

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Karel Künzel

Pracoviště na měření frekvenčních charakteristik transformátorů

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Jiří Petr, CSc.

Katedra:

Katedra elektrotechnologie

Datum vypracování práce (uzavření rukopisu):

Praha, květen 2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Karel Künzel**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Technologické systémy

Název tématu: **Pracoviště na měření frekvenčních charakteristik transformátorů**

Pokyny pro vypracování:


- 1/ Vypracujte stručný teoretický rozbor metody měření frekvenčních charakteristik transformátorů
- 2/ Sestavte a oživte pracoviště na měření frekvenčních charakteristik s využitím generátoru RIGOL DG1022 a osciloskopu RIGOL DS1052E
- 3/ Vypracujte a ověřte program vhodný pro měření frekvenčních charakteristik transformátorů na sestaveném pracovišti

Seznam odborné literatury:

- [1] Dokumentace firmy Doble Engineering Company
- [2] Technická dokumentace RIGOL (DG1022, DS1052E)

Vedoucí: doc. Jiří Petr Ing., CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016


Ing. Karel Dušek, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 25. 3. 2015

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Petrovi, CSc. za cenné rady, připomínky a metodické vedení při tvorbě práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 11. 5. 2015

Karel Künzel

Obsah

Poděkování	1
Prohlášení.....	2
Obsah	3
1 Úvod	4
2 Teoretický rozbor problematiky	6
2.1 Metody měření frekvenčních charakteristik	6
2.2 Historie	6
2.3 Představení SFRA metody	7
2.4 Rozbor metodiky měření frekvenčních charakteristik	11
2.5 Analýza charakteristik	26
2.6 Shrnutí	33
3 Sestavení a oživení pracoviště	34
4 Program k ovládnání měřicího pracoviště	35
4.1 Specifikace požadavků na programové řešení	35
4.2 Úvodní analýza	36
4.3 Návrh programu	41
5 Ověření funkčnosti pracoviště	49
5.1 Přístrojové vybavení	49
5.2 Měřený transformátor	50
5.3 Charakteristiky	51
6 Závěr	59
Seznam zkratk	61
Seznam použité literatury a pramenů	62
Přílohy	65
Příloha 1 – Návod k ovládnání měřicího pracoviště	65
Příloha 2 – Seznam prvků uživatelského rozhraní	67
Příloha 3 – Seznam subVI	68
Příloha 4 – Vývojový diagram	73
Abstrakt	75
Abstract	76
Klíčová slova.....	77

1 Úvod

V oblasti diagnostiky poruch transformátorů znamenalo rozšíření metody analýzy stavu vinutí transformátorů zvané SFRA (Sweep Frequency Response Analysis) značný pokrok. Tato metoda se stala široce rozšířenou a akceptovanou teprve v posledních několika desetiletích, ačkoli její počátky lze vysledovat až do 80. let minulého století. Metoda SFRA se stala značně populární proto, že se jedná o metodu neinvazivní, která umožňuje především diagnostiku změn geometrie vinutí bez nutnosti rozebrání transformátoru, což je její velkou předností.

Podstata metody spočívá ve změření závislosti impedance transformátoru, ke kterému je přistupováno jako k *black box*, na frekvenci. Na svorku měřeného objektu je přiveden budicí nízkonapěťový sinusový signál s postupně se měnící frekvencí a je zaznamenáváno napětí na svorce výstupní v závislosti na této frekvenci. Charakteristika získaná tímto měřením není analyzována sama o sobě, ale představuje unikátní záznam dané konfigurace (stav transformátoru a dané zapojení) a dojde-li ke změně této konfigurace, bude nová charakteristika odlišná od charakteristiky původní. Jedná se tudíž o metodu komparativní, kdy analýza poruch transformátoru je založena na porovnání nově získané charakteristiky s charakteristikou referenční. Je zřejmé, že existuje celá řada různých kombinací zapojení svorek při měření a jedna charakteristika je tudíž nositelem pouze dílčí informace o stavu transformátoru, a proto jsou při diagnostice měřeny celé sady.

Metoda SFRA je velmi citlivá a postupně se ukazuje, že je schopná detekce velmi široké palety závad, přičemž k tomu, jak se jednotlivé závady projevují, dospěla odborná veřejnost vesměs experimentálně. Citlivost metody je zároveň její nevýhodou, protože je tím pádem velmi náchylná k rušení a výsledné charakteristiky jsou ovlivněny mnoha okolními vlivy, které nesouvisí se stavem transformátoru. Z tohoto důvodu bylo v posledních letech vypracováno několik mezinárodních, národních i firemních standardů majících za úkol zajistit konzistentní metodiku při měřeních a tím maximalizovat opakovatelnost měření. Proto se tato práce v první řadě zaměřuje na systematickou analýzu doporučení obsažených v těchto standardech a odborné literatuře s cílem je použít při návrhu a realizaci nového pracoviště pro měření frekvenčních charakteristik transformátorů katedry elektrotechnologie.

Vycházeje z good engineering practice v oblasti měření frekvenčních charakteristik transformátorů bude následně sestaveno a oživeno nové měřicí pracoviště, které bude sloužit jako náhrada za již zastaralé pracoviště původní. Cílem je pracoviště, které bude používat soudobé komunikační rozhraní bez nutnosti komunikace prostřednictvím speciálního zařízení, bude mít moderní a uživatelsky příjemné ovládací prvky a bude vyžadovat kratší čas k proměření frekvenční charakteristiky při zachování přesnosti měření. Samotné měření bude plně automatizováno a bude řízeno pouze prostřednictvím počítače,

k čemuž bude na základě specifikace zadání provedena analýza a návrh vhodného programu k řízení pracoviště.

Na závěr bude ověřena funkčnost nového měřicího pracoviště. Cílem bude nejprve ověřit, že pracoviště splňuje alespoň základní požadavky identifikované v analýze standardů a odborných publikací. Vedle toho bude též provedena komparace nově získaných charakteristik s charakteristikami referenčními naměřenými na totožném objektu ještě pomocí původního pracoviště. V neposlední řadě bude prověřena opakovatelnost měření na novém pracovišti.

Výsledkem by tak mělo být nové pracoviště splňující současné požadavky, které bude dobře použitelné jak při výuce, tak při odborné práci, a které bude moci být dále zlepšováno například v rámci další studentské závěrečné práce.

2 Teoretický rozbor problematiky

2.1 Metody měření frekvenčních charakteristik

Existují dva etablované přístupy k měření frekvenčních charakteristik, tedy tzv. FRA (Frequency Response Analysis). První způsob jejich měření je SFRA (Sweep FRA), při kterém je na vstupní svorku přiveden signál se sinusovým průběhem s konstantní periodou a na výstupní svorce je snímán signál výstupní. Druhý způsob – IFRA (Impulse FRA) – využívá metody rychlé Fourierovy transformace (Fast Fourier Transform – FFT), kdy na vstupní svorku je přiveden impulz (v ideálním případě by se jednalo o Diracův impulz) a z průběhu výstupního signálu je pak pomocí FFT vypočtena příslušná charakteristika. První z metod, tedy SFRA, je pomalejší, jelikož je měřena hodnota pro každou frekvenci zvlášť, na druhou stranu se ukazuje, že tato metoda je přesnější a má větší frekvenční rozsah. Metoda IFRA je naopak rychlejší, jelikož samotné měření trvá řádově 100 ms a zbytek času představují výpočty, ovšem to přináší výše zmíněné nedostatky. Vedle toho existuje celá řada dalších metod, které jako budicí signál používají například širokopásmový šum, nebo také PRBS (Pseudo Random Binary Sequence).

Jak původní, tak nově navrhované pracoviště měření frekvenčních charakteristik transformátorů katedry elektrotechnologie ČVUT používají metodu SFRA.

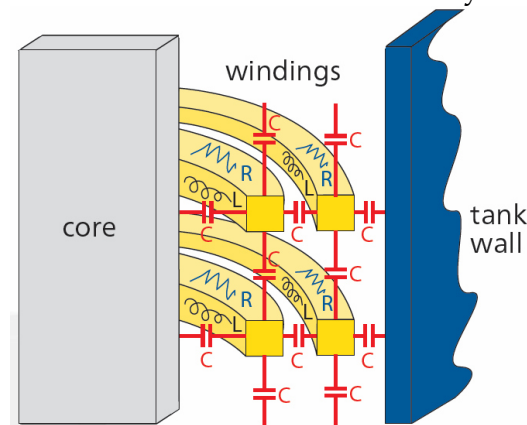
2.2 Historie

Metoda SFRA byla původně vyvinuta společností Ontario Hydro v Kanadě jako metoda mající za cíl odstranit problémy spojené se starší do té doby používanou IFRA metodou. IFRA metoda byla totiž původně vyvinuta jako podpůrná metoda při zkouškách nakrátko a tak, alespoň zpočátku, její použití pro diagnostiku stavu vinutí transformátoru bylo spojeno s řadou problémů. Od roku 1975 proto byla prováděna měření na 5 výkonových transformátorech s cílem vyvinout náhradu IFRA diagnostiky, která by nebyla tak citlivá vůči rušení a obecně nevyžadovala speciálně vyrobené a velmi citlivé měřicí přístroje. Výsledkem, popsáním v článku z roku 1978, který se ovšem nikdy nedostal do povědomí široké odborné veřejnosti, byla právě metoda SFRA. Oproti dnešním standardně používaným měřicím sestavám se odlišovala použitím čtyř kabelů (jeden pro připojení generátoru, dva pro měření napětí a jeden pro měření výstupního proudu), svým i na dnešní poměry výborným dynamickým rozsahem a přesností (dynamický rozsah byl 120 dB s rozlišením 0,01 dB a 0,01 ° v případě fázové charakteristiky) a tím, že se jednalo o tři samostatné přístroje (generátor, síťový analyzátor a plotter). [15] Kupodivu se tato diagnostická metoda alespoň zpočátku nedostala do povědomí

širší odborné veřejnosti. Značný rozmach zaznamenala SFRA diagnostika až v 90. letech minulého století nejprve ve Velké Británii a v dnešní době jí už patří v oblasti diagnostiky transformátorů nezastupitelné místo po celém světě.

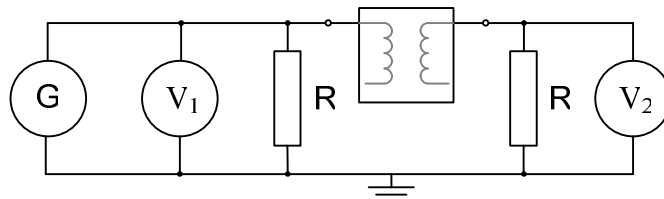
2.3 Představení SFRA metody

Metody FRA měření spočívají ve zjištění závislosti impedance měřeného objektu (transformátoru) na frekvenci. V případě měření frekvenčních charakteristik běžných elektrotechnických součástek (rezistor, cívka a kondenzátor) je samozřejmé, že s rostoucí frekvencí, tedy zkracující se vlnovou délkou, postupně vzrůstá význam parazitních vlastností reálné součástky. Nejinak tomu je v případě transformátoru, který ovšem z tohoto pohledu představuje mnohem složitější obvod s rozprostřenými parametry s mnohonásobně více prvky, které reprezentují odpor vinutí, vlastní a vzájemné indukčnosti jednotlivých závitů, kapacitu mezi závity, závity a jádrem, závity a nádobou transformátoru a podobně. Se zkracující se vlnovou délkou pak roste schopnost metody detekovat čím dál tím menší změny.



Obr. 1 Řez transformátorem zvýrazňující dílčí parametry

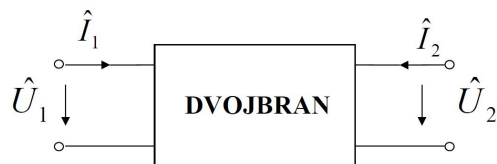
Nebudeme-li brát v potaz všemožná dílčí úskalí spojená s měřením frekvenčních charakteristik transformátorů, je popis metody SFRA velmi jednoduchý. Jak již bylo řečeno, frekvenční charakteristiky popisují závislost impedance měřeného objektu na frekvenci. K tomu, aby SFRA analyzátor mohl tyto charakteristiky získat, musí obsahovat generátor sinusového napětí a měření vstupní a výstupní veličinu (většinou napětí).



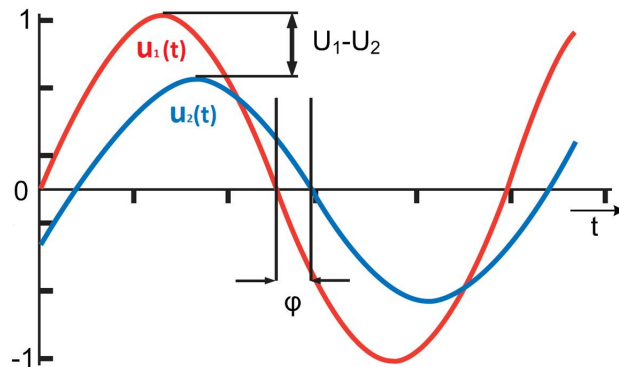
Obr. 2 Zjednodušené zapojení při SFRA měření

Měřený objekt – transformátor je na vstupu buzen vstupním signálem $u_1(t)$ a na výstupu je měřeno napětí $u_2(t)$. Uvážíme-li, že přívodní kabely

transformátoru jsou ukončeny, aby bylo zabráněno nežádoucím odrazům signálu, zakončovacím odporem R , jak je naznačeno na výše uvedeném zjednodušeném schématu, tvoří měřený obvod dvojbran a výsledná charakteristika je charakteristikou tohoto dvojbranu.



Obr. 3 Dvojbran



Obr. 4 Vstupní a výstupní napětí

Na vstup dvojbranu je přivedeno sinusové napětí generátoru

$$u_1(t) = U_1 \sin(\omega t) \quad , \text{ kde } \omega \in (10 \text{ Hz}, 20 \text{ MHz}),$$

a napětí na výstupu pak lze popsat

$$u_2(t) = U_2 \sin(\omega t + \varphi) .$$

Je-li zanedbán vliv rušení a nelinearity obvodu, mají oba průběhy sinusový průběh se stejnou periodou, která odpovídá frekvenci budícího signálu. Z rovnic i obrázku je dobře vidět, že se ale liší v amplitudě a jsou vzájemně časově posunuty. Vzájemný vztah obou napětí vyjadřuje jejich přenos, který určuje jak jejich poměr velikosti napětí (tzv. velikost přenosu), tak i jejich vzájemný posun (tzv. fáze přenosu).

Rozdíl okamžitých hodnot napětí $u_1(t)$ a $u_2(t)$ je vyjádřen přenosem dvojbranu, který lze popsat vztahem

$$\hat{A} = \frac{\hat{U}_2}{\hat{U}_1} .$$

Přenos \hat{A} je na kmitočtu závislé komplexní číslo, tedy

$$\hat{A} = \text{Re}[A] + j \text{Im}[A] , \text{ nebo též } \hat{A} = |A|e^{j\varphi} ,$$

kde absolutní hodnota (velikost) přenosu je dána vztahem

$$|A| = \sqrt{\text{Re}^2[A] + \text{Im}^2[A]} ,$$

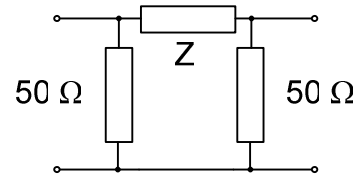
a fázový posun vztahem

$$\varphi = \text{arctg} \frac{\text{Im}[A]}{\text{Re}[A]} .$$

Závislost přenosu \hat{A} na kmitočtu popisuje přenosová funkce $H(j\omega)$. Vzhledem k tomu, že použité koaxiální kabely mají obvykle charakteristickou impedanci 50Ω , pročež jsou na jejich koncích připojeny zakončovací odpory téže velikosti, tedy 50Ω , skládá se měřená impedance ze sérioparalelní kombinace těchto odporů a neznámé impedance Z .

Vztah přenosové funkce $H(j\omega)$ a měřené impedance objektu $Z(j\omega)$ má potom tvar

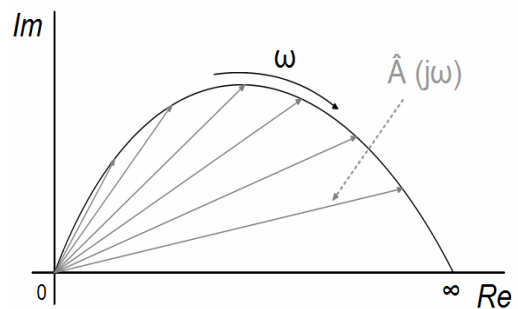
$$H(j\omega) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{50}{Z(j\omega) + 50}$$



Obr. 5 Schéma pro odvození měřené impedance

Grafické znázornění závislosti přenosu na frekvenci je možné několika způsoby. První možností je znázornění pomocí Nyquistova diagramu, kdy jsou hodnoty přenosu při všech frekvencích vyneseny do Gaussovy roviny jako vektory. Imaginární část přenosu je na svislé ose a reálná část přenosu na ose vodorovné a přenos \hat{A} pro danou frekvenci představuje orientovanou úsečku s počátkem ležícím v počátku Gaussovy roviny.

V jednom grafu je tak vynesena jak velikost přenosu, která odpovídá délce orientované úsečky, tak i jeho fáze, které odpovídá úhel, který úsečka svírá s reálnou osou. Všechny orientované úsečky potom dohromady opisují v Gaussově rovině křivku – amplitudovo-fázovou nebo také Nyquistovu charakteristiku.

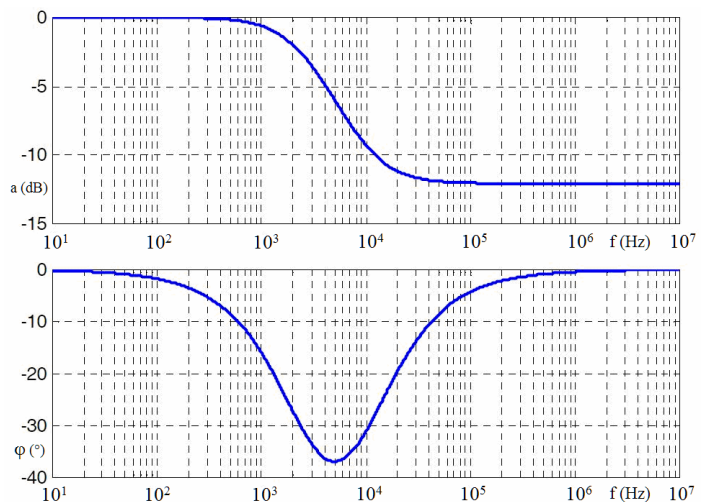


Obr. 6 Nyquistův diagram

Druhým způsobem grafického znázornění závislosti přenosu na frekvenci, který je používán častěji možná i proto, že je jednodušší, je Bodeho diagram. Oba již zmíněné parametry, tedy velikost přenosu $|A| = f(\omega)$ a jeho fáze $\varphi = f(\omega)$ jsou vynášeny do grafu samostatně jako veličiny závislé na frekvenci. Z charakteristik je pak dobře patrná hodnota velikosti nebo fáze přenosu při dané frekvenci. Charakteristiky jsou často, a nejinak tomu je v případě SFRA charakteristik, vynášeny za použití logaritmického měřítka na ose frekvence.

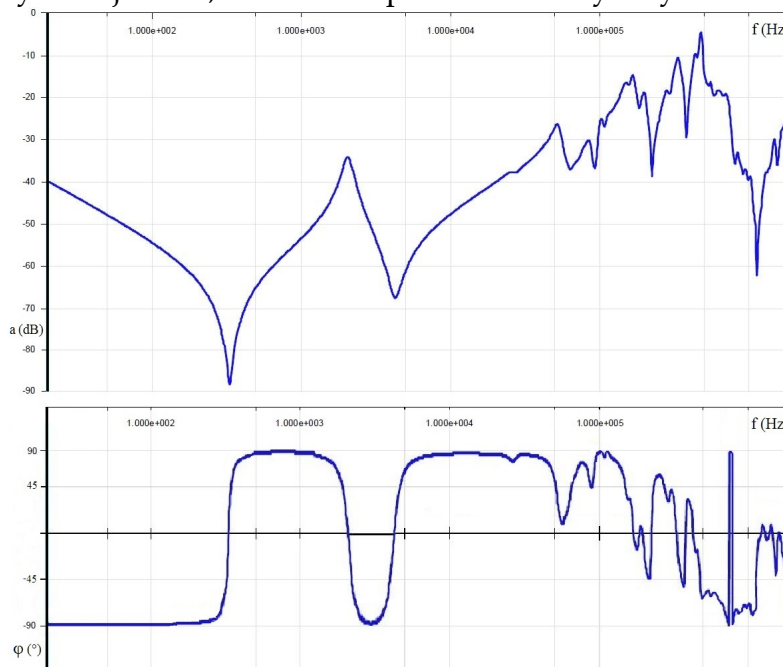
Fázová charakteristika je obvykle vynášena lineárně ve stupních, zatímco amplitudová charakteristika není vynášena jako prostý poměr velikostí obou napětí, ale jako útlum v decibelech, který lze vyjádřit vztahem

$$a = 20 \log \frac{U_2}{U_1} \quad (dB).$$



Obr. 7 Bodeho diagram

Výše uvedené charakteristiky jsou užity jako obecné příklady pouze pro vysvětlení základních vztahů a pro znázornění rozdílů mezi Nyquistovým a Bodeho diagramem. Reálné frekvenční charakteristiky transformátorů měřené SFRA analyzátozem typicky vypadají poněkud odlišně, jelikož jejich průběh se s frekvencí výrazněji mění, obzvláště pak v oblasti vysokých frekvencí.



Obr. 8 Typické frekvenční charakteristiky

Ačkoli řada mezinárodních standardů [1, 2] analýzu fázové charakteristiky v rámci SFRA diagnostiky pomíjí zcela, či ji považuje za metodu jen doplňkovou, ukazuje se, že tuto charakteristiku nelze opomíjet. V odborných textech se často objevuje názor, že fázová charakteristika totiž nepřináší žádnou informaci navíc [31], protože k transformátoru je přistupováno jako k jednoduchému RLC obvodu, pro který platí, že rezonance je spojena s nulovým fázovým posuvem, při kterém mají kapacitní a induktivní reaktance stejnou velikost [1], takže imaginární složka impedance je nulová a ta je rovna pouze činnému odporu – takto nazíráno, nepřináší fázová charakteristika z hlediska SFRA diagnostiky nové informace. Při praktických měřeních však často dochází k tomu, že při rezonanční frekvenci (rezonanční bod charakteristiky) není fázový úhel nulový, což svědčí o tom, že výše uvedené zjednodušení je nepřesné. Lepším přístupem, který nevede k nutnosti nulové fáze při rezonanci, je popis chování transformátoru pomocí obvodu s rozprostřenými parametry. [32] I když je tedy měření fázové charakteristiky problematictější a méně přesné, má své opodstatnění a minimálně může sloužit jako zdroj dodatečných informací [23, 28] při SFRA diagnostice.

Protože je metoda diagnostiky transformátoru na základě měření frekvenčních charakteristik metodou komparativní, je nutné disponovat referenční charakteristikou, se kterou bude možné porovnat charakteristiku nově naměřenou. Takovou charakteristikou bude v ideálním případě

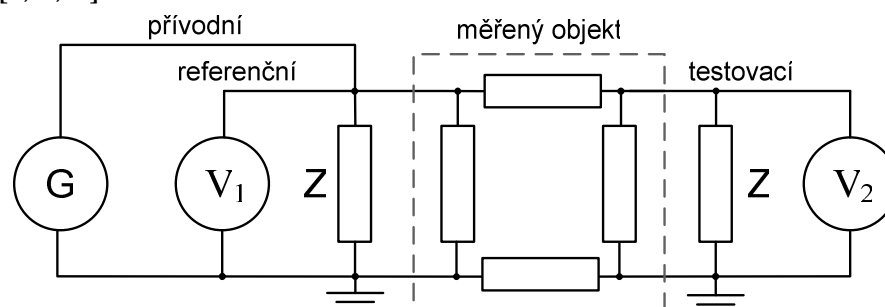
charakteristika téhož transformátoru naměřená v tomtéž zapojení za týchž okolních podmínek (v to případě půjde o tzv. *time-based SFRA*). Není-li taková charakteristika k dispozici, je také možné ke komparaci použít frekvenční charakteristiku jiného transformátoru patřícího do stejné výrobní série (tzv. *type-based SFRA*), ovšem mělo by jít vskutku z hlediska výrobní technologie o v podstatě totožný transformátor. Třetí možností je komparace s charakteristikou téhož transformátoru, která byla ovšem měřena v jiném zapojení (například charakteristikou jiné fáze – tzv. *phase comparison SFRA*). Tento způsob je nejproblematictější, protože transformátor není nikdy dokonale symetrický, a tudíž se charakteristiky vždy liší a velmi záleží na konkrétní konstrukci transformátoru (v některých případech jsou si například u třífázového transformátoru velmi podobné charakteristiky krajních vinutí).

2.4 Rozbor metodiky měření frekvenčních charakteristik

Vzhledem k tomu, že v případě FRA pro diagnostiku transformátorů jde o metody komparativní, je naprosto klíčové zajistit opakovatelnost měření, maximalizovat přesnost. Je proto nezbytné při každém měření zajistit okolní podmínky a konfiguraci měřicího systému takové, aby co nejvíce odpovídaly stavu, kdy bylo prováděno měření referenční. Tato část práce je věnována rozboru metodiky při SFRA měřeních s cílem navrhnout vhodné postupy pro nové pracoviště pro měření frekvenčních charakteristik transformátorů na katedře elektrotechnologie.

