

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Analyzátor 3f sítě

Vojtěch Doležel 2015

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vojtěch DOLEŽEL**
Osobní číslo: **E12B0012P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Analyzátor 3f sítě**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vytipujte vhodný analyzátor sítě 3x690V pro 3f měření s odběry 0,1-18A.
2. Popište základní veličiny, které analyzuje vytipovaný analyzátor sítě.
3. Navrhněte zapojení s proudovými transformátory.
4. Zapojení realizujte.
5. Shrňte dosažené výsledky.

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na výběr vhodného 3f analyzátoru sítě. Dále se práce zabývá návrhem zapojení 3f analyzátoru sítě s proudovými transformátory a praktickým řešením navrženého zapojení.

Klíčová slova

Analyzátor sítě, proudový transformátor, návrh zapojení, přepínač rozsahů, měření elektrických veličin.

Abstract

The bachelor thesis deals with choosing a suitable 3-phase network analyzer. It describes the design of connection 3f network analyzer with current transformers and a practical solution of the proposed connection.

Key words

Network analyzer, current transformer, design of connection, switch of ranges , measurement of electrical values.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů 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 4.6.2015

Vojtěch Doležel

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Bohumilovi Skalovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky k řešení této bakalářské práce. Dále děkuji svému tatínkovi Janu Doleželovi a svým bratrům Václavu a Martinu Doleželovi za rady a připomínky ke konstrukčnímu řešení práce.

Obsah

Obsah

OBSAH.....	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	8
ÚVOD.....	10
1. VÝBĚR VHODNÉHO ANALYZÁTORU 3F SÍTĚ.....	11
1.1. ANALYZÁTOR ANR96-24 DODÁVANÝ FIRMOU ABB.....	11
1.2. ANALYZÁTOR P50 DODÁVANÝ FIRMOU SIEMENS.....	12
1.3. ANALYZÁTOR DMG800 DODÁVANÝ FIRMOU LOVATO.....	12
1.4. ANALYZÁTOR A2000 DODÁVANÝ FIRMOU GOOSEN-METRAWATT.....	13
1.5. VÝBĚR KONKRÉTNÍHO ANALYZÁTORU SÍTĚ.....	13
2. POPIS ZÁKLADNÍCH MĚŘENÝCH VELIČIN.....	14
2.1. ELEKTRICKÉ NAPĚTÍ.....	14
2.2. ELEKTRICKÝ PROUD.....	17
2.3. ELEKTRICKÝ VÝKON.....	18
a) Činný výkon.....	19
b) Jalový výkon.....	21
c) Zdánlivý výkon.....	22
d) Účinnost.....	22
e) Čtyřkvadrantové měření výkonů.....	23
2.4. HARMONICKÁ ANALÝZA.....	24
2.5. THD – TOTAL HARMONIC DISTORTION.....	25
3. NÁVRH ZAPOJENÍ.....	25
4. KONSTRUKČNÍ PŘEVODNÍK ZAŘÍZENÍ.....	27
4.1. SKŘÍŇ.....	27
4.2. ČELNÍ PANEL.....	27
4.3. ZADNÍ PANEL.....	27
4.4. VNITŘNÍ PŘEVODNÍK ZAŘÍZENÍ.....	28
4.5. PŘEVODNÍK PRIMÁRNÍCH CÍVEK PROUDOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ.....	29
4.6. PŘEVODNÍK PŘEPÍNAČŮ.....	29
a) Přepínač proudových rozsahů Sw2.....	29
b) Spínač bypass Sw3.....	29
c) Přepínač napěťových vstupů Sw4.....	30
4.7. PŘEVODNÍK JEDNOTLIVÝCH KOMPONENTŮ ZAŘÍZENÍ.....	30
5. SHRNUTÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.....	30
6. SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	32
7. PŘÍLOHY.....	33

Seznam symbolů a zkratek

$3f$	.....označení trojfázové soustavy
φ	.....fázový posun [°]
φ_A	.....elektrický potenciál v bodě A [V]
φ_B	.....elektrický potenciál v bodě B [V]
ω	.....úhlový kmitočet [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]
A	.....práce [J]
CuL	.....měděný lakovaný vodič
$CuL, 2B$	.....měděný lakovaný vodič dvakrát opředený bavlnou
CY	.....měděný neflexibilní vodič
CYA	.....měděný flexibilní vodič
dl	.....element délky [m]
dt	.....element času [s]
dQ	.....element elektrického náboje [C]
D/A	.....digitálně analogový převodník
E	.....vektor intenzity elektrického pole [V/m]
F_e	.....vektor síly působící na elektron [N]
F_k	.....k-tý spektrální koeficient
f_n	.....n-tý vzorek analyzovaného průběhu v časové oblasti
f_t	.....Fourierova řada
$FUI-FU8$	.....tavné přístrojové pojistky
I	.....stejnoseměrný proud [A]
$i(t)$	.....okamžitá hodnota proudu v závislosti na čase [A]
L_1, L_2, L_3	.....označení fázových vodičů
N	.....délka analyzované posloupnosti
P	.....činný výkon [W]
$p(t)$	.....okamžitá hodnota výkonu v závislosti na čase [W]
$P_{stř}$	.....střední hodnota elektrického výkonu [W]
PTP	.....přístrojový transformátor proudu
PTN	.....přístrojový transformátor napětí

