



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

IZOLAČNÍ SYSTÉMY ELEKTRICKÝCH STROJŮ MALÉHO A NÍZKÉHO NAPĚTÍ

LOW-VOLTAGE AND LOW-VOLTAGE ELECTRICAL MACHINES INSULATING SYSTEMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Procházka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marcel Janda, Ph.D.

BRNO 2019



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Jan Procházka

ID: 173730

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Izolační systémy elektrických strojů malého a nízkého napětí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte analýzu normativních požadavků na zkoušení izolačních systémů strojů napájených z frekvenčních měničů malých a nízkých napětí, zejména pak požadavky na dvojitou a zesílenou izolaci.
2. Navrhněte metodiku koordinace a zkoušení izolačních systémů pro různá stadia výroby.
3. Na vybraných vzorcích ověřte vhodnost a správnost metodiky dle bodu 2.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] STONE, Greg. Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair. Hoboken, NJ:

Wiley-Interscience, c2004. IEEE Press series on power engineering.

[2] PYRHONEN, Juha., Tapani JOKINEN a Valeria. HRABOVCOVÁ. Design of rotating electrical machines. Second edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2014. ISBN 9781118701621.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 22.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Marcel Janda, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

V této práci jsou uvedeny vlastnosti vinutí elektrických točivých strojů a jejich izolačních systémů. Jsou zde popsány zkoušky pro testování vinutí a izolace elektrických strojů na malé a nízké napětí, jejich postupy a kritéria. Dále se práce zabývá metodikou koordinace a v poslední části jsou provedeny a zhodnoceny zkoušky na vzorcích statorů.

Klíčová slova

Točivý elektrický stroj, vinutí, izolační materiál, výrobní proces, metodika koordinace, vysokonapěťová zkouška, částečné výboje, izolační odpor, nesymetrie vinutí, polarizační index, zkouška rázovou vlnou.

Abstract

This thesis describes properties of windings of electric rotating machines and their insulation systems. There are winding and insulation low voltage machines tests listed with their procedures and criteria. Further it deals with coordination methodology and the last part contains execution and results assessment of tests conducted on stator samples.

Keywords

Rotating electric machine, winding, insulation material, manufacturing process, coordination methodology, Hi-pot test, partial discharges, insulation resistance, winding unbalance, polarization index, surge test.

Bibliografická citace:

PROCHÁZKA, Jan. Izolační systémy elektrických strojů malého a nízkého napětí. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119713>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Marcel Janda.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Izolační systémy elektrických strojů malého a nízkého napětí* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **22. května 2019**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Marcelovi Jandovi Ph.D. a konzultantovi Ing. Jiřímu Duroňovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále děkuji kolegovi Bc. Janu Daleckému za podporu a odbornou pomoc.

V Brně dne: **22. května 2019**

.....
podpis autora

Obsah

1.	Úvod.....	11
2.	Izolační materiály.....	12
2.1.	Elektrická vodivost plynů	12
2.2.	Vnitřní elektrická vodivost tuhých izolanů.....	14
2.3.	Povrchová elektrická vodivost tuhých izolanů	14
2.4.	Dielektrické ztráty	14
2.5.	Průraz izolanů	17
3.	vinutí elektrických strojů.....	19
3.1.	Statorová vinutí	19
3.2.	Izolace vsypávaných vinutí	20
3.3.	Drážková a mezifázová izolace.....	20
3.4.	Zalévání statoru	21
3.5.	Impregnace	22
3.6.	Poruchy vinutí a jeho izolace	22
3.6.1	Tepelné stárnutí.....	23
3.6.2	Vady impregnace	24
3.6.3	Nesymetrie vinutí.....	24
4.	Metodika koordinace a zkoušení izolačních systémů	25
4.1.	Návrh izolačního systému	25
4.1.1	Stupeň znečištění	25
4.1.2	Kategorie přepětí.....	26
4.1.3	Vzdušné vzdálenosti	26
4.1.4	Povrchové cesty	27
4.1.5	Vzdušné a povrchové cesty testovaných vzorků	27
4.1.6	Požadavky na pevnou izolaci.....	27
4.2.	Výrobní proces.....	28
5.	detekce poruch vinutí a izolace	32
5.1.	Stejnoseměrná vysokonapěťová zkouška	32
5.2.	Střídavá vysokonapěťová zkouška (zkouška přiloženým napětím).....	33
5.3.	Izolační odpor a polarizační index	34
5.3.1	Měření izolačního odporu.....	35

5.3.2	Měření polarizačního indexu	38
5.4.	Měření odporu vinutí.....	39
5.5.	Částečné výboje	39
5.6.	Měření částečných výbojů.....	40
5.6.1	Příprava pro měření	40
5.6.2	Zkušební napětí.....	41
5.6.3	Šum a rušení.....	41
5.6.4	Výsledky měření	42
5.7.	Zkouška rázovou vlnou	43
6.	Testování satorových vinutí	45
6.1.	Testované vzorky	45
6.2.	Měření odporu vinutí na testovaných vzorcích.....	46
6.3.	Měření indukčnosti vinutí na testovaných vzorcích.....	47
6.4.	Střídavá vysokonapěťová zkouška testovaných vzorků.....	47
6.5.	Stejnoseměrná vysokonapěťová zkouška testovaných vzorků	48
6.6.	Zkouška testovaných vzorků rázovou vlnou.....	49
6.7.	Výsledky zkoušek na testovaných vzorcích.....	50
7.	Začlenění zkoušek do výrobního procesu	51
7.1.	Testované vzorky	51
7.2.	Výsledky měření odporu vinutí.....	52
7.3.	Výsledky měření indukčnosti vinutí	52
7.4.	Výsledky střídavé vysokonapěťové zkoušky	53
7.5.	Výsledky zkoušky rázovou vlnou	53
8.	Závěr	55

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Elektrická pevnost vzduchu o tlaku 101 kPa.....	13
Obr. 2-2 Paschenova křivka.....	13
Obr. 2-3 Náhradní dvouprvkové paralelní zapojení	16
Obr. 2-4 Náhradní dvouprvkové sériové zapojení	16
Obr. 2-5 a) Teplotní b) Kmitočtová závislost ztrátového činitele nepolárního dielektrika [6].....	17
Obr. 4-1 Statorový svazek s drážkovou izolací a izolačním kruhem.....	29
Obr. 4-2 Statorový svazek s navinutým vinutím	29
Obr. 4-3 Statorový svazek připravený pro vložení do kostry statoru	30
Obr. 4-4 Stator zalitý zalévací hmotou	30
Obr. 4-5 kompletní motor [24]	31
Obr. 5-1 Ekvivalentní obvod znázorňující čtyři proudy sledované při měření izolačního odporu. [8].....	37
Obr. 5-2 Zvyšování a snižování zkušebního napětí po skocích a spojitě [12].....	41
Obr. 5-3 Schématické znázornění rázového generátoru	44
Obr. 6-1 Testované vzorky 1, 2 a 3.....	45
Obr. 6-2 Testované vzorky 4, 5 a 6.....	46
Obr. 7-1 Testované statory.....	51

Seznam tabulek

Tab. 3-1 Tabulka tepelných tříd izolace [13].....	20
Tab. 3-2 Tabulka izolačních materiálů pro drážkovou a mezifázovou izolaci	21
Tab. 5-1 Tabulka stejnosměrných napětí pro měření izolačního odporu [9].....	35
Tab. 5-2 Tabulka minimálních izolačních odporů při teplotě 40 °C.....	36
Tab. 6-1 Naměřené hodnoty odporů vinutí.....	47
Tab. 6-2 Naměřené hodnoty indukčností vinutí	47
Tab. 6-3 Výsledky střídavé vysokonapěťové zkoušky	48
Tab. 6-4 Výsledky stejnosměrné vysokonapěťové zkoušky.....	49
Tab. 6-5 Tabulka vypočtených procentuálních odchylek průběhů pro zkoušku rázovou vlnou	49
Tab. 6-6 Výsledky zkoušek na testovaných vzorcích.....	50
Tab. 7-1 Naměřené hodnoty odporů vinutí.....	52
Tab. 7-2 Naměřené hodnoty indukčností vinutí	53
Tab. 7-3 Tabulka vypočtených procentuálních odchylek průběhů pro zkoušku rázovou vlnou	54

1. ÚVOD

Elektrické točivé stroje malého a nízkého napětí jsou zařízení, která mají za úkol přeměňovat elektrickou energii na mechanickou, nebo naopak a jsou napájeny napětím do 1 kV. Pracují na principu vzájemných silových účinků točivého magnetického pole, které je vyvoláno proudem procházejícím statorovým vinutím a magnetického pole rotoru. Právě ono vinutí a jeho izolace jsou nejčastějšími zdroji poruch točivých elektrických strojů. I když jsou vinutí a izolace navrženy správně, může dojít k jejich selhání dříve, než dojdou na konec jejich předpokládané životnosti. To může být způsobeno výrobními vadami, nesprávným používáním, nebo vlivy okolí. Aby se předešlo předčasnému selhání stroje provádějí se na něm zkoušky při výrobě a v provozu. Tímto způsobem se v průběhu výroby dají odhalit vady, které se opraví, nebo se vadné kusy vyřadí. Zkouškami na strojích, které jsou již v provozu se dají vady odhalit dříve, než způsobí selhání stroje, a tak je možné tyto vady vyřešit pro zamezení neplánovaného výpadku.

V této práci budou popsány funkce vinutí elektrických točivých strojů na malé a nízké napětí a jejich poruchy, které mohou vzniknout již při jejich výrobě, nebo v průběhu jejich používání. Dále se práce bude zabývat různými metodami pro zjišťování poruch vinutí a izolačního systému těchto strojů. Tyto metody budou popsány a bude uveden postup při jejich provádění a normativní požadavky. Podle těchto metod budou provedeny zkoušky na několika vzorcích a budou vybrány metody zkoušení pro začlenění do výrobního procesu. V práci bude popsána metodika koordinace a budou navrženy vzdušné a povrchové vzdálenosti statoru na malé napětí. Na závěr budou statory otestovány při jejich výrobním procesu zvolenými zkouškami a testy budou zhodnoceny.

2. IZOLAČNÍ MATERIÁLY

Izolační materiály jsou materiály s velice nízkou elektrickou vodivostí. Primárním účelem izolačních materiálů v elektrickém stroji je oddělení vodivých částí s různými elektrickými potenciály. Všechny izolanty jsou také dielektriky což znamená, že jsou schopny být polarizovány při působení elektrického pole. To znamená, že se elektricky vázané náboje přemístí ze svých rovnovážných poloh a dipólové molekuly se orientují ve směru pole s polaritou opačnou, než má působící pole. Tím je velikost působícího pole zmenšována. Míra polarizace je relativní permitivita a vektor polarizace. Relativní permitivita udává poměr intenzity elektrického pole vnějšího ku výslednému elektrickému poli. Polarizovatelnost je schopnost polarizace dielektrické látky, která souvisí s permitivitou.

Mezi polarizační mechanismy patří polarizace pružná a relaxační. Pružná polarizace má krátkou dobu trvání, jedná se tedy o mechanismus s rychlým průběhem. Probíhá bez ztrát energie a není závislá na frekvenci. Polarizace relaxační se zvyšuje pomalu po začátku působení elektrického pole a je závislá na teplotě. Stejně tak pomalu ubývá po skončení působení elektrického pole. Dielektrikum při této polarizaci uvolňuje teplo způsobené ztrátami energie. Pokud působí více polarizačních mechanismů, silnější mechanismus překryje slabší.

Elektrická vodivost se odvíjí od pohybu volných, nebo i slabě vázaných elektrických nábojů v elektrickém poli a závisí také na typu nosičů náboje a jejich koncentraci. Elektrická vodivost u tuhých látek může být vnitřní, nebo povrchová.

2.1. Elektrická vodivost plynů

Plyny obecně jsou velmi dobrými izolanty za podmíněk, že na ně nepůsobí příliš silné elektrické pole. Plyn se stává vodivým při ionizaci části jeho neutrálních molekul. Při ionizaci plynu se z molekul, nebo atomů postupně vytvářejí elektrony a kladné ionty. U plynů probíhá ionizace objemová.

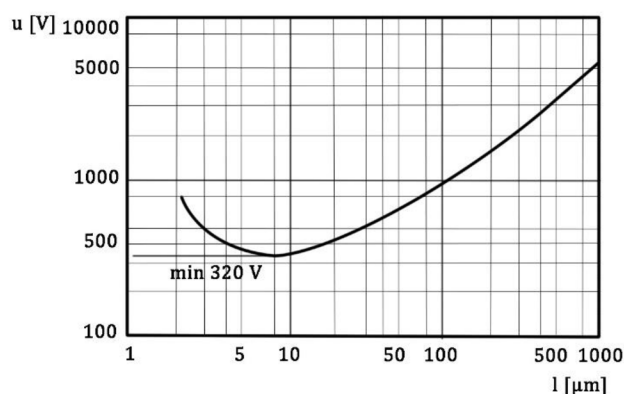
Rozdíl mezi samostatnou a nesamostatnou vodivostí je ten, že při samostatné vodivosti musí být nabitě částice urychleny elektrickým polem natolik, že dostanou kinetickou energii dost velkou pro to, aby docházelo k nárazové ionizaci. U samostatné vodivosti není potřebný žádný vnější ionizační činitel. U nesamostatné vodivosti je třeba

působení vnějšího ionizačního činitele jako je velmi vysoká teplota, nebo záření elektromagnetické, UV, rentgenové a gama. Při této nesamostatné vodivosti tedy vnějším ionizačním činitelem ionizace vzniká a nadále je jím také udržována.

Rekombinace nosičů náboje probíhá současně s ionizací do dosažení dynamické rovnováhy. Rekombinace je opačný jev ionizace, to znamená, že při rekombinaci se spojují stejně nabitě částice opačných znamének a vytvářejí tak neutrální částice. [6]

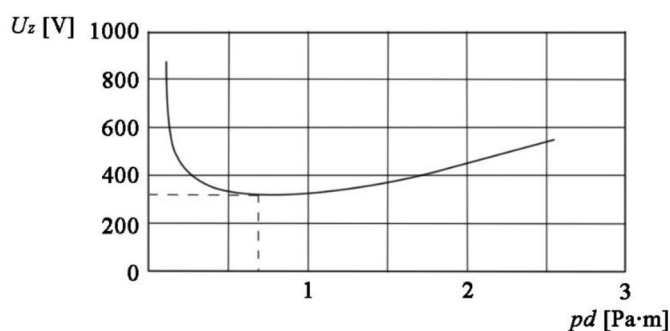
V elektrických strojích jsou plynná dielektrika nejvíce zastoupena vzduchem. Dále v nich může být použit dusík, který se nejvíce používá u rychloběžných strojů s velkým výkonem. [4]

Pokud se jedná o homogenní elektrické pole při tlaku 101 kPa, závislost zápalného napětí na délce vzduchové mezery je vykreslena na obrázku 2-1.



Obr. 2-1 Elektrická pevnost vzduchu o tlaku 101 kPa

Závislost zápalného napětí na tlaku vzduchu je dána Paschenovou křivkou, která je na obrázku 2-2.



Obr. 2-2 Paschenova křivka

Při nízkém tlaku jsou volné dráhy dlouhé, a tak většina uvolněných elektronů nedorazí od katody k anodě. Tím pádem nepřispějí ke vzniku kladných iontů a k průrazu je třeba vysoké napětí.

Pokud je tlak vysoký elektrony se srážejí s molekulami plynu už po krátké uražené vzdálenosti, takže nejsou schopny získat dostatečnou kinetickou energii z pole, která je nutná pro ionizaci.

2.2. Vnitřní elektrická vodivost tuhých izolantů

Vnitřní elektrická vodivost závisí na struktuře, chemickém složení, výskytu defektů vnitřního složení a na obsahu a druhu případných nečistot, nebo příměsí. Také je ovlivněna teplotou, což je způsobeno změnou počtu nosičů při změně teploty.

Elektrická vodivost je buďto iontová, takže je způsobena usměrněným pohybem iontů příměsí, nečistot, nebo samotného izolantu. Nebo vodivost elektronová, která se více projevuje až v intenzivnějších elektrických polích a při vyšších teplotách. Vodivost tedy může být příměsová, nebo vlastní.

2.3. Povrchová elektrická vodivost tuhých izolantů

Tato vodivost vzniká především pomocí vlhkosti, která je absorbovaná povrchem izolačního materiálu. Voda má dobrou elektrickou vodivost, takže na povrchu izolantu stačí jen malá vrstva pro vytvoření povrchové vodivosti. Povrchová vodivost je specifická vlastnost určitého materiálu, protože na jiném materiálu se vytvoří jinak tlustá vrstva vody.

Mezi rozhodující vlivy povrchové vodivosti patří relativní vlhkost prostředí, která se zvyšuje s nižší teplotou. Takže při zvyšující se teplotě se odpařuje vodivá vrstva a tím klesá povrchová vodivost. Dalším vlivem je schopnost látky buď odpuzovat vodu (látka hydrofobní), nebo vodu vázat (látka hydrofilní). Vliv na povrchovou vodivost má také čistota a hladkost povrchu. Hladké povrchy vodu lépe odpuzují, takže mají menší vodivost. U hydrofobních látek nečistoty povrchu nemají velký význam na vodivost, ale u hydrofilních nečistoty vodivost značně zvyšují.

2.4. Dielektrické ztráty

Dielektrické ztráty jsou energie přeměněná na teplo v dielektrickém materiálu, který se nachází ve střídavém elektrickém poli. Pokud se dielektrikum skládá z dipólových

molekul, nebo obsahuje slabě vázané ionty, je vyžadována určitá doba (relaxační) pro jejich posun, nebo změnu jejich orientace. To znamená, že polarizace nenabývá maxima zároveň s maximem elektrického pole, ale je zpožděna. Pokud jsou molekuly, nebo ionty orientovány ve směru elektrického pole, tak narážejí do jiných částic a pohlcují energii. Pokud je relaxační doba delší než perioda elektrického pole, molekuly se téměř nepolarizují a vznikají malé ztráty. [3]

Při vložení reálného (technického) dielektrika do elektrického pole nastávají nestacionární pochody, které způsobují ztráty dielektrika. Tyto ztráty jsou veškerá energie, která se rozptýlí v dielektriku za časovou jednotku při působení elektrického pole. Působením elektrického pole je způsoben fázový posun mezi napětím a proudem. Když kondenzátor s dielektrikem připojíme na zdroj střídavého napětí, nebude proud předbíhat napětí o 90° , jako u ideálního kondenzátoru, ale o úhel φ menší než 90° . Pro tento úhel platí:

$$\varphi = 90 - \delta, \quad (2.1)$$

kde δ znamená ztrátový úhel (míra nedokonalosti dielektrika).

Ztráty v dielektriku mají různou fyzikální podstatu, ale stejné výsledné působení na dielektrikum. Mezi tyto ztráty patří vodivostní ztráty, polarizační ztráty a ionizační ztráty.

Vodivostní ztráty jsou ovlivněny i vnitřní i povrchovou vodivostí a vyskytují se u všech dielektrik. Důsledkem těchto ztrát je přeměna energie elektrického pole na Joulovo teplo srážkami volných nosičů náboje s kmitajícími částicemi dané látky.

Polarizační ztráty a jejich závislost na frekvenci a teplotě vyplívají z druhu polarizací a mají velký podíl na celkových ztrátách. Nevyskytují se u elektronové a iontové polarizace, ale u dipólové a iontové relaxační polarizace jsou výrazné.

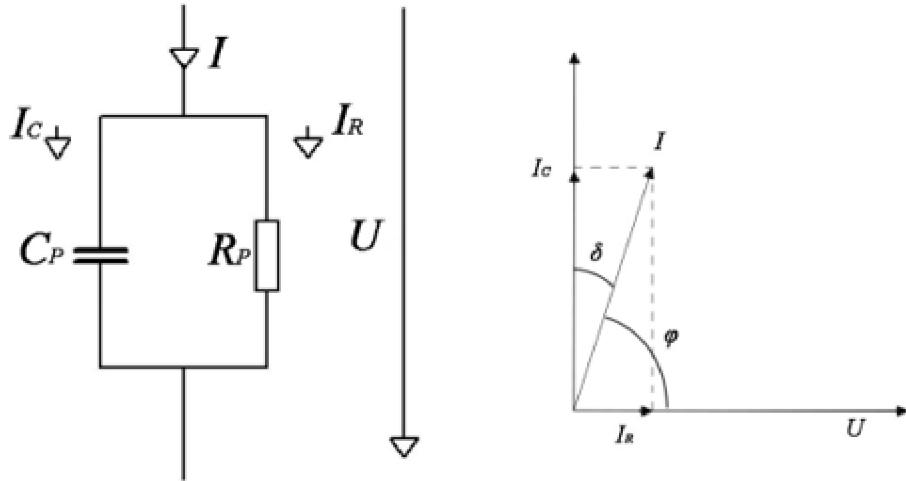
Ionizační ztráty se vyskytují u plyných látek, nebo u pevných látek obsahujících plynové vměstky. Vznikají při překročení prahu ionizace určitého plynu.

Velikost dielektrických ztrát je vyjádřena ztrátovým úhlem δ , ztrátovým činitelem $\text{tg } \delta$, ztrátovým číslem ϵ'' a měrnými dielektrickými ztrátami.

Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ se dá vypočíst nahrazením ztrátového dielektrika ekvivalentním sériovým, nebo paralelním zapojením rezistoru a kondenzátoru.

Potom ztrátový činitel vypočteme podle vztahů:
pro dvouprvkové paralelní náhradní zapojení:

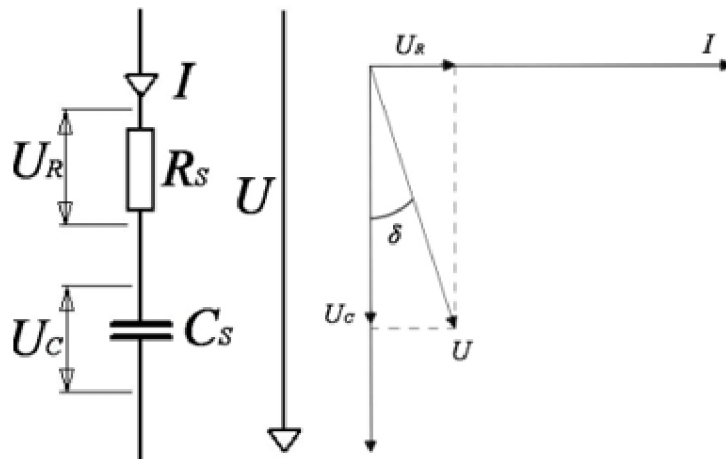
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega R_p C_p}, \quad (2.2)$$



Obr. 2-3 Náhradní dvouprvkové paralelní zapojení

pro dvouprvkové sériové zapojení:

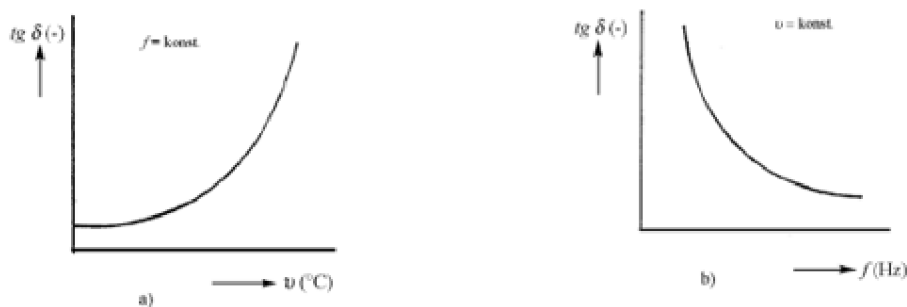
$$\operatorname{tg} \delta = \omega R_s C_s, \quad (2.3)$$



Obr. 2-4 Náhradní dvouprvkové sériové zapojení

kde ω je úhlová rychlost, R_p je paralelní rezistor, R_s je sériový rezistor, C_p je paralelní kapacitor a C_s je sériový kapacitor.