2.4.1 Přívodní vodiče

Po počátečních experimentech s různým počtem použitých přívodních kabelů, kdy byly zkoušeny konfigurace využívající pouze dvou či naopak i čtyř kabelů (viz např. [15]), se výsledný počet použitých kabelů ustálil na třech kabelech - přívodní, referenční a testovací. Tento systém, kdy jeden kabel slouží k přivedení budicího signálu, druhý k měření vstupního napětí u_1 a třetí k měření výstupního napětí u_2 je dnes považován za naprostý standard v této oblasti. [1, 8, 9]



Obr. 9 Zapojení pomocí tří přívodních vodičů

Vzhledem k tomu, že metoda měření frekvenčních charakteristik transformátorů je metodou značně citlivou, zvláště pak v oblasti vyšších frekvencí (nad 1 MHz), je velmi důležité zajistit na všech svorkách a konektorech dobrý kontakt. Byť se na první pohled může jevit jako nevýznamná, má i vrstva rzi či barvy mezi kontakty zřetelný vliv na charakteristiku v oblasti nad 3 MHz, což je obzvláště důležitým poznatkem v případě, kdy je stínění kabelů zemněno na příruby průchodek či nádoby transformátoru, které jsou vystaveny vnějším vlivům. (viz [3] kde byl měřen vliv kontaktního odporu na kontaktech zemnicích vodičů). Krom specifitějších případů, jako je například špatné uzemnění stínění, kterým se tato práce věnuje samostatně, mohou obecně nastat dva problémy. Buďto dojde ke zkratu, anebo naopak k nežádoucímu rozpojení měřicího systému. Zatímco případný zkrat je snadno identifikovatelný, protože se typicky projevuje nulovou odezvou až do řádově stovek kilohertz (takže i v případě měření na jednom vinutí se charakteristiky značně liší), je identifikace přerušeno obvodu náročnější. Je-li měřena charakteristika vinutí, je identifikace opět jednoduchá, protože očekávaný průběh (minimální impedance alespoň na počátku měření, tedy přibližně do 100 Hz s očekávanou směrnici přibližně -20 dB na dekádu, což indikuje induktivní charakter zátěže) je ve zjevném rozporu s měřenou charakteristikou (velký útlum v téže frekvenční oblasti). Nejnáročnější se jeví identifikace tohoto problému v případě měření v kapacitním zapojení. Ukazuje se, že chybu je možné identifikovat rozdílným průběhem charakteristik, kdy charakteristika přerušeno obvodu má tvar podobný charakteristice odporové (alespoň zpočátku konstantní útlum) a oproti tomu kapacitní zapojení, jak už název napovídá, má charakteristiku podobnou charakteristice kapacitní. [22] V každém případě je však nutné v situaci, kdy je měřena charakteristika vinutí (nebo je měřeno v induktivním zapojení) a získaná charakteristika je kapacitního či odporového typu, prověřit zapojení měřicí sestavy a v ideálním případě provést ověřovací měření, při kterém jsou přírodní kabely spojeny dohromady, přičemž transformátor není vůbec zapojen. Je-li výsledek stejný, je chyba zjevně způsobena měřicí sestavou, v opačném případě je nutné pečlivě prozkoumat měřený transformátor. Pokud je rozpojení, či spíše velmi špatné spojení obvodu měřicího systému způsobeno vadnými kabely, má charakteristika typický průběh podobný charakteristice odporové, která je navíc značně zašuměná (podobně jako v případě špatného uzemnění nádoby transformátoru, což je podrobněji popsáno na jiném místě této práce). [22]

Kabely použité při měření by nepochybně měly mít v ideálním případě nulový vliv na výsledný tvar FRA charakteristiky v celém frekvenčním rozsahu. To v praxi nepředstavuje větší problém u frekvencí do přibližně 2 MHz (viz například [11] a [18], kdy kabely až do 2 MHz vykazují útlum nulový od této hodnoty se postupně zvyšující). Zde je nutno poznamenat, že nenulový vliv kabelů nad tyto frekvence přímo nevylučuje FRA měření, ale pouze ovlivňuje výsledný tvar charakteristiky, která už v tom případě není

pouze charakteristikou měřeného transformátoru, ale v podstatě charakteristikou celého systému. Z toho důvodu není vhodné při měření frekvenčních charakteristik v oblasti vyšších frekvencí používat různé kabely. Větší problém nastává, jsou-li použity kabely nekvalitní, které mají značný útlum v širokém frekvenčním rozsahu, jelikož v tom případě může být tvar výsledné charakteristiky značně zkreslen charakteristikou kabelu. Kabel může mít při určitých frekvencích dokonce impedanci větší, než je impedance měřeného transformátoru, což je jev nežádoucí, protože případná porucha se pak při analýze naměřených dat může jevit jako insignifikantní, případně vůbec nemusí být patrná.

Z hlediska věrohodnosti měření frekvenčních charakteristik je také mimo jiné nezbytné, aby všechny tři kabely byly stejně dlouhé (nebo alespoň aby rozdíly v délce byly minimální) a délka jednotlivých kabelů nepřekročila maximální v literatuře doporučovanou hranici 30 m [1]. Společnosti zabývající se komerční výrobou přístrojů pro měření FRA charakteristik obvykle doporučují kabel s délkou raději kratší nicméně stále dostatečnou k tomu, aby mohly být měřeny vysokonapěťové transformátory značných rozměrů (viz např. [11], kde se hovoří o délce 60 ft., tedy přibližně o délce 18 m).

Nelze totiž opominout, že délka kabelu limituje maximální použitou frekvenci, jelikož při vysokých frekvencích začíná být vlnová délka srovnatelná s délkou kabelu. Literatura uvádí, že přesnost FRA měření je dostačující, pokud je kabel kratší než $\frac{1}{4}$ vlnové délky maximální použité frekvence (tedy se jedná o vedení tzv. elektricky krátké). Praktické pokusy společnosti Doble ukázaly, že kabely s délkou přibližně 18 m reálně znamenají, že maximální možná použitá frekvence je přibližně 2 MHz, přičemž pokusy s měřením charakteristik nad tuto hranici až do 10 MHz neposkytovaly konzistentní výsledky. [11] Ukazuje se tedy, že přiměřená délka kabelů (do 20 m) v běžně používaném frekvenčním rozsahu nemá na tvar amplitudové charakteristiky vliv. Na co je však nutné dávat pozor a mohlo by působit problémy, je snaha usnadnit manipulaci s příliš dlouhými kabely jejich svinutím, které teoreticky vede ke zvýšení jejich indukčnosti.

Extrémnější rozdíl délky přírodních kabelů je již na frekvenčních charakteristikách patrný a shoduje se s výše uvedenými poznatky, tedy že s rostoucí frekvencí je vliv dlouhého kabelu patrný i na amplitudové charakteristice (srovnej s [8], kde jsou porovnávány frekvenční charakteristiky téhož zařízení při měření prováděném s 18 m a 100 m dlouhými kabely). Naopak u fázové charakteristiky dochází k mírnému fázovému posunu, který se s frekvencí mění lineárně, což lze vysvětlit proměnným časovým zpožděním signálu v závislosti na délce vodiče.

Výsledky experimentálních měření zaměřených na vliv délky kabelů na citlivost FRA diagnostiky ukázaly, že v oblasti nižších frekvencí (do 0,5 MHz pro velmi dlouhé přírodní kabely potřebné pro měření vysokonapěťových transformátorů a 2,3 MHz pro kabely standardní délky) je vliv délky kabelů na

výslednou charakteristiku minimální (v případě kabelů standardní délky je do 0,4 MHz vliv v podstatě nulový). [20, 21] V oblasti vyšších frekvencí dochází vždy k tomu, že s rostoucí délkou kabelu se snižuje frekvence, při které je impedance kabelů srovnatelná s impedancí měřeného transformátoru. V důsledku toho dochází v této frekvenční oblasti ke ztrátě citlivosti FRA měření na změny způsobené případnými poruchami transformátoru v oblasti frekvencí vyšších.

Nejdůležitějším poznatkem je však fakt, že jsou-li při obou měřeních (referenčním i testovacím) použity kabely sice delší (např. z toho důvodu, že jsou měřeny charakteristiky distribučního transformátoru značných rozměrů), ale všechny stejně dlouhé, nedochází k znevěrohodnění výsledků měření, ale pouze k tomu, že potenciální rozdíly vzniklé případnou poruchou, které se objevují v pásmu vyšších frekvencí, jsou hůře diagnostikovatelné, protože jejich vliv na měřenou charakteristiku je srovnatelný s vlivem dlouhého přívodního kabelu.

Závěrem je z výše uvedených důvodů možno uvést, že je při FRA měřeních vhodné volit systém tří kabelů stejné délky, které mají minimální vliv na výslednou charakteristiku v celém používaném frekvenčním rozsahu a které jsou spíše kratší. Zvláště je-li cílem měřit i v pásmu vyšších frekvencí, je potřebné, aby použité kabely byly co nejkratší. Vzhledem k potenciálnímu vlivu kabelů na výslednou FRA charakteristiku měřeného zařízení je do protokolu o měření nutné zaznamenat jak jejich typ, tak i délku a při dalším měření použít tutéž konfiguraci.

Běžně jsou v komerčně vyráběných testovacích soustavách používány kabely s charakteristickou impedancí 50 Ω a odpovídajícím impedančním přizpůsobením, aby nedocházelo k odrazům. [11] Stejná doporučení lze nalézt i v některých mezinárodních dokumentech majících za cíl určitou standardizaci v oblasti FRA měření, kde je konstatováno, že nelze říci, že by některá hodnota charakteristické impedance byla vhodnější než jiná a že nepsaným standardem v této oblasti je právě hodnota 50 Ω . [2]

Ačkoli se ukazuje a je to vzhledem ke kratší vlnové délce logické, že právě v oblasti vyšších frekvencí je metoda FRA citlivější vůči případným malým změnám v transformátoru (typicky menší posun vinutí), není v praxi oblastem nad 3 MHz věnována pozornost. Lze si to vysvětlit tím, že existuje řada překážek, které jsou naznačeny v této práci, se kterými je nutné se vypořádat před tím, než bude možné považovat výsledky v oblasti vyšších frekvencí za validní. Jednou z těchto překážek je právě používání impedance velikosti 50 Ω . Při měřeních do 1 MHz není rozdíl použité impedance významný vzhledem k převažujícímu vlivu impedance transformátoru. S rostoucí frekvencí se tento poměr mění a postupně roste vliv použité impedance na výslednou charakteristiku. Výše uvedené snižuje značným způsobem výpovědní hodnotu FRA diagnostiky v oblasti nad 500 kHz, je-li použita impedance 50 Ω , a nad 3 MHz v případě použití impedance

10 Ω . [20, 21] Z výsledků odborných publikací věnujících se tomuto problému je možné vyvodit závěr, že použití větší impedance vede, stejně jako použití delších přírodních kabelů, ke snížení citlivosti měření a potlačení rezonančních bodů, které se projevují jako typické špičky ve frekvenční charakteristice. To značně znesnadňuje, ne-li znemožňuje využití oblasti vyšších frekvencí pro FRA diagnostiku drobných změn ve vinutí. Je vhodné poznamenat, že změna použité impedance nevede k posunu charakteristiky ve směru osy frekvence.

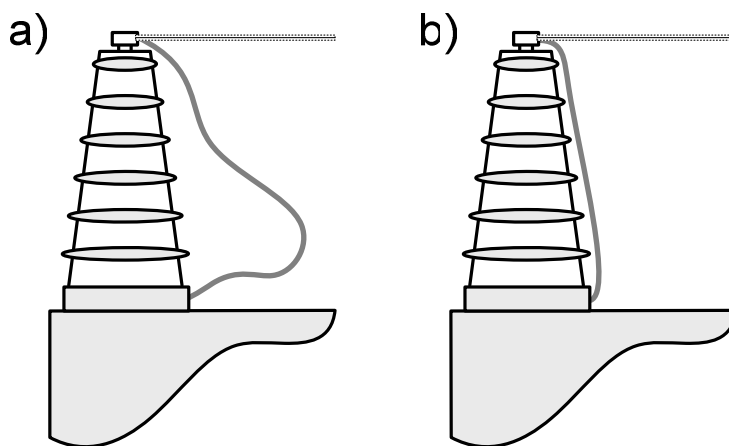
Přes výše uvedené jsou však typicky v měřicích systémech používány vysokofrekvenční, stíněné, koaxiální kabely s hodnotou charakteristické impedance v elektrotechnické praxi v podstatě nejrozšířenější, tedy 50 Ω . Podle některých obecně akceptovaných standardů je požadováno, aby kabely byly uzemněny na obou jejich koncích. [1] Je tomu tak proto, že měření FRA charakteristik, jak již bylo rozebráno jinde, je značně citlivé na jakékoli nekvalitní uzemnění, které do měření vnáší značnou nepřesnost (resp. má vliv na výsledný tvar charakteristiky a tím snižuje výpovědní hodnotu této diagnostické metody v situaci, kdy jsou porovnávány charakteristiky a jedna je získána měřením s kvalitně uzeměnou měřicí soustavou a druhá nikoli). Nekvalitní uzemnění stínění přírodních kabelů je zvláště problematické z toho důvodu, že se při analýze naměřených dat projevuje podobně jako některé závažné poruchy a dochází k viditelnému posunu celé charakteristiky vůči charakteristice referenční. Tento problém není bez patřičných zkušeností snadno identifikovatelný (má sice určité typické znaky a tak např. v oblasti 300 kHz až 500 kHz dochází k vertikálnímu posunu směrem dolů [22]) a je tudíž jedním z důvodů, proč při FRA měřeních důsledně dbát na kvalitu kontaktů.

Z těchto důvodů je nepochybně nutné při měření do protokolu zaznamenat, vedle typu kabelu a jeho délky, také jaká hodnota zakončovací impedance byla při měření použita, jelikož výsledné charakteristiky získané při měření s různou hodnotou impedance se liší.

2.4.2 Zemní vodiče

Jak již bylo zmíněno, je výsledná FRA charakteristika zvláště v oblasti nad 1 MHz značně závislá na parametrech a konfiguraci měřicího systému. Citlivost této diagnostické metody je v oblasti vyšších frekvencí snižována rostoucím vlivem parazitních impedancí, jejichž velikost s rostoucí frekvencí roste do té míry, že zastíní vliv impedance transformátoru samotného na výsledný tvar frekvenční charakteristiky. Jednou z příčin jsou i zemní kabely, vedoucí od stínění přírodních koaxiálních kabelů (kabel je připevněn ke svorce transformátoru) podél celé délky průchodek až k jejich přírubám, kde jsou uzemněny přes nádobu transformátoru. Při snaze standardizovat přístup k FRA měření bylo porovnáním nemalého počtu charakteristik zjištěno, že vliv zemních vodičů v oblasti nad 0,5 MHz v případě velkých transformátorů a

nad 2 MHz až 5 MHz v případě transformátorů menších v podstatě znečitliví FRA diagnostiku vůči případným změnám v transformátoru samotném. Rozdíl v maximální použitelné frekvenci je způsoben rostoucí délkou zemnicího vodiče, která je určena velikostí průchodky (ta v případě vysokonapěťových transformátorů může mít řádově i několik metrů). [2] Tato zjištění vedla k závěru o nezbytnosti standardizovaného přístupu při nakládání se zemnicími vodiči, který by zvýšil konzistentnost výsledků měření a tím posunul hranici maximální pro diagnostiku použitelné frekvence. Toho lze dosáhnout jednak minimalizací této parazitní impedance a jednak jednotným přístupem k zemnění při každém jednotlivém měření, který zajistí pokaždé stejný vliv impedance zemnicího kabelu na výslednou charakteristiku. Přístup, který byl na základě výše uvedených poznatků doporučen, je nazýván *shortest braid concept*, příp. *shortest braid method*. Z prvního uvedeného důvodu, tedy minimalizace parazitní impedance, je k zemnění stínění přívodních kabelů podél průchodky transformátoru doporučeno namísto vodiče kruhového průřezu používat pletený páskový vodič o minimální šířce 20 mm, který je zakončen šroubovacími nebo klešťovými svorkami s dostatečnou přitlačnou silou. [2, 19] Použití takových vodičů není překvapením, jelikož se vyznačují tím, že s rostoucí frekvencí roste jejich impedance pouze minimálně (oproti vodiči s kruhovým průřezem – k tomu např. viz [3]). Druhým důvodem je zajistit, aby při každém opakování měření byla tato impedance stejná, čehož je dosaženo pokaždé stejnou délkou zemnicího vodiče. Je-li tedy k zemnění používán páskový vodič, jehož délku lze variabilně upravovat, a tudíž vždy přizpůsobit délce průchodky tak, aby byl co nejkratší, je dosaženo toho, že tato parazitní impedance je minimalizována a je pokaždé stejná (taktéž i její vliv na tvar charakteristiky je stejný).



Obr. 10 a) špatné zemnění b) metoda shortest braid

Tato metoda zemnění je jak odbornou veřejností, o čemž svědčí, že je doporučena v podstatě každým dokumentem zabývajícím se standardizací v této oblasti (viz [1, 2, 11, 19]), tak i společnostmi zabývajícími se komerční výrobou FRA měřících zařízení (viz [18]), považována za *good engineering practice* v této oblasti. Pro úplnost lze dodat, že byla zkoušena i metoda odlišná,

kdy koaxiální kabel končí uchycením jeho stínění na přírubu průchodky a namísto stínění jsou od paty průchodky až ke svorkám prodlužovány samotné vodiče. K ověření minimalizace vlivu parazitní impedance, způsobené přívodními kabely a zemnicími vodiči, se používá tzv. zero-check test. [2] Při tomto měření, majícím za cíl zjistit vliv kabeláže při zapojení přes vysokonapěťovou průchodku na výslednou charakteristiku, jsou všechny přívodní kabely zapojeny na tutéž průchodku a jejich stínění patřičně uzemněno. V ideálním případě je výsledkem lineární charakteristika, která kopíruje frekvenční osu (útlum je tedy 0 dB v celé frekvenční oblasti). Je-li zjištěn nenulový útlum, případně charakteristika obsahuje i rezonanční body, musí být tato charakteristika kabeláže brána v úvahu při analýze frekvenčních charakteristik transformátoru samotného. V této souvislosti je ještě nutné upozornit na to, že na výsledný tvar charakteristiky má vliv i poloha zemnicího vodiče vůči průchodce. V situaci kdy je zemnicí vodič příliš blízko průchodce samotné, dochází ke změně hodnoty parazitní impedance, a tím i výsledného útlumu, přičemž impedance může jak vzrůst, tak se i snížit (k tomu viz [3], kde byl tento jev pozorován v případě menšího transformátoru v oblasti 0,3 MHz až 2 MHz a měl za následek zvýšení útlumu a naopak ke snížení útlumu došlo v případě vysokonapěťového transformátoru, a to od hodnoty 600 kHz, kdy vliv postupně vzrůstal, až byl rozdíl v charakteristikách přibližně 10 dB při hodnotě 1,7 MHz). Ačkoli se to může jevit jako samozřejmost, je vhodné pro úplnost zmínit, že je při měření třeba ověřit, že zemnicí pásy nejsou s ničím v kontaktu a že příruba průchodky je sama dobře uzemněná. Metoda zemnění s co nejkratšími pletenými páskovými vodiči se jeví jako zcela nejvhodnější koncept a umožňuje, jsou-li dodržena všechna ostatní doporučení, reprodukovatelnost měření až do vysokých frekvencí. Opakovatelnost měření je takovém případě totiž limitována v podstatě jen rozměry průchodek transformátoru, což samozřejmě znamená nutnost prodloužení zemnicích pásků. Jako maximální použitelná frekvence je proto většinou uváděna hodnota 1 MHz v případě vysokonapěťových transformátorů a až 5 MHz v případě transformátorů menších. [2, 8]

2.4.3 Stav transformátoru

Měření frekvenčních charakteristik je, jak bylo rozebráno dříve, zjednodušeně vzato ve své podstatě měřením charakteristiky velmi složitého sérioparalelního RLC obvodu s rozprostřenými parametry. Uvážíme-li, že jednotlivé prvky tohoto modelového obvodu reprezentují například indukčnost jednotlivých závitů či mezizávitovou kapacitu, je zřejmé, že každá nepatrná změna v konfiguraci či elektromagnetických vlastnostech materiálů vede ke změně výsledné charakteristiky.

Jako první nelze nezmínit vliv špatného uzemnění nádoby transformátoru, který je častým zdrojem chyb při FRA měřeních. Na druhou

stranu, není-li zajištěn kvalitní kontakt mezi zemí a nádobou, je vliv této chyby na výsledné charakteristice natolik zřetelný a specifický, že nebývá problém takovou situaci identifikovat. Frekvenční charakteristika transformátoru, který není řádně uzemněn, je značně zašuměná. [9] Z toho důvodu je vhodné okamžitě po měření, případně ještě v jeho průběhu porovnat s očekávaným průběhem (ať už pouze na základě zkušeností s obvyklým tvarem charakteristiky podobných zařízení, či na základě zběžného porovnání s charakteristikou referenční), jelikož je bezprostředně poté přímo na místě možné provést opakované měření a výsledky ověřit.

V souvislosti s potřebou kvalitního zemnění a kvalitních kontaktů vůbec při FRA měřeních nelze nezmínit otázku, jak jsou zapojeny svorky transformátoru, na kterých není prováděno měření. Jak bylo rozebráno na jiném místě této práce, existuje rozličné množství různých typů zapojení při FRA měřeních (měření na vinutí, měření mezi vinutími). To, zdali jsou svorky, na kterých není prováděno měření, zkratovány a případně uzemněny, má vliv na uspořádání výsledného RLC obvodu, kterým de facto transformátor je, a tudíž i na výsledné frekvenční charakteristiky. Nesmírně důležité pro opakovatelnost měření je tedy (stejně jako při ostatních již rozebraných otázkách) zachování jednotného přístupu k zapojení pro FRA měření nepoužívaných svorek v rámci jednoho typu měření. Ty mohou být ponechány rozpojené, mohou být uzemněny, nebo zkratovány a jejich (ne)zapojení má vliv na výsledný tvar charakteristiky. Pokaždé se však projevuje různě a závisí na konkrétním typu měření (například podle [21] byl rozdíl při kapacitním měření na straně nízkého napětí mezi uzemněným středem vysokonapěťového vinutí a středem neuzemněným na charakteristikách dobře patrný až nad hodnotu 1,5 MHz). Komplexnější analýzy různých zapojení ukazují, že odlišnosti v charakteristikách způsobené různými způsoby zapojení volných svorek mohou být natolik výrazné i v oblastech středních frekvencí (1 kHz až 10 kHz), že je lze snadno považovat za důsledek poruchy transformátoru (k tomu viz [6], kde byly zkoumány odlišnosti v případě rozpojení, zkratování a uzemnění svorek a v některých případech byl rozdíl i v počtu rezonančních bodů v dané frekvenční oblasti). Nelze opominout, že v případě, kdy je některé z vinutí zapojeno do hvězdy, existuje možnost (ne)zapojit svorku nulového vodiče samostatně, nezávisle na ostatních svorkách, což může také ovlivnit tvar výsledné charakteristiky. Vliv (ne)zapojení svorek, na kterých není prováděno měření, závisí také na použitém typu zapojení pro měření a konstrukčním řešení transformátoru, protože vedení, která jsou si fyzicky blíže, mají větší kapacitní vazbu a (ne)zapojení jejich svorek při měření má vliv větší, než v případě vinutí, která jsou vzdálenější. Lze shrnout, že různá zapojení volných svorek je vhodné kombinovat s odlišnými typy zapojení, při kterých je transformátor měřen, pro získání co nejširších diagnostických možností této metody (k tomu viz [2], kde autoři zkratováním vinutí nižšího napětí při měření vysokonapěťového vinutí v induktivním zapojení docílili odstranění vlivu jádra

transformátoru a tím i magnetizace, kterou je běžně nutné při diagnostice zohledňovat). Každopádně je při každém jednotlivém měření nezbytné zaznamenat konkrétní konfiguraci použitou při měření a napříště, mají-li být výsledky diagnostiky validní, použít tutéž. Vzhledem k tomu, že možností různých zapojení je poměrně hodně (například v případě trojvinuťového transformátoru se zapojením do hvězdy) může detailní formulářový protokol z měření, či fotodokumentace předejít případným nesrovnalostem.

V případě offline FRA diagnostiky je doporučeno před měřením z důvodů minimalizace rušivých vlivů transformátor zcela odstrojit. Odstraněny by měly být všechny připojené vodiče a je-li to možné, měla by být všechna měření prováděna s přívodními vodiči zapojenými přímo na svorky transformátoru (připojení přes jakékoli další prvky může, vzhledem k nenulové impedanci těchto prvků, ovlivnit výsledek měření).

Nezanedbatelný vliv na výsledný tvar frekvenční charakteristiky má také tvar (resp. rozměry) použitých průchodek. Je tomu tak proto, že FRA měření je zvláště v oblasti vyšších frekvencí v důsledku zkracující se vlnové délky značně citlivé v podstatě na jakékoli změny (především na změny geometrie a zařazení dalších prvků mezi měřicí aparaturu a měřený objekt, kam nepochybně spadá i měření přes průchodku mající na délku i několik metrů). Experimenty na menším (27kV) transformátoru ukazují, že vliv průchodek na výsledné frekvenční charakteristiky je velmi malý, pokud je prováděno měření do 3 MHz. Nad tuto hodnotu paradoxně při experimentech došlo vlivem indukčního charakteru průchodky k tomu, že výsledná měřená impedance byla nižší v případě měření s průchodkou. [21] Jiná podobná měření ukazují, že charakteristiky získané při měření s průchodkou mohou v oblasti nad 3 MHz obsahovat odlišné rezonanční frekvence a značně se proto odlišují, přičemž v oblasti nad 7 MHz dochází vlivem průchodky k značnému útlumu a průběh nad tuto frekvenci tudíž nemůže sloužit diagnostickým účelům. [20] V případě vysokonapěťových průchodek se musí uvážit jak vliv velikosti průchodky samotné, tak nutnost použití podstatně delších přívodních kabelů, což lze přirovnat, zvláště v oblasti vyšších frekvencí, k zařazení nikoli nevýznamné impedance do měřicího systému, která zastře potenciální změny frekvenční charakteristiky transformátoru samotného způsobené poruchami. Navíc v případě vysokonapěťových průchodek bude poměrně výrazně patrný efekt přizemnění budicího signálu přes parazitní kapacitu průchodky.

Olej je příčinou změn v charakteristikách v celém frekvenčním intervalu, ve kterém je měření prováděno. Změna dielektrických vlastností izolačního materiálu má v podstatě za následek posun celé charakteristiky ve směru osy frekvence. K vysvětlení postačí zjednodušení transformátoru na již zmiňovanou RLC soustavu, kde vystupují i prvky typu mezizávitové kapacity, jejichž parametry jsou nepochybně ovlivněny relativní permitivitou dielektrika. Je-li tedy vzduch nahrazen olejem, který má permitivitu přibližně dvakrát vyšší, lze očekávat změnu charakteristiky. Posun není podle provedených

experimentů konstantní, ale s rostoucí frekvencí roste (k tomu viz [4], kde je posun v oblasti nižších frekvencí minimální a oblasti vysokých frekvencí je charakteristika posunuta o více než 200 kHz směrem k nižším frekvencím). Vliv oleje je potřeba brát v úvahu v situaci, kdy je nový transformátor, ještě bez oleje, převážen z výroby na místo použití a FRA měření jsou prováděna pro detekci poruch způsobených transportem, nebo v případě, kdy byl transformátor čerstvě naplněn či vypuštěn (v takovém případě je i vhodné zaznamenat, kdy k vypuštění došlo, jelikož v izolaci může zůstat olej nasáklý). Charakteristiky olejeproutého transformátoru nelze použít jako referenční při budoucí diagnostice za provozu a *vice versa*, jelikož se charakteristiky značně liší.

U transformátorů vybavených přepínačem odboček je při měření FRA charakteristik také třeba dbát na nastavenou polohu odbočky, která by měla být shodná s polohou, která byla použita při měření referenčním. Standardy doporučují, aby v případě přepínače přepínaného ve stavu naprázdno byla zvolena hodnota nominální a v případě přepínače přepínaného pod zátěží odbočka nejvyšší. [1]

2.4.4 Měřicí přístroje

Většina SFRA měřicích přístrojů používá generátor sinusového signálu s vnitřním napětím špička–špička v rozsahu od 5,66 V do 24 V, přičemž asi nejpoužívanější je napětí 10 V (například společnost Doble Engineerign u většiny svých modelů anebo společnost Megger). Obvykle mají přístroje vnitřní impedanci 50 Ω , a tudíž v případě zatížení impedancí 50 Ω na výstupu je výsledné napětí na svorkách transformátoru, tedy vstupní napětí u_1 , poloviční (tedy 2,83 V až 12 V). Ačkoli se to může zdát překvapivé, tvar frekvenční charakteristiky transformátoru je ovlivněn i velikostí budicího napětí. Byť tento vliv není výrazný, je nutné ho brát v potaz. Je mimo jiné jedním z důvodů, proč při FRA diagnostice není doporučováno používat při měření různé přístroje, což je potenciální problém v situaci, kdy je potřeba provést diagnostické měření po dlouhé době a původní charakteristika byla získána za použití již vyřazeného měřicího přístroje. Pro takové případy umožňují někteří výrobci zařízení pro měření FRA charakteristiky uživatelsky nastavit jinou hodnotu budicího napětí (např. společnost Megger). Vliv velikosti napětí na charakteristiky je patrný především v oblasti nízkých frekvencí, v momentě, kdy je použito zapojení, při kterém se v charakteristikách výrazněji projevuje vliv jádra (tj. induktivní zapojení do 100 Hz), a malý posun lze také pozorovat nad hodnotu 2 MHz. Tento vliv je výraznější při měřeních na vinutích nízkého napětí a oproti tomu jen nepatrný při měřeních na straně vysokého napětí (viz [8], kde byl porovnáván rozdíl v charakteristikách při napětích 10 V a 2,83 V). Vzhledem k možnosti záměny měřicího zařízení, které může používat jinou hodnotu napětí, je vhodné hodnotu napětí použitou při měření také zaznamenat.

