

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra výkonové elektroniky a strojů

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Metody on-line diagnostiky, senzory a přenos dat v systémech
elektrických strojů a zařízení VN

Autor práce: **Vojtěch Hábl**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Pihera, Ph.D.**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Vojtěch HÁBL**
Osobní číslo: **E19B0007P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Metody on-line diagnostiky, senzory a přenos dat v systémech elektrických strojů a zařízení VN**
Zadávající katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Popište systém diagnostiky elektrických strojů a zařízení z pohledu možností online snímání.
2. Popište vhodné senzory pro sledování vybraných signálů diagnostiky elektrických strojů a zařízení.
3. Popište systém sběru a přenosu dat diagnostických signálů v průmyslové diagnostice elektrických strojů a zařízení.
4. Navrhněte soubor diagnostických signálů a soubor adekvátních snímačů pro sledování stavu daného stroje, či zařízení.

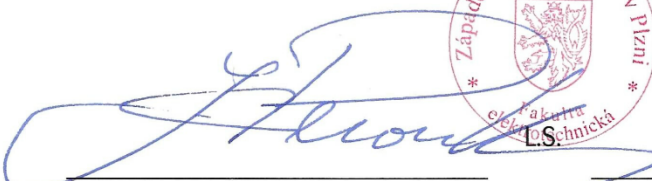

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

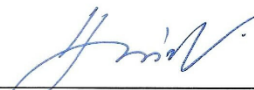
Seznam doporučené literatury:

1. Hauschild, W. High-Voltage Test and Measuring Techniques, Springer 2019.
2. Küchler, A. High-Voltage Test and Measuring Techniques, Springer 2018.
3. Stone, G.C. Electrical insulation for rotating machines, Wiley-IEEE Press 2014.
4. Mentlík, V. et al.: Diagnostika elektrických zařízení, BEN Praha 2008,, 1.vydání, ISBN 978-80-7300-232-9.
5. Kreidl, M. a kol.: Diagnostické systémy, ČVUT Praha 2001.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Josef Pihera, Ph.D.**
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání bakalářské práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2023**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan


Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. října 2022

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá teoretickým popisem on-line diagnostických systémů pro vysokonapěťová zařízení, aplikovatelnými metodami a použitelnými senzory. Dále jsou popsány systémy sběru dat a komunikace v průmyslových sítích. Tato práce se zaměřuje na monitoring částečných výbojů, jsou zde popsány základní veličiny a metody potřebné pro měření výbojové činnosti. Vhodně zvoleným diagnostickým systémem je možné včas předcházet haváriím a lépe plánovat servisní intervaly. V závěru práce je popsáno několik aktuálně nabízených řešení pro on-line monitoring částečných výbojů od různých společností na trhu a návrh jednoho řešení pro konkrétní zařízení.

Klíčová slova

On-line diagnostika, diagnostické metody, senzory, částečné výboje, sběr dat, monitoring částečných výbojů

Abstract

This bachelor thesis deals with the theoretical description of on-line diagnostic systems for high-voltage devices, applicable methods, and applicable sensors. Furthermore, data acquisition and communication systems in industrial networks are described. This thesis focuses on partial discharge monitoring, the basic quantities and methods required for measuring discharge activity are described. With a properly selected diagnostic system, early prevention of accidents and better planning of service intervals are possible. The thesis concludes with a description of several currently offered solutions for on-line monitoring of partial discharges from different companies on the market and a proposal for one solution for a specific device.

Key Words

On-line diagnostics, diagnostic methods, sensors, partial discharges, data acquisition, partial discharge monitoring

Poděkování

Rád bych zde poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Josefu Piherovi, Ph.D. za jeho čas, ochotu a příjemnou spolupráci při konzultacích.

Obsah

Úvod	- 1 -
1 Systém diagnostiky z pohledu možností on-line	- 2 -
1.1 Vlastnosti on-line diagnostiky	- 2 -
1.2 Rozdíly on-line a off-line diagnostiky	- 3 -
1.3 Základní rozdělení aplikovatelných metod on-line diagnostiky	- 4 -
1.3.1 Vibrodiagnostika	- 4 -
1.3.2 Termodiagnostika	- 4 -
1.3.3 Akustická diagnostika.....	- 5 -
1.3.4 Detekce ozónu	- 6 -
1.3.5 Měření základních elektrických veličin.....	- 6 -
1.3.6 Měření částečných výbojů	- 6 -
2 Vhodné senzory pro on-line diagnostiku.....	- 8 -
2.1 Senzory pro vibrodiagnostiku	- 9 -
2.1.1 Senzory rychlosti vibrací	- 9 -
2.1.2 Senzory výchylky vibrací	- 9 -
2.1.3 Akcelerometry	- 10 -
2.2 Senzory teploty	- 10 -
2.3 Akustické senzory	- 11 -
2.4 Detektory ozónu.....	- 11 -
2.5 Senzory pro měření částečných výbojů	- 12 -
2.5.1 Senzory pro konvenční metodu měření	- 12 -
2.5.2 Senzory pro nekonvenční metody měření	- 12 -
3 Online diagnostika částečných výbojů	- 13 -
3.1 Částečné výboje	- 13 -
3.2 Negativní účinky částečných výbojů	- 13 -
3.3 Veličiny vztahující se k částečným výbojům.....	- 15 -
3.4 Způsoby měření částečných výbojů.....	- 17 -
4 Systém sběru a přenosu dat v průmyslové diagnostice	- 18 -
4.1 RS-485	- 18 -

4.2	CAN bus	- 18 -
4.3	ProfiBus	- 19 -
4.4	ProfiNet.....	- 19 -
4.5	AS-Interface (AS-i).....	- 20 -
4.6	InterBus.....	- 20 -
4.7	ModBus.....	- 21 -
4.8	Shrnutí.....	- 21 -
5	Nabízená řešení pro on-line monitoring částečných výbojů na trhu	- 23 -
5.1	PD Service	- 23 -
5.1.1	PDSimply	- 23 -
5.1.2	PDS senzory	- 24 -
5.1.3	PDS software	- 24 -
5.2	Power Diagnoststic Instrument Company	- 24 -
5.3	Sparks Instruments.....	- 25 -
5.3.1	TMS	- 25 -
5.3.2	Sparks Instruments senzory	- 26 -
5.4	IRIS Power.....	- 26 -
5.4.1	Guard II+	- 27 -
5.4.2	IRIS senzory	- 27 -
5.4.3	Software IRIS	- 28 -
6	Shrnutí nabízených řešení.....	- 29 -
6.1	PD Service	- 29 -
6.2	Power Diagnostic Instrument Company	- 29 -
6.3	Sparks Instruments.....	- 29 -
6.4	IRIS Power.....	- 29 -
7	Návrh řešení pro konkrétní zařízení	- 30 -
7.1	Monitoring částečných výbojů.....	- 30 -
7.2	Monitoring vibrací konců čel vinutí	- 31 -
7.3	Shrnutí.....	- 31 -
	Zhodnocení a závěr.....	- 32 -
	Literatura	- 33 -

Úvod

Vysokonapěťové stroje a zařízení jsou nedílnou součástí průmyslu, ať už se jedná o odvětví výroby a přenosu elektrické energie, dopravy či průmyslové výroby. Pořizovací cena těchto zařízení bývá obrovská, stejně jako náklady spojené s jejich údržbou a provozem. Na zařízení jsou kladeny vysoké nároky již při výrobě, mezi které mimo jiné patří spolehlivost a finální cena. Finanční náklady na pořízení a provoz zařízení, které jsme schopni ovlivnit přesným dimenzováním stroje do konkrétního provozu, jsou klíčové pro ekonomické výpočty a dobu návratnosti zařízení. Spolehlivost a schopnost udržení v provozu jsou zase velmi důležité především u zařízení, jejichž náhlá porucha by znamenala velké finanční ztráty pro provozovatele či bezpečnostní riziko. Nejen z těchto důvodů je třeba věnovat značnou pozornost diagnostice těchto zařízení.

Díky vhodné diagnostice jsme schopni sledovat stav a opotřebení zařízení při jeho chodu a v průběhu jeho životnosti. Na základně shromážděných a zpracovaných dat ze senzorů jsme schopni lépe porozumět vývoji stavu daného zařízení. Tato data nám dávají možnosti lepšího plánování servisních intervalů a odstávek, monitorování měnících se vlastností a parametrů zařízení, či včasné detekování hrozící havárie zařízení. Online diagnostika nám navíc umožňuje monitorování zařízení přímo v jeho provozu a dlouhodobé sledování vývoje jeho vlastností.

Pro správnou diagnostiku ale potřebujeme data nejen korektně snímat vhodnými senzory a filtrovat případné rušení. Je nezbytné také určit jaké veličiny je třeba snímat pro určitý druh diagnostiky a jak snímaná data dále zpracovávat pro jejich požadovanou výpovědní hodnotu. Sestavení diagnostického modelu pro dané zařízení bývá proto velmi komplexní a je zapotřebí určitá znalost vlastností samotného zařízení. Tato práce se bude zabývat možnými způsoby online diagnostiky, popsáním senzorů pro sledování vhodných veličin a samotným systémem sběru a přenosu dat v zařízeních vysokého napětí.

Online diagnostiku vysokonapěťových zařízení vnímám jako velmi důležitý obor s velmi perspektivní budoucností. Celá řada firem již dnes vyžaduje toto řešení právě kvůli výhodám monitorování životnosti zařízení, zvýšení bezpečnosti včasným odhalením blížící se havárie, a v neposlední řadě také možné lepší ekonomice provozu daného zařízení.