U dielektrika je ztrátový činitel ovlivněn teplotou a kmitočtem elektrického pole, jak je vidět na obrázku 2-5. [6][5]



Obr. 2-5 a) Teplotní b) Kmitočtová závislost ztrátového činitele nepolárního dielektrika [6]

2.5. Průraz izolantů

Pokud je izolant namáhán vystavením elektrickému poli s intenzitou přesahující kritickou hodnotu vzniká výboj. Výboj je náhlý jev, při kterém vznikne dokonale vodivá cesta v izolantu. Se vznikem výboje klesá napětí a roste proud. Výboj tuhé izolační látky trvale poškodí a zhorší jejich izolační vlastnosti, zatímco u plyných a kapalných izolantů se izolační vlastnosti zhorší pouze dočasně. Napětí potřebné pro vznik výboje mezi dvěma vodivými částmi je průrazné napětí.

Intenzita elektrického pole je vyjádřena jako:

$$E = \frac{U}{d}, \quad (2.4)$$

kde U je napětí a d je tloušťka izolantu.

Pokud se jedná o dva izolační materiály, které se nacházejí ve stejném elektrickém poli a jsou vrstvené v sérii. Intenzita elektrického pole působící na jednotlivé materiály je v poměru daném jejich permitivitou:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}, \quad (2.5)$$

kde E je intenzita elektrického pole a ε je permitivita materiálu.

Průraz může být čistě elektrický, nebo tepelný. Při čistě elektrickém průrazu vznikne nárazová ionizace, při které dojde k porušení krystalické mřížky izolantu za působení intenzivního elektrického pole. Pokud v izolantu vzniká teplo způsobené vnějším elektrickým polem, zvyšuje se v něm počet volných nosičů, což může způsobit tepelný průraz.

U plyných izolantů vzniká čistě elektrický průraz. Elektrická pevnost je ovlivněna tlakem plynu, vzdáleností elektrod a kmitočtem elektrického pole. Při nízkém tlaku plynu (1 – 100 Pa) vzniká doutnavý výboj, při kterém zůstávají elektrody studené, plyn září

a proud je velmi malý. Při tlaku okolo 0,1 MPa se jedná o obloukový výboj. Obloukový výboj jasně září a má velkou proudovou hustotu s malým napětím.

Průraz tuhých izolantů může být čistě elektrický, což znamená, že průraz proběhne za (10^{-7} až 10^{-8} s) a místo průrazu dosahuje průměru řádově 0,01 mm bez opálení jeho okolí. Nebo může být tepelný. Tento průraz trvá několik sekund až několik minut. Za tuto dobu se okolí místa průrazu zahřeje, zuhelnatí a popraská. Vznik tepelného průrazu je způsoben porušením tepelně elektrické rovnováhy izolantu, tato rovnováha je porušena růstem dielektrických ztrát spolu s teplotou.

Elektrická pevnost izolantů se odvíjí od teploty, tloušťky, druhu elektrického pole, frekvence elektrického pole, doby působení elektrického pole a je také ovlivněna částečnými výboji, které vznikají v dutinách dielektrika. Elektrická pevnost klesá s rostoucí dobou působení elektrického pole, teploty, vlhkosti, oxidace, mechanického namáhání, nebo částečných výbojů a podobně. [6]

3. VINUTÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ

Elektrické stroje jsou založeny na principu interakce magnetických polí a proudů tekoucích vinutími. Konstrukce a zapojení vinutí definují společně s jejich napájecími proudy a napětími typ a pracovní režim elektrického stroje.

Rozdělení vinutí podle funkce:

- vinutí kotvy,
- statorové vinutí,
- magnetizační vinutí,
- tlumící vinutí,
- komutační vinutí,
- kompenzační vinutí.

3.1. Statorová vinutí

Statorová vinutí jsou vinutí, která vytváří točivé magnetické pole. Počet fází může být libovolný nejčastěji jsou voleny tři fáze kvůli třífázovému napájení, nebo dvě fáze tam, kde je dostupné pouze jednofázové napájení, přičemž je využito kondenzátoru připojeného na pomocné vinutí. Dvě fáze jsou minimální požadavek pro vytvoření točivého pole.

U statorového vinutí je důležitým parametrem činitel plnění drážky, který udává procentuální využití prostoru v drážce vodiči. Pro snížení ztrát na odporu vodiče je nejvýhodnější, když je činitel plnění drážky co největší, čehož je obtížné docílit, protože izolace vodičů a drážková izolace potřebná pro zajištění dostatečných parametrů ve výsledku může vyplňovat až polovinu prostoru v drážce.

Na vlastnosti statorového vinutí má také vliv čelo vinutí, což je ta část vinutí, která přesahuje ven z drážky neboli z čela jádra statoru. Čela vinutí jsou nutná pro uzavření elektrického okruhu, ale snahou je zkracovat jejich délku kvůli úspoře materiálu, ale také pro zvýšení účinnosti snížením ztrát na odporu vodiče. [1]

U strojů na nižší napětí než 1000 V se obvykle využívá prošivané, nebo vsypávané vinutí tvořené vodiči o kruhovém průřezu. U strojů na vyšší napětí je často použito šablonové vinutí s obdélníkovými vodiči. Izolace vodičů pro vsypávané vinutí musí být schopna odolat velikosti napětí mezi začátkem a koncem každé cívky, jelikož se díky této

metodě tyto dva vodiče mohou setkat. Také proto je tato metoda navíjení využívána u strojů na nižší napětí, než 1000 V.

3.2. Izolace vsypávaných vinutí

Izolace vinutí musí odvádět teplo přímo z vodičů, kterými teče proud, a tak na nich vznikají Joulovy ztráty. Vodiče vinutí, obvykle měděné či méně často hliníkové jsou navzájem izolovány lakem naneseným na jejich povrch. Lak dosahuje tloušťky od 0,05 do 0,1 mm a je obvykle tvořen polymerem, či polyesterem s polymerovým povrchem. Tyto izolační materiály jsou nanášeny po vrstvách, které jsou tepelně zpracovány ve speciálních pecích. Kvůli značnému zahřívání je u těchto typů izolací dbáno na dobré tepelné vlastnosti jako tepelná vodivost a odolnost vůči teplotnímu namáhání. Také je třeba, aby měly dobrou mechanickou pevnost při zachování ohebnosti a aby byly odolné vůči chemickým vlivům. [1]

Izolace jsou mimo jiné rozděleny podle tepelných tříd, které určují jejich horní mezní teplotu používání. Při překročení této teploty vzniká nevratné poškození izolace. Tepelné třídy jsou uvedeny v tabulce 3-1 Tab. 3-1 Tabulka tepelných tříd izolace [13].

Tab. 3-1 Tabulka tepelných tříd izolace [13]

Rozsah teplot pro nepřetržité použití [°C]		Tepelná třída [°C]
≥ 90	< 105	90 (Y)
≥ 105	< 120	105 (A)
≥ 120	< 130	120 (E)
≥ 130	< 155	130 (B)
≥ 155	< 180	155 (F)
≥ 180	< 200	180 (H)
≥ 200	< 220	200 (N)
≥ 220	< 250	220 (R)
≥ 250	< 275	250 (-)

3.3. Drážková a mezifázová izolace

Drážková izolace je izolace nejčastěji v podobě izolačního papíru, nebo termoplastu o tloušťce 0,1 – 0,75 mm a je vložena do drážek před vinutím. Primárně slouží k elektrické izolaci vinutí od jádra. Další funkcí drážkové izolace jsou ochrana vinutí před

mechanickým poškozením o jádro vlivem vibrací působících i při běžném provozu, nebo při navíjení.

U nižších tepelných tříd se z pravidla používá jedna vrstva drážkové izolace. U vyšších tříd je možné izolace vrstvit. Drážková izolace přesahuje svou délkou délku statorového svazku, jelikož na koncích drážek vzniká největší intenzita elektrického pole, která zapříčiňuje svodové proudy.

V případě, že se do drážky ukládá více vinutí je mezi tyto vinutí vložena mezifázová izolace. Toto opatření se provádí z toho důvodu, že rozdíl potenciálů mezi cívkami může nabývat až špičkové hodnoty sdruženého napětí. Mezifázová izolace se aplikuje také v čelech vinutí, kde je mezi cívky vložena izolační tkanina.

Tab. 3-2 Tabulka izolačních materiálů pro drážkovou a mezifázovou izolaci

Název	Typ	tloušťka d [mm]	elektrická pevnost při 60 Hz E_p [KV/mm]	relativní permitivita při 60 Hz ϵ_r	ztrátový činitel při 60 Hz $\tan \delta$	Tepelná třída / počet vrstev
Nomex® T410 [15]	Kalandrovaný aramidový papír	0,25	63	2,7	$6 \cdot 10^{-3}$	H / 1
Nomex® T411 [16]	Nekalandrovaný aramidový papír	0,25	18	1,2	$3 \cdot 10^{-3}$	H / 3
Nomex® T418 [17]	Kalandrovaný aramidový papír s příměsí slídového papíru	0,25	18	1,2	$3 \cdot 10^{-3}$	H / 3
Kapton® HN [18]	Polyimidová fólie	$127 \cdot 10^{-3}$	118	3,5 *	$3,6 \cdot 10^{-3}$ *	C / 1
Myoflex® PV1 [19]	Polyesterová fólie / polyesterová rohož	0,4	22			F / 2
Myoflex® 2NK50 [19]	Nomex® 50 μm / polyesterová fólie / Nomex® 50 μm	0,43	15			R / 3
Myoflex® 2N80 [19]	Nomex® 80 μm / polyesterová fólie / Nomex® 80 μm	0,53	30			F / 3

Poznámka: parametry s "*" jsou udány při 1 kHz

3.4. Zalévání statoru

Zalévání statoru zalévací hmotou slouží primárně k zajištění mechanického upevnění vinutí, ochraně proti vnějším vlivům a lepšímu odvodu tepla z vinutí. K zalévání se používá vhodný epoxid, nebo polyuretan. Zalévací hmota se před zaléváním míchá s tvrdidlem, které je uchováváno odděleně.

Zaliti může být částečné, nebo celkové. Při částečném se zalévají čela vinutí, aby byly lépe upevněny ke statoru a zvýšila se tak jejich odolnost proti vibracím a odvodu tepla. Celkové zalévání znamená zaliti celého statoru.

Požadavky na zalévací hmoty jsou tedy dobrá tepelná vodivost, mechanická pevnost, elektrická pevnost a odolnost proti teplotě a chemikáliím.

Při zalévání statoru se stator nejdříve zahřeje v peci, aby se odstranila vlhkost a nečistoty. Poté se zahřeje zalévací hmota, která se smíchá s tvrdidlem na správnou teplotu,

aby se zvýšila její tekutost. Čím je zalévací hmota tekutější tím rychlejší je proces zalévání. Do statoru je vložena forma, která vymezuje prostor pro zalévání. Zalévací hmota je aplikována ze spodní strany statoru, aby se omezil vznik vzduchových bublin. Potom je stator vložen do pece, kde je zalévací hmota vytvrzena při teplotě nastavené tak, aby se omezilo zmenšení objemu hmoty a maximalizovala výsledná mechanická pevnost.

3.5. Impregnace

Většina vsypávaných vinutí je impregnována, nebo zakapávána, aby bylo vinutí ochráněno před nečistotami a vlhkostí, pro zlepšení přenosu tepla a pro upevnění vinutí v drážce tak, aby se zamezilo erozi vlivem vibrací. Vsypávaná vypnutí napájená pomocí pulzně-šířkové modulace musí být impregnována pro eliminaci trhlin, které by vedly k částečným výbojům.

Impregnace nízkonapěťových strojů se provádí tak, že se vinutí očistí, vysuší a zahřeje na určitou teplotu a při otáčení se zakapává pryskyřicí, nebo se celé ponoří do laku. Vinutí se ponechá ponořené, aby se lak rozprostřel, čemuž napomáhá zahřátí vinutí, které způsobí snížení viskozity laku. Poté se vinutí vytáhne a přebytečný lak se nechá odkapat. Nakonec se vinutí umístí do pece, kde se impregnace nechá vytvrdit. Tato metoda je levná a snadno proveditelná. [7]

Hlavně pro impregnaci vysokonapěťových strojů se využívá vakuové metody neboli VPI (Vacuum pressure impregnation). Proces probíhá tak, že se vinutí umístí do komory, ve které se vytvoří prostředí s velmi nízkým tlakem okolo jednoho milibaru. Komora se naplní pryskyřicí předehřátou na 70 °C tak, aby vinutí bylo kompletně ponořeno. Po určité době, která je určena vinutím a jeho výsledným použitím se vinutí vyjme z vakuové komory a umístí se do pece, kde následně probíhá vytvrzování. Tato metoda impregnace se využívá pro svou schopnost impregnovat tenké vodiče, nebo z důvodu vyšší kvality, než u metod zakapávání pryskyřicí a ponoření do laku. [2]

3.6. Poruchy vinutí a jeho izolace

Poruchy vinutí jsou nejčastější poruchy statoru. Poruchou vinutí může dojít k jeho rozpojení, nebo ke zkratu.

Poruchy vinutí elektrického stroje mohou vznikat už při jeho výrobě, nebo postupnou degradací materiálů v čase. Poruchy při výrobě mohou vznikat odchylkami od daného

výrobního procesu, nebo vadami v materiálech. Poruchám se dá předcházet kontrolou parametrů vinutí a jeho izolace začleněnou do výrobního procesu, nebo diagnostikou zařízení v provozu.

Mezi možné příčiny poruch patří například:

- vibrace čel vinutí, které způsobí prasknutí vodičů,
- synchronizace mimo fázi, při které působí velká síla na vinutí, což může zapříčinit jeho prasknutí či ulomení ve spojích,
- vadné pájené, nebo svařované spoje způsobují jejich lokální ohřev a oxidaci,
- velké odstředivé síly mohou způsobit praskání vinutí rotoru,
- mezi-závitové zkraty, které způsobují zvýšení proudu a ohřev vodičů,
- nesymetrické vinutí, která způsobuje vyšší teplotu, nebo vibrace.

Vzniklá porucha často nevede přímo ke zničení stroje, ale způsobuje nežádoucí vlivy na jeho součásti. Například lokální zvýšení teploty kvůli mezi-závitovému zkratu, které má za následek rychlejší degradaci izolací vinutí, drážek a mezi fázemi. Tento zkrat potom může vést ke vzniku zkratu mezi cívkami jedné fáze, mezi fázemi, nebo zkratu na kostru. K poruše tak dochází dříve, než izolační systém dojde ke konci své předpokládané životnosti.

3.6.1 Tepelné stárnutí

K degradaci materiálu vede například tepelné stárnutí. Tepelné stárnutí je asi nejčastějším důvodem poruchy vinutí u vinutí chlazených vzduchem. Na vinutí působí vysoká teplota a výsledkem je potom křehčí izolace s menší mechanickou pevností a horší schopnost držet vrstvy pohromadě. Izolace tedy může praskat, když na ni působí pohyb vodičů vinutí v magnetickém poli při rozběhu, nebo i normálním provozu. Při poruše izolace může nastat mezi-závitový zkrat v jehož místě narůstá teplota zahřívající vodič, nebo izolaci, což eventuálně vede ke spojení se zemí. Vlivy tepelného stárnutí lze snížit provozováním stroje při nižších teplotách, než je tepelná třída izolace, nebo volbou vyšší tepelné třídy izolace.

Poškození tepelným stárnutím je nevratné (pokud neuvažujeme převinutí), proto by mělo být zavedeno měření teploty, zvláště pokud je stroj provozován při teplotách blízkých tepelné třídě izolace.

Mezi možné opravy patří:

- čištění pro lepší odvod vznikajícího tepla,
- opětovné zakapání, nebo impregnace,
- rozdíl napětí mezi fázemi do 1 %,
- instalace ochrany proti častému spouštění a
- menší dovolené zatížení.

3.6.2 Vady impregnace

Pokud jsou v impregnaci vady, vinutí je náchylnější k poruše způsobené nečistotami, olejem a vlhkostí, které mohou být částečně vodivé. Vadná impregnace může mít za následek nedostatečnou soudržnost vodičů navzájem a vodičů s jádrem, takže magnetické síly o dvojnásobné frekvenci napájení mohou způsobovat vibrace vodičů. Pro předejití poruch je možné provést testy částečných výbojů, které dokáží zjistit malé trhliny v izolaci.

3.6.3 Nesymetrie vinutí

Nesymetrie je výchylka velikosti, nebo fáze napětí od ideálního sinusového průběhu. Nesymetrie vinutí vzniká při rozdílných parametrech vinutí mezi různými fázemi, nebo mezi paralelními větvemi. Způsobena tedy může být například mezi-závitovými zkraty, nebo rozdílnou tenzí při navíjení.

Jednotlivá sdružená napětí se typicky liší v řádu voltů, ale nesymetrie, která přesahuje 2 % jmenovitého napětí už může stroj poškodit. S nesymetrií napětí vzniká nesymetrie proudů. Pokud je zvýšený proud alespoň v jedné fázi tato fáze se více zahřívá což má negativní účinky na její izolaci.

Mezi následky nesymetrie patří zhoršení účinnosti, vyšší teplota, nebo vznik vibrací.

Nesymetrie se dá zjistit buďto měřením odporů jednotlivých cívek, nebo měřením jejich indukčností, přičemž tyto metody se navzájem nevylučují.

4. METODIKA KOORDINACE A ZKOUŠENÍ IZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ

Tato kapitola je věnována návrhu izolačního systému strojů na malá a nízká napětí a začlenění jeho testování do výrobního procesu. Při koordinaci je proveden výběr vlastností izolace suvážením takových namáhání, která budou na zařízení pravděpodobně působit.

4.1. Návrh izolačního systému

Při koordinaci izolace se volí vlastnosti elektrické izolace podle použití a jejího okolí.

Izolace se vybírá na základě těchto vlivů:

- stupeň znečištění,
- kategorie přepětí,
- systém uzemnění napájení,
- izolační napětí,
- umístění izolace,
- typ izolace.

Pokud je v zařízení pro izolaci mezi živými částmi a přístupnými povrchy navržena dvojitá, nebo zesílená izolace, pak návrh splňuje třídu ochrany II. Musí také platit, že zařízení nemá prostředky pro připojení ochranného zemního vodiče.

U třídy ochrany 0 je ochrana před elektrickým proudem zajištěna pouze základní izolací. Třída ochrany I má ochranný vodič připojený k neživým částem a ochrana je zajištěna automatickým odpojením od zdroje. Třída ochrany III využívá malého bezpečného napětí SELV.

4.1.1 Stupeň znečištění

Znečištění prostředí má nepříznivé účinky zejména na izolace vzdušnými vzdálenostmi a povrchovými cestami. Jsou definovány čtyři stupně znečištění. Normální pohony se navrhují z hlediska bezpečnosti na stupeň 3 ve kterém se vyskytuje vodivé znečištění, nebo suché znečištění, které může být vodivé vlivem kondenzace. Potom jsou použitelné v prostředích o stupni znečištění 1, 2 a 3.

4.1.2 Kategorie přepětí

Pracovní izolace, která není výrazně ovlivněna vnějšími přechodnými jevy se navrhuje podle pracovního napětí. Pokud je výrazně ovlivněna navrhuje se podle impulzního napětí přepětí kat. II a pokud je systém pohonu připojen na začátku instalace navrhuje se podle kat. III. Jmenovité impulzní napětí se vybírá na základě jmenovitého napětí zařízení a kategorie přepětí podle normy ČSN EN 60664-1 ed.2. Izolaci je možné navrhnout pro nižší kategorii přepětí v případě opatření pro zmenšení přechodných napětí.

4.1.3 Vzdušné vzdálenosti

K tomu, aby byla zajištěna funkčnost základní či doplňkové izolace je třeba dodržet minimální vzdušné vzdálenosti dané normou ČSN EN 60664-1 ed.2. Pokud je uvažováno použití v nadmořské výšce převyšující 2000 m musí se započítat korekce podle Paschenova zákona.

Vzdušná vzdálenost je dimenzována podle:

- impulzního výdržného napětí,
- ustáleného výdržného napětí,
- dočasného přepětí,
- periodického špičkového napětí,
- podmínek elektrického pole,
- nadmořské výšky,
- stupně znečištění.

Vzdušné vzdálenosti u stroje se zesílenou izolací se volí jako vzdálenosti pro impulzní napětí o jednu tabulkovou hodnotu vyšší než pro základní izolaci, nebo pro 1,6násobek impulzního výdržného napětí, pokud je impulzní výdržné napětí pro základní izolaci jiné než hodnota z tabulkových řad.

Pokud jsou vzdušné vzdálenosti stejné, nebo větší, než udává norma pro nehomogenní pole je možné je ověřit měřením či napěťovou zkouškou.

Pokud jsou menší, než dané hodnoty je nutné je ověřit napěťovou zkouškou. Při zkoušce musí být zkušební napětí voleno podle požadavků na výdržné napětí. Vzdušné vzdálenosti se ověřují zkouškou impulzním napětím 1,2/50 μ s. Pokud jsou vzdušné

vzdálenosti dimenzovány proti ustáleným napětím, dočasným přepětím, nebo špičkovým napětím je potřeba provést zkoušku střídavým napětím.

4.1.4 Povrchové cesty

Délka povrchových cest je důležitá z hlediska vlivu dlouhodobé degradace povrchu izolantu. Minimální povrchové vzdálenosti jsou dány normou ČSN EN 60664-1 ed.2.

Povrchové cesty jsou ovlivněny napětím, mikroprostředím, orientací, umístěním, tvarem povrchu, izolačním materiálem a dobou namáhání napětím.

Jako napětí se uvažuje efektivní hodnota, která na izolaci působí dlouhodobě a v potaz se berou i dočasná funkční přepětí. Povrch je možné tvarovat, což je účinné pouze pro třetí stupeň znečištění.