Q	.....	jalový výkon [Var]
S	.....	zdánlivý výkon [VA]
$Sw1-Sw4$	.....	označení vypínačů a přepínačů
T	.....	perioda průběhu [s]
t	.....	čas [s]
T_1, T_2, T_3	.....	označení proudových transformátorů
THD	.....	celkové haronické zkreslení (total harmonic distortion)
U	.....	elektrické napětí [V]
U_{AB}	.....	elektrické napětí mezi body A a B [V]
U_m	.....	maximální hodnota (amplituda) napětí [V]
U_{ef}	.....	efektivní hodnota napětí [V]
$u(t)$	.....	okamžitá hodnota napětí v závislosti na čase [V]
U_{UV}	.....	velikost fázoru sdruženého napětí mezi fázemi u a v [V]
$u_{L1}(t)-u_{L3}(t)$	.....	okamžité hodnoty fázových napětí v závislosti na čase [V]
USB	.....	jednotná sériová sběrnice
UTP	.....	nestíněný kroucený pár vodičů

Úvod

Tato práce je zaměřena na výběr vhodného 3f analyzátoru sítě, popis základních veličin, se kterými analyzátor pracuje, návrh zapojení analyzátoru s použitím proudových transformátorů a praktickou realizaci navrženého zapojení.

Text je rozdělen do pěti částí podle bodů zadání; první se zabývá porovnáním parametrů analyzátorů dodávaných různými výrobci a výběrem jednoho konkrétního. Druhá část textu je zaměřena na veličiny, které je vybraný analyzátor schopen zpracovávat. Třetí část textu je zaměřena na návrh zapojení s důrazem kladeným na jednoduchost a rychlost při používání zařízení. Čtvrtá část textu je zaměřena na praktickou realizaci přístroje. Pátá část textu je zaměřena na porovnání hodnot měřených realizovaným přístrojem s hodnotami měřenými jiným, přesnějším přístrojem.

1. Výběr vhodného analyzátoru 3f sítě

Základními požadavky na analyzátor sítě je schopnost měřit napětí do hodnot 3x690V sdružených a měřit fázové proudy v rozmezí 0,1 – 18A (s použitím vhodných proudových transformátorů). Dále se očekává, že analyzátor měří výkony (činný, jalový, zdánlivý) ve všech čtyřech kvadrantech a účinník. Analyzátor musí být schopen komunikace s PC s využitím sériového rozhraní USB. Přístroj s analyzátozem sítě by se měl využívat přednostně k měření během výuky ve školních laboratořích, tudíž nejsou kladeny zvláštní nároky na jeho krytí (postačuje IP20).

1.1. Analyzátor ANR96-24 dodávaný firmou ABB

Základní vlastnosti	
3f	ano
vstupní napětí L – L	660 V
vstupní proud	5 A
použití PTN	ano
použití PTP	ano
max. primární proud PTP	25 kA
display	LCD
rozměry	96 x 96 mm
4q – měření	ano
způsob komunikace	RS232, RS485
napájecí napětí	20 – 60 V=/~
Přesnost měření	
napětí	±0.5 % ±1 digit
proud	±0.5 % ±1 digit
výkon činný	±0.5 % ±0.1 % f.s. od $\cos\varphi=0.3$ to $\cos\varphi=-0.3$
výkon jalový	±0.5 % ±0.1 % f.s. od $\cos\varphi=0.3$ to $\cos\varphi=-0.3$
účinník	-
frekvence	±0.2 % ±0.1 Hz od 30 do 500 Hz

Tab. 1: Parametry analyzátoru sítě ANR96-24 [1]

1.2. Analyzátor P50 dodávaný firmou Siemens

Základní vlastnosti	
3f	ano
vstupní napětí L – L	690 V
vstupní proud	1 A, 5 A
použití PTN	ano
použití PTP	ano
max. primární proud PTP	999999 A
display	LCD
rozměry	96 x 96 mm
4q – měření	ano
způsob komunikace	RS485
napájecí napětí	24 – 250 V= / 100 – 230 V~
Přesnost měření	
napětí	±0,2%
proud	±0,2%
výkon činný	±0,5%
výkon jalový	±0,5%
účinnost	±0,5%
frekvence	±10mHz