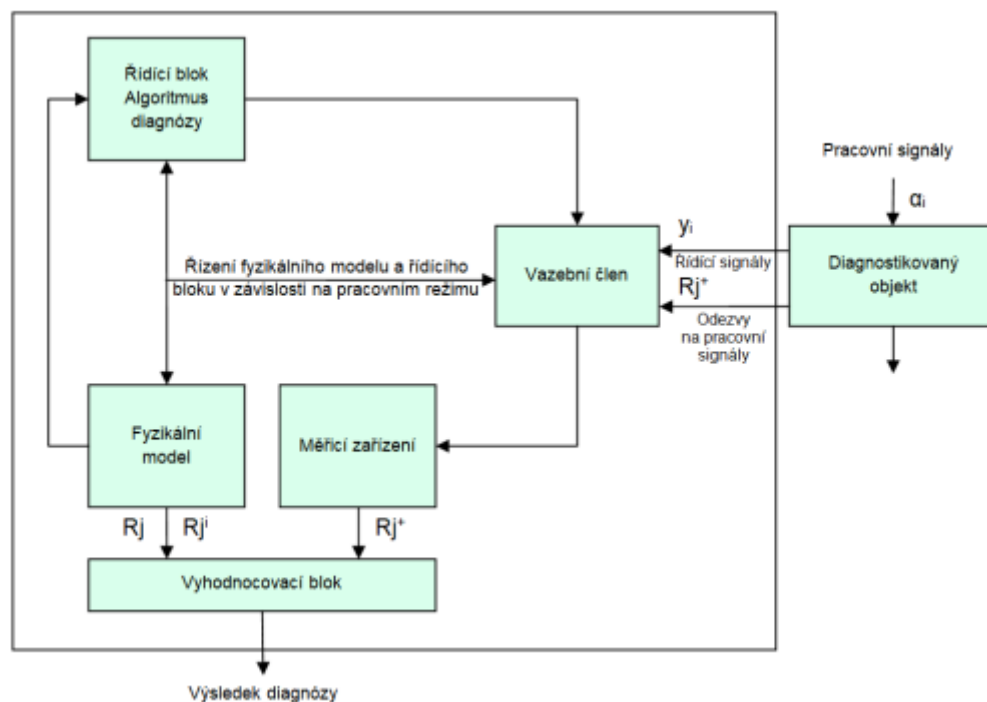
1 Systém diagnostiky z pohledu možností on-line

Systém diagnostiky elektrického zařízení je soubor senzorů, komunikačních sítí a vyhodnocovacích zařízení, který je schopný měřit a sledovat určité parametry diagnostikovaného objektu. V případě, že jsme schopni aplikovat tento diagnostický systém na zařízení za jeho plného chodu, jedná se o on-line (funkční) systém diagnostiky [1]. Pokud diagnostický systém neustále, popřípadě v určitých pravidelných intervalech snímá hodnoty daného zařízení, hovoříme o monitorování [2]. Při monitorování jsme schopni sledovat technický stav objektu, vyhodnocovat měnící se trend provozních vlastností a mezních bezpečnostních stavů, při kterých je zařízení nutno odstavit. Navíc nám sledování vývoje parametrů dává možnost s určitou pravděpodobností predikovat budoucí stav a vlastnosti daného zařízení, tedy vytvořit prognózu. Finální částí diagnostiky je pak geneze, při které ze získaných informací a znalostí určujeme příčiny poruch a zhoršených vlastností zařízení a vytváříme vhodná opatření pro budoucí provoz [3].

1.1 Vlastnosti on-line diagnostiky

On-line systém diagnostiky se na rozdíl od off-line systémů vyznačuje především možností neustálého monitoringu, ale také nepřenositelností samotného systému [1]. On-line diagnostický systém je navrhnout právě pro jedno konkrétní diagnostikované zařízení a je alespoň z části jeho pevnou součástí. Tento fakt do jisté míry zhoršuje finanční stránku celého systému a je tedy nezbytné důkladně zhodnotit jeho použití. Při on-line snímání nepřivádíme do zařízení žádné testovací signály, jelikož využíváme odezvu na reálné pracovní signály diagnostikovaného zařízení [1]. Díky tomu získáme soubor diagnostických veličin snímaných v reálných provozních podmínkách, což by při odstávce zařízení bylo jen těžko dosažitelné.

Na obr. 1 je patrné, že do diagnostikovaného objektu jsou přiváděny pouze pracovní signály a_i , jeho provoz tedy není nijak ovlivněn [1]. Z diagnostikovaného objektu jsou poté snímány řídicí signály y_i a odezvy na pracovní signály R_j^+ . Vyhodnocovací blok následně vyhodnotí výsledek diagnózy na základě porovnání naměřených hodnot z měřicího zařízení R_j^+ a hodnot z fyzikálního modelu R_j .



Obrázek 1: Blokové schéma on-line diagnostiky [4]

1.2 Rozdíly on-line a off-line diagnostiky

Základním rozdílem mezi on-line a off-line diagnostikou je, že on-line diagnostiku můžeme provádět přímo při běžném provozu zařízení [5]. Při provádění off-line diagnostiky na zařízení je nutná jeho odstávka, což může být problém především u zařízení, která jsou neustále v provozu a jejich odstávka by znamenala velké finanční ztráty či bezpečnostní riziko. Příkladem mohou být velké generátory v elektrárnách, či transformátory zajišťující důležitou dodávku energie. Na těchto zařízeních je možné off-line diagnostiku provádět pouze při plánovaných odstávkách, ovšem otázkou zůstává, zda je četnost těchto odstávek dostatečná pro sledování trendu měnících se parametrů zařízení. Off-line diagnostický systém může být do jisté míry přenositelný na jiná zařízení, což značně zlepšuje jeho finanční stránku. Navíc jsme schopni do zařízení přivádět externí testovací signály a sledovat, jak se zařízení chová v extrémních případech, a nejen za jeho běžného provozu.

On-line diagnostický systém je aplikovatelný na zařízení v plném provozu, což nám dává možnost provádět monitoring v reálném čase a sbírat tak velké množství informací a sledovat měnící se trend vlastností zařízení s větší přesností [5]. Navíc nám umožňuje použít bezobslužné diagnostické systémy. Na druhou stranu autonomní on-line systémy

mívají složitější strukturu, která je do jisté míry spojená s nižší spolehlivostí a vyšší cenou [5]. Tyto systémy jsou také určeny pro jedno konkrétní zařízení a jsou nepřenositelné. Je nutné tedy důkladně zvážit jejich použití, především z ekonomického hlediska.

1.3 Základní rozdělení aplikovatelných metod on-line diagnostiky

Ne všechny metody diagnostiky jsme schopni aplikovat pro on-line snímání. Jsme schopni monitorovat zařízení pouze v jeho provozních podmínkách, přičemž jeho chod nesmí být diagnostikou nijak ovlivňován. Je nutné použití senzorů, jejichž signál jsme schopni počítačově zaznamenávat, dále zpracovávat a uchovávat. Vyhodnocování dat pouze z jedné metody nám navíc může dávat zkreslené až zavádějící informace o reálném stavu zařízení. Proto je vhodné při aplikaci diagnostického systému v praxi použít tzv. multiparametrickou diagnostiku, která kombinuje více metod [6].

1.3.1 Vibrodiagnostika

Jednou z možných metod on-line diagnostiky je vibrodiagnostika, která využívá pro vyhodnocování stavu zařízení snímání signálu vibrací. Tato metoda je aplikovatelná především na točivé stroje, kde bývá zdroj vibrací způsoben nejčastěji poškozením ložisek uložení rotoru, ale může jim být i například nesymetrie v elektrickém obvodu rotoru [1]. Například množství a intenzita impulzů za jedno otočení bývají vhodným indikátorem stavu opotřebených ložisek [2]. Přestože při malém poškození jsou vibrace stroje poměrně malé, můžeme je vhodnými způsoby detekovat a odhalit tak vznikající závady již v jejich počátku [2]. Pro správnou vibrodiagnostiku je nutné vypracovat určitou metodiku měření a brát v úvahu kinematické schéma stroje, schéma měřících bodů, způsoby měření, očekávané frekvence a v neposlední řadě také typ stroje a použitých ložisek [2].

Ve vibrodiagnostice rozlišujeme dva základní druhy kmitů, kterými jsou [2]:

- **Absolutní kmity** – vztažené k fixnímu bodu na Zemi
- **Relativní kmity** – vztažené ke zvolenému bodu na samotném zařízení

1.3.2 Termodiagnostika

Tato diagnostická metoda využívá pro určení stavu zařízení měření a sledování vývoje teplot, popřípadě rozbor termovizních snímků (termografie) [7]. Měření teplot je velice důležité především kvůli izolačnímu systému, který důsledkem zvýšené teploty rychleji stárne a vzniká tak vyšší pravděpodobnost výskytu poruchy [1]. Sledováním teplot částí

diagnostikovaného zařízení můžeme odhalit zvýšené mechanické i elektrické namáhání sledované oblasti, popřípadě závadu chladicího systému [1]. Teplotu nedokážeme měřit přímo, proto pro její měření využíváme jiných fyzikálních veličin [7].

Podle přístupu k měření rozlišujeme dva způsoby [7]:

- **Kontaktní měření**, při kterém dochází k přímému kontaktu měřeného objektu se senzorem. Používáme zde především odporové, polovodičové a termoelektrické snímače, které často bývají implementovány přímo v zařízení. V případech, kde by měření elektrickým způsobem bylo komplikované, je možné využití optovláknových snímačů, které nejsou náchylné na rušení, ani žádné rušení nezpůsobují.
- **Bezkontaktní měření**, které zahrnuje také použití infračervených termokamer. Díky tomuto způsobu jsme schopni měřit teploty i na rotujících a pohybujících se částech objektu, měřit z bezpečné vzdálenosti, zachycovat velmi rychlé změny teplot a určit teploty celých povrchů objektu. Navíc má tento způsob minimální vliv na měřené zařízení. Je zde ale nutná určitá znalost měření a je nezbytné počítat s okolními vlivy prostředí.

1.3.3 Akustická diagnostika

Princip akustické diagnostiky je založen na snímání akustického projevu závady. Jsme díky ní schopni určit druh závady i do jisté míry lokalizovat místo jejího vzniku. Může být určena pro diagnostiku vadných ložisek a mechanických defektů točivých strojů, dává nám ale také možnost odhalit přítomnost částečných výbojů v zařízení [1]. Pro detekci částečných výbojů používáme především snímání v ultrazvukovém pásmu, kvůli snazšímu rozlišení od rušivého pozadí a přesnější lokalizaci poruchy [1]. Pozici poruchy jsme pak schopni určit díky metodám mapování akustických polí, tedy softwarového zpracování signálů z více senzorů [7].

Zvuk vzniká při zhušťování a zředování částic hmotného prostředí, ve kterém se šíří [8]. Částice přitom kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Dvě po sobě jdoucí místa s maximálně a minimálně zhuštěnými částicemi tvoří zvukovou vlnu, její délku označujeme λ (m). Tato vlna prostupuje hmotou s určitou rychlostí označovanou c (m/s), která je závislá na prostředí, ve kterém se zvuk šíří. Počet kmitů za 1 sekundu představuje frekvence f (Hz). V místech zhuštěných a zředěných částic vzniká ve vzduchu určitý přetlak a podtlak, tyto změny tlaku označujeme jako akustický tlak p (Pa). Rychlost, kterou částice kmitají kolem své rovnovážné polohy, nazýváme akustická rychlost v . Součinem akustického tlaku

a akustické rychlosti získáme intenzitu zvuku I (W/m^2). Jedná se o měrný výkon označující energii procházející jednotkovou plochou za 1 sekundu. Akustickou energii skrze libovolnou plochu za 1 sekundu pak nazýváme akustický výkon P (W).