Při použití zesílené izolace jsou minimální povrchové vzdálenosti dvojnásobné a při použití dvojité izolace jsou dány součtem hodnot pro základní a přídavnou izolaci.

Pokud je minimální povrchová vzdálenost menší, než minimální vzdušná vzdálenost je nutné povrchovou vzdálenost navýšit na vzdušnou vzdálenost. [22][23]

4.1.5 Vzdušné a povrchové cesty testovaných vzorků

Vzdušné vzdálenosti pro testované statory na střídavé napětí 35 V byly určeny podle normy ČSN EN 60664-1 ed.2. Byla uvažována kategorie přepětí I, jelikož stroj nebude výrazně ovlivněn vnějšími přechodnými jevy. Hodnota minimální vzdušné vzdálenosti je 0,2 mm jak pro homogenní, tak pro nehomogenní pole při uvážení zesílené izolace a stupně znečištění 2.

Minimální hodnota povrchových cest pro testované statory je dána normou ČSN EN 60664-1 ed.2. Pro stupeň znečištění 2 a materiálovou skupinu izolace IIIa je 0,75 mm.

4.1.6 Požadavky na pevnou izolaci

Při návrhu izolačního systému stroje na nízké napětí se návrhu pevné izolace může věnovat menší pozornost než návrhu vzdušných vzdáleností. To je dáno tím, že pevné izolace mají výrazně vyšší elektrickou pevnost než vzduch. Na pevnou izolaci však působí velké elektrické namáhání díky její malé tloušťce.

V pevných izolacích se mohou vyskytovat dutiny ať už mezi elektrodou a izolací, nebo mezi vrstvami izolace. V těchto dutinách mohou vznikat částečné výboje, a to i při

napětích nižších, než je průrazné napětí. Částečné výboje mají negativní vliv na životnost pevné izolace. Je třeba jim věnovat pozornost, pokud je pracovní napětí nesinusové s periodicky se opakujícími špičkami, nebo u lité izolace či při výskytu izolačních vrstev. Výskyt částečných výbojů je ovšem nepravděpodobný pro špičkové hodnoty napětí menší, než 500 V.

Pokud je izolace namáhána vysokými kmitočty zdůrazní se vliv dielektrických ztrát a částečných výbojů. Není však možno vypočítat požadovanou tloušťku pevné izolace a je třeba ji ověřit pouze zkoušením. Tímto namáháním se blíže zabývá norma ČSN EN 60664-4.

Základní, přídatná a zesílená izolace musí trvale vydržet působení elektrického, mechanického, tepelného namáhání a vlivů prostředí, které se mohou vyskytnout v průběhu používání.

Pokud je použita zesílená izolace musí odolat přechodnému napětí o velikosti impulzního napětí o jeden stupeň upřednostňovaných hodnot větší, než je daná pro izolaci základní, nebo musí odolat napětí 1,6krát většímu než izolace základní.

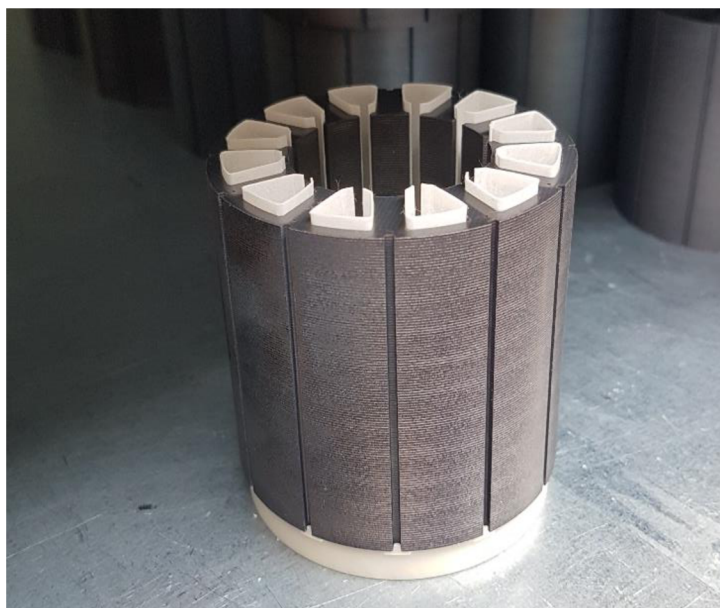
Základní a přídatná izolace musí vydržet dočasná přepětí $U_n + 1200$ V po dobu 5 s a $U_n + 250$ V po dobu delší než 5 s. Zesílená izolace musí odolat dvojnásobku napětí než základní.

Zda pevná izolace vydrží napěťové namáhání musí být vždy ověřeno zkouškou. Odolnost proti přechodným přepětím je hodnocena zkouškou impulzním napětím, nebo vysokonapěťovou střídavou zkouškou. [22]

4.2. Výrobní proces

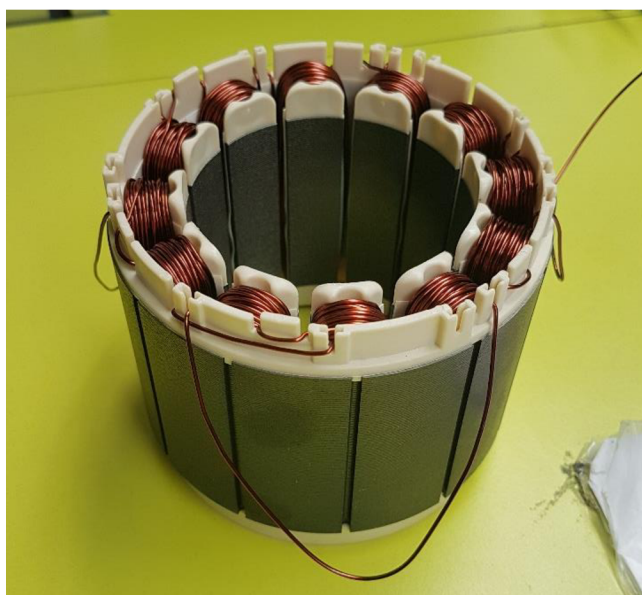
Zde je popsán výrobní proces synchronního motoru s permanentními magnety a zalitým statorem na malé či nízké napětí.

Na začátku výrobního procesu se do připraveného statorového svazku vloží drážková izolace a na čela se připevní izolační kruhy.



Obr. 4-1 Statorový svazek s drážkovou izolací a izolačním kruhem

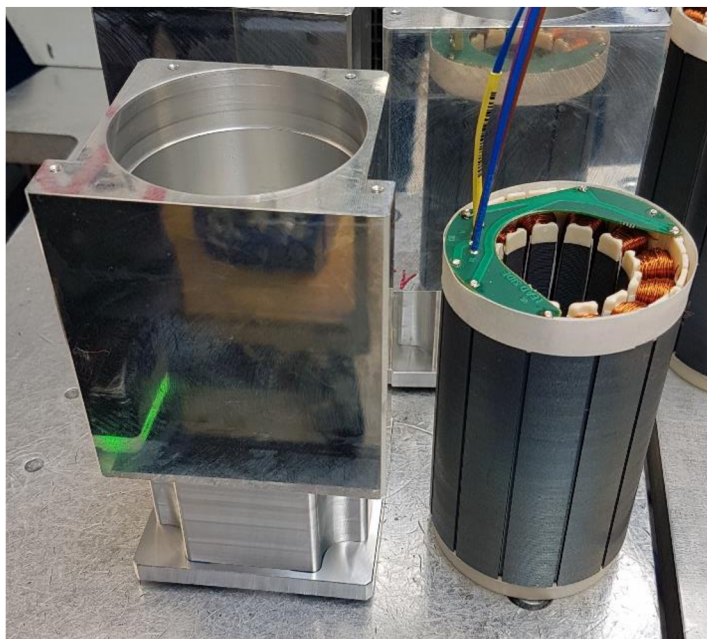
Poté je vinutí navinuto navíječkou pomocí příslušného programu a nástavce daného typem a rozměry statoru. Při navíjení je důležité dodržovat správnou tenzi vodičů.



Obr. 4-2 Statorový svazek s navinutým vinutím

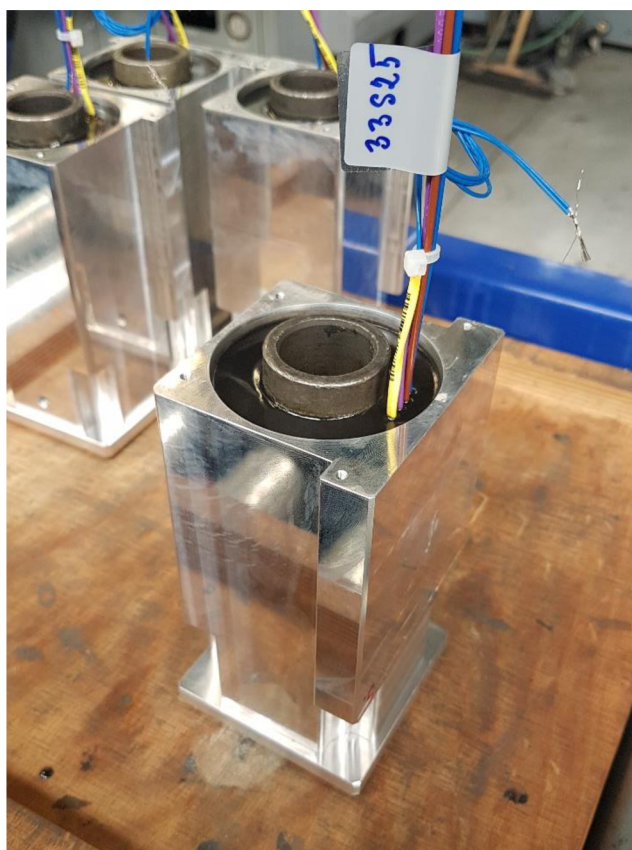
Po navinutí se cívky zapojí na desku plošných spojů, která obsahuje výstupní kontakty a přes obvod izolačních kruhů je navlečen izolační aramidový papír pro izolaci proti kostře motoru.

V této fázi je vhodné na statoru provést zkoušky, protože po zalití statoru již případné vady nelze opravit. Zkoušky jsou velice důležité a provádějí se za účelem ověření, zda jednotlivé součásti statoru neobsahují výrobní vady, či nebyly nějak poškozeny.



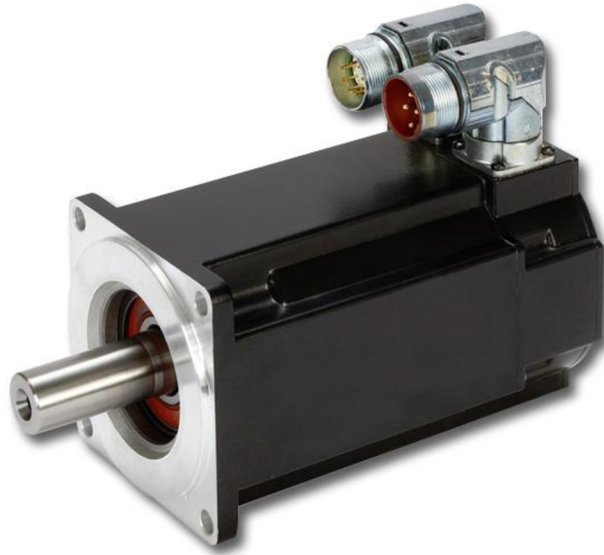
Obr. 4-3 Statorový svazek připravený pro vložení do kostry statoru

Takto připravený statorový svazek se vkládá do statorové kostry. Kostra statoru je před vložení předehřáta indukčním ohřevem, aby se materiál roztáhnul a zvětšil se vnitřní průměr a bylo tak možné do ní statorový svazek vložit.



Obr. 4-4 Stator zalitý zalévací hmotou

Po vložení statorového svazku do kostry statoru je na místo rotoru vložena šablona a vinutí je zalito zalévací hmotou. Pro vytvrzení zalévací hmoty stator prochází pecí. Šablona je poté vyjmuta a jsou zahlazeny ostré hrany, které vznikají na vytvrzené zalévací hmotě. Následuje kompletace stroje, která obsahuje nasazení čel, vložení rotoru a vyvedení příslušných vývodů do konektoru.



Obr. 4-5 kompletní motor [24]

Na takto zkompletovaném stroji je opět vhodné provést zkoušky. Není však možné měřit indukčnosti vinutí a jejich symetrii, protože by na měření měl vliv rotor s permanentními magnety a jeho natočení.

5. DETEKCE PORUCH VINUTÍ A IZOLACE

Tato kapitola se zabývá metodami, které mají za úkol zjišťovat různé poruchy izolace a vinutí na základě jejich příznaků. Pokud se zkoušky začlení do výrobního procesu, lze již v průběhu výroby identifikovat vadné kusy, které nepodléhají tolerančním odchylkám a je tedy možné vady opravit.

5.1. Stejnoseměrná vysokonapěťová zkouška

Vysokonapěťová zkouška je zkouška, při které se na statorové vinutí přivede stejnosměrné napětí o hodnotě výrazně převyšující špičkovou hodnotu střídavého napětí při normálním provozu. Pokud izolace neselže při vysokém napětí je nepravděpodobné, že selže v blízké budoucnosti kvůli stárnutí při běžné provozu. Pokud izolace selže při tomto testu je nutná oprava, nebo převinutí, jelikož byla proražena izolace. Statorová vinutí musejí projít vysokonapěťovou zkouškou po jejich vyrobení. Alternativou pro tuto zkoušku je střídavá vysokonapěťová zkouška, která se nejčastěji provádí na šablonových vinutích.

Zkouška se provádí proto, aby byly zjištěny výrazné nedostatky izolací před tím, než je zařízení uvedeno do provozu, nebo je v provozu. Pokud je tedy izolace v některém místě slabá vysoké napětí přivedené na vinutí způsobí průraz v tomto místě. Jelikož může být zkouška destruktivní často se neprovádí při údržbě strojů, které již jsou v provozu. Neprovádí se z toho důvodu, že by mohla způsobit poruchu, která by se při normálním provozu ještě dlouho neprojevila, a tak nejsou prováděny složité opravy dříve, než je to nutné. V některých případech však porucha může způsobit velké škody, a tak je výhodnější vysokonapěťovou zkoušku provést.

Před provedením stejnosměrné vysokonapěťové zkoušky je doporučeno změřit izolační odpor a polarizační index. Tímto měřením se totiž mohou zjistit nečistoty a vlhkost vinutí. Vinutí se potom musí vysušit nebo vyčistit, než se přejde k vysokonapěťové zkoušce. Pokud by se vysokonapěťová zkouška provedla na znečištěném, nebo vlhkém vinutí mohlo by zbytečně dojít k průrazu izolace.

Při měření se uzemňují všechny detektory teploty vinutí a napětí se přivádí na každou fázi zvlášť, přičemž ostatní dvě fáze jsou uzemněny. To zajišťuje namáhání čel vinutí elektrickým polem, takže je pravděpodobnější, že se projeví vady izolace v čelech. U

strojů, kde není možné testovat jednotlivé fáze zvlášť se napětí přivede na všechny tři zároveň. V tom případě v čelech vinutí nevzniká rozdílný potenciál a vady čel vinutí vzdálené od jádra tak nejsou zjištěny.

Na rozdíl od vysokonapěťové zkoušky střídavým napětím u této zkoušky nedochází k degradaci izolace částečnými výboji. Pokud tedy vinutí obstojí při této zkoušce vlastnosti izolace se nezhorší.

Při měření se na vinutí připojí vhodný stejnosměrný zdroj. Napětí zdroje je rychle navýšeno na hladinu testovacího napětí a poté udržováno 1, nebo 5 minut. Po uplynutí této doby je napětí sníženo a vinutí uzemněno. Zkouškou se ve výsledku zjistí, jestli je vinutí v pořádku, nebo není. To poznáme podle toho, zda vybaví jistič zdroje napětí. Pokud vybaví znamená to, že vznikl velký nárůst proudu kvůli přeskoku, nebo průrazu a vinutí selhalo. Pokud nevybaví vinutí obstálo v této zkoušce.

Pro rozšíření této zkoušky můžeme při přiloženém napětí měřit procházející proud. Pokud se proud zvyšuje s roky používání stroje znamená to, že se snižuje polarizační index a vinutí je více znečištěné, nebo vlhké. [1]

5.2. Střídavá vysokonapěťová zkouška (zkouška přiloženým napětím)

Střídavá vysokonapěťová zkouška je podobná stejnosměrné vysokonapěťové zkoušce. Při střídavé vysokonapěťové zkoušce je však zařízení testováno napětím o frekvenci sítě 50 Hz. Touto zkouškou se zabývá norma ČSN EN 61180-1. Jedná se o zkoušku, u které testované zařízení buďto vyhoví, nebo selže podobně jako u stejnosměrné vysokonapěťové zkoušky.

Rozdíl oproti stejnosměrné zkoušce je ten, že při střídavém napětí je jinak rozloženo namáhání v tloušťce izolace vůči zemi. To je dáno tím, že při stejnosměrném napětí je úbytek napětí na izolaci dán odporem izolace. Kdežto u střídavého napětí je úbytek ovlivněn kapacitou, tudíž relativní permitivitou izolace a rozložení namáhání izolace v její tloušťce je stejné jako při běžném provozu. Je tedy možné, že některé poruchy, které způsobí průraz u střídavé zkoušky by stejnosměrnou zkouškou nebyly zjištěny. Z tohoto důvodu je při střídavé zkoušce využíváno nižšího testovacího napětí než při zkoušce stejnosměrné.

Nevýhodou je však degradace izolace, kterou způsobuje tato zkouška. Při vysokém napětí totiž v izolaci vznikají částečné výboje a tím se zkracuje její doba života. Tento negativní vliv však není natolik kritický, aby významně ovlivnil životnost stroje. [1]

Frekvence zkušebního napětí musí být v mezích 45 Hz až 65 Hz a tvar napětí se musí blížit sinusovému průběhu to znamená, že poměr vrcholové hodnoty ku efektivní musí být roven $\sqrt{2} \pm 5\%$. Velikost měřeného zkušebního napětí se musí lišit od předepsaného maximálně o $\pm 3\%$ při zkouškách o délce trvání 60 s a déle. Při zkouškách o délce trvání do 60 s musí být napětí udržováno v toleranci $\pm 1\%$. Při provádění typových zkoušek musí být efektivní hodnota očekávaného zkratového proud nejméně 0,1 A. [20][21]

Při provádění střídavé vysokonapěťové zkoušky se zkušební napětí zvyšuje z hodnoty menší, než je polovina plného zkušebního napětí na plnou hodnotu buďto plynule, nebo po stupních menších než 5 % plné hodnoty. Napětí musí být zvyšováno po dobu nejméně 10 s. Při plném napětí nesmí dojít k poruše během jedné minuty. Zkušební napětí je podle normy ČSN EN 60034-1 ed.2 pro vinutí o jmenovitém výkonu menším než 1 kW a jmenovitém napětí menším než 100 V 500 V + dvojnásobek jmenovitého napětí. A pro vinutí o jmenovitém výkonu menším než 10 000 kW 1000 V + dvojnásobek jmenovitého napětí (minimálně 1500 V).

Při kusových zkouškách hromadně vyráběných strojů, které mají jmenovité napětí pod 1 kV a jmenovitý výkon do 200 kW je možné nahradit minutovou zkoušku zkouškou o délce 1 s. V tomto případě se použije zkušební napětí o hodnotě o 20 % vyšší, než je hodnota zkušebního napětí daná normou. Při opakování zkoušky se použije 80 % zkušebního napětí.

Pokud se provádí zkouška na stejnosměrných motorech napájených měničem pro určení zkušebního napětí se použije buďto jmenovité stejnosměrné napětí motoru, nebo efektivní hodnota sdruženého napětí na vstupních svorkách statického výkonového měniče. Vždy se použije hodnota vyšší. [1]

5.3. Izolační odpor a polarizační index

Měření izolačního odporu a polarizačního indexu je asi nejrozšířenější diagnostickou metodou pro testování vinutí točivých strojů. Izolační odpor je dán typem izolace a jejím stavem, který se časem zhoršuje tím rychleji, čím více na izolaci působí nežádoucí vlivy.

Obecně izolační odpor roste s tloušťkou izolace a klesá s povrchem izolovaného vodiče. Měření izolačního odporu a polarizačního indexu vychází z normy ČSN EN IEC 60034-27-4.

Izolační odpor se měří mezi vodičem a jádrem statoru, nebo rotoru. V ideálním případě je odpor nekonečný. Čím nižší je odpor, tím větší je pravděpodobnost výskytu poruchy. Izolační odpor a polarizační index se obvykle měří současně stejným měřicím přístrojem.

Izolační systém statorového vinutí je složen z několika rozhraní mezi jednotlivými materiály. To způsobuje, že je proces vedení elektřiny ovlivňován polarizačními mechanizmy rozhraní.

Porovnání změny izolačního odporu, nebo celkového proudu při přiloženém testovacím napětí může být užitečné pro určení čistoty a suchosti vinutí. Pokud je vinutí znečištěno částečně vodivým materiálem, nebo je vlhké, celkový proud bude v čase přibližně konstantní, jelikož převládá vodivostní proud daný materiálem a proud povrchové vodivosti. Pokud je vinutí čisté a suché, celkový proud bude s časem klesat, protože v tomto případě převládá absorpční proud, který vzniká molekulární polarizací a klesá téměř k nule.

5.3.1 Měření izolačního odporu

Měření izolačního odporu se provádí při konstantním stejnosměrném napětí se zápornou polaritou, což znamená připojení záporné svorky napětí na vinutí a kladné svorky na kostru. Maximální hodnota napětí je dána jmenovitým napětím stroje. Toto je obzvláště důležité u malých nízkonapěťových strojů, nebo u vlhkých vinutí. Pokud by bylo napětí překročeno, může dojít k poškození izolace.

Tab. 5-1 Tabulka stejnosměrných napětí pro měření izolačního odporu [9]

Jmenovité napětí [V]	Velikost SS napětí [V]
< 1000	500
1000 až 2500	500 až 1000
2501 až 5000	1000 až 2500
5001 až 12000	2500 až 5000
> 12000	5000 až 10000

Doporučený minimální izolační odpor je dán typem vinutí a jeho izolace. U vinutí s menším odporem se nedoporučuje provádět zkoušku výdržným napětím, nebo je

zatěžovat provozním zatížením. Doporučené hodnoty nejsou platné pro úplná vinutí před jejich impregnací.

Tab. 5-2 Tabulka minimálních izolačních odporů při teplotě 40 °C

Zkoušený objekt	Minimální izolační odpor R_{rI} [MΩ]
Vysokonapěťové izolační systémy založené na šelaku a asfaltu a všechna budící vinutí	Jmenovité napětí (kV) + 1
Vysokonapěťové izolační systémy založené na syntetické pryskyřici (tvarovaná vinutí)	100
Nizkonapěťová vsypávaná a tvarovaná vinutí a stejnosměrné kotvy	5

Izolační odpor izolačních systémů se na rozdíl od vodičů snižuje s vyšší teplotou vinutí a to exponenciálně. V kovovém vodiči se totiž nachází velké množství volných elektronů. Vysoká teplota způsobuje větší tepelnou aktivitu, která snižuje střední volnou dráhu elektronu což vede ke snížení mobility elektronu a vyššímu odporu. U izolačních systémů dodaná tepelná energie uvolňuje dodatečné nosiče náboje a snižuje odpor.

