

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**  
**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Měřicí systémy nepřímého fakturačního měření**

Vedoucí práce:

Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.

2014

Autor:

Pavel Polívka

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel POLÍVKA**  
Osobní číslo: **E11B0073K**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Měřicí systémy nepřímého fakturačního měření**  
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

### Zásady pro vypracování:

1. Uveďte normy a právní předpisy stanovující požadavky na měřicí systémy fakturačního měření v ČR.
2. Popište měřicí systémy fakturačního měření pro napěťové hladiny NN, VN, VVN.
3. Uveďte přehled, princip a provedení nejčastěji používaných typů elektroměrů a měřících transformátorů pro fakturační měřicí systémy.
4. Analyzujte poruchy měřicí soupravy.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

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

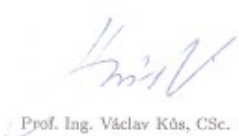
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2013**

Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2014**

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

**Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na měřicí systémy nepřímého fakturačního měření elektrické energie v distribučních soustavách pro napěťové hladiny nn, vn a vvn. V práci je uveden přehled legislativních a technických norem stanovující požadavky na fakturační měření, přehled systémů pro měření, princip a provedení elektroměrů a měřících transformátorů. V práci je také uvedena stručná analýza poruchových stavů vzniklých instalací a provozem měřicí soupravy.

**Klíčová slova**

Měřicí systém, indukční elektroměr, statický elektroměr, přístrojový transformátor, polopřímé měření, nepřímé měření.

**Abstract**

The thesis focuses on measuring the billing transformer measuring of electrical energy in distribution system for high and low level voltage. The thesis gives an overview of legislation and technical standards that prescribe the requirements on billing measurement. It also summarizes main principles and implementation of meters and measuring transformers. At the same time, there is a brief analysis of failure modes resulting from the operation of measuring kit.

**Key words**

Measuring system, induction meter, static meter, instrument transformer, transformer measuring.

## Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a parametrů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

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

.....

podpis

V Plzni dne 6.6.2014

Pavel Polívka

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Janě Jiříčkové Ph.D za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

**Obsah**

1	Úvod.....	9
2	Normy a právní předpisy .....	11
3	Fakturační měření.....	12
3.1	Druhy fakturačního měření.....	12
3.2	Vyhodnocení naměřené elektrické energie.....	13
4	Měření výkonu střídavého harmonického proudu v trojfázové soustavě .....	15
4.1	Metody měření výkonů v trojfázových soustavách s nulovým vodičem .....	15
4.2	Metody měření výkonů v trojfázových soustavách bez nulového vodiče.....	16
4.3	Měření výkonu s měřicími převodníky.....	18
5	Provedení a umístění měřicích systémů.....	20
5.1	Základní části nepřímých měřicích systémů .....	20
5.2	Měřicí systém pro OPM připojené z napěťové hladiny nn .....	21
5.3	Měřicí systém pro OPM připojené z napěťové hladiny vn a vvn .....	22
6	Přehled, provedení a princip základních typů nepřímých elektroměrů.....	25
6.1	Rozdělení elektroměrů.....	25
6.2	Provedení elektromechanických (indukčních) elektroměrů.....	26
6.3	Provedení statických (elektronických) elektroměrů .....	30
7	Přístrojové transformátory .....	35
7.1	Provedení přístrojových transformátorů .....	35
7.2	Princip činnosti přístrojového transformátoru .....	36
7.3	Pracovní režim měřicích transformátorů .....	37
7.4	Základní parametry měřicích transformátorů .....	38
8	Analýza poruch měřicí soupravy nepřímého měřicího systému .....	40
8.1	Analýza napěťového obvodu měřicí soupravy při poruše .....	40
8.2	Analýza proudového obvodu měřicí soupravy při poruše.....	45
9	Závěr .....	50
10	Použitá literatura .....	51
11	Přílohy.....	52

**Seznam symbolů a zkratek**

A	[kW/h]	činná elektrická energie
I	[A]	efektivní hodnota proudu
<b>I</b>	[A]	fázor proudu
i	[A]	okamžitá hodnota proudu
IS		informační systém
L1, L2, L3	(R, S, T)	označení fáze trojfázové soustavy
LP		zátěžový profil
MT		měřicí transformátor
MTP		měřicí transformátor proudu
MTN		měřicí transformátor napětí
M <sub>p</sub>	[Nm]	pohybový točivý moment
nn		nízké napětí
OPM		odběrné předací místo
OTE		operátor trhu s elektřinou OTE a.s.
p		převod, transformační poměr
P	[kW]	činný výkon
Q	[kVA]	jalový výkon
R	[kVAr]	jalová elektrická energie
T <sub>p</sub>	[-]	třída přesnosti
U	[V]	efektivní hodnota napětí
<b>U</b>	[V]	fázor napětí
u	[V]	okamžitá hodnota napětí
vn		vysoké napětí
vvn		velmi vysoké napětí
Φ	[Wb]	magnetický tok
φ	[°]	úhel fázového posuvu



## 1 Úvod

Požadavek na měření elektrické energie je neoddelitelně spojen s rozvojem všeobecného rozšíření výroby a využití elektrické energie. Zpočátku byly měřicí systémy osazovány jen v největších průmyslových podnicích. Postupem času se začala měřit odebraná elektřina i u menších odběratelů a domácností, jak se pro ně používání elektřiny stalo technicky a ekonomicky dostupné. Prvním podnětem, pro potřebu měřit vyrobené a spotřebované množství elektřiny, byl především ekonomický důvod. Ten tvořil pomyslnou váhu mezi náklady a ziskem spojeným s výrobou, rozvodem a spotřebou elektřiny. Se vzrůstajícími nároky na množství spotřebované elektřiny nejen průmyslových podniků, ale i domácností a s tím spojeným rozšířením a zatížením distribučních sítí, se k ekonomickým důvodům postupně přidávaly i důvody technické, využívající výsledky měření například ke stanovení celkového využití a bilance sítí, ke stanovení technického diagramu zatížení a k určení provozních technických i netechnických ztrát.

Konstrukce měřicích systémů jako i samotných elektroměrů využívaných pro fakturační (obchodní) měření se liší podle charakteru proudu měřené soustavy. Zpočátku se jednalo o stejnosměrné ampérhodinové elektroměry určené pro měření stejnosměrného proudu v dvou a troj vodičových soustavách [1]. V současnosti měření elektřiny v soustavách určených pro přenos střídavého proudu zajišťují jedno, dvoj a troj fázové střídavé wattahodinové (činné) a voltampérhodinové (jalové) elektroměry.

Nejpoužívanější princip indukčních elektroměrů předčil pro svoji konstrukční jednoduchost a provozní spolehlivost elektromotorické, elektrodynamické, elektromechanické a elektrochemické elektroměry, které stály na počátku rozvoje měřicích systémů. Princip indukčního elektroměru se uplatnil mimo činných a jalových elektroměrů také u speciálních konstrukcí průmyslových elektroměrů určených nejen pro záznam maxima výkonu, ale i pro jeho časový průběh [1].

Rozvoj polovodičových součástek a technologií digitálních měřicích přístrojů umožnil v nedávné minulosti rozvoj moderních elektronických elektroměrů. V současnosti elektronické elektroměry zaujímají nenahraditelné místo v oblasti fakturačního měření. Jejich konstrukce umožňující vícekvadrantní měření činné a jalové elektřiny jedním přístrojem. Splňují náročné požadavky na způsob měření, přesnost a přenos měřených údajů.

Uvolnění trhu s elektřinou přineslo do fakturačních systémů nové požadavky na rozšíření měřicích systémů především z pohledu přenosu, zpracování a předávání naměřených údajů v rámci jednotlivých subjektů volného trhu. Realizace těchto nových požadavků je neodmyslitelně spojená s vývojem a užitím výpočetní techniky a datových komunikačních systémů, jejichž základem stále zůstává měřicí systém.

V průmyslových aplikacích, kde hodnoty proudů a napětí nedovolují přímé připojení elektroměru k měřené soustavě, je měření realizováno prostřednictvím nepřímého měřicího systému. V těchto systémech jsou elektroměry připojovány do měřené soustavy prostřednictvím proudových, nebo proudových a napěťových převodníků.

Předkládaná bakalářská práce je svým obsahem právě zaměřena na aspekty nepřímo připojených měřicích systémů fakturačního měření. Přesně vymezené požadavky na

současné zřízení a provozování těchto měřicích systémů jsou stanovené na základě platných legislativních a technických norem, jejíž přehled je uveden v úvodní kapitole práce. Nejen s využitím těchto požadavků jsou v navazujících kapitolách popsány jednotlivé měřicí systémy včetně popisu principu měřicí metody a způsobu jejich instalace pro dané napěťové hladiny. Součástí práce je také přehled a provedení používaných typů elektroměrů a měřicích transformátorů tvořících nejdůležitější prvky měřicích systémů.

Na základě praktických zkušeností jsou v závěru bakalářské práce vybrány k analýze nejčastější příčiny možných poruch vzniklých provozem případně instalací popsaných nepřímo připojených měřicích systémů.

## 2 Normy a právní předpisy

V České Republice jsou pravidla stanovující požadavky na fakturační měření včetně předávání naměřených dat pro zúčtování elektřiny upraveny řadou legislativních norem a předpisů zakotvených v právním systému státu. Základní legislativní normou je Energetický zákon č.458/2000 Sb. upravující podmínky a výkon státní správy v energetických odvětvích. Zákon tak mimo jiné ukládá povinnosti provozovatelům distribučních a přenosových soustav zřizovat a provozovat tyto měřicí systémy v odběrných nebo předacích místech (OPM) připojených k dané distribuční nebo přenosové soustavě [2]. Konkrétní podmínky pro volbu měřicího systému a způsob měření jsou upraveny vyhláškou MPO č.82/2011Sb. ve znění pozdějších předpisů [3]. Požadované parametry měřících přístrojů zejména z pohledu přesnosti měření včetně způsobu ověření upravuje zákon O metrologii č. 505/1990 Sb. Ucelený seznam legislativních norem v podobě zákonů, vyhlášek a nařízeních vlády upravující obor fakturačního měření je uveden v Příloze Tabulka P1.

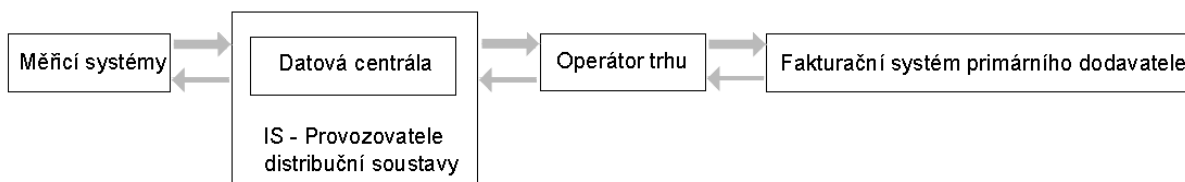
Technické provedení jednotlivých přístrojů, jejich instalace a připojení k sítím elektrické soustavy musí respektovat doporučení definovaná technickými normami z oblasti elektrotechniky a elektroenergetiky. Výčet nejdůležitějších technických norem je uvedený v Příloze Tabulka P2.

Požadavky vyplývající z těchto legislativních a technických norem jsou zohledněny provozovateli distribučních a přenosových soustav při stanovení vlastních pravidel provozování distribučních soustav, které schvaluje Energetický regulační úřad. Tímto dokumentem jsou v dané distribuční síti zadány podmínky pro připojení OPM včetně způsobu provedení měření elektrické energie pro účely fakturace odebrané a dodané elektrické energie [4].

### 3 Fakturační měření

Úkolem fakturačního měření je odpovídajícím způsobem získávat měřená data o množství odebrané nebo dodané činné a jalové elektřině včetně časového průběhu přenášeného výkonu. Následně naměřené údaje bezpečným způsobem předávat ve stanoveném tvaru oprávněným účastníkům volného trhu s elektřinou ke konečnému zúčtování [2][3].

Blokové schéma procesu uvedené na *Obr. 1* popisuje základní způsob přenosu naměřených dat v celém řetězci fakturačního systému od pořízení až ke konečnému zúčtování.



*Obr. 1* Blokové schéma předávání dat z fakturačního měření

Naměřená data jsou získávána prostřednictvím jednotlivých měřicích systémů přímo instalovaných v místech připojení konkrétních OPM. Základem měřicího systému je elektroměr, který zajistí měřené údaje o dodané nebo odebrané elektřině v požadovaném tvaru.

Naměřené údaje jsou přeneseny do informačního systému (IS) provozovatele přenosové nebo distribuční soustavy prostřednictvím datových odečtových centrál a ručních terminálů. Způsob a periodičita přenosu dat stejně jako zvolený způsob zpracování jsou závislé na konkrétním požadovaném druhu měření. Podle druhu měření je také nastaven termín následného předání dat do datového systému Operátora Trhu s Elektřinou (OTE). Datový systém OTE pak podle předem nastavených oprávnění poskytuje naměřená data fakturačním systémům primárních dodavatelů elektřiny ke konečné fakturaci.

#### 3.1 Druhy fakturačního měření

Pro měření množství elektřiny se používají průběhové a neprůběhové způsoby měření [3].

- Průběhové měření průběžně zaznamenává do profilu zatížení (LP) střední hodnotu činného výkonu v kW, jalového induktivního výkonu a jalového kapacitního výkonu v kVar za měřicí interval. Množství činné a jalové energie je odvozeno z daného LP.
- Neprůběhové měření zaznamenává hodnoty množství činné energie v kWh za daný interval.

Jednotlivé druhy měřicích systémů jsou dále děleny na čtyři základní typy, které blíže specifikují měřicí a vyhodnocovací intervaly fakturačního měření [3]:

- Typ A: Průběhové měření s dálkovým přenosem dat, zajišťuje měření v intervalu 15 minut s vyhodnocovacím intervalem 60 minut. Naměřená data musí být zpracována a předána v intervalu jednoho kalendářního dne [3].
- Typ B: Průběhové měření s dálkovým přenosem dat, zajišťuje měření v intervalu 15 minut s vyhodnocovacím intervalem 60 minut. Naměřená data musí být zpracována a předána v intervalu jednoho kalendářního měsíce [3].

- Typ S: Neprůběhové měření s dálkovým přenosem dat zajišťuje měření s intervalem zpracování, vyhodnocení a předání dat jeden kalendářní měsíc [3].
- Typ C: Neprůběhové měření, pro ostatní měření elektřiny s intervalem pro zpracování a přenos dat jeden kalendářní rok [3].

Popsané typy měření jsou rozhodující pro volbu měřicího systému určeného pro instalaci v konkrétním OPM. Elektroměry instalované v těchto systémech musí svojí funkcí daný druh a typ měření podporovat.

### 3.2 Vyhodnocení naměřené elektrické energie

Elektrická energie je dána součinem výkonu a hodnoceného časového intervalu. Pro činnou a jalovou elektrickou energii časově neměnného výkonu platí:

$$A = P \cdot t \quad (3.1)$$

$$R = Q \cdot t \quad (3.2)$$

Kde  $A$  činná elektrická energie,  
 $R$  jalová elektrická energie,  
 $t$  čas vyhodnocovaného intervalu.

Elektrickou energii v čase proměnného výkonu  $p(t)$  získáme integrací naměřeného okamžitého výkonu za zvolený časový interval od času  $t_0$  do  $t_1$ .

$$A = \int_{t_0}^{t_1} p(t) dt \quad (3.3)$$

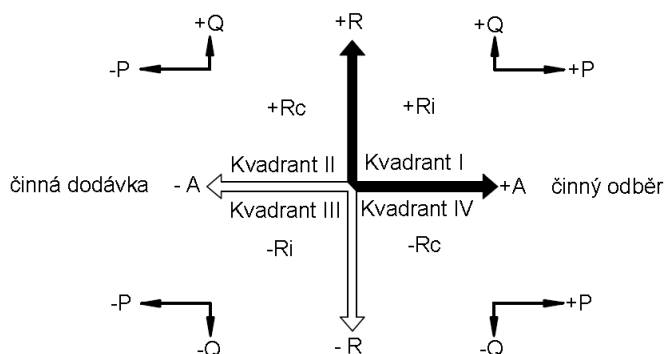
Měřený činný a jalový výkon a tomu odpovídající elektrická energie jsou vyhodnocovány podle fázového úhlu  $\varphi$  mezi měřeným napětím a proudem [3].

Kladným znaménkem je označována činná elektrická energie  $+A$  s nulovým úhlem fázového posuvu.  $+A$  představuje tok činné elektrické energie z distribuční nebo přenosové soustavy do příslušného OPM - spotřebované elektrické energii [3].

Záporným znaménkem je označována činná elektrická energie  $-A$  s úhlem fázového posuvu  $\varphi = 180^\circ$ . Přesné dodržení tohoto úhlu odpovídá směru toku činné energie z příslušného OPM směrem do distribuční nebo přenosové soustavy [3] - dodané elektrické energii.

Kladný jalový výkon a energie dodávané do příslušného OPM odpovídá úhlu fázového posuvu v rozmezí od  $0^\circ$  do  $180^\circ$ . Odebíraný jalový výkon a energie pak odpovídá úhlu fázového posuvu  $180^\circ$  až  $360^\circ$  [3].

Přiřazení vyhodnoceného výkonu a elektrické energie do příslušných kvadrantů je názorně zobrazeno na *Obr 2*.



Obr. 2 Rozdělení kvadrantů vyhodnoceného výkonu a elektrické energie.

Ve vybraných OPM se pro vyhodnocení výsledného směru toku elektrické energie uplatňují dva algoritmy stanovené vyhláškou [3]:

- Pro předpokládanou symetricky zatíženou trojfázovou soustavu je výsledná dodaná nebo odebraná činná elektrická energie  $A$  dána prostým součtem – saldem [3].

$$A = (|+A_{L1}| + |+A_{L2}| + |+A_{L3}|) - (|-A_{L1}| + |-A_{L2}| + |-A_{L3}|) \quad (3.4)$$

- Pro nesymetricky zatíženou síť je požadováno vyhodnocení činné elektrické energie samostatně v jednotlivých fázích pro oba směry oddělenými součty [3]:

$$+A = |+A_{L1}| + |+A_{L2}| + |+A_{L3}| \quad (3.5)$$

$$-A = |-A_{L1}| + |-A_{L2}| + |-A_{L3}| \quad (3.6)$$

- Jalová energie je pro symetricky i nesymetricky zatíženou síť dána saldem součtu jalové energie každé fáze [3].

$$R = |\pm R_{L1}| + |\pm R_{L2}| + |\pm R_{L3}| \quad (3.7)$$

Při instalaci měřicího systému na konkrétní OPM musí být zvolen takový elektroměr, který svou funkcí takovéto vyhodnocení elektrické energie podporuje.

Vyhodnocení účinníku je pro fakturační měření požadováno u odběrných nebo předacích míst připojených z napěťové hladiny vyšší než 1kV [4]. Vyhodnocení je provedeno na základě naměřených hodnot zátěžového profilu měřicího systému typu A a B. Výpočet je proveden poměrem jalové  $R$  a činné  $A$  energie za vyhodnocované období:

$$\tan \varphi = \frac{R}{A} \quad (3.8)$$

Z tohoto poměru se následně určí odpovídající účinník  $\cos \varphi$  [4]. Vyhodnocení účinníku je obvykle provedeno při zpracování naměřených dat na úrovni datové odečtové centrály.

## 4 Měření výkonu střídavého harmonického proudu v trojfázové soustavě

Měřicí systémy fakturačního měření jsou založeny na podstatě měření výkonu. Výkon je určen z matematického vyjádření naměřených hodnot základních veličin - napětí, proudu a jejich vzájemného působení. Metody měření výkonů vycházejí z konstrukčního uspořádání měřené soustavy a z jejího předpokládaného provozovaného charakteru zatížení.

Z pohledu metody fakturačního měření lze trojfázové distribuční a přenosové soustavy uvažovat jako soustavy se zajištěným symetrickým harmonickým průběhem napětí s konstantní frekvencí 50Hz. Pro měřené distribuční a přenosové soustavy lze v ideálním případě uvažovat také nezkreslený harmonický průběh proudu přenášený s požadovaným účínkem.

Podle charakteru zatížení se uvažují soustavy se souměrnou nebo nesouměrnou zátěží. Konstrukční provedení provozovaných trojfázových soustav se z pohledu měření výkonu rozdělují na soustavy s vyvedeným středním vodičem, často označované jako čtyřvodičové, provozované pro napětové hladiny nn. A na soustavy s napětovou hladinou vn a vvn bez vyvedeného středního vodiče v provedení jako trojvodičové soustavy.

Pro návrh měřicího systému musí být také respektována velikost jmenovitých napětí měřených rozvodných soustav a velikost předpokládaného přenášeného proudu.

Za těchto předpokladů měřicí systémy nepřímého fakturačního měření, určené pro měření přenášeného výkonu v trojfázových soustavách, využívají dvě základní metody.

