524	1,169562	-0,000038
8,28	1,170662	1,170682	-0,000020
9,66	1,175149	1,175097	0,000052
11,04	1,179636	1,179513	0,000123
12,42	1,184123	1,183928	0,000195
13,80	1,188610	1,188343	0,000267



a) Regresní křivka s plným počtem měření



b) Regresní křivka s optimalizovaným počtem měření (polovičním)

Graf č. 4E: Srovnání regresních křivek před a po optimalizování měření kapacity generátoru G4 v roce 2021

Výsledná P-hodnota Studentova testu vypočtená v SW Statgraphics je 0,718356. Tedy na hladině významnosti 5 % hypotézu  $H_0$  **nezamítám**.



## Příloha F – Optimalizace počtu měření ztrátového činitele

V této příloze jsou uvedeny: rovnice křivek, které vznikly z polovičních záznamů měření ztrátového činitele na jednotlivých generátorech G1 – G4, dále tabulky s vypočítanými hodnotami ztrátového činitele na jednotlivých měřených hladinách zkušebního napětí a pro srovnání grafy s regresními křivkami před a po optimalizaci počtu měření.

Pro rychlejší orientaci a doplnění je přiložena **tab. F**, která shrnuje rozhodnutí o hypotéze, že střední hodnota je rovna 0 (hypotéza vůči nule – soubory jsou si podobné), tedy  $H_0 : \mu = 0$ , na hladině významnosti 5 %.

*Tab. F: Souhrn testovaných hypotéz pro ztrátový činitel*

<b>Generátor</b>	<b>P-hodnota</b>	<b>Rozhodnutí o hypotéze</b>
G1	0,614685	Nezamítám
G2	0,141993	Nezamítám
G3	0,534100	Nezamítám
G4	0,0	Zamítám

## Generátor G1

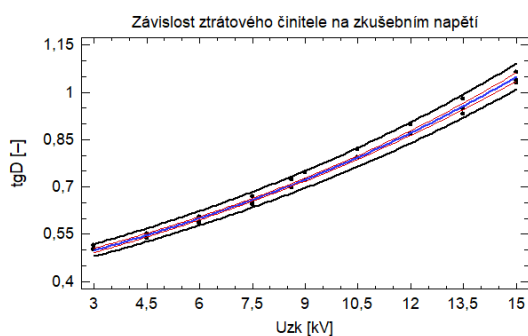
Regresní křivka z plného počtu měření má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,882682 + 0,0620777 \cdot U_{zk})$

Regresní křivka z polovičního počtu měření má předpis  $\text{tg } \delta_o = \exp(-0,876843 + 0,0615168 \cdot U_{zk})$

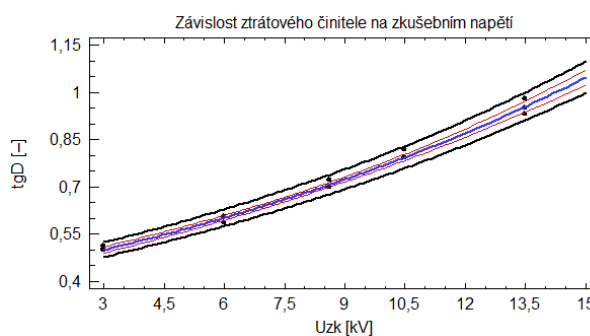
Kde  $\text{tg } \delta$  ( $\text{tg } \delta_o$ ) je ztrátový činitel a  $U_{zk}$  je hodnota zkušební napětí

Tab. č. 1F: Vypočítané hodnoty ztrátového činitele generátoru G1 v roce 2021

Zkušební napětí $U_{zk}$ [kV]	Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ [-]	Optimalizovaný ztrátový činitel $\text{tg } \delta_o$ [-]	Rozdíl ztrátový činitelů $\text{tg } \delta_d$ [-]
3,00	0,498352	0,500427	-0,002076
4,50	0,546986	0,548802	-0,001816
6,00	0,600366	0,601853	-0,001487
7,50	0,658956	0,660032	-0,001076
8,62	0,706401	0,707111	-0,000710
9,00	0,723263	0,723835	-0,000572
10,50	0,793846	0,793806	0,000040
12,00	0,871317	0,870540	0,000777
13,50	0,956348	0,954692	0,001656
15,00	1,049678	1,046979	0,002699



a) Regresní křivka s plným počtem měření



b) Regresní křivka s optimalizovaným počtem měření (polovičním)

Graf č. 1F: Srovnání regresních křivek před a po optimalizování měření ztrátového činitele generátoru G1 v roce 2021

Výsledná P-hodnota Studentova testu vypočtená v SW Statgraphics je 0,614685. Tedy na hladině významnosti 5 % hypotézu  $H_0$  **Nezamítám**.