Minimální hodnota izolačního odporu se vypočítá podle:

$$R = \frac{U_n}{\frac{P_n}{100} + 1000}, \quad (5.1)$$

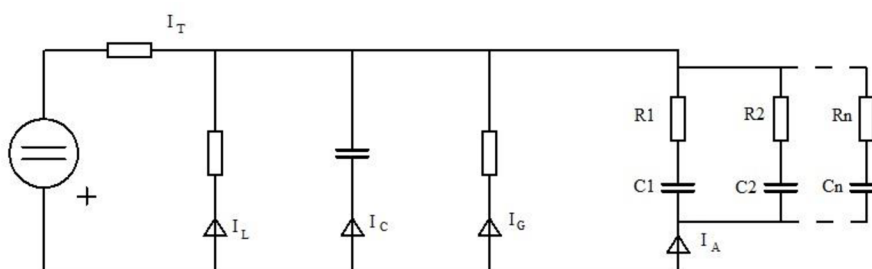
kde U_n je jmenovité napětí stroje a P_n je jeho jmenovitý výkon.

Existují 4 proudy, které mohou téct po přivedení testovacího napětí na vinutí.

1. Kapacitní proud I_C : Když je na kondenzátor přivedeno stejnosměrné napětí objeví se vysoký nabíjecí proud, který potom exponenciálně klesá. Velikost kondenzátoru a vnitřní odpor zdroje určují strmost klesání proudu. Vsypávané satorové vinutí může mít kapacitu okolo 1 nF mezi vinutím a jádrem. Vnitřní odpor zdroje může dosahovat několika stovek kilo ohmů. To znamená, že tento proud klesne k nule za méně než 10 s. Vzhledem k tomu, že kapacitní proud obsahuje zanedbatelnou informaci o stavu vinutí izolační odpor se měří až při kapacitním proudu blízkém nule.
2. Vodivostní proud I_G : Tento proud je tvořen elektrony, nebo ionty, které procházejí skrz objem izolace mezi vinutím a jádrem. Tento proud může vznikat, pokud je izolace vlhká, popraskaná, nebo obsahuje nečistoty umožňující tok proudu. Tento proud je v čase konstantní a v ideálním případě roven nule.

3. Plazivý proud I_L : V čase konstantní stejnosměrný proud tekoucí po povrchu izolace. Je způsoben vodivými nečistotami na povrchu. Nečistota může být například olej, vlhkost v kombinaci s prachem, popílek, chemikálie a podobně. V ideálním případě je roven nule.
4. Absorpční proud I_A : Absorpční proud je částečně tvořen polarizačním proudem, který vzniká kvůli polarizaci molekul ve stejnosměrném poli. Energie potřebná pro polarizaci molekul vyplývá z proudu odebíraného ze zdroje. Jakmile jsou všechny molekuly polarizovány proud zaniká. Po přiložení stejnosměrného napětí je tento proud relativně vysoký a klesá k nule. Pokles k nule trvá přibližně 10 minut u moderních vysokonapěťových drážkových izolací. Izolace vinutí má na rozdíl méně polárních molekul, a proto má nízký absorpční proud. Absorpční proud se chová jako RC obvod s dlouhou časovou konstantou. Absorpční proud stejně jako kapacitní není ani škodlivý ani příznivý. Je pouze vlastností izolačních materiálů.

Celkový proud I_T je měřitelný a je dán součtem těchto proudů. Proudů, které vypovídají o stavu izolace jsou plazivý proud a vodivostní proud.



Obr. 5-1 Ekvivalentní obvod znázorňující čtyři proudy sledované při měření izolačního odporu. [8]

Pouhé měření odporu v jednom čase po přivedení napětí není spolehlivé, protože je izolační odpor vysoce závislý na teplotě. Nárůst teploty o 10 °C může snížit odpor pětikrát až desetkrát. Vliv teploty je také jiný pro různé izolační materiály. Naměřený odpor lze přepočítat na 40 °C, což ale nezajistí větší spolehlivost jako měření při malých výchylkách teploty. Při měření je tedy důležité zaznamenat teplotu okolí, relativní vlhkost, teplotu vinutí, dobu vinutí mimo provoz, testovací napětí a zapojení. [8][9]

5.3.2 Měření polarizačního indexu

Pro zvýšení spolehlivosti měření snížením vlivu teploty byl stanoven polarizační index. Polarizační index je obecně definován jako poměr izolačních odporů měřených ve dvou různých časech například 10 minut a jedna minuta:

$$PI = \frac{IR_{10}}{IR_1}. \quad (5.2)$$

Polarizační index je bezrozměrná veličina, která určuje strmost změny izolačního odporu a může být použita k posouzení stavu izolace. Měří se při relativně stálé teplotě a pro vyšší přesnost a možnost závislost vykreslit v logaritmickém měřítku je možné odečíst hodnoty izolačního odporu i v časech okolo jedné minuty.

Pokud předpokládáme, že IR_{10} i IR_1 byly měřeny za stejné teploty korekce teplot bude pro obě měření stejná a tím pádem se vykrátí. To znamená, že je polarizační index relativně nezávislý na teplotě.

Polarizační index vypovídá o tom, zda je plazivý a vodivostní proud nadměrně velký. Pokud jsou tyto proudy větší, než absorpční proud bude výsledek rovnice (4.1) blízky 1. Polarizační index blízky 1 značí, že jsou vodivostní proudy dost velké, což znamená výskyt prasklin, nebo nečistot v izolaci. Tím pádem mohou vznikat zkraty mezi závity, které mohou přejít až k poruše izolace mezi vinutím a jádrem.

Při vodivostních a plazivých prouděch o malé hodnotě v porovnání s absorpčním proudem po jedné minutě by měl být polarizační index větší než 2, což znamená, že je vinutí v pořádku a nepředpokládá se výskyt poruchy. Pokud je teda zaznamenán pokles celkového proudu v intervalu mezi jednou a deseti minutami je tento pokles způsoben absorpčním proudem. To znamená, že proudy plazivé a vodivostní, které jsou konstantní v čase dosahují nízkých hodnot.

Tento test nemusí být proveditelný u malých vsypávaných vinutí, protože je u nich absorpční proud zanedbatelný již po krátké době. Pro tyto případy je možné použít jiné časy měření jako například 1 min a 30 s, nebo 5 min a 1 min. Protože je absorpční proud téměř nulový již po pár minutách, čas pro testování se může výrazně zkrátit bez jakékoli ztráty informace. Problém u těchto jiných poměrů je ten, že není zcela jisté, jaké hodnoty jsou přijatelné. Proto je interpretace výsledku složitější, pokud neexistuje rozsáhlá databáze. Další způsob je měření izolačního odporu každou minutu a ukončit měření po ustálení odporu, což je zjištěno třemi následovnými měřeními stejné hodnoty.

Měření se provádí pomocí vysokonapěťového stejnosměrného zdroje s dobrou regulací a citlivého ampérmetru měřícího proudy menší než nA. Existují i speciální megaohmmetry. U statorových vinutí se měření provádí na výstupních svorkách postupně po jedné fázi, pokud je to možné. Vlhkost má vliv na měření, proto se měření musí provádět při teplotě nad rosným bodem. Testovací napětí musí být nižší než jmenovité špičkové napětí. Po každém měření by vinutí mělo být uzemněno po alespoň čtyřnásobek doby po kterou bylo přivedeno napětí, aby se molekuly polarizovaly náhodně a aby se vybil prostorový náboj. [1][8][9]

5.4. Měření odporu vinutí

Měření odporu vinutí je test, který má za úkol zjistit, zda nejsou vodiče vinutí mechanicky poškozené, nebo jestli pájené či svařované spoje vinutí zajišťují dobrou vodivost. Také slouží k ověření symetrie jednotlivých fází stroje. Pokud se měření provádí například z rozvaděče, může tento test odhalit i povolené přívodní svorky stroje.

Pokud se vodiče vinutí poškodí například zlomením či naprasknutím odpor mezi jeho vývody se zvýší kvůli sníženému průřezu proudovodné dráhy. Takto poškozené vodiče, nebo spoje s vysokým odporem vedou ke zvyšování teploty a následně k poruše.

Pro změření odporu vinutí se vinutím nechá protékat stejnosměrný proud a zároveň je na něm měřeno napětí. Odpor se poté vypočte podle Ohmova zákona, takže se podělí napětí proudem. Odpor statorového, nebo rotorového vinutí je velmi nízký a pohybuje se v řádu jednotek ohmů u malých strojů a v řádu mili-ohmů u větších strojů. Aby bylo možné měřit nízké hodnoty odporu je potřeba využít čtyř-vodičové metody, měřícího můstku, nebo digitální ohmmetr s nízkým odporem. [1]

5.5. Částečné výboje

Částečný výboj je trvalý anebo přechodný průraz prostoru mezi dvěma elektrodami, při kterém nevzniká jejich galvanické spojení. Doba trvání těchto výbojů se pohybuje okolo 10 až 50 ns a proto se uměle prodlužuje na 1 až 3 μ s, aby je bylo možné zobrazovat na periodě napájecího napětí. Hodnota částečných výbojů Q se určuje v pC, nebo v mV. Off-line měřením částečných výbojů se zabývá norma ČSN EN IEC 60034-27-1.

Mezi nežádoucí účinky částečných výbojů patří lokální ohřev dielektrika, namáhání vysokofrekvenčním elektrickým polem, emise ultrafialového záření a chemické změny

v izolantech. Částečné výboje tedy vedou k postupnému zhoršování stavu dielektrika, a nakonec k průrazu. Kvůli nežádoucím účinkům jsou kladeny vysoké nároky na technologii výroby izolantů, aby v nich nevznikaly poruchy a neobsahovaly nečistoty. Částečné výboje jsou však často příznakem poruchy, a ne její příčinou.

U nízkonapěťových strojů se částečné výboje vyskytují převážně v plynech uvnitř pevných izolací.

5.6. Měření částečných výbojů

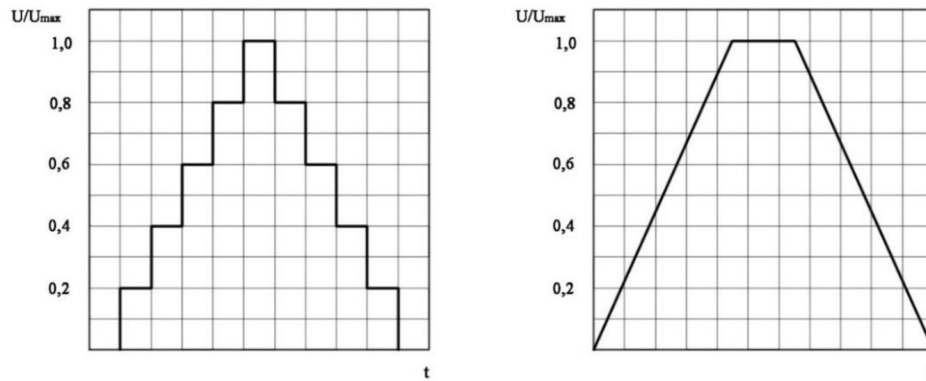
Měření částečných výbojů může být použito jako nedestruktivní testovací metoda pro zjišťování stavu izolačního systému. Výsledky měření částečných výbojů na jednom zařízení jsou dobrým nástrojem pro sledování postupného stárnutí statorového vinutí. Sledování stavu stroje umožňuje například plánování jeho údržby. Selhání stroje nelze přesně předpovědět, ale zvýšení aktivity částečných výbojů v průběhu času znamená zvětšující se poškození statorového vinutí, které může vést k předčasné poruše.

5.6.1 Příprava pro měření

Před samotným měřením je třeba zkontrolovat čistotu statoru a zajistit, aby fázové spojky a vnitřní kabely byly dostatečně daleko od sousedících a nedotýkaly se navzájem, nebo povrchu s jiným potenciálem. Doporučuje se také změřit izolační odpor, zda dosahuje hodnot vyšších než daná minima. Tím se také zjistí, jestli není vinutí znečištěné, vlhké, nebo nemá poškozenou izolaci. Částečné výboje za normálních podmínek poklesnou již po několika minutách od přiložení napětí. Proto se provádí kondicionování, což znamená, že se na zkoušený objekt připojí napětí několik minut před odečtením dat částečných výbojů. U nových a použitých vinutí se připojuje napětí o maximální hodnotě zkušebního napětí minimálně 5 min před měřením. Po uplynutí této doby se napětí znovu přiloží pro zahájení měření. Pokud má být měření součástí výrobního procesu je možné u nových tyčí, nebo cívek kondicionování provést přiložením vysokého napětí o vyšší hodnotě než jmenovité na krátkou dobu. Takže lze provést vysokonapěťové zkoušky před zkouškou částečných výbojů.

5.6.2 Zkušební napětí

Při měření se zkušební napětí přiloží na vinutí a zvyšuje se na maximální hodnotu U_{max} spojitě se strmostí menší než 1 kV/s, nebo po skocích o velikosti například $0,2 \cdot U_{max}$. Při nárůstu i poklesu je rychlost změny stejná.



Obr. 5-2 Zvyšování a snižování zkušební napětí po skocích a spojitě [12]

Pokud je napětí o síťovém kmitočtu zvyšováno stupňovitě musí být prodleva každého schodu alespoň 10 s pro zaznamenání částečných výbojů. Volba zkušební napětí pro nová vinutí, nebo části vinutí:

- $U_{max} = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$ (jmenovité fázové napětí),
- $U_{max} = 1,2 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}$ (120 % fázového jmenovitého napětí),
- $U_{max} = U_n$ (sdružené jmenovité napětí).

Přičemž vyšší zkušební napětí může poskytnout další informace.

5.6.3 Šum a rušení

Signály, které nepochází ze statorového vinutí a nemají charakter impulzu jsou šum. A elektrické impulzy o relativně krátké době trvání, které mohou mít charakteristiky impulzů částečných výbojů jsou rušení. Před začátkem zkoušky by se měla získat úroveň šumu pozadí pro dané uspořádání až do U_{max} . To lze provést dvěma způsoby, a to nahrazením měřeného zařízení bez výbojovým kondenzátorem, nebo měřením naprázdno při odpojeném měřeném zařízení. Při metodě naprázdno je třeba, aby byl měřicí obvod normalizován pro měření naprázdno.

U zdrojů, které mají proměnné napětí při regulaci vzniká šum, a proto se u metody skokového zvyšování napětí nesmí provádět měření během regulace napětí. Pro metodu spojitého zvyšování napětí se musí použít přiměřené přístroje.

Šum generovaný zdrojem prakticky nelze eliminovat. Rušení však mohou být omezena až eliminována, pokud pocházejí z vnějších zdrojů. Pokyny pro omezení rušení a optimalizaci měření:

- osvědčená kombinace vazebního členu částečných výbojů a měřicího zařízení,
- umístění vazebního členu blízko ke zkoušenému zařízení pro snížení útlumu,
- připojení zdroje a vazebního členu na protější svorky vinutí tak, aby rušení ze zdroje šířením zeslábnulo,
- připevnění odporových teplotních čidel hotového statoru na uzemněnou kostru,
- normalizace a měření zkušebního uspořádání před každým použitím (kvalita sítě se mění s místem a časem měření),
- velká plocha uzemnění zkoušeného objektu a měřicího zařízení (pokud možno stejný připojovací bod zkoušeného objektu, měřicího zařízení a vazebního členu částečných výbojů),
- kompaktní zkušební uspořádání (krátké kabely pro měření a uzemnění) snižuje elektromagnetickou vazbu,
- použití prověřených kabelů s požadovaným odporem pro zabránění odrazu,
- umístění elektroniky, která způsobuje rušení do jiného směru, nebo použití Faradayovy klece, popřípadě jednodušší skeletové klece
- filtrace šumu na nízkonapěťové, nebo vysokonapěťové straně transformátoru.

5.6.4 Výsledky měření

Výsledky měření jsou definovány velikostí částečných výbojů, efektivní hodnotou zkušebního napětí a frekvencí zkušebního napětí. Velikost částečných výbojů je nevyšší opakovaně se vyskytující hodnota značená Q_m a je vztažena na přiložené zkušební napětí. Velikost částečných výbojů slouží jako účinný prostředek, který popisuje typické významné zdroje částečných výbojů.

Výsledky se zaznamenávají a zpracovávají při každém skoku napětí, nebo při plynulém zvyšování. Je tedy získána křivka $Q_m = f(U)$ a lze také zaznamenat počáteční napětí PDIV a zhašecí napětí PDEV. Pokud je pro měření využito digitálních přístrojů

výpočet Q vyžaduje dobu pro získávání a zpracování dat. Doba pro nepřetržité získávání a zpracování hodnot Q při síťové frekvenci musí být alespoň 5 sekund. Stabilní napětí proto musí být udržováno déle než 5 sekund, například 10 sekund.

U továrních zkoušek jde obecně o kontrolu kvality výroby, kdežto u zkoušek na místě instalace se zjišťuje zestárnutí izolace. Výsledek měření potom rozhoduje o existenci vad a o tom, zda je třeba provést dodatečné zkoušky, nebo nápravu.

Točivé stroje se zatěžují mnoha různými profily namáhání a vyrábějí se s různými konstrukčními prvky a izolačními systémy. Také jsou používány zkušební přístroje s různými charakteristikami. Z tohoto důvodu nelze výsledky měření přímo porovnávat mezi odlišnými typy stroje a není snadné nastavení absolutních mezí částečných výbojů u nových vinutí. Je tedy vhodné při hodnocení stavu izolace současně využívat výsledky zaznamenané z předchozích zkoušek například vizuálních kontrol.

U kompletních statorových vinutí mají výsledky srovnávací charakter, jelikož není možné stanovit určitou přijatelnou hodnotu Q , nebo takovou hodnotu při které vzniká vysoké riziko poruchy. Možnosti porovnání výsledku:

- opětovné měření průběhu Q na stejném vinutí po uplynutí času (při použití stejné zkušební metody a měřicích přístrojů),
- porovnání měřeného Q na několika statorech stejného typu (při použití stejné zkušební metody a měřicích přístrojů),
- porovnání Q měřených mezi různými fázemi na jednom statoru (při použití stejné zkušební metody a měřicích přístrojů). [10][11][12]

5.7. Zkouška rázovou vlnou

Zkouška rázovou vlnou je zkouška vinutí elektrického stroje. Lze ji provádět jak při výrobě, tak při údržbě.

Zkouška rázovou vlnou dokáže detekovat:

- mezi-závitový zkrat,
- zkrat mezi cívkami,
- zkrat mezi fázemi,
- rozdílný počet závitů mezi fázemi.

Při zkoušce na zařízení působí rázový generátor krátkými pulzy napětí s velkou strmostí nárůstu a amplitudou převyšující jmenovité napětí. Vzniká tak mezi-závitové

napětíové namáhání. Pro stroje na malé a nízké napětí je maximální amplituda zkušebního napětí $2 \cdot U_n + 1000$ V. Při zkoušce se nejčastěji využívá impulzů vytvořených vybíjením kondenzátorů. Výsledkem měření jsou tlumené kmity sinusového tvaru mezi pulzy z generátoru, které vytváří cívky vinutí. Frekvence těchto kmitů je dána indukčností vinutí.

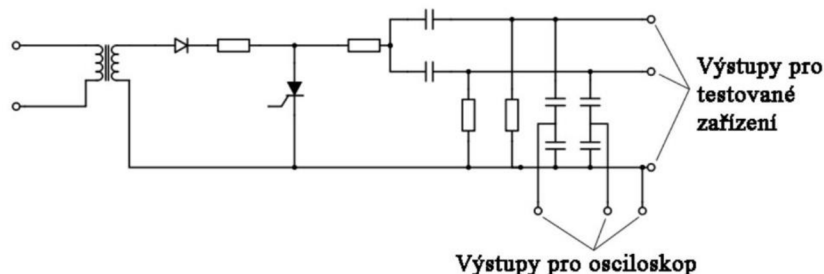
Frekvence kmitů je dána Thomsonovým vztahem:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (5.3)$$

kde L je indukčnost a C je kapacita.

Každá cívka vinutí má tedy svou charakteristickou odezvu. Tyto odezvy se zobrazí současně na osciloskopu a je možné zkoumat jejich odlišnost.

Zkouška rázovou vlnou se provádí na nových strojích i jako součást údržby. Na obrázku 5-3 je schématické znázornění rázového generátoru pro zkoušku rázovou vlnou při které jsou porovnávány impulzy dvou fází. Kondenzátory jsou nabity na testovací napětí a poté je sepnut tyristor. Energie uchovaná v kondenzátorech osciluje kvůli zapojení kondenzátoru s indukčností vinutí. Tyto kmity jsou poté zaznamenány pomocí kapacitních děličů a porovnávány. [1]



Obr. 5-3 Schématické znázornění rázového generátoru

Porovnání dvou naměřených průběhů se poté provede výpočtem procentuálního rozdílu ploch pod oběma křivkami za pomoci vztahu:

$$EAR = \frac{\sum_{i=1}^N |U_i^{(1)} - U_i^{(2)}|}{\sum_{j=1}^N |U_j^{(1)}|} \cdot 100, \quad (5.4)$$

kde EAR je procentuální odchylka, N je počet naměřených hodnot, $U^{(1)}$ jsou napětí naměřená na jedné fázi a $U^{(2)}$ jsou napětí naměřená na druhé fázi.

Pokud se jedná o mezi-závitový zkrat vznikne fázový posuv mezi průběhy změnou indukčností vinutí. Při zkratu na kostru dochází ke snížení amplitudy.