### 4.1 Metody měření výkonů v trojfázových soustavách s nulovým vodičem

Činný výkon střídavého harmonického proudu je dán součinem fázového napětí s průmětem daného proudu do směru tohoto napětí (činná složka proudu). Činný výkon  $P$  měřené trojfázové soustavy v čtyřvodičovém provedení lze obecně vyjádřit vztahem [1][5][6]:

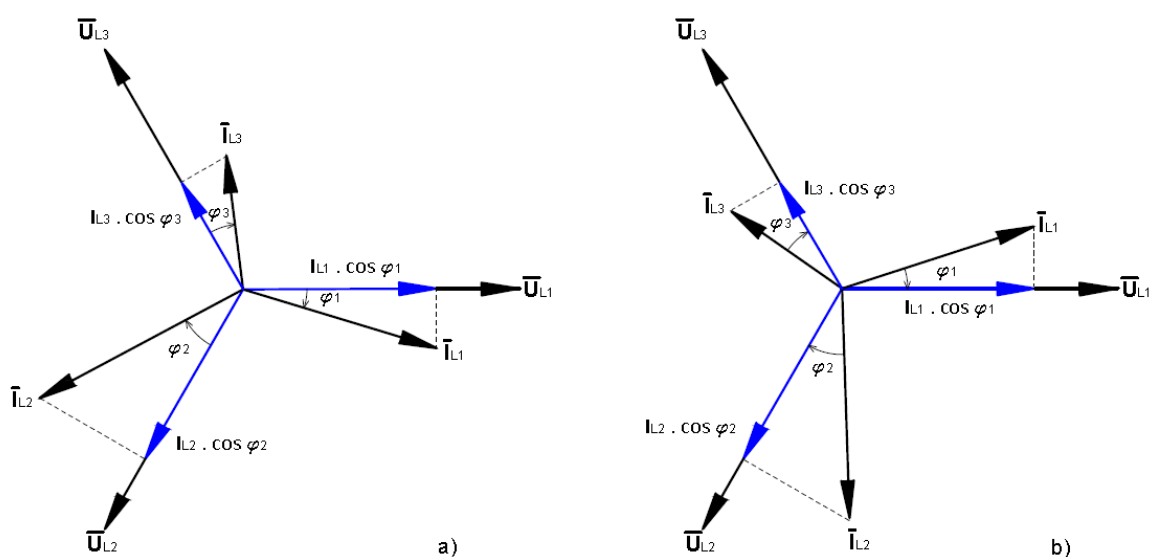
$$P = U_{L1} \cdot I_{L1} \cdot \cos(\varphi_1) + U_{L2} \cdot I_{L2} \cdot \cos(\varphi_2) + U_{L3} \cdot I_{L3} \cdot \cos(\varphi_3) \quad (4.1)$$

Kde	$P$	činný výkon trojfázové soustavy,
	$U_{L1,2,3}$	velikost fázového napětí mezi danou fází a středním vodičem,
	$I_{L1,2,3}$	velikost proudu dané fáze,
	$\varphi_{1,2,3}$	vzájemný fázový posun napětí a proudu dané fáze.

Pro jednotlivé fáze je úhel  $\varphi_{1,2,3}$  určen rozdílem fázového posuvu napětí  $\varphi_U$  a fázového posuvu proudu  $\varphi_I$  [5]:

$$\varphi = \varphi_U - \varphi_I \quad (4.2)$$

Rozložení vektorů napětí a proudu pro výpočet výkonu v trojfázové soustavě je možné zobrazit pomocí fázorového diagramu. Vzájemné časové rozložení vektorů napětí  $U_{L1}$ ,  $U_{L2}$ ,  $U_{L3}$  při dodržení sledu fází je  $120^\circ$ . Kladný nebo záporný fázový posun proudů  $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$ ,  $I_{L3}$  je určen induktivním nebo kapacitním charakterem zatížení jednotlivých fází soustavy. Příklad uspořádání vektorů pro obě varianty zatížení zobrazuje fázorový diagram na Obr. 3.



Obr. 3 Příklad fázorových diagramů trojfázové soustavy s induktivním a) a kapacitním b) charakterem zatížení.

Obdobným způsobem je v trojfázové soustavě definován i jalový výkon  $Q$ . V jedné fázi je dán součinem fázového napětí a průmětem proudu do směru kolmému k danému napětí (jalová složka proudu) [1][5][6]:

$$Q = U_{L1} \cdot I_{L1} \cdot \sin(\varphi_1) + U_{L2} \cdot I_{L2} \cdot \sin(\varphi_2) + U_{L3} \cdot I_{L3} \cdot \sin(\varphi_3) \quad (4.3)$$

Kde  $Q$  Jalový výkon trojfázové soustavy.

Z popsaných vztahů je pro měřicí metodu v tomto zapojení trojfázové soustavy zřejmá potřeba měřit výkon pro každou fázi samostatně. Tedy s použitím tří wattmetrů[6]. Napěťové vstupy wattmetrů  $W_1$ ,  $W_2$  a  $W_3$  jsou paralelně připojené na fázová napětí. Proudové vstupy wattmetrů jsou vřazeny sériovým připojením do obvodu dané fáze. Celkový naměřený výkon je pak dán součtem naměřených výkonů každého z wattmetrů [1][6].

$$P = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3} \quad (4.4)$$

$$Q = Q_{W1} + Q_{W2} + Q_{W3} \quad (4.5)$$

Kde  $P_W$  činný výkon naměřený wattmetrem v označené fázi,  
 $Q_W$  jalový výkon naměřený wattmetrem v označené fázi.

Princip popsané metody měření výkonu pomocí tří wattmetrů v trojfázové soustavě s vyvedeným středním vodičem umožňuje spolehlivě měřit činný a jalový výkon v symetrické i nesymetrické soustavě se souměrným i nesouměrným zatížením [1][6].

#### 4.2 Metody měření výkonů v trojfázových soustavách bez nulového vodiče

V trojfázových soustavách bez vyvedeného středního vodiče se pro měření výkonů využívá metoda dvou wattmetrů v Aronově zapojení [1] [6]. Toto zapojení umožňuje měřit třífázový činný výkon v symetrické i nesymetrické soustavě se souměrným i nesouměrným zatížením i při neharmonickém průběhu napětí a proudů [6]. Základní podmínkou metody je vyvážená



soustava proudů bez nulové složky. To znamená, že součet okamžitých hodnot proudů  $i_L(t)$  je roven nule [6].

$$i_{L1}(t) + i_{L2}(t) + i_{L3}(t) = 0 \quad (4.6)$$

Metodu dvou wattmetrů v Aronově zapojení lze popsat pro celkový okamžitý výkon  $p(t)$  trojfázové soustavy následující úpravou rovnice [6]:

$$\begin{aligned} i_{L1} \cdot u_{L12} + i_{L3} \cdot u_{L32} &= i_{L1} \cdot (u_{L1} - u_{L2}) + i_{L3} \cdot (u_{L3} - u_{L2}) = \\ &= i_{L1} \cdot u_{L1} + u_{L2} \cdot (-i_{L1} - i_{L3}) + i_{L3} \cdot u_{L3} = \\ i_{L1} \cdot u_{L1} + u_{L2} \cdot i_{L2} + i_{L3} \cdot u_{L3} &= p_{L1} + p_{L2} + p_{L3} = p \end{aligned} \quad (4.7)$$

Wattmetry umístěné pouze ve dvou například krajních fázích soustavy měří součin velikosti sdružených napětí  $U_{L12}$  a  $U_{L32}$  a příslušného průmětu proudu krajních fází  $I_{L1}$  a  $I_{L3}$  do směru daného sdruženého napětí.

Při uvažování harmonického průběhu je možné z uvedených rovnic odvodit vztah pro celkový výkon trojfázové soustavy naměřený jednotlivými wattmetry  $W1$  a  $W3$  v soustavě s induktivním charakterem zatížení [6].

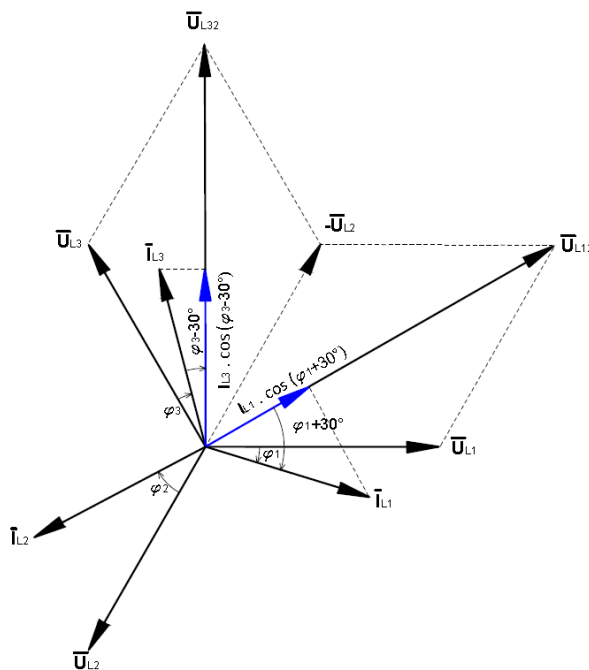
$$P_{W1} = U_{L12} \cdot I_{L1} \cdot \cos(\varphi_1 + 30^\circ) \quad (4.8)$$

$$P_{W3} = U_{L32} \cdot I_{L3} \cdot \cos(\varphi_3 - 30^\circ) \quad (4.9)$$

$$P = P_{W1} + P_{W3} \quad (4.10)$$

Kde  $\varphi_{1,3}$  fázový úhel mezi napětím fáze  $U_L$  a proudem  $I_L$  podle (4.3)

Příklad zobrazení fázorů napětí  $U_{L12}$ ,  $U_{L32}$ , fázorů proudů  $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$  a jejich činných složek vycházející z popsaných vztahů je uveden pro induktivní charakter zatížení měřené soustavy na Obr. 4.



Obr. 4 Příklad rozložení fázorů pro induktivní charakter zátěže v trojfázové soustavě měřené metodou Aronova zapojení.

Zásadní omezení metody je pro měření činného výkonu v soustavě provozované s velmi nízkým účinníkem představující fázový úhel  $\varphi$  větší než  $60^\circ$ . Úhel fázového posuvu  $\varphi_1 + 30^\circ$  pak dosahuje hodnoty větší než  $90^\circ$ . V tomto případě má činná složka proudu obrácený směr, v jejímž důsledku vychází záporná hodnota činného výkonu  $P_1$ , která bez úpravy zapojení zatíží metodu značnou chybou.

Pro měření jalového výkonu je použití metody Aronova zapojení omezeno pouze pro symetrické trojfázové soustavy se souměrným zatížením. Při splnění této podmínky je celkový jalový výkon  $Q$  měřené trojfázové soustavy dán vztahem [1][6]:

$$Q = \sqrt{3} \cdot (P_{W3} - P_{W1}) \quad (4.11)$$

Ověření uvedeného vztahu lze dokázat úpravou této rovnice (4.11) pro sdružené symetrické napětí  $U_{L12} = U_{L32} = U_S$  a souměrné zatížení fázových proudů  $I_{L1} = I_{L3} = I_F$  s posunem proti fázovému napětí  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$  [1]:

$$\begin{aligned} \sqrt{3} \cdot (P_{W3} - P_{W1}) &= \sqrt{3} \cdot U_S \cdot I_F \cdot [\cos(\varphi + 30^\circ) - \cos(\varphi - 30^\circ)] = \\ &= \sqrt{3} \cdot U_S \cdot I_F \cdot [\cos \varphi \cdot \cos 30^\circ + \sin \varphi \cdot \sin 30^\circ - \cos \varphi \cdot \cos 30^\circ + \sin \varphi \cdot \sin 30^\circ] = \\ &= \sqrt{3} \cdot U_S \cdot I_F \cdot \sin \varphi = 3 \cdot \frac{U_S}{\sqrt{3}} \cdot I_F \cdot \sin \varphi = 3 \cdot U_F \cdot I_F \cdot \sin \varphi \end{aligned} \quad (4.12)$$

V měřicích systémech jsou wattmetry uvedených měřicích metod nahrazeny měřicími systémy elektroměrů, kterým je pro svůj rozsah věnována samostatná kapitola 6.

### 4.3 Měření výkonu s měřicími převodníky

V trojfázových soustavách s velkými proudy, nebo vysokým napětím se pro uvedené metody měření použije připojení prostřednictvím měřicích převodníků. Pro stanovení skutečného výkonu měřené soustavy je potřeba naměřený výkon násobit příslušným převodem měřicích převodníků [1].

V soustavách nízkého napětí s proudy přesahujícími vstupní jmenovité hodnoty se wattmetry uvedených měřicích metod připojí jen prostřednictvím měřicích převodníků proudu. Pro skutečný výkon  $P_{skutečný}$  měřené soustavy s použitím jen proudových převodníků platí [1]:

$$P_{skutečný} = p_I \cdot P = \frac{I_{np}}{I_{ns}} \cdot P \quad (4.13)$$

Kde  $p_I$  jmenovitý převod proudového převodníku,  
 $I_{np}$  jmenovitý primární proud proudového převodníku,  
 $I_{ns}$  jmenovitý sekundární proud proudového převodníku.

V soustavách kde je požadováno připojení wattmetrů měřicích metod prostřednictvím proudových a napěťových převodníků platí pro skutečný naměřený výkon [1]:

$$P_{skutečný} = p_I \cdot p_U \cdot P = \frac{I_{np}}{I_{ns}} \cdot \frac{U_{np}}{U_{ns}} \cdot P \quad (4.14)$$

Kde  $p_U$  jmenovitý převod napěťového převodníku,  
 $U_{np}$  jmenovité primární napětí napěťového převodníku,  
 $U_{ns}$  jmenovité sekundární napětí napěťového převodníku.

Obdoba uvedených vztahů pro výpočet korekční konstanty pak platí v plném rozsahu i pro metody měření jalových výkonů.

Pro systémy nepřímého fakturačního měření jsou jako převodníky určené měřicí transformátory proudu (MTP) a napětí (MTN), jejichž výhody jsou blíže popsány v samostatné kapitole 7.

Základní podmínkou použití měřicích transformátorů v metodách měření výkonů je správná polarita připojení. Zařazením MT do obvodu měřicího systému musí být zachován stejný směr proudu měřicím přístrojem jako v případě přímého připojení. Tato podmínka je dána principem ideálního transformátoru, kde je směr sekundárního proudu posunut o  $180^\circ$  (tedy opačný) proti primárnímu proudu [7]. Podmínku je tedy nutné dodržet nejen pro připojení měřicího transformátoru proudu, ale i napětí [1].

Dalším aspektem užití měřicích transformátorů je rozšíření chyby měřicí metody nejen o chybu převodu a fáze, ale i o chybu způsobenou vlastní spotřebou MT. Vlastní spotřeba MTP se při jmenovitém zatížení pohybuje v rozmezí 20 až 35W [1] a mění se s druhou mocninou proudového zatížení. Vlastní spotřeba MTN při jmenovitém napětí se pohybuje v rozmezí 5 až 15W a mění se s druhou mocninou napětí [1]. Pro podmínky fakturačního měření řádově nesrovnatelně větších výkonů proti vlastní spotřebě MT lze tuto chybu zanedbat. Přesto je účelné volit takovou kombinaci v zapojení MT do měřené soustavy, která omezí vliv měnící se vlastní spotřeby MTP při proměnném proudovém zatížení [1][8].

## 5 Provedení a umístění měřicích systémů

Konkrétní požadavky na umístění a technické provedení měřicích systémů jsou stanoveny v přípojovacích podmínkách vydaných jednotlivými provozovateli příslušných distribučních nebo přenosových soustav [8][9].

Měřicí systémy jsou rozděleny podle velikosti předpokládaného měřeného proudu a napětí měřené soustavy. Svoji podstatou jsou shodná pro měření toku elektřiny směrem ze soustavy do spotřebního OPM, nebo do soustavy z výrobního OPM.

Přímé měření - měřený proud i napětí jsou přímo připojeny na svorky elektroměru. Toto připojení měření lze používat pro soustavy nn s maximálním proudem obvykle do 80A [9].

Polopřímé měření - napětí měřeného obvodu je přímo připojené k elektroměru, proud je měřen prostřednictvím měřicího transformátoru proudu (MTP) v poměru daném převodem transformátoru. Používá se pro měření na hladině nn s předpokládaným přenášeným proudem nad 80A [8][9], nebo i nižším a to v případě zvýšených nároků na zabezpečení plynulosti dodávky elektrické energie spojených se servisní činností měřicího systému.

Nepřímé měření - napětí i proud měřeného obvodu je měřen prostřednictvím proudových a napěťových (MTN) měřicích transformátorů v poměrech daných převodem transformátorů. Využití nepřímého měření je především v soustavách vn a vvn [8]. V soustavách nn je v ojedinělých případech nepřímé měření užito v případech speciálního požadavku galvanického oddělení proudových a i napěťových obvodů od měřené soustavy.

### 5.1 Základní části nepřímých měřicích systémů

Základní součástí nepřímého měřicího systému pro fakturační měření je elektroměr a přístrojové měřicí transformátory. Tyto přístroje jsou detailně popsány v kapitole 6 a 7. Vzájemné galvanické propojení těchto prostorově oddělených přístrojů zajišťuje spojovací vedení, jehož nedílnou součástí je zkušební (zkratovací) svorkovnice (ZS) a prvky požadovaného jištění.

Úkolem zkušební svorkovnice je při servisní a kontrolní činnosti bezpečně zajistit:

- rozpojení a spojení jednotlivých napěťových obvodů,
- zkratování a odzkratování jednotlivých proudových obvodů,
- sériové připojení kontrolního přístroje do jednotlivých proudových obvodů MTP bez přerušení obvodu [8][9].

Spojovací vedení je tvořeno soustavou napěťových a proudových obvodů samostatně vedených od MT přes zkušební svorkovnici na vstupní svorky elektroměru. Provedení vodičů je požadováno v celé délce bez přerušení a s dostatečnou ochranou proti poškození [8][9].

Požadavek minimálního průřezu  $2,5 \text{ mm}^2$  pro Cu vodiče proudového obvodu a  $1,5 \text{ mm}^2$  pro vodiče v napěťovém obvodu je stanoven na základě délky vedení a jmenovitého zatížení s ohledem na dovolený úbytek napětí. Pro soustavy vvn je povolen maximální úbytek napětí 0,1% a pro soustavy vn 0,2% [8].

Svorkovnice a všechny volně přístupné prvky měřicího systému musí být upraveny k zajištění proti neoprávněné manipulaci zaplombováním [8].

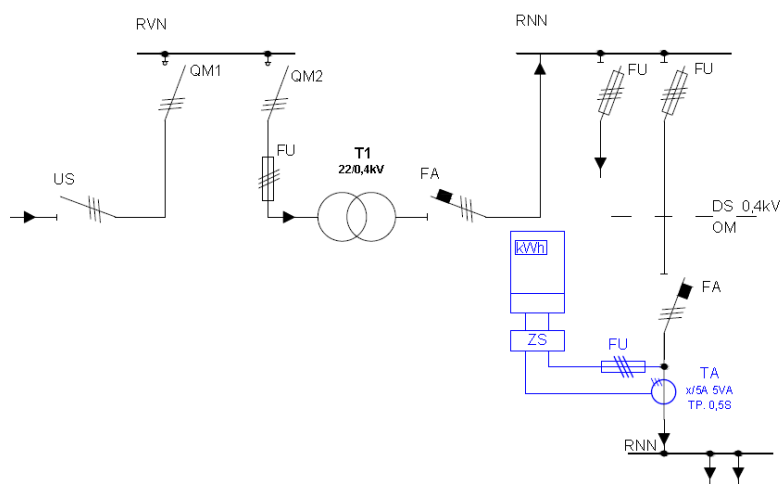
## 5.2 Měřicí systém pro OPM připojené z napětové hladiny nn

K distribuční soustavě s napětovou hladinou nízkého napětí jsou připojena spotřební odběrná místa, předací místa malých zdrojů elektrické energie a předací místa mezi distribučními soustavami. U těchto uvedených OPM lze předpokládat nesouměrné zatížení s měnícím se účínkem v jednotlivých fázích.

Pro spotřební OPM je minimální požadavek na měřicí systém s typem měření C [3], pro předací místa mezi distribučními soustavami a pro OPM výroben je požadován minimálně typ měření B [3].

Distribuční soustavy nn včetně připojovacího vedení odběrných a předacích míst jsou realizovány v uspořádání TN-C případně TN-C-S, tedy čtyřvodičovém provedení s vyvedeným středním vodičem. Tomuto uspořádání odpovídá i měřicí systém s metodou polopřímého čtyřvodičového připojení [9].

Na Obr. 5 je na jednopólovém schématu uveden příklad připojení měřicího systému pro OPM připojená k distribuční síti nízkého napětí.