1.3.4 Detekce ozónu

U vysokonapěťových (VN) zařízení jsme schopni naměřit přítomnost ozónu v chladicím vzduchu. Jeho přítomnost detekuje výskyt částečných výbojů, popřípadě jiné lokální teplotní namáhání izolace, při které dochází k ionizaci vzduchu [1]. V principu se jedná o jednoduchou metodu, která nám umožňuje včas detekovat výbojovou činnost a zamezit tak rozsáhlejšímu poškození izolačního systému. Pro měření koncentrace ozónu používáme metody založené na plynové chromatografii či kolorimetrické metody [5]. Detekce ozónu se využívá pro diagnostiku velkých VN točivých strojů chlazených vzduchem s jmenovitým napětím vyšším než 6 kV [5]. Koncentrace ozónu ve vzduchu větší než 0,1 ppm (částic na milion) může při dlouhodobém vystavení představovat také zdravotní riziko pro personál [5].

1.3.5 Měření základních elektrických veličin

Sledováním základních provozních veličin – napětí a proudů nám dává možnost stanovit okamžité zatížení zařízení. Na hodnotě proudu závisí také velikost Jouleových ztrát ve vinutí a můžeme tak na základě jeho velikosti odhadnout tepelné zatížení izolačního systému [1]. Monitorování a archivace aktuálních napětí a proudů jsou důležité pro sledování života zařízení a způsobu jeho provozování. Měřící transformátory napětí a proudů bývají mnohdy již součástí zařízení a je vhodné je implementovat i do online diagnostického systému [1]. Vhodným měřicím obvodem jsme také schopni měřit proudové pulzy, provázející vznik částečných výbojů [1].

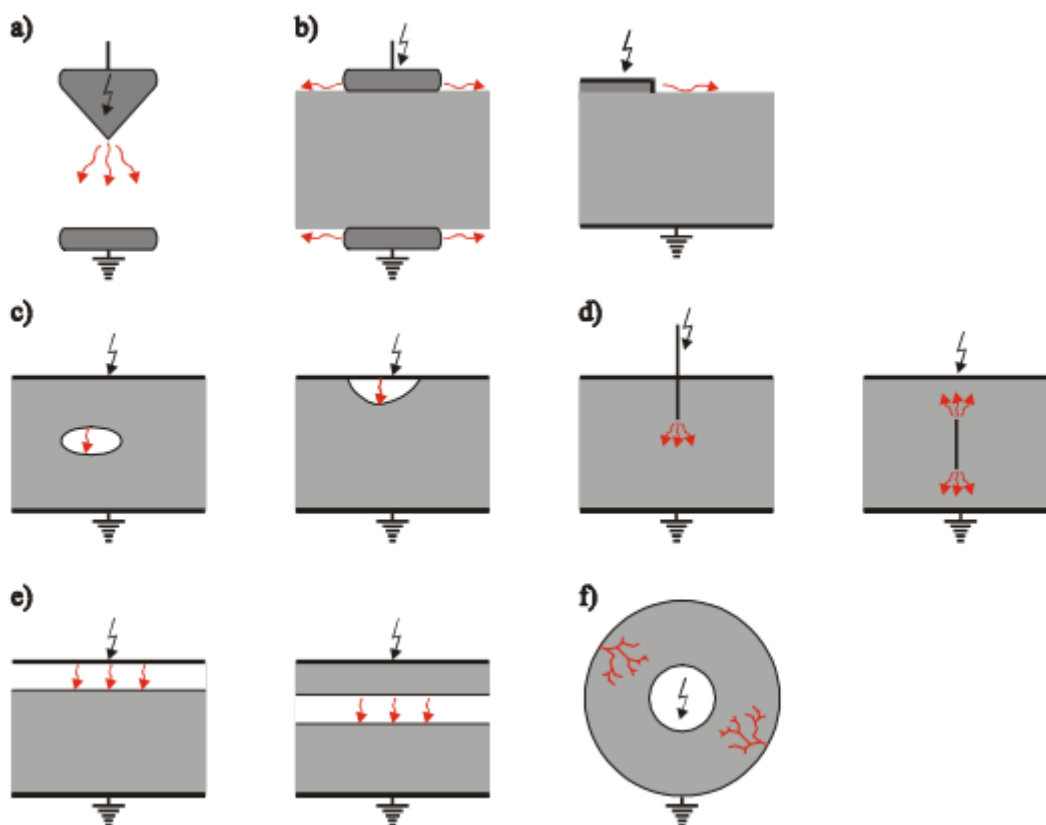
1.3.6 Měření částečných výbojů

V diagnostice VN elektrických strojů je důležitá detekce přítomnosti elektrických výbojů v izolačním systému, ať už se jedná o pevné, kapalné, či plynné dielektrikum [1]. Při provozu zařízení se v jeho izolaci mohou objevit částečné výboje a je třeba je vhodným způsobem detekovat a lokalizovat. Částečné výboje jsou druhem elektrických výbojů, které částečně přemostí izolaci zařízení a velmi negativně tím ovlivňují vlastnosti izolačního systému, což má za následek snížení spolehlivosti a životnosti celého zařízení. Výbojovou činnost provází celá řada fyzikálních veličin, díky kterým jsme schopni částečné výboje

monitorovat, lokalizovat a klasifikovat [1]. Mezi základní veličiny popisující průběh výbojové činnosti patří četnost výbojů (q), zdánlivý náboj výbojů a fáze jejich výskytu.

Podle výskytu částečných výbojů rozlišujeme [9]:

- **Vnější částečné výboje** vznikající v plynech v blízkosti elektrod malých poloměrů nebo velkých zakřivení. Řadí se sem korónové či doutnavé výboje.
- **Povrchové částečné výboje**, které vznikají na rozhraní mezi pevným a plynným dielektrikem. Příkladem mohou být klouzavé výboje na kabelových průchodkách zařízení.
- **Vnitřní částečné výboje**, které se objevují v plynech obklopených kapalným či pevným dielektrikem. Typickým příkladem jsou částečné výboje vzniklé v dutinkách pevného dielektrika.



Obrázek 2: Typický výskyt částečných výbojů; a) vnějších; b) povrchových; c), d), e), f) vnitřních [9]

2 Vhodné senzory pro on-line diagnostiku

Senzor (snímač, detektor) je jedním ze základních bloků samotného diagnostického systému. Nachází se na jeho vstupu a bývá často v přímém kontaktu s diagnostikovaným zařízením, popřípadě součástí jeho vnitřní struktury. Citlivou část senzoru (místo snímání) označujeme jako čidlo [2]. Úkolem senzoru je transformace měřené veličiny (fyzikální, chemické, či biologické) na vhodný diagnostický signál, ten bývá elektrický (analogový, digitální), nebo optický [2].

Dle potřeby napájení senzoru rozlišujeme dva druhy senzorů, aktivní a pasivní [10]. Zatímco aktivní senzory potřebují pro svoji funkčnost vlastní napájení, pasivní senzory transformují přímo měřenou veličinu a není třeba je nijak napájet.

- **Aktivní senzory** se chovají jako zdroj elektrického signálu, který je způsoben přímo měřenou veličinou. Mohou jimi být senzory fotoelektrické, piezoelektrické, termoelektrické, elektrochemické atd. Jejich výhodou je funkčnost bez externího napájení [10].
- **Pasivní senzory** mění své elektrické vlastnosti (např. elektrický odpor, indukčnost či kapacitu) vlivem měřené veličiny [10]. Pro svůj provoz potřebují vždy napájení.

Dále můžeme rozlišit senzory na klasické a inteligentní, které mají již integrovaný AD převodník přímo ve své konstrukci [10]. Přestože v současnosti směřuje trend k využití především inteligentních senzorů, klasické senzory mají stále své uplatnění [10].

- **Klasické senzory** pouze transformují měřenou veličinu na spojitý (analogový) signál, který je ale velmi náchylný na rušení a pro další zpracování je nutné jeho následné převedení na digitální podobu ve vhodném AD (analog/digital) převodníku [10]. Jejich výhodou je jednoduchost, nižší cena a možnost pracovat aktivně bez nutnosti napájení.
- **Inteligentní senzory** mohou díky zabudovanému AD převodníku mít na výstupu již digitalizovaný signál. Tento signál je méně náchylný na rušení, a navíc jsme schopni díky sériovým sběrnicím spojovat více senzorů do uzlů. Chytré senzory (smart) mohou poskytovat celou řadu dalších funkcí, jako např. dálkové nastavení, kontrolu

správné funkce senzoru či kontrolu komunikace [10]. Digitální signál může být dále přenášen prostřednictvím sériové komunikace a komunikačního protokolu průmyslové sběrnice (např. CAN, AS Interface, Profibus DP, Interbus, Device Net) popřípadě prostřednictvím průmyslové verze Ethernet [10].

Pro účely online diagnostiky a monitoringu vyžadujeme naměřený signál vždy v digitální podobě pro jeho snadné ukládání a další zpracování [2]. Digitální signál může být přímo na výstupu inteligentního senzoru, nebo je nutná jeho digitalizace v AD převodníku příslušného diagnostického systému.

2.1 Senzory pro vibrodiagnostiku

U vibrodiagnostiky používáme senzory pro sledování vibračního stavu. Můžeme je rozdělit podle druhu snímaných vibrací na absolutní a relativní, jak již bylo zmíněno. Pro měření absolutních vibrací se používají seismické senzory umístěné na konstrukci zařízení. Senzory pro měření relativních vibrací jsou umístěny na rotujících a pevných částech stroje, následně se počítá s jejich rozdíly [6].

Podle měřené veličiny můžeme dále rozlišit senzory rychlosti (velometry), senzory výchylky a senzory zrychlení (akcelerometry). Měřené veličiny jsou navzájem vázány matematickými vztahy. Rychlost jsme schopni vyjádřit jako první derivaci výchylky a zrychlení jako její druhou derivaci [11].

2.1.1 Senzory rychlosti vibrací

Senzor rychlosti vibrací (velometr) sleduje rychlost vibrací, která se udává v mm/s. Jedná se o první derivaci výchylky, ale často se využívá integrace signálu z akcelerometru. Dalším druhem jsou senzory založené na elektrodynamickém principu, u kterých se rychlost vibrací určuje podle indukovaného napětí na cívce [11]. Velikost napětí je úměrné rychlosti seizmické hmoty senzoru, která je tvořena permanentním magnetem [11].