Tab. 2: Parametry analyzátoru sítě P50 [2]

1.3. Analyzátor DMG800 dodávaný firmou Lovato

Základní vlastnosti	
3f	ano
vstupní napětí L – L	690 V
vstupní proud	1 A, 5 A
použití PTN	ano
použití PTP	ano
max. primární proud PTP	10kA
display	LCD
rozměry	96 x 96 mm
4q – měření	ano
způsob komunikace	RS232, RS485, USB
napájecí napětí	110 – 250 V= / 100 – 250 V~
Přesnost měření	
napětí	±0,2% (50 – 830 VAC)
proud	±0,2% (0,1 – 1,1 I _n)
výkon činný	±0,5% f.s.
výkon jalový	-
účinnost	±0,5%
frekvence	±0,05%

Tab. 3: Parametry analyzátoru sítě DMG800 [3]

1.4. Analyzátor A2000 dodávaný firmou Goosen-Metrawatt

Základní vlastnosti	
3f	ano
vstupní napětí L – L	500 V
vstupní proud	1 A, 5 A
použití PTN	ano
použití PTP	ano
max. primární proud PTP	150 kA
display	7 – segmentový LED
rozměry	144 x 144 mm
4q – měření	ano
způsob komunikace	RS232, RS485
napájecí napětí	230 V / 115 V \pm 10 %, 45 - 65 Hz
Přesnost měření	
napětí	$\pm(0.25 \% U_n + 1 \text{ digit})$
proud	$\pm(0.25 \% I_n + 1 \text{ digit})$ pro $I_{\text{měř}} > 2 \% I_n$
výkon činný	$\pm(0.5 \% P_n + 1 \text{ digit})$
výkon jalový	$\pm(0.5 \% Q_n + 1 \text{ digit})$
účinnost	± 0.02 pro $U, I > 10 \% U_n, I_n$
frekvence	$\pm 0,02$ Hz

Tab. 4: Parametry analyzátoru sítě A2000 [4]

1.5. Výběr konkrétního analyzátoru sítě

Na základě uvedených požadavků byl vybrán analyzátor dodávaný firmou Lovato typ DMG 800. Vyhovuje z hlediska měřených veličin včetně měřicích rozsahů. Umožňuje komunikaci s PC s využitím sériového rozhraní USB. Další výhodou je velký rozsah napájecího napětí, což umožňuje napájet analyzátor přímo síťovým napětím 230V~. Analyzátor DMG 800 byl vybrán kromě uvedených vlastností také z toho důvodu, že již v minulosti byly ve školních laboratořích provozovány analyzátory typu DMK 32, na které tento analyzátor navazuje a které vyhovovaly požadavkům laboratorních měření.

2. Popis základních měřených veličin

2.1. Elektrické napětí:

Elektrické napětí [7] mezi body A a B lze definovat jako rozdíl potenciálů mezi těmito body :

$$U_{ab} = \varphi_b - \varphi_a [V] \quad (1)$$

kde φ_A je elektrický potenciál v bodě A [V]

φ_B je elektrický potenciál v bodě B [V].

Elektrické napětí mezi body A a B je dáno prací A , kterou elektrické pole vykoná při přenosu elektrického náboje Q z bodu A do bodu B.

$$U = \frac{A}{Q} [V] \quad (2)$$

kde U je elektrické napětí [V]

A je práce elektrického pole [J]

Q je elektrický náboj [C]

$$U_{AB} = \int_A^B \mathbf{E} \, d\mathbf{l} = \int_A^B \frac{\mathbf{F}_e}{Q} \, d\mathbf{l} = \frac{1}{Q} \int_A^B \mathbf{F}_e \, d\mathbf{l} [V] \quad (3)$$

kde \mathbf{E} je vektor intenzity elektrického pole [V/m]

$d\mathbf{l}$ je délkový element dráhy mezi body A a B [m]

Napětí v energetické síti je střídavé, v ideálním případě harmonické:

$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) [V] \quad (4)$$

kde $u(t)$ je funkce průběhu střídavého elektrického napětí [V]

U_m je maximální hodnota (amplituda) průběhu střídavého elektrického napětí [V]

ω je úhlový kmitočet průběhu střídavého elektrického napětí [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]

t je čas [s]

φ je fázový posun průběhu střídavého elektrického napětí [rad]

Vybraný analyzátor měří efektivní hodnotu střídavého napětí:

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} [V] \quad (5)$$

kde U_{ef} je efektivní hodnota střídavého elektrického napětí

T je perioda průběhu střídavého elektrického napětí

$u(t)$ je funkce průběhu střídavého elektrického napětí

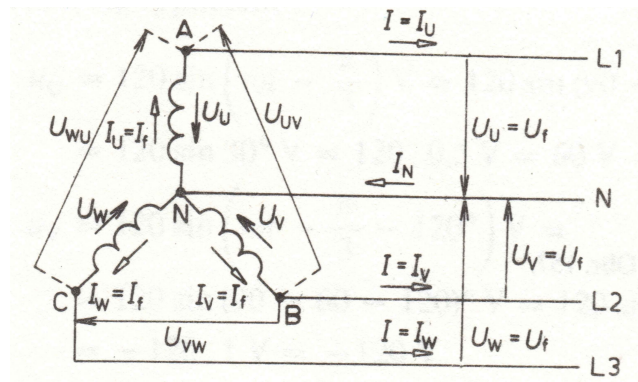
Po dosazení harmonického průběhu napětí do uvedeného vztahu (4) získáme:

$$\begin{aligned}
 U_{ef} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (U_{MAX} \cdot \sin(\omega t))^2 dt} = \sqrt{\frac{U_{MAX}^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{\sin(2\omega t)}{2}\right) dt} = \\
 &= \sqrt{\frac{U_{MAX}^2}{4\pi} \left([t]_0^{2\pi} + \left[\frac{-\cos(2\omega t)}{2\omega} \right]_0^{2\pi} \right)} = \sqrt{\frac{U_{MAX}^2}{4\pi} \left(2\pi + \left(\frac{-\cos(2\omega \cdot 2\pi)}{2\omega} - \frac{-\cos(0)}{2\omega} \right) \right)} = \\
 &= \sqrt{\frac{U_{MAX}^2}{2 \cdot 2\pi} (2\pi + 0)} = \sqrt{\frac{U_{MAX}^2}{2}} = \frac{U_{MAX}}{\sqrt{2}} [V]
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Nejčastěji se setkáváme s trojfázovým symetrickým rozvodem. Trojfázová soustava [5] je tvořena třemi stejně velkými střídavými napětími, která jsou navzájem fázově posunuta o 120°. Jednotlivé fáze značíme L_1 , L_2 , L_3 . Okamžité hodnoty napětí jednotlivých fází lze popsat rovnicemi [5]:

$$\begin{aligned}
 u_{L1}(t) &= U_m \cdot \sin(\omega t) [V] \\
 u_{L2}(t) &= U_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) [V] \\
 u_{L3}(t) &= U_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right) [V].
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Napětí mezi okamžitou hodnotou $u_{L1}(t)$ (resp. $u_{L2}(t)$ a $u_{L3}(t)$) a místem nulového potenciálu (uzlem zdroje) se nazývá fázové napětí. Napětí mezi jednotlivými fázemi se nazývá sdružené napětí. Analyzátor sítě měří sdružené napětí mezi fázemi L_1 - L_2 , L_2 - L_3 , L_3 - L_1 . Fázové napětí měří analyzátor mezi jednotlivými fázemi a nulovým vodičem L_1 -N, L_2 -N, L_3 -N. Mezi fázovým a sdruženým napětím platí vztah, který lze snadno odvodit.



Obr. 1: Znáznornění napětí a proudů v trojfázové soustavě. Převzato z [5].

Víme, že sdružené napětí vypočítáme jako rozdíl dvou fázových hodnot napětí. Geometrické odčítání vektorů U_U a U_V nahradíme geometrickým součtem vektoru U_U se zápornou hodnotou vektoru U_V tj. s hodnotou $-U_V$. Z Pythagorovy věty potom můžeme psát:

$$\frac{U_{UV}}{2} = \sqrt{U_U^2 - \left(\frac{U_U}{2}\right)^2} \rightarrow \frac{U_{UV}}{2} = \sqrt{\frac{4U_U^2 - U_U^2}{4}} = \sqrt{\frac{3}{4}U_U^2} = \frac{U_U \cdot \sqrt{3}}{2} \rightarrow U_{UV} = \sqrt{3} \cdot U_U \quad [6] \quad (8)$$

Vybraný analyzátor [3] je konstruován pro měření sdruženého napětí v rozsahu 20 – 830 V při kmitočtu 45 – 66 Hz. Maximální hodnota sdruženého napětí povolená výrobcem je 690 V. Tyto hodnoty bez problémů vyhovují potřebám laboratorních měření.

2.2. Elektrický proud:

Elektrický proud je jednou ze základních veličin v soustavě SI. Je definován pomocí silových účinků mezi dvěma vodiči, kterými prochází elektrický proud. Jeho přesná definice [7] zní: Jeden ampér je proud, který při stálém průtoku dvěma rovnoběžnými přímkovými velmi dlouhými vodiči zanedbatelného kruhového průřezu, umístěnými ve vakuu ve vzdálenosti 1 metr od sebe, vyvolá mezi vodiči sílu $2 \cdot 10^{-7}$ newtonů na 1 metr délky.