## Generátor G2

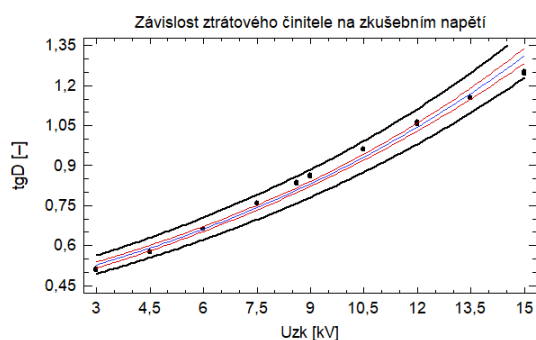
Regresní křivka z plného počtu měření má předpis  $\text{tg } \delta = \exp(-0,868382 + 0,0760275 \cdot U_{zk})$

Regresní křivka z polovičního počtu měření má předpis  $\text{tg } \delta_o = \exp(-0,890455 + 0,0789073 \cdot U_{zk})$

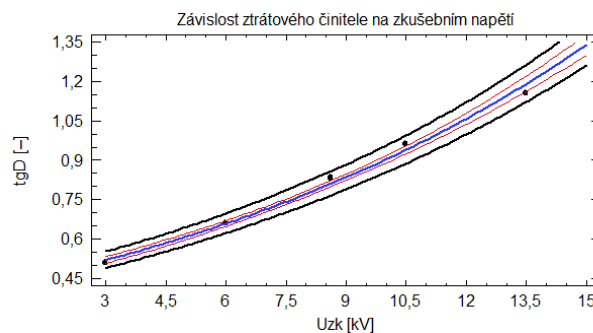
Kde  $\text{tg } \delta$  ( $\text{tg } \delta_o$ ) je ztrátový činitel a  $U_{zk}$  je hodnota zkušební napětí

Tab. č. 2F: Vypočítané hodnoty ztrátového činitele generátoru G2 v roce 2021

Zkušební napětí $U_{zk}$ [kV]	Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ [-]	Optimalizovaný ztrátový činitel $\text{tg } \delta_o$ [-]	Rozdíl ztrátový činitelů $\text{tg } \delta_d$ [-]
3,00	0,527135	0,520101	0,007034
4,50	0,590812	0,585451	0,005360
6,00	0,662181	0,659014	0,003167
7,50	0,742171	0,741819	0,000352
8,62	0,808136	0,810362	-0,002226
9,00	0,831824	0,835029	-0,003205
10,50	0,932307	0,939950	-0,007643
12,00	1,044928	1,058055	-0,013127
13,50	1,171154	1,191000	-0,019847
15,00	1,312627	1,340650	-0,028023



a) Regresní křivka s plným počtem měření



b) Regresní křivka s optimalizovaným počtem měření (polovičním)

Graf č. 2F: Srovnání regresních křivek před a po optimalizování měření ztrátového činitele generátoru G2 v roce 2021

Výsledná P-hodnota Studentova testu vypočtená v SW Statgraphics je 0,141993. Tedy na hladině významnosti 5 % hypotézu  $H_0$  **Nezamítám**.

## Generátor G3

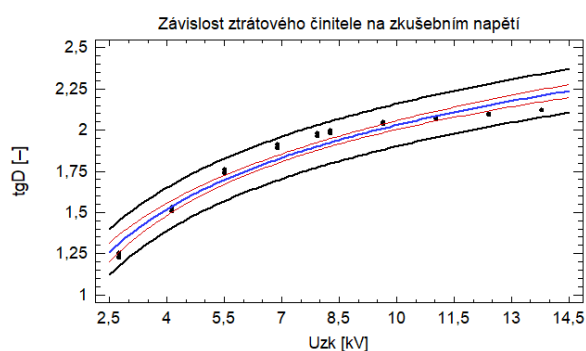
Regresní křivka z plného počtu měření má předpis  $\text{tg } \delta = 0,747391 + 0,557246 \cdot \ln(U_{zk})$

Regresní křivka z polovičního počtu měření má předpis  $\text{tg } \delta_o = 0,683216 + 0,590953 \cdot \ln(U_{zk})$

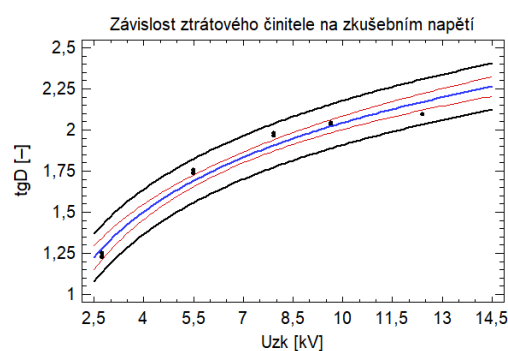
Kde  $\text{tg } \delta$  ( $\text{tg } \delta_o$ ) je ztrátový číselník a  $U_{zk}$  je hodnota zkušební napětí