Měřicí systém by měl umožňovat měření FRA charakteristik s dostatečným dynamickým rozsahem v celém frekvenčním intervalu, ve kterém je měření charakteristik prováděno. Konkrétní hodnoty závisí na měřeném transformátoru a jeho frekvenční charakteristice. Dynamický rozsah je totiž důležitým parametrem ovlivňujícím přesnost FRA měření zejména v oblasti prvního rezonančního bodu, který se obvykle nachází v oblasti nižších frekvencí, kde se projevuje hlavně vliv magnetického jádra, a především u velkých transformátorů je hodnota útlumu v tomto bodě i více než -90 dB při měření s impedancí 50Ω (jde zvláště o případy měření na vinutí vysokého napětí s rozpojenými svorkami na straně nízkého napětí). Má-li mít diagnostika vad transformátoru, které se projevují především v této frekvenční oblasti, smysl, musí mít měřicí přístroje dostatečný dynamický rozsah a přesnost. Za dostatečný, pro měření na libovolném transformátoru, je standardně považován rozsah -100 dB až $+20$ dB a přesnost ± 1 dB. [2, 11, 16, 17] Obvyklé hodnoty se u komerčně vyráběných měřicích přístrojů pohybují od -90 dB až do -130 dB. Není zřejmé, proč v podstatě veškeré mezinárodně používané standardy i výrobci FRA měřicích přístrojů doporučují maximální hodnotu $+20$ dB, když v podstatě téměř žádná z měřených charakteristik nepřekračuje 0 dB. Obvykle tudíž nebývá ověřována horní hranice, ale je proveden již zmíněný *zero check test* s kabelem majícím nulový vliv a ověřeno, že v celém frekvenčním rozsahu je útlum nulový. [7] Na to, aby byla splněna podmínka přesnosti ± 1 dB při útlumu -100 dB, je nutné zajistit, aby vnitřní šum (hladina šumu) byla pod úrovní -120 dB. Při měření vnitřního šumu je obvod otevřený a jsou zapojeny pouze kabely přívodní a referenční (testovací je odpojen, aby byl minimalizován vliv vnějšího rušení), a protože měřené výstupní napětí u_2 je nulové, zobrazuje výsledná charakteristika úroveň šumu. Úroveň vnitřního šumu se liší pro různé přístroje různých výrobců a běžně se pohybuje od -90 dB do -130 dB. [7] Dosažená přesnost závisí na měřeném transformátoru, respektive jeho frekvenční charakteristice, přičemž hladina šumu by obecně měla být minimálně o 20 dB níže, než je nejnižší hodnota útlumu charakteristiky, aby následná komparace charakteristik umožňovala komparaci i těchto rezonančních bodů. Valná většina frekvenčních charakteristik však obsahuje pouze jeden rezonanční bod s tak vysokým útlumem (ten je zároveň v podstatě vždy prvním rezonančním bodem charakteristiky, řádově okolo 1 kHz), který obvykle dosahuje hodnoty okolo -80 dB, a to v poměrně úzkém frekvenčním intervalu (k tomu viz [2], kde jsou ukázány některé typické průběhy pro různá zapojení a rozdíly mezi jednotlivými charakteristikami transformátorů stejné kategorie, byť se měřené transformátory liší datem výroby i designem, jsou minimální). Je tudíž zřejmé, že vyšší hladina šumu (např. -90 dB) není při FRA diagnostice vysloveně nepřekonatelným problémem, ale spíše komplikací znesnadňující diagnostiku určitých poruch, které se v této frekvenční oblasti projevují (poškození jádra, zkratky vinutí

apod.). Žádoucí je před zahájením měření na konkrétním transformátoru změřit úroveň vnitřního šumu a tuto hodnotu zaznamenat do protokolu.

Měření frekvenčních charakteristik je v oblasti vysokých útlumů (obvykle přibližně okolo hodnoty -80 dB) zatíženo značnou chybou způsobenou různými zdroji rušení (okolní elektromagnetická pole, kvalita uzemnění apod.). Nízkofrekvenční šum (někdy též $1/f$ šum) značně ovlivňuje výsledky měření přibližně do 300 Hz (s rostoucí frekvencí pak jeho vliv postupně klesá). Vliv bílého (širokopásmového) šumu je frekvenčně nezávislý a jeho hodnota závisí na okolních podmínkách, což v případě měření v terénu bývá problematické. Z tohoto důvodu výrobci FRA diagnostických přístrojů používají pro zvýšení přesnosti měření a minimalizaci šumu průměrování a filtrování. Průměrování je jednoduchý postup, který samozřejmě vede k prodloužení doby měření (dle [11] vede použití průměrování při SFRA měřeních k potlačení šumu). Otázka filtrování a volby správné šířky pásma je složitější. Vhodně zvolená šířka pásma má pozitivní vliv na snížení úrovně hodnoty šumu, ale na druhou stranu volba užší šířky pásma má za následek prodloužení doby měření. Konkrétní šířka pásma je závislá na frekvenci a měla by být menší než $\frac{1}{5}$ aktuální frekvence. [11] Běžně používaná šířka odpovídá 10% aktuální hodnoty frekvence (obvykle bývá takto v defaultním nastavení s možností tuto hodnotu snížit [30]).

Vzhledem k vlivu velikosti budícího napětí (u_1) na tvar FRA charakteristiky, který byl podrobněji popsán v části věnované přístrojovému vybavení, je nutné zajistit, aby zdroj testovacího signálu poskytoval v ideálním případě budící sinusový signál s konstantní amplitudou v celém měřeném frekvenčním rozsahu (tedy přibližně 10 Hz až 20 MHz) [1], čímž je zajištěna konzistentnost výsledků měření. To znamená, že by mělo jít o zdroj tvrdý, jehož výstupní napětí se mění spolu se zatížením pouze minimálně. Na druhou stranu rozdíly jsou výrazněji patrné v situacích, kdy je jedno napětí násobně vyšší než druhé, což nelze porovnávat s poklesem napětí generátoru například na 80% jmenovitého napětí. Vstupní napětí u_1 se ovšem se zatížením nepochybně mění a z toho důvodu není možné počítat útlum s použitím hodnoty nastavené na generátoru.

2.4.5 Frekvenční rozsah a rozlišení

Především v oblasti vyšších frekvencí se průběh frekvenčních charakteristik dramaticky mění, a je tudíž nutné, aby následná komparace měla smysl, správně zachytit všechna rezonanční body charakteristiky, což lze jen s dostatkem měřených bodů. Rozmístění měřených bodů může být lineární či logaritmické, přičemž každý přístup má své výhody i nevýhody. Běžně jsou charakteristiky měřeny s logaritmickým rozlišením, kdy je rozdíl logaritmu frekvence konstantní, což zajišťuje lineární rozmístění bodů v případě, že jsou charakteristiky vynášeny s logaritmickou osou frekvence. Logaritmicky

rozmístěné body umožňují měřit pohodlně jeden široký frekvenční interval a oproti lineárnímu rozmístění obsahují více bodů v oblasti nižších frekvencí a naopak méně bodů v oblasti frekvencí vyšších. Lineární rozlišení je oproti tomu spíše vhodné pro detailnější měření v úzkých frekvenčních intervalech, a tudíž je obvyklé celý frekvenční rozsah rozdělit do několika pásem. Tak je tomu v doporučení již zmiňované společnosti Doble, která v případě lineárního rozlišení dělí interval 10 Hz až 10 MHz do pěti frekvenčních pásem, které se vzájemně částečně překrývají, což kompenzuje menší rozlišení blízko počáteční frekvence intervalu, a v každém z nich je měřeno 400 bodů. [11] V případě logaritmicky rozmístěných měřicích bodů by měl měřicí systém umožňovat měření alespoň s rozlišením 200 bodů na dekádu frekvence. [1, 2] Takovým příkladem může být například přístroj M5100 společnosti Doble, který používá v defaultním nastavení konstantní logaritmické rozlišení s krokem 1,2 %. [30] V oblasti nižších frekvencí (přibližně od 10 kHz až 100 kHz) je vhodné měření urychlit snížením počtu měřených bodů, jelikož v této oblasti se v charakteristikách neobjevuje příliš rezonančních bodů a derivace útlumu se mění jen minimálně. Je-li použito lineární rozmístění měřených bodů, je doporučeno rozdělit měření do několika frekvenčních pásem s různou hustotou měřených bodů, aby bylo zajištěno rovnoměrnější pokrytí celého frekvenčního rozsahu. [2]

Při SFRA měřeních, kdy jsou hodnoty vstupního a výstupního napětí (u_1 a u_2) měřeny postupně pro každou jednotlivou hodnotu frekvence, je potřeba před samotným odečtem hodnot vstupního a výstupního napětí určitou chvíli počkat, aby nebylo měření ovlivněno přechodovým dějem. Vzhledem k tomu, že je měřeno obvykle řádově 400 bodů na dekádu frekvence, je změna frekvence poměrně malá. Literaturou doporučovaný čas na ustálení je tak poměrně krátký (viz [8], kde je uváděna doba jedné periody případně 0,01 ms).

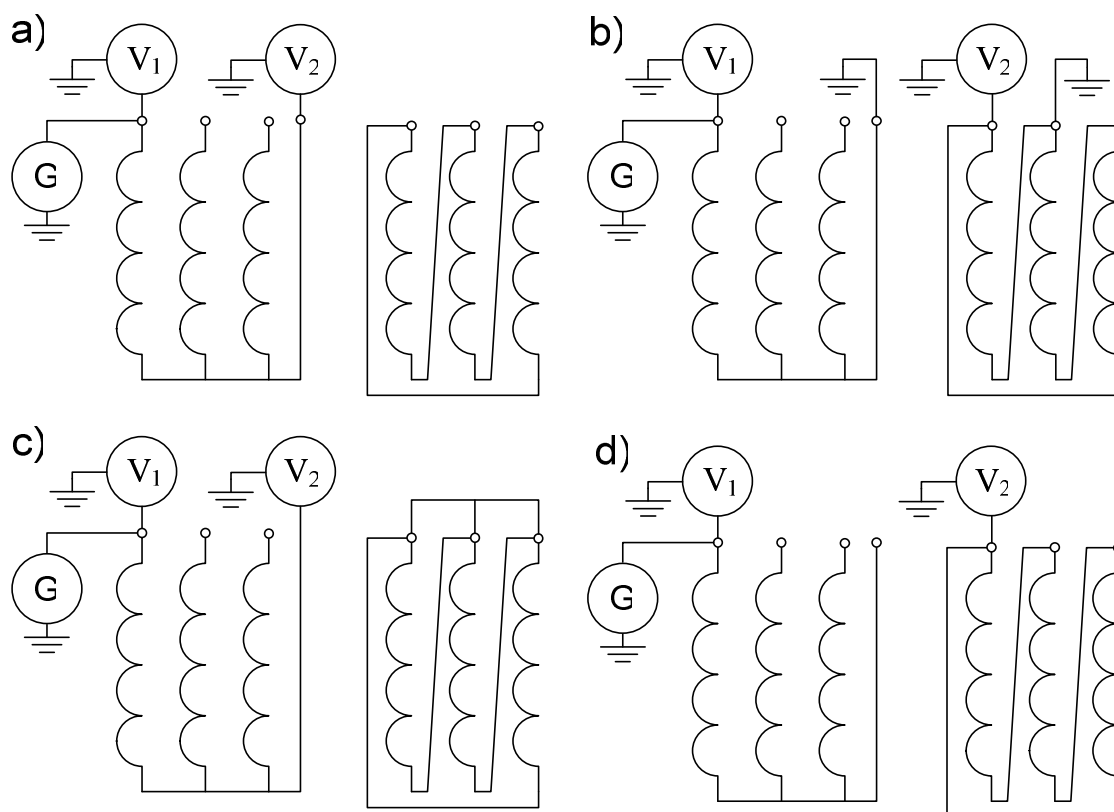
Je zajímavé, že zatímco ve většině doporučení týkajících se konzistentnosti FRA měření se rozličné mezinárodně používané standardy shodují, v otázce vhodného frekvenčního rozsahu se poměrně liší. Volba vhodné počáteční a koncové frekvence je odvislá od frekvenčního intervalu, ve kterém se projevují rezonanční špičky, a tudíž závisí na velikosti a typu měřeného transformátoru. Nejnižší frekvence by tak měla být zvolena s ohledem na polohu prvního rezonančního bodu (který se u výkonových transformátorů pohybuje okolo hodnoty 1 kHz) a maximální frekvence závisí na míře vlivu parazitních impedancí, které činí v případě transformátorů s vysokonapěťovými průchodkami oblast nad 2 MHz z hlediska diagnostiky v podstatě bezvýznamnou. Obecně lze říci, že frekvenční rozsah od 10 Hz do 10 MHz by měl být pokryt v podstatě všechny myslitelné případy. V poslední době se ale objevují tendence tento rozsah rozšiřovat až téměř na dvojnásobek, tedy až do 20 MHz, což by mělo rozšířit diagnostické možnosti této metody, ale je třeba říci, že tento přístup (v případě výkonových transformátorů) je spojen

s řadou prozatím nevyřešených problémů. [20] Reprezentantem obecně doporučeného rozsahu je například firma Doble Engineering, která ovšem v základním nastavení používá rozsah 20 Hz až 2 MHz (viz [11] a [30]). Podobně společnost ABB doporučuje počáteční hodnotu 10 Hz a horní hranici maximálně 1 MHz až 2 MHz. [17] Čínský standard naopak operuje s počáteční hodnotou 1 kHz a konečnou hodnotu 1 MHz. [16] To není tak překvapivé vzhledem k faktu, že v oblasti frekvencí nižších nedochází k výraznějším změnám v charakteristikách a oblast nad 1 MHz je naopak považována za problematickou z hlediska parazitních impedancí při měření na velkých transformátorech. Na druhou stranu i dnešní komerčně vyráběné SFRA přístroje, které jsou z hlediska doby měření řádově pomalejší než přístroje IFRA, jsou schopny změřit celou charakteristiku do několika minut, takže s intervalem o dekádu širším nedojde k výraznější úspoře času, ale výpovědní schopnost metody bude snížena (jak bylo ukázáno, například poruchy týkající se jádra se projevují v oblasti frekvencí nižších). Mezinárodní organizace Cigre naopak neodrazuje od použití frekvenčního rozsahu širšího, tedy 10 Hz až 2 MHz v případě výkonového transformátoru a 5 MHz v případě transformátoru malých rozměrů, ale při interpretaci výsledků doporučuje zaměřit se na oblast od 5 kHz do 1 MHz v případě transformátorů nad 100 kV a do 2 MHz v případě transformátorů na nižší napětí. [2] Důvody pro omezení užitečného rozsahu byly již v podstatě podrobně rozebrány.

Na druhou stranu jsou FRA měření s rostoucí frekvencí více citlivá nejen vůči parazitní impedanci a vnějšímu rušení, ale roste také jejich citlivost vůči případným geometrickým změnám v transformátoru. Při frekvenci 10 MHz odpovídá čtvrtina vlnové délky 7,5 m a při 20 MHz potom polovině této hodnoty, z čehož vyplývá, že roste význam i menších geometrických změn (k vinutí transformátoru je možno přistupovat podobně jako k vedení s rozprostřenými parametry, tudíž platí, že se zkracující se vlnovou délkou signálu se zmenšuje velikost detekovatelných změn). Uvolněné vinutí a drobné změny jeho tvaru jsou tudíž patrné až v oblasti vyšších frekvencí (podle [20, 21] jsou tyto změny dobře patrné až nad frekvencí 3 MHz). Lze uzavřít tím, že ačkoli zvyšování frekvence a tedy zkracování vlnové délky vede ke zvyšování citlivosti FRA diagnostiky vůči drobným změnám ve sledovaném objektu, je zároveň spojeno s růstem nežádoucích vlivů a bude zajímavé sledovat budoucí vývoj a trendy ke zvyšování maximální užitečné frekvence při FRA diagnostice. Jednou z takovýchto potenciálně slibných metod odvozených od konvenční FRA diagnostiky je HIFRA (nový koncept *High Internal Frequency Response Analysis* je navrhován v [20]). Odstranění signifikantního vlivu parazitních impedancí je docíleno umístěním vnitřního měřicího senzoru k patě vysokonapěťové průchodky. Takové řešení by výrazně zvýšilo maximální použitelnou frekvenci, a tudíž i citlivost metody. Před aplikací v praxi je třeba vyřešit řadu problémů, ale návrh naznačuje cesty, kterými se bude pravděpodobně vývoj v oblasti FRA diagnostiky v budoucnu ubírat.

2.4.6 Způsoby zapojení

Metody FRA diagnostiky spočívají v tom, že na jednu libovolnou svorku připojíme budící signál a referenční měření a na jinou libovolnou svorku (jinak by se jednalo o *zero check test*) připojíme měření výstupního napětí. Je tudíž zřejmé, že existuje rozličné množství kombinací, zvláště uvážíme-li, že nezapojené svorky lze ještě navíc například uzemnit (o tom blíže v části věnující se faktorům týkajících se stavu transformátoru). Následující řádky jsou věnovány popisu nejtypičtějších a nejběžněji používaných způsobů zapojení pro případ třífázového transformátoru, který je obvyklým měřeným objektem. První dva způsoby používaných zapojení jsou ve své podstatě typem jedním, z hlediska zapojení přívodních vodičů jsou totiž totožné a ani výsledné charakteristiky se neliší diametrálně. V obou případech je měřena charakteristika konkrétního vybraného vinutí, tedy takzvané měření *end-to-end*. Oba typy se liší tím, že v případě zapojení nazývaného *open circuit* (příp. *end-to-end open*) jsou nepoužívané svorky ponechány rozpojené, zatímco v případě *short-circuit* (nebo též *end-to-end short-circuit*) je druhé, k měření nepoužívané, vinutí zkratováno. Rozdíl v charakteristikách se projeví výrazněji pouze v oblasti nízkých frekvencí (přibližně do 10 kHz), jelikož zkratováním dojde k tomu, že v této oblasti bude mít výrazný vliv rozptylová indukčnost namísto indukčnosti magnetizační. Další dva typy jsou nazývány *inter-winding* a jde, jak již název napovídá, o měření charakteristiky mezi dvěma různými vinutími. Zapojení jsou opět stejná, co se zapojení přívodních vodičů týče, a liší se znovu, jako v předešlém případě, pouze tím, jsou-li druhé strany vinutí uzemněny či nikoli. V prvním případě jde o induktivní zapojení (*inductive inter-winding*), které je specifické tím, že zpočátku charakteristika odpovídá převodu transformátoru. Druhý případ je zapojení kapacitní (*capacitive inter-winding*), kdy má výsledná charakteristika typický průběh odpovídající, i ze samotné povahy zapojení, kapacitnímu charakteru měřené impedance. Nelze říci, že by některý z těchto typů zapojení byl tím nejlepším způsobem měření či naopak zcela nevhodný, spíše je každý způsob zapojení příhodnější pro diagnostiku jiných poruch. Z toho důvodu je při praktických FRA měřeních prováděno nikoli jedno měření, ale sada různých měření.



Obr. 11 a) end-to-end open b) inductive inter-winding c) end-to-end short-circuit
d) capacitive inter-winding)

Mezinárodní standardy i příručky jednotlivých výrobců komerčních SFRA analyzátorů obsahují doporučení různých sad měření pro různé typy transformátorů. Obecně lze uvést, že za obligatorní se považují měření na všech jednotlivých vinutích (jak end-to-end open, tak short-circuit), které jsou nejvhodnější z hlediska detekce možných posunů vinutí a podobných poruch a měření mezi vinutími jsou brána spíše jako fakultativní. V závislosti na typu transformátoru a počtu jeho vinutí se tak obvyklý doporučovaný počet měření pro jednu sadu pohybuje od devíti obligatorních měření pro dvouvinuťový třífázový transformátor až po třicetšest měření (včetně fakultativních zapojení) pro třívinuťový třífázový transformátor (jednotlivé kombinace jsou podrobně rozepsány například v [1]). Software komerčně vyráběných SFRA analyzátorů obvykle obsahuje možnost výběru typu transformátoru, který je měřen, podle které následně vede obsluhu celou sadou měření vhodnou pro daný typ.

2.5 Analýza charakteristik

2.5.1 Vyhodnocení pomocí statistických nástrojů

Diagnostika transformátorů pomocí FRA je metodou komparativní a vzniká tak otázka, jaké jsou nejvhodnější přístupy k identifikaci a popisu rozdílů v charakteristikách a k jejich interpretaci. V současné době provádějí analýzu a interpretaci pouze vysoce kvalifikovaní odborníci dostatečně znalí

dané problematiky a zkušení, co se dopadů různých poruch a rušivých faktorů na výsledné charakteristiky týče. Žádoucí by však z praktického hlediska naopak byl stav, kdy by byla identifikace rozdílů v charakteristikách a interpretace jejich příčin při FRA diagnostice plně automatizována. Tato lákavá myšlenka je ale spojena s řadou překážek. V první řadě není automatizace myslitelná v případech, kdy není dostupná charakteristika referenční (původní), která byla změřena na tomtéž zařízení ve stejném zapojení. Případy, kdy jsou jako referenční brány charakteristiky jiných vinutí téhož transformátoru, nebo charakteristiky transformátoru ze stejné výrobní série, lze těžko automatizovat, jelikož se tyto charakteristiky navzájem liší již z podstaty věci. I když je dostupná výchozí charakteristika, je automatizace možná pouze do určité míry, protože při interpretaci je na tvar a rozdíly charakteristik nutné pohlížet jako na celek a nelze se omezit na prostou komparaci statistických ukazatelů. Statistické nástroje použité při komparaci charakteristik nejsou vševypovídající (jsou různě citlivé vůči různým změnám, takže ve skutečnosti nevýznamný rozdíl může zastínit reálný problém) a jsou tak spíše pomocným nástrojem pro odborníka interpretujícího výsledky. Jak bylo totiž podrobněji popsáno v části týkající se změn v charakteristikách, nelze zobecnit, že by malé rozdíly byly méně významné a velké rozdíly naopak indikovaly závažnou poruchu. Navíc se různé poruchy projevují různě (změna amplitudy, posun charakteristiky, nové rezonanční frekvence atp.), v různých frekvenčních oblastech se projevují s různou intenzitou (v některých se neprojevují vůbec) a vedle toho je tvar výsledné charakteristiky ovlivněn řadou dalších nežádoucích faktorů (parazitní impedance, magnetizace, teplota atd.). Řada doporučení se proto shoduje na tom, že plná automatizace zatím není bez dalšího výzkumu v této oblasti možná. [2, 11]

Cílem nejjednodušších nástrojů není kvantifikovat rozdíly v charakteristikách, ale pouze usnadnit identifikaci oblastí, kde se charakteristiky odlišují. Často jsou pro tyto účely namísto amplitudové charakteristiky používány charakteristiky znázorňující závislost impedance, případně admitance na frekvenci. Použití těchto charakteristik nepřináší, na rozdíl od fázové charakteristiky, žádnou novou informaci a jedná se pouze o usnadnění vizuální identifikace rozdílů v charakteristikách (jsou opticky zvýrazněna lokální maxima především v oblasti nízkých útlumů, anebo lokální minima v oblasti vysokých útlumů). Další možností je zobrazení absolutního rozdílu charakteristik v závislosti na frekvenci. Pro každou hodnotu frekvence je spočten rozdíl a výsledná křivka je zobrazena stejným způsobem jako charakteristiky samotné, pouze osa útlumu má kladné i záporné hodnoty a podstatně menší rozsah. To samozřejmě předpokládá, že jednotlivé body obou charakteristik jsou měřeny při stejných frekvencích (jinak je nutno hodnoty interpolovat).

Pro použití v oblasti FRA diagnostiky byla uvažována řada statistických nástrojů kvantifikujících rozdíly ve dvou zkoumaných

charakteristikách. Každý z těchto nástrojů se vyznačuje různou citlivostí vůči specifickým změnám, které jsou pro frekvenční charakteristiky typické. Některé nástroje se pro FRA diagnostiku vysloveně nehodí, jelikož se ukazuje, že pro tuto oblast zájmu poskytují značně nespolehlivé výsledky. Příkladem může být nevhodnost použití směrodatné odchylky z důvodu nestejně váhy v relativních číslech stejných rozdílů v charakteristikách (k tomu blíže viz [27], kde tato metoda není doporučena právě proto, že rozdíly v oblastech s velkým útlumem nemají na výslednou hodnotu odchylky prakticky vliv, protože jsou zastíněny i nepatrnou odlišností v oblastech s malým útlumem). Je tudíž zřemé, že pouze kombinace vhodně zvolených statistických nástrojů umožní identifikaci všech potenciálních změn. Vzhledem k tomu, že lze celý frekvenční interval rozdělit do několika pásem, která odpovídají charakteru poruch, které se v dané oblasti projevují, je i při komparaci dat pomocí statistických nástrojů rozdělen celý měřený interval do několika dílčích pásem. Případné změny v jednom pásmu tak neovlivní hodnoty těchto parametrů v pásmech ostatních (za předpokladu, že jsou intervaly vhodně zvoleny) a nedochází tak k tomu, že by jedna výraznější změna zastínila všechny ostatní. Výčet a popis statistických nástrojů používaných v FRA diagnostice na následujících řádcích této práce není vyčerpávající a je omezen na výběr nejpoužívanějších, nejzmiňovanějších, či nejzajímavějších ukazatelů.

Asi jediným skutečně široce rozšířeným a používaným nástrojem je korelační koeficient:

$$r = \frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_i^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Korelační koeficient je reálně jediným skutečně používaným statistickým ukazatelem v pracích zabírajících se analýzou dopadů poruch a nikoli pouze v těch zaměřených na statistické zpracování FRA dat (je tak doporučen například standardem IEEE[1] a jako jediný ukazatel používán v [4]). Jeho zjevnou nevýhodou jsou případy, kdy jsou hodnoty jedné křivky násobkem odpovídajících hodnot křivky druhé (tedy případy vertikálního posunu). Korelační koeficient tak není vůbec schopen detekovat změny mající za následek konstantní amplitudový posun v celém frekvenčním intervalu. Naopak je tento ukazatel poměrně citlivý vůči posunům již existujících rezonančních bodů ve směru osy frekvence, jejich zániku, nebo vzniku nových, či případům, kdy rozdíl v útlumu není konstantní. [27, 28]

Další dva ukazatele kvantifikují rozdíly stejným způsobem, a to jako absolutní odchylku, tedy přesněji řečeno jako průměrnou hodnotu absolutní odchylky. Jejich odlišnost spočívá v tom, že první ukazatel používá přímo absolutní hodnotu rozdílů (což je běžně používáno), zatímco pro výpočet druhého se používá rozdíl logaritmů hodnot. V případě druhého ukazatele jde

o příklad více sofistikovaného ukazatele, který má za cíl odstranit nevýhody různých dalších komplikovanějších, zde ani nezmiňovaných ukazatelů, které jsou často velmi citlivé vůči malým absolutním, ale velkým relativním rozdílům a podobně (blíže viz [27]).