Velikost elektrického proudu [8] určujeme množstvím elektrických nábojů, které projdou průřezem vodiče za jednotku času, tedy v coulombech za sekundu. Proteče-li průřezem vodiče

za dobu t [s] rovnoměrně elektrický náboj Q [C], pak pro velikost elektrického proudu I zavádíme vztah:

$$I = \frac{Q}{t} [A] \quad (9)$$

Při nerovnoměrném průchodu nábojů vodičem definujeme elektrický proud v určitém okamžiku poměrem:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} [A] \quad [8]. \quad (10)$$

Časově proměnný proud lze definovat:

$$i(t) = \frac{dQ}{dt} [A] \quad (11)$$

Vybraný analyzátor [3] měří efektivní hodnotu proudu ve fázových vodičích. U zvoleného přístroje [3] lze nastavit jmenovitý proud na hodnoty 1 A nebo 5 A. Uvažuje se totiž, že analyzátor bude doplněn o měřicí transformátory proudu. Měřicí transformátory proudu se dříve vyráběly přednostně s transformačními poměry $p = X/5$ [-]. V poslední době se z hlediska snížení ztrát při měření vyrábí měřicí transformátory proudu s transformačními poměry $p = X/1$ [-]. Jmenovitý proud primárního vinutí proudového transformátoru [3] lze v analyzátoru nastavit v rozmezí 1 A až 10 kA.

2.3. Elektrický výkon

Elektrický výkon je definován jako práce vykonaná elektrickým proudem za jednotku času:

$$P = \frac{A}{t} [W] \quad (12)$$

kde P je elektrický výkon [W]

A je práce vykonaná elektrickým proudem [J]

t je čas [s]

Okamžitá hodnota výkonu střídavého proudu je dána součinem okamžitých hodnot napětí a proudu [8]:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad [\text{W}] \quad (13)$$

kde p je okamžitá hodnota elektrického výkonu [W]

u je okamžitá hodnota elektrického napětí [V]

i je okamžitá hodnota elektrického proudu [A].

V obvodech se střídavým proudem nás však zajímá činný výkon, který je mírou skutečné práce (skutečně spotřebované elektrické energie, která je nevratným pochodem převedena na jiný druh energie, např. v teplo, mechanickou energii apod.) a jalový výkon, který je mírou výměnné energie (vratné pochody) mezi zdrojem a spotřebiči [8].

a) Činný výkon

Na obrázku 2 je grafické znázornění časového průběhu výkonu střídavého sinusového napětí a střídavého sinusového proudu, který je s napětím ve fázi. Okamžitý výkon v kladné i záporné polovině periody je kladný. Křivka výkonu je sinusoida, ale její osa leží nad osou času a má dvojnásobný kmitočet. Sinusoida nemá záporné hodnoty, neboť v polovině periody, kdy okamžité hodnoty proudu a napětí mají opačný směr, je jejich součin kladný. Obsah plochy omezené osou času a sinusoidou výkonu znamená práci střídavého proudu za periodu při proměnném výkonu. Přeměníme-li tuto plochu na obdélník se základnou T, odpovídá jeho výška střednímu výkonu P za jednu periodu [9].

Střední hodnota výkonu [9]:

$$P_{stř} = \frac{1}{2} U_m I_m [W] \quad (14)$$

kde $P_{stř}$ je hodnota středního elektrického výkonu [W]

U_m je maximální hodnota (amplituda) napětí [V]

I_m je maximální hodnota (amplituda) proudu [A].

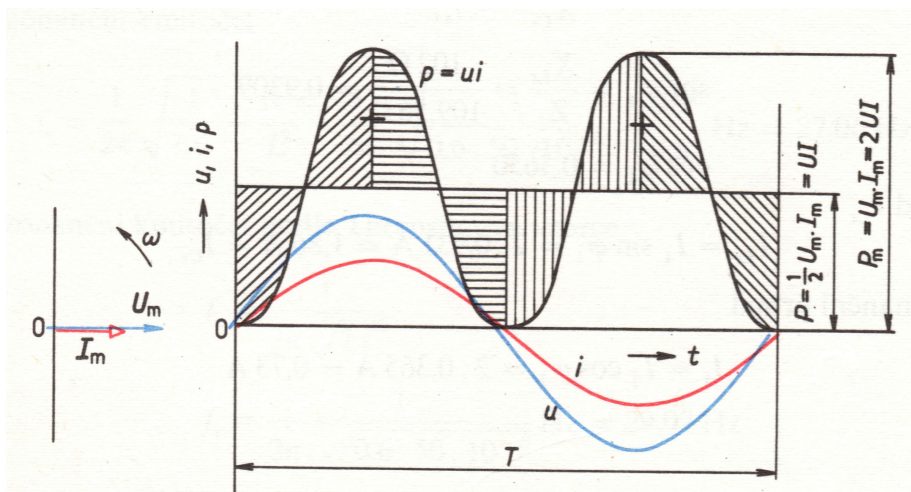
Po dosazení získáme:

$$P_{stř} = \frac{1}{2} \sqrt{2} U \cdot \sqrt{2} I = U \cdot I [W] \quad (15)$$

kde $P_{stř}$ je hodnota středního elektrického výkonu [W]

U je efektivní hodnota napětí [V]

I je efektivní hodnota proudu [A].



Obr. 2: Okamžitý výkon střídavého (sinusového) proudu, který je ve fázi s napětím. Převzato z [9].

Výkon střídavého proudu je dán součinem efektivních hodnot napětí a proudu. Tento vztah platí pouze tehdy, jsou-li proud a napětí ve fázi, tj. platí v obvodu, ve kterém jsou zapojeny jenom spotřebiče s činným odporem (žárovky, topná tělesa apod.). Pokud tomu tak není, platí pro činný výkon vztah:

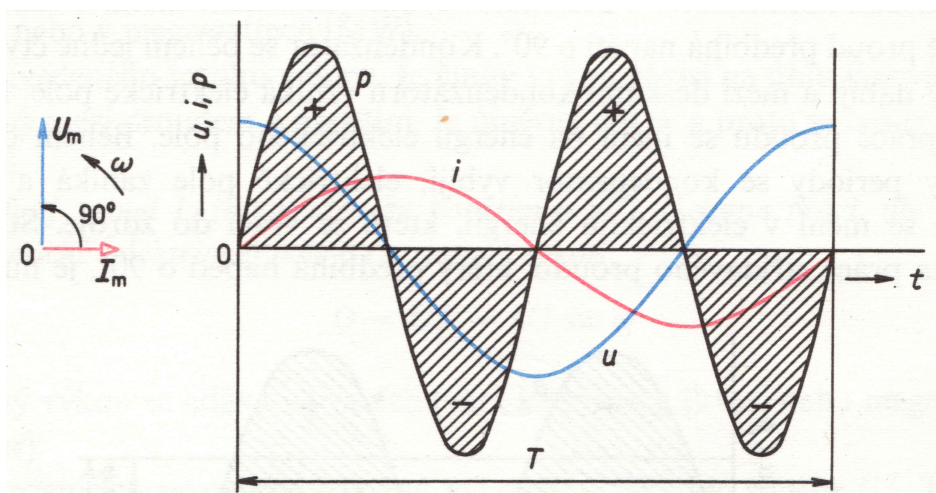
$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad [W] \quad (16)$$

kde φ je fázový posun mezi napětím a proudem ($\varphi_U - \varphi_I$)

Zvolený analyzátor měří činný výkon s přesností danou třídou 0,5S (podle normy ČSN/EN62053-23)

b) Jalový výkon

Na obrázku 3 je časový průběh okamžitého výkonu v obvodu střídavého proudu, který je za střídavým napětím zpožděn o 90° , tzn. výkon proudu, který prochází ideální cívkou. Z grafu vidíme, že okamžitý výkon $p = ui$ má v jedné čtvrtině periody proudu hodnotu kladnou a v následující čtvrtině periody hodnotu zápornou. Střední hodnota práce za celou periodu je nulová. V cívce se vlivem indukčnosti během jedné čtvrtiny periody vytváří magnetické pole a práce proudu se mění na energii magnetického pole. Během druhé čtvrtiny periody magnetické pole zaniká a jeho energie se elektromagnetickou indukcí mění na elektrickou energii a vrací se do zdroje [9].



Obr. 3: Okamžitý výkon střídavého (sinusového) proudu, který je zpožděn za napětím o 90° . Převzato z [9].

Jalový výkon Q lze určit podle vztahu:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi) \quad [VAr] \quad (17)$$

Vybraný analyzátor měří jalový výkon s přesností, která je dána třídou 2 (podle normy ČSN/EN62053-23).

c) Zdánlivý výkon

Zdánlivý výkon určíme jako součin efektivních hodnot napětí a proudu, počítá se tedy z údajů voltmetru a ampérmetru. Udává se ve voltampérech. Není to skutečný výkon, je to v podstatě jen matematický pojem, ale v technice střídavých proudů je velmi důležitou veličinou, neboť určuje skutečnou velikost proudu

$$S = U \cdot I \rightarrow I = \frac{S}{U} \quad [VA] \quad (18)$$

a charakterizuje tak horní hranici využití elektrického zařízení (zdrojů, vedení a spotřebičů). Skutečný (činný) výkon dodávaný, přenášený nebo spotřebovaný je buď číselně rovný (při $\cos(\varphi) = 1$), nebo je menší než zdánlivý výkon (při $\cos(\varphi) < 1$) [8].