Tab. č. 3F: Vypočítané hodnoty ztrátového číselníku generátoru G3 v roce 2021

Zkušební napětí $U_{zk}$ [kV]	Ztrátový číselník $\text{tg } \delta$ [-]	Optimalizovaný ztrátový číselník $\text{tg } \delta_o$ [-]	Rozdíl ztrátový číselníků $\text{tg } \delta_d$ [-]
2,76	1,313124	1,283170	0,029955
4,14	1,539068	1,522780	0,016288
5,52	1,699378	1,692787	0,006591
6,90	1,823724	1,824654	-0,000931
7,93	1,901254	1,906875	-0,005621
8,28	1,925322	1,932398	-0,007076
9,66	2,011221	2,023494	-0,012272
11,04	2,085631	2,102404	-0,016773
12,42	2,151265	2,172009	-0,020743
13,80	2,209977	2,234272	-0,024295



a) Regresní křivka s plným počtem měření



b) Regresní křivka s optimalizovaným počtem měření (polovičním)

Graf č. 3F: Srovnání regresních křivek před a po optimalizování měření ztrátového číselníku generátoru G3 v roce 2021

Výsledná P-hodnota Studentova testu vypočtená v SW Statgraphics je 0,534100. Tedy na hladině významnosti 5 % hypotézu  $H_0$  **Nezamítám**.

## Generátor G4

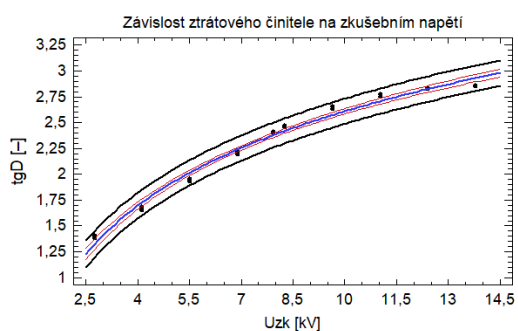
Regresní křivka z plného počtu měření má předpis  $\text{tg } \delta = 0,313151 + 0,997513 \cdot \ln(U_{zk})$

Regresní křivka z polovičního počtu měření má předpis  $\text{tg } \delta_o = 0,348448 + 0,987427 \cdot \ln(U_{zk})$

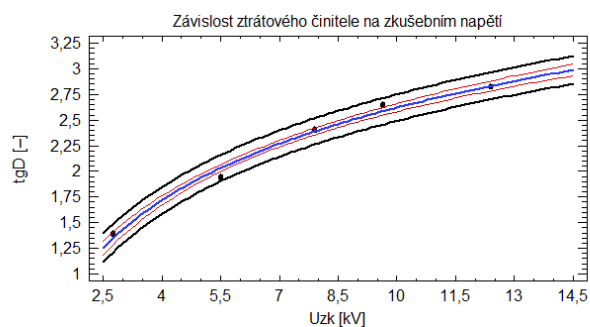
Kde  $\text{tg } \delta$  ( $\text{tg } \delta_o$ ) je ztrátový činitel a  $U_{zk}$  je hodnota zkušební napětí

Tab. č. 4F: Vypočítané hodnoty ztrátového činitele generátoru G4 v roce 2021

Zkušební napětí $U_{zk}$ [kV]	Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ [-]	Optimalizovaný ztrátový činitel $\text{tg } \delta_o$ [-]	Rozdíl ztrátový činitelů $\text{tg } \delta_d$ [-]
2,76	1,325857	1,350914	-0,025057
4,14	1,730314	1,751281	-0,020968
5,52	2,017280	2,035346	-0,018066
6,90	2,239869	2,255684	-0,015816
7,93	2,378654	2,393067	-0,014412
8,28	2,421737	2,435714	-0,013977
9,66	2,575504	2,587926	-0,012422
11,04	2,708703	2,719779	-0,011075
12,42	2,826194	2,836081	-0,009887
13,80	2,931292	2,940117	-0,008825



a) Regresní křivka s plným počtem měření



b) Regresní křivka s optimalizovaným počtem měření (polovičním)

Graf č. 4F: Srovnání regresních křivek před a po optimalizování měření ztrátového činitele generátoru G4 v roce 2021

Výsledná P-hodnota Studentova testu vypočtená v SW Statgraphics je 0,0. Tedy na hladině významnosti 5 % hypotézu  $H_0$  **Zamítám**.