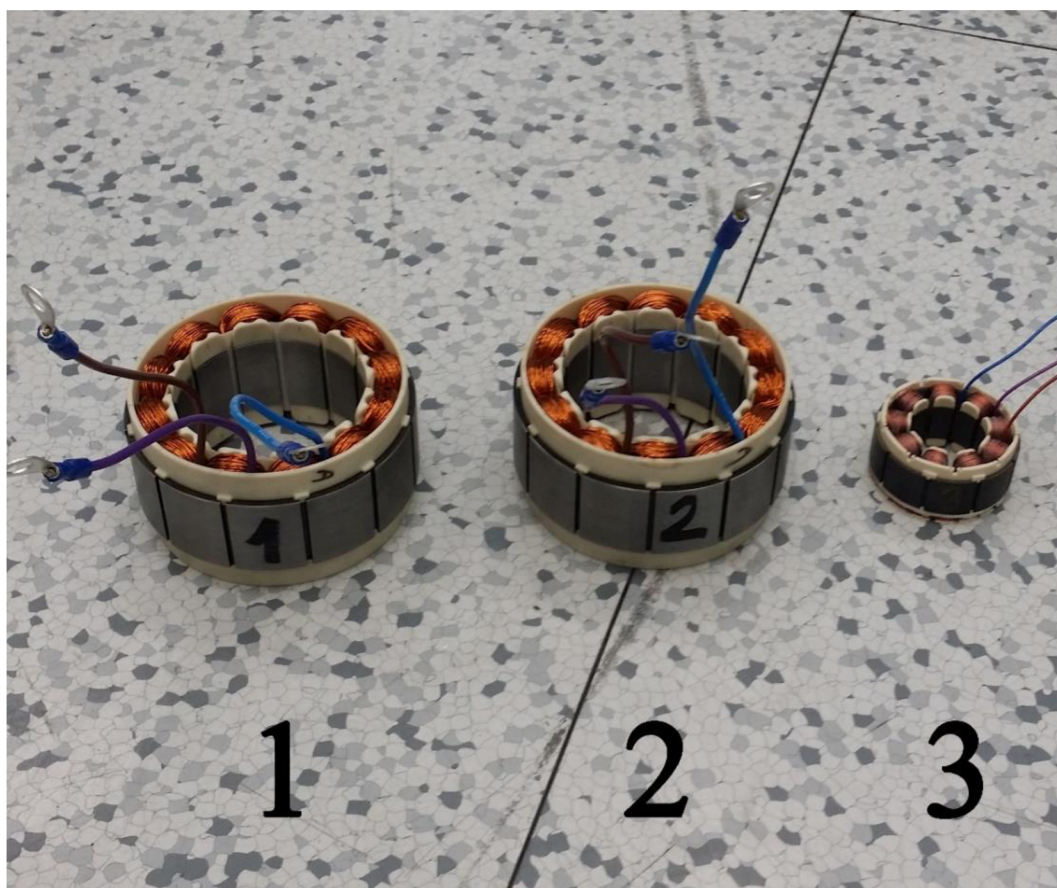
6. TESTOVÁNÍ STATOROVÝCH VINUTÍ

Tato část práce se zabývá testováním statorových vinutí pomocí zkoušek pro ověření jejich použitelnosti. Zkoušky vinutí jsou prováděny z toho důvodu, aby bylo zajištěno, že bude pracovat správně a bez poruchy za běžných provozních podmínek, ale i za určitých nepříznivých stavů. Zkoušky se tedy provádějí na nových vinutích, ale i na používaných vinutích pro kontrolu jejich stavu.

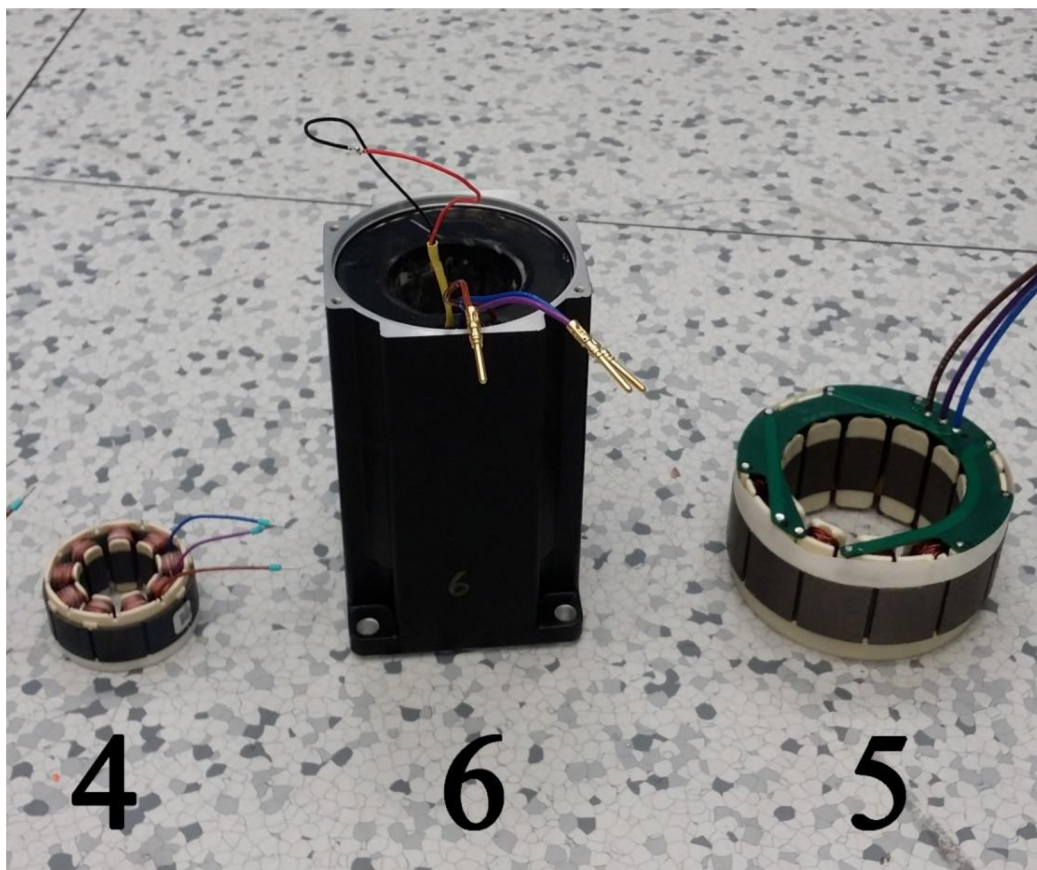
6.1. Testované vzorky

Testované vzorky jsou kompletní statory na malé či nízké napětí s impregnovaným či zalitým vinutím. Statory je možné vidět na obrázcích 6-1 a 6-2.

Statory s označením 1 až 5 mají jmenovité střídavé napětí 35 V a vzorek 6 má jmenovité střídavé napětí 480 V.



Obr. 6-1 Testované vzorky 1, 2 a 3



Obr. 6-2 Testované vzorky 4, 5 a 6

6.2. Měření odporu vinutí na testovaných vzorcích

Na testovaných vzorcích byly měřeny odpory vinutí mezi jednotlivými fázemi pomocí $\mu\Omega$ metru CROPICO DO5000 v.č. 42A-1049. Měření bylo provedeno čtyřvodičovou metodou při vhodně zvoleném měřicím rozsahu a proudu tekoucím ze zdroje podle měřeného vinutí. Měřicí přístroj byl připojen přímo na svorky stroje, do vinutí byl pouštěn stejnosměrný proud a na vinutí bylo měřeno napětí. Z těchto údajů byl pomocí $\mu\Omega$ metru vypočten odpor vinutí. Odpor byl zaznamenán až určitou dobu po připojení zdroje stejnou pro všechny vzorky.

Tab. 6-1 Naměřené hodnoty odporů vinutí

Č. vzorku	U - W	U - V	V - W	rozsah	nesymetrie	tolerance odporu	rozsah tolerance
	[mΩ]	[mΩ]	[mΩ]		[%]		
1.	107,15	98,72	107,3	200 mΩ / 10 A	8,5	105 mΩ ± 5 %	99,75 ÷ 110,25
2.	96,33	98,88	96,62		2,6	105 mΩ ± 5 %	99,75 ÷ 110,25
3.	1660	1660	1656	3 Ω / 1 A	0,2	1,63 Ω ± 5 %	1545,8 ÷ 1711,5
4.	1690	1690	1690		0,0	1,63 Ω ± 5 %	1545,8 ÷ 1711,5
5.	102,25	102,10	102,93	200 mΩ / 10 A	0,8	103 mΩ ± 5 %	97,85 ÷ 108,15
6.	2759	2756	2759	3 Ω / 1 A	0,1	2,81 Ω ± 10 %	2529 ÷ 3091
Pozn. Tolerance nesymetrie 5 %							

Z naměřených hodnot odporů vinutí v tabulce 6-1 vyplývá, že vzorek č.1 nesplňuje požadavek na symetrii fází, jelikož se odpor mezi fázemi U-V výrazně liší od ostatních odporů. Nejvyšší nesymetrie dosahuje 8,5 %, což převyšuje toleranci 5 %. Statorová vinutí u vzorků č.1 a č.2 nesplňují minimální mezifázový odpor 99,75 mΩ.

6.3. Měření indukčnosti vinutí na testovaných vzorcích

Při tomto měření byly získány hodnoty indukčností mezi jednotlivými fázemi u všech testovaných vzorků. Měření bylo provedeno měřicím RLC můstkem CHROMA LCR METER 11021 v.č. 110213000394.

Tab. 6-2 Naměřené hodnoty indukčností vinutí

Č. vzorku	U - W	U - V	V - W	rozsah	nesymetrie	tolerance indukčnosti	rozsah tolerance
	[mH]	[mH]	[mH]		[%]		
1.	0,4225	0,4182	0,4157	1 kHz / 1 V	1,6	0,33 mH ± 10 %	0,297 ÷ 0,363
2.	0,2975	0,4145	0,3105		39,3	0,33 mH ± 10 %	0,297 ÷ 0,363
3.	2,6522	2,6522	2,6608		0,3	2,5 mH ± 10 %	2,25 ÷ 2,75
4.	2,6578	2,6504	2,6530		0,3	2,5 mH ± 10 %	2,25 ÷ 2,75
5.	0,4085	0,4082	0,4086		0,1	0,41 mH ± 10 %	0,369 ÷ 0,451
6.	9,759	9,884	9,904		1,5	10,8 mH ± 20 %	8,64 ÷ 12,96
Pozn. Tolerance nesymetrie 5 %							

Z naměřených hodnot v tabulce 6-2 vyplývá, že vzorek č.2 vykazuje nadměrnou nesymetrii mezifázových indukčností 39,3 %. Toleranci odchylky od požadované indukčnosti nesplňují statory č.1 a č.2.

6.4. Střídavá vysokonapět'ová zkouška testovaných vzorků

Střídavá vysokonapět'ová zkouška byla provedena testerem CHROMA AC/DC/IR hipot tester 19052 v.č. 190520010669.

Při zkoušce bylo přivedeno střídavé napětí současně na svorky všech tří fází kvůli pevnému pospojování statoru do hvězdy a kostra byla připojena k zemi. Na vzorcích byla provedena kusová výdržná zkouška o délce 1 s. Náběh napětí na testovací hladinu trval 0,5 s. Přiložené testovací napětí bylo udržováno po dobu 1 s a poté bylo napětí opět snižováno s dobou trvání 0,5 s. Testovací napětí byla zvolena na základě normy ČSN EN 60034-1 ed.2., která udává 500 V + dvojnásobek jmenovitého napětí motoru a zvýšení napětí o 20 % při sekundové zkoušce pro vzorky č.1 až č.5. Testovací napětí pro vzorek č.6 bylo 1000 V + dvojnásobek jmenovitého napětí a zvýšení o 20 %, tedy 2400 V. Výsledky měření jsou v tabulce 6-3.

Tab. 6-3 Výsledky střídavé vysokonapěťové zkoušky

Č. vzorku	I	U	nastavení zdroje
	[mA]	[V]	
1.	0,18		800 V; 1 s; Ramp 0,5 s
2.	0,18		
3.		422	
4.		20	
5.	0,1		
6.		437	2400 V; 1 s; Ramp 0,5 s

Při provádění zkoušky byly termočlánky statoru zkratovány, aby nedošlo k jejich poškození. Vzorky č.1, č.2 a č.5 u kterých je uveden proud procházející z vinutí do kostry vyhověly a nedošlo u nich k průrazu. Napětí uvedená v tabulce 6-3 jsou napětí, při kterých došlo k průrazu na kostru což znamená, že obvodem protékal proud větší než 0,01 A. To znamená, že při střídavé vysokonapěťové zkoušce nevyhověly vzorky č.3, č.4 a č.6.

6.5. Stejnoseměrná vysokonapěťová zkouška testovaných vzorků

Pro stejnosměrnou zkoušku byla zkušební napětí volena $\sqrt{2}$ krát větší než efektivní hodnota zkušební napětí při střídavé zkoušce. Zkouška byla provedena za pomoci testeru CHROMA AC/DC/IR hipot tester 19052 v.č. 190520010669. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 6-4.

Tab. 6-4 Výsledky stejnosměrné vysokonapěťové zkoušky

Č. vzorku	I	U	nastavení zdroje
	[mA]	[V]	
1.	0,001		1200 V; 1 s; Ramp 0,5 s
2.	0,001		
3.		260	
4.		0	
5.	0,1		
6.		674	

Vzorky č.1, č.2 a č.5 při této zkoušce vyhověly a v tabulce 6-4 jsou uvedeny proudy procházející na kostru. Nevyhověly vzorky č.3, č.4 a č.6.

6.6. Zkouška testovaných vzorků rázovou vlnou

Pro zkoušení rázovou vlnou byl použit rázový tester surge tester PSG 204A v.č. 2207 a pro zaznamenání výsledků osciloskop YOKOGAWA DL850 v.č. 91KB20664. Testování rázovým testerem funguje na principu rázového srovnávání. Dva stejné pulzy jsou přivedeny na dvě fáze a na osciloskopu jsou zobrazeny jejich indukované odrazy. Dva měřené průběhy se budou shodovat v případě, že cívky obou fází mají stejný počet závitů a nejsou zkratovány. Toto měření je vhodné provést při vyjmutém rotoru.

Při měření byly tři svorky testeru A, B, C připojeny na jednotlivé fáze a svorka GND připojena na kostru statoru. Zkušební napětí bylo voleno přibližně jako dvojnásobek jmenovitého napětí plus 1000 V. Pro získané průběhy z osciloskopu v příloze této práce platí, že napětí měřené na osciloskopu je oproti skutečnému v poměru 1/1000.

Tab. 6-5 Tabulka vypočtených procentuálních odchylek průběhů pro zkoušku rázovou vlnou

Č. vzorku	EAR_{A-B}	EAR_{A-C}	EAR_{B-C}
	[%]	[%]	[%]
1.	1,49	2,61	2,13
2.	41,16	51,68	19,46
3.	1,02	125,32	120,91
4.	2,25	149,38	138,85
5.	1,35	1,42	1,32
6.	387,6	0,669	327,23
Pozn. Tolerance procentuální odchylky 5 %			

V tabulce 6-5 jsou uvedeny vypočtené procentuální odchylky průběhů naměřených při zkoušce rázovou vlnou. U vzorku č.1 nebyla touto zkouškou zjištěna chyba, protože

procentuální odchylky nepřesahují 5 %. Při zkoušce obstál také vzorek č.5. U vzorků č.2, č.3, č.4 a č.6 jsou překročeny tolerance a průběhy se liší svou fází i amplitudou z čehož vyplývá, že se na vinutí objevuje zkrat na kostru. Tyto výsledky odpovídají výsledkům z vysokonapěťových zkoušek až na výsledek pro vzorek č.2 na kterém vznikl zkrat na kostru při zkoušce rázovou vlnou.

6.7. Výsledky zkoušek na testovaných vzorcích

Tabulka 6-6 znázorňuje výsledky testovaných vzorků při jednotlivých zkouškách. Symbol X značí, že vzorek při zkoušce neprošel a symbol ✓, že prošel.

Tab. 6-6 Výsledky zkoušek na testovaných vzorcích

Č. vzorku	Typ zkoušky					Celkový výsledek
	Měření odporu vinutí	Měření indukčnosti vinutí	Střídavá vysokonapěťová zkouška	Stejnoseměrná vysokonapěťová Zkouška	Zkouška rázovou vlnou	
1.	X	X	✓	✓	✓	X
2.	X	X	✓	✓	X	X
3.	✓	✓	X	X	X	X
4.	✓	✓	X	X	X	X
5.	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6.	✓	✓	X	X	X	X

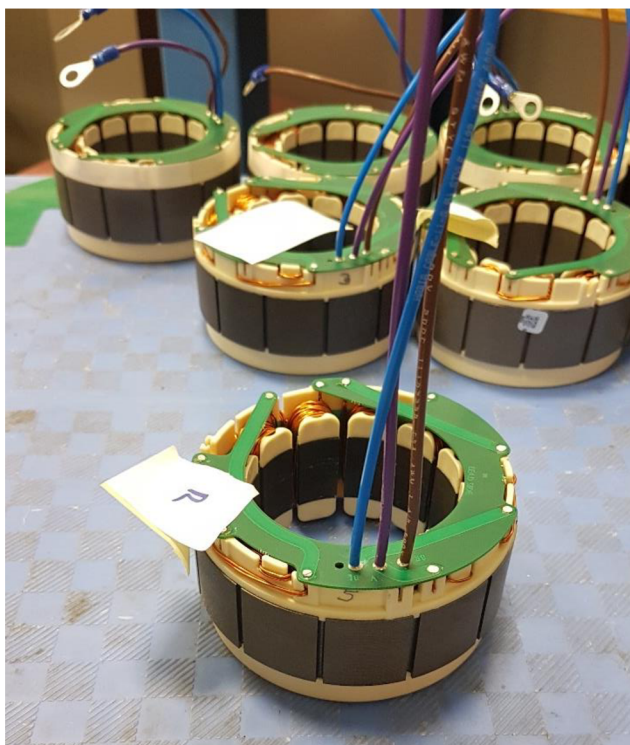
7. ZAČLENĚNÍ ZKOUŠEK DO VÝROBNÍHO PROCESU

Do výrobního procesu byly začleněny vybrané zkoušky z předchozí kapitoly. Měření odporu, měření indukčnosti, střídavá vysokonapěťová zkouška a zkouška rázovou vlnou. Tyto zkoušky byly provedeny ve fázi před impregnací lakem, kdy jsou vinutí navinuta a cívky jsou zapojeny na desku plošných spojů.

Zkoušky po zkompletování stroje v tomto případě nebyly provedeny, jelikož se motory dodávají v rozloženém stavu a kompletace probíhá až v cílové aplikaci.

7.1. Testované vzorky

Zkoušky byly provedeny na šestnácti statorech synchronního motoru s permanentními magnety o jmenovitém střídavém napětí 35 V a stejnosměrném napětí v meziobvodu 48 V. Jedná se o bezrámový motor BLM5 určených pro použití v kolaborativních robotických ramenech UR5.



Obr. 7-1 Testované statory

7.2. Výsledky měření odporu vinutí

Čtyř-vodičovou metodou pomocí $\mu\Omega$ metru CROPICO DO5000 v.č. 42A-1049 byly naměřeny odpory mezi fázemi ze kterých byla následně vypočtena nesymetrie. Touto zkouškou prošly všechny měřené vzorky a výsledky jsou uvedeny v tabulce 7-1.

Tab. 7-1 Naměřené hodnoty odporů vinutí

Č. vzorku	U - W	U - V	V - W	nesymetrie	tolerance odporu	rozsah tolerance
	[m Ω]	[m Ω]	[m Ω]	[%]		[m Ω]
3497	101,3	102,2	101,6	0,9	103 m Ω \pm 5 %	97,85 \div 108,15
3503	101,7	102,5	101,7	0,8		
3508	101,4	102,5	101,7	1,1		
3509	101,2	102,5	101,2	1,3		
3513	101,2	102,30	101,6	1,1		
3516	101,3	102,30	101,6	1,0		
3517	102,3	104,00	103,3	1,6		
3518	102	102,80	102	0,8		
3522	101,5	102,40	101,7	0,9		
3524	102,3	103,00	102,5	0,7		
3526	101,8	102,50	101,8	0,7		
3530	101,9	102,70	102,1	0,8		
3531	100,7	101,50	100,8	0,8		
3532	101,5	102,40	101,7	0,9		
3539	101,2	102,10	101,5	0,9		
3562	101,8	102,7	102	0,9		
Pozn. Tolerance nesymetrie 5 %						

7.3. Výsledky měření indukčnosti vinutí

Indukčnosti byly měřeny mezi fázemi měřícím RLC můstkem CHROMA LCR METER 11021 v.č. 110213000394 a výpočtem byla zjištěna vzájemná nesymetrie. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 7-2, přičemž všechny vzorky splnily požadavky na indukčnosti i jejich symetrii.

Tab. 7-2 Naměřené hodnoty indukčností vinutí

Č. vzorku	U - W	U - V	V - W	nesymetrie	tolerance indukčnosti	rozsah tolerance
	[mH]	[mH]	[mH]	[%]		[mH]
3497	0,42	0,42	0,42	0	0,41 mH ± 10 %	0,369 ÷ 0,451
3503	0,423	0,423	0,423	0		
3508	0,416	0,416	0,417	0,2		
3509	0,419	0,419	0,4190	0		
3513	0,414	0,414	0,414	0		
3516	0,417	0,417	0,417	0		
3517	0,423	0,423	0,423	0		
3518	0,4	0,4	0,4	0		
3522	0,416	0,416	0,416	0		
3524	0,425	0,425	0,425	0		
3526	0,424	0,424	0,424	0		
3530	0,425	0,425	0,425	0		
3531	0,414	0,414	0,414	0		
3532	0,424	0,424	0,424	0		
3539	0,417	0,417	0,417	0		
3562	0,422	0,422	0,422	0		
Pozn. Tolerance nesymetrie 5 %						

7.4. Výsledky střídavé vysokonapěťové zkoušky

Na všech vzorcích byla provedena sekundová střídavá vysokonapěťová zkouška o zkušebním napětí 800 V testerem CHROMA AC/DC/IR hipot tester 19052 v.č. 190520010669. Při zkoušce byl sledován proud procházející na kostru. Pokud proud nepřevyšoval 0,01 A zkoušený vzorek zkouškou prošel. U žádného z šestnácti vzorků proud tuto hodnotu nepřevýšil, a tak všechny zkoušené vzorky touto zkouškou prošly.

7.5. Výsledky zkoušky rázovou vlnou

Zkouška byla provedena pomocí rázového testeru PSG 204A v.č. 2207 a výsledky byly zaznamenány osciloskopem YOKOGAWA DL850 v.č. 91KB20664. Naměřené průběhy získané z osciloskopu jsou v přílohách 7 až 22. V tabulce 7-3 jsou uvedeny procentuální odchylky těchto průběhů, přičemž toleranci 5 % nesplňují tři vzorky, a to vzorky číslo 3497, 3509 a 3518. Na průbězích získaných na těchto vzorcích lze pozorovat změnu amplitudy mezi porovnávanými fázemi. Z toho se dá usuzovat, že u těchto vzorků došlo ke zkratu na kostru statoru.

Tab. 7-3 Tabulka vypočtených procentuálních odchylek průběhů pro zkoušku rázovou vlnou

Č. vzorku	EAR_{A-B}	EAR_{A-C}	EAR_{B-C}
	[%]	[%]	[%]
3497	50,37	24,39	24,06
3503	1,13	0,65	0,7
3508	0,65	0,8	0,89
3509	24,34	51,17	23,43
3513	1,42	0,96	0,92
3516	0,8	0,75	0,91
3517	0,74	0,8	0,85
3518	19,79	36,75	23,38
3522	0,64	0,87	1,03
3524	0,68	1,34	1,66
3526	0,71	0,89	0,73
3530	0,62	0,7	0,75
3531	2,02	1,8	0,85
3532	0,67	1,04	0,94
3539	0,9	0,56	0,7
3562	1,09	0,72	1,22

Pozn. Tolerance procentuální odchylky 5 %

8. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo popsat funkci vinutí elektrických strojů na malé a nízké napětí a definovat zkušební postupy a kritéria zkoušek pro detekci jeho poruch a poruch izolačního systému. V práci je tak zpracován souhrn zkušebních metod, jejich požadavků a postupů s uvedenými normativními dokumenty, které se jimi zabývají pro snadnější orientaci. V rámci této práce byly také vybrané zkoušky provedeny a vyhodnoceny.