2.1.2 Senzory výchylky vibrací

Senzor výchylky sleduje dráhu (výchylku) vibrací, která se obvykle udává v mikrometrech. Tato veličina se využívá pro měření především nižších frekvencí (<10 Hz) [11]. Senzory výchylky pracují na principu kapacitním, indukčním, indukčnostním, magnetickém, či optickém [11]. V současnosti se nejčastěji využívají senzory indukčností, které fungují na

principu závislosti indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů [11]. Pro matematický popis výchylky lze použít vztah [11]:

$$m\ddot{y} = M\ddot{x} \Rightarrow y \approx x \quad (1)$$

, kde m je hmotnost seizmické hmoty senzoru,

\ddot{y} je zrychlení seizmické hmoty senzoru,

M je hmotnost objektu,

\ddot{x} je zrychlení objektu,

y je výchylka seizmické hmoty senzoru,

x je výchylka diagnostikovaného objektu.

2.1.3 Akcelerometry

Mezi nejpoužívanější senzory ve vibrodiagnostice patří akcelerometry. Měřenou veličinou je zde zrychlení, obvykle se udává v ms^{-2} nebo v g . Tento druh senzoru je velmi rozšířen především díky jeho jednoduché konstrukci a nižší ceně [2]. Pro realizaci akcelerometrů existuje celá řada fyzikálních principů, pro účely diagnostiky se ale využívají především senzory piezoelektrické, piezorezistivní, kapacitní, popřípadě senzory založené na technologii MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) [7].

2.2 Senzory teploty

V současné době se pro měření teplot využívají především senzory založené na principu odporovém, polovodičovém či termoelektrickém [7]. Tyto senzory jsou kontaktní a na jejich výstupu je signál reagující na změnu teploty na čidle senzoru [7]. V případě odporových a polovodičových sensorů (termistorů) teplota způsobuje měřitelnou změnu odporu čidla. Polovodiče bývají oproti kovům až 10x citlivější na změnu teploty, jejich charakteristika je ale výrazně nelineární [7]. U termoelektrických sensorů vzniká na jejich výstupu termoelektrické napětí způsobené měřenou teplotou a může se tak jednat o aktivní senzory. Pro bezkontaktní měření je možné využít také infračervené senzory teploty, popřípadě termokamery [7].

2.3 Akustické senzory

V současnosti se pro měření v ultrazvukovém pásmu využívají především piezoelektrické snímače. Piezoelektrický jev, na jehož principu fungují tato čidla, mění mechanickou deformaci krystalu na odpovídající elektrické napětí. Mechanická deformace krystalu uvnitř senzoru je způsobena dopadající akustickou vlnou. Vhodnými materiály využívající piezoelektrického jevu jsou např. křemen či Seignettova sůl [9]. V praxi se tyto senzory používají pro monitoring částečných výbojů v transformátorech, přičemž je použito několik vhodně umístěných senzorů na povrchu nádoby [1]. Po počítačovém zpracování signálů z těchto senzorů je možné určit přibližnou polohu vzniku částečného výboje a do jisté míry filtrovat okolní rušení [9].

Dalším možným využitím akustického jevu jsou tzv. akustické kamery. Jedná se o kompaktní zařízení, jehož součástí je pole desítek až stovek citlivých mikrofónů. Data z těchto mikrofónů jsou zpracovávána a zobrazují se na displeji ve formě obrazu v reálném čase. Jedná se o jednoduchý a rychlý způsob diagnostiky přístupných částí zařízení a vedení. Pro online monitoring je ovšem tento způsob nevhodný.

2.4 Detektory ozónu

Nejjednodušší způsob pro indikaci ozónu ve vzduchu je využití tzv. indikačních trubic (kolorimetrická metoda) [5]. Tyto trubice obsahují chemickou látku citlivou na ozón, která se po uvolnění zbarví a lze tak zjistit přibližnou koncentraci ozónu. Tento test by se měl na zařízení provádět jednou za 6 měsíců [5]. Dále je nutné, aby chladicí vzduch byl přístupný pro obsluhu, která toto měření provádí. Tuto metodu ovšem nelze aplikovat pro automatizované diagnostické systémy, jelikož je zde nutná obsluha pro měření.

Dalším způsobem pro detekci ozónu v zařízení je využití elektrických senzorů pracujících na principu plynové chromatografie [5]. Tento senzor může být umístěn i v uzavřené konstrukci stroje, popřípadě v chladicím potrubí i ve větší vzdálenosti od stroje. Díky senzoru můžeme koncentraci ozónu měřit nepřetržitě a naměřená data dále zpracovávat.

Naměřená koncentrace ozónu ve stroji je ovlivňována mnoha faktory, jako např. provozní napětí či vlhkost vzduchu, a je třeba s těmito faktory počítat [5].

2.5 Senzory pro měření částečných výbojů

Senzory pro měření elektrických projevů částečných výbojů lze podle metody měření rozdělit do dvou skupin. Rozdíly mezi těmito metodami jsou popsány v kapitole 3.4.

2.5.1 Senzory pro konvenční metodu měření

Do této skupiny se řadí vazební kondenzátory, díky kterým jsme schopni zachytit proudové pulzy provázející výbojovou činnost. Tyto kapacitní snímače se připojují na jednotlivé fáze ke svorkám měřeného stroje a dále jsou uzemněny [12]. Nízkonapěťová signální část je spojena s měřicím zařízením za pomoci koaxiálního kabelu. Měření probíhá na frekvenci zhruba do 1 MHz [9]. Před samotným měřením je nutné provést kalibraci měřicího obvodu.

2.5.2 Senzory pro nekonvenční metody měření

Pro nekonvenční metody měření elektrických projevů ČV (částečných výbojů) se využívají především senzory měřící ve frekvenčním pásmu UHF (300-3000 MHz) umístěné na přívodním kabelu měřeného stroje, popřípadě v rozvodně, uvnitř transformátoru či na jeho průchodkách [9]. Další možností jsou drážkové snímače, které se umísťují přímo do statorových drážek. Tyto snímače nejsou ovlivňovány běžným externím rušením [13] a díky jejich počtu umožňují lepší lokalizaci poruchy. Měřicí frekvence těchto snímačů je 10-1000 MHz [13]. Senzory pro nekonvenční měření neměří zdánlivý náboj q a nelze tak provést kalibraci měřeného obvodu.

3 Online diagnostika částečných výbojů

Monitorování částečných výbojů je velmi důležité z hlediska bezpečnosti a spolehlivosti provozu vysokonapěťových zařízení, jako jsou např. generátory, motory, transformátory, zapouzdřené rozvodny a kabely. Výbojová činnost způsobuje postupnou degradaci izolačního systému, což může vést k havárii zařízení, požárům, výbuchům a vážným zraněním [14]. Poruchy způsobující částečné výboje mohou vznikat špatným zpracováním již při výrobě, nevhodným postupem při instalaci, popřípadě poruchami při provozu [14]. Vhodné monitorování přináší spolehlivou analýzu vývoje skutečného stavu zařízení a umožňuje lepší plánování jeho údržby. Jedním z důvodů k instalaci diagnostiky částečných výbojů může být také podmínka ze strany pojišťovny daného zařízení.

3.1 Částečné výboje

V izolačním systému vysokonapěťových strojů o jmenovitém napětí vyšším než přibližně 4 kV může docházet ke vzniku částečných výbojů [5]. Tyto výboje vznikají na rozhraní dvou materiálů, popřípadě ve vzduchových dutinkách jednoho materiálu, které jsou způsobeny jeho nedokonalostí při výrobě. Zlepšováním technologie výroby lze dutinky v izolaci redukovat, nelze však jejich tvorbě zcela zabránit [4]. V těchto dutinkách vlivem elektrického namáhání dochází ionizací ke vzniku vodivého kanálu a zápalu elektrického oblouku. Tento zápal má velice negativní vliv na životnost izolace a při dlouhodobém provozu zařízení s rozsáhlou výbojovou činností v izolaci může dojít až k jejímu průrazu a havárii celého zařízení. Proto je jejich detekce a lokalizace velmi důležitým úkolem diagnostického systému. Částečné výboje se projevují jako velice krátké pulzy s dobou trvání kolem 1 mikrosekundy [1].

3.2 Negativní účinky částečných výbojů

Negativních účinků částečných výbojů na izolaci je celá řada, zároveň ale na každou skupinu izolačních materiálů působí výboje odlišně. Anorganické materiály, jako je například porcelán či slída, jsou vůči působení částečných výbojů vcelku odolné i při dlouhodobém namáhání [9]. Na druhou stranu dnes velmi rozšířené organické skupiny materiálů, jako např. PET, PEN, PE, PTFE, nebo kompozity se silikonovými či epoxidovými pojivky, jsou na výboje velmi citlivé i při krátkodobém namáhání [9].

Negativní účinky na materiál můžeme rozdělit na [4], [9]:

- **Elektroerozivní účinky**, které jsou způsobeny elektrickým obloukem v dutinkách dielektrika a nárazy elektronů a iontů o stěny v těchto dutinkách. Vodivá dráha dutinky se navíc může důsledkem velké intenzity elektrického pole dále šířit v dielektriku a způsobit tak růst tzv. elektrického stromečku.
- **Chemické účinky**, které vznikají především při dlouhodobém působení částečných výbojů. V dutinkách mohou vznikat látky plynného, kapalného, ale i pevného skupenství. Jedná se o reakce kyslíku s chemickými sloučeninami na povrchu dutinky, přičemž roste tlak a mění se vodivost v dutince. To má za následek změnu charakteru výbojů, zpravidla pak vzniká lepší prostředí pro výbojovou činnost. Chemickými reakcemi v dutinkách se vytvářejí prvky jako např. kyslík a dusík. Kyslík se rozkládá na ozón, který dále působí svými oxidačními účinky. Z dusíku se stávají dusíkaté kyseliny a tzv. aktivní dusík, který má značné erozivní účinky. Tyto látky postupem času působí nejen uvnitř dutinky, ale i v jejím okolí. Dochází tak k rozsáhlému narušování izolačního materiálu, který ztrácí svoji izolační schopnost. Dalšími látkami vznikajícími při výbojové činnosti mohou být oxid uhelnatý (CO), oxid uhličitý (CO₂) a v malém množství i vodík H₂. Uhlíkové monoxidy mohou se vzdušnou vlhkostí vytvářet karboxylové kyseliny a kyselinu mravenčí či octovou. Tyto kapalné kyseliny postupně krystalizují a vznikají tak pevné produkty. Kapalné produkty mohou zvyšovat vodivost stěn dutinky až o 7 řádů.
- **Tepelné účinky**, které způsobují vlivem hoření elektrického oblouku uvnitř dutinky zahřívání výbojového kanálu na vysokou teplotu. Na povrchu dutinky může docházet až ke zuhelnatění povrchu a tím ke zvýšení elektrické vodivosti. Izolační materiál se kromě působení částečných výbojů zahřívá také dielektrickými ztrátami. Pokud není teplo z materiálu dostatečným způsobem odváděno, dochází k jeho přehřívání, což má velmi negativní vliv na jeho životnost. V krajním případě může dojít také k tepelnému průrazu materiálu. Při zvyšování teploty dochází ke snížení četnosti částečných výbojů, což je způsobeno zvýšenou vodivostí povrchu dutinky, zároveň ale dochází ke zvýšení intenzity (amplitudy) výbojů.