Obr. 5 Příklad připojení měřicího systému v OM připojeném k soustavě nn.

Měřicí systém je připojen k přípojnícím v hlavním rozvaděči nn, v co nejmenší možné vzdálenosti, za hlavním jističem OM [9].

Měřicí transformátory proudu jsou v sérii připojeni v každé fázi samostatně. Jejich primární jmenovité hodnoty převodu  $x/5A$  jsou voleny tak, aby odpovídaly jmenovité proudové hodnotě hlavního jističe a byly ve všech fázích shodné [8][9].

Napětové obvody jsou přímo napojené na napětí 230V z přípojníc jednotlivých fází v místě před připojením MTP. Doporučená hodnota jištění pro napětový obvod měřicího systému je 2A [9]. Střední vodič je napojen z přípojnice PEN ve stejném poli rozvaděče.

Elektroměr a zkušební svorkovnice měřicího systému jsou umístěné v samostatné k tomuto účelu vyhrazené části nn rozvaděče.

Detailní schéma zapojení polopřímého měřicího systému je uvedeno v Příloze Obr. P1.

### 5.3 Měřicí systém pro OPM připojené z napěťové hladiny vn a vvn

Pro odběrná místa konečné spotřeby s rezervovaným příkonem do 250kW připojená z distribuční soustavy vysokého napětí je minimální požadavek na měřicí systém umožňující měření v rozsahu definovaném pro typ měření B [3]. Ostatní odběrná a předávací místa připojená z napěťové hladiny vysokého a velmi vysokého napětí musí být osazena měřicím systémem splňující podmínky pro typ měření A [3]. Jedná se o předací místa mezi přenosovou a zahraniční nebo distribuční soustavou, předací místa výroben elektřiny a odběrná místa konečné spotřeby připojená z hladiny vvn případně vn za podmínky rezervovaného příkonu nad 250kW [3].

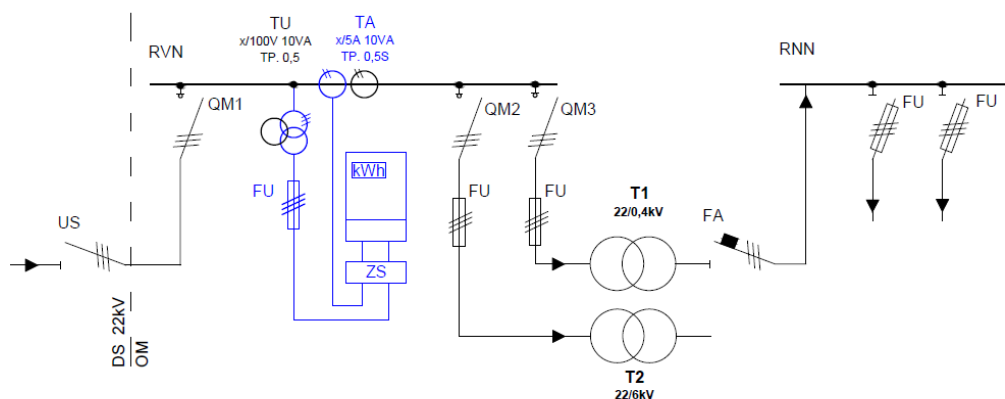
Měřicí systémy určené pro měření odběrných a předacích míst připojených k napěťové hladině vyšší než 1kV dělíme podle umístění připojení vzhledem k silovému transformátoru, který v těchto případech není součástí distribuční soustavy, na měřicí systémy primárního měření a systémy sekundárního měření [8].

Systémy primárního měření jsou umístěné na straně vyššího napětí silového transformátoru a tím umožňují měřit odebranou případně dodanou elektřinu bezprostředně v místě připojení k distribuční nebo přenosové soustavě.

Systém primárního měření v soustavách vn se použije pro OM s více instalovanými silovými transformátory nebo v případě jednoho transformátoru o příkonu obvykle vyšším než 400kVA [8].

Připojení těchto odběrných nebo předacích míst je realizováno odbočením z distribuční soustavy vn. Trojfázová soustava této distribuční sítě včetně přípojky je provozována soustavou s neúčinně uzemněným uzlem bez vyvedeného středního vodiče. V této trojvodičově uspořádané soustavě, která pracuje do primárního vinutí silového transformátoru zapojeného do trojúhelníka, lze pak předpokládat souměrné zatížení jednotlivých fází. Pro měření elektřiny přenášené touto soustavou jsou určeny měřicí systémy na základě metody Aronova zapojení [8].

Příklad umístění a připojení primárního měřicího systému pro napěťovou hladinu vn je uveden na Obr. 6.



Obr. 6 Příklad připojení primárního měřicího systému v OM připojeném k soustavě vn.

Měřicí transformátory jsou osazené v samostatném poli vn rozvaděče, umístěného v hlavní vstupní rozvodně OM. V případě napájení vn rozvaděče více přívody se přednostně volí takový způsob, aby bylo možné použít pouze jednu sadu MT [8]. Není-li tento způsob možný, musí být každý přívod měřen samostatným měřicím systémem s následným součtem naměřených dat.

MTP jsou připojeny do systému přípojnic pouze v krajních fázích L1 a L3 za podélným odpojovačem a před vývodem pro silový transformátor [8]. Jmenovité hodnoty převodu  $x/5A$  jsou voleny s ohledem na příkon transformátorů.

Připojení primárního vinutí MTN k systému přípojnic je provedeno s odpovídajícím jištěním, pokud MTN již nejsou vybaveny vlastním jištěním od výrobce. Pro napěťový obvod měřicího systému mohou být použity dva dvoupólově nebo tři jednopólově izolované měřicí transformátory [8]. Zapojení sekundárního vinutí MTN s jmenovitým převodem  $x/100/\sqrt{3}$  nebo  $x/110/\sqrt{3}$  musí zajistit pro trojvodičové připojení elektroměru sdružená napětí o velikosti 100V nebo 110V. Toho je dosaženo v případě použití dvoupólově izolovaných MTN zapojením do otevřeného trojúhelníka („V“) [8]. Nebo v případě jednopólově izolovaných transformátorů zapojením do hvězd („Y“) [8]. Podrobné schéma zapojení obou variant MTN je uvedeno v Příloze *Obr. P2 a Obr. P3*.

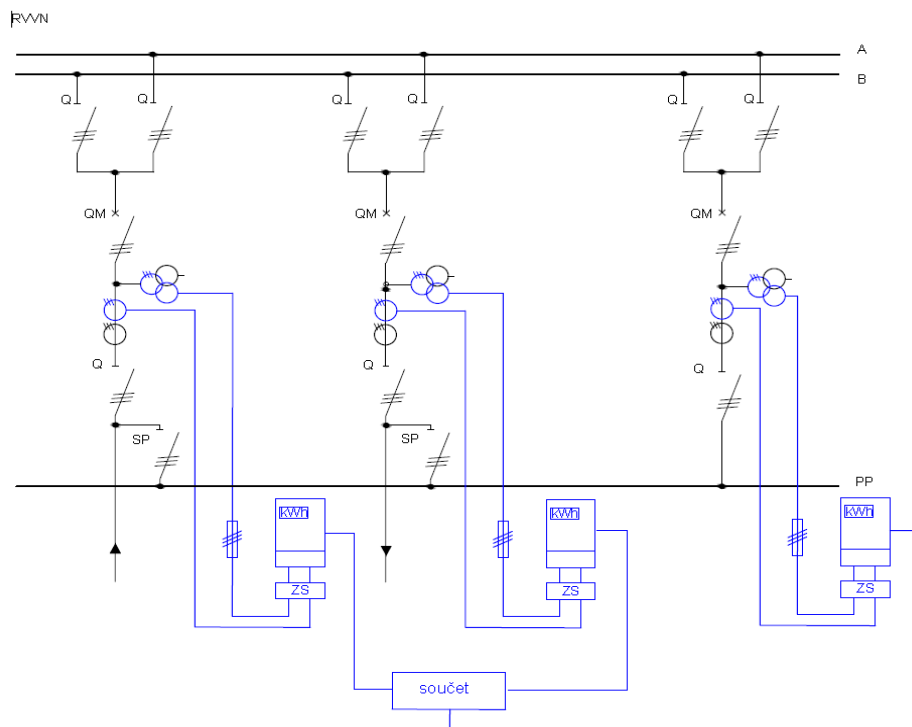
Distribuční nebo přenosové sítě velmi vysokého napětí jsou obdobně provozovány v uspořádání trojvodičové soustavy v provedení s účinně uzemněným uzlem bez vyvedeného středního vodiče. Z důvodu vyšších nároků na přesnost měření již nelze předpokládat souměrné zatížení jednotlivých fází. Z tohoto důvodu je systém primárního měření pro soustavy velmi vysokého napětí požadován opět na principu metody tří wattmetrů [8].

Měřicí transformátory, většinou v provedení jako vícejádrové kombinované transformátory napětí a proudu, jsou v závislosti na provedení rozvodny umístěny v jednotlivých odbočkách mezi vypínačem a vývodovým odpojovačem. MT se instalují do systému přípojnic ve všech třech fázích L1, L2 a L3 [8].

Jmenovitý převod  $x/1A$  měřicích transformátorů proudu pro měřicí systémy vvn je požadován z důvodu dovoleného úbytku napětí při velké délce spojovacího vedení. Zapojení sekundárního vinutí MTN s jmenovitým převodem  $x/100/\sqrt{3}$  nebo  $x/110/\sqrt{3}$  do hvězdy [8] zajistí pro připojený elektroměr fázová napětí o velikosti  $100/\sqrt{3}$  V nebo  $110/\sqrt{3}$  V. Podrobné schéma zapojení měřicího systému pro napěťovou hladinu vvn je uvedené v Příloze *Obr. P4*.

Elektroměry a zkušební svorkovnice těchto primárních měřicích systémů jsou umístěné odděleně v samostatné skříni měření v bezpečné vzdálenosti od živých částí zařízení vn a vvn. V případech takového uspořádání vn a vvn rozvoden, kdy je pro napájení použito více samostatně měřených přívodů, nebo především jsou-li instalovány systémy pomocné přípojnice, je nutné jednotlivé měřicí systémy opatřit součtem naměřených dat.

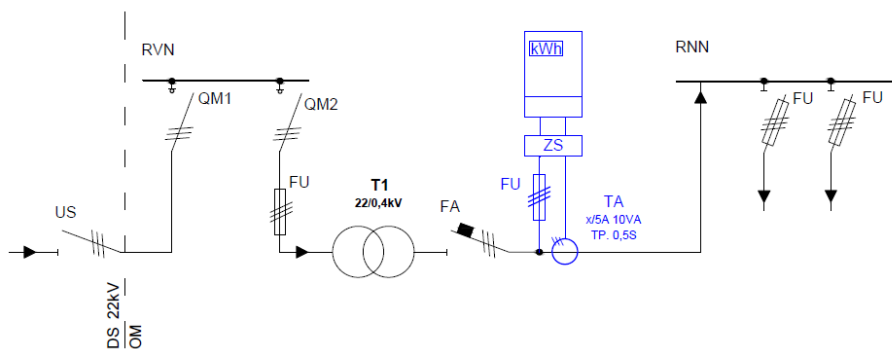
Příklad umístění měřicích systémů v rozvodně vvn se systémem dvou přípojnic doplněným systémem pomocné přípojnice je uveden na *Obr. 7*.



Obr. 7 Příklad provedení měřicího systému v rozvodně vvn s pomocnou přípojnici.

Systémy sekundárního měření jsou naopak umístěné na straně nižšího napětí silového transformátoru. V tomto případě naměřený výkon a tím i množství elektrické energie vzhledem k místu připojení ovlivní ztráty vzniklé v napájecím transformátoru [8]. Z tohoto důvodu se k naměřeným hodnotám tyto ztráty činné elektrické energie připočítávají, nebo v případě dodávky odečítají ve stanovené výši podle [4]. Pro sítě vvn ve výši 2% a pro sítě vn ve výši 4% nebo stanoveným výpočtem na základě skutečných ztrát prokázaných doložením parametrů transformátoru a naměřeném výkonu [4].

Systém sekundárního měření se pro napěťové hladiny vn uplatní v případě připojení pouze jednoho transformátoru o maximálním příkonu do 1000kVA [8]. Umístění, připojení a provedení měřicího systému je ve své podstatě shodné s již popsaným systémem v úrovni nízkého napětí jak dokládá příklad jednopólového schéma na Obr.8. Výpočet ztrát a úprava naměřených hodnot je obvykle provedena na úrovni datové centrály při zpracování odečtených dat.



Obr. 8 Příklad připojení sekundárního měřicího systému v OM připojeném k soustavě vn.



## 6 Přehled, provedení a princip základních typů nepřímých elektroměrů

Zákon o metrologii č. 505/190 Sb. definuje elektroměry pro fakturační měření jako stanovená měřidla. Toto legislativní ustanovení omezuje použití elektroměrů pro měřicí systémy pouze na přístroje schváleného typu ověřené autorizovaným metrologickým střediskem.

### 6.1 Rozdělení elektroměrů

Elektroměry využívané v současné době pro fakturační měření můžeme rozdělit do následujících skupin podle:

- principu měřicího systému:
- indukční,
- statické,

počtu měřených fází:

- jednofázové,
- třífázové,

třífázové elektroměry dělíme podle způsobu připojení k měřené soustavě:

- čtyřvodičové – trojsystémové,
- trojvodičové – dvousystémové,

způsobu připojení k měřené síti:

- přímé,
- polopřímé,
- nepřímé,

druhu měřené energie:

- pro samostatné měření činného výkonu,
- pro samostatné měření jalového výkonu,
- pro měření výkonu ve více kvadrantech (vícekvadrantní),

počtu měřených tarifů:

- jednotarifní,
- dvoutarifní,
- vícetarifní,

druhu měření:

- neprůběhové,
- průběhové.

Z uvedeného rozdělení jsou v současnosti pro nepřímé a polopřímé fakturační měření nejvíce využívány trojfázové statické elektroměry splňující náročné požadavky kladené na více kvadrantové průběhové typy měření A a B. Proti tomu jedno a dvou tarifní trojfázové indukční elektroměry svými možnostmi již vyhovující pouze podmínkám pro nepřímé měřicí systémy s typem měření C. Ale vzhledem k stále značnému počtu použití těchto systémů mají indukční elektroměry stále ve fakturačním měření své místo.

Vyhláškou [3] definované parametry elektroměrů určených pro systémy nepřímého měření jsou uvedeny tabulce 1. Tyto parametry určené podle napěťové hladiny a způsobu připojení musí splňovat všechny typy elektroměrů bez rozdílu provedení jejich principu měření.

Tabulka 1 Parametry nepřímých elektroměrů. Převzato z [3]

	Způsob připojení k měřené síti	Jmenovitý proud [A]	Jmenovité vstupní fázové napětí [V]	Třída přesnosti pro měření činné energie	Třída přesnosti pro měření jalové energie
nn	polopřímé čtyřvodičové	5	230	1	2
vn	polopřímé čtyřvodičové	5	230	1	2
	nepřímé třívodičové	5	$100/\sqrt{3}$ $110/\sqrt{3}$		
vvn	nepřímé čtyřvodičové	1 (5)	$100/\sqrt{3}$ $110/\sqrt{3}$	0,5	1

## 6.2 Provedení elektromechanických (indukčních) elektroměrů

Konstrukce indukčního elektroměru je sestavena ze tří základních částí: pouzdra elektroměru, měřicího systému a počítacího zařízení [1][10].

Pouzdro elektroměru zajišťuje mechanické uložení a odolnost proti poškození měřicího systému. Zajišťuje požadované krytí dle IP (IP54). Součástí pouzdra elektroměru jsou závěsy pro upevnění elektroměru k desce elektroměrového rozvaděče. Rozmístění a rozměry upevňovacích otvorů musí odpovídat požadavkům stanovených v připojovacích podmínkách distribučních společností [8][9].

Důležitou součástí elektroměrového pouzdra je svorkovnicový blok určený pro připojení elektroměru do měřicího obvodu. Součástí tohoto bloku jsou hlavní silové svorky s nezáměnným označením pro připojení proudových a napěťových obvodů a pomocné svorky pro externí ovládání tarifních funkcí.

Měřicí systém indukčního elektroměru je založen na Ferrarisově (indukčním) principu vzájemného působení dvou v čase a v prostoru proměnných magnetických toků na otočně uložený elektricky vodivý kotouč. Ve své podstatě se jedná o obdobu principu asynchronního motoru s kotvou na krátko. Systém se skládá z hnacího a otočného ústrojí a brzdícího permanentního magnetu [1].

Hnací ústrojí jednofázového elektroměru je tvořeno dvěma elektromagnetickými obvody složenými z železo-křemíkových plechů a vzájemně umístěnými tak, aby mezi nimi byla dostatečná vzduchová mezera pro vložení kotouče otočného ústrojí.

Napěťový magnetický obvod je tvořen trojramenným magnetickým obvodem se vzduchovou mezerou, jehož budící cívka umístěná na středním sloupku, je navinuta velkým počtem závitů měděného drátu. Toto provedení zajišťuje velkou indukčnost při malé vnitřní spotřebě pohybující se kolem 5VA [1] [10].

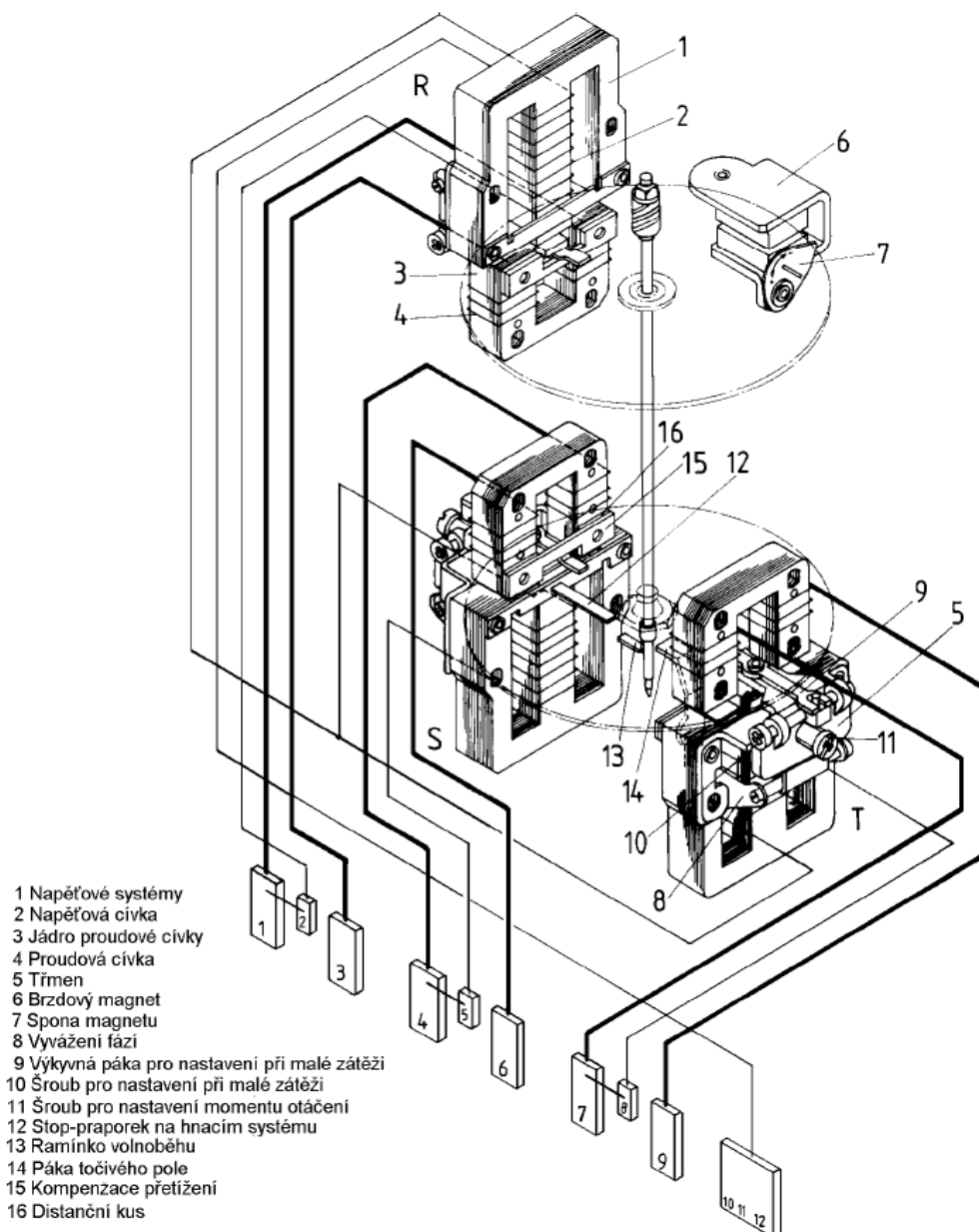
Protipólem napěťového magnetického obvodu umístěného zpravidla nad kotoučem je proudový magnetický obvod umístěný ze spodní strany kotouče. Tento magnetický obvod je tvořen plášťovým dvojramenným magnetickým obvodem, jehož budící cívka je rozdělena na dvě poloviny umístěné na krajních sloupcích magnetického obvodu. Cívky jsou navinuty několika závitů dostatečně dimenzovaného měděného vodiče pro průtok měřeného proudu s minimálními ztrátami. Spotřeba proudového magnetického obvodu se pohybuje v rozmezí 0,1 až 1VA [1] [10].