Vybraný analyzátor určí hodnotu zdánlivého výkonu výpočtem na základě změřených efektivních hodnot napětí a proudu. Analyzátor umožňuje zobrazení zdánlivého výkonu pro jednotlivé fáze včetně celkového.

d) Účinník

Energetické obvody jsou střídavé obvody, v nichž zpravidla převažují spotřebiče s indukčním charakterem. To znamená, že se proud za napětím zpožďuje a mezi nimi je fázový úhel φ v rozmezí $0^\circ - 90^\circ$. Čím více převládá vliv indukčností, tím je tento úhel větší [10].

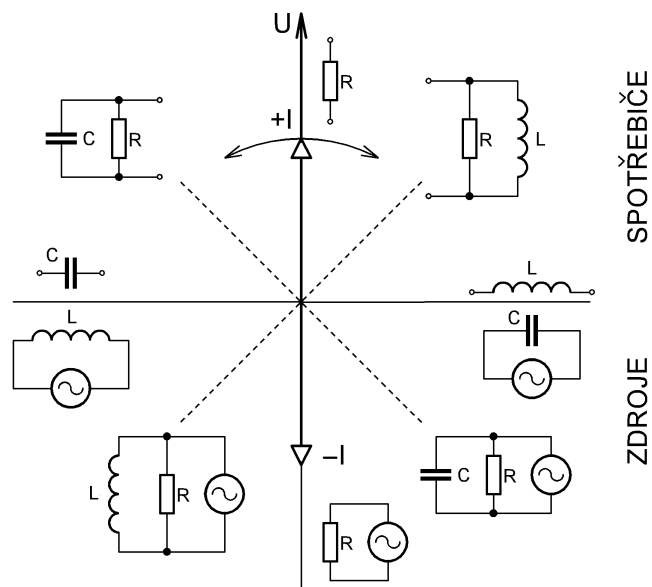
Účinníkem nazýváme výraz $\cos(\varphi)$. Jde o hodnotu určující část proudu, která se uplatní při tvorbě činného výkonu v obvodu. Čím více se bude hodnota $\cos(\varphi)$ blížit jedné, tím lepší budou přenosové poměry ve vedení [10]. Účinník lze vypočítat podle vztahu:

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} \quad [-] \quad (19)$$

Vybraný analyzátor zobrazuje hodnoty účinníku pro každou fázi.

e) Čtyřkvadrantové měření výkonů

Vybraný analyzátor umožňuje čtyřkvadrantové měření výkonů. Tzn. měří odběr činného výkonu (P_+), dodávku činného výkonu (P_-), odběr jalového výkonu s indukčním charakterem (Q_+) a odběr jalového výkonu s kapacitním charakterem (Q_-). Každý z měřených výkonů odpovídá jednomu kvadrantu v uvedeném grafickém znázornění na obrázku 4. Fázor napětí leží na svislé ose. Fázor proudu se otáčí okolo počátku o 360° . Leží-li fázor proudu v prvním kvadrantu, odpovídá jeho poloha spotřebě elektrické energie s indukčním charakterem. Leží-li fázor proudu na svislé ose ve fázi s fázorem napětí, odpovídá jeho poloha spotřebě pouze činného výkonu. Leží-li fázor proudu ve druhém kvadrantu, odpovídá jeho poloha spotřebě elektrické energie s kapacitním charakterem. Pod vodorovnou osou je situace obdobná pouze s tím rozdílem, že fázor proudu má opačný směr a tudíž se nejedná o spotřebu elektrické energie, ale o její dodávku.



Obr. 4: Grafické znázornění odebíraných a dodávaných výkonů

Čtyřkvadrantové měření výkonů využívají elektroměry velkých podniků, kde samy podniky ručí za vykompenzování jalového výkonu. Čtyřkvadrantové měření výkonů se používá také v elektrárnách, kde se podle odebíraného výkonu a jeho charakteru mění budící proud generátoru.