3.3 Veličiny vztahující se k částečným výbojům

Abychom mohli částečné výboje měřit a klasifikovat, je nutné znát jejich charakteristické veličiny. Tyto veličiny jsou podrobně popsány v normě ČSN EN 60270 [15]:

- **Zdánlivý náboj q** (apparent charge q) je takový náboj, který na měřicím přístroji způsobí stejnou výchylku jako proudový impulz ČV. Nejedná se ale o množství náboje působícího lokálně v místě výboje, který nemůže být měřen přímo. Zdánlivý náboj se obvykle vyjadřuje v pikocoulombech (pC).
- **Četnost impulzů n** (pulse repetition rate n) vyjadřuje poměr mezi celkovým počtem impulzů ve vybraném časovém intervalu a dobou trvání tohoto intervalu. V praxi jsou přitom uvažovány pouze impulzy nad určitou úrovní, popřípadě v rámci předepsaného rozsahu.
- **Čas výskytu ČV a fázový úhel** (time occurrence and phase angle of a PD pulse) se vyjadřuje jako:

$$\varphi_i = 360 \frac{t_i}{T} \quad (2)$$

, kde t_i je čas mezi kladným průchodem zkušebního napětí nulou a impulzem ČV a T je perioda zkušebního napětí. Fázový úhel se vyjadřuje ve stupních ($^\circ$).

- **Střední proud částečných výbojů I** (average discharge current I) je odvozená veličina, která vyjadřuje součet absolutních hodnot jednotlivých zdánlivých nábojů q_i za daný časový interval T_{ref} .

$$I = \frac{1}{T_{ref}} (|q_1| + |q_2| + \dots + |q_i|) \quad (3)$$

Obecně se vyjadřuje v ampérech (A) nebo coulombech za sekundu (C/s).

- **Výkon částečných výbojů P** (discharge power P) je odvozená veličina vyjadřující střední výkon impulzu způsobený hodnotami zdánlivého výboje q_i za určitý čas T_{ref} .

$$P = \frac{1}{T_{ref}}(q_1 u_1 + q_2 u_2 + \dots + q_i u_i) \quad (4)$$

, kde u_1, u_2, \dots, u_i představují okamžité hodnoty napětí v okamžicích výskytu zdánlivého náboje q_i , přičemž záleží na znaménkách jednotlivých hodnot. Výkon ČV se vyjadřuje ve wattech (W).

- **Střední kvadratický součet D** (quadratic rate D) je součet ploch jednotlivých úrovní zdánlivého náboje q_i během daného časového úseku T_{ref} .

$$D = \frac{1}{T_{ref}}(q_1^2 + q_2^2 + \dots + q_i^2) \quad (5)$$

Jedná se o odvozenou veličinu vyjádřenou v (coulombech)² za sekundu (C²/s).

- **Počáteční napětí ČV U_i** (PD inception voltage U_i) je takové přiložené napětí, při kterém jsou poprvé pozorovány částečné výboje, pokud napětí postupně zvyšujeme z nižší hodnoty, při které nejsou pozorovány žádné částečné výboje. V praxi toto napětí představuje nejnižší přiloženou hodnotu napětí, při kterém úroveň impulzu ČV převyšuje předepsanou nejnižší hodnotu.
- **Zhášecí napětí ČV U_e** (PD extinction voltage U_e) je přiložené napětí, při kterém se ve zkuškovém objektu přestávají objevovat opakující se částečné výboje, pokud napětí postupně snižujeme z vyšší hodnoty, při které jsou částečné výboje pozorovány. V praxi zhášecí napětí představuje nejnižší hodnotu napětí, při kterém je hodnota impulzu ČV nižší než nejnižší předepsaná hodnota.

3.4 Způsoby měření částečných výbojů

Metody pro měření částečných výbojů lze podle přístupu rozdělit do dvou skupin, konvenční a nekonvenční metody [9], [16]:

- **Konvenční (galvanická) metoda** je jednou z neúčinnějších metod a je definována normou ČSN EN 60270. Tato norma definuje také frekvenční pásmo pro měření. Měřicí obvod se skládá z vazebního kondenzátoru, vstupní impedance, filtru a měřicího přístroje. Před měřením každého nového zařízení je nutná kalibrace. Touto metodou je možné sledovat velikost a četnost výbojů a vykreslit fázové rozložení částečných výbojů PRPD (Phase Resolved Partial Discharge). Vzorec PRPD překrývá sinusoidu napětí s velikostí a četností výbojů a můžeme díky němu určit druh výbojové činnosti. Díky kalibraci jsme schopni měřit zdánlivý náboj q .
- **Nekonvenční metody** jsou založeny na principu měření ostatních jevů provázející výbojovou činnost. Jedná se o metody optické, akustické, elektromagnetické a chemické. Obvody měřené tímto způsobem nelze kalibrovat, proto těmito metodami nelze zjistit zdánlivý náboj ČV. Tyto metody jsou vhodné především pro nepřetržitý monitoring, při kterém sledujeme vývoj výbojové činnosti v čase.

4 Systém sběru a přenosu dat v průmyslové diagnostice

Systém sběru a přenosu dat v průmyslových sítích je klíčovou součástí diagnostického systému. Jedná se o komunikační kanál mezi senzory diagnostikovaného stroje a zařízeními, která dále zpracovávají a ukládají naměřená data. Jsou na něj kladeny vysoké nároky na přenosové rychlosti, rychlosti zpracování a odolnosti vůči rušivému okolí. V současné době existuje celá řada možností sběru, přenosu a zpracování dat.

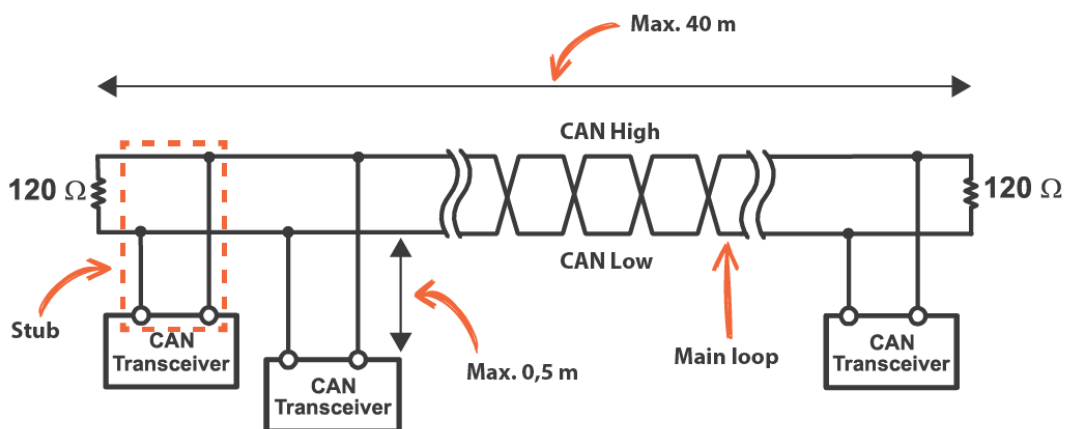
4.1 RS-485

RS-485 je standardem sériové sběrnice využívaným v současné době především v průmyslu. Jedná se o sériovou datovou komunikaci po dvou vodičovém stíněném kabelu (twisted pair) [17]. Jednotlivé logické stavy zde prezentuje rozdíl napětí mezi těmito dvěma vodiči [17]. Jednotlivé vodiče jsou označeny A/B, popřípadě $-/+$ [17]. Vodič A ($-$) se označuje jako tzv. invertovaný a vodič B ($+$) jako neinvertovaný [17]. Pokud je napěťový rozdíl $A-B$ menší než $-0,3$ V, jedná se o logický stav 1 [17]. V opačném případě, tedy $A-B$ je větší než $+0,3$ V, se jedná o logický stav 0 [17]. Tento přenos pomocí rozdílového napětí eliminuje vliv naindukovaného napětí, jelikož se na obou vodičích naindukují stejná napětí [17]. Vysílač by měl na výstupu generovat napětí ± 2 V a přijímač by měl být schopný rozlišit úroveň $\pm 0,2$ V [17]. Pomocí tohoto standardu je možné spojit až 32 zařízení a komunikovat po kabelu na vzdálenost až 1200 m [17]. Standard RS-485 využívají pro svoji komunikaci např. průmyslové sběrnice Profibus či Interbus [17].

4.2 CAN bus

Sběrnice CAN (Controller Area Network) je vnitřní komunikační síť senzorů a funkčních jednotek pracujícím na principu podobnému peer-to-peer [18]. Původně byla tato síť vyvíjena pro automobilovou diagnostiku, ale v současné době se uplatňuje i v průmyslové diagnostice a automatizaci [18]. Jedná se o sběrnice systém umožňující efektivní decentralizované řízení v reálném čase s důrazem na vysokou spolehlivost a s rychlostí přenosu dat až 1 Mbit/s, přičemž maximální rychlost je dosažena při délce spojení do 40 m, při komunikaci na delší vzdálenost se rychlost značně snižuje [18]. Pro přenos dat je zapotřebí alespoň dvou vodičový kabel (vodiče CAN_H a CAN_L) a nejčastěji použité konektory jsou 9pin D-SUB [18]. Sběrnice je ukončena rezistorem o velikosti 120Ω [19].

Napětí na vodiči CAN_H se pohybuje v rozmezí 2,5-3,5 V a napětí na vodiči CAN_L mezi 1,5-2,5 V [19]. Aplikační vrstva protokolu CAN je definována několika standardy (např. CAN Open, CAN Kingdom, Device Net) [18].