V první části jsou obecně definovány izolační materiály, jejich vlastnosti jako elektrická vodivost a dielektrické ztráty a dále je popsán průraz izolantů a jeho typy.

V následující části je popsáno samotné vinutí elektrických strojů, jeho funkce, vlastnosti a izolace. Jsou zde také uvedeny poruchy vinutí a jeho izolace a nepříznivé vlivy vedoucí k poruchám, které vznikají při výrobním procesu, nebo v průběhu provozu stroje.

Další kapitola je věnována detekci poruch vinutí a jeho izolačního systému. V této části jsou jednotlivé zkušební metody blíže definovány.

V následující části byly provedeny zkoušky na šesti testovaných vzorcích v podobě statorů synchronních motorů na malé a nízké napětí. Celkem bylo provedeno 5 druhů zkoušek.

Měření odporu vinutí bylo provedeno čtyř-vodičově za pomoci $\mu\Omega$ metru a mělo za úkol zjistit, zda jsou odpory v tolerančních mezích a zda není vinutí nesymetrické.

Indukčnosti vinutí byly měřeny měřicím můstkem a bylo ověřeno dodržení tolerancí a nesymetrie vinutí.

Na vzorcích byla prováděna střídavá vysokonapěťová zkouška neboli zkouška přiloženým napětím a stejnosměrná vysokonapěťová zkouška. Tyto zkoušky mají ověřit schopnost izolačního systému odolávat zvýšenému elektrickému namáhání.

Zkouška rázovou vlnou byla provedena za pomoci rázového testeru a osciloskopu. Byla zkoumána procentuální odlišnost dvou naměřených průběhů pro každou kombinaci dvou fází.

Výsledky těchto zkoušek jsou shrnuty v tabulce 6-6. Na základě těchto zkoušek byly vybrány zkoušky pro začlenění do výrobního procesu. Stejnosměrná a střídavá zkouška vykazovaly obdobné výsledky, proto byla zvolena pouze střídavá zkouška, která blíže odpovídá namáhání zařízení v provozu. V tabulkách 6-1 a 6-2 lze vidět, že vzorek č.1

nevyhovuje toleranci nesymetrie odporů, ale vyhovuje toleranci nesymetrie indukčností z čehož se dá usoudit, že se tyto metody navzájem nevylučují. Může to být způsobeno změnou tenze při navíjení, ale zachování stejného počtu závitů mezi fázemi. V případě vzorku č.2 je tomu naopak, což může být rozdílným počtem závitů mezi fázemi. Z výsledků také lze usoudit, že pro detekci poruch vinutí není dostatečné měření odporů, indukčností a jejich nesymetrie. Protože i v případě, kdy v obou těchto zkouškách vinutí obstálo není vyloučen mezi-závitový zkrat, který se na výsledcích zkoušky rázovou vlnou zřetelně projevil. Zkouška rázovou vlnou tedy má své opodstatnění i při testování vinutí statoru o jmenovitém střídavém napětí 35 V.

V poslední části byly provedeny vybrané zkoušky na šestnácti statorech BLM5 v průběhu výroby před impregnací vinutí. Zkouškami neprošly tři vzorky, a to konkrétně při zkoušce rázovou vlnou. Tyto statory budou převinuty. Ostatní vzorky se pohybovaly v tolerancích a mohly pokračovat ve výrobním procesu.

V návaznosti na tuto práci by mohla být měření prováděných zkoušek zautomatizována a zkoušky statorů na nízké napětí by mohly být rozšířeny o měření částečných výbojů.

Literatura

- [1] STONE, Greg. *Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, c2004. IEEE Press series on power engineering.
- [2] PYRHONEN, Juha., Tapani JOKINEN a Valeria. HRABOVCOVÁ. *Design of rotating electrical machines*. Second edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2014. ISBN 9781118701621.
- [3] Dielectric loss. In: *The free dictionary* [online]. [cit. 2018-10-30]. Dostupné z: <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Dielectric+Loss>
- [4] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje*. Přeložil Břetislav BENDA. Praha: Academia, 1980.
- [5] Electrical properties of insulating materials. *Readorrefer* [online]. 2015 [cit. 2018-10-29]. Dostupné z: http://www.readorrefer.in/article/Electrical-properties-of-insulating-materials_129/
- [6] Materiály a technická dokumentace Část Materiály v elektrotechnice. *Moodle.vutbr.cz* [online]. [cit. 2018-10-30]. Dostupné z: https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/262653/mod_resource/content/1/BMTD%20MEI%20.pdf
- [7] *TEMCo* [online]. 2016, 1 [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: http://www.temcoindustrialpower.com/product_selection.html?p=insulation_varnish_dip_and_bake
- [8] *IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery*. 1. 3 Park Avenue, New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014.
- [9] ČSN EN IEC 60034-27-4: *Točivé elektrické stroje - Část 27-4: Měření izolačního odporu a polarizačního indexu izolace vinutí točivých elektrických strojů*. 2018.
- [10] WARREN, V. *PARTIAL DISCHARGE TESTING: A PROGRESS REPORT PD – A COMPARISON TEST* [online]. In: . 2017 [cit. 2018-11-16]. Dostupné z: <https://irispower.com/learning-centre/partial-discharge-testing-progress-report-pd-comparison-test/>
- [11] Measurement and diagnosis of partial discharges in low voltage applications \leq 1000 volts. *Zvei* [online]. 2016, , 24 [cit. 2018-11-16]. Dostupné z: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2017/Januar/Guideline_Measurement_and_diagnosis_of_partial_discharges_in_low_voltage/Partial_Discharge-Feb2017_EN.pdf
- [12] ČSN EN IEC 60034-27-1: *Točivé elektrické stroje - Část 27-1: Offline měření částečných výbojů na izolaci statorových vinutí točivých elektrických strojů*. 2018.
- [13] ČSN EN 60085 *Elektrické izolace - Tepelné hodnocení a značení*. 2. Praha, 2008.
- [14] *Silent-czech* [online]. 1996 [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: <http://www.silent-czech.cz/>
- [15] Nomex 410. *Dupont* [online]. [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/content/dam/assets/products-and-services/electronic-electrical->

materials/assets/DPT16_21668_Nomex_410_Tech_Data_Sheet_me03_REFERENCE.pdf

- [16] Nomex 411. *Dupont* [online]. [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/content/dam/assets/products-and-services/electronic-electrical-materials/assets/411.pdf>
- [17] Nomex 418. *Dupont* [online]. [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: http://www2.dupont.com/Energy_Solutions/en_US/assets/downloads/418_419.pdf
- [18] Kapton HN. *Dupont* [online]. [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/membranes-and-films/polyimide-films/documents/DEC-Kapton-general-specs.pdf>
- [19] *Myoflex* [online]. [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: https://www.fabrico.com/sites/default/files/datasheets/Myoflex_Flexible_Laminates_Edition_2013.pdf
- [20] ČSN EN 61180-1 *Technika zkoušek vysokým napětím zařízení nízkého napětí - Část 1: Definice, požadavky na zkoušky a zkušební předpisy*. 1997.
- [21] ČSN EN 60060-1 *Technika zkoušek vysokým napětím - Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky*. 2011.
- [22] ČSN EN 60664-1 ed.2: *Koordinace izolace zařízení nízkého napětí - Část 1: Zásady, požadavky a zkoušky*. 2008.
- [23] ČSN EN 61800-5-1 ed.2: *Systémy elektrických výkonových pohonů s nastavitelnou rychlostí - Část 5-1: Bezpečnostní požadavky - Elektrické, tepelné a energetické*. 2008.
- [24] AC Synchronous Servo Motors – AKM™ Series. In: *Kollmorgen* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.kollmorgen.com/en-us/products/motors/servo/akm-series/akm-series-ac-synchronous-motors/ac-synchronous-servo-motors/>
- [25] ČSN EN 60664-4: *Koordinace izolace zařízení nízkého napětí - Část 4: Vliv namáhání napětím s vysokým kmitočtem*. Praha, 2006.
- [26] Demystifying the Use of Frameless Motors in Robotics. *Roboticsbusinessreview* [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.roboticsbusinessreview.com/download/demystifying-use-frameless-motors-robots/>

Seznam příloh

Příloha 1 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou pro testovaný vzorek č.1 ...	60
Příloha 2 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou pro testovaný vzorek č.2 ...	61
Příloha 3 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou pro testovaný vzorek č.3 ...	62
Příloha 4 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou pro testovaný vzorek č.4 ...	63
Příloha 5 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou pro testovaný vzorek č.5 ...	64
Příloha 6 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou pro testovaný vzorek č.6 ...	65
Příloha 7 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3497	66
Příloha 8 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3503	67
Příloha 9 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3508	68
Příloha 10 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3509	69
Příloha 11 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3513	70
Příloha 12 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3516	71
Příloha 13 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3517	72
Příloha 14 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3518	73
Příloha 15 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3522	74
Příloha 16 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3524	75
Příloha 17 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3526	76
Příloha 18 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3530	77
Příloha 19 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3531	78
Příloha 20 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3532	79
Příloha 21 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3539	80
Příloha 22 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3562	81

Příloha 1 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou pro testovaný vzorek č.1



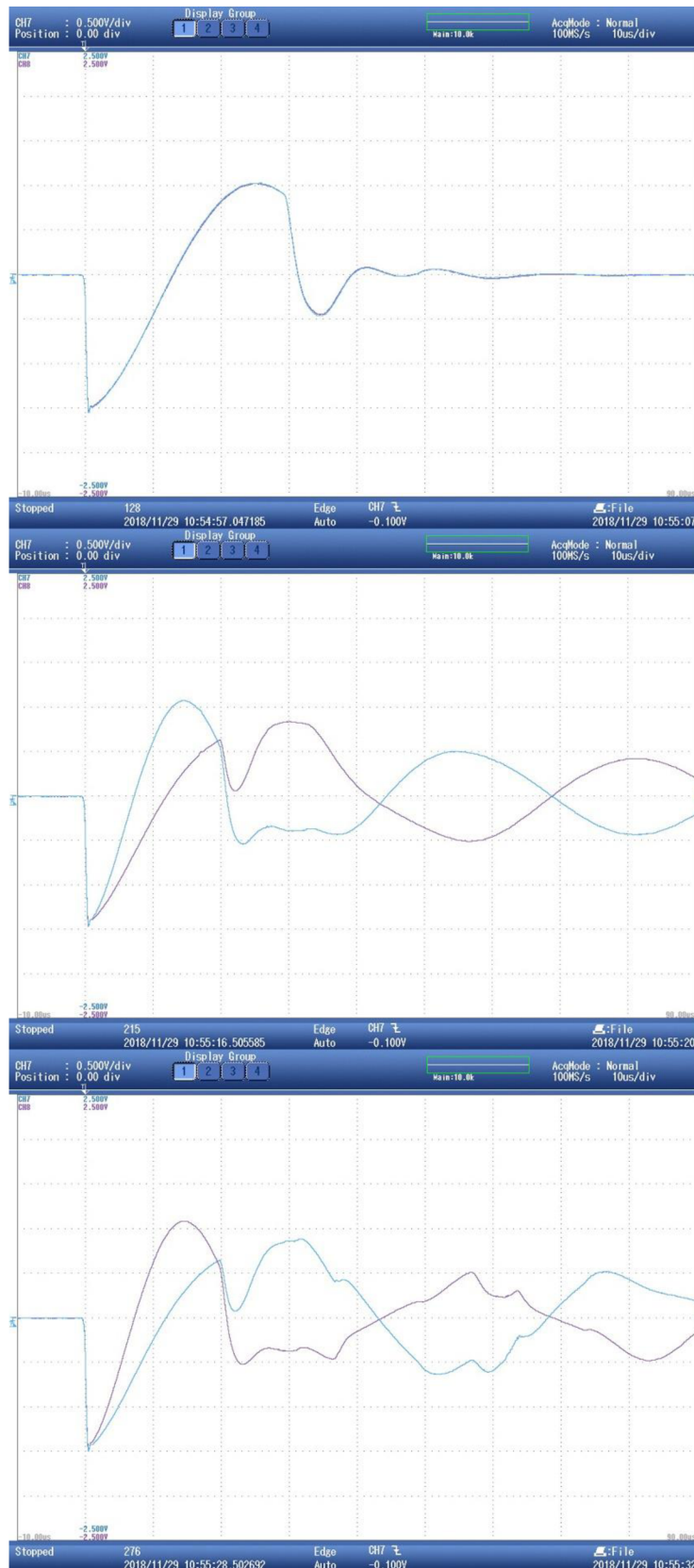
Příloha 2 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou pro testovaný vzorek č.2



Příloha 3 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou pro testovaný vzorek č.3



Příloha 4 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou pro testovaný vzorek č.4



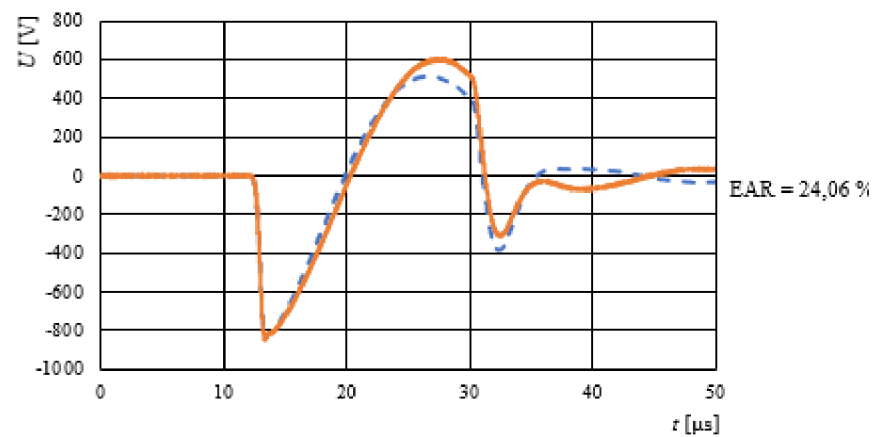
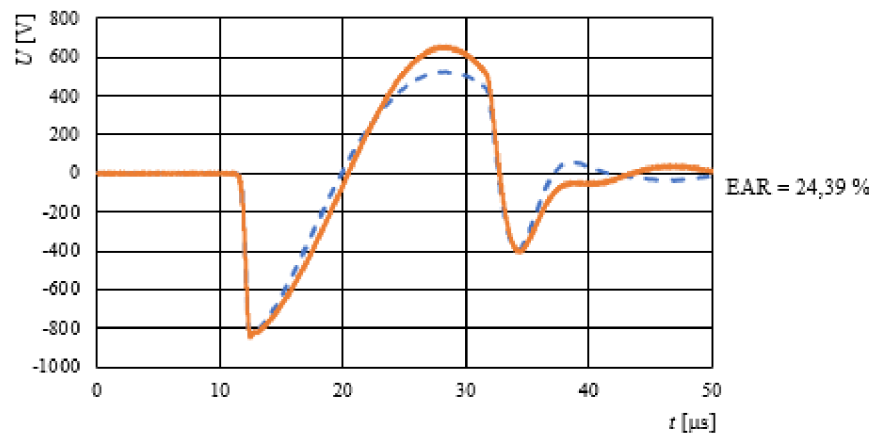
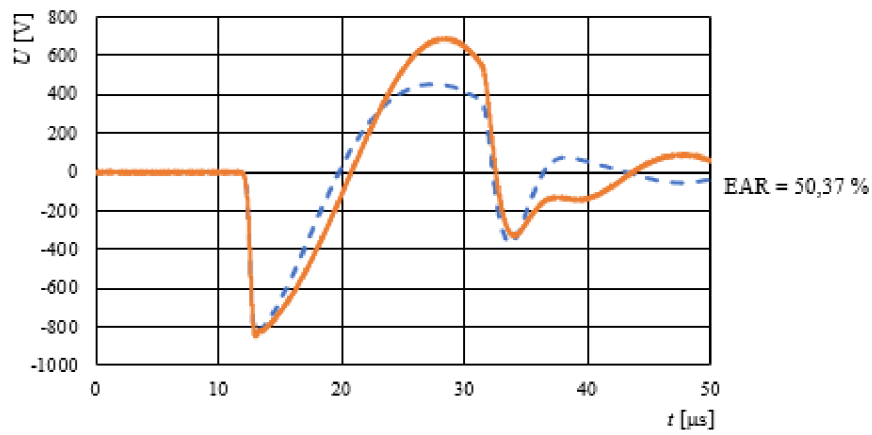
Příloha 5 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou pro testovaný vzorek č.5



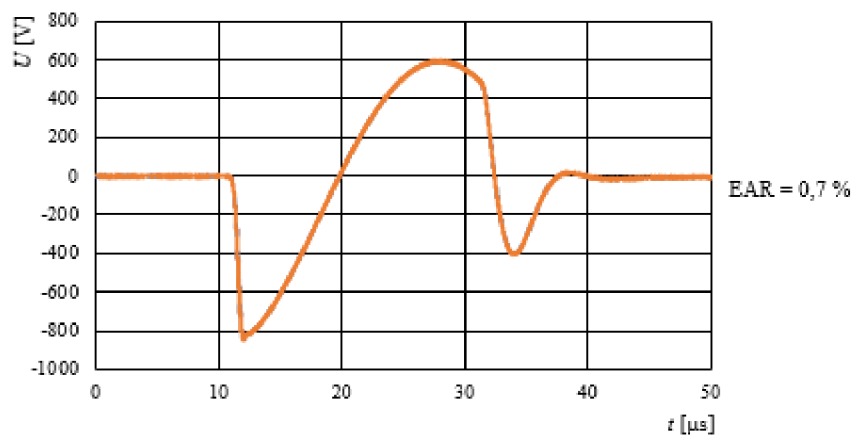
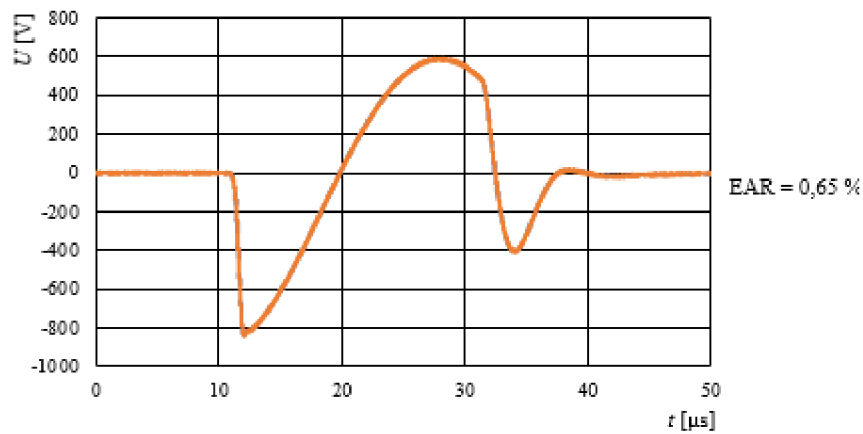
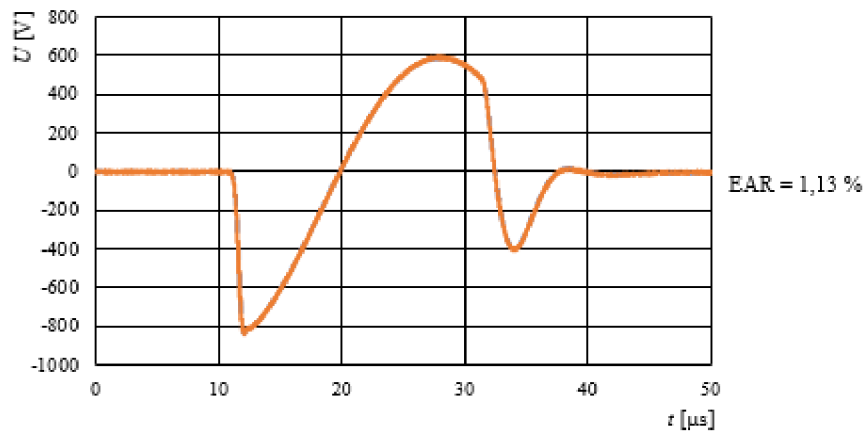
Příloha 6 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou pro testovaný vzorek č.6



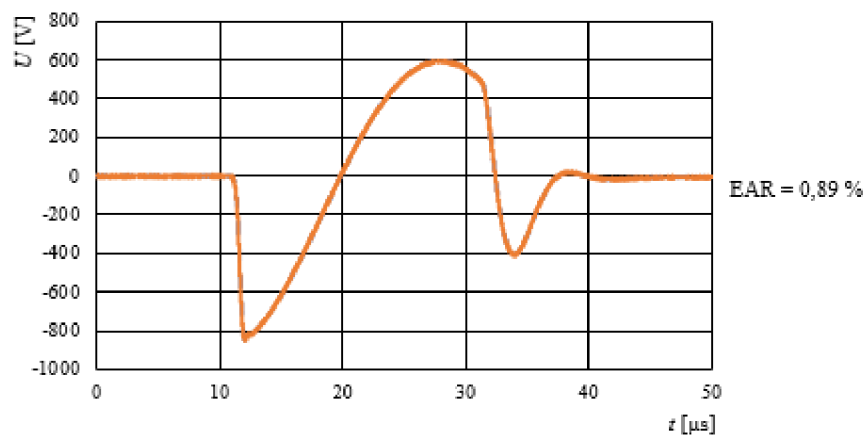
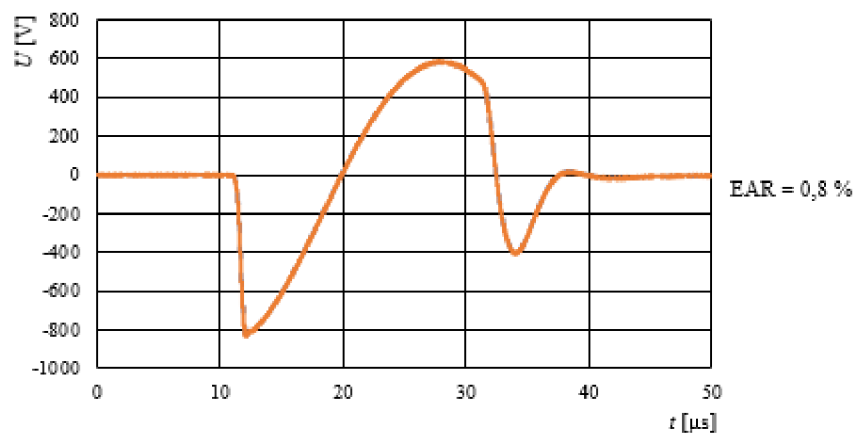
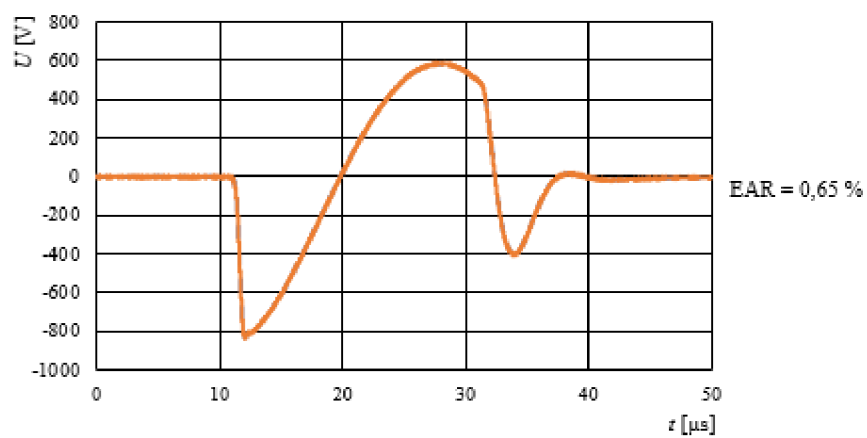
Příloha 7 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3497