Průměrná absolutní odchylka:

$$r = \frac{\sum_i^n |x_i - y_i|}{N}$$

Průměrná absolutní logaritmická odchylka:

$$r_{\log} = \frac{\sum_i^n |20\log_{10} x_i - 20\log_{10} y_i|}{N}$$

Poslední nástroj reprezentuje ukazatele schopné dobře identifikovat změny v charakteristikách s konstantním rozdílem v celém frekvenčním intervalu. Tento ukazatel je na druhou stranu méně citlivý vůči změnám tvaru, které nemají výrazný vliv na rozdíly v amplitudách. Vztah mezi minimy a maximy je definován jako:

$$MM = \frac{\sum_i^n \min(x_i, y_i)}{\sum_i^n \max(x_i, y_i)}$$

Samozřejmě existuje celá řada dalších ukazatelů, ale jejich detailní popis a analýza jejich předností a nevýhod není cílem této práce. Cílem předchozích řádků bylo prezentovat alespoň jejich užší výběr a ukázat, že identifikaci rozdílů v charakteristikách a jejich analýzu je nejlepší provádět za pomoci více statistických nástrojů vhodně zkombinovaných tak, aby zastupovaly ukazatele různě citlivé vůči obvyklým v praxi častým změnám při FRA diagnostice, jelikož někdy ukazatele poskytují i diametrálně odlišné výsledky [29]. Na závěr je třeba připomenout, že již samotné měření hodnot, jejichž suma tvoří frekvenční charakteristiku, je samo o sobě zatíženo chybou, a tudíž i všechny výše popsané nástroje tuto chybu nesou dále. S tím je samozřejmě třeba počítat při volbě vhodného nástroje (nevhodně zvolený by mohl být kupříkladu nadměru citlivý vůči nepatrným změnám v hodnotách blízkých nule v případě, pracoval-li by s rozdílem relativním).

2.5.2 Změny charakteristiky – neporuchové stavy

Metoda se používá k detekci fyzických změn, ale charakteristiky jsou ovlivněny řadou dalších faktorů, které nemusí být vždy brány v potaz. Mnohé z nich jsou poměrně snadno identifikovatelné, především kvůli svému specifickému vlivu na charakteristiky. Problém nastává, když je výsledná charakteristika ovlivněna několika faktory zároveň.

Jeden z faktorů ovlivňující výsledný tvar frekvenční charakteristik je i teplota. Růst teploty způsobuje posun frekvenční charakteristiky směrem k nižším frekvencím, přičemž s rostoucí frekvencí tento vliv roste. Změna teploty má ovšem při zachování běžných teplot vliv velmi malý a přibližně do 2 MHz v podstatě zanedbatelný. [4] Vzhledem k tomu, že změna teploty o 30 °C má vliv pouze nepatrný i v oblasti vysokých frekvencí, muselo by dojít k výrazné změně okolních podmínek a tepelných ztrát, aby vliv rozdílu teplot nebyl zanedbatelný vůči ostatním faktorům ovlivňujícím tvar charakteristiky (např. ve [4] byl vliv teploty zcela zastíněn vlivem změny vlhkosti izolačního materiálu). Vzhledem k již tak obtížné interpretaci dat, je však vhodné do protokolu z měření teplotu zaznamenat a její eventuální vliv pak snadno vyloučit.

Podobný vliv jako olej má i přítomnost vody (vlhkosti), obzvláště v papírové izolaci. Navlhnutí izolace má, stejně jako v případě oleje, následkem odlišné relativní permitivity vody (vedle změny kapacity v důsledku přítomnosti dielektrika s odlišnou permitivitou dojde i ke zvýšení vodivosti izolace), za následek posun charakteristiky směrem k nižším frekvencím. Efekt je dle očekávání podstatně méně výrazný než naplnění transformátoru olejem. [4] Změna teploty, oleje i vlhkosti se projevuje na frekvenčních charakteristikách všech typů transformátorů v podstatě stejně (posun ve směru osy frekvence), ale míra ovlivnění charakteristiky těmito jevy se pro každý typ transformátoru liší v závislosti na jeho konstrukci. Jedním z důvodů, proč jsou FRA měření nad obvykle používanou maximální hodnotou frekvence tak problematická, je právě rostoucí vliv těchto faktorů s tím, jak narůstá frekvence, v důsledku čehož jsou charakteristiky s větším frekvenčním rozsahem pro praxi nepoužitelné.

Jak bylo popsáno na jiném místě této práce, je FRA metoda v oblasti vyšších frekvencí poměrně citlivá vůči změnám, byť nepatrným, geometrie transformátoru. K těm může dojít jak v důsledku poruchového stavu a následného poškození, tak v důsledku revizních prací. Síla vyvíjená stahovací konstrukcí na jádro transformátoru a jeho vinutí postupem času klesá, a proto bývají při generálních revizích svorníky dotahovány. Ačkoli tento servisní zásah nemá na provozuschopnost transformátoru vliv, má někdy i značný vliv na tvar frekvenční charakteristiky transformátoru (k tomu více [4], kde došlo k výrazným změnám oproti charakteristice původní především v oblasti frekvencí nad 700 kHz). Jev lze vysvětlit tím, že zvýšením tlaku dochází ke snížení tloušťky dielektrika mezi vinutími, vytlačení oleje a tím i změně poměru papír-olej (tomu odpovídá zvýšení vodivosti mezi závity, což by podle [20] nemělo působit posun charakteristiky, ale pouze zmenšení rezonančních špiček). Pokles upínací síly má logicky účinek opačný, čehož lze při diagnostice využít. Oproti výše uvedenému se změny geometrie jádra transformátoru v souladu s očekávanými projevují především v oblasti nízkých frekvencí a kolem prvního rezonančního bodu, čemuž odpovídá přibližně frekvence do

1 kHz (k tomu blíže viz [9], kde byl na základě komparace charakteristik krajních fází diagnostikován výrazný pokles upínací síly, poškození stahovací konstrukce a výsledná dislokace části jádra).

Magnetizace jádra transformátoru může způsobit rozdíly ve frekvenčních charakteristikách tím, že při každém měření bude úroveň remanentního magnetismu jádra jiná. Remanentní magnetismus má za následek posun prvního rezonančního bodu směrem k vyšší frekvenci a jeho vliv je patrný přibližně do hodnoty 5 kHz, jelikož je v oblasti vyšších frekvencí potlačen vlivem vířivých proudů. [2] Jak již bylo zmíněno, vliv magnetizace lze minimalizovat použitím vhodného zapojení (vliv je podle [2] minimální jak při měření charakteristiky vinutí, tak při měření v induktivním zapojení), a tak umožnit komparaci charakteristik i v oblasti nižších frekvencí, která slouží k detekci poruch týkajících se jádra transformátoru a vinutí. Protože měření FRA charakteristik není jedinou diagnostickou metodou, je obvyklé provádět postupně různá měření, přičemž je nutné dbát na to, aby měření předcházející FRA diagnostice zbytečně neovlivňovala výslednou charakteristiku právě magnetizací jádra (například měření odporu vinutí stejným směrem napětím). Odborné publikace naznačují, že tento jev je možné, pravděpodobně vlivem magnetické viskozity, pozorovat i po demagnetizaci snižováním napětí a teprve po přibližně 24 hodinách dochází k ustálení polohy prvního rezonančního bodu. Při komparaci charakteristik různých vinutí navíc interpretaci dat komplikuje nerovnoměrná úroveň remanentního magnetismu v jádře transformátoru. [26] Velmi podobný vliv, tedy odlišnou frekvenci prvního minima charakteristiky, má zemnění jádra, které ovšem může vést i dalším menším změnám v této frekvenční oblasti, a které proto nelze při zapojení opomenout.

Ze všech výše uvedených důvodů je pro praktická měření v terénu doporučováno před zahájením měření samotných charakteristik proměřit charakteristiku známé a na okolních podmínkách minimálně závislé impedance. Charakteristika tohoto "etalonu" by měla být za všech běžně očekávaných okolností stejná a případné rozdíly je tudíž možné přičítat chybám v zapojení, vnějšímu šumu a tak podobně. [7] Společnosti zabývající se komerční výrobou přístrojů k měření frekvenčních charakteristik někdy tyto etalony nabízí i jako součást standardního příslušenství.

2.5.3 Změny charakteristik – poruchové stavy

V této části jsou pouze pro úplnost, protože cílem této práce není ani tak analýza diagnostických možností FRA metody jako rozbor samotné metodiky měření frekvenčních charakteristik, stručně popsány vybrané poruchy transformátorů, které jsou FRA metodou diagnostikovatelné, a jejich typické projevy ve frekvenčních charakteristikách. Je tomu tak proto, aby si čtenář této práce mohl učinit celistvou představu o tom, jak se jednotlivé

poruchy v charakteristikách projevují v porovnání se změnami charakteristik způsobenými nežádoucími okolními vlivy a nedodržením správného metodického postupu při měření. Níže uváděné typické projevy jednotlivých poruch se týkají vždy měření na konkrétním vinutí (tj. *end-to-end*), které je v praxi nejobvyklejším způsobem zapojení.

Pro účely této části textu je dělení frekvenčních intervalů pouze orientační, ale přibližně odpovídá rozsah 10 Hz až 10 kHz oblasti nízkých frekvencí, rozsah 5 kHz až 100 kHz oblasti středních frekvencí, rozsah 50 kHz až 1 MHz oblasti vyšších frekvencí a nad 1 MHz se mluví o oblasti vysokých frekvencí.

Radiální deformace (v angličtině též *Hoop Buckling*) je případ, kdy, obvykle vlivem velkých poruchových proudů a výsledných elektromagnetických sil směřujících dovnitř vinutí, dojde k lokálnímu prohnutí vinutí mezi lištami směrem do osy vinutí. Změna charakteristiky závisí na míře deformace, přičemž tato porucha se projevuje především zřetelným posunem jedné nebo více částí charakteristiky ve směru osy frekvence s rostoucím rozdílem v oblasti vyšších frekvencí a také případně vznikem nových rezonančních bodů charakteristiky. Porucha je diagnostikována při měření na konkrétním vinutí s tím, že změny jsou výraznější v případě ponechání nepoužívaných svorek volně.

Axiální deformace (v angličtině též zvaná *Telescoping*) je další geometrická změna tvaru vinutí v důsledku elektromagnetických sil, ovšem tentokrát ve směru osy cívky, kdy dochází k prohýbání vinutí (nejvíce na krajích cívky), a tím zmenšení poloměru závitů, a tím utažení vinutí. Změny v charakteristice jsou nejvýraznější v oblasti středních frekvencí, kde dochází k horizontálnímu posunu a eventuálně i k vytvoření nových rezonančních bodů. V oblasti vyšších frekvencí se také tato deformace projevuje, ale posun je spíše horizontální, přičemž opět může dojít k menším odlišnostem v tvaru charakteristiky. Nevhodnějším zapojením pro diagnostiku této poruchy je měření přímo na poškozeném vinutí s nezapojenými svorkami vinutí ostatních.

Příkladem poruchy, která se projevuje především v oblasti nízkých frekvencí, je poškození jádra transformátoru. Tato porucha se projevuje, jak posunem charakteristiky, tak i změnou jejího tvaru. Porucha je dobře identifikovatelná v případě změny tvaru charakteristiky, protože samotný posun v tomto frekvenčním intervalu nemusí znamenat poškození jádra, ale může se jednat pouze o vliv reziduálního magnetismu (jak byl popsán výše).

Velmi snadno jsou detekovány mezizávitové zkraty na vinutí, případně zkraty mezi dvěma vinutími. V těchto případech dochází k výrazným změnám charakteristik v oblasti nízkých frekvencí, a to jak v případě měření na vinutí s nezapojenými ostatními svorkami, tak v případě zkratování těchto svorek. V prvním případě je tvar zcela odlišný a charakteristika postrádá typický první rezonanční bod, zatímco v druhém případě dochází spíše k výraznému posunu a změnám amplitudy.

Uvolnění kontaktů nebo přerušení (přepálení) vinutí v důsledku extrémního tepelného namáhání vinutí odpovídá zapojení impedance velké hodnoty do měřicího obvodu. To má za následek zejména výrazný vertikální posun obvykle celé charakteristiky směrem dolů (větší impedance odpovídá většímu útlumu), či v případě úplného rozpojení nebo přerušení vinutí může být celá charakteristika skryta pod úrovní vnitřního šumu měřicího přístroje. Vedle toho se také, především v oblasti středních frekvencí objevují často nová lokální maxima.

Stejně jako má na charakteristiku vliv dotažení svorníků (jak bylo popsáno výše), projeví se i uvolnění vinutí, obvykle způsobené otřesy při přepravě transformátoru. Metoda FRA nedetekuje uvolnění samotných vložek mezi cívkami, ale následné geometrické změny nastalé uvolněním vinutí. Obdobně jako v případě dotažení stahovací konstrukce jsou změny v charakteristikách patrné až v oblasti vysokých frekvencí a s rostoucí frekvencí se rozdíly obvykle zvětšují.

Poslední příklad poruchy detekovatelné metodou FRA je specifický v tom, že zastupuje ta poškození transformátoru, která přímo nesouvisí s magnetickým obvodem samotným. Je-li mezi primární a sekundární vinutí vloženo uzemněné kovové stínění, projeví se případná porucha zemnění tohoto stínění odlišným průběhem charakteristiky hlavně v oblasti středních frekvencí (v [1, 2] byla navíc tato porucha spojena s prorůstáním papírové izolace uhlíkovými strukturami, což také nepochybně ovlivnilo výsledky).

Jak již bylo popsáno, je FRA metoda schopná diagnostikovat i další změny stavu transformátorů (navlhnutí, špatné zemnění apod.), ovšem v těchto případech se nejedná o typické poruchové stavy transformátoru, a tudíž jsou tyto vlivy popsány v části týkající se změn charakteristik v důsledku změn vnějších okolností.

2.6 Shrnutí

Tato část práce poskytuje ucelený přehled všech důležitých požadavků, obsažených v mezinárodních i firemních standardech, kladených na měřicí přístroje, vodiče a vůbec postup *lege artis* při měření frekvenčních charakteristik transformátorů. Z pohledu návrhu nového pracoviště se jeví jako nedůležitější doporučení týkající se zejména kabelů, které by měly být co nejkratší a mít ideálně nulový útlum v celé frekvenční oblasti, délky zemnicích vodičů a kvality zemnění vůbec, zajištění kvalitních kontaktů v celém měřicím obvodu a záznamu veškerých dat týkajících se možných vlivů na tvar charakteristiky (zapojení včetně zapojení k měření nepoužívaných svorek, napětí, stav transformátoru apod.). Doporučované parametry přístrojů budou využity po sestavení a oživení měřicího pracoviště, jelikož je žádoucí ověřit, zdali měřicí sestava splňuje alespoň základní požadavky vyplývající z předchozího textu (dynamický rozsah, vliv kabelů, atd.).

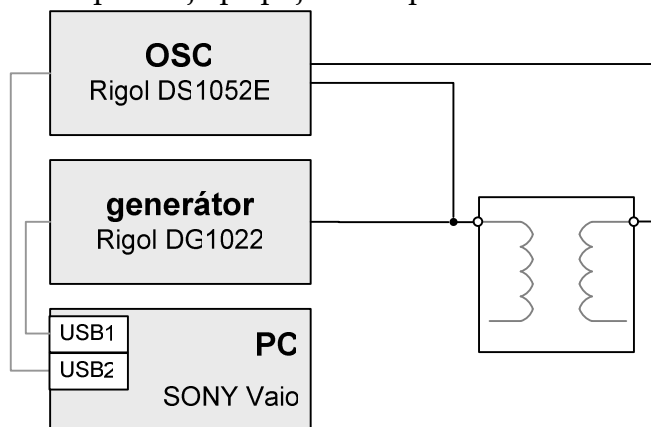
3 Sestavení a oživení pracoviště

3.1.1 Sestavení

Nové pracoviště pro měření SFRA charakteristik se sestává, obdobně jako pracoviště původní, ze dvou přístrojů – dvoukanalového osciloskopu Rigol DS 1052E a generátoru Rigol DG1022. Tyto přístroje by měly být uživatelem ovládány prostřednictvím notebooku Sony VAIO, ke kterému jsou připojeny prostřednictvím USB rozhraní, jímž jsou oba vybaveny.

Ačkoli jsou přístroje již pořízeny, a tudíž jsou parametry hardware dopředu dány, budou pro účely komparace s komerčními SFRA analyzátory a doporučenými parametry v mezinárodních standardech na tomto místě stručně představeny. Generátor umožňuje generovat sinusový signál s napětím až 10 V špička–špička při zatížení 50 Ω o maximální frekvenci 20 MHz, což by mělo být postačující. Osciloskop umožňuje měření až do 50 MHz s tím, že vzorkovací frekvence je 500 MSa/s. Určité omezení představuje minimální rozsah 2 mV/div a osmibitové vertikální rozlišení. Další nevýhodou je pevně daný krok přepínání rozsahů na časové ose, kterou tak lze měnit pouze s krokem 1–2–5. Na druhou stranu je nutno uvážit, že dané vybavení pracoviště je možno pořídit za značně nižší cenu, než je cena komerčních analyzátorů, a bude tak zajímavé porovnat reálné výsledky tohoto pracoviště s požadavky kladenými na profesionální přístroje.

Sestavení pracoviště je tudíž poměrně jednoduchou záležitostí a v podstatě stačí měřicí přístroje připojit k PC pomocí USB rozhraní.



Obr. 12 Schéma zapojení pracoviště

3.1.2 Oživení

K oživení pracoviště, odhlédneme-li od programové části práce, bylo nutné doinstalovat do notebooku potřebné VISA ovladače (respektive chybějící VISA32 knihovnu), bez kterých nelze s přístroji komunikovat. Jako nejjednodušší řešení tohoto problému se ukázala instalace NI-VISA Run-Time Engine. Software Rigol UltraScope se ukázal pro dané účely zcela nepotřebným.

4 Program k ovládní měřicího pracoviště

4.1 Specifikace požadavků na programové řešení

4.1.1 Obecné požadavky na program

Pracoviště samotné a jeho ovládní prostřednictvím notebooku by mělo být řešeno takovým způsobem, aby byl celek dobře použitelný při výuce studentů, například jako jedna z úloh v rámci některého z předmětů zaměřeného na diagnostiku transformátorů. I to je jeden z důvodů, proč byl pro účely nového pracoviště pořízen dvoukanálový osciloskop. Výsledné řešení by tak mělo zajistit didaktickou názornost a studenti by měli mít možnost pozorovat, jak se mění vzájemný poměr velikosti vstupního a výstupního napětí a jejich vzájemný fázový posun. Navržený program by proto měl po celou dobu měření umožňovat vizuální kontrolu obou měřených napětí buďto přímo na displeji osciloskopu, anebo v rámci uživatelského rozhraní.

Cílem softwarové části této práce je návrh, vývoj a implementace programu vhodného k ovládní pracoviště pro měření frekvenčních charakteristik výlučně prostřednictvím notebooku, který je součástí tohoto pracoviště. Program by měl na základě parametrů daného FRA měření zadaných uživatelem automaticky změřit frekvenční charakteristiku textovaného objektu v požadovaném frekvenčním rozsahu a s daným rozlišením a data z tohoto měření uložit do formátu používaného vybraným tabulkovým procesorem. Měření samotné (před zahájením měření je samozřejmě nutný vstup uživatele ve formě zadání výchozích parametrů měření) by mělo být plně automatické a doba měření by v ideálním případě měla trvat řádově několik minut. Výsledná aplikace by měla být uživatelsky jednoduchá a z didaktického hlediska názorná, což je požadavek týkající se pracoviště jako celku. Softwarové řešení by mělo být takové, aby co nejvíce využilo možností měřicích přístrojů, které jsou součástí pracoviště, a výsledky byly co nejpřesnější.

4.1.2 Požadavky na uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní by mělo být především srozumitelné, snadné k používání a umožňovat nastavení všech u komerčních přístrojů obvyklých parametrů. Ovládní by tudíž mělo obsahovat prvky k nastavení počáteční frekvence, konečné frekvence, hustotu měřených bodů a volbu, zdali bude krok lineární či logaritmický. Zadávané hodnoty by měly buďto nabízet výběr z listu několika obvykle používaných hodnot (například 200/400/800 bodů na dekádu), anebo by měly být zadané hodnoty omezeny reálnými možnostmi měřicího pracoviště. Volba velikosti budicího napětí by neměla být součástí uživatelského rozhraní a jeho změna by měla být možná pouze v rámci

programátorského rozhraní. Součástí uživatelského rozhraní by měl být panel průběžně zobrazující naměřené výsledky formou amplitudové a fázové charakteristiky. Osy grafu by se měly automaticky přizpůsobovat měřeným hodnotám. Rozměry uživatelského rozhraní by měly být přizpůsobeny velikosti plochy displeje notebooku, prostřednictvím kterého bude měřicí pracoviště ovládáno. Ovládání by mělo umožňovat zahájit měření, zastavit právě probíhající měření a uložit naměřená data.

4.1.3 Požadavky na práci s daty a datové výstupy

Aplikace by měla, jak již bylo popsáno výše, obsahovat vizualizaci již naměřených dat, aby uživatel mohl okamžitě reagovat na zjevné chyby při měření. Po ukončení měření by měla být naměřená (u_1, u_2 , fáze) vypočtená (útlum) data uložena ve formátu používaném některým z dostupných tabulkových procesorů, nebo jiného běžně používaného formátu pro práci s daty z měření. Vedle toho by také měly být vypočteny a do stejného souboru uloženy odpovídající hodnoty impedance a admitance. Statistické zpracování, komparace charakteristik, ani databáze naměřených výsledků nejsou požadovány. Datová struktura by měla být taková, aby ve vybraném programu, v němž budou data dále zpracovávána, byla práce s daty (vizualizace, komparace charakteristik, statistické zpracování apod.) uživatelsky co nejjednodušší.

4.2 Úvodní analýza

4.2.1 Volba programovacího jazyka a software

Pro realizaci ovládání měřicího pracoviště prostřednictvím notebooku byl zvolen grafický programovací jazyk LabVIEW vyvinutý společností National Instruments (dále jen NI). Tento jazyk je již téměř 30 let vyvíjený mimo jiné právě pro účely ovládání měřících přístrojů prostřednictvím počítače. Jazyk je založen na trochu jiných principech než klasické textové programovací jazyky, takže například běh programu není sekvenční, ale je založen na toku dat (tzv. *dataflow programming*), kdy jsou jednotlivé funkce spuštěny ve chvíli, kdy mají na svých vstupech platná data, což inherentně umožňuje vícevláknové zpracování. Ačkoli je způsob programování v tomto jazyku poněkud odlišný, byl zvolen mimo jiné právě proto, že výsledný grafický kód je přehledný i pro uživatele neprogramátory. Další důvod pro jeho výběr souvisí s jeho primárním účelem, jelikož do LabVIEW je implementována *Virtual Instrument Software Architecture* (dále jen VISA), a ten tudíž obsahuje všechny potřebné funkce pro ovládání přístrojů prostřednictvím tohoto rozhraní. VISA standard je mezinárodním průmyslovým standardem majícím za cíl sjednotit formu komunikace s přístroji různých výrobců prostřednictvím rozličných rozhraní (jako jsou GPIB a USB) a přístroje společnosti Rigol, které

jsou součástí měřicího pracoviště, je možné řídit právě i prostřednictvím tohoto rozhraní. V neposlední řadě je vývojové prostředí NI LabVIEW produkt, který je dostupný studentům i zaměstnancům ČVUT.

Jako vhodný tabulkový procesor pro následné zpracování naměřených dat se jeví Microsoft Excel. Program Excel je v první řadě, mimo jiné pro jeho širokou uživatelskou základnu, podporován společností NI jakožto tabulkový procesor určený ke zpracování výstupních dat z LabVIEW a je schopen pracovat s řadou formátů generovaných prostřednictvím tohoto programovacího jazyka, a to buďto přímo (např. formát CSV), nebo pomocí různých doplňků vyvinutých společností NI (např. formát TDMS). Druhým důvodem pro výběr programu Excel je skutečnost, že je již nainstalován na notebooku určeném k ovládání měřicího pracoviště. V neposlední řadě se jedná o program, se kterým je zvyklá pracovat drtivá většina zaměstnanců i studentů, což zajisté zaručuje uživatelskou přívětivost takového řešení. Podle zvoleného formátu dat je nutné rozšířit program Excel o případné doplňky, bude-li je práce s tímto formátem vyžadovat.

4.2.2 Uživatelské rozhraní

Tvorba jednoduchého a přehledného, ale přitom estetického a moderně vypadajícího uživatelského rozhraní je jednou z předností LabVIEW. Jelikož byl tento programovací jazyk primárně vyvinut pro moderní měření řízená počítačem, obsahuje již ve svém základu vestavěné knihovny s grafickými prvky představujícími uživatelské vstupy a vizualizaci výstupů (tzv. *controls* a *indicators*). I samotná struktura vývojového prostředí je tomuto uzpůsobena a předpokládá simultánní tvorbu uživatelského rozhraní v samostatném okně (tzv. *front panel*) zároveň s vývojem programu samotného v druhém okně (tzv. *block diagram*).

Návrh uživatelského rozhraní vychází z požadavků na něj kladených, tedy jednoduchost, přehlednost, uživatelskou přívětivost a maximální rozměry, tedy nutnost respektovat velikost monitoru s rozlišením 1366 × 768 bodů.

Z hlediska ovládacích a vizualizačních prvků musí front panel obsahovat ty, které jsou uvedeny ve specifikaci, tedy:

- i. numerický vstup určující počáteční frekvenci,
- ii. numerický vstup určující koncovou frekvenci,
- iii. numerický vstup určující frekvenční krok (rozlišení),
- iv. numerický vstup určující počet bodů na dekádu (rozlišení),
- v. přepínač mezi lineárním a logaritmickým frekvenčním krokem,
- vi. tlačítko pro zahájení měření,
- vii. tlačítko pro zastavení měření,
- viii. XY graf pro vizualizaci amplitudové charakteristiky a
- ix. XY graf pro vizualizaci fázové charakteristiky.

Co se vizualizačních prvků týče, tak uživatelské rozhraní musí, dle zadání, obsahovat dva grafy (jeden pro amplitudovou a druhý pro fázovou charakteristiku), které budou dostatečně velké a čitelné, ale zároveň nebudou zabírat většinu poměrně malé pracovní plochy notebooku. Jako vhodné řešení se jeví jejich umístění ve dvou přepínatelných, vzájemně se překrývajících oknech. Grafy by také měly, protože se jedná o pouhý předběžný náhled a aplikace by z tohoto pohledu měla být uživatelsky pohodlná, automaticky přizpůsobovat rozsahy os aktuálně zobrazovaným datům. Všechny numerické vstupy by měly být řešeny tak, aby uživatel nemohl zadat nereálné hodnoty (a ohrozit tak například měřicí přístroje). Podobně by následky stisknutí tlačítka majícího vliv na běh programu měly být navázány na potvrzení takového kroku v rámci dialogového okna, aby bylo ošetřeno případné překlíknutí uživatele. Většina ovládacích prvků nevyžaduje další komentář a jejich programové řešení bude popsáno v části věnované dokumentaci programu, snad pouze stručně ke vstupu určujícímu rozlišení. Ačkoli je v zadání preferován způsob výběru rozlišení z listu hodnot oproti zadání libovolné hodnoty, byla pro konečný návrh zvolena kombinace obou přístupů s tím, že dle návrhu by program měl umožnit zadání rozlišení jak prostřednictvím měřicího kroku, tak prostřednictvím počtu měřených bodů na dekádu frekvence. Je to jednak proto, že v případě lineárního rozlišení je uživatelsky vhodnější určovat rozlišení formou měřicího kroku a naopak v případě logaritmického formou počtu bodů na dekádu frekvence, jednak také proto, že z didaktických důvodů je vhodné, aby se studenti seznámili a osvojili si práci s logaritmickým měřítkem, které je při FRA měřeních standardně používáno (prostřednictvím pochopení zadání rozlišení formou logaritmického kroku). Toto řešení také umožňuje zkušenému uživateli nastavit libovolný krok, což je důležité kupříkladu ve chvíli, kdy je referenční charakteristika naměřena s nestandardním krokem.