Do vzduchové mezery mezi póly obou elektromagnetů je uložen elektricky vodivý (zpravidla hliníkový) kotouč otočného ústrojí upevněný na svisle uloženém hřídeli. Uložení hřídele, z důvodu omezení mechanických ztrát, je provedeno v horním a spodním magnetickém ložisku. Na hřídeli je nalisováno ozubené, případně šnekové kolo pro převod točivého momentu hřídele na počítací zařízení. Na kotoučku je vyznačený barevný terč indukující činnost elektroměru sloužící také pro optické snímání počtu otáček při kalibraci [1] [10].

Brzdící permanentní magnet většinou tvořený dvěma deskovými magnety upevněnými na ocelovém rámu je uložen tak, aby se kotouč pohyboval ve vzduchové mezeře mezi jeho jižním a severním pólem. Materiál permanentního magnetu (AlNiCo) musí dlouhodobě zajistit stálou hodnotu magnetického pole. Brzdící permanentní magnet bývá vybaven nastavitelným magnetickým můstkem pro jemné seřízení brzdícího momentu [1].

Měřicí systém pro třífázový elektroměr vychází z popsaného systému jednofázového elektroměru s tím, že je rozšířen o další dva měřicí systémy. Nákras provedení trojfázového činného elektroměru je uveden na *Obr. 9*. Napěťové a proudové měřicí systémy každé fáze (R, S, T) jsou odděleně upevněny na pouzdro v takovém uspořádání, že na spodní kotouč působí systém fáze S a T umístěné proti sobě. Systém fáze R a brzdící magnet jsou umístěny tak, aby působily na horní kotouč [1].

Elektroměry pro trojvodičové připojení určené pro Aronovo zapojení s dvěma hnacími systémy mají stejnou konstrukci s rozdílem, že je vynechán střední systém S- Systém.



Obr. 9 Uspořádání hnacího ústrojí třífázového indukčního elektroměru. Převzato z [10].

Počítací systém elektroměru je mechanicky spojen s hřídelí otočného systému. Zaznamenává počet otáček prostřednictvím mechanického válečkového počítadla [1][10]. Počet kotoučků počítadla odpovídá počtu zobrazovaných míst. Dvoutarifní počítadla obsahují dva počítací válečky, přepínání pohonu mezi nimi zajišťuje elektromagnetický tarifní přepínač.

Výhodou mechanických počítadel je uchování naměřeného stavu i při elektrickém i mechanickém poškození elektroměru.

Princip měřicího systému indukčního elektroměru je založen na pohybovém točivém momentu  $M_p$ , který uvádí kotouč hnacího ústrojí do pohybu [1][11]. Moment vzniká vzájemným působením střídavého magnetického pole ve vzduchových mezerách magnetických obvodů a vířivých proudů v kotoučku. Při podmínce harmonického průběhu napětí a proudu je střední hodnota pohybového momentu vyjádřena vztahem:

$$M_p = k' \cdot \omega \cdot \Phi_I \cdot \Phi_U \cdot \sin \varphi_I = k \cdot I_I \cdot I_U \cdot \sin \varphi_I \quad (6.1)$$

Kde	$\omega$	úhlový kmitočet,
	$k', k$	konstanty závislé na konstrukci přístroje,
	$\varphi_I$	fázový posuv fázorů proudů $I_I$ a $I_U$ ,
	$\Phi_I, \Phi_U$	magnetické toky napěťového a proudového magnetického obvodu,
	$I_I, I_U$	efektivní hodnoty proudů protékající cívkou proudového a napěťového magnetického obvodu [11].

Indukční elektroměr je v podstatě integrační wattmetr. Pro integraci výkonu je potřeba, aby pohybový moment  $M_p$  přístroje byl úměrný činnému výkonu zátěže. Musí tedy platit [11]:

$$\Phi_I \approx I, \Phi_U \approx U, \sin \varphi_I = \cos \varphi \quad \text{tedy} \quad \varphi_I = 90^\circ - \varphi \quad (6.2)$$

To znamená, že magnetický tok proudového magnetického obvodu  $\Phi_I$  musí odpovídat hodnotě měřeného proudu a magnetický tok napěťového magnetického obvodu  $\Phi_U$  odpovídal velikosti měřeného napětí.

Nastavení fázového posuvu  $\varphi_I = 90^\circ - \varphi$  je zajištěno velkou indukčností napěťového magnetického obvodu, pro jeho přesné seřízení slouží magnetický bočník a závit na krátko umístěné na tomto magnetickém obvodu [1].

Při dodržení výše uvedených podmínek je pohybový moment úměrný činnému výkonu střídavého harmonického proudu [1] [11]:

$$M_p = k_E \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (6.3)$$

V důsledku otáčení kotouče v neproměnném magnetickém poli permanentního magnetu jsou v kotouči indukovány vířivé proudy, jejichž protisměrné magnetické účinky spolu s účinky permanentního magnetu vytvoří brzdící moment. Velikost brzdícího momentu je tedy úměrná rychlosti otáčení kotouče. Vzájemné porovnání hnacího a brzdícího momentu je takové, aby rychlost otáčení kotouče odpovídala odebíranému proudu a zabránilo setrvačnosti kotouče při náhlém poklesu nebo zastavení průtoku měřeného proudu [1].

Indikačním zařízením elektroměru je mechanické počítadlo otáček kotouče s takovým převodem, aby odebranou elektrickou prací bylo možné přímo odečíst v kilowatthodinách. Naměřené množství činné elektrické energie za vyhodnocovaný interval odpovídá:

$$A = k_E \cdot \Delta_N = \int_{t_0}^{t_1} u \cdot i \cdot dt \quad (6.4)$$

Kde	$k_E$	vnitřní konstanta elektroměru daná konstrukcí elektroměru,
	$\Delta_N$	počet otáček kotouče vykonaných za vyhodnocovaný interval,
	$u$	okamžitá hodnota měřeného napětí,
	$i$	okamžitá hodnota měřeného proudu [1].

Pokud je měřicímu systému předřazen napěťový a proudový převodník je nutné upravit naměřené množství elektrické energie vynásobením hodnotu transformačního poměru převodníků podle (4.13) a (4.14).

Indukční elektroměry pro měření jalové energie dnes již nenacházejí širší uplatnění. Jejich systém pracuje na podobném principu s podmínkou fázového posuvu  $\varphi_I = \varphi$ , tak aby platilo  $M_p = k_E \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$ . Pro dosažení uvedeného fázového posuvu je k napěťové cívce předřazen ohmický odpor a k proudové cívce ohmický odporový bočník [1].

### 6.3 Provedení statických (elektronických) elektroměrů

Velkou výhodou statických oproti indukčním elektroměrům je, že jejich měřicí systém neobsahuje žádné mechanické pohyblivé součásti (proto statické), které by podléhaly opotřebení. Měřicí systém statických elektroměrů je v podstatě založen na principu digitálního měřicího přístroje. Který je rozšířen o mikroprocesor určený pro zpracování naměřených hodnot formou číslicových výpočtů [12][13][14].

Konstrukce vstupních obvodů digitálního měřicího přístroje přispívá k rozšíření rozsahu požadované přesnosti měření, kterou u indukčních elektroměrů omezovaly náběhové proudy[1]. Možnosti měřicích obvodů a parametrizace algoritmů mikroprocesoru pak nabízí řadu variant pro zpracování naměřených hodnot, které u mechanických elektroměrů není možné z jejich principu realizovat. Vedle základních požadovaných údajů z měřených veličin je také možné získat informace o stavu měřicího zařízení a měřené soustavy [12][13][14]. Konkrétní provedení statických elektroměrů tak zcela závisí na daném typu přístroje a na účelu použití.

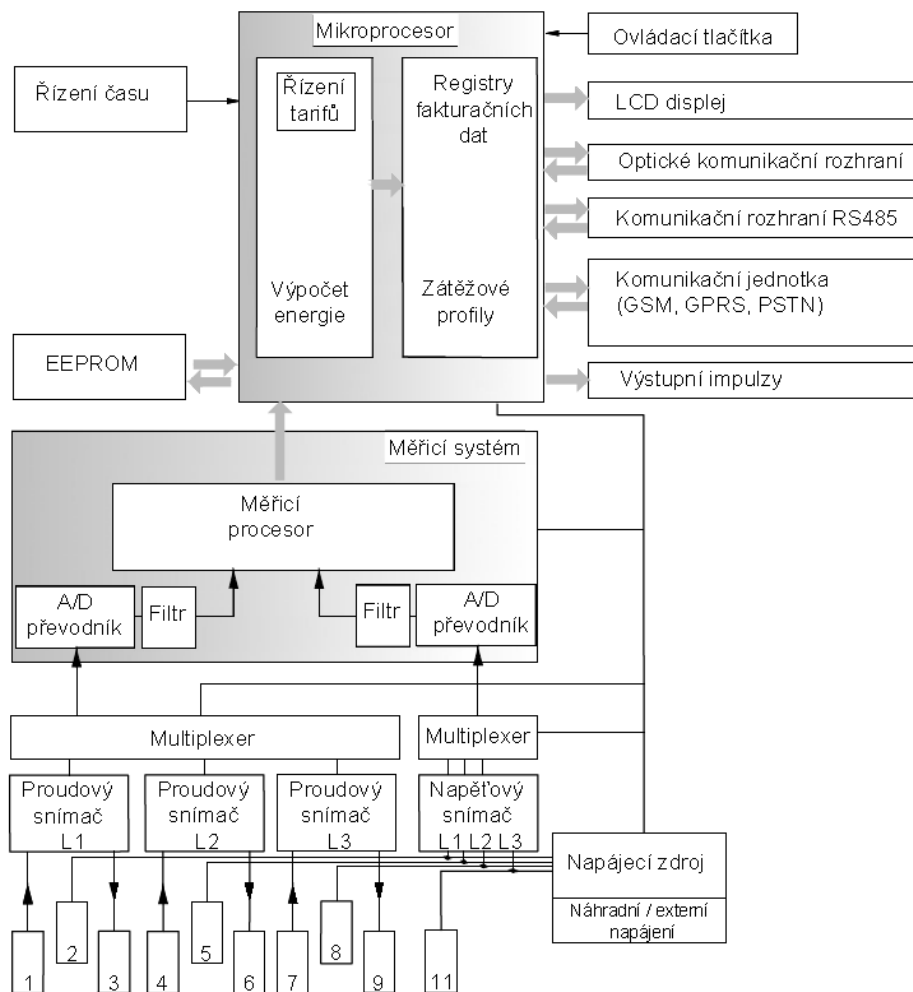
Požadované provedení statických elektroměrů určených pro nepřímé systémy fakturačního měření musí splňovat podmínky pro vícekvadrantní průběhové typy měření s možností nastavení algoritmů pro vyhodnocení naměřené elektrické energie podle (4) nebo (5),(6) a (7). Dalším požadavkem je možnost jejich zákaznické softwarové parametrizace umožňující přizpůsobení měřicího přístroje konkrétním parametřům nepřímého měřicího systému daného odběrného místa a požadavkům servisních činností.

Další výhodou použití statických elektroměrů v systémech nepřímého měření jsou možnosti rozšíření o komunikační rozhraní, jako jsou například optická rozhraní, RS 232, RS 485 a komunikační rozhraní pro dálkový odečet dat s technologiemi GSM, GPRS, PSTN. Komunikační možnosti elektroměrů jsou tak využívány ve spojení s podpůrným servisním softwarem, kterým lze ověřit stav přístroje osazeném na OPM [12][13][14].

Základní požadavky na pouzdro statického elektroměru jsou stejné jako u indukčního elektroměru. To znamená zajištění mechanické ochrany měřicího systému, požadovaného krytí IP a uchycení přístroje. Připojení přístroje k měřenému obvodu zajišťuje také hlavní svorkovnice rozšířená v návaznosti na provedení přístroje o svorky umožňující připojení vstupních /výstupních impulsů, RS rozhraní, externího tarifního ovládní, komunikačních jednotek případně externího napájení. Čelní štítek je vybaven LCD displejem pro zobrazení naměřených hodnot a ve většině případů i základním optickým komunikačním rozhraním. Důležitou součástí je optický kalibrační indikátor, realizovaný LED diodou, indikující měřicí činnost elektroměru [12][13][14].

Měřicí systém je umístěn na dvou deskách plošného spoje uvnitř pouzdra elektroměru. Na první desce navazující na hlavní svorkovnici jsou umístěné měřicí a napájecí obvody. Druhá deska je osazena obvody pro zpracování dat včetně komunikačních rozhraní [12] [14].

Příklad blokového uspořádání třífázového nepřímého statického elektroměru je uveden na *Obr.10*.



Obr. 10 Příklad blokového schéma trojfázového statického elektroměru [12][13][14].

Úkolem vstupního proudového a napěťového snímače je poměrné převedení měřeného napětí a proudu na odpovídající velikost napěťového signálu. Velikost výstupního signálu v řádech milivoltů zaručí možnost následného zpracování v polovodičových obvodech.

Napěťový snímač je konstruován s maximální vstupní impedancí, aby nezatěžoval měřený obvod. Jako senzor napětí může být využit napěťový transformátor, piezoelektrický senzor, kapacitní, induktivní nebo nejvíce rozšířený odporový dělič [12].

Konstrukce proudového snímače musí naopak pro minimální zatížení zajistit protékajícímu proudu nepatrnou vstupní impedanci. Pro proudové snímače jsou využívány například proudový transformátor, Rogowského cívka nebo senzor na principu Hallova efektu. Výstupem proudového senzoru je napětí úměrné odpovídající hodnotě měřeného proudu [12].

Vstupní obvody zároveň plní ochrannou funkci díky nainstalované přepětové a nadproudové ochraně.

Takto upravené analogové napěťové signály odpovídající měřenému napětí a proudu jsou v následném zpracování přivedeny na vstup měřicího systému. Tento blok obsahuje vstupní multiplexer (přepínání jednotlivých fází), A/D převodník a digitální filtr. AD převodník

s obvyklou vzorkovací frekvencí pohybující se v rozmezí 2 až 6,4kHz [13][14] dle typu přístroje převede analogový napěťový signál na digitální. Kvalita a četnost vzorkování je rozhodující pro přesnost celého měřicího systému elektroměru.

Digitální vzorky odpovídající okamžitým hodnotám napětí a proudu jsou přivedeny na vstup měřicího procesoru, který provede zpracování hodnot ve formě číslcových výpočtů. Výpočty jsou samostatné pro jednotlivé měřené fáze.

Hlavní vypočtené hodnoty jsou:

- činný výkon,
- jalový výkon,
- činnou elektrickou energii,
- jalovou elektrickou energii,

A hodnoty servisních dat dostupné podle typu přístroje:

- efektivní hodnotu fázového napětí,
- efektivní hodnotu proudu ve fázi,
- proud nulovým vodičem,
- zdánlivou energii,
- frekvenci sítě,
- fázový posun napětí, napětí a proudu,
- celkové harmonické zkreslení (THDA, THDU, THDI) [12][13][14].

Tyto výstupní hodnoty měřicího procesoru jsou přivedeny na vstup mikroprocesoru, který provede následné zpracování podle předem nastavených algoritmů, které jsou předmětem zákaznické parametrizace. Nastavení tak umožní například volbu následující položek:

- přiřazení měřených veličin  $P$ ,  $Q$ ,  $A$  a  $R$  příslušným registrům na základě výpočtu energie,
- převodový poměr napěťových a proudových měřících transformátorů,
- nastavení časové základny pro vyhodnocované intervaly energie,
- délka měřících period pro záznam zátěžových profilů,
- přiřazení tarifních tabulek k tarifním registrům,
- výběr registrů pro ukládání historických hodnot,
- výběr kanálů pro ukládání zátěžového profilu, případně profilu zvolených zaznamenávaných servisních veličin,
- výběr hodnot zobrazovaných na display v režimu automatického, manuálního a servisního rolování dat,
- formát registrů pro zobrazování na display a pro externí odečet,
- definice výstupních rozhraní pro předávání impulsů pro další systémy (např. kompenzace) v závislosti na naměřeném výkonu,
- zobrazení dalších indikátorů stavu systému na display,
- definice událostí stavu měřidla pro sledování poruch,
- meze záznamu výpadků, přepětí, podpětí a nadproudu,
- heslování a zabezpečení přístupových rozhraní [12][13][14].



Mikroprocesor na základě definované volby těchto položek následně zajistí uložení a předání finálních naměřených dat do paměti a na příslušná rozhraní - LCD displeje, optický komunikační port, modem a impulsní výstup.

Princip výpočtu měřicího procesoru pro stanovení elektrické energie je rozdělen do dvou samostatných kroků zpracování:

- výpočet okamžité hodnoty výkonu - vynásobením okamžitých hodnot napětí a proudu,
- výpočet hodnoty energie – integrováním okamžitého výkonu za dobu jedné sekundy [12].

Hodnota činného výkonu  $P$  je spočtena pro každou fázi samostatně vynásobením napětí a činné složky proudu, která je ve fázi s tímto napětím:

$$P = U \cdot I_p \quad (6.5)$$

Kde  $I_p$  hodnota reálné složky vzorku proudu.

Před výpočtem jalového výkonu  $Q$  musí být okamžité hodnoty napětí fázově posunuty o  $90^\circ$ , aby platilo:

$$Q = U \cdot I_Q \quad (6.6)$$

Kde  $I_Q$  hodnota imaginární složky vzorku proudu

Fázový posun je u čtyřkvadrantních měřicích systémů proveden zpožďovacími obvody filtrů nastavených pro základní harmonickou měřeného napětí. Při tomto výpočtu tak nejsou zohledněny vyšší harmonické složky výkonů [12].

Efektivní hodnoty fázových napětí a proudů jsou spočteny jako odmocnina podílu sumy kvadrátu okamžitých hodnot za daný vyhodnocovaný úsek a periody  $T$  [12]:

$$U = \sqrt{\frac{\int_0^T u^2 dt}{T}} \quad (6.7)$$

$$I = \sqrt{\frac{\int_0^T i^2 dt}{T}} \quad (6.8)$$

Zdánlivý výkon je stanoven násobkem efektivních hodnot jednotlivých fází [12]:

$$S = U \cdot I$$

Proud nulovým vodičem je vypočten geometrickým součtem okamžitých hodnot proudu [12]:

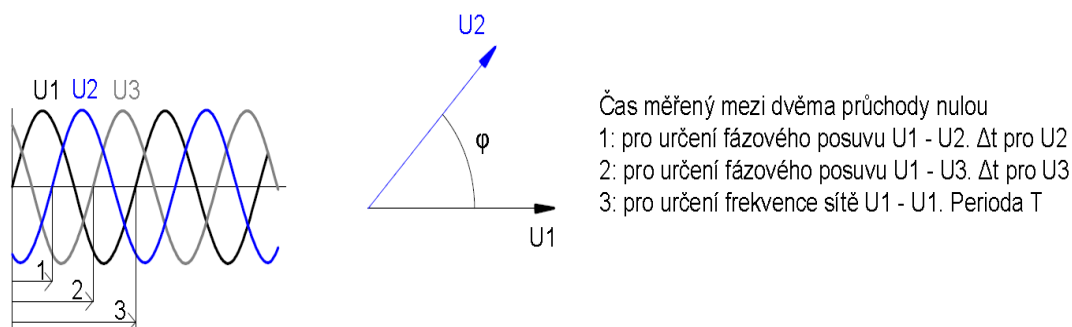
$$i_N = i_{L1}(t) + i_{L2}(t) + i_{L3}(t) \quad (6.9)$$

Frekvence sítě je spočtena na základě měření času mezi dvěma průchody nulou daného průběhu napětí (změny kladné půlperiody na zápornou).

Obdobným způsobem měření času jsou určeny i úhly vzájemných fázových posuvů napětí a proudů. Zobrazované úhly jsou obvykle vztaheny k napětí  $U_{L1}$  a jsou zobrazeny jako kladný úhel [12]:

$$\varphi = 2\pi \cdot f \cdot \Delta T = 2\pi \frac{\Delta t}{T} \quad (6.10)$$

Kde  $\Delta t$  difference měřeného času.



Obr. 11 Grafické zobrazení výpočtu fázového posuvu [12].