Obrázek 3: Schéma CAN-Bus sběrnice [19]

4.3 ProfiBus

ProfiBus (Process Field Bus) je průmyslová sběrnice založena právě na komunikačním protokolu RS-485, využívající otevřeného komunikačního protokolu ISO/OSI, která spojuje jednotlivé prvky sítě lineárně za sebe, popřípadě do hvězdice [20]. Nejčastější je lineární spojení, které je zakončené tzv. zapnutými odpory [21]. Tato síť je tvořena segmenty, do kterých jsou jednotlivá zařízení připojena. Do jednoho segmentu sítě je možno zapojit až 32 zařízení, přičemž maximální počet spojených segmentů je 9 [20]. Přenosová rychlost sítě je až 12 Mbit/s, ale při spojení delším než 100 m rychlost klesá [20]. Standardním kabelem je kroucená stíněná dvojlinka zakončená konektorem M12, ale lze použít i optického kabelu (komunikace na vzdálenost 80 km) pomocí vhodných převodníků. Jednou z možností je také bezdrátové spojení [21].

4.4 ProfiNet

ProfiNet je průmyslová komunikační sběrnice založená na principu standardu Ethernet (IEEE 802.3) [21]. Topologie sítě může být hvězdicová, sběrnice, stromová nebo kruhová, přičemž v praxi bývají tyto topologie různě propojeny [21]. Pro přenos se využívá metalické spojení měděným vodičem (twisted pair) s maximální délkou segmentu 100 m a konektory

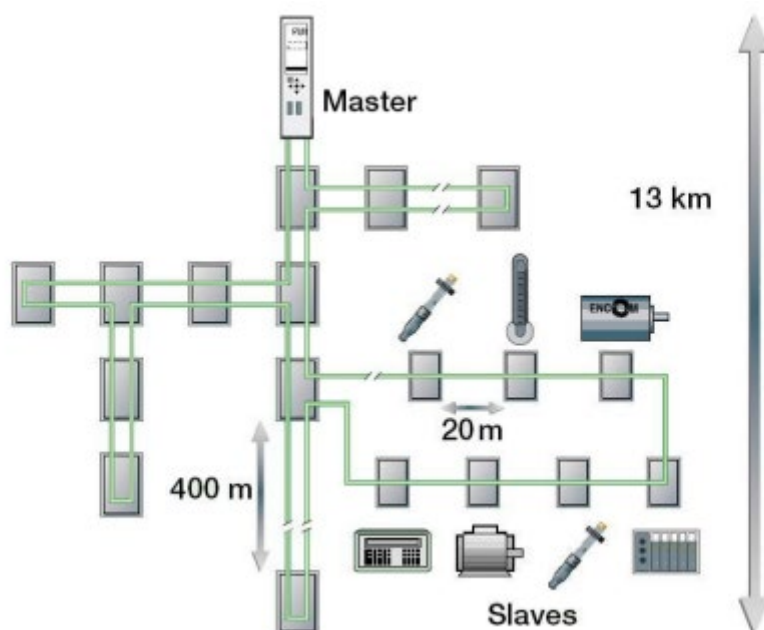
typu RJ45, popřípadě kulatými konektory M12 [21]. Komunikace dosahuje rychlosti 100 Mbit/s (Fast Ethernet), nebo až 1 Gbit/s a vyšší [21]. Je možné využít i komunikaci pomocí optických kabelů, kde je maximální délka spojení až 14 km. Další možností je také bezdrátové spojení Wi-Fi či Bluetooth [21].

4.5 AS-Interface (AS-i)

AS – Interface (Actuator Sensor Interface) je standardem pro nejnižší úroveň a umožňuje připojení jednoduchých akčních členů a senzorů od různých výrobců do sítě pomocí jedné sériové linky [22]. Síť má otevřenou strukturu pro ostatní nadřazené úrovně. Je kompatibilní s fieldbus sítěmi, jako např. ProfiBus, InterBus, DeviceNet, a průmyslovou Ethernet sítí [22]. Sběrnice je typu Master-Slave, tedy umožňuje připojení jednoho zařízení typu Master, ostatní zařízení jsou typu Slave. Do sítě je možno připojit až 62 zařízení typu Slave [22]. Tento systém umožňuje také přenos komunikačních dat a napájení senzoru v jednom kabelu. Napájení má hodnotu stejnosměrného napětí 24 V [22]. Spojení je zajištěno dvoužilovým nestíněným nekrouceným kabelem, který je schopný přenášet data i napájení zároveň. Délka jedné větve sítě může být až 100 m, popřípadě delší v případě použití opakovačů [22].

4.6 InterBus

Jedná se o otevřenou standardizovanou průmyslovou sběrnici sloužící ke spojení senzorů, akčních členů a řídicích zařízení. Komunikace probíhá přes dvou vodičové vedení podle standardu RS-485 s rychlostí až 500 kbit/s [23]. Délka mezi spojenými jednotkami může být až 400 m, popřípadě 3,6 km při použití optických vláken [23]. Maximální délka celé sítě je 13 km [23]. Komunikace je typu master/slave, přičemž je možno připojit až 4096 slave jednotek [23]. Síť InterBus je kruhové topologie, tudíž není nutné síť zakončovat na konci větve [23].



Obrázek 4: Schéma systému sběrnice InterBus [23]

4.7 ModBus

Modbus je otevřený protokol umožňující komunikaci průmyslových zařízení po různých sítích a sériových sběrnících [20]. Jedná se o jednoduchý a snadno implementovatelný protokol nezávislý na výrobci [24]. Komunikace funguje na principu master/slave nebo klient/server [24]. Díky jeho otevřenosti může komunikace probíhat přes Ethernet (TCP/IP), sériovou sběrnici (RS-485, optické vlákno, rádiový přenos), nebo přes vysokorychlostní síť Modbus plus [20].

4.8 Shrnutí

Při výběru použitého komunikačního kanálu pro diagnostický systém je třeba brát v úvahu veškeré parametry, které požadujeme. Ať už se jedná o rychlost, vzdálenost a druh přenosu, odolnost vůči okolnímu rušení, kompatibilita s použitými senzory a diagnostickým zařízením, způsobem napájení, a v neposlední řadě také finanční nákladnost.

Sběrnice CAN Bus byla primárně vyvíjena pro použití v automobilovém průmyslu a je zde kladen důraz především na bezpečnost komunikace [18]. Nehodí se ovšem pro komunikaci na delší vzdálenosti, jelikož při komunikaci na více jak 40 m klesá její maximální rychlost (1 Mbit/s) [18].

Sběrnice ProfiBus a **ProfiNet** jsou od stejného výrobce a jejich použití se dá snadno kombinovat. **ProfiBus** využívá protokolu RS-485 s maximální rychlostí 12 Mbit/s, je možný

bezdrátový přenos i přenos na velké vzdálenosti za použití optických kabelů [21]. Princip jeho komunikace je master/slave a hodí se především pro nižší úroveň. Oproti tomu **ProfiNet** využívá průmyslový Ethernet, jehož rychlost může být až 1 Gbit/s a vyšší [20]. Je možné kombinovat metalický, optický, ale také bezdrátový přenos (Wi-Fi, Bluetooth) [21]. Pracuje na principu klient/server [20]. Jeho výhodou je také neomezené množství adresovaných zařízení.

AS – Interface je určen pro nejnižší úroveň (připojení senzorů a jednoduchých akčních členů) a je možná jeho kombinace s ostatními sběrnici [22]. Mezi jeho hlavní výhody patří především kombinace napájení a přenosu signálu do jednoho dvou vodičového vedení.

InterBus je standardizovaná průmyslovou sběrnici, jejíž přenos probíhá přes dvou vodičové vedení RS-485 s relativně malou rychlostí 500 kbit/s ve srovnání s ostatními sběrnici [23]. Její výhodou je ale komunikace na větší vzdálenosti mezi zařízeními i za pomoci optických kabelů. Jedná se o kruhovou síť, kde odpadá nutnost zakončování.

ModBus je v současné době velmi rozšířený protokol umožňující komunikaci po různých sítích a průmyslových sběrnici [24]. Jeho výhodou je především univerzálnost použití a snadná implementace do již existujících sítí.

5 Nabízená řešení pro on-line monitoring částečných výbojů na trhu

Firem nabízející možnosti pro on-line diagnostiku různých VN zařízení je v současné době na trhu celá řada. V této kapitole budou vybrané firmy představeny a srovnány jejich aktuálně nabízené produkty pro on-line monitoring částečných výbojů.

5.1 PD Service

Power Diagnostic Service Co., LTD. (PDS) je společnost specializující se na údržbu a diagnostiku energetických systémů, založena v roce 1990 [25]. Své pobočky má např. ve Švýcarsku, USA, Taiwanu, Singapuru, Číně, či v Koreji, ale spolupracuje se svými partnery i v jiných státech [25]. V současné době se stará o monitoring více než 15 000 zařízení po celém světě a nabízí řešení pro diagnostiku VN kabelů, točivých strojů, transformátorů a vypínačů [25]. Pro měření částečných výbojů nabízí pouze nekonvenční metody akustické a elektromagnetické [25].

5.1.1 PDSimply

PDSimply je diagnostický systém pro nepřetržité monitorování částečných výbojů vhodný pro většinu VN zařízení. Jedná se o kompaktní zařízení (250x164x53 mm) v hliníkovém pouzdře, které umožňuje připojení až 6 kanálů z kompatibilních senzorů [25]. O napájení se stará konektor IEC C14 pro připojení AC 85–264 V, 50/60 Hz, 15 W [25]. Pro komunikaci s místním PC je možné využít micro USB či USB, pro vzdálený přístup přes WAN pak konektor RJ45 [25]. Pro připojení SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) systémů, které slouží pro dispečerský dohled, je zde 5 bezpotenciálových výstupních terminálů s nastavitelnou funkcí [25]. Systém obsahuje také flash paměť o velikosti 512 MB, což by mělo zajistit až 6 měsíců záznamu trendu výbojové činnosti [25].

Frekvenční rozsah měření je 50–900 MHz pro UHF verzi a 1,5–2000 MHz pro tzv. full band verzi. Integrovaný filtr tlumí frekvence menší než 50 MHz [25].



Obrázek 5: Zařízení PDSimply [25]

5.1.2 PDS senzory

Pro připojení k PDSimply společnost nabízí pro detekci částečných výbojů senzory akustické a UHF senzory [25]. Pro aplikaci na točivé stroje je to především TM (transient magnetic) senzor upevňující se na kabelové koncovky stroje [25]. Tento senzor by podle výrobce měl být schopný odhalit všechny druhy částečných výbojů, tedy vnější, vnitřní i korónové [25].