Vedle toho musí front panel obsahovat další uživatelské vstupy, které jsou nezbytné z hlediska komunikace s měřicími přístroji a to:

- i. lištu pro výběr VISA adresy přístroje Rigol DS1000,
- ii. lištu pro výběr VISA adresy přístroje Rigol DG1000 a
- iii. tlačítko pro iniciaci komunikace.

Tyto uživatelské vstupy jsou nezbytné pro účely komunikace k určení, na kterém konkrétním USB portu je ten daný měřicí přístroj připojen (přesněji řečeno jde o určení tzv. *VISA resource name*, což je unikátní VISA identifikátor pro komunikaci prostřednictvím tohoto rozhraní). Tlačítko pak slouží k zahájení komunikace s přístroji prostřednictvím VISA rozhraní.

Samotný program by pak měl být navržen tak, aby odezva na libovolný uživatelský zásah byla maximálně 100 ms, jelikož pomalejší odezvu jsou již uživatelé schopni vnímat jako nepříjemné zpomalení programu.

4.2.3 Funkce programu

Program musí na základě uživatelských vstupů a pokynů provést určité dílčí kroky reprezentované v obecné rovině těmito činnostmi:

- i. načíst vstupní data,
- ii. zahájit komunikaci s měřicími přístroji,
- iii. provést prvotní nastavení měřících přístrojů,
- iv. nastavit konkrétní frekvenci budicího signálu,
- v. nastavit rozsahy odpovídající měřeným signálům,
- vi. změřit hodnoty napětí u_1 a u_2 a časový posun těchto napětí,
- vii. vypočítat útlum, fázi, impedanci a admitanci,
- viii. uložit naměřené hodnoty do datové struktury,
- ix. zobrazit hodnoty již naměřené,
- x. vytvořit soubor a uložit naměřené a vypočtené hodnoty a
- xi. uvést přístroje do klidového stavu a ukončit komunikaci.

Z výše uvedeného rozboru vyplývá, že vhodnou programovou strukturou pro řešení této úlohy je stavový automat, který bude obsahovat stavy jednorázové (načtení hodnot, inicializace přístrojů atp.) a pak stavy cyklicky se opakující (nastavení frekvence, nastavení rozsahů, měření atd.). Protože program musí i během samotného automatického měření reagovat na zásah uživatele (přerušování měření), je nutné do cyklicky opakovaného sledu stavů souvisejících s měřením včlenit specifický stav, v rámci kterého bude reagováno na uživatelské požadavky (jde v podstatě jen o příkaz k přerušování cyklu).

V rámci načtení vstupních dat zadaných uživatelem určujících podmínky měření je třeba ošetřit zadání nesmyslných hodnot. Při zahájení komunikace s přístroji, které by měly být dostupné na uživatelských VISA adresách, je po samotné iniciaci komunikace žádoucí ověřit, zdali se skutečně jedná o zařízení, k jejichž ovládání je program určen, a nedojde-li ke shodě oznámit uživateli tuto skutečnost chybovou hláškou. Třetím krokem je uvedení přístrojů do výchozího stavu, tedy zejména nastavení typu generovaného signálu, jeho amplitudu (tu dle zadání nelze změnit v uživatelském rozhraní), nastavení polohy měřených signálů na vertikální ose osciloskopu. Činnosti uvedené v bodech iv. až vi. musí program opakovat do té doby, než je proměřen celý frekvenční interval, anebo do té doby než uživatel měření přeruší. Při měření frekvenční charakteristiky se z hlediska generátoru signálu mění pouze parametr frekvence, což by mělo být řešeno jednoduše pouze jedním příkazem. Samotné nastavení rozsahů osciloskopu a měření napětí je komplikovanější, jelikož se rozsahy musí průběžně automaticky měnit tak, aby měřené signály optimálně zaplňovaly obrazovku a tím byl maximálně využit osmi bitový převodník, kterým je osciloskop vybaven. Rozlišení na časové ose je nutné pouze zjemňovat s tím, jak se známým krokem roste frekvence, tudíž je vždy dopředu možné tuto hodnotu nastavit. Výstupní napětí generátoru u_1 , by se mělo měnit po celou dobu měření pouze minimálně, takže

vertikální rozsah daného kanálu není pravděpodobně vůbec nutné v průběhu měření měnit. Oproti tomu se výstupní napětí u_2 měřené na druhém kanálu mění obvykle poměrně výrazně zvláště v oblasti vyšších frekvencí, a je tudíž nutné zajistit automatické přizpůsobování vertikálního rozsahu aktuální maximální hodnotě tohoto napětí. Vzhledem k tomu, že impedance a admitance nejsou předběžně zobrazovány (jelikož tyto charakteristiky nenesou skutečně novou informaci), je možné tyto hodnoty vypočítat až po skončení měření při ukládání hodnot do vytvořeného souboru. Výsledkem každého měření je samostatný soubor naměřených dat, a proto by vždy, když jsou data ukládána, měl být vytvořen nový soubor, přičemž zkušenější uživatelé obvykle preferují dialogové okno a možnost volby místa uložení souboru.

Měření velikosti napětí bude provádět na základě příkazu samotný osciloskop, a nebude tudíž nutné v rámci programu řešit online zpracování navzorkovaného signálu streamovaného přes VISA rozhraní. Protože úloha není náročná na procesorový čas, jelikož se v daném případě nejedná o kontinuální zpracování většího datového toku, nejeví se nezbytné, aby program pracoval vícevláknově. Samotný program by tak tím, že bude řešen jednovláknově a budou použity programové struktury v podstatě obecně známé, měl být více přehledný i pro uživatele, kteří nejsou seznámeni se specifiky jazyka LabVIEW (např. studenti).

4.2.4 Práce s daty

Program při každém opakování cyklu sloužícího k měření hodnot napětí při dané hodnotě frekvence musí do vhodné datové struktury, ve které jsou ukládána data za běhu programu, připojit data nově získaná (aktuální frekvenci, obě napětí, útlum a fázi) a následně aktualizovat data zobrazená v obou grafech. V rámci programu je také nezbytné se vypořádat s tím, jaký datový formát mají data poskytovaná měřicími přístroji a případně je převést, jedná-li se například o textový řetězec, na číselný datový typ. Použitá datová struktura sloužící k ukládání dat, by také měla korespondovat s formou dat vyžadovanou na vstupu vizualizačních prvků, aby nebylo nutné ukládat data do dvou struktur (jedna pro účely jejich uložení do souboru a druhá pro účely grafů), případně data při každém běhu cyklu převádět z jedné datové struktury do druhé. Pro ukládání dat do souboru je vhodný binární TDMS formát, protože LabVIEW obsahuje širokou paletu funkcí pro práci s tímto typem souboru, formát je přizpůsobem k ukládání velkého množství dat a v neposlední řadě je tento formát dobře vniřně strukturován, což ho činí přehledným. V neposlední řadě po instalaci doplňku *TDM Excel Add-In for Microsoft Excel* lze ke zpracování dat v tomto souboru použít bez problémů program Microsoft Excel.

4.3 Návrh programu

Na tomto místě práce je stručně popsán návrh programu (tzv. *Virtual Instrument*, dále jen VI), jeho struktury, prvků uživatelského rozhraní, vnitřních proměnných a datových struktur, nejdůležitějších funkčních celků a způsobu ukládání dat do externího souboru. V souladu s tímto návrhem byl v programovacím jazyku LabVIEW vytvořen vlastní program, jehož dokumentace je k nalezení v přílohách této práce. Následující text se nevěnuje podrobnému popisu návrhu jednotlivých podprogramů (tzv. *subVI*), jelikož cílem této části je spíše nastínit základní koncepci, na které je program postaven, a podrobnosti jsou obsaženy v samotné dokumentaci programu. Jelikož LabVIEW je grafickým programovacím jazykem, jsou výsledné blokové diagramy hlavního VI a subVI již svým způsobem, jsou-li dobře navrženy, dokumentací programu samy o sobě, protože LabVIEW umožňuje připojit ke každému prvku popisky a dokumentaci. Z tohoto důvodu neobsahují přílohy kopii všech blokových diagramů, jelikož takový přístup je neúčelný a pro uživatele nepotřebný.

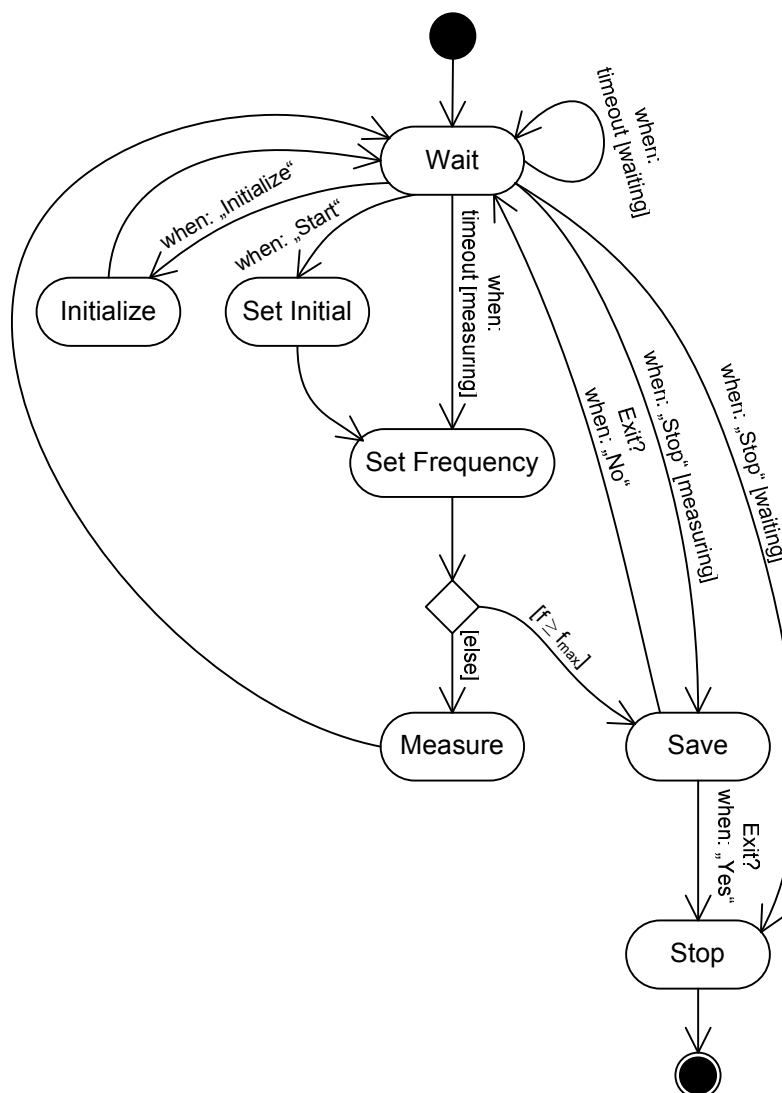
4.3.1 Uživatelské rozhraní

Návrh uživatelského rozhraní je plně v souladu s provedenou analýzou a jednotlivé prvky rozhraní jsou řešeny pro LabVIEW standardním způsobem (typ *control* a *indicator*). Všechny prvky, jejich typ a popis funkce lze nalézt v seznamu, který je přílohou této práce. Nad rámec analýzy byly navíc přidány dva prvky typu *Tab Control*. Jedná se v podstatě o záložky, jež mohou obsahovat různé jiné prvky a umožňují volbu, který obsah záložky bude zobrazen. V prvním případě tento prvek slouží k přepínání mezi amplitudovým a fázovým grafem a v druhém případě je použit pro volbu způsobu, jakým je určena hustota měřených bodů.

Ačkoli nejde o uživatelské rozhraní v přesném smyslu slova, bude na tomto místě popsána možnost změny celé řady dalších parametrů, které nejsou přístupné prostřednictvím front panelu hlavního VI, který zprostředkovává běžnou interakci s uživatelem. Jednotlivá subVI se totiž, stejně jako hlavní VI, sestávají vedle blokového diagramu obsahujícího samotný kód podprocesu také z front panelu, který představuje vstupy a výstupy tohoto podprocesu a který vypadá vizuálně stejně jako v případě hlavního VI. Front panely všech subVI jsou navrženy tak, aby zkušenějšímu uživateli umožňovaly pohodlně pomocí jejich ovládacích prvků nastavit řadu dalších parametrů typu filtrování stejnosměrné složky a vysokých frekvencí, rychlosti měření, použití radiánů namísto stupňů, způsobu přepínání rozsahů a podobně. V seznamu a popisu subVI v příloze této práce jsou zahrnuty i tyto ovládací prvky.

4.3.2 Struktura programu

Jak již bylo v analýze problematiky naznačeno, je navrhovaný program založen na principu stavového automatu (v LabVIEW označovaný *Simple State Machine*) o celkem sedmi stavech. Pohyb mezi jednotlivými stavy určují v první řadě celkem tři ovládací tlačítka, vedle toho také několik dialogových oken, vypršení času a v některých případech pokračuje automat následujícím stavem bez dalšího. Struktura programu typická pro stavový automat se sestává z while smyčky, stavové proměnné a programového switche obsahujícího case pro každou variantu stavové proměnné (v LabVIEW je nazývána *case structure*). Navrhovaná struktura se nepatrně liší v tom, že vedle obvyklé stavové proměnné *Next State* obsahuje i další proměnnou *Previous State*, která nese informaci o předchozím stavu (přesněji o tom, zdali je program v režimu *waiting* nebo *measuring*). Pro obě stavové proměnné byl použit datový typ *enumerated constant*, který obsahuje vždy pár string–integer, a jednotlivé hodnoty stavové proměnné jsou tak pro přehlednost a lepší orientaci v programu pojmenovány. Důvodem pro toto řešení je snaha o návrh programu, který by vyhovoval konvencím týkajícím se návrhu programu a požadavku na umístění všech událostí vyvolaných uživatelem na jedno místo programu. Protože jsou veškeré tyto události ošetřeny ve stavu *Wait*, musí program nést dodatečnou informaci o předchozím stavu formou této druhé stavové proměnné, aby bylo po uplynutí časového limitu jednoznačné, zdali následuje stav *Set Frequency* nebo *Save*.



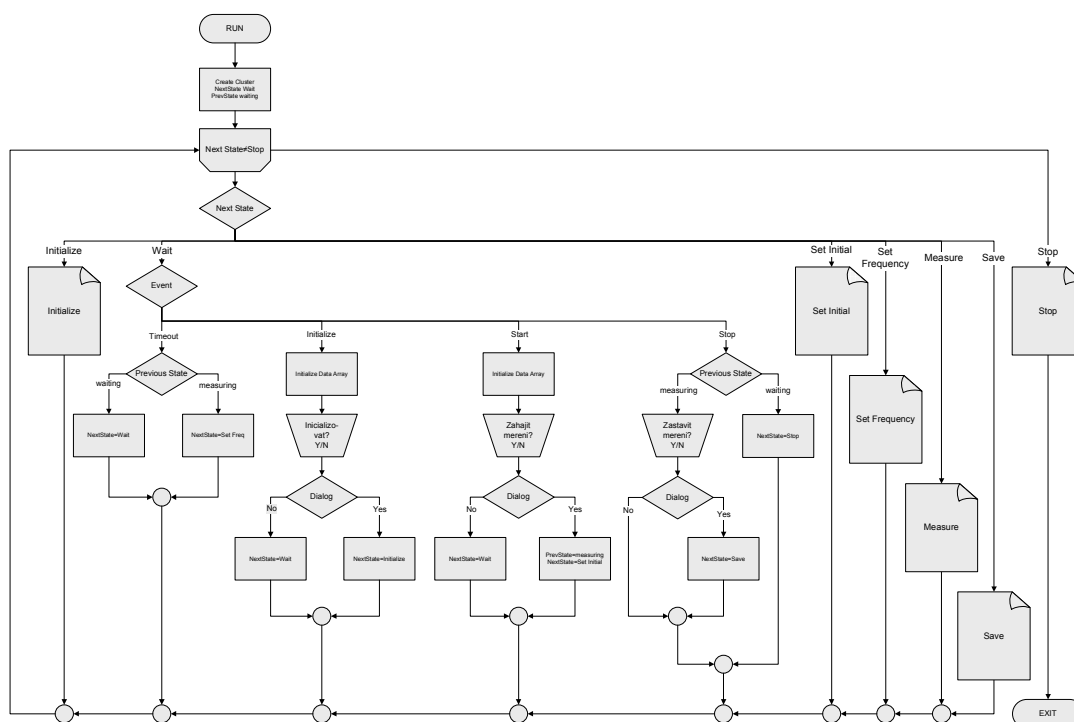
Obr. 13 Stavový diagram programu

Výchozím stavem je stav *Wait*, ve kterém program buďto čeká na stisk tlačítka (případně řeší stisk tlačítka v předešlých stavech, protože jednotlivá stisknutí se řadí do fronty, a nedochází tak k jejich ztrátě), anebo reaguje na uplynutí stanovené doby v závislosti na stavu enumerátoru *Previous State*. V tomto stavu program čeká v nekonečné smyčce do doby, než dojde k akci uživatele (*Previous State* je v tomto případě nastaven na hodnotu *waiting*). Stav *Initialize* následuje po stisku tlačítka *Initialize* a v rámci tohoto stavu je zahájena komunikace s měřicími přístroji na základě uživatelem zadaných VISA identifikátorů. Stiskem tlačítka *Start* přechází program do stavu *Set Initial*, ve kterém jsou načteny parametry měření zadané uživatelem a provedeno prvotní nastavení měřicích přístrojů. Poté následuje již stav *Set Frequency*, v němž je nastavena konkrétní frekvence budicího signálu a který již je součástí automatického měřicího cyklu (stavy *Wait*, *Set Frequency*, *Measure*) opakovaného do doby, než má být nastavena frekvence vyšší než frekvence konečná nebo než je uživatelem měření přerušeno. Není-li tedy podmínka týkající se frekvence splněna, přechází program do stavu *Measure*, v rámci kterého jsou nastaveny vhodné rozsahy, provedeno měření obou napětí a jejich

vzájemného časového posunu, vypočteny odpovídající hodnoty útlumu a fázového posunu, nová data přidána k datům již naměřeným a aktualizován amplitudový a fázový graf. Ze stavu *Measure* přechází program automaticky do stavu *Wait* a v případě, že nedošlo k uživatelské akci, pokračuje po uplynutí nastaveného intervalu dalším měřicím cyklem (*Previous State* je po stisku tlačítka *Start* nastaven na hodnotu *measuring*). Je-li měření uživatelem přerušeno tlačítkem *Stop* nebo je-li splněna podmínka maximální frekvence, následuje stav *Save*. V tomto stavu jsou naměřená data uložena do uživatelem specifikovaného souboru a na základě dialogového okna přechází program do stavu *Wait* (s tím, že *Previous State* má hodnotu *waiting*) anebo *Stop*, kdy je ukončena komunikace s přístroji a poté i program samotný. Z uvedeného stavového diagramu a jeho popisu mimo jiné vyplývá, že program neumožňuje měření pozastavit a posléze pokračovat. Tuto vlastnost program nemá proto, že samotné měření je poměrně krátké, do měřicí sestavy by v jeho průběhu nemělo být zasahováno a konečně jí obvykle nedisponují ani komerčně vyráběné FRA analyzátoři.

Vedle automaticky zobrazovaného dialogu v rámci stavu *Save*, který je uveden ve stavovém diagramu a určuje, zdali bude program ukončen, nebo přejde do režimu čekání na uživatelskou akci, obsahuje hlavní VI řadu dalších dialogů, které mají ve většině případů také přímo vliv na pohyb mezi jednotlivými stavy. V tomto případě se ale jedná o dialogy předcházející překliknutí uživatele, které by jinak mohlo zmařit právě probíhající měření, které nezpůsobují odlišný chod stavového automatu a slouží pouze k potvrzení. Při každém stisku jednoho ze tří ovládacích tlačítek je tak vyvolán dialog a uživatel svoji akci musí potvrdit, nebo je událost ignorována a program pokračuje beze změny stavem *Waiting*. Výjimku tvoří případ, kdy neprobíhá měření a program pouze čeká na vnější událost – v takovém případě totiž stisk tlačítka *Stop* nevyvolá dialog a program rovnou přechází do stavu *Stop*, protože daná akce nepůsobí v případě překliknutí škodu a je zbytečné uživatele obtěžovat neodůvodněnými dialogy. Zakomponování těchto potvrzujících dialogů jakožto dalších podmínek přechodů mezi stavy by učinilo diagram značně nepřehledný a nepřineslo by podstatnou informaci navíc, proto ve stavovém diagramu zachyceny nejsou, nicméně v dalším z nástrojů používaných při návrhu programu – vývojovém diagramu – již obsaženy jsou.

Celá struktura hlavního VI včetně všech dialogových oken je zachycena na takovém vývojovém diagramu. Na tomto místě je z důvodu jeho větších rozměrů podrobněji ukázána pouze ta část, která se týká stavu *Wait* a již zmíněných dialogových oken, a ostatní stavy programového switche jsou znázorněny pouze jako podprocesy. Podrobnější verze tohoto vývojového diagramu komplexně popisující celou strukturu hlavního VI, včetně subVI v něm použitých, je k nalezení v přílohách této práce.



Obr. 14 Vývojový diagram programu

Na vývojovém diagramu je vidět while smyčka, která zajišťuje cyklický běh programu do té doby, než je splněna v ní obsažená podmínka – proměnná *Next State* je na hodnotě *Stop* – a program je po vykonání kódu obsaženého v case *Stop* ukončen. Ačkoli je tedy podmínka testována na začátku smyčky, je tělo smyčky vykonáno i v případě, je-li podmínka splněna, což úzce souvisí se způsobem, jakým LabVIEW přistupuje k vykonávání jednotlivých částí kódu. Vytvoření while smyčky, která se ukončí po otestování podmínky (tedy skutečné smyčky s podmínkou na začátku), by bylo možné, ale zvolené řešení umožňuje, aby poslední case obsahoval kód, který bude vždy při ukončení běhu programu vykonán. Jednotlivé dialogy a jejich vliv na běh programu jsou z diagramu dobře patrné a nepotřebují proto podrobnější komentář. V krátkosti je žádoucí zmínit přístup k proměnné *Previous State*, která není měněna v každém stavu, ale pouze při potvrzení zahájení měření po stisku tlačítka *Start* a poté ve stavu *Save*.

Pro úplnost je vhodné dodat, že program obsahuje ve stavu *Save* ještě jeden dialog, který má vliv na běh programu, nikoli však na přechody mezi stavy, a dává uživateli pouze na výběr naměřená data neuložit (nedojde ke spuštění subVI sloužícího k uložení dat do souboru).

4.3.3 Práce s daty a vnitřní proměnné

Program používá při svém běhu rozličné datové struktury, které budou na tomto místě rámcově popsány. V souladu s výše uvedeným používá program dvě stavové proměnné datového typu enum, které jsou za účelem jednoduchosti používány samostatně. Pro přehlednost jsou všechny ostatní

proměnné a jiné datové struktury sdruženy v rámci vyšších datových struktur v textových jazycích označovaných jako datový typ record, eventuálně struct (v LabVIEW je obdobné sdružení rozličných datových typů nazýváno *cluster*). Hlavní VI tak zůstává přehledné, protože jednotlivé datové vodiče proměnných a polí jsou nahrazeny celkem třemi klastry. První skupina proměnných sdružuje proměnné související s během programu, jako jsou počáteční a koncová frekvence, krok měření, použitý rozsah a podobně. Druhý klaster sdružuje dva VISA identifikátory (tzv. *VISA resource name*), které slouží ke komunikaci s přístroji za běhu programu. Poslední je zdánlivě nejsložitější, jelikož se jedná o klaster tří klastrů dvou jednorozměrných polí, která obsahují naměřená data. Tato struktura není samoučelná, ale vychází z požadavku indikátoru typu *XY Graph* použitý v programu pro průběžné zobrazování naměřených hodnot. Ten totiž akceptuje na svém vstupu právě buďto klaster dvou jednorozměrných polí, pole klastrů tvořících vždy dvojici hodnot, nebo jednorozměrné pole obsahující komplexní čísla. Jako nejvhodnější, i z hlediska ukládání dat do souboru, jak bude popsáno dále, se jeví právě zvolená struktura a práce s ní je nakonec poměrně jednoduchá.

4.3.4 Iniciale přístrojů a ukončení komunikace

Je-li úspěšně v rámci stavu *Initialize* zahájena komunikace s přístroji a příkazem k jejich identifikaci ověřeno, že se skutečně jedná o přístroje s programem kompatibilní, může po zahájení měření uživatelem proběhnout v rámci stavu *Set Initial* jejich počáteční nastavení. U generátoru jsou uvedeny do požadovaného stavu veškeré parametry, které by mohly být nastaveny odlišně při předchozím použití přístroje a ovlivnit tak výsledky měření (jde zejména o tvar generovaného signálu, jeho napětí a stejnosměrnou složku). Stejně tak je provedeno nastavení osciloskopu (zejména rozsahy os, vertikální posun, filtrování vysokých frekvencí a stejnosměrné složky). Všechny tyto parametry nelze měnit v rámci uživatelského rozhraní, ale je možná jejich pohodlná změna v rámci front panelů daných subVI, které inicializaci přístrojů obstarávají. Podrobnější popis prvotního nastavení rozsahů je uveden v části věnované změně rozsahů obecně.