Pro výpočet celkového harmonického zkreslení jsou napětí a proudy vedeny přes pásmový filtr, který odstraní průběh základní harmonické. Hodnota harmonického zkreslení je pak stanovena porovnáním hodnot průběhu základní harmonické a hodnot průběhu vyšších harmonických [12].

Zátěžový profil pro hodnoty činného a jalového výkonu je sestaven měřicím procesorem na základě integrace každé hodnoty okamžitého výkonu za předem nastavenou měřicí periodu. Do registru příslušného zátěžového profilu pak uloží průměrnou hodnotu výkonu, čas a datum jejího naměření [12].

## 7 Přístrojové transformátory

Úkolem přístrojových transformátorů je transformace hodnot primárních proudů nebo napětí na hodnoty sekundární určené pro vstupní rozsah měřicích případně jisticích přístrojů.

Další výhodou použití přístrojových transformátorů z pohledu bezpečnosti obsluhy a měřicích přístrojů je galvanické oddělení a prostorové oddálení měřicího zařízení od měřeného místa především u měření v systémech na napěťových hladinách vn a vvn. Přístrojové transformátory umožňují účelně a přehledně soustředit měřicí a jisticí přístroje mimo silové rozvody například ve společných elektroměrových skříních a tím zpřehlednit a ulehčit obsluhu zařízení.

Vhodnou volbou nadproudové charakteristiky přístrojových transformátorů proudu je možné zajistit ochranu připojených měřicích systémů před účinky nadproudů při zkratech v měřené síti.

Uvedené vlastnosti upřednostňují měřicí transformátory pro použití v systémech fakturačního měření před jiným typem měřicích převodníků.

### 7.1 Provedení přístrojových transformátorů

Základním rozdělením můžeme přístrojové transformátory rozdělit na:

- měřicí,
- jisticí.

Měřicí přístrojové transformátory jsou určeny jako převodníky pro měřicí přístroje a proto musí splňovat požadovanou přesnost v okolí jmenovitých hodnot. V přechodných stavech jako je zkrat nebo přepětí, není naopak přesnost vyžadována. Pro účely fakturačního měření jsou měřicí transformátory podle zákona o metrologii č. 505/190 Sb. stanovená měřidla a musí být schváleného typu a úředně ověřené.

Jisticí přístrojové transformátory jsou určeny pro ochrany, pro které musí zajišťovat požadovanou přesnost při velkých nadproudech a nízkých napětích.

Měřicí i jisticí transformátory dělíme:

- transformátory proudu,
- transformátory napětí,

Měřicí transformátory mohou být:

- podle provedení určené pro vnitřní a venkovní umístění
- podle určení k montáži do soustavy nn, vn, vvn,
- podle konstrukce samostatné jednoúčelové, kombinované měřicí a jisticí, kombinované proudové a napěťové.

Měřicí transformátory proudu jsou konstrukčně řešeny jako podpěrné s montáží na konstrukci nebo průvlečné s montáží na nosný primární vodič v provedení jako jedno nebo třífázové. Podle typu přístroje jsou některé MTP řešeny s možností přepínání proudového rozsahu na primární případně na sekundární straně vinutí [15]. U průvlečných transformátorů je primární vinutí tvořeno provlečením silového vodiče magnetickým jádrem přístroje.

Měřicí transformátory napětí jsou provedeny jako jednopólově izolované nebo dvoupólově izolované určené výhradně pro Aronovo zapojení [15].

U kombinovaných transformátorů je napěťová a proudová část umístěna na společném izolátoru. Toto provedení je určené především pro použití na hladině vvn.

Měřicí transformátory jsou obvykle řešeny jako transformátory s jedno nebo více závitovým primárním vinutím uloženým společně se sekundárním vinutím na jednom jádře magnetického obvodu. Pracovní režim magnetického obvodu MT se od ostatních transformátorů liší značně proměnnou indukcí, pro kterou musí magnetický obvod, v daném rozsahu, zajistit konstantní přenos při nepatrných činných a jalových ztrátách. Pro splnění tohoto požadavku je magnetický obvod vyroben z feromagnetického materiálu s dostatečně velkou permeabilitou, která musí být konstantní pro daný pracovní rozsah buzení [7]. Pro snížení ztrát je jádro složené z orientovaných navzájem izolovaných plechů vyrobených ze slitiny Si a Fe případně slitiny Ni, Fe a dalších přísad jako Cu, Mo nebo Cr. U kombinovaných měřicích a jisticích transformátorů je v pouzdře umístěno jedno měřicí jádro a jedno nebo několik jisticích jader [15].

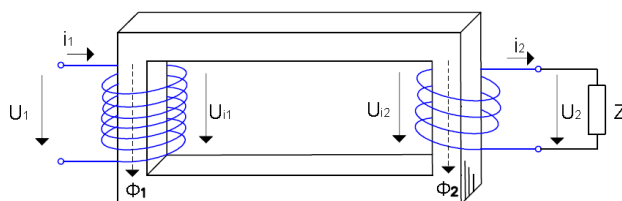
Pouzdro měřicích transformátorů je obvykle vytvořeno zalitím aktivních částí epoxidovou směsí, nebo kvalitním nehořlavým plastem. Tato zálivka pak zajišťuje elektrickou (izolační) a mechanickou pevnost přístroje.

Nezbytnou součástí pouzdra měřicích transformátorů je nezáměnné označení svorek vinutí, které musí zajistit:

- pro MTP v každém okamžiku shodný směr proudu na stejnojmenných svorkách sekundárního a primárního vinutí. Svorky primárního vinutí se značí velkými písmeny P1 – P2 pro MTP vn, případně K – L pro MTP nn. Značení výstupních sekundárních je provedeno malými písmeny s1 – s2 a k – l, v případě vícejádrového provedení MTP vn pak předřazená čísla značí pořadí vinutí (1s1-1s2, 2s1-2s2) [15] [16].
- pro MTN v každém okamžiku stejnou polaritu napětí na stejnojmenných svorkách primárního a sekundárního vinutí. Primární vinutí jednopólově izolovaného transformátoru A - N; u dvoupólově izolovaného transformátoru M, N. Sekundární vinutí pak analogicky malými písmeny a, n m, n. V případě více jádrového provedení je označení doplněno pořadovým číslem vinutí [15].

## 7.2 Princip činnosti přístrojového transformátoru

Přístrojový transformátor vychází z principu činnosti ideálního transformátoru, jehož schéma je uvedeno na Obr 12.



Obr. 12 Schéma principu přístrojového transformátoru

Základní částí je uzavřený magnetický obvod s velkou magnetickou vodivostí. Na ramenu magnetického obvodu jsou umístěna dvě vinutí: primární s  $N_1$  závitů a sekundární s  $N_2$  závitů. Je-li ke svorkám primárního vinutí připojeno střídavé napětí sinusového průběhu s okamžitou hodnotou napětí  $u_1$  prochází vinutím proud  $i_1$ , který vytvoří magnetický tok  $\Phi_1$  procházející magnetickým obvodem. Tento magnetický tok vybudí v sekundárním vinutí napětí  $u_2$ . Pokud je ke svorkám sekundárního vinutí připojena zatěžující impedance  $Z$ , prochází sekundárním obvodem proud  $i_2$ . Na základě Lenzova principu je magnetický tok  $\Phi_2$  vytvořený tímto proudem  $i_2$  reakční a působí proti směru magnetického toku  $\Phi_1$ . Ze vzájemné reakce magnetických toků pak vznikne výsledný magnetický tok  $\Phi$  [7].

Efektivní hodnotu indukovaného napětí v sekundárním vinutí pak určíme ze vztahu:

$$U_i = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot N \cdot f \cdot \Phi = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot \Phi \quad (7.1)$$

Kde	$U_i$	efektivní hodnota indukovaného napětí,
	$N$	počet závitů cívky transformátoru,
	$f$	frekvence napájecího napětí,
	$\Phi$	celkový magnetický tok.

Efektivní hodnotu primárního  $U_1$  a sekundárního  $U_2$  napětí získáme ze vztahu (7.1):

$$U_1 = 4,44 \cdot N_1 \cdot f \cdot \Phi \quad \text{a} \quad U_2 = 4,44 \cdot N_2 \cdot f \cdot \Phi \quad (7.2)$$

Podílem rovnic (7.2) pak získáme vztah pro transformační poměr transformátoru  $p$  [7]:

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (7.3)$$

### 7.3 Pracovní režim měřicích transformátorů

Měřicí transformátory napětí jsou ideálně provozovány v režimu naprázdno. Tímto nevzniká nežádoucí úbytek napětí. Protože MTN zapojený v měřicím obvodu je vždy zatížen nepatrným proudem  $I_2$  měřicích přístrojů (elektroměrů) není možné jeho převod považovat za přesný poměr. Tím je MTN zatížen chybou převodu. Velikost zatěžujícího proudu ovlivňuje i fázový posuv mezi primárním a sekundárním napětím a tím vzniká chyba úhlu. Z tohoto důvodu nesmí spotřeba přístrojů napojených na sekundární straně překročit dovolené zatížení transformátorů [1][7].

Porušením podmínky provozu MTN naprázdno (např. v případě zkratování sekundárního obvodu nebo připojením nedovolené zátěže) dojde k tomu, že sekundární obvod MTN bude zatížen nedovoleným proudem  $I_2$ , který může způsobit poškození vinutí přístroje svými tepelnými účinky. Proto je nutné sekundární vinutí MTN chránit proti přetížení vhodným jištěním.

Měřicí transformátor proudu je také zatížen chybou převodu a chybou úhlu. Pro minimalizování těchto chyb je nutné MTP provozovat v režimu nakrátko. To znamená s minimální zatěžovací impedancí, aby se v rámci dovoleného jmenovitého zatížení při daném sekundárním proudu  $I_2$  vystačilo s nepatrným napětím  $U_2$ . Malému indukovanému napětí  $U_2$  pak odpovídá malý magnetický tok  $\Phi$  a tím je zaručen požadavek na minimální magnetizační proud  $I_u$ . Ten pak tvoří jen minimální část primárního proudu  $I_1$ . Splnění těchto

podmínek zaručuje malý magnetický odpor jádra transformátoru – to znamená dostatečný průřez, kvalitní feromagnetický materiál (velká permeabilita bez vzduchové mezery) [1] [7].

Porušením podmínky provozu MTP nakrátko (např. v případě rozpojení sekundárního obvodu) dojde k tomu, že celý primární proud se stane magnetizačním a v sekundárním vinutí MTP se naindukuje vysoké napětí, které může poškodit izolaci přístroje.

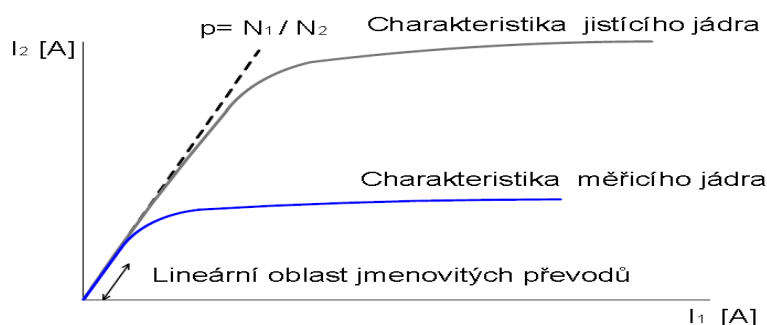
Pracovní režim platí v případě vícejádrových provedení MT pro všechny jeho sekundární vinutí. Nedodržení těchto podmínek například u pomocného jisticího jádra zásadním způsobem ovlivní přesnost i měřicího jádra [15][16].

#### 7.4 Základní parametry měřících transformátorů

Jmenovitý proud (MTP) a jmenovité napětí (MTN) primárního a sekundárního vinutí jsou na typovém štítku uváděny ve tvaru zlomku a udávají transformační poměr. Pro dosažení požadované přesnosti by se měly předpokládané provozní hodnoty napětí a proudu pohybovat v blízkosti jmenovitých hodnot. Toto pravidlo platí především pro MTP.

Jmenovitá zátěž MTP a MTN udává maximální možné zatížení transformátoru v měřeném rozsahu, při kterém nedojde k překročení dovolené chyby. Musí být volena s ohledem na spotřebu měřících přístrojů, zapojených v sekundárním obvodu MT a ztráty, způsobené spojovacím vedením. Skutečná zátěž musí být v rozsahu 25-100% jmenovité zátěže jádra včetně ztrát na vinutí [8][15][16].

Jmenovité nadproudové číslo pro MTP udávané pod označením FS je násobek jmenovitého primárního proudu, ve kterém dosáhne chyba proudu při jmenovité zátěži hodnoty 10%. Graficky je tento poměr zobrazen nadproudovou charakteristikou, jejíž příklad je uveden na Obr.13. Charakteristika udává závislost sekundárního proudu na primárním v nadproudové oblasti transformátoru proudu, kdy dochází k přesycení magnetického obvodu [15][16].



Obr. 13 Příklad převodní charakteristiky měřících transformátorů

Měřicí transformátory proudu jsou navrhovány s nízkou hodnotou nadproudového čísla FS a s nadproudovou charakteristikou v oblasti nad FS s minimálním stoupáním (nárůstem) z důvodu ochrany proudových obvodů elektroměrů před poškozením dynamickými a tepelnými účinky nadproudů (u jisticích transformátorů je tento požadavek opačný, aby jisticí přístroje pracovali spolehlivě i při zkratech).

Třída přesnosti  $T_p$  přístrojového transformátoru určuje mezní dovolené hodnoty chyby proudu a úhlu při dané zátěži pro měřicí rozsah primárních hodnot měřených veličin a pro jmenovitý kmitočet a zatížení.

Podle dovolených chyb jsou měřicí transformátory zařazeny do tříd přesnosti:

- 0,1 pro přesné laboratorní měření,
- 0,2 a 0,5 (0,5S) pro energetické fakturační měření (S značí rozšíření požadované přesnosti proudového rozsahu od 1% jmenovitého proudu),
- 1 pro podružné měření,
- 3 pro orientační kontrolní
- 5P a 10P pro jistící transformátory[15][16].

Požadované parametry měřicích transformátorů pro systémy nepřímého fakturačního měření [3] jsou uvedeny v přehledové tabulce 2.

Tabulka 2 Parametry měřicích transformátorů. Převzato z [8] [9].

		Třída přesnosti $T_p$ [%]	Jmenovitá zátěž [VA]	Jmenovitý převod
vvn	MTP	0,2S	10	x/1 (5) A
	MTN	0,2	10	$110000/\sqrt{3} / 100/\sqrt{3}$ V $110000/\sqrt{3} / 110/\sqrt{3}$ V
vn	MTP	0,5S	10	x/5 A
	MTN	0,5	10	$x/\sqrt{3} / 100/\sqrt{3}$ V pro jednopólově izolované MTN $x/\sqrt{3} / 100$ V pro dvoupólově izolované MTN v Aronově zapojení
nn	MTP	0,5S	5 -10	x/5 A
	MTN	-		-

## 8 Analýza poruch měřicí soupravy nepřímého měřicího systému

Předpoklad správného zapojení proudového a napěťového obvodu je základní, ne však jedinou, podmínkou bezchybné funkce měřicího systému. Z popisu, uvedeného v předchozích kapitolách je zřejmé, že systémy nepřímého měření v porovnání s přímým měřením obsahují mimo samotného elektroměru, také měřicí transformátory, zkušební svorkovnici a propojovací vedení včetně předepsaného jištění. Tyto prvky při své poruše, nebo při nesprávném zapojení mohou vnést do přesnosti měřicího systému značnou chybu. A tím zásadním způsobem ovlivnit množství naměřené činné i jalové elektrické energie, které pak vede k nesprávnému vyúčtování.

V praxi používanou metodou pro diagnostiku poruch měřicího systému s dostatečnou výpovědíschopností o stavu systému je analýza zobrazením vektorů napětí a proudu v sekundárním obvodu MT. Analýza je založena na znalosti správného zobrazení vektorů vycházející z dané metody měření uvedených v kapitole 4, předpokládaného induktivního nebo kapacitního charakteru zatížení měřené trojfázové soustavy. A ze směru toku proudu pro odběr a dodávku. Výhodou této metody je možnost diagnostiky bez omezení dodávky elektrické energie. Další výhodou v systémech vn a vvn je dostačující provedení diagnostiky v sekundárním obvodu měřicího systému na hladině bezpečného napětí. V případě, že jsou měřicí systémy osazeny statickými elektroměry podporující tuto servisní funkci, je další výhodou možnost provádět diagnostiku z centrálního pracoviště pomocí vzdáleného připojení.

### 8.1 Analýza napěťového obvodu měřicí soupravy při poruše

Nejčastějším následkem poruchy v napěťovém obvodu měřicího systému je nedostatečná velikost nebo úplná ztráta napětí v jedné nebo více fázích. Příčinou může být vybavení jisticí pojistky, přerušený vodič spojovacího vedení nebo porucha primárního případně sekundárního vinutí MTN vedoucí ke ztrátě funkčnosti přístroje nebo k nesprávnému transformačnímu poměru.

Základní diagnostikou je měření velikosti napětí, které je možné provést vhodným voltmetrem nebo zkoušečkou nízkých napětí. V současnosti patří parametr velikosti napětí k základním plošně vyhodnocovaným servisním datům odečítaných přímo z elektroměrů. Příklad odečteného průběhu napětí zobrazující poruchu v napěťovém obvodu je uveden na *Obr.16*. Velikost napětí je však pro výpočet chyby měření nedostatečný parametr, z tohoto důvodu musíme určit i změnu úhlu fázového posuvu. Tím narůstá význam použití pro diagnostiku poruch metodu umožňující fázorové zobrazení napětí a proudů.

Napěťový obvod pro čtyřvodičové připojení elektroměru lze pro potřeby analýzy charakterizovat jako symetricky napájenou trojfázovou soustavu s vyvedeným středním vodičem. Připojením elektroměru, podle schématu uvedeného v příloze č.3, získáme souměrné zatížení soustavy zapojené do hvězdy. Napětí uzlu  $U_N$  je díky přímému spojení s uzlem zdroje vždy, i v případě poruchy, rovno nule. To znamená, že pro všechny fázory fázových napětí  $U_{L1}$ ,  $U_{L2}$  a  $U_{L3}$  na svorkách elektroměru platí [5]:

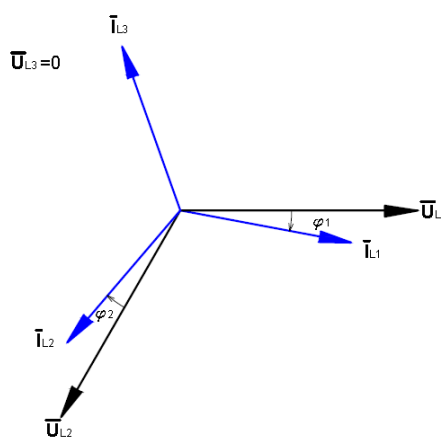
$$U_{LX} = U_{OLX} - U_N = U_{OLX} - 0 = U_{OLX} \quad (8.1)$$

Kde  $x$  1,2,3  
 $U_{OL}$  fázor napětí „zdroje“ napěťového měřicího obvodu



Zdroj pro napájení napěťového měřicího obvodu je v případě polopřímého měření přímo připojená měřená soustava nn s fázovým napětím 230V . V případě vvn je zdrojem sekundární vinutí MTN poskytující napětí podle jmenovitého převodu  $100/\sqrt{3}$  V nebo  $110/\sqrt{3}$  V).

Příklad uspořádání fázorů vyplývající z rovnice (8.1) pro souměrně zatíženou soustavu při poruše napětí například v L3 je uveden na Obr.14. Fázor proudu  $I_3$  postižené fáze se v důsledku poruchy napětí nezmění. (Jeho časté chybné zobrazení měřicím přístrojem při prováděné diagnostice je způsobeno úplnou ztrátou referenčního napětí  $U_{L3}$  pro stanovení fázového posuvu).



Obr. 14 Příklad uspořádání fázorů pro souměrně zatíženou soustavu při poruše napětí v L3

V nepostižených fázích se při poruše velikost ani fázový posun napětí nezmění. Pro metodu měření výkonů tím zůstávají v nepostižených fázích wattmetry v činnosti. Velikost naměřeného činného a jalového výkonu je tedy závislá na počtu poruchou postižených fází a na velikosti proudu tekoucího těmito fázemi. V případě zcela souměrného zatížení měřené soustavy lze velikost naměřeného činného výkonu v uvedeném příkladu vyjádřit úpravou rovnice (4.1).

$$\begin{aligned}
 P &= 230 \cdot I \cdot \cos(\varphi) + 230 \cdot I \cdot \cos(\varphi) + 0 \cdot I \cdot \cos(\varphi) = \\
 &= \frac{2}{3} \cdot 230 \cdot I \cos \varphi = \frac{2}{3} \cdot P_{skutečný}
 \end{aligned}
 \tag{8.2}$$

Obdobně je pak možné vyjádřit i jalový výkon podle rovnice (4.3).