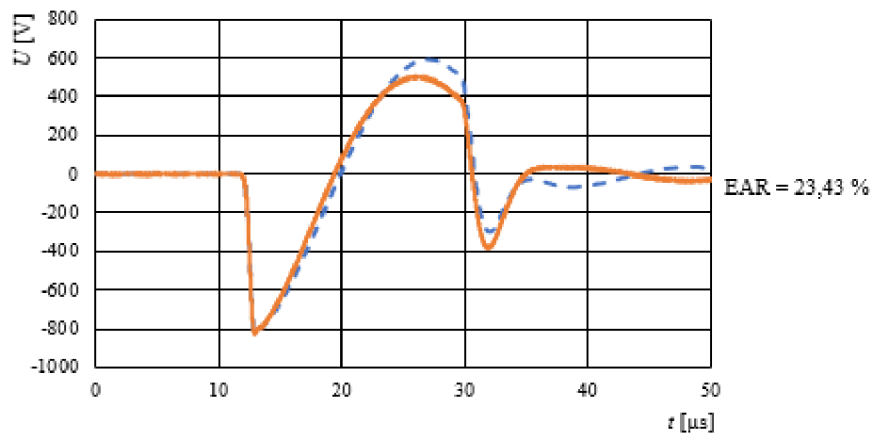
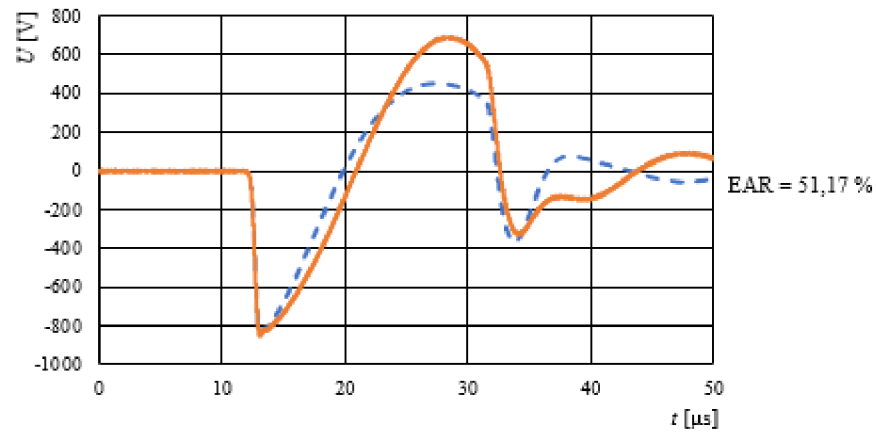
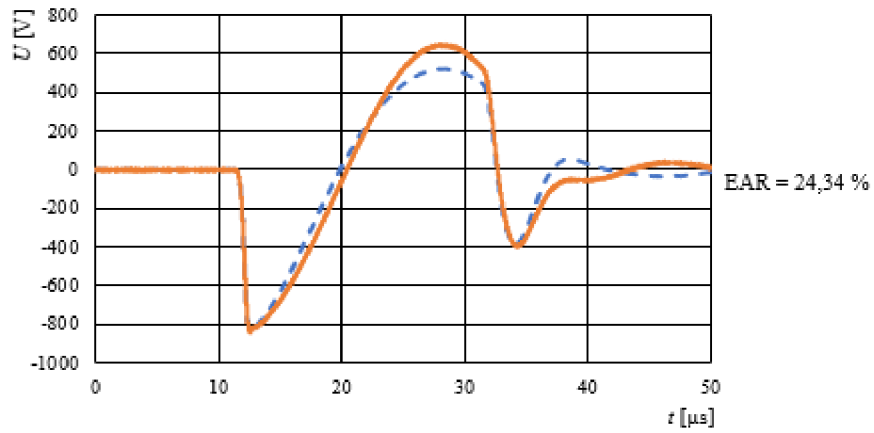
Příloha 8 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3503



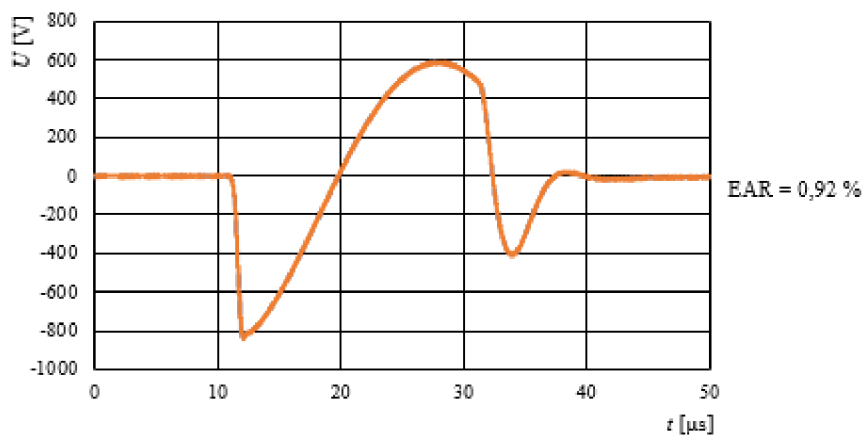
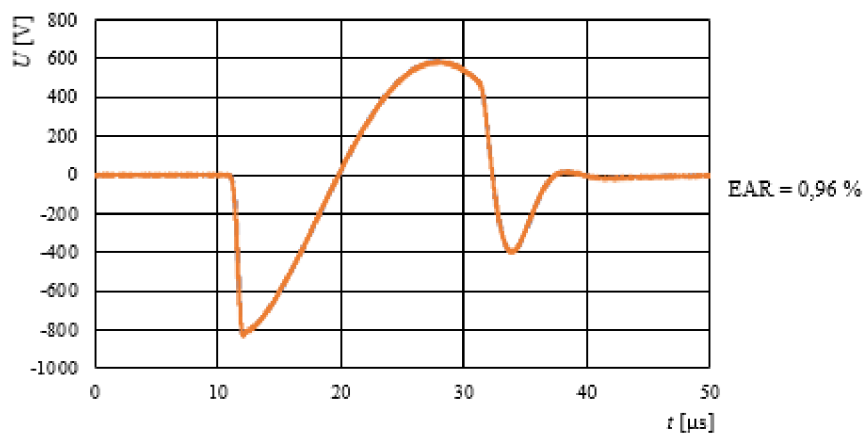
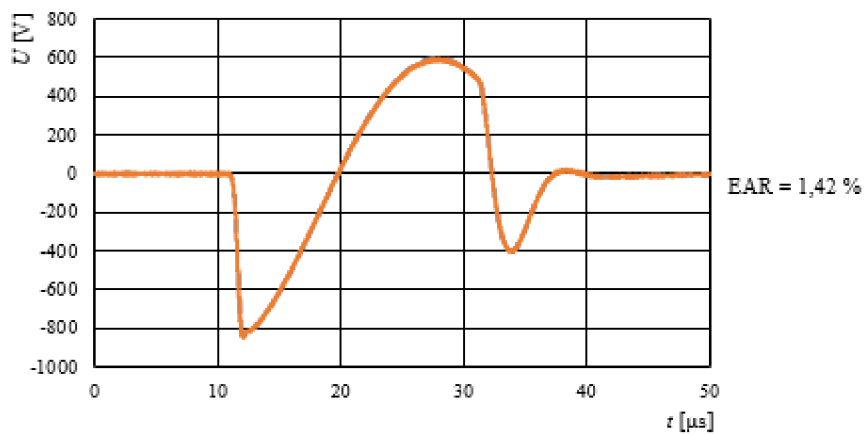
Příloha 9 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3508



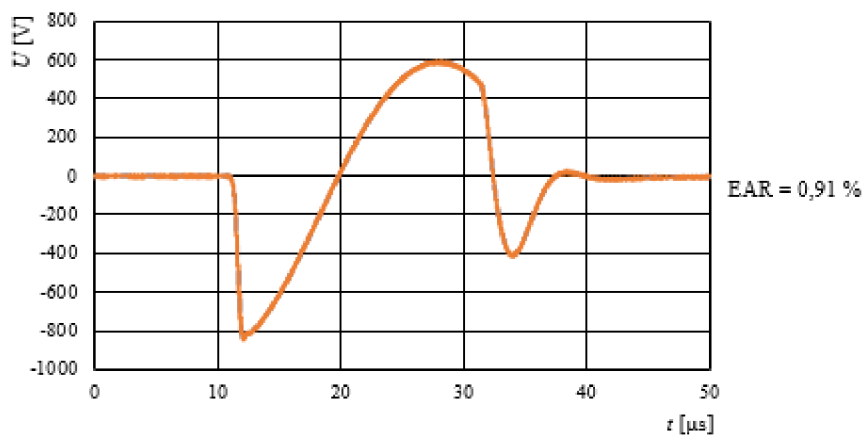
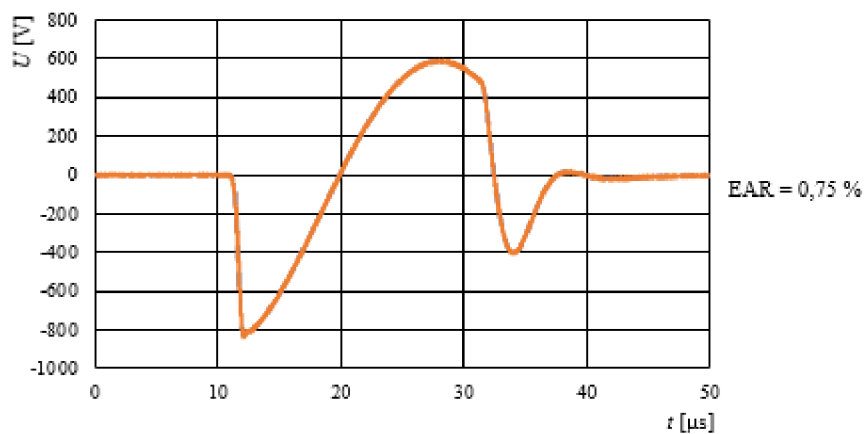
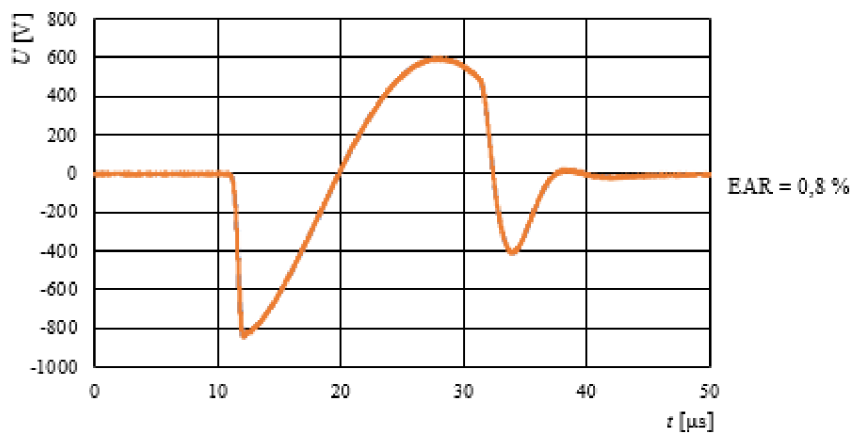
Příloha 10 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3509



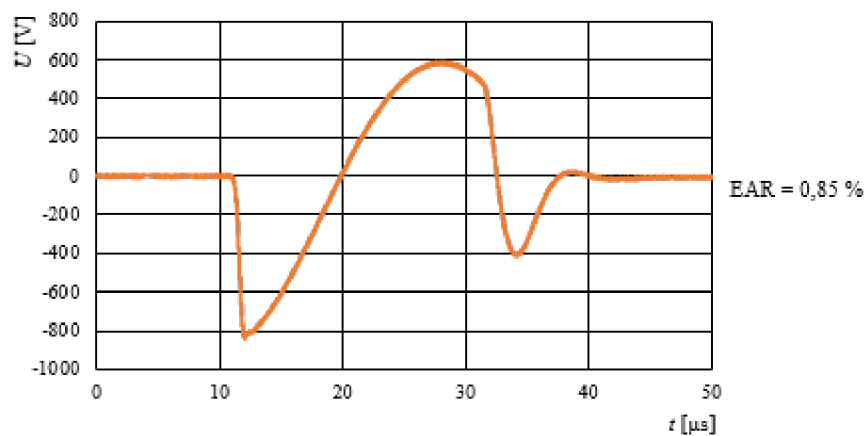
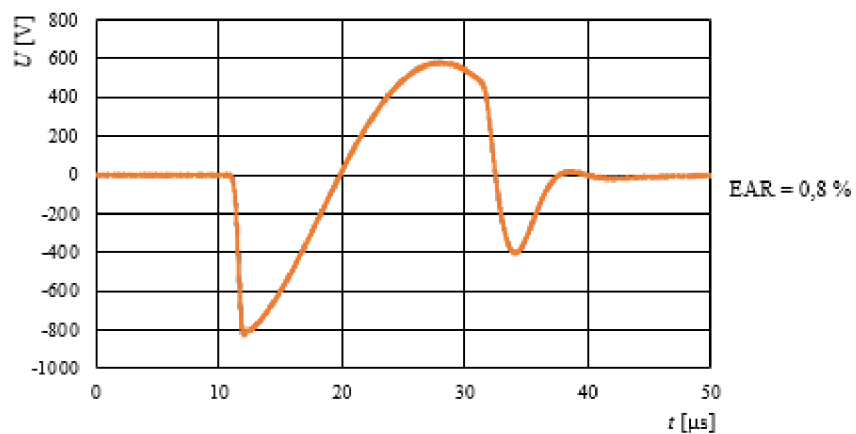
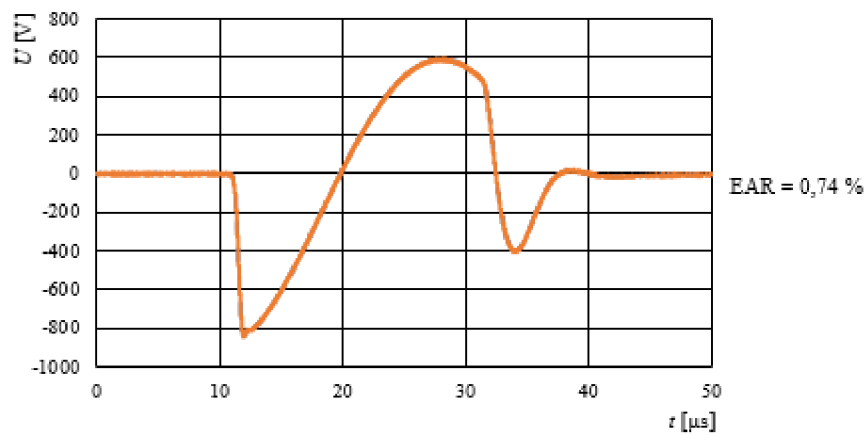
Příloha 11 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3513



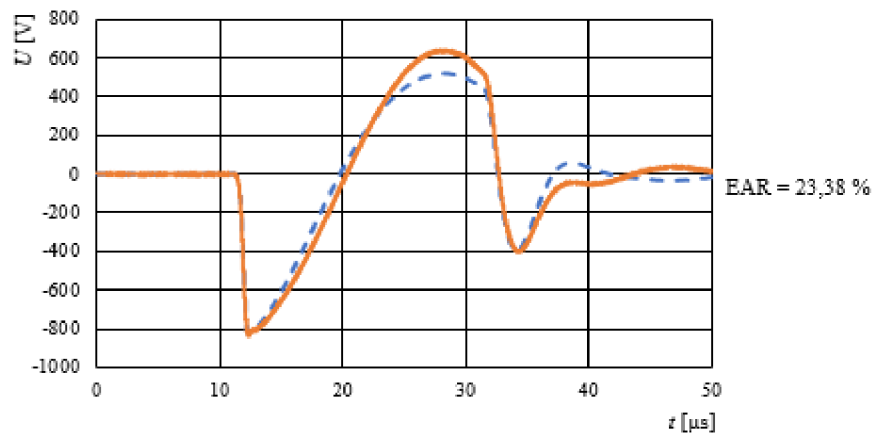
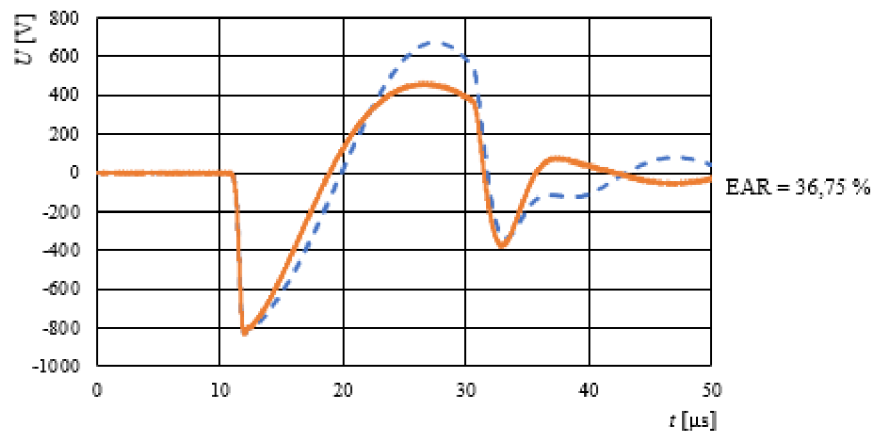
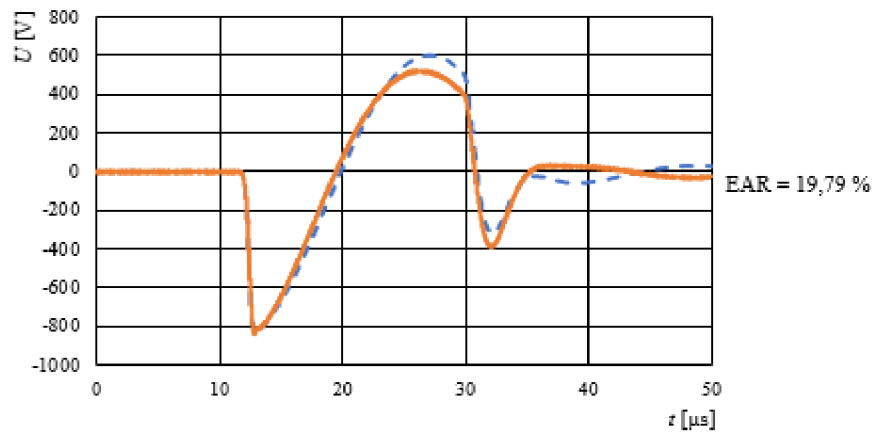
Příloha 12 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3516



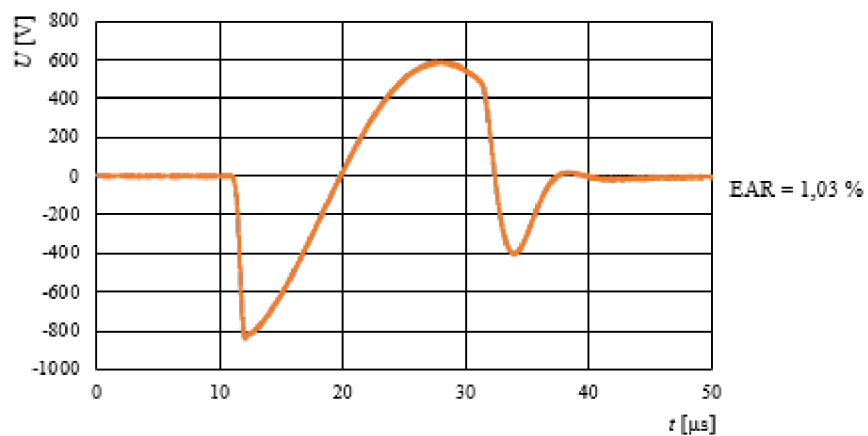
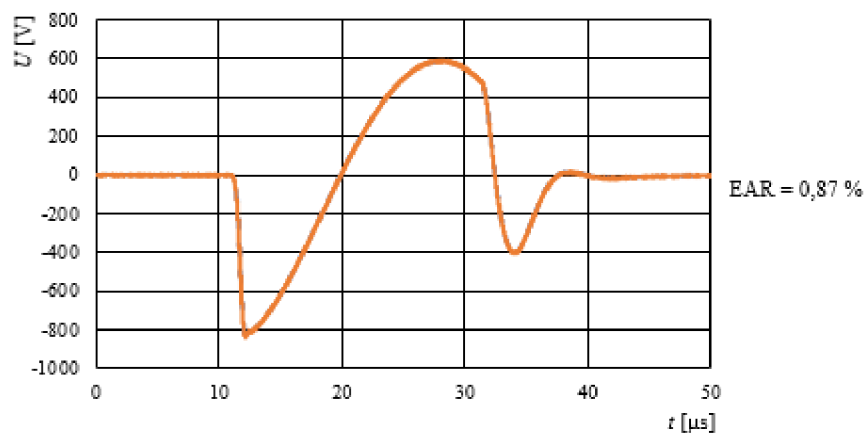
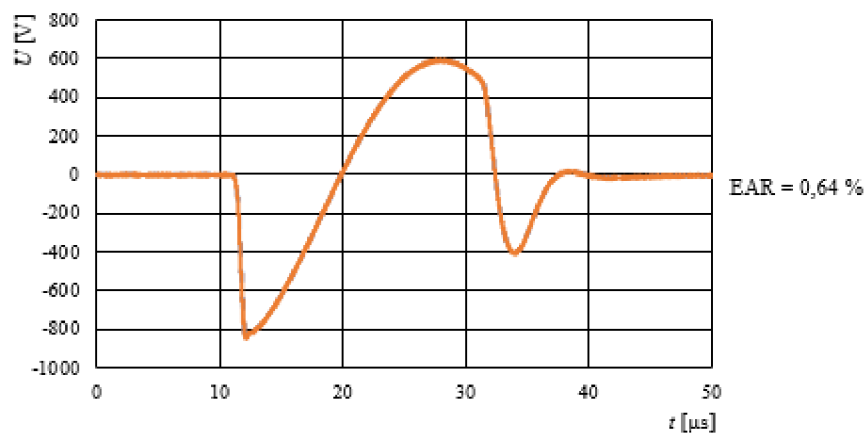
Příloha 13 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3517