4.3.5 Nastavení rozsahů na osciloskopu

Jak již bylo zmíněno, program musí zajistit automatické přepínání rozsahů jak vertikální, tak horizontální osy. Na obou osách osciloskop používá pro nastavení napětí, případně času na jeden dílek stupnice krok 1–2–5 (tedy například 0,5 V/div, 0,2 V/div, 0,1 V/div, 0,05 V/div atd.). Výsledné rozsahy obou os (dílků je na obou osách celkem 8) představují tudíž poměrně skokové změny, se kterými musí program pracovat. To na jednu stranu urychluje měření, protože program nepřepíná rozsah při každé změně, ale až tehdy, je-li vhodné použít rozsah nižší nebo vyšší, na druhou stranu takto hrubý krok

snižuje přesnost měření, protože v ideálním případě by měl měřený signál dokonale zaplnit obrazovku osciloskopu. Protože by na výsledné charakteristiky nemělo mít vliv, zdali je měřeno od frekvencí nižších směrem k vyšším nebo naopak, program nedává uživateli na výběr a používá směr od nejnižší frekvence k nejvyšší. Z tohoto pohledu je změna rozsahu časové osy, vedle toho, že z dopředu známé frekvence je možné snadno vypočíst periodu signálu, a tedy i vhodný rozsah, jednodušší, protože se při daném řešení vždy pouze zjemňuje s tím, jak roste frekvence signálu. Část kódu programu, která je určena k měření fázového rozdílu, proto obsahuje pouze jednoduchou logiku, která v situaci, kdy se na obrazovku osciloskopu již vejde více než stanovený počet period měřeného signálu, vyše příkaz přepnutí rozsahu. Stanovený počet period nesmí být příliš malý a musí respektovat daný krok používaný osciloskopem, aby v důsledku přepnutí rozsahu nedošlo k tomu, že na obrazovce nebude ani celá jedna perioda signálu. Přepínání osy vertikální je problematičtější, jelikož v průběhu měření charakteristiky se jak zvětšuje, tak zmenšuje, přičemž v oblasti vysokých frekvencí jsou změny natolik výrazné, že je třeba měnit použitý rozsah při každé změně frekvence (samozřejmě záleží na použitém rozlišení). V prvním kroku po nastavení požadované frekvence je proto změřena velikost napětí, čímž je získána buďto hodnota orientační pro nastavení vhodného rozsahu, jsou-li splněny dále uvedené podmínky, nebo hodnota konečná, není-li nutné rozsah použitý v předchozím cyklu upravovat. První je testována podmínka přetečení rozsahu, což je situace, kdy aktuálně nastavený rozsah nestačí k zobrazení aktuálního napětí. V tomto případě má osciloskop v reakci na příkaz ke změření hodnoty napětí na svém výstupu hodnotu „99e36“, a tudíž stačí pokaždé výstupní hodnotu porovnat s totožným řetězcem a jsou-li shodné, zaslat příkaz ke zvětšení rozsahu. Není-li indikováno překročení rozsahu, je třeba ověřit druhou podmínku týkající se rozsahu o krok menšího. Opět je porovnávána naměřená hodnota, ale tentokrát s rozsahem o krok menším, respektive s hodnotou o trochu menší, aby byla zajištěna určitá rezerva z důvodu zarušení signálu a rozsah nebyl přepínán v jednom kroku směrem dolů a v druhém směrem nahoru. Stejně tak tato rezerva řeší i situaci, kdy by k přepnutí rozsahu došlo v blízkosti lokálního minima. Z toho vyplývá, že je nutné v rámci programu ukládat do proměnné informaci o naposledy použitém rozsahu (je možné i řešení, kdy se při každém měření program příkazem dotáže osciloskopu na nastavený rozsah, ale toto řešení zbytečně zpomaluje program, jelikož samotná komunikace je časově nejnáročnější). Po přepnutí rozsahu je znovu změřena velikost napětí a tato hodnota již je hodnotou konečnou. V rámci programu není nutné uvažovat situaci, kdy by došlo mezi cykly k tak výrazné změně napětí, že by bylo nutné přepnout více než jeden rozsah. Vzhledem k rozdílu mezi jednotlivými rozsahy (krok 1-2-5), by muselo napětí v dalším cyklu programu být více jak dvojnásobné oproti napětí měřenému o bod dříve. V takovém případě je zjevné, že rozlišení použité

pro dané měření je zvoleno krajně nevhodně, jelikož je velmi hrubé a není s to postihnout dostatečně přesný tvar charakteristiky.

Prvotní nastavení rozsahů závisí na zadané hodnotě počáteční frekvence a způsobu zapojení měřeného transformátoru. Co se časové osy týče, tak je vypočtena odpovídající počáteční perioda signálu a je nastaven nejbližší vyšší rozsah (s menší rezervou, aby byl správně měřen fázový rozdíl signálů). V případě vertikální osy kanálu, na který je připojen budicí signál, nastaví program nejmenší rozsah, který je ještě dostatečný pro zobrazení vstupního napětí. Je tomu tak proto, že sice není možné měnit hodnotu napětí v rámci uživatelského rozhraní, ale je možná její změna v rámci nastavení programu, čemuž se automaticky přizpůsobí i rozsah. Nastavení druhé vertikální osy je nejproblematictější, jelikož v závislosti na použitém zapojení může být počáteční útlum buďto velmi velký, nebo naopak velmi malý. Aby nedošlo k poškození osciloskopu, je nejprve defaultně nastaven rozsah odpovídající minimálnímu útlumu, změřeno napětí a podle jeho velikosti je opět nastaven nejnižší možný rozsah.

4.3.6 Ukládání dat do souboru

Posledním důležitým prvkem programu je ukládání dat do souboru. SubVI, které ukládání řeší, pracuje z důvodů popsaných výše s datovou strukturou (klastr tří klastrů dvou jednorozměrných polí). V první řadě je před uložením nutné rozdělit tuto strukturu do několika jednorozměrných polí obsahujících vždy hodnoty dané veličiny, vypočítat odpovídající hodnoty impedance a admitance a sloučit tato pole do jednoho dvourozměrného pole, které je vstupem funkce zapisující data do TDMS souboru. Paralelně s tím je pokaždé vyvoláno dialogové okno, aby uživatel specifikoval adresářovou cestu a název souboru, do kterého budou data uložena. Poté, co je na základě uživatelské specifikace vytvořen soubor, jsou postupně zobrazena dialogová okna, v rámci kterých může uživatel data z měření podrobněji popsat (název, autor, popis), a tyto údaje jsou následně spolu s vlastními daty uloženy do vytvořeného souboru.

4.3.7 Vytvoření samostatné aplikace

Vývojové prostředí LabVIEW umožňuje z hotového projektu, který zahrnuje všechna VI a další prvky, vytvořit samostatně spustitelnou aplikaci. Tato aplikace obsahuje spolu s několika dalšími soubory samostatně spustitelný EXE soubor, který je zcela nezávislý na vývojovém prostředí. Hotový program je pak v takovéto podobě plně přenositelný na libovolný počítač, kterým bez ohledu na to, zdali je nainstalováno vývojové prostředí LabVIEW, bude možné ovládat měřicí pracoviště. Vzhledem k tomu, že program používá ke komunikaci s přístroji VISA rozhraní, musí však na daném počítači být nainstalovány příslušné ovladače.

5 Ověření funkčnosti pracoviště

5.1 Přístrojové vybavení

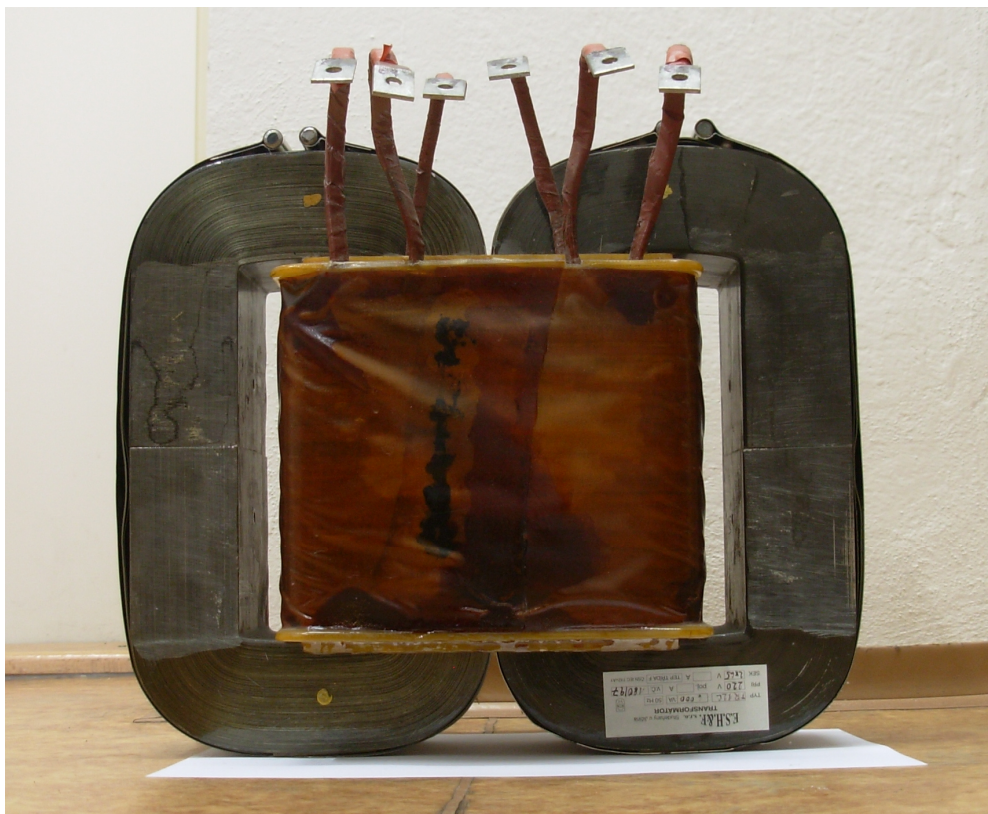
5.1.1 Původní pracoviště

Původní pracoviště k měření SFRA charakteristik na katedře elektrotechnologie bylo velmi podobné nově navrhovanému pracovišti. Bylo také sestaveno ze dvou přístrojů – dvoukanalového osciloskopu HP 54600B a funkčního generátoru HP 33120A. Přístroje byly ovládány taktéž pomocí počítače, ale nikoli prostřednictvím USB rozhraní, ale pomocí interface modulu HP 54675A připojeného k PC vybaveného komunikační kartou HP-IB. Pro zajímavost je možné dodat, že pracoviště bylo řízeno pomocí grafického prostředí HP VEE, které se v mnohém podobá právě LabVIEW. Na tomto pracovišti byla možná měření omezena parametry generátoru na interval od 10 Hz do 15 Mhz a jedno měření trvalo kvůli pomalejšímu přepínání rozsahů delší dobu (při použití rozlišení 40 bodů na dekádu frekvence trvalo jedno měření téměř 20 minut).

5.1.2 Nové pracoviště

Sestava nahrazující původní pracoviště bude, co se typů přístrojů týče, totožná, pouze se nebude jednat o přístroje společnosti HP, ale Rigol. Hlavní odlišnosti budou spočívat především v konkrétních parametrech přístrojů, jiného komunikačního rozhraní a jiného programového řešení. Popis nového pracoviště je k nalezení v části týkající se sestavení a oživení pracoviště, tudíž není nutné parametry na tomto místě opakovat. Z hlediska porovnání s původním pracovištěm by nové pracoviště mělo umožňovat měření až do 20 MHz (maximální frekvence generátoru je vyšší a vzorkovací frekvence osciloskopu by měla postačovat). Vedle toho se očekává zkrácení doby nutné ke změření jedné frekvenční charakteristiky, jelikož přepínání rozsahů by mělo být rychlejší. V neposlední řadě by uživatelské rozhraní mělo poskytovat uživateli příjemnější pracovní prostředí v důsledku použití více grafických prvků s modernějším grafickým designem.

5.2 Měřený transformátor



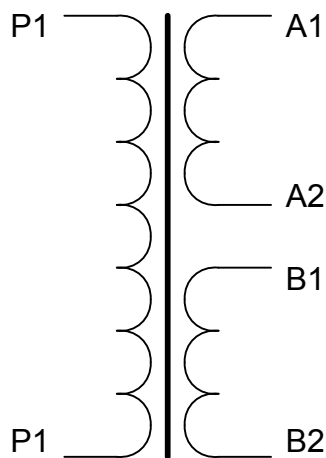
Obr. 15 Měřený transformátor

Na transformátoru, který je vidět na fotografii výše (transformátor 230 V / 2x65 V, 6 kVA), byla prováděna jak měření na všech vinutích, tedy A1–A2, B1–B2 a P1–P2, tak měření mezi vinutími, a to A1–B1, A1–P1 a B1–P1. Data z měření na původním SFRA pracovišti katedry elektrotechnologie použítá k ověření funkčnosti byla měřena v zapojení A1–B1 a A1–A2.



Obr. 16 Štítkové údaje měřeného transformátoru

230 V 2 x 65 V



Obr. 17 Schéma transformátoru včetně značení vývodů

5.3 Charakteristiky

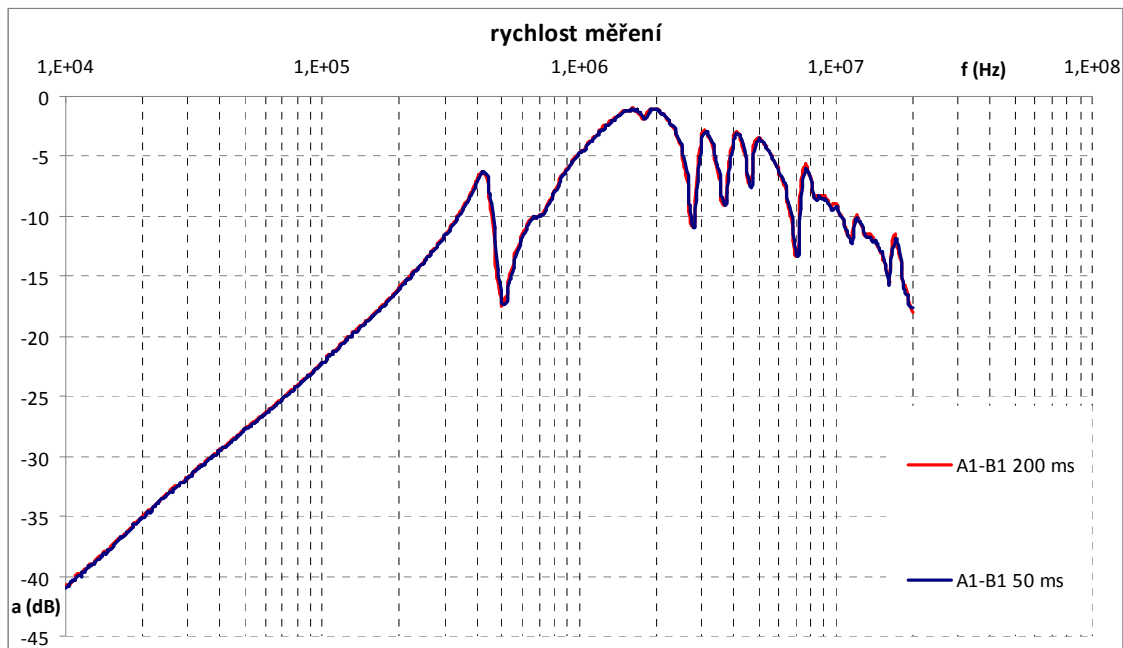
5.3.1 Vliv rozlišení



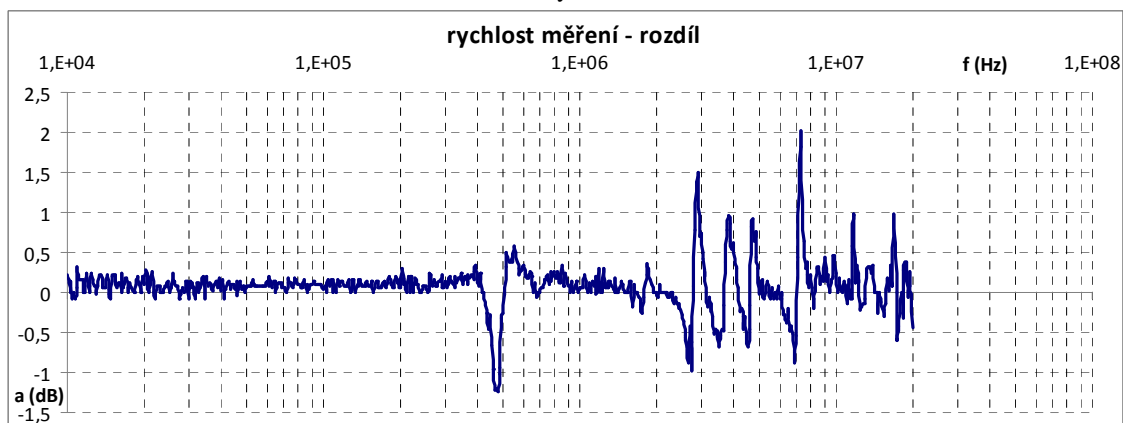
Graf 1 Vliv rozlišení

Jak vyplývá z rozboru v části práce věnované metodice měření, pracoviště pro měření by mělo umožňovat měření alespoň s hustotou 200 bodů na dekádu frekvence, je-li použit logaritmický krok. Navržený program pro řízení pracoviště umožňuje uživateli volit ovládacím prvkem *Points* rozlišení od 100 bodů do 400 bodů, což se jeví jako dostatečný rozsah. Výše uvedený graf ukazuje, že použití 20 bodů na dekádu frekvence pro urychlení měření by bylo možné pouze pro části, kde se charakteristika výrazněji nemění. Oproti tomu již s rozlišením 50 bodů není tvar výsledné charakteristiky výrazněji ovlivněn, stále jsou však zvláště v okolí rezonančních bodů patrné odchylky. Podobně se liší charakteristiky s rozlišením 100 bodů a 200 bodů v oblastech vyšších frekvencí, kde se charakteristika transformátoru mění velmi rychle a změny nejsou tak výrazné, a je tudíž potřeba ještě vyšší hustota bodů. Zvolená dolní hranice počtu bodů tak představuje skutečné minimum, mají-li být prováděna měření nikoli pouze orientační.

5.3.2 Vliv rychlosti měření



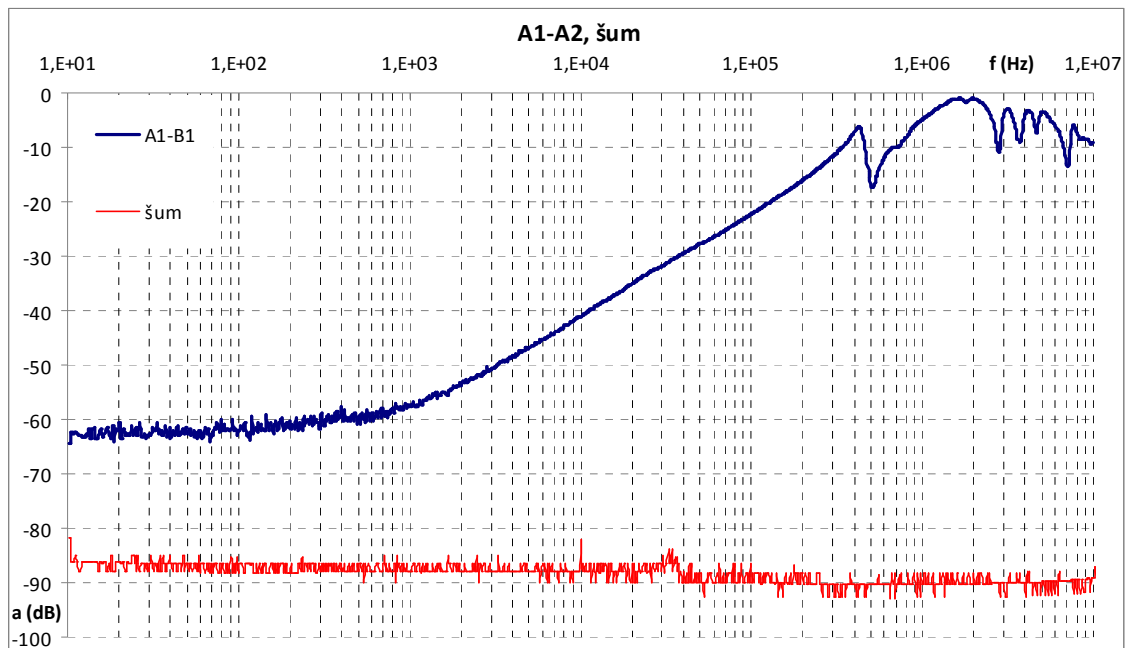
Graf 2 Vliv rychlosti měření



Graf 3 Vliv rychlosti měření – absolutní rozdíl

Podobný vliv na výslednou charakteristiku má rychlost měření, kterou zejména určuje doba mezi jednotlivými instrukcemi a čas na ustálení po změně rozsahu (obě tyto hodnoty jsou programově nastavitelné). Výše uvedené grafy znázorňují rozdíl mezi nastavením doby na instrukci 200 ms a 50 ms (s tím byla také zkrácena doba čekání po změně rozsahu z 200 ms na 100 ms). Měření se výrazně urychlilo a při prvním pohledu se charakteristiky jeví totožné. Při pohledu v detailu a zejména pak z absolutního rozdílu hodnot je však patrné, že v okolí rezonančních bodů, kde se charakteristiky prudce mění a dochází tudíž k častému přepínání rozsahů, je charakteristika měřená při vyšší rychlosti zatížena nezanedbatelnou chybou. V ostatních oblastech se rozdíl pohybuje v rozmezí $\pm 0,3$ dB, což téměř odpovídá zjištěné chybě měření (o tom viz dále).

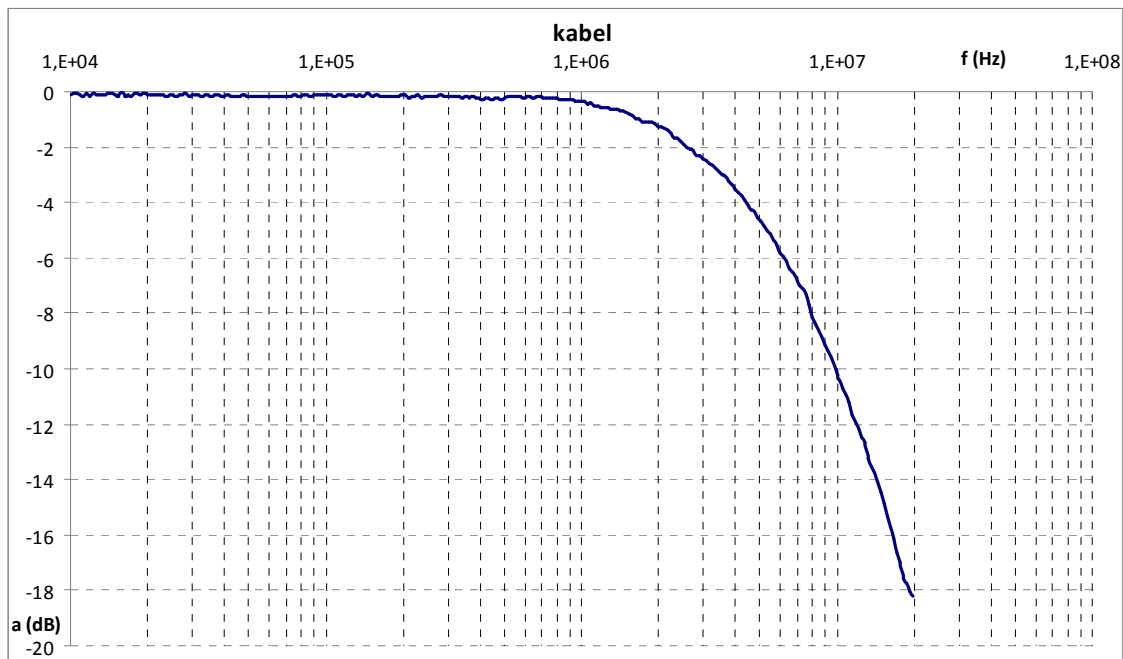
5.3.3 Odstup signál – šum



Graf 4 Odstup signál – šum

V souladu s doporučeními k ověření citlivosti měřicího pracoviště bylo provedeno měření vnitřního šumu, kdy je měřen otevřený obvod a testovací kabel zůstává odpojen. Měření ukázalo, že vnitřní šum je minimální, přesněji řečeno, v podstatě neměřitelný vzhledem k tomu, že nejnižší možný rozsah je 2 mV/div a ani při této hodnotě nebyl vnitřní šum téměř patrný. Teoreticky by tak mělo být pracoviště schopné měřit řádově až do -80 dB, což se ovšem ukázalo jako mylný předpoklad. Jak je v grafu vidět, pohybuje se hladina šumu reálně okolo hodnoty -60 dB a charakteristika se při vyšších hodnotách útlumu již zcela v šumu ztrácí. V tomto případě však zjevně nejde o šum vnitřní, ale o šum vnější způsobený pravděpodobně nedokonalým zemněním a rušivým signálem z elektrické sítě. Z rozdílu více jak 20 dB je patrný nemalý potenciál ke zlepšení citlivosti pracoviště použitím kupříkladu oddělovacího transformátoru, lepší metody zemnění a filtrování měřeného signálu s proměnlivou šířkou pásma, jako používají komerčně vyráběné SFRA analyzátory (realizované ať už prostřednictvím osciloskopu, či filtrování streamovaného signálu v LabVIEW).

5.3.4 Vliv přívodních vodičů

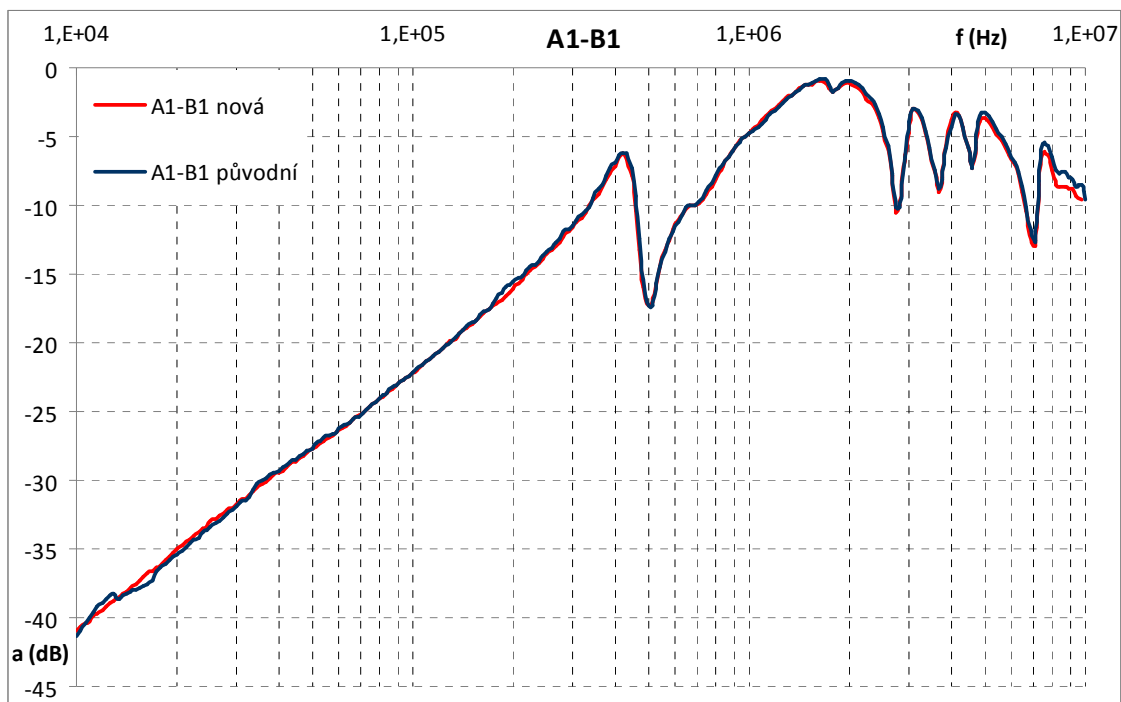


Graf 5 Charakteristika přívodních vodičů

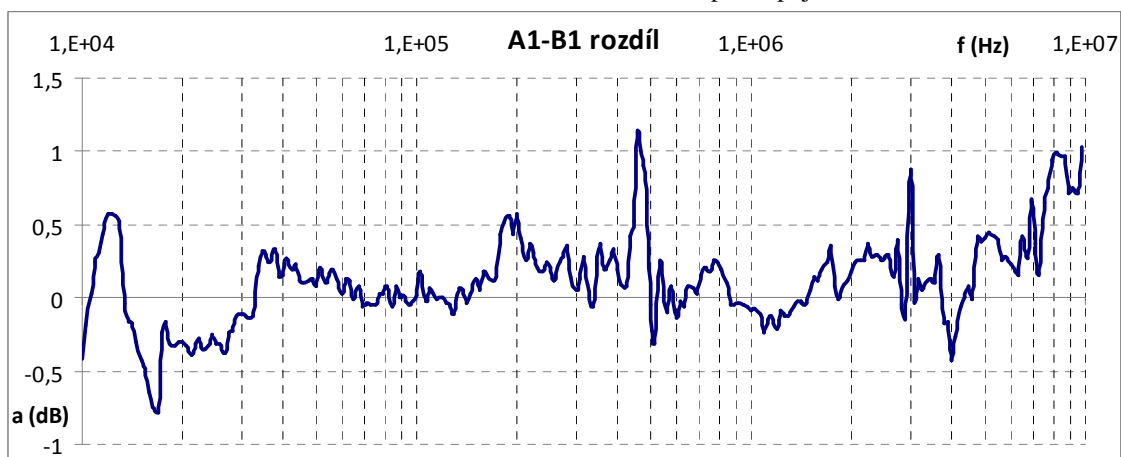
Měřením bylo také ověřeno, jaký vliv mají přívodní kabely na výsledné charakteristiky a zdali v oblasti vyšších frekvencí nedochází vlivem rostoucího útlumu kabelů ke zkreslení charakteristiky samotného transformátoru. Jak je vidět, kabely mají přibližně až do hodnoty 1 MHz útlum v podstatě nulový, lépe řečeno se pohybuje na hranici přesnosti měření. Při 1 MHz je útlum přibližně 0,4 dB a s rostoucí frekvencí postupně prudce klesá, při 10 MHz je -10 dB a při 20 MHz má již hodnotu -18 dB. Ukazuje se tak, že výsledné charakteristiky v oblasti do 1 MHz jsou ovlivněny pouze nepatrně, ovšem nad touto hodnotou, zejména v oblasti 10 MHz až 20 MHz, může být útlum kabelu srovnatelný s útlumem měřeného objektu a případné změny charakteristiky, způsobené změnou v transformátoru, nemusejí být vůbec zřetelné.