Poruchou způsobená chyba měření činného i jalového výkonu při souměrném zatížení je -33%. Pro extrémní nesouměrnost proudového zatížení jednotlivých fází měřené soustavy se však chyba měření může pohybovat v celém intervalu od 0% (při proudově nezátížené postižené fázi) do -100% (v případě proudově zatížené pouze postižené fázi).

Protokol diagnostiky tohoto typu poruchy v reálném provozu je v Příloze Obr.P5.

Pro třívodičové připojení elektroměru podle Aronova zapojení je rozložení vektorů napětí při poruše závislé na postižené fázi. Napěťový obvod lze pro potřeby analýzy charakterizovat jako symetricky napájenou trojfázovou soustavu se zátěží zapojenou do trojúhelníka (bez vyvedeného středního vodiče) o velikosti sdruženého napětí 100V. Připojením elektroměru k napěťovému obvodu se změní zapojení zátěže do otevřeného trojúhelníka („V“) se středem

v L2. V důsledku přímého spojení fáze L2 je napětí uzlu  $U_N$  rovno napětí  $U_{L2}$  ( $U_{L2} \angle 120^\circ$ ). Pro fázory sdružených napětí  $U_{L12}$  a  $U_{L32}$  na svorkách připojeného elektroměru v bezporuchovém stavu platí [5]:

$$U_{L12} = U_{0L1} - U_{L2} = U_{L12} \angle 30^\circ \quad (8.3)$$

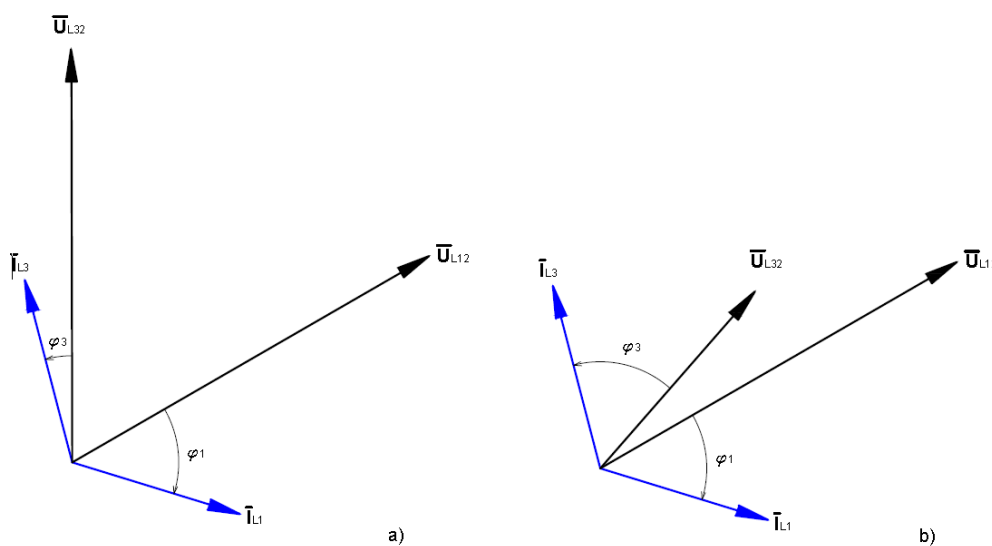
$$U_{L32} = U_{0L3} - U_{L2} = U_{L32} \angle 90^\circ \quad (8.4)$$

Při poruše jedné z krajních fází, například v důsledku vybavení vn pojistky MTN v L3 ( $U_{0L3} = 0$ ), se na svorkách elektroměru změní velikost a fázový posun napětí  $U_{L32}$ . Tato změna je popsána rovnicí:

$$U_{L12} = U_{0L1} - U_{L2} = \frac{100}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ - \frac{100}{\sqrt{3}} \angle -120^\circ = 100 \angle 30^\circ V \quad (8.5)$$

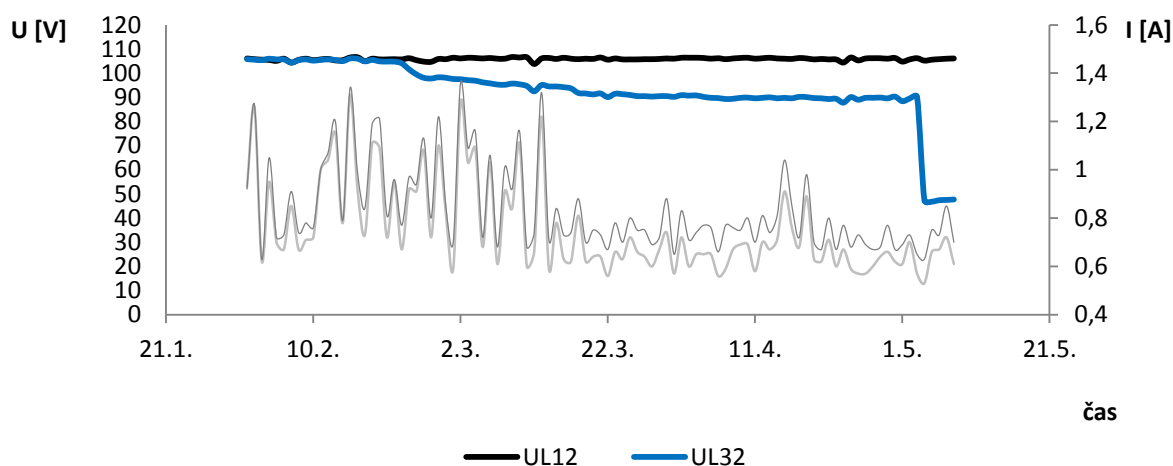
$$U_{L32} = 0 - U_{L2} = 0 - \frac{100}{\sqrt{3}} \angle -120^\circ = \frac{100}{\sqrt{3}} \angle 60^\circ V \quad (8.6)$$

Změnu rozložení vektorů napětí před a při analyzované poruše je možné porovnat z fázorového diagramu na Obr. 15.



Obr. 15 Fázorový diagram před poruchou a) a při poruše napětí v L3 b)

Praktický příklad naměřeného průběhu napětí dokládající poruchu vn pojistky MTN ve fázi L3 je uveden na Obr.16. Dlouhotrvající pokles naměřeného napětí zaznamenaný v servisních datech elektroměru je způsobený úbytkem napětí na pojistce, po přerušení vodivého spoje vybavením pojistky je naměřena typická hodnota napětí  $U_{L32} = 57,7 V$ .



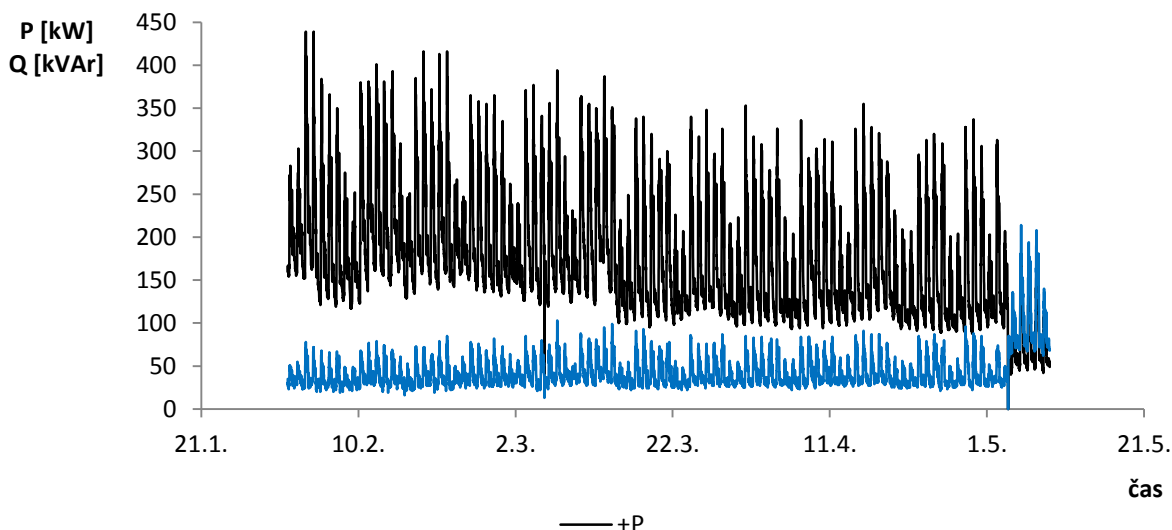
Obr. 16 Průběh naměřených hodnot napětí a proudu při poruše napětí  $U_{L32}$

Výkon naměřený při této poruše wattmetry v Aronově zapojení je ovlivněn nejen změnou velikosti napětí  $U_{L32}$ , ale především změnou úhlu fázového posunu. Dosazením těchto hodnot do rovnice (4.8) a (4.9), tak získáme velikost naměřeného výkonu:

$$P_{W1} = 100 \cdot I_{L1} \cdot \cos(30^\circ - \varphi_{I1}) \quad (8.7)$$

$$P_{W3} = \frac{100}{\sqrt{3}} \cdot I_{L3} \cdot \cos(60^\circ - \varphi_{I3}) \quad (8.8)$$

Za předpokladu souměrného zatížení měřené soustavy se chyba měření činného výkonu díky změněnému fázoru napětí při uvedené poruše pohybuje kolem -33%. Velikost naměřeného jalového výkonu určeného výpočtem z rovnice (4.10) se naopak neúměrně zvýší na až na hodnotu kolem 200% skutečného jalového výkonu. Výpočet vzniklé chyby dokládá na Obr.17 záznam zátěžového profilu činného a jalového výkonu naměřeného při analyzované poruše.



Obr. 17 Naměřené hodnoty zátěžového profilu činného a jalového výkonu při poruše napětí  $U_{L3}$

V případě poruchy napětí ve fázi L2, kdy dochází k přerušení přímého spojení napětí  $U_{L2}$  se středním uzlem zátěže je za předpokladu  $Y_{L2}=0$  a  $Y_N=0$   $Y_{L1}=Y_{L3}=Y$  fázor napětí  $U_N$  roven[5]:

$$U_N = \frac{U_{0L1} \cdot Y + U_{0L3} \cdot Y}{2 \cdot Y} = \frac{\frac{100}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ + \frac{100}{\sqrt{3}} \angle 120^\circ}{2} = \frac{100}{2\sqrt{3}} \angle 60^\circ = 28,85 \angle 60^\circ V \quad (8.9)$$

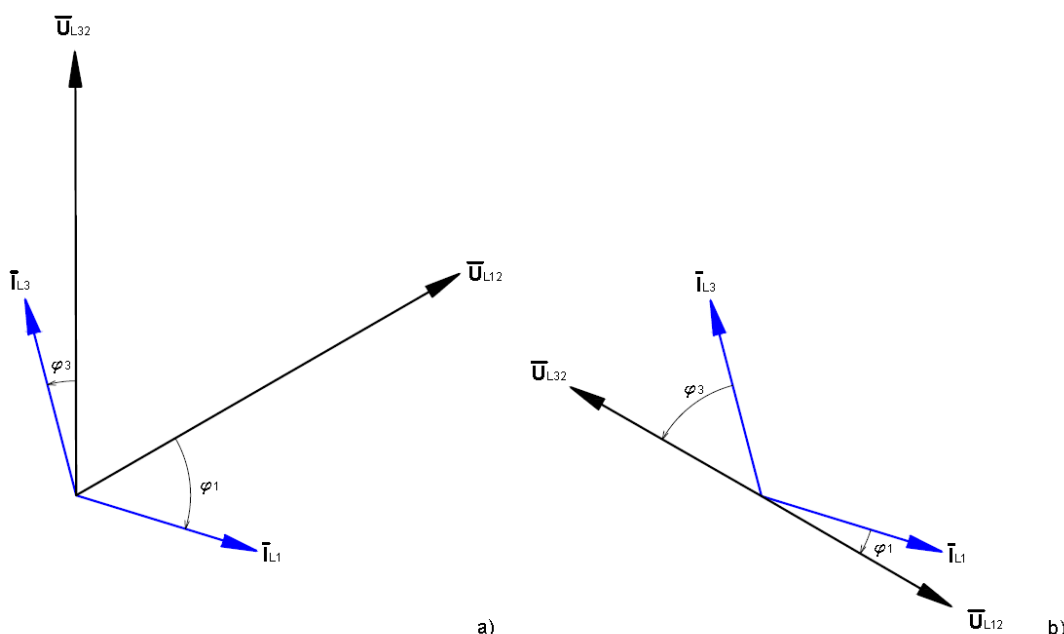
Kde  $Y$  je admittance jednotlivých fází.

Fázory sdružených napětí na svorkách elektroměru  $U_{L12}$  a  $U_{L32}$  po dosazení  $U_N$  do rovnice (8.3) a (8.4) změni svoji velikost i fázový posun:

$$U_{L12} = \frac{100}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ - \frac{100}{2\sqrt{3}} \angle 60^\circ = 50 \angle -30^\circ V \quad (8.10)$$

$$U_{L32} = \frac{100}{\sqrt{3}} \angle 120^\circ - \frac{100}{2\sqrt{3}} \angle 60^\circ = 50 \angle 150^\circ V \quad (8.11)$$

Na Obr. 18 je možné porovnat vypočtenou změnu rozložení vektorů napětí před a při poruše napěťového obvodu v L2.



Obr. 18 Fázorový diagram před poruchou a) a při poruše napětí v L2 b)

Do výpočtu výkonů metodou Aronova zapojení pak dosadíme do rovnic (4.8), (4.9) fázory napětí  $U_{L12}$  a  $U_{L32}$  s méně než poloviční velikostí a značně odlišným fázovým posuvem:

$$P_1 = 50 \cdot I_{L1} \cdot \cos(-30^\circ - \varphi_{I1}) \quad (8.12)$$

$$P_3 = 50 \cdot I_{L3} \cdot \cos(150^\circ - \varphi_{I3}) \quad (8.13)$$

Chyba měření činného a v tomto případě i jalového výkonu při poruše napětí v L2 za stejného předpokladu souměrného zatížení dosahuje hranice -50%.

## 8.2 Analýza proudového obvodu měřicí soupravy při poruše

Nejčastější následky poruch v proudovém obvodu měřicího systému způsobí změnu velikosti proudu nebo změnu fázového posunu.

Nesprávná velikost proudu v proudovém obvodu vzniká při ztrátě funkce MTP, přerušením a částečným nebo plným zkratováním proudových obvodů. Pro diagnostiku a stanovení chyby měření výkonu v tomto případě vzniku poruchy je nutné porovnat skutečnou velikost proudu v měřené soustavě s velikostí proudu protékajícího připojeným elektroměrem. To však z důvodu bezpečnosti v soustavách vn a vvn není možné, proto se ve většině případů takovýto typ závady diagnostikuje ověřením MTP v autorizovaném metrologickém středisku. Zapojení a vodivost proudového obvodu je ověřena pouze v beznapěťovém stavu měřené soustavy.

V důsledku chybného zapojení proudového obvodu je nejčastějším zdrojem chyby měření nesprávná velikost vzájemného fázového posuvu  $\varphi$  mezi napětím a proudem postižených fází. Z rovnic (4.1), (4.3) a v případě Aronova zapojení z (4.8), (4.9) a (4.11) pro výpočet činného a jalového výkonu je zřejmé, že úhel fázového posuvu  $\varphi$  (4.2) je rozhodující pro určení velikosti průmětu činné nebo jalové složky proudu do směru daného napětí.

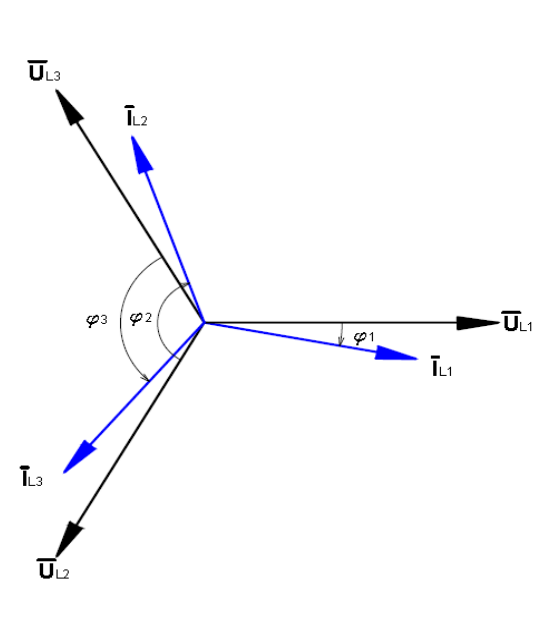
Chyba v zapojení měřicího systému vznikne nedodržením stejného sledu fází mezi napěťovým a proudovým obvodem nebo nedodržením správné polaroty připojení MTP. Případně současnou kombinací obou případů. Diagnostiku chybného zapojení lze provést bez omezení dodávky elektřiny do OM s výhodou použitím metody zobrazení vektorů napětí a proudu. Je však potřeba správného vyhodnocení především podle charakteru odebíraného proudu. Největší riziko chybného vyhodnocení nastává u OM s instalovaným zdrojem pro výrobu elektřiny připojeným do jedné fáze.

V následujících příkladech je uveden přehled fázorových diagramů, které znázorňují rozložení vektorů v nejčastější kombinaci nesprávného zapojení proudového obvodu. Vzniklá chyba v měření je u každého příkladu prezentována výpočtem činného a jalového výkonu dosazením hodnot z tabulky do rovnic daných metod měření (4.1), (4.3) a (4.8), (4.9), (4.10), (4.11).

Pro názornost jsou příklady řešeny pro ideální případ souměrného zatížení měřené soustavy, kterému odpovídá proud v proudovém obvodu 2A s účínkem  $\cos \varphi = 0.98$ . Porovnání těchto teoretických předpokladů s naměřenými hodnotami je možné z přiložených protokolů pořízených při diagnostice v reálném provozu. Tato diagnostika byla provedena měřicím etalonem WS2000 paralelně připojeném k diagnostikovanému měřicímu systému.

Tabulka 3 Nedodržení sledu fází proudového obvodu čtyřvodičově připojeného elektroměru

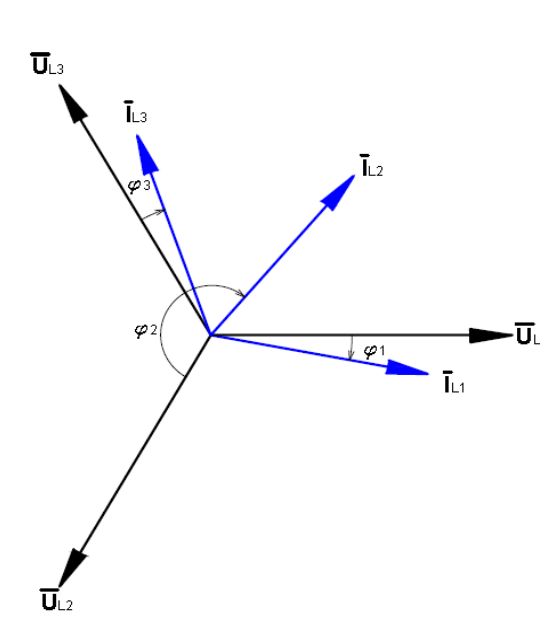
Sled fází	L1	L2	L3
	U [V]	230	230
I [A]	2	2	2
$\varphi_U$ [°]	0	-120	120
$\varphi_I$ [°]	-10	110	-130
P [W]	453,01	-295,68	-157,33
Q [VAr]	79,88	352,38	-432,25
P [W]	0		
Q [VAr]	0		
Chyba P	-100		
Chyba Q	-100		



Protokol diagnostiky tohoto typu poruchy v reálném provozu je uložený v Příloze Obr.P6.