5.1.3 PDS software

Samotné zařízení PDSimply je vybaveno softwarem, který umožňuje provoz v samostatné režimu i v režimu monitoringu na vzdáleném PC [25]. Software je schopný měřit a zaznamenávat velikost a četnost pulzů a vykreslovat vzorec PRPD. PDSimply obsahuje také tzv. PDS signature Smart Algorithm, který by měl do jisté míry eliminovat falešná data ze senzorů [25].

5.2 Power Diagnoststic Instrument Company

Tato společnost nabízí téměř totožné produkty pro monitoring částečných výbojů jako PD Service pod vlastním názvem. Na rozdíl od PD Service ale nabízí i konvenční metody měření za použití vazebních kondenzátorů o kapacitě 80 pF a 1000 pF [26].

5.3 Sparks Instruments

Sparks Instruments SA je švýcarská společnost vyrábějící senzory, kompletní diagnostické systémy a nabízející služby pro diagnostiku a on-line monitoring VN generátorů, motorů, transformátorů, kabelů a rozvodů [27]. Firma působí v zastoupení po celém světě včetně ČR [27]. Pro měření částečných výbojů společnost nabízí konvenční metodu měření s použitím vazebních kondenzátorů i nekonvenční metodu za použití vysokofrekvenčních proudových transformátorů umístěných na uzemnění přepět'ových kondenzátorů stroje [27]. V ČR výrobky této firmy nabízí společnost PROFESS, spol. s r.o. [27].

5.3.1 TMS

Pro diagnostický systém nabízí společnost několik zařízení pro monitoring částečných výbojů, jsou to: TMS-5041, TMS-5141 a TMS-6141 [27]. Poslední zmíněné je kompaktní zařízení s dotykovým displejem hodící se spíše jako přenosná diagnostika bez nutnosti připojení k PC [27]. Zbylá dvě zařízení slouží pro nepřetržitý monitoring a mohou být ve verzi pro umístění do 19" rack slotu, nebo pro venkovní umístění na zeď s krytím IP65 [27]. Zařízení TMS-5041 může být umístěno také na DIN lištu [27].

Zařízení TMS-5141 nabízí nejvíce funkcí, mezi které patří simultánní 4 kanálové měření skrze BNC konektory pro připojení vazebních kondenzátorů pro každou fázi stroje, popřípadě přídavného vazebního kondenzátoru připojeného na N svorku stroje [27]. Dále zařízení obsahuje 8x 4-20 mA externích vstupů (např. senzory teploty) a vstup pro referenční síťové napětí [27]. O napájení se stará terminál pro připojení 20 W DC 18-36 V nebo AC 90-264 V [27]. Mezi výstupy patří 100 Mbit Ethernet pro připojení k počítačové síti, RS-485 pro komunikaci se SCADA systémy, 4x 4-20 mA a 5x bezpotenciálových výstupů s nastavitelnými funkcemi [27]. Na zařízení je také 4,3" dotykový displej pro nastavení a lokální měření bez připojeného PC [27].

Rozsah pro měření lze nastavit integrovaným LP filtrem 40 kHz-5 MHz a HP filtrem 0,8-300 MHz [27].



Obrázek 6: Zařízení TMS-5141W ve verzi pro umístění na zed' [27]

5.3.2 Sparks Instruments senzory

Pro měření pomocí vazebního kondenzátoru nabízí společnost řadu měřících kondenzátorů o kapacitě 80 pF nebo 1000 pF pro jmenovitá napětí 7-24 kV [27]. Pro nekonvenční metodu měření nabízí vysokofrekvenční proudové transformátory pro připojení na kabely o průměru 17-50 mm [27].

5.4 IRIS Power

Společnost IRIS Power, založena v roce 1990, nabízí celou řadu senzorů a diagnostických a testovacích přístrojů pro motory, generátory, transformátory a rozvodny v energetickém průmyslu po celém světě [13]. V roce 2010 získala IRIS Power společnost Qualitrol Corp a rozšířila tak své portfolio o diagnostické systémy pro pravidelný či nepřetržitý monitoring [13]. V ČR nabízí tyto produkty společnost TECTRA a.s.. Pro měření částečných výbojů využívá vlastních vazebních kondenzátorů, popřípadě anténních snímačů SSC (Stator Slot Coupler) [13].

5.4.1 Guard II+

Iris Power Guard II+ je diagnostické zařízení umožňující on-line monitoring částečných výbojů, magnetického toku rotoru, vibrací čel vinutí a sledování napětí a proudu rotoru pro VN motory a generátory [13]. Jedná se o multifunkční diagnostický přístroj schopný kombinovat až tři různé diagnostické metody v jednom. Mimo vzdálený monitoring přes PC umožňuje také lokální měření díky zabudovanému dotykovému displeji [13].



Obrázek 7: Zařízení Guard II+ [13]

5.4.2 IRIS senzory

Pro měření menších strojů nabízí společnost vlastní kapacitní snímače EMC (Epoxy Mica Capacitor) s kapacitou 80 pF dostupné pro jmenovitá napětí 6,9 – 35 kV a poskytuje na ně doživotní záruku [13]. Pro nízkofrekvenční monitoring nabízí vazební kondenzátory s kapacitou 1000 pF pro jmenovitá napětí 7, 15, 20 a 30 kV [13]. Pro velké turbogenerátory a stroje chlazené vodíkem jsou pak určeny anténní snímače SSC (Stator Slot Coupler), které se umísťují přímo do statorových drážek a umožňují provádět nekonvenční metodu monitoringu [13]. Tyto snímače jsou vyrobeny z epoxidového skleněného laminátu a neměly by mít žádný vliv na provoz zařízení [13]. Jejich frekvenční rozsah pro měření činí 10–1000 MHz [13].



Obrázek 8: Anténní snímače SSC [13]

5.4.3 Software IRIS

Iris Application Manager (IAM) je software pro PC umožňující konfiguraci diagnostického systému a samotný monitoring zařízení zahrnující zobrazení a ukládání naměřených dat částečných výbojů a jiných sledovaných diagnostických veličin [13]. Výhodou je kombinace různých diagnostických metod do jednoho systému.

6 Shrnutí nabízených řešení

V této kapitole budou shrnuty hlavní vlastnosti výše popsaných systémů vybraných firem.

6.1 PD Service

PD Service se zaměřuje pouze na nekonvenční metody akustické a elektromagnetické pro monitoring částečných výbojů [25]. Výhodou tohoto řešení může být snadná instalace diagnostického systému včetně nižších finančních nákladů. Nabízené elektromagnetické senzory umožňují instalaci na zařízení bez jakékoliv demontáže a nutnosti kalibrace. Na druhou stranu schopnost rozlišit určitý druh výbojů a jejich lokalizace může být značně omezena.

6.2 Power Diagnostic Instrument Company

Tato společnost rozšiřuje nabídku PD Service také o nekonvenční metody pro měření, popřípadě je možná kombinace obou metod [26]. Jedná se o totožný diagnostický systém s relativně snadnou instalací a kompaktními rozměry, který mimo nepřetržitého monitoringu nabízí také možnost přenositelnosti systému. Kvůli absenci displeje umožňuje zobrazení pouze přes PC, ale díky integrovanému úložišti je schopný zaznamenávat data až 6 měsíců bez připojeného PC [26].

6.3 Sparks Instruments

Diagnostický systém společnosti Sparks Instruments se zaměřuje především na konvenční metodu měření, ale nabízí možnosti i pro nekonvenční měření. Jedná se o pevně instalované zařízení, které díky integrovanému displeji umožňuje mimo vzdáleného monitorování i lokální zobrazení diagnostických veličin na zařízení [27].

6.4 IRIS Power

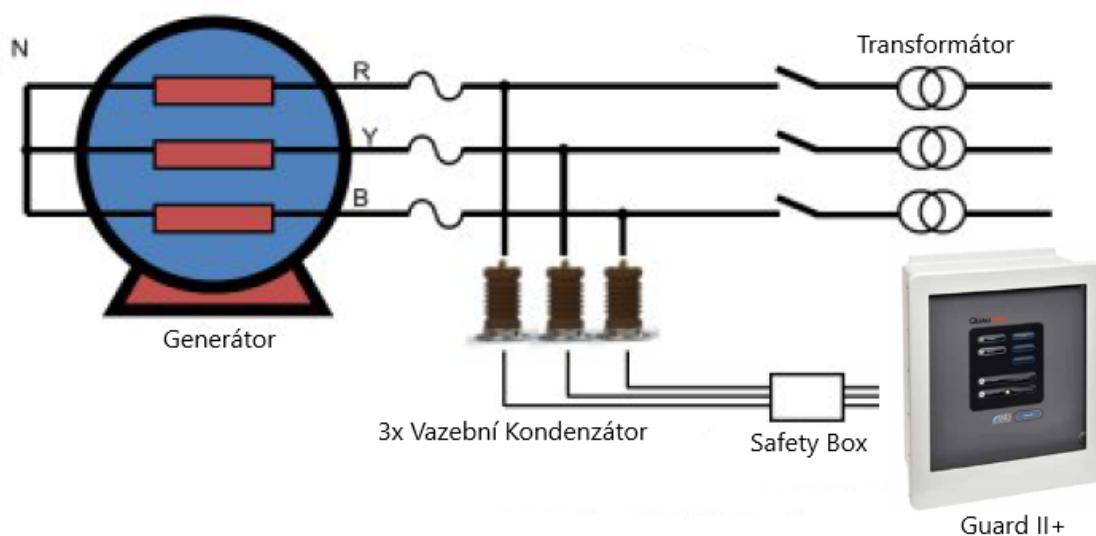
IRIS Power kombinuje ve svém diagnostickém systému data naměřená z více druhů diagnostického monitoringu, na které se tato společnost také zaměřuje. Pro monitoring částečných výbojů nabízí jak konvenční metody, založené mimo jiné na vlastních EMC vazebních kondenzátorech, tak metody nekonvenční za pomoci drážkových snímačů SSC [13].

7 Návrh řešení pro konkrétní zařízení

Jako zařízení pro konkrétní návrh diagnostického systému jsem vybral fiktivní vysokonapěťový generátor o výkonu 25MW a jmenovitém napětí 15 kV. Tento generátor je třífázový, pracující na frekvenci 50 Hz.