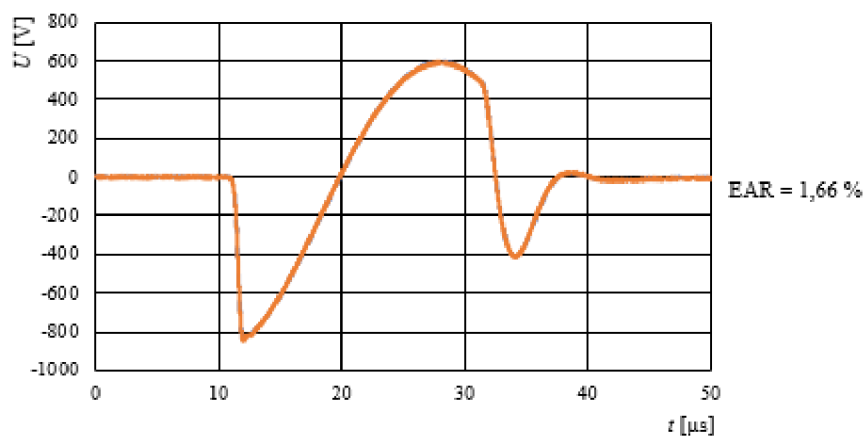
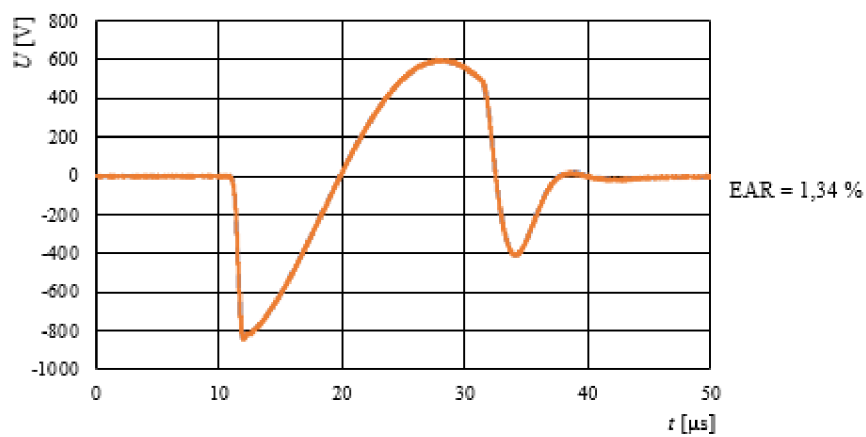
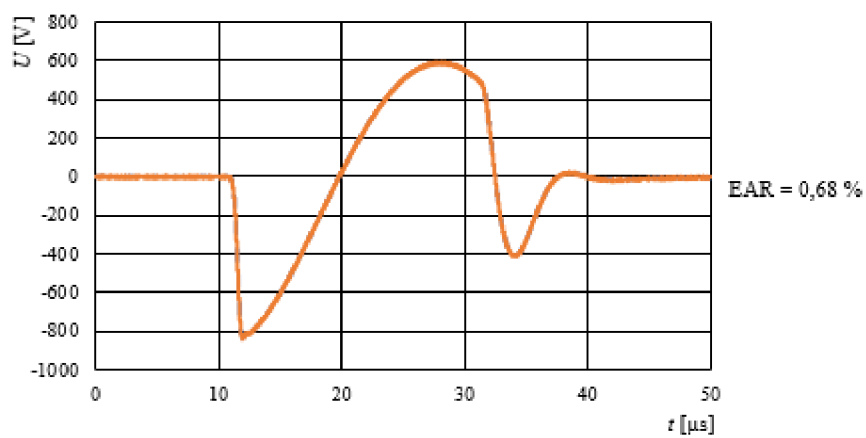
Příloha 14 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3518



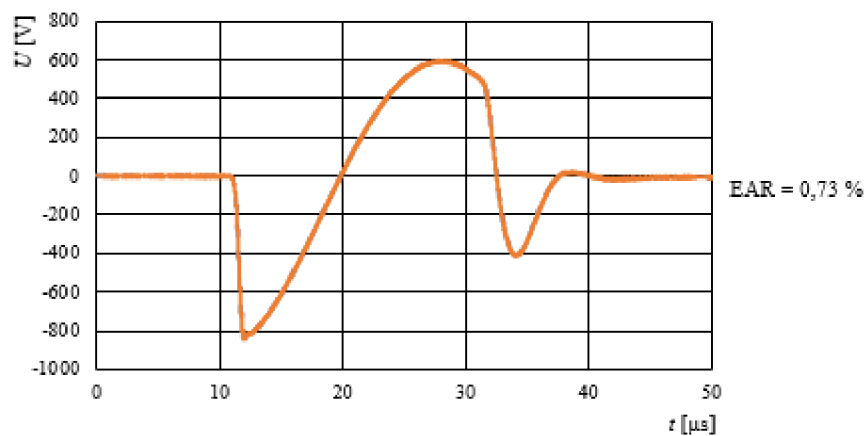
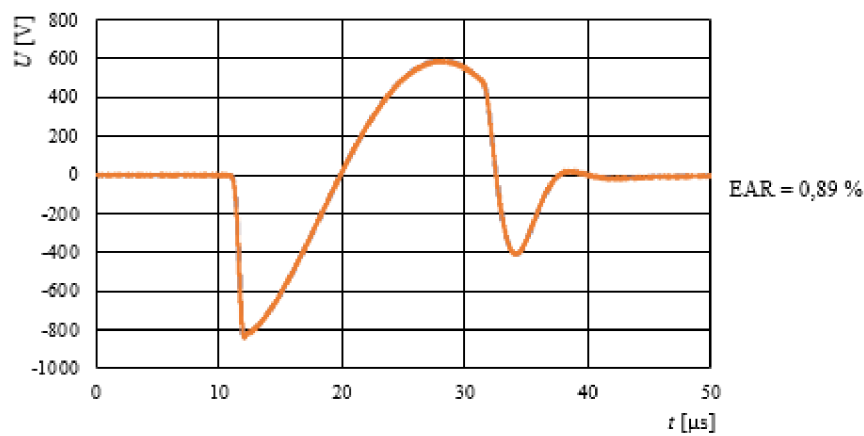
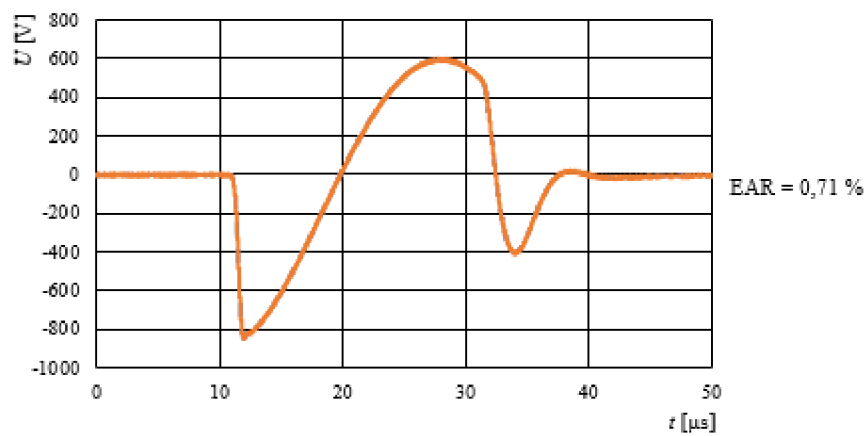
Příloha 15 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3522



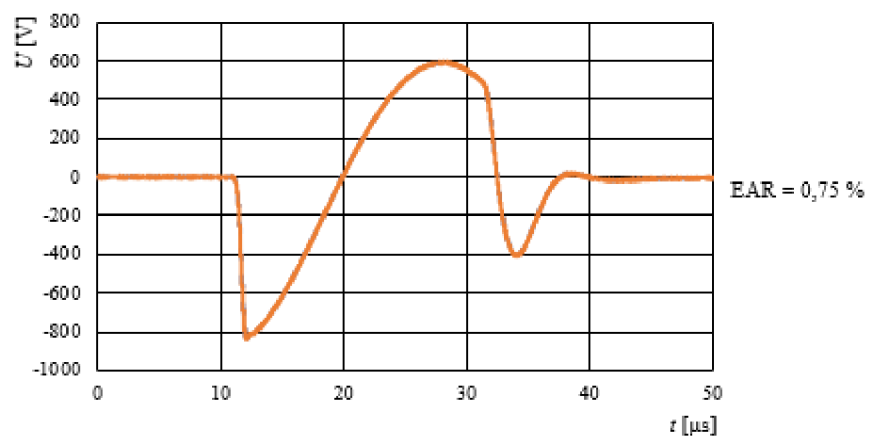
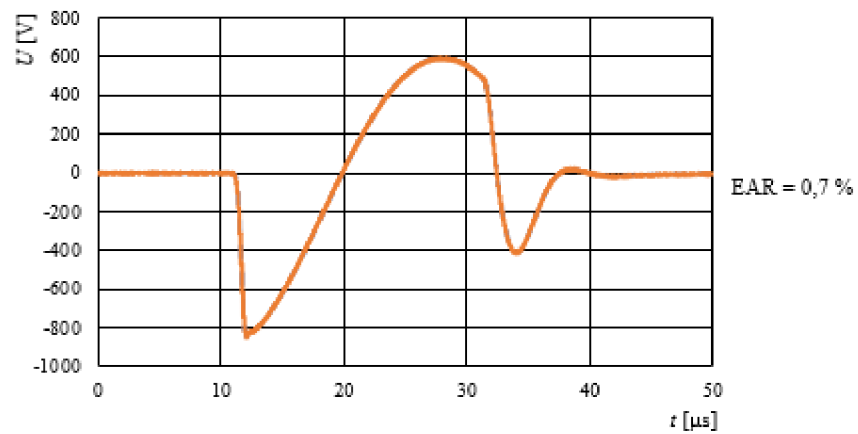
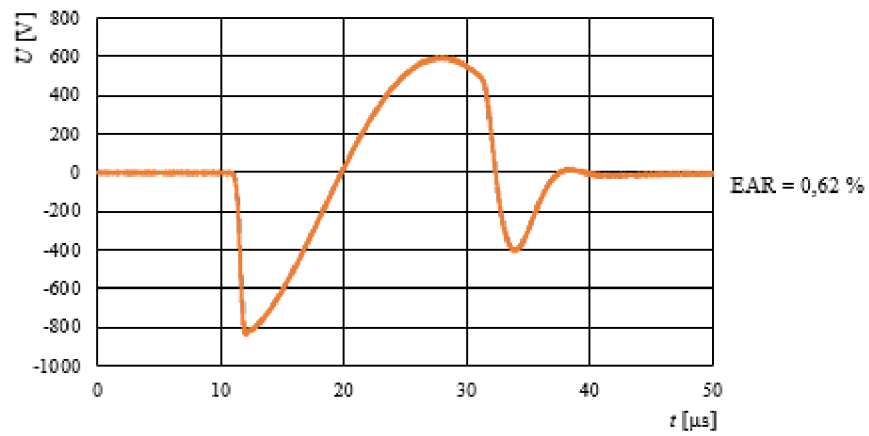
Příloha 16 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3524



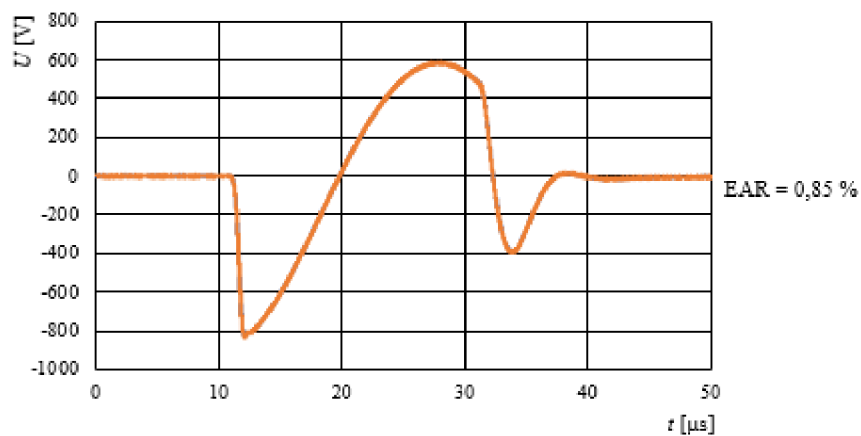
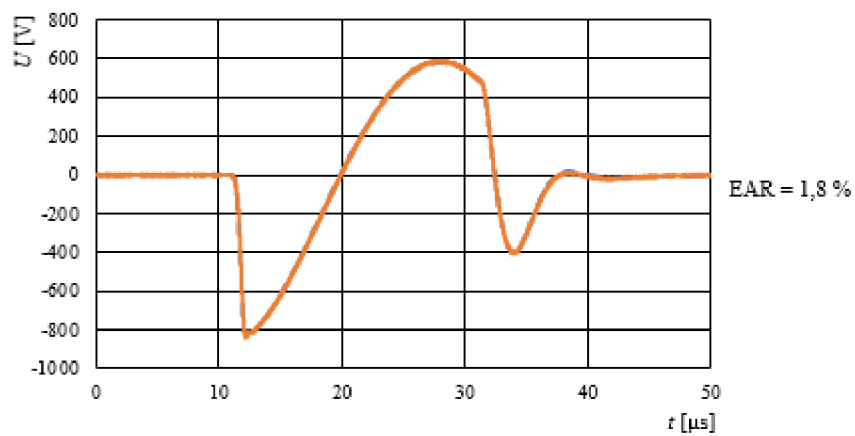
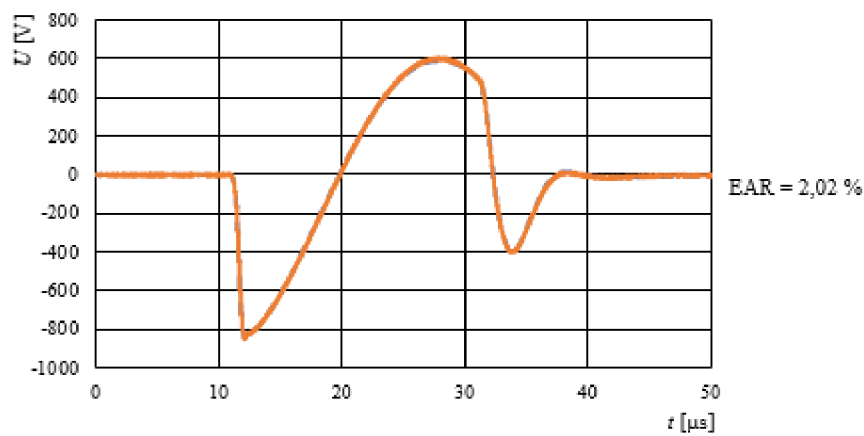
Příloha 17 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3526



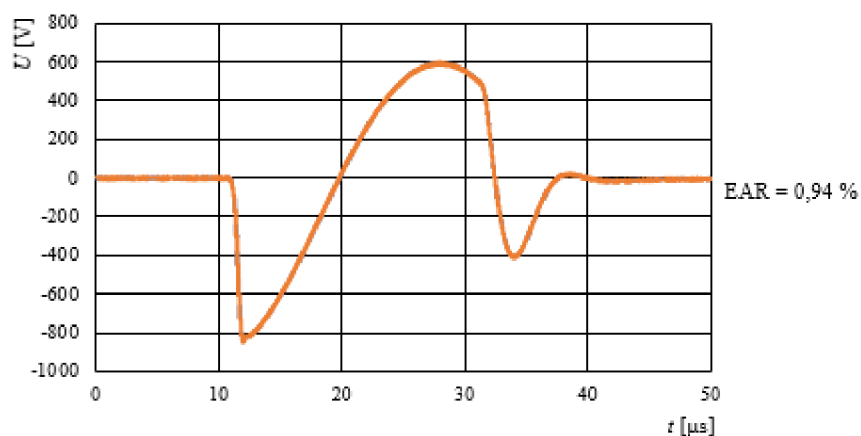
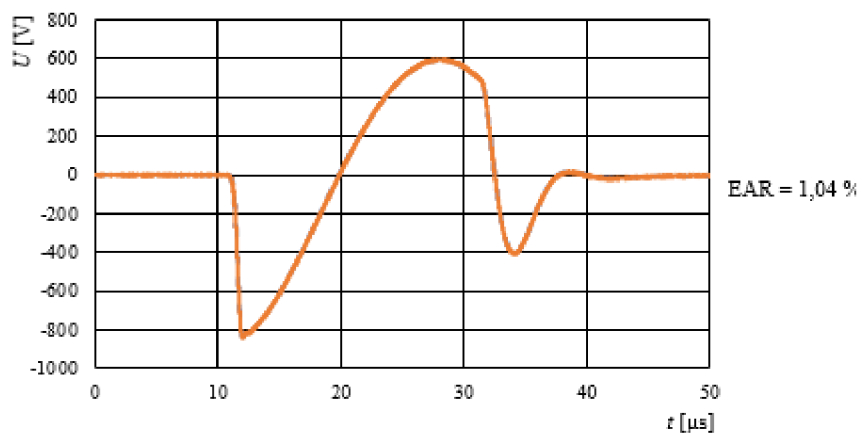
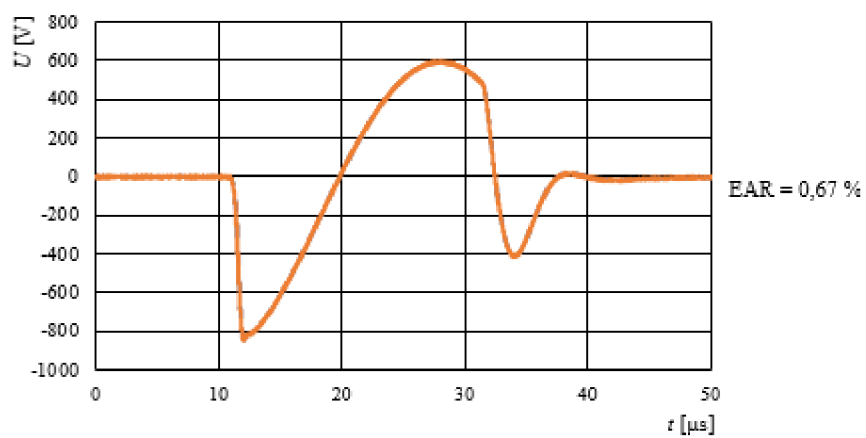
Příloha 18 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3530



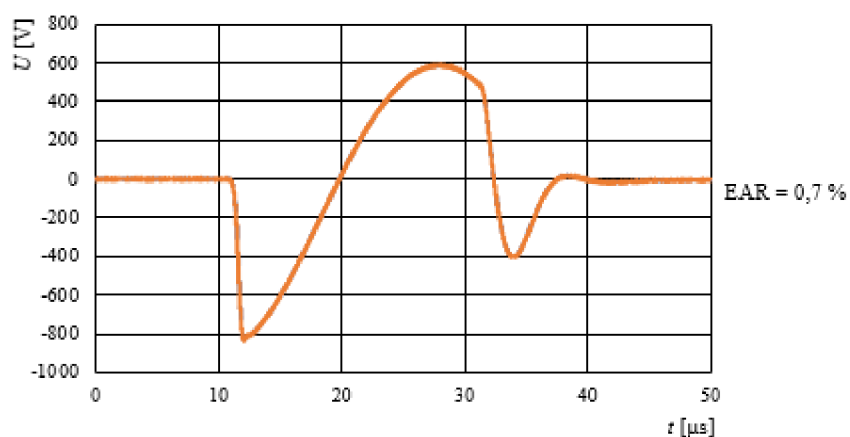
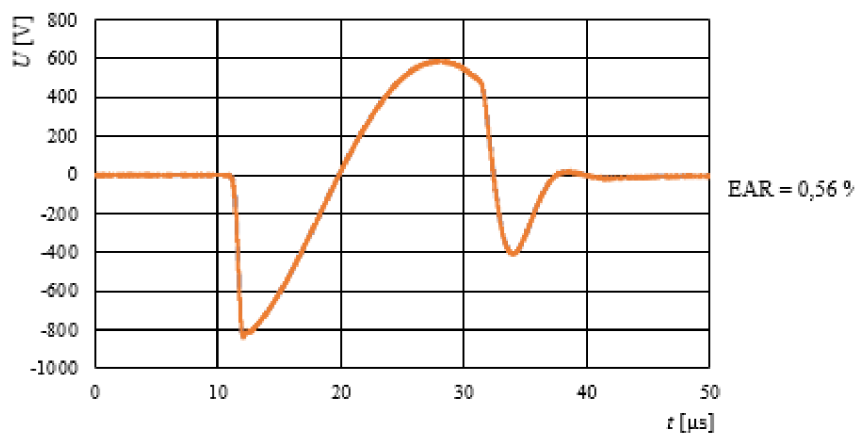
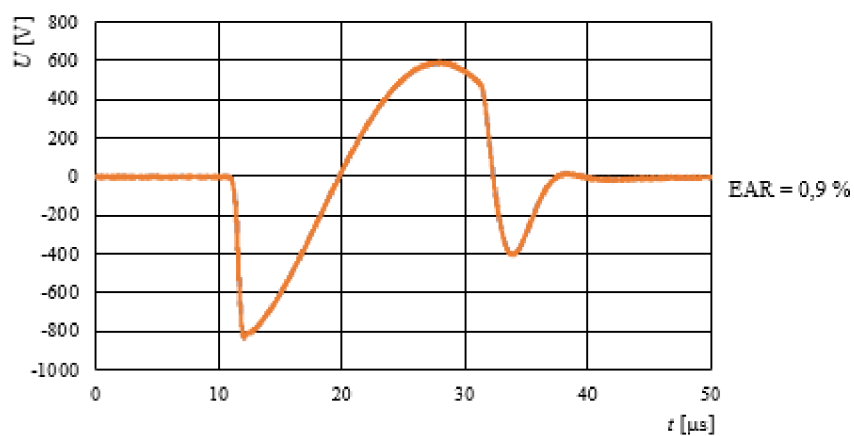
Příloha 19 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3531



Příloha 20 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3532



Příloha 21 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3539



Příloha 22 - Průběhy oscilací ze zkoušky rázovou vlnou vzorku 3562