Tabulka 4 Nesprávná polarita připojení MTP v L2 čtyřvodičově připojeného elektroměru

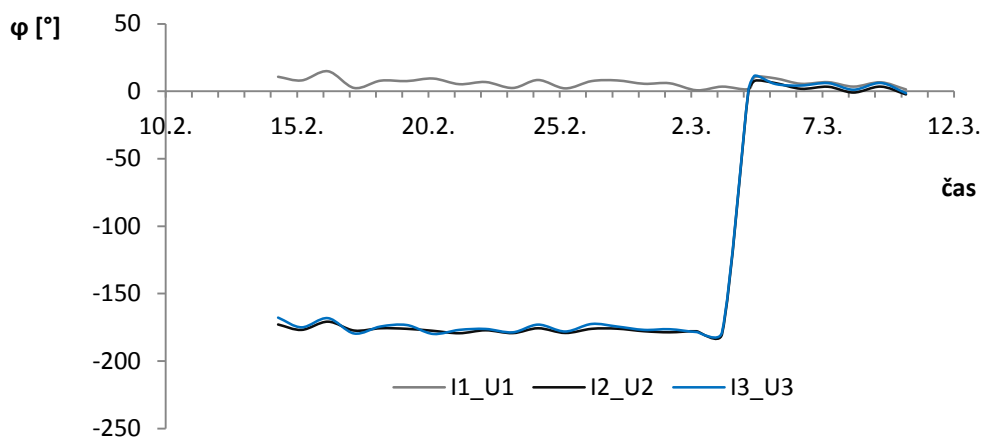
Sled fází	L1	L2	L3
U [V]	230	230	230
I [A]	2	2	2
$\varphi_U$ [°]	0	-120	120
$\varphi_I$ [°]	-10	50	110
P [W]	453,01	-453,01	453,01
Q [VAr]	79,88	-79,88	79,88
P [W]	453,012		
Q [VAr]	79,88		
Chyba P	-66.66		
Chyba Q	-66.66		



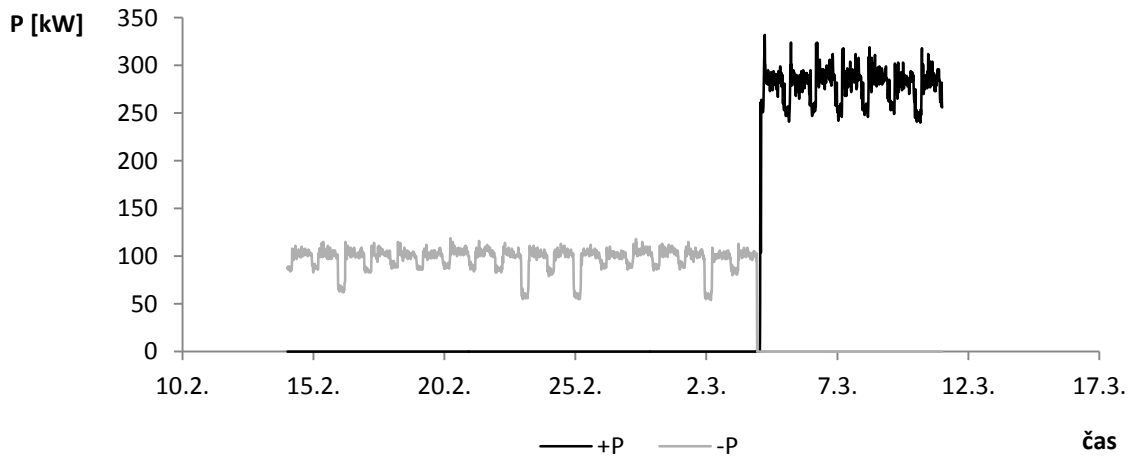
Protokol diagnostiky tohoto typu poruchy v reálném provozu je uložený v Příloze Obr.P7.

V případě čtyřkvadrantního měření s vyhodnocením podle (3.5) a (3.6) je v důsledku tohoto nesprávného zapojení velikost naměřeného výkonu ve fázi L2 vyhodnocena v kvadrantu

dodávky. Toho je možné využít při opravě naměřených dat. V případě vyhodnocení podle (3.4) je výkon v L2 odečten od L1 a L3. Tento případ mimo teoretického výpočtu dokumentuje i odečtený průběh fázového posuvu *Obr. 19* a naměřeného výkonu *Obr.20* při nesprávné polaritě připojení MTP v L2 a L3.



*Obr. 19* Průběh fázového posuvu při nesprávné polaritě připojení MTP v L2 a L3



*Obr. 20* Naměřený výkon při nesprávné polaritě připojení MTP v L2 a L3

Tabulka 5 Nesprávná polarita připojení MTP v kombinaci s nedodržením sledu fází proudového obvodu čtyřvodičově připojeného elektroměru

	Sled fází	L1	L2	L3
	U [V]	230	230	230
	I [A]	2	2	2
	$\varphi_U$ [°]	0	-120	120
	$\varphi_I$ [°]	-10	110	50
	P [W]	453,01	-295,68	157,32
	Q [VAr]	79,88	352,38	432,25
	P [W]	314,65		
	Q [VAr]	864,51		
	Chyba P	-76,84		
	Chyba Q	>260		

Protokol diagnostiky tohoto typu poruchy v reálném provozu je uložený v Příloze Obr.P8.

Tabulka 6 Nedodržení sledu fází proudového obvodu v Aronově zapojení

	Sled fází	L12		L32
	U [V]	100	-	100
	I [A]	2	-	2
	$\varphi_U$ [°]	30	-	90
	$\varphi_I$ [°]	110	-	-10
	P [W]	34,73	-	-34,73
	P [W]	0		
	Q [VAr]	-120,308		
	Chyba P	-32,04		
	Chyba Q	Nelze stanovit		

Protokol diagnostiky tohoto typu poruchy v reálném provozu je uložený v Příloze Obr.P9.

V případě tohoto nesprávného zapojení je jalový výkon chybně vyhodnocen jako výkon kapacitního charakteru.



Tabulka 7 Nesprávná polarita připojení MTP v L1 v Aronově zapojení

	Sled fází	L12		L32
	U [V]	100	-	100
	I [A]	2	-	2
	$\varphi_U$ [°]	30	-	90
	$\varphi_I$ [°]	170	-	110
	P [W]	-153,2	-	187,93
	P [W]	34,732		
	Q [VAr]	590,88		
	Chyba P	-89,81		
	Chyba Q	>882		

Protokol diagnostiky tohoto typu poruchy v reálném provozu je uložený v Příloze Obr.P10.

V uvažovaném ideálním případě souměrného zatížení měřené soustavy se výkony jednotlivých fází v důsledku chybného fázového posuvu vzájemně odečítají. Chyba měření činného a jalového výkonu tak může dosáhnout až uvedených -100% pro daný způsob připojení. Pro měření výkonu v reálné síti již nelze ve většině případů uvažovat souměrné zatížení. Výsledná chyba v měření výkonu je pak touto nesouměrností také ovlivněna. Chybu v naměřeném celkovém množství elektrické energie dále ovlivní samostatné vyhodnocení pro každou fázi (5) a (6).

## 9 Závěr

V předložené bakalářské práci jsem se pokusil pro oblast fakturačního měření popsat všechny důležité aspekty použití nepřímo připojených měřicích systémů. S pomocí uvedené literatury a vlastních zkušeností jsem uvedl přehled legislativních a technických norem stanovující v České republice požadavky na zřízení a provozování fakturačního měření. Na základě těchto požadavků jsem v navazující kapitole popsal jednotlivé typy měření, která definují způsob měření, vyhodnocení a předání dat o množství dodané nebo odebrané elektřiny.

Pro pochopení funkce měřicích systémů jsem uvedl princip dvou používaných metod měření výkonů pro systémy s trojvodičově a čtyřvodičově připojenými elektroměry. Pro rozšíření využití uvedených metod v oblasti měření velkých výkonů v soustavách nízkého, vysokého a velmi vysokého napětí jsem uvedl aspekty použití proudových a napěťových převodníků umožňující bezpečné připojení elektroměru k měřené síti. V práci jsem dále uvedl požadavky na připojení a způsob instalace těchto nepřímých měřicích systémů v odběrných místech pro napěťové hladiny nízkého, vysokého a velmi vysokého napětí. Popis provedení a principu nejdůležitějších součástí systémů, k nimž bezesporu patří elektroměry a měřicí transformátory je uveden v samostatné kapitole.

Instalace a provoz nepřímých měřicích systémů vyžaduje z důvodu zachování požadované přesnosti měření zvýšené nároky na spolehlivost, kterou je nutné zabezpečit správným zapojením a včasnou diagnostikou náhodně vzniklých poruch.

Na základě praktických zkušeností jsem pro analýzu vybral nejčastější příčiny poruch nepřímého měřicího systému, které se vyskytují vlivem nesprávného zapojení nebo jako důsledek selhání funkce jednotlivých součástí systému. Mezi vybrané poruchy k analýze jsem záměrně nezařadil závady vyskytující se přímo v elektroměru a měřicích transformátorech. Jedná se o stanovená měřidla podléhající úřednímu ověření a poruchu tak může potvrdit pouze přezkoušení v autorizovaném metrologickém středisku.

Při analýze vybraných poruch jsem aplikoval studium získané znalosti základních vztahů pro řešení trojfázových obvodů. Hlavním úkolem, který jsem si stanovil, bylo grafické zobrazení vektorů napětí a proudů charakterizující popsané poruchy. Uvedené fázorové diagramy tak mohou sloužit jako referenční podklad pro diagnostiku funkce měřicích systémů. Teoretické předpoklady jsem následně ověřil s praktickým měřením provedeným měřicím etalonem WS2000. Protokoly z těchto měření jsem uvedl v příloze bakalářské práce.

Z výsledků analýzy popsaných poruch je zřejmé, že nelze přesně stanovit korekční konstantu pro dopočet naměřených fakturačních dat. Je však možné k vypočteným chybám přihlídnout při stanovení náhradních hodnot v kratších intervalech, ve kterých lze považovat měřenou soustavu za relativně souměrnou.

## 10 Použitá literatura

- [1] MACHÁČEK, Cyril. *Elektroměry: Technika a praxe*. Brno: Elektrotechnický svaz československý, 1946.
- [2] Zákon č. 458/2000 Sb. o podmínkách a výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (Energetický zákon). In: *Sb.* 2000.
- [3] Vyhláška MPO 82/2011 o měření elektřiny a o způsobu stanovení náhrady škody při neoprávněném odběru, neoprávněné dodávce, neoprávněném přenosu nebo neoprávněné distribuci elektřiny. In: *Sb.* 2011.
- [4] Cenové rozhodnutí ERÚ č.5/2013, kterým se stanovují regulované ceny souvisejících s dodávkou elektřiny.
- [5] BENEŠOVÁ, Zdeňka a Marcela LEDVINOVÁ. *Základy elektrických obvodů v příkladech*. 1. vydání-dotisk. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009. ISBN 978-80-7043-640-0.
- [6] TŮMOVÁ, Olga, Václav ČTVRTNÍK, Josef GIRG a Jiří ŠVARNÝ. *Elektrická měření- měřicí metody*. 2. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2005. ISBN 80-7043-412-0.
- [7] BARTOŠ, Václav, Josef ČERVENÝ, Josef HRUŠKA, Anna KOTLANOVÁ a Bohumil SKALA. *Elektrické stroje*. 1. vydání-dotisk. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2001. ISBN 978-80-7043-444-4.
- [8] *PŘIPOJOVACÍ PODMÍNKY PRO UMÍSTĚNÍ MĚŘICÍCH ZAŘÍZENÍ V ODBĚRNÝCH A PŘEDACÍCH MÍSTECH NAPOJENÝCH ZE SÍTÍ VN, VVN* [online]. Změna č. 2 k 4. 2. 2009. ČEZ Distribuce a.s. 2005 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.cezdistribuce.cz/cs/technicke-informace/pripojovaci-podminky.html>.
- [9] *PŘIPOJOVACÍ PODMÍNKY NN: pro osazení měřicích zařízení v odběrných místech* [online]. změna č. 5 k 1. 4. 2011. ČEZ Distribuce a.s., 2005 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.cezdistribuce.cz/cs/technicke-informace/pripojovaci-podminky.html>.
- [10] Katalog elektromechanických elektroměrů Actaris/AEG řady C 114, Actaris s.r.o. 2002 In: [online]. [cit. 2014-06-05]. Dostupné z: <http://itron.cz>.
- [11] BARTUŠEK, Karel, GESCHEIDTOVÁ, Eva, KUBÁSEK, Radek, MIKULKA, Jan, REZ, Jiří, STEINBAUER, Miroslav. *Měření v elektrotechnice*. 2., přeprac. A dopl. vyd. Brno: VUTIUM, 2010, 2012s. ISBN978-80-214-4160-6.
- [12] LANDIS+GYR AG. *E650 ZxD Series 3 Functional Description*. 2010.
- [13] LANDIS+GYR. *HIGH PRECISION METERING: USER MANUAL*. 2006.
- [14] ACTARIS SAS. *ELEKTROMĚR ACE SL7000: Návod k obsluze*. 2008.
- [15] KPB INTRA INSTRUMENT TRANSFORMERS. *Návod na montáž a obsluhu přístrojových transformátorů proudu* [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.kpb intra.cz/cz/index.html>.
- [16] MĚŘICÍ TRANSFORMÁTORY S.R.O. *Doporučení pro volbu parametrů přístrojových transformátorů proudu nízkého napětí* [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.mtbrno.cz/index.php?l=cs&k=poradna#definice>.

## 11 Přílohy

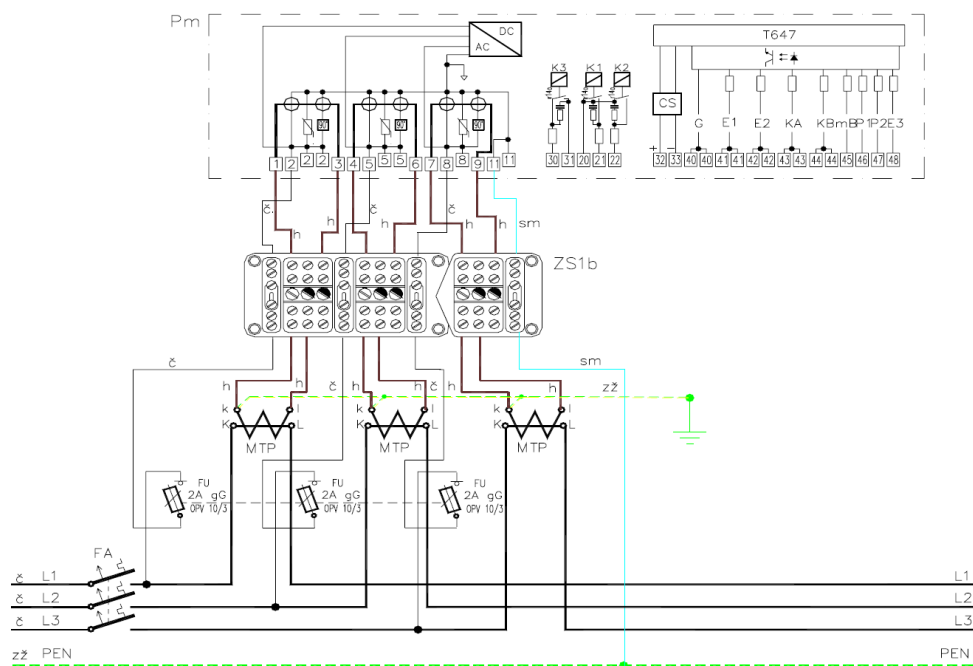
Tabulka P 1 Legislativní předpisy

Označení	Název předpisu
Zákon č.458/2000 Sb.	o podmínkách a výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (Energetický zákon)
Zákon č. 505/1990 Sb.	o metrologii
Vyhláška MPO č.82/2011 Sb.	o měření elektřiny a o způsobu stanovení náhrady škody při neoprávněném odběru, neoprávněné dodávce, neoprávněném přenosu nebo neoprávněné distribuci elektřiny
Vyhláška ERÚ č. 541/2005 Sb.	o pravidlech trhu s elektřinou, zásadách tvorby cen za činnost operátora trhu s elektřinou a provedení některých dalších ustanovení energetického zákona, ve znění vyhlášky č. 438/2012
Vyhláška ERÚ č. 540/2005 Sb.	o kvalitě dodávek elektřiny a souvisejících služeb v elektroenergetice
Vyhláška MPO č. 345/2002 Sb.	kterou se stanoví měřidla k povinnému ověřování a měřidla podléhající schválení typu, ve znění pozdějších předpisů – Vyhláška 285/2011 Sb.
Nařízení vlády č.464/2005 Sb.	kterým se stanoví technické požadavky na měřidla
Cenové rozhodnutí č.5/2013 ERÚ	ze dne 27. listopadu 2013, kterým se stanovují regulované ceny souvisejících s dodávkou elektřiny
PPDS	Pravidla provozování distribuční soustavy schválená Energetickým úřadem (pro PPS a PDS)

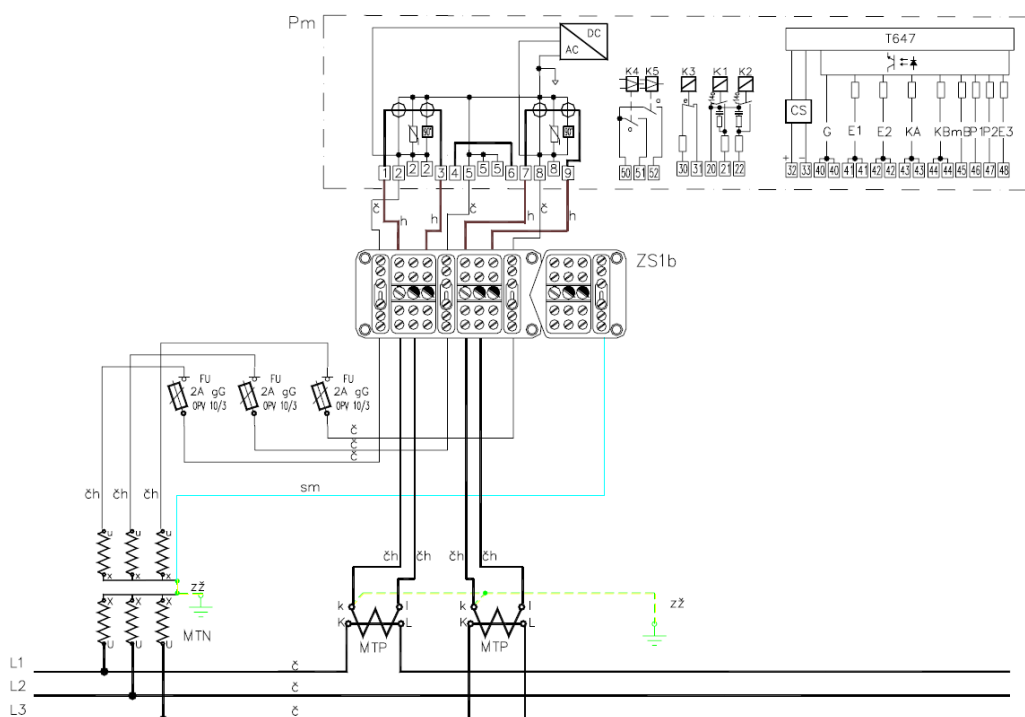
Tabulka P 2 Technické normy

Označení	Název předpisu
ČSN EN 50470-1	Vybavení pro měření elektrické energie AC Část 1: Všeobecné požadavky, zkoušky a zkušební podmínky - Měřicí zařízení (třídy A, B, C)
ČSN EN 50470-2	Vybavení pro měření elektrické energie AC Část 3: Zvláštní požadavky – Činné elektromechanické elektroměry (třídy A, B)
ČSN EN 50470-3	Vybavení pro měření elektrické energie AC Část 3: Zvláštní požadavky – Statické činné elektroměry (třídy A, B, C)
ČSN EN 62052-11	Vybavení pro měření elektrické energie AC Všeobecné požadavky zkoušky a zkušební podmínky Část 11: Elektroměry
ČSN EN 62053-21	Vybavení pro měření elektrické energie AC Zvláštní požadavky - Část 21: Střídavé statické činné elektroměry (třídy 1 a 2)
ČSN EN 62053-22	Vybavení pro měření elektrické energie AC Zvláštní požadavky - Část 22: Střídavé statické činné elektroměry (třídy 0,2S a 0,5S)
ČSN EN 62053-23	Vybavení pro měření elektrické energie AC Zvláštní požadavky - Část 23: Statické elektroměry pro jalovou energii (třídy 2 a 3)
ČSN EN 62053-31	Vybavení pro měření elektrické energie AC Zvláštní požadavky - Část 31: Impulsní výstupní zařízení elektromechanických a elektronických elektroměrů
ČSN EN 62053-52	Vybavení pro měření elektrické energie AC Zvláštní požadavky - Část 52: Značky
ČSN EN 62056-21	Měření elektrické energie – Výměna dat pro odečet elektroměrů, řízení tarifu a regulaci zátěže – Část 21: Přímá místní výměna dat
ČSN EN 60044-1	Přístrojové transformátory – Část 1: Transformátory proudu