7.1 Monitoring částečných výbojů

Pro monitoring částečných výbojů jsem zvolil produkty výše zmíněné společnosti IRIS Power. Pro konvenční metodu měření se systém skládá ze 3 vazebních kondenzátorů EMC o kapacitě 80 pF pro každou fázi stroje, je ale doporučeno použít čtvrtého vazebního kondenzátoru také pro nulovou svorku zařízení. Vazební kondenzátory jsou spojeny s diagnostickým zařízením Guard II+ pomocí koaxiálních kabelů a konektorů BNC. Kvůli bezpečnosti a ochraně diagnostického zařízení je zde umístěn tzv. safety box.

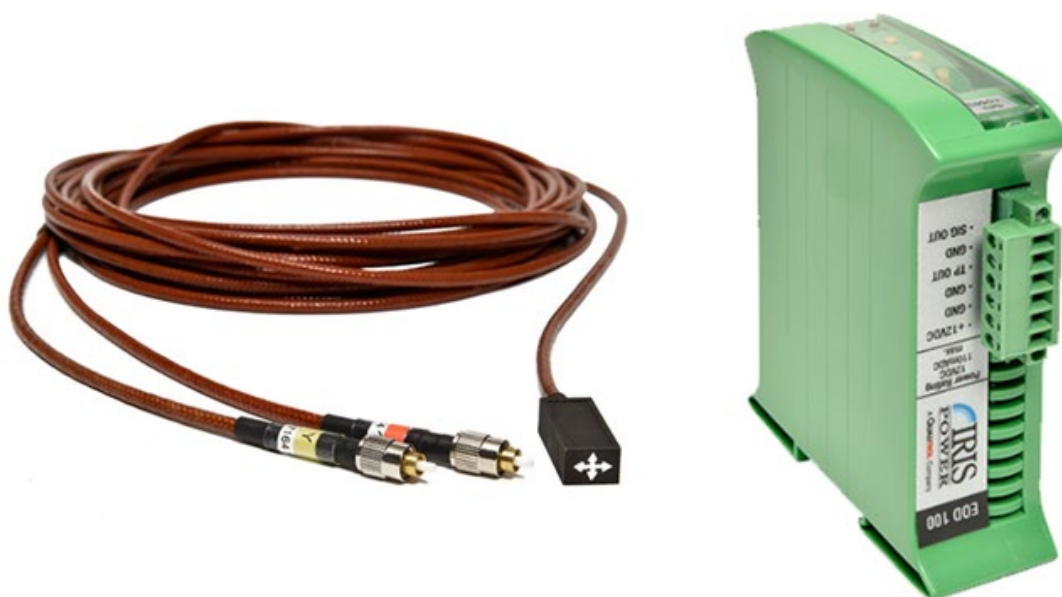


Obrázek 9: Schéma zapojení pro monitoring částečných výbojů [12], [13]

Diagnostické zařízení Guard II+ je schopno nepřetržitého monitoringu a komunikace se vzdáleným PC přes počítačovou síť Ethernet. Na PC pomocí příslušného softwaru IAM dochází k ukládání, vizualizaci a dalšímu zpracování naměřených dat.

7.2 Monitoring vibrací konců čel vinutí

Pro sledování vibrací konců čel vinutí jsem zvolil snímače EVA II od stejného výrobce. Výhodou tohoto řešení je spojení obou diagnostických metod do jednoho diagnostického zařízení. Snímače EVA II jsou dvouosé optické senzory s citlivostí 100 mV/g a frekvenčním rozsahem 5-1000 Hz, délka přívodního optického kabelu je 10 m [13]. Lze je připojit do diagnostického zařízení Guard II+ přes příslušný opticko-elektrický modul.



Obrázek 10: Dvouosý snímač vibrací EVA II a opticko-elektrický modul EOD [13]

Obdobně jako u monitoringu částečných výbojů jsou zde naměřená data přenášena přes diagnostické zařízení Guard II+ do vzdáleného PC. Zde jsou pak data následně zpracována a uchována.

7.3 Shrnutí

Pro monitoring jsem volil zařízení od stejného výrobce, a to především z důvodu použití jednoho zařízení pro více metod diagnostiky. Diagnostické zařízení Guard II+ je schopno kombinovat až 3 různé metody diagnostiky. Je zde tedy ještě prostor rozšířit monitoring o další metodu.

Zhodnocení a závěr

Monitoring VN zařízení sebou nese celou řadu výhod, ať už se jedná o lepší plánování údržby, nebo zlepšení bezpečnosti provozu. Finanční výdaje na nečekanou poruchu daného zařízení mohou být obrovské a vhodně zvolený diagnostický systém by měl být schopný odhalit blížící se poruchy již v jejich počátku. Diagnostické systémy navíc mohou pracovat zcela autonomně a není vyžadován jakýkoliv personál pro jejich obsluhu.

Na druhou stranu vytvoření vhodného a funkčního diagnostického systému bývá nelehký úkol a je zde potřeba určité znalosti nejen daného zařízení, ale také použitých diagnostických systémů, vhodných snímačů a systémů sběru dat v průmyslových sítích. Také finanční náklady na pořízení diagnostického systému mohou být velké.

V současné době je na trhu celá řada společností nabízejících diagnostické systémy. Přestože jejich hlavní vlastnosti a rozdíly byly v této práci popsány, pro vhodné zhodnocení by bylo třeba provést jejich detailnější rozbor, popřípadě uskutečnit praktická měření.

V závěru práce bylo stručně popsáno jedno z možných řešení monitoringu částečných výbojů a vibrací pro konkrétní zařízení. Zvolil jsem zařízení a senzory od jednoho výrobce kvůli zaručené kompatibilitě a jednoduchosti celého diagnostického systému.

Literatura

- [1] MENTLÍK, V.; PIHERA, J.; POLANSKÝ, R.; PROSR, P.; TRNKA, P. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. Praha: BEN – technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [2] KREIDL, M.; ŠMÍD, R. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 1. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-158-6.
- [3] BULUŠEK, Petr. *Diagnostika asynchronního motoru s ohledem na jeho údržbu a spolehlivost*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky.
- [4] KOŽANT, Martin. *Online měřicí systém částečných výbojů*. Plzeň, 2020. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická.
- [5] STONE, C. Greg; BOULTER, A. Edward; CULBERT, Ian; DHIRANI, Hussein. *Electrical insulation for rotating machines*. Piscataway: IEEE Press, 2004. ISBN 0-471-44506-1.
- [6] ZÁŘECKÝ, Tomáš. *Online diagnostika obráběcích strojů*. Brno, 2020. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [7] BLATA, Jan; JURASZEK, Janusz. *Metody technické diagnostiky: teorie a praxe*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-2997-5.
- [8] MARTINEK, Radislav. *Senzory v průmyslové praxi*. Praha: BEN – technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-114-4.
- [9] HUBÁČEK, Jaroslav. *Nekonvenční metody sledování částečných výbojů*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická.
- [10] FORMÁNEK, Josef. *Výukové texty: Základní charakteristika a demonstrování základních principů měření veličin*. [online]. [cit. 13. 2. 2023]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~formanek/mmvvyuka/Data/ivk-mt-soubory/01-F.pdf>
- [11] *Automa: časopis pro automatizační techniku*. Praha: FCC Public, 1994-. ISSN 1210-9592.
- [12] *Direct Industry*. [online]. ©2023 [cit. 4. 4. 2023]. Dostupné z: <https://www.directindustry.com/>
- [13] *IRIS Power*. [online]. IRIS Power ©2017 [cit. 12. 4. 2023]. Dostupné z: <https://irispower.com/>

- [14] MEDEK, Petr. Monitoring částečných výbojů pro včasnou diagnostiku elektrických zařízení. *Elektro* [online]. 12/2021 [cit. 9. 4. 2023]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/clanek/monitoring-castecnych-vyboju-pro-vcasnou-diagnostiku-elektrickyh-zarizeni--6065>
- [15] ČSN EN 60270. *Technika zkoušek vysokým napětím – Měření částečných výbojů*. Český normalizační institut, 2001.
- [16] NYBECK, Charles. Odpovědi na nejčastější otázky z problematiky měření částečných výbojů. *Megger* [online]. 29. 10. 2021 [cit. 9. 4. 2023]. Dostupné z: <https://cz.megger.com/electrical-tester/october-2021/odpovedi-na-nejcastejsi-otazky-z-problematiky-mere>
- [17] VOJÁČEK, Antonín. Základní informace o RS-485 a RS-422 pro každého. *Automatizace* [online]. 14. 7. 2007 [cit. 9. 4. 2023]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/zakladni-informace-o-rs-485-rs-422-pro-kazdeho>
- [18] ŠPONAR, Radek. Vlastnosti a užití průmyslových sběrnic. *Elektrorevue* [online]. 5.4.2004 [cit. 21. 3. 2023]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/04019/index.html#kap1>
- [19] ALFERINK, Timon. Practical tips: CAN-Bus. *KMP Drivetrain Solutions* [online]. [cit. 27. 4. 2023]. Dostupné z: <https://www.kmpdrivetrain.com/paddleshift/practical-tips-can-bus/>
- [20] Průmyslová sběrnice Profibus. *vyvoj.hw.cz*. [online]. 17. 1. 2004 [cit. 11. 4. 2023]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/rozhrani/prumyslova-sbernice-profibus.html>
- [21] *Profibus-Profinet*. [online]. FOXON s.r.o. ©2017 [cit. 11. 4. 2023]. Dostupné z: <https://www.profibus-profinet.cz/>
- [22] Průmyslová sběrnice AS-Interface. *Automa*. [online]. [cit. 11. 4. 2023]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/prumyslova-sbernice-as-interface-2001_02_33464_2573/
- [23] VOJÁČEK, Antonín. Úvod do INTERBUS Fieldbus. *Automatizace* [online]. 3. 3. 2005 [cit. 27. 4. 2023]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2005030301>
- [24] Průmyslové sběrnice Modbus a Profibus (vlastnosti a vývoj). *Studentino.cz* [online]. 22. 8. 2018 [cit. 27. 4. 2023]. Dostupné z: <https://www.studentino.cz/ss/aut/prumyslove-sbernice-modbus-a-profibus-vlastnosti-a-vyvoj-21759-p2.html>

- [25] *PDSservice*. [online]. PDS ©2021 [cit. 4. 4. 2023]. Dostupné z: <https://www.pdservice.com/>
- [26] *PDiC*. [online]. Power Diagnostic Instrument Company ©2018 [cit. 9. 4. 2023]. Dostupné z: <https://pdicus.com/>
- [27] *Sparks Instruments*. [online]. Sparks Instruments SA [cit. 4. 4. 2023]. Dostupné z: <https://sparksinstruments.com/>