5.3.5 Referenční charakteristiky – komparace

Ověření funkčnosti nového pracoviště pro měření SFRA charakteristik je provedeno i porovnáním s historickými daty. První graf zachycuje charakteristiku změřenou na novém pracovišti a jako referenční slouží charakteristika změřená na pracovišti původním. Obecně lze říci, že charakteristiky se, krom drobnějších rozdílů, velmi dobře překrývají i přesto, že transformátor byl v mezidobí podroben jiným experimentům, v rámci kterých byl namáčen, vysoušen, rozebrán a opětovně složen.

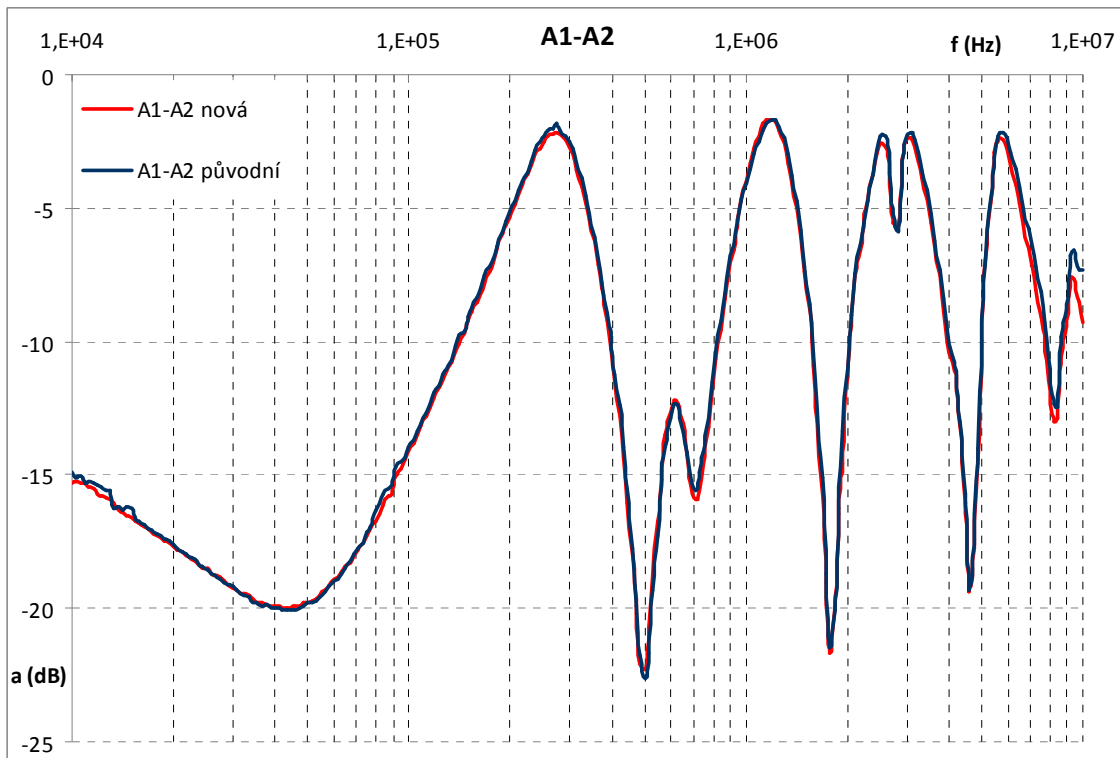


Graf 6 Porovnání s referenční charakteristikou pro zapojení A1-B1

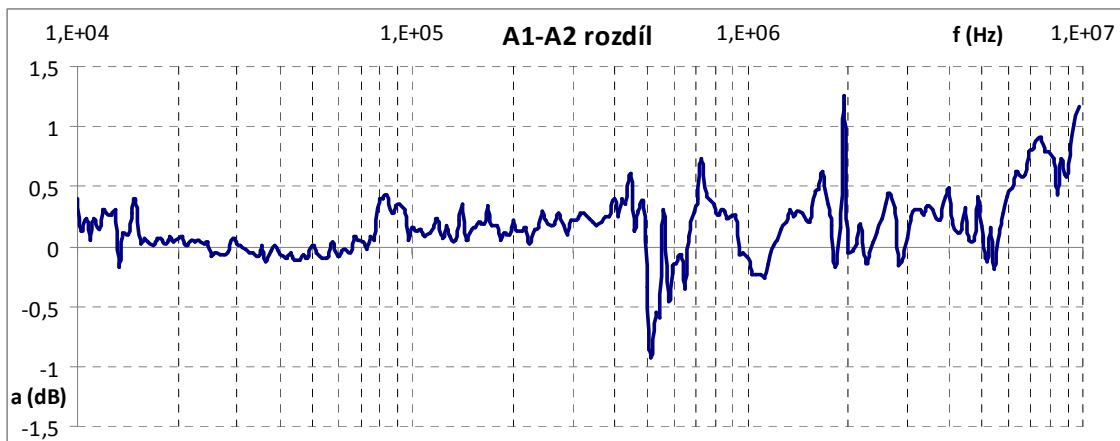


Graf 7 Porovnání s referenční charakteristikou pro zapojení A1-B1 – absolutní rozdíl

Nejprve zapojení A1-B1, tedy měření mezi sekundárními vinutími. Obě charakteristiky jsou téměř totožné a řadu drobných rozdílů, především drobné posuny rezonančních bodů, je možné vysvětlit právě ne zcela totožnou polohou vinutí vůči sobě a jádru transformátoru před jeho rozebráním a po jeho opětovném složení. Výraznější rozdíl se také objevuje v oblasti frekvencí blízkých 10 MHz, kde už je ovšem měření velmi citlivé vůči jakýmkoli změnám v konfiguraci, a bylo by spíše překvapením, kdyby byl rozdíl v této oblasti menší. Poslední oblast, na kterou je nutno upozornit, je interval od 10 kHz do 20 kHz, kde je patrný "zub" v původní charakteristice, což je i v rozporu s očekávanými, jak je popsáno v teoretické části – charakteristika by měla být v této oblasti v podstatě hladká s konstantní směrnici. Vysvětlením by mohl být vliv přepínání rozsahů měřicích přístrojů a jím způsobená nepřesnost, ale bohužel toto nelze ověřit, protože původní pracoviště je již rozebráno.



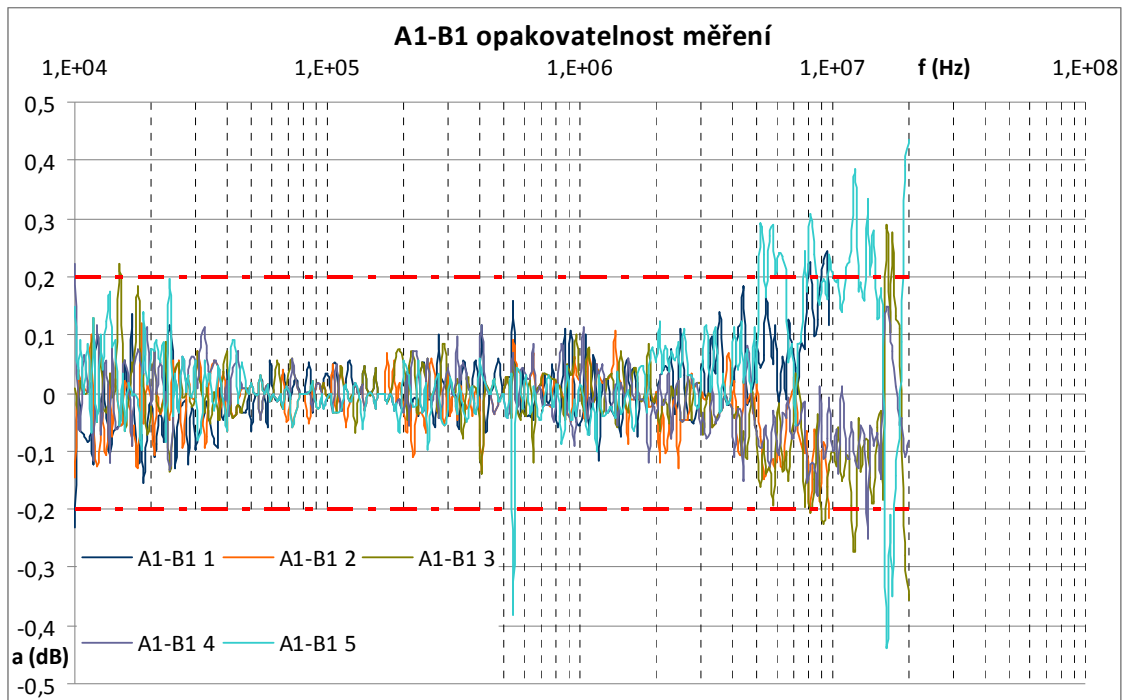
Graf 8 Porovnání s referenční charakteristikou pro zapojení A1–A2



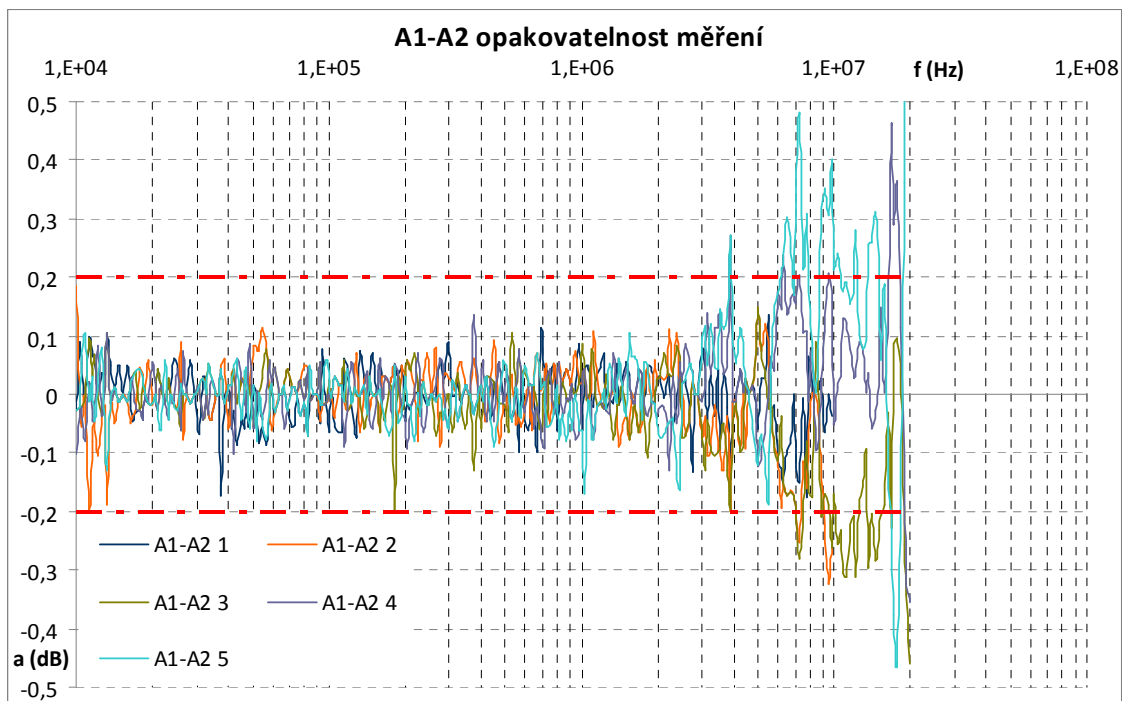
Graf 9 Porovnání s referenční charakteristikou pro zapojení A1–A2 – absolutní rozdíl

Pro porovnání měření v zapojení A1–A2, tedy měření na jednom ze sekundárních vinutí, platí vesměs totéž co pro předešlé zapojení. V první řadě charakteristiky velmi dobře korespondují i na počátku. Stejně jako v předešlém případě jsou největší rozdíly patrné v oblastech rezonančních bodů a pak také v blízkosti 10 MHz.

5.3.6 Opakovatelnost měření



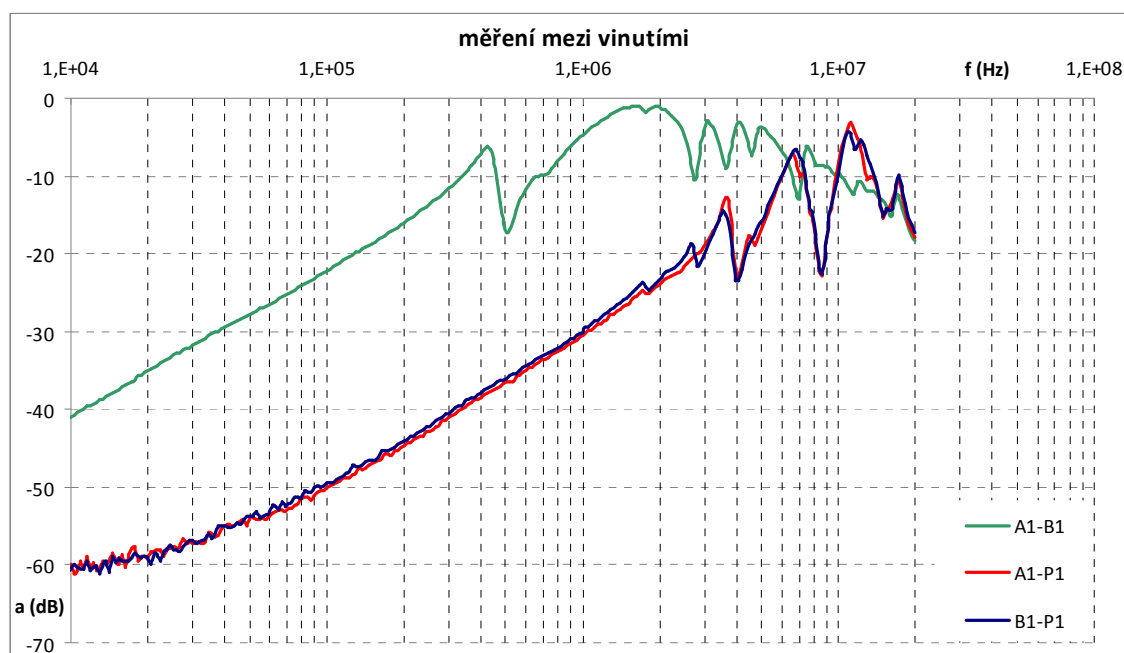
Graf 10 Opakovatelnost měření v zapojení A1-B1 – absolutní rozdíl vůči průměru



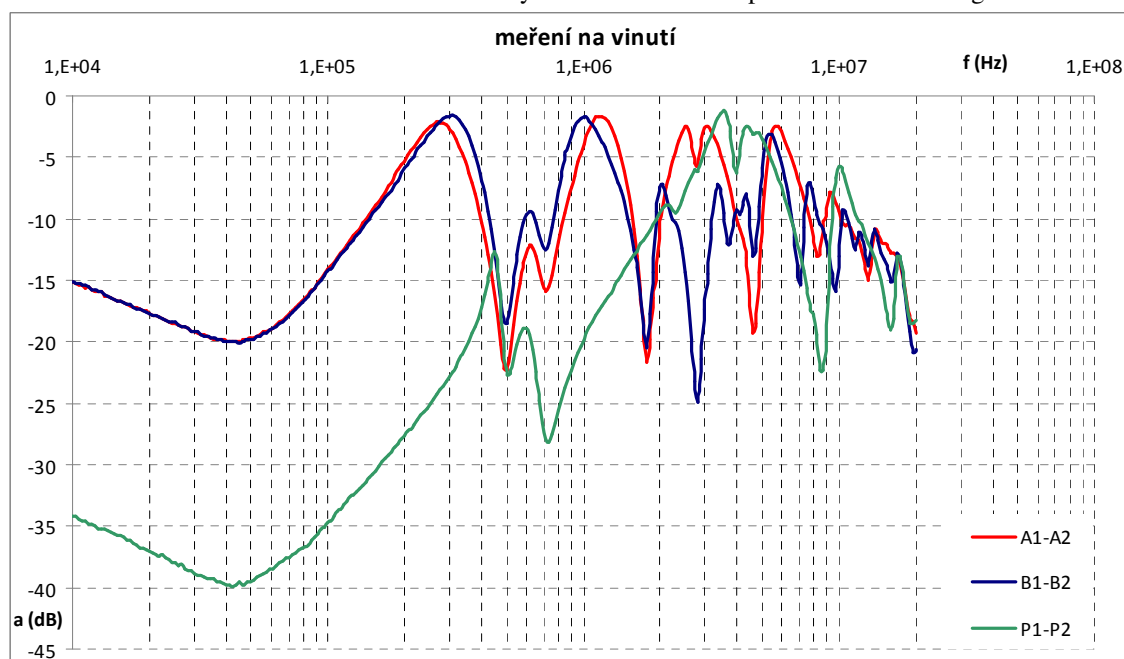
Graf 11 Opakovatelnost měření v zapojení A1-A2 – absolutní rozdíl vůči průměru

Tyto grafy zobrazují absolutní odchylku jednotlivých sad měření od průměru těchto pěti měření (pro oblast 10 MHz až 20 MHz pouze ze tří). Co se opakovatelnosti měření týče, jsou výsledky uspokojivé, jelikož se hodnoty pohybují v pásmu $\pm 0,2$ dB, což je interval který někteří výrobci respektují jako maximální tolerovanou odchylku. V oblasti od 10 MHz do 20 MHz odchylky přesahují danou mez, ale stále má výsledná chyba pouze malý potenciál ovlivnit výsledky měření.

5.3.7 Frekvenční charakteristiky transformátoru



Graf 12 Frekvenční charakteristiky transformátoru – capacitive inter-winding



Graf 13 Frekvenční charakteristiky transformátoru – end-to-end open

Byly provedeny dvě sady měření mezi vinutími a vinutí samotných (tedy end-to-end open a capacitive inter-winding). Především z měření v kapacitním zapojení je dobře vidět, že z hlediska geometrie jsou si obě sekundární vinutí podobná, nicméně, jak je zřejmé z měření na obou vinutích, charakteristiky by pouze stěží šly vzájemně použít jako referenční. Podle očekávání má menší útlum v důsledku menší tloušťky dielektrika charakteristika mezi sekundárními vinutími. Stejně tak je možné pozorovat typický vyšší útlum v případě měření na vinutí vyššího napětí oproti měření na vinutích nižšího napětí.

6 Závěr

Metodě SFRA patří v dnešní době již nezastupitelné místo v oboru diagnostiky stavu transformátorů. Jedná se o metodu neinvazivní, založenou na komparaci charakteristik měřených v různých časových okamžicích. Metoda umožňuje diagnostikovat nejen poruchové stavy týkající se vinutí transformátoru, ale též řady dalších změn.

Frekvenční charakteristiky transformátoru získané měřením jsou, zvláště v oblasti vyšších frekvencí, citlivé i vůči menším změnám, které neznamenají bezprostřední nutnost transformátor odstavit. Zároveň jsou však poměrně citlivé i vůči změnám, které nemusí vůbec souviset s určitým poruchovým stavem transformátoru a které tudíž analýzu charakteristik, a tím i diagnostiku případné poruchy, komplikují. Mezi takové vlivy patří zejména změna okolních podmínek, konfigurace měřicí sestavy nebo změna stavu transformátoru, která není poruchou – například navlhnutí izolace. S rostoucí maximální frekvencí, a tím pádem kratší vlnovou délkou, se zvyšuje schopnost metody detekovat stále drobnější změny. Paralelně s tím však roste vliv rušení a parazitních vlastností měřicí sestavy, které výrazně snižují opakovatelnost měření anebo zastírají charakteristiku samotného transformátoru. Ve snaze minimalizovat tyto nežádoucí jevy, zvýšit maximální použitelnou frekvenci a maximalizovat opakovatelnost měření byla v posledních letech vypracována řada mezinárodních, národních i firemních standardů pro SFRA měření.

Obecně řečeno je cílem této práce zprovoznění nového pracoviště pro měření frekvenčních charakteristik transformátorů. Vzhledem k tomu, že výše zmíněné standardy představují soubor doporučených postupů, který lze označit jako *good engineering practice*, tak konzistentní přístup k měření charakteristik na novém pracovišti v souladu s těmito doporučeními je žádoucí. Návrh a realizace pracoviště a metodika měření by měly z těchto požadavků vycházet, a tudíž je první část práce věnována analýze těchto standardů a dalších doporučených postupů obsažených v odborných publikacích. Provedený komplexní rozbor metodiky SFRA měření obsažený v první části této práce a z něj vyplývající doporučení představují ucelený soubor požadavků, které je při měření vhodné dodržet a jejichž znalost usnadňuje následnou interpretaci dat a identifikaci jak případných poruch transformátoru, tak možných chyb při měření.

Sestavení pracoviště a zprovoznění komunikace mezi počítačem a osciloskopem a generátorem nepředstavovalo výraznější problém, a jelikož jsou všechna zařízení propojena prostřednictvím USB rozhraní, nebude problém pracoviště ovládat i jiným osobním počítačem, ve kterém budou nainstalovány knihovny potřebné pro komunikaci.

Na základě obecného zadání a specifikace požadavků na program zadavatelem byla provedena jejich analýza, v rámci které byly identifikovány nezbytné funkce programu. Pro realizaci byl zvolen grafický programovací

jazyk LabVIEW. Podle provedené analýzy byl vytvořen návrh programu, který je v další části práce zdokumentován. Provedení dokumentace odpovídá povaze jazyka LabVIEW, jelikož program v tomto jazyce vytvořený je svým způsobem dokumentací *per se* a program byl s ohledem na to vytvářen – grafický kód je přehledný a všechny důležité prvky jsou náležitě okomentovány. Výsledkem je samostatně spustitelná aplikace bez nutnosti instalace vývojového prostředí, která skutečně umožňuje ovládat měřicí pracoviště libovolným osobním počítačem, který bude disponovat patřičnými ovladači. K aplikaci byl též vypracován jednoduchý návrh, který je přílohou této práce.

Na již plně funkčním pracovišti byla následně ověřena jeho funkčnost. Rychlost měření je vyšší oproti pracovišti původnímu, ale příliš rychlé měření negativně ovlivňuje přesnost měření. Použité rozlišení je plně srovnatelné s komerčně vyráběnými SFRA analyzátory. Hladina šumu se pohybuje okolo -63 dB, a je tak oproti doporučením obsaženým ve standardech i oproti parametrům komerčních analyzátorů vyšší. Na druhou stranu se toto omezení týká pouze oblasti nízkých frekvencí především v případě měření transformátorů velkých výkonů a hladinu lze pravděpodobně snížit filtrováním měřených signálů a průměrováním hodnot. Opakovatelnost měření je velmi dobrá i v oblasti nad 10 MHz, na což mají nejspíše i vliv malé rozměry měřeného transformátoru, a bylo by tudíž zajímavé prověřit opakovatelnost i u transformátoru vyššího výkonu. Limitujícím faktorem pro měření nad 1 MHz jsou však použité kabely, jejichž impedance nad touto frekvencí postupně roste a stává se srovnatelnou s impedancí měřeného transformátoru, a proto by bylo pro měření v oblastech vysokých frekvencí vhodné vybavit pracoviště kabely lepšími. Porovnání s charakteristikami téhož transformátoru měřenými pomocí původního pracoviště ukázalo velmi dobrou shodu, přihlédne-li se k tomu, že transformátor byl v mezidobí rozebrán a opětovně složen.

Nové pracoviště pro měření frekvenčních charakteristik tak představuje plnohodnotnou náhradu za pracoviště původní a v některých ohledech ho předčí. Program k ovládání pracoviště má moderní a uživatelsky příjemný design a je přenositelný na jiný počítač, měření charakteristik je rychlejší a přitom je zachována přesnost měření. Určitý potenciál ke zlepšení, což by mohlo být tématem další závěrečné práce, představuje především snížení hladiny šumu a zvýšení přesnosti měření, například použitím dvou voltmetrů s tím, že osciloskop bude sloužit pouze k vizuální kontrole probíhajícího měření.