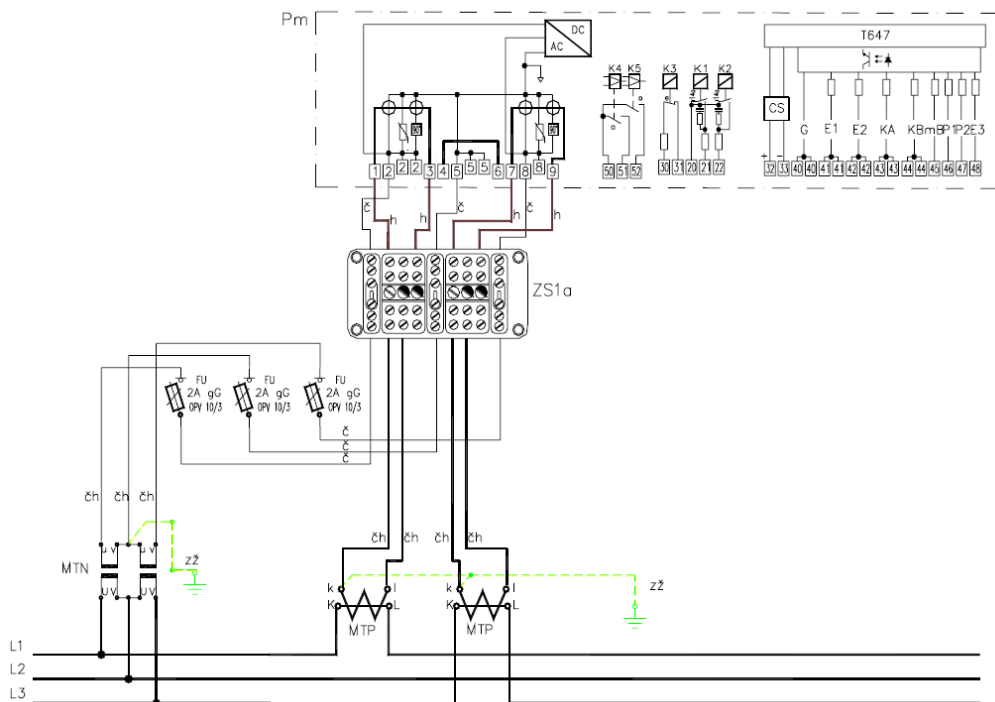
ČSN EN 60044-2	Přístrojové transformátory – Část 1: Induktivní transformátory napětí
ČSN 357020	Elektroměrové a přístrojové desky
ČSN 357020	Revize elektrických zařízení
ČSN 33 2000	Elektrické instalace nízkého napětí
ČSN EN 60439	Rozvaděče nn (část 1 až 5)
ČSN EN 60059	Normalizované hodnoty proudů IEC
ČSN 33 3320	Elektrotechnické předpisy. Elektrické přípojky
ČSN EN 60529	Stupně ochrany krytím (IP- kód)
ČSN 33 0166	Označování žil kabelů a ohebných šňůr



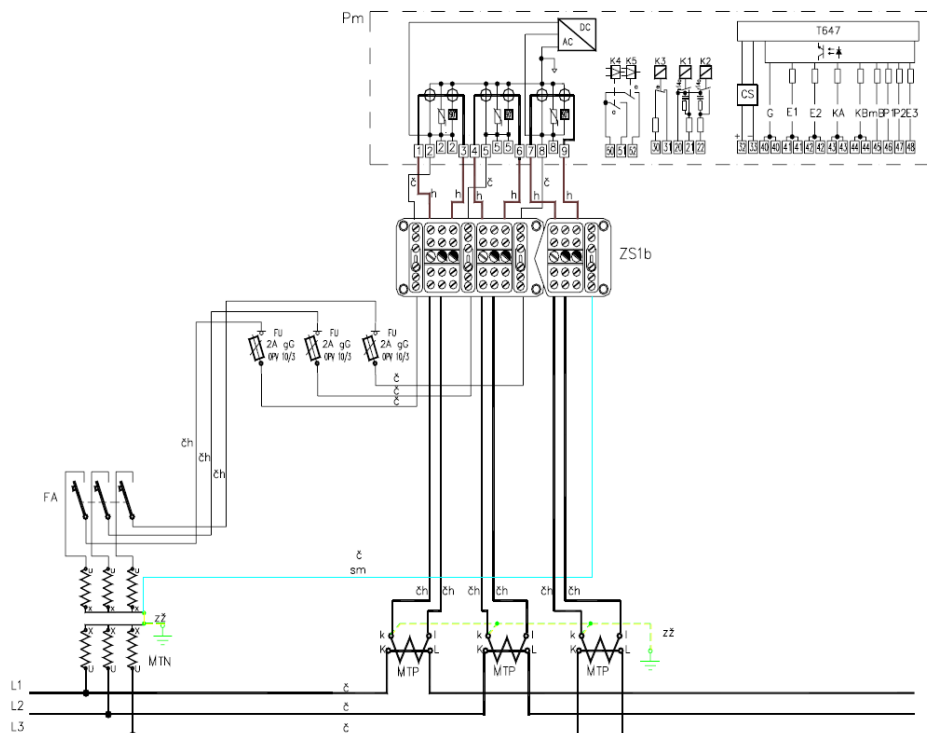
Obr. P 1 Schéma zapojení polopřímého měřicího systému (sekundární měření) se statickým elektroměrem v síti nn. Převzato z [4]



Obr. P 2 Schéma zapojení nepřímého měřicího systému (primární měření) se statickým elektroměrem v síti vn. Dvou systémové Aronovo zapojení se třemi jedno pólově izolovanými MTN. Převzato z [4]

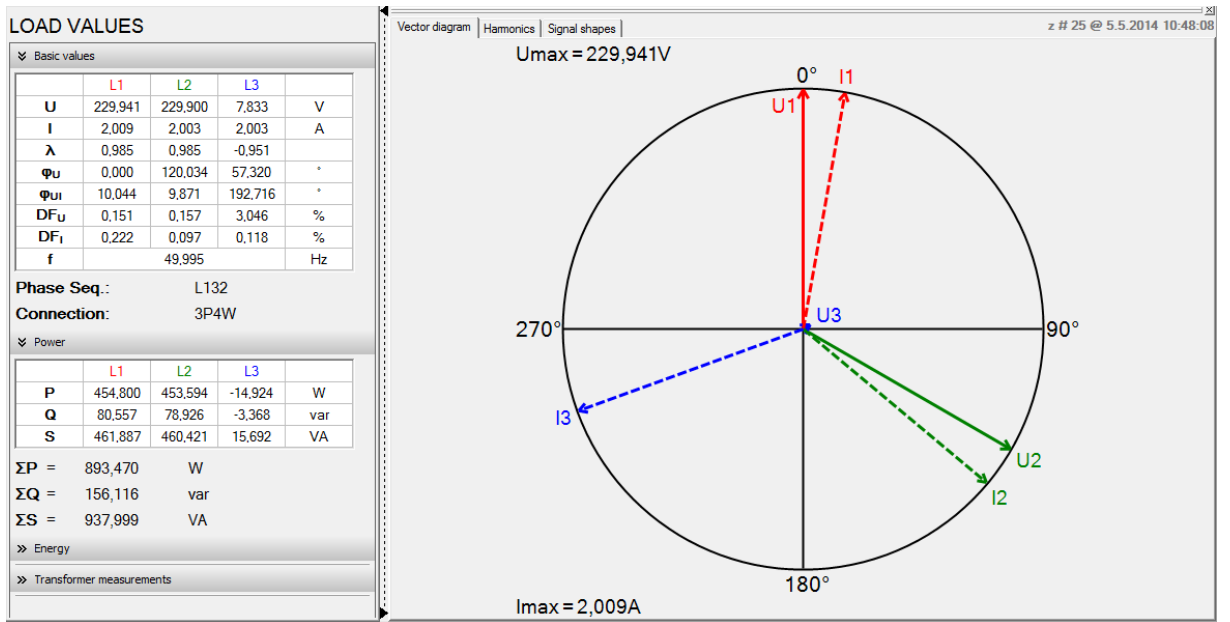


Obr. P 3 Schéma zapojení nepřímého měřicího systému (primární měření) se statickým elektroměrem v síti vn. Dvou systémové Aronovo zapojení se dvěma dvoupólově izolovanými MTN. Převzato z [4]

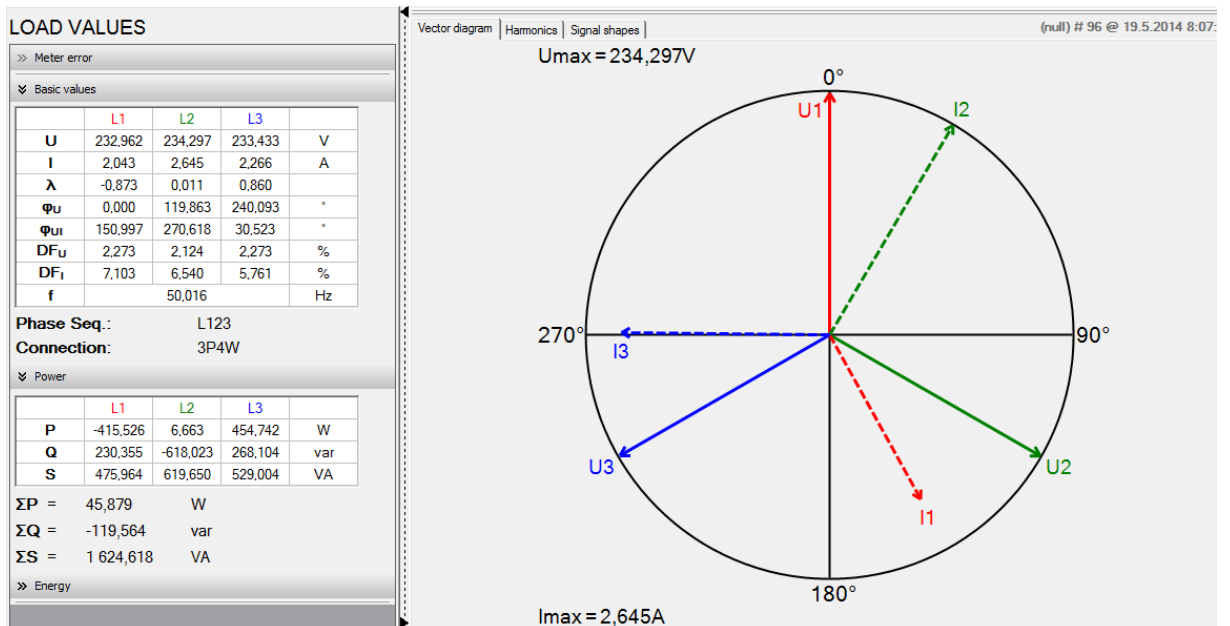


Obr. P 4 Schéma zapojení nepřímého měřicího systému (primární měření) se statickým elektroměrem v síti vvn. Zapojení se třemi jednopólově izolovanými MTN. Převzato z [4]

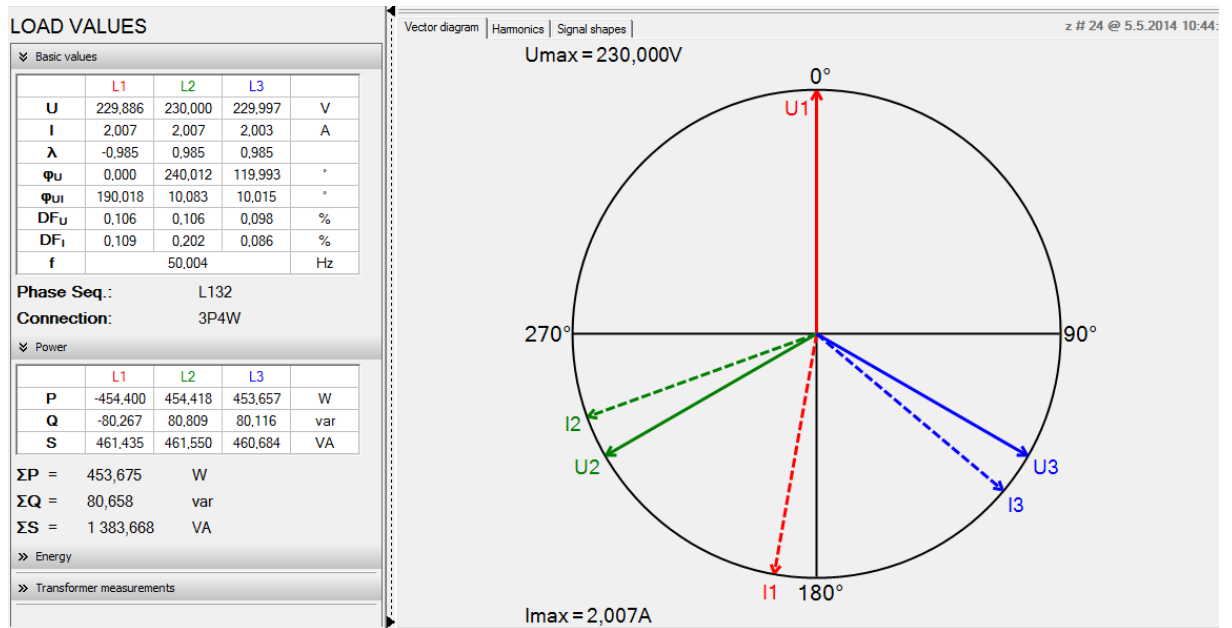




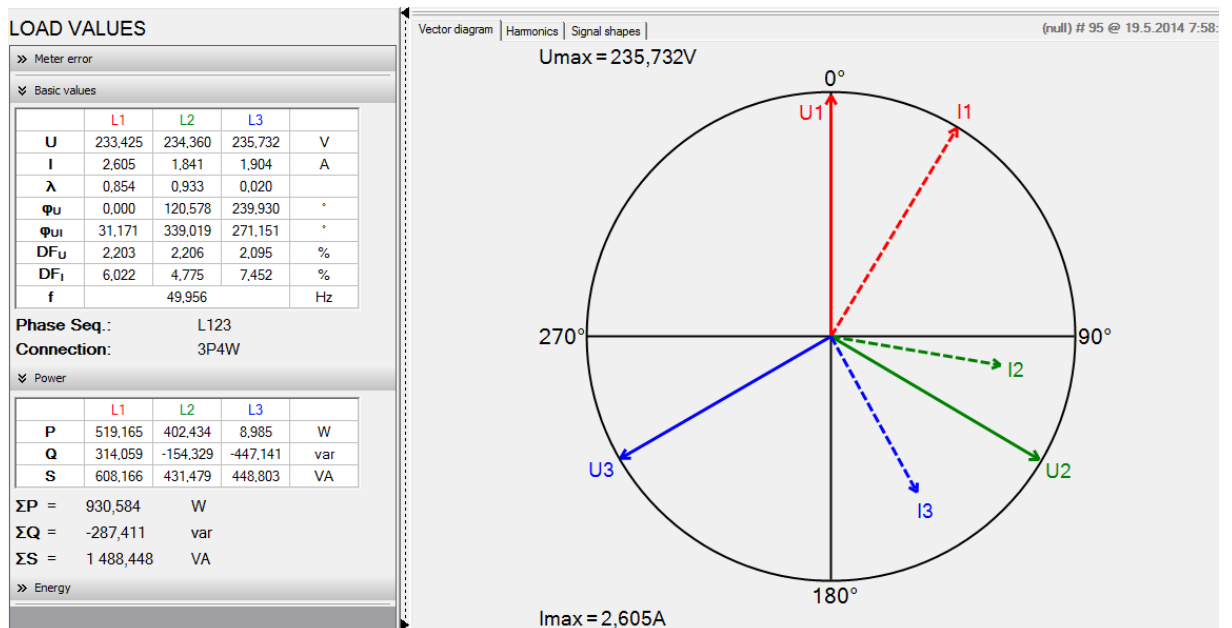
Obr. P 5 Protokol diagnostiky poruchy – ztráta napětí v L3



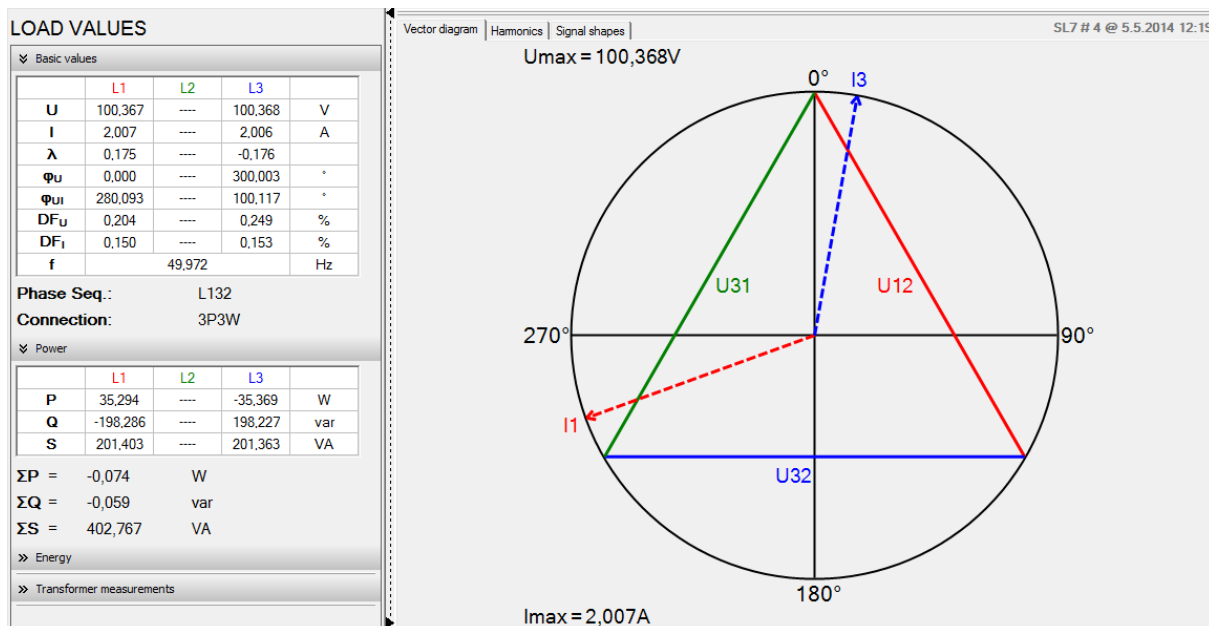
Obr. P 6 Protokol diagnostiky poruchy – záměna sledu fází proudového obvodu L1 a L2



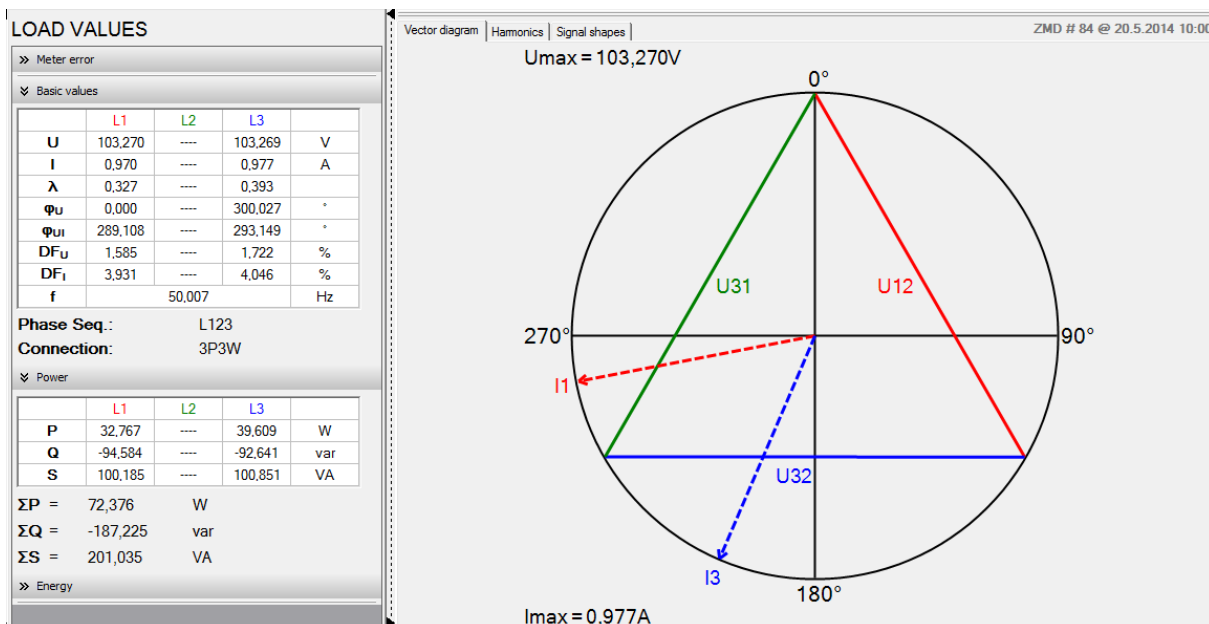
Obr. P 7 Protokol diagnostiky poruchy – chybná polarita připojení MTP v L1



Obr. P 8 Protokol diagnostiky poruchy – chybná polarita připojení MTP v L2 v kombinaci se záměnou sledu fází proudového obvodu v L2 a L3



Obr. P 9 Protokol diagnostiky poruchy – záměna sledu fází proudového obvodu v L1 a L3 v Aronově zapojení



Obr. P 10 Protokol diagnostiky poruchy – záměna sledu fází proudového obvodu v L1 a L3 v kombinaci s nesprávnou polaritou připojení MTP v Aronově zapojení