Seznam zkratek

FRA	Frequency Response Analysis
SFRA	Sweep Frequency Response Analysis
FFT	Fast Fourier Transform
IFRA	Impulse Frequency Response Analysis
PRBS	Pseudo Random Binary Sequence
VISA	Virtual Instrument Software Architecture
NI	National Instruments

Seznam použité literatury a pramenů

- [1] *Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers*. IEEE-SA Standards Board, Transformers Committee of the IEEE Power and Energy Society. December 2012
- [2] *Mechanical-condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA)*. Cigre 342/2008, Working Group A2.26. April 2008
- [3] Reykherdt, A. A. Davydov, V. G. Effects of test cable ground extensions on repeatability of frequency response analysis measurements on power transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, May/June 2012, vol. 28, no. 3, p. 26–31.
- [4] Reykherdt, A. A. Davydov, V. G. Case Studies of Factors Influencing Frequency Response Analysis Measurements and Power Transformer Diagnostic. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, January/February 2012, vol. 27, no. 1, p. 22–30.
- [5] Abu-Siada, A. Hashemnia, N. Islam, S. Masoum, M. A. S. Understanding Power Transformer Frequency Response Analysis Signatures. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, May/June 2013, vol. 29, no. 3, p. 48–56.
- [6] Al Murawwi, E. Mardiana, R. Su, C. Q. Effects of Terminal Connections on Sweep Frequency Response Analysis of Transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, May/June 2012, vol. 28, no. 3, p. 8–13.
- [7] Jahormi, A.N. Bochenski, B.M. Fujimoto, N. Velek, J. *Effect of Dynamic Range in SFRA Measurement*. Electrical Insulation Conference. Philadelphia USA, 8 to 11 June 2014
- [8] Karlstrom, M. Werelius, P. Öhlen, M. Adeen, L. Brynjebo, E. *Measurement Considerations using SFRA for Condition Assessment of Power Transformers*. Weidmann, New Orleans, September 2008
- [9] Kraetge, A. Krüger, M. Velásquez, J. L. Viljoen, H. Dierks, A. *Aspects of the practical application of sweep frequency response analysis (SFRA) on power transformers*. 6th Southern Africa Regional Conference CIGRE. Cigre Paper P504. 2009
- [10] Kraetge, A. Krüger, M. Velásquez, J. L. Heindl, M. Tenbohlen, S. *Experiences with the practical application of Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) on power transformers*. 16th International Symposium on High Voltage Engineering. Johannesburg. 2009
- [11] Sweetser, Ch. McGrail, T. *Sweep Frequency Response Analysis Transformer Applications - A Technical Paper from Doble Engineering*, Version 1.0. Watertown USA: Doble Engineering. 2003

- [12] Kennedy, G. M. - McGrail, A. J. - Lapworth, J. A. Transformer sweep frequency response analysis (SFRA). *energize*, October 2007. p. 28–33.
- [13] McGrail, T. Transformer Frequency Response Analysis: An introduction. *Neta World*, 2005, p. 1–4
- [14] McGrail, T. *SFRA Poor Cable Grounds*, Version 1.0. Watertown USA: Doble Engineering, 2003
- [15] Dick, E. P. Erven, C. C. Transformer Diagnostic Testing by Frequency Response Analysis. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. November/December 1978, vol. PAS-97, no. 6, p. 2144-2153.
- [16] The Electric Power Industry Standard of People's Republic of China *Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers*. DL Standard DL/T911-2004, ICS 27.100, F24, Document No. 15182-2005. June 2005
- [17] ABB Technical Standard, BA Transformers *Frequency Response Analysis (FRA): Measurement on Power Transformers*, Version 5. ABB. 2008
- [18] *SFRA Measurement Cables*, Quick Reference Card, 72A-3292-02, Rev. A. Doble Engineering. Watertown USA. May 2014
- [19] IEC *Power transformers – Part 18: Measurement of frequency response - International Standard IEC 60076-18*, Edition 1.0. IEC technical committee 14: Power transformers. July 2012
- [20] Wang, M. Vandermaar, A. J. Improved detection of power transformer winding movement by extending the FRA high frequency range. *IEEE Transactions on Power Delivery*, July 2005, vol. 20, no. 3, p.1930–1938.
- [21] Wang, M. Vandermaar, A. J. Srivastava, K.D. Transformer winding movement monitoring in service - key factors affecting FRA measurements. *IEEE Electrical Insulation magazine*, September/October 2004, vol. 20, issue 5, p. 5-12.
- [22] Sweetser, Ch. *Experience with Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) Measurements*. Doble Engineering. Watertown USA. 2002
- [23] Bocovich, M. *Swept Frequency Response Analysis to Detect Power Transformer Shipping Damage*. Xcel Energy. Minneapolis USA. 9 September 2011
- [24] Behjat, V. et al. Identification of the most sensitive frequency response measurement technique for diagnosis of interturn faults in power transformers, *Measurement Science Technology*, June 2010, vol. 21, n. 7
- [25] Karlstrom, M. Wereluis, P. Ohlen, M. *Measurement Considerations using FRA for Condition Assessment of Power Transformers*. 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Beijing, China. April 2008

- [26] Abeywickrama, N. Serdyuk, Y. V. Gubanski, S. M. Effect of Core Magnetization on Frequency Response Analysis (FRA) of Power Transformers. *IEEE Transaction on Power Delivery*, July 2008, vol. 23, no. 3
- [27] ByungKoo, P. Seung Cheol, J. Sang Woo, K. PooGyeon, P. Fault Diagnosis of a Power Transformer Using an Improved Frequency-Response Analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, January 2005, vol. 20, no. 1
- [28] Secue, J. R. Mombello, E. Sweep frequency response analysis (SFRA) for the assessment of winding displacements and deformation in power transformers. *Electric Power System Research*, vol. 78, 2008, p.1119–1128
- [29] Yousof, M. F. M. Saha, T. K. Ekanayake, C. *Investigating the Sensitivity of Frequency Response Analysis on Transformer Winding Structure*. PES General Meeting, Conference & Exposition. 2014 IEEE. 27 to 31 July 2014
- [30] M5100 Brochure. Doble Engineering. Watertown USA. 2002
- [31] Patil, S. Kushare, B. E. SFRA Sensitivity Towards detection of Transformer Insulation Damage, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 3, issue 4, April 2013
- [32] Pramanik, S. Satish, L. A critical review of the definition of FRA resonance frequency of transformers as per IEEE Std C57.149-2012, *Electric Power System Research*, vol. 121, April 2015, p. 52–57

Přílohy

Příloha 1 – Návod k ovládání měřicího pracoviště

1. Program k ovládání pracoviště na měření frekvenčních charakteristik transformátorů lze buďto spustit jako samostatnou aplikaci (soubor *SFRA Application.exe*), nebo spuštěním hlavního VI *SFRA (main)* ve vývojovém prostředí LabVIEW. Je-li program spouštěn jako VI *SFRA (main)* ve vývojovém prostředí LabVIEW, je spuštěn bílou šipkou *Run* vlevo v horní liště ovládacího panelu. Po ukončení programu opět nedochází k uzavření okna programu.
2. Po každém spuštění programu (i v případě spouštění ve vývojovém prostředí LabVIEW) je nutné iniciovat komunikaci s osciloskopem Rigol 1052E a generátorem Rigol DG 1022, které musí být k počítači připojeny prostřednictvím USB rozhraní. Před iniciací je nutné vybrat pro každý přístroj VISA adresu, na které se v danou chvíli nachází – to lze provést kliknutím na rozbalovací lištu ovládacích prvků *DG 1022 (USB1)* a *DS 1052E (USB2)* a výběrem správné adresy z lišty nabídek (v adrese je obsažen název přístroje, který musí korespondovat s názvem ovládacího prvku). Poté lze již zahájit komunikaci s měřicími přístroji stiskem tlačítka *Initialize*.
3. Před samotným měřením frekvenčních charakteristik je nutné zadat parametry měření, které bude po jeho zahájení již probíhat zcela automaticky. V první řadě je nutné nastavit počáteční a koncovou frekvenci (prvky *Start Frequency* a *Stop Frequency*) měřeného frekvenčního intervalu. Za druhé je třeba nastavit vhodný frekvenční krok, se kterým bude měření probíhat. Lze zvolit rozlišení logaritmické a případně lineární, přičemž pro obecné měření je doporučeno měřit s rozlišením logaritmickým a lineární měření používat pouze pro měření v detailu. Samotné rozlišení (hustotu měřených bodů) lze nastavit v rámci prvku *Resolution*, který umožňuje zadat jak počet bodů na dekádu (záložka *Points*), tak frekvenční krok (záložka *Step*) – pro měření je použit ten parametr, který odpovídá aktivní záložce při stisku tlačítka *Start*. Při zadávání rozlišení v záložce *Step* (tedy frekvenční krok) je třeba dáti pozor na to, jaký typ rozlišení (logaritmické/lineární) je nastaven. V případě lineárního rozlišení probíhá měření s daným krokem (jednotkou je Hz) a jednotlivé měřené body jsou od sebe vzdáleny přímo o tento krok. V případě logaritmického rozlišení je krok logaritmický a odpovídá rozdílu logaritmů frekvence dvou sousedních bodů – krok 0,01 tudíž odpovídá 100 bodům na dekádu, krok 0,005 200 bodům na dekádu apod.
4. Před zahájením měření stisknutím tlačítka *Start* je nutné ověřit, zdali zapojení přívodních vodičů a zemnění odpovídá zvolenému zapojení, zdali

jsou svorky k měření nepoužívané zapojeny v souladu se zvoleným typem měření (ponechány rozpojené, zkratovány, zkratovány a uzemněny) a zdali je na svorkách zajištěn kvalitní kontakt.

5. Měření je zahájeno stiskem tlačítka *Start*. Od této chvíle probíhá automaticky a nelze již měnit parametry měření. V průběhu měření je možné sledovat postupně měřené charakteristiky – amplitudovou (záložka *Attenuation*) a fázovou (záložka *Phase*).
6. Měření lze přerušit nebo zastavit stiskem tlačítka *Stop*. Nedojde-li k potvrzení zastavení měření v rámci dialogového okna (volba *No*), pokračuje program v měření. V případě potvrzení volby (*Yes*) je měření zastaveno.
7. Po automatickém ukončení měření, či jeho zastavení je zobrazen dialog umožňující uložit naměřená data. V případě potvrzení volby (*Yes*) je nutné zvolit cílový adresář souboru a posléze zadat údaje o daném měření (název, autor, popis), které budou do souboru uloženy spolu s naměřenými daty.
8. Po uložení dat je možné program ukončit, nebo v měření pokračovat (dialog). V případě, že nebyl program ukončen, přechází do režimu, kdy čeká na zadání parametrů nového měření a stisk tlačítka *Start*. Program je v tomto režimu možno ukončit stiskem tlačítka *Stop*.

Příloha 2 – Seznam prvků uživatelského rozhraní

Název prvku	Typ	Popis prvku
<i>DG 1022 (USB1)</i>	VISA resource name	Identifikátor pro komunikaci přes VISA rozhraní s přístrojem Rigol DG 1022.
<i>DS 1052E (USB2)</i>	VISA resource name	Identifikátor pro komunikaci přes VISA rozhraní s přístrojem Rigol DS 1052E.
<i>Initialize</i>	Button Control (boolean)	Zahájí komunikaci s přístroji vybranými prostřednictvím prvků DG 1022 (USB1) a DS 1052E (USB2).
<i>Start Frequency</i>	Numeric Indicator (double)	Slouží k zadání počáteční frekvence měření. (minimum = 10, maximum = $2 \cdot 10^7$ inkrement = 1000).
<i>Stop Frequency</i>	Numeric Indicator (double)	Slouží k zadání koncové frekvence měření. (minimum = 10, maximum = $2 \cdot 10^7$ inkrement = 1000).
<i>Linear / Logaritmick</i>	Enumerator	Přepíná mezi měřením s lineárním a logaritmickým rozlišením. (logaritmick, linear).
<i>Resolution</i>	Tab Control (integer)	Přepíná mezi možnostmi určit hustotu měřených bodů formou počtu bodů na dekádu frekvence, nebo frekvenčním krokem. (obsahuje indikátor <i>Points</i> a <i>Step</i>)
<i>Points</i>	Enumerator	Slouží k zadání rozlišení formou počtu bodů na dekádu frekvence. (100, 200, 300, 400).
<i>Step</i>	Numeric Indicator (double)	Slouží k zadání rozlišení formou frekvenčního kroku. (minimum = $1 \cdot 10^{-3}$, maximum = $1 \cdot 10^5$).
<i>Graphs</i>	Tab Control (integer)	Přepíná mezi zobrazením amplitudové, nebo fázové charakteristiky. (obsahuje prvky <i>Attenuation</i> a <i>Phase</i>).
<i>Attenuation</i>	XY Graph	Graf zobrazující průběžně naměřené hodnoty amplitudy.
<i>Phase</i>	XY Graph	Graf zobrazující průběžně naměřené hodnoty fáze.
<i>Start</i>	Button Control (boolean)	Zahájí měření s parametry, které jsou vybrány v ostatních prvcích.
<i>Stop</i>	Button Control (boolean)	Ukončí právě probíhající měření, případně ukončí program, neprobíhá-li měření.

Příloha 3 – Seznam subVI

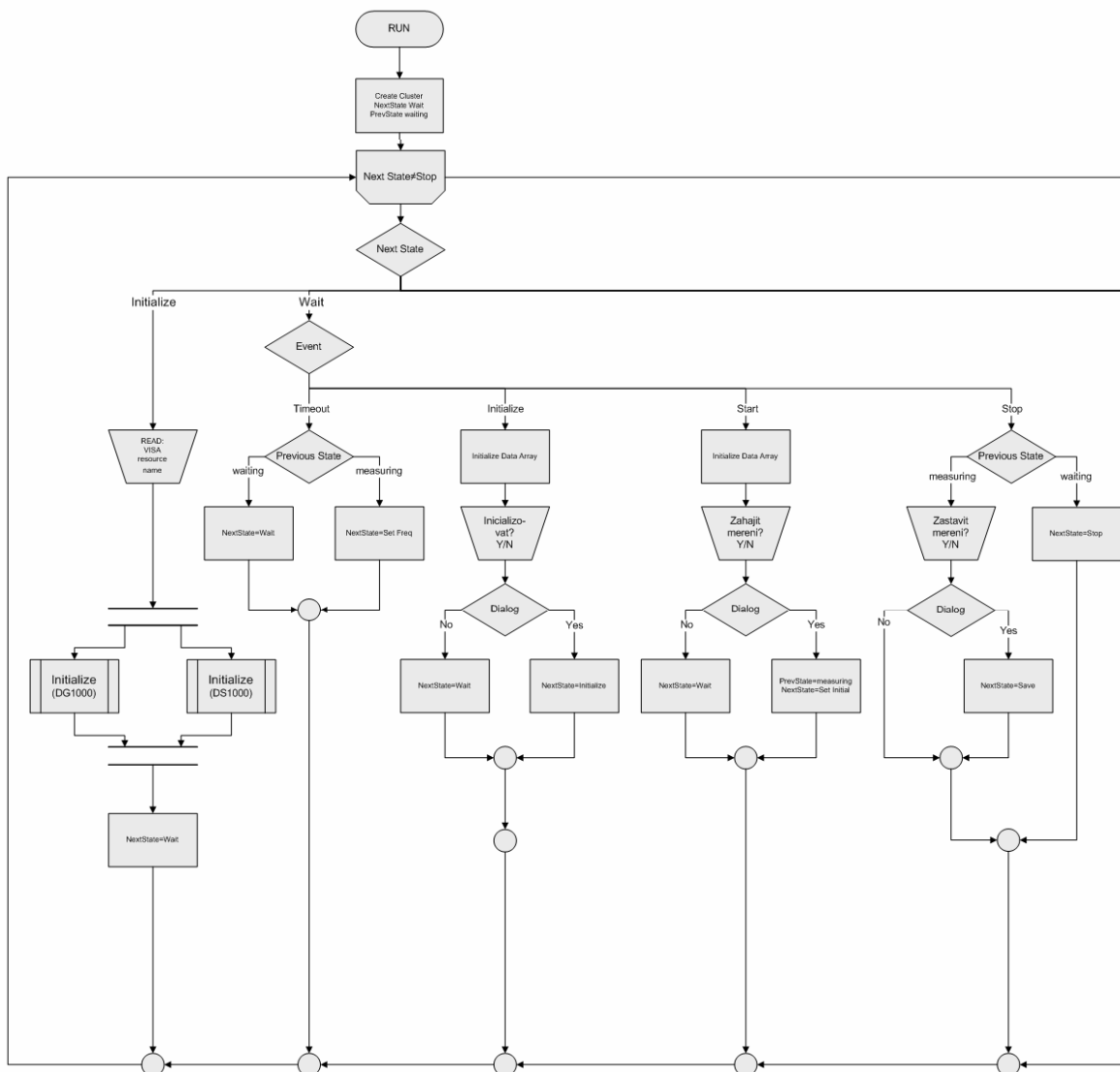
subVI	Vstupy	Výstupy	Popis funkce
<i>add all data</i>	Cluster in (<i>cluster</i>) Current Frequency Attenuation Phase Delay read buffer CHAN1 read buffer CHAN2 (<i>double</i>)	Cluster out (<i>cluster</i>)	Přidá do každého ze dvou polí tří klastrů sdružených v jednom klastru novou hodnotu.
<i>add data element</i>	Cluster in (<i>cluster</i>) X axes data Y axes data (<i>double</i>)	Cluster out (<i>cluster</i>)	Přidá do každého ze dvou polí jednoho klastru novou hodnotu.
<i>calculate attenuation</i>	CHAN1 data CHAN2 data (<i>double</i>)	Attenuation (<i>double</i>)	Spočte útlum na základě dvou vstupních hodnot.
<i>calculate freq step</i>	Step Start Frequency (<i>double</i>) Points Linear / Logarithmic Resolution (<i>enum</i>)	Spacing (<i>double</i>)	Na základě zvoleného způsobu zadání rozlišení vypočte frekvenční krok.
<i>calculete initial timebase</i>	Start Frequency (<i>double</i>)	New Scale (<i>double</i>)	Vypočte vhodné počáteční nastavení časové osy.
<i>calculate next freq</i>	Spacing Current Frequency (<i>double</i>) Linear / Logarithmic (<i>enum</i>)	Next Frequency (<i>double</i>)	Na základě zvoleného měřicího kroku (lineární, logaritmický) spočte frekvenci dalšího bodu.
<i>calculate phase delay</i>	Current Frequency Read Buffer Delay (<i>double</i>) Degrees / Radian (<i>enum</i>)	Phase Delay (<i>double</i>)	Vypočte hodnotu fázového zpoždění ve stupních, nebo radiánech.
<i>change freq</i>	Frequency (<i>double</i>) VISA resource name (<i>VISA resource name</i>)	VISA resource name out (<i>VISA resource name</i>)	Vyšle přístroji příkaz k nastavení zadané frekvence.
<i>close</i>	VISA resource name (<i>VISA resource name</i>)		Ukončí komunikaci s daným přístrojem přes VISA rozhraní.

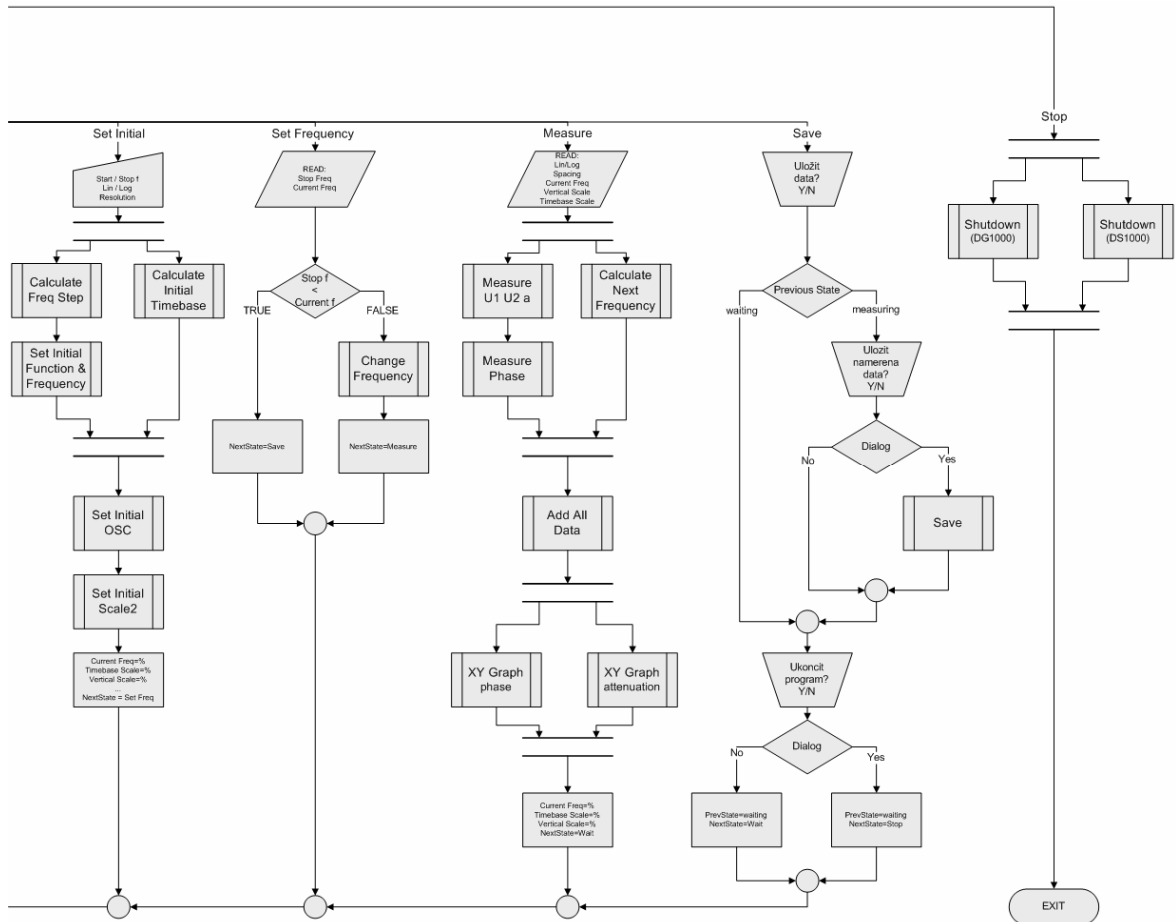
subVI	Vstupy	Výstupy	Popis funkce
<i>compare scale lower</i>	Vpp / Vrms (boolean) Measured Value Lower Scale % (double)	Lower (boolean)	Porovná zadanou měřenou hodnotu s xx % hodnoty zadaného rozsahu.
<i>compare scale upper</i>	99e36 or xx% (boolean) Measured Value Regular Expression (string) Vertical SCALe (enum) Maximum (%) (double)	Range Exceeded (boolean)	Porovná zadanou měřenou hodnotu buďto se zadaným řetězcem, nebo s xx % zadaného rozsahu.
<i>compera timebase scale</i>	Max Periods Current Frequency Timebase Scale (double)	Lower (boolean)	Porovná zadaný násobek vypočtené periody na základě zadané frekvence se zadaným rozsahem.
<i>initialize</i>	VISA resource name (VISA resource name) Device (enum)	VISA resource name out (VISA resource name)	Zahájí komunikaci přes VISA rozhraní a ověří, že komunikuje se zadaným přístrojem.
<i>lower scale</i>	CHAN1 data in Scale nb. (double) Vertical SCALe in (enum)	CHAN1 data out Scale nb. out (double) Lower SCALe (boolean) Vertical SCALe out (enum)	Porovná zadanou měřenou hodnotu se zadanou hodnotou nižšího rozsahu a v případě, že je nižší, sníží hodnotu proměnné Vertical Scale a nastaví na výstupu true.
<i>measure pdelay</i>	VISA resource name (VISA resource name) Current Frequency Timebase Scale in (double) Regular Expression (string) Milliseconds to Wait (integer)	VISA resource name out (VISA resource name) Timebase Scale out Read Buffer Delay (double)	Nastaví vhodný rozsah na časové ose a změří časový posun mezi signály.
<i>measure phase</i>	VISA Refnum in (VISA resource name) Current Frequency Timebase Scale (double)	Current Frequency Phase Delay Timebase Scale out (double)	Nastaví vhodný rozsah na časové ose, změří časový a vypočte fázový posun mezi signály.

subVI	Vstupy	Výstupy	Popis funkce
<i>measure U1U2a</i>	VISA Refnum in (<i>VISA resource name</i>) Vertical Scale in (<i>enum</i>)	VISA Refnum out (<i>VISA resource name</i>) Vertical Scale out (<i>enum</i>) Attenuation read buffer CHAN1 read buffer CHAN2 (<i>double</i>)	Nastaví vhodný rozsah na napěťové ose, změří napětí na obou kanálech a vypočte útlum.
<i>measure Vrms</i>	VISA resource name (<i>VISA resource name</i>) Vpp / Vrms (<i>boolean</i>) Vertical Scale (<i>enum</i>) Milliseconds to Wait (<i>integer</i>)	VISA resource name out (<i>VISA resource name</i>) read buffer CHAN1 read buffer CHAN2 (<i>double</i>) Vertical Scale out (<i>enum</i>)	Nastaví vhodný rozsah na napěťové ose, změří napětí na obou kanálech.
<i>save data</i>	Cluster (<i>cluster</i>)		Dopočte hodnoty Z a Y a uloží spolu s daty z clusteru do TDMS souboru.
<i>set initial func&freq</i>	VISA resource name (<i>VISA resource name</i>) Voltage Offset Frequency (<i>double</i>) Function Voltage Unit (<i>string</i>)	VISA resource name out (<i>VISA resource name</i>) CHAN1 Scale (<i>double</i>)	Provede prvotní nastavení přístroje podle vstupních proměnných a vypočte vhodný počáteční napěťový rozsah.
<i>set initial OSC</i>	VISA resource name (<i>VISA resource name</i>) Timebase Scale CHAN1 Scale (<i>double</i>) CHAN1 Probe CHAN2 Probe (<i>integer</i>) Milliseconds to Wait (<i>unsigned long</i>) CHAN2 Scale (<i>enum</i>) BandWidth limit Coupling AC/DC (<i>boolean</i>)	VISA resource name out (<i>VISA resource name</i>) CHAN2 Scale	Provede prvotní nastavení přístroje podle vstupních proměnných.
<i>set initial scale2</i>	VISA resource name (<i>VISA resource name</i>) Vertical SCALE 2 (<i>enum</i>) Milliseconds to Wait (<i>integer</i>)	VISA resource name out (<i>VISA resource name</i>) Vertical Scale Out (<i>enum</i>)	Změří napětí a na základě této hodnoty nastaví vhodný počáteční rozsah.

subVI	Vstupy	Výstupy	Popis funkce
<i>shutdown</i>	VISA Refnum in (VISA resource name) Device (enum)		Zastaví osciloskop, případně vypne generátor a ukončí komunikaci.
<i>transfer string-number</i>	CHAN1 data string CHAN2 data string (string)	CHAN1 data no. CHAN2 data no. (double)	Převádí dva textové řetězce na dvě čísla formátu double precision.
<i>Vpp to Vrms</i>	CHAN1 data CHAN2 data (double) Vpp / Vrms (boolean)	CHAN1 data out CHAN2 data out (double)	Převádí hodnoty Vpp na Vrms a naopak v závislosti na hodnotě boolean.
<i>write&delay</i>	Command (string) Milliseconds to Wait (integer)		Vyšle zadaný string jako příkaz přes VISA rozhraní na adresu konkrétního přístroje.
<i>YesNo dialog</i>	Message (string) Enabled (boolean)	T button (boolean)	Otevře dialogové okno se zadaným stringem jako zprávou pro uživatele a na základě odpovědi Y/D je na výstupu True/False.
<i>1-2-5</i>	Current Scale (double)	New Scale (double)	Zajišťuje krok 1-2-5, tedy dělení 2 beze zbytku.

Příloha 4 – Vývojový diagram





Abstrakt

Metoda frekvenční analýzy transformátoru (SFRA) je v praxi běžně používanou neinvazivní metodou diagnostiky poruch vinutí transformátorů. Tato práce má za cíl sestavit a oživit pracoviště pro měření frekvenčních charakteristik, které bude plně automatizované a počítačem řízené. Za tímto účelem je první část práce věnována rozboru metodiky SFRA měření na základě mezinárodních, národních a firemních standardů a odborných publikací. Druhá část práce je věnována analýze, návrhu a dokumentaci programu v jazyce LabVIEW určenému k řízení pracoviště. Ověření funkčnosti pracoviště a komparaci s původním pracovištěm se věnuje poslední část práce.

Abstract

Sweep frequency response analysis (SFRA) is a widely used diagnostic method which allows the analysis of the integrity of power transformer windings without prior dismantling. The task given to the author of this paper is to assemble workplace for measurement of frequency domain characteristic of transformers and make it fully operational. Workplace should be fully automated and computer controlled. For this purpose the first part of the thesis is devoted to analyze the SFRA methodology based on international, national and corporate standards and other technical publications. The second part of the paper consists in analysis, design and documentation of the program for workplace control in the LabVIEW programming language. Verification of functionality of the workplace and comparison with the original workplace is the content of the last part of this paper.

Klíčová slova

Název: Pracoviště na měření frekvenčních charakteristik transformátorů
Frekvenční analýza transformátoru
Frekvenční charakteristiky
LabVIEW

Key words

Title: Workplace for Measurement of Frequency Domain Characteristics of Transformers
Sweep Frequency Response Analysis
Frequency domain characteristics
LabVIEW