2.4. Harmonická analýza

Při harmonické analýze vyjadřujeme periodickou a po částech spojitou funkci $f(t)$ tzv. Fourierovou řadou, tedy lineární kombinací harmonických funkcí. Fourierova řada může být definována vztahem:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_k e^{j2\pi \frac{t}{T} k} \quad (20)$$

kde T je délka základní periody a c_k jsou obecně komplexní koeficienty, které určíme podle vztahu:

$$c_k = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-j2k\pi \frac{t}{T}} dt \quad (21)$$

Zvolený analyzátor je digitální měřicí přístroj, který spojitě průběhy napětí a proudu převádí do digitální podoby. Diskrétní signály jsou analyzovány pomocí diskrétní Fourierovy transformace, která posloupnosti N vzorků v originální časové oblasti přiřazuje stejně dlouhou posloupnost spektrálních koeficientů F_k ve frekvenční oblasti. Diskrétní Fourierova transformace je definována vztahem:

$$F_k = \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{-j2k\pi \frac{n}{N}} \quad (22)$$

kde F_k je k -tý spektrální koeficient

f_n je n -tý vzorek analyzovaného průběhu v časové oblasti

N je délka analyzované posloupnosti

Výpočet spektrálních koeficientů podle uvedené definice je zdlouhavý, v roce 1965 byl však nalezen rychlý algoritmus výpočtu, který dnes označujeme jako FFT – Fast Fourier Transform. Existuje několik modifikací původního algoritmu, ve všech případech se však jedná o efektivní výpočet diskrétní Fourierovy transformace [11].

Zvolený analyzátor zobrazuje spektrální složky do 31. harmonické. Analyzuje sdružené napětí, fázové napětí a fázový proud.

2.5. THD – Total Harmonic Distortion

Celkové harmonické zkreslení THD vychází z harmonické analýzy signálu. Lze jej definovat vztahem

$$THD = \frac{\sum_{i=2}^n U_i^2}{\sum_{i=1}^n U_i^2} \quad (23)$$

Jde tedy o poměr, v jehož čitateli vystupují vyšší harmonické složky, zatímco ve jmenovateli do součtu zahrnujeme i první harmonickou. Pokud by analyzovaný signál nebyl harmonicky zkreslený (jednalo by se o ideální, čistě sinusový průběh), hodnota THD by byla nulová. Hodnota THD se zvyšuje s narůstajícím podílem vyšších harmonických složek v analyzovaném průběhu.

Vybraný analyzátor umožňuje měření a zobrazení několika desítek dalších elektrických veličin a funkcí, včetně uživatelsky programovatelných. Např. elektroměr, tarify, alarmy atd.

3. Návrh zapojení

Při návrhu zařízení bylo postupováno s maximálním důrazem na jednoduchost měření a používání přístroje. Nejprve bylo potřeba určit počet proudových rozsahů a jejich jmenovité hodnoty. Vzhledem k tomu, že byly objednány proudové transformátory s primárním proudem 60 A, byl nejvyšší rozsah zvolen také tak. Další proudové rozsahy (nižší) jsou řešeny provlečením odpovídajícího počtu závitů průvlečným proudovým transformátorem.

V případě potřeby vytvořit rozsah nižší, než je jmenovitý rozsah, musí vodič procházet jádrem tolikrát, aby vytvořil stejné magnetické účinky jako proud jmenovitý. Byly tedy zvoleny rozsahy: 60 A, 30 A, 10 A a 2 A. Tomu odpovídají následující počty provlečení vodičů: 1, 2, 6 a 30. Z důvodu komfortnosti používání zařízení byla zvolena verze s přepínačem zmíněných proudových rozsahů. Došlo tak i k omezení počtu svorek na zařízení. S přepínačem proudových rozsahů bylo potřeba řešit problém s odpojením a následným připojením měřené zátěže během přepínání rozsahů. Problém by vznikl především u zátěží s velkým záběrným proudem hlavně potom u transformátorů a motorů. Tento problém byl vyřešen přidáním spínače, kterým lze překlenout přepínač rozsahů i s proudovými transformátory tzn. propojit vstupní a výstupní svorky proudového obvodu zařízení. Spínač (bypass) i přepínač musí být dimenzovány na maximální možný proud, což je v tomto případě 60 A. Proudový obvod nejnižšího rozsahu (2 A) byl doplněn o tavné pojistky F10A, které chrání zařízení proti neúmyslnému přetížení a následnému zničení. Obvod by totiž jinak musel být silněji dimenzován, což by byl problém z ekonomických i konstrukčních důvodů. Dále bylo zařízení doplněno o přepínač napětí. Tímto přepínačem si obsluha zařízení zvolí, jestli na napěťové vstupy analyzátoru bude přivedeno napětí ze samostatných svorek (externí) nebo napětí ze vstupních svorek proudového obvodu (interní). Napěťové vstupy musí být podle výrobce chráněny tavnými pojistkami F1A. Napájení analyzátoru bylo vyřešeno pomocí euro konektoru v zadním panelu zařízení. Pro zapínání / vypínání byl použit dvojpólový spínač. Napájení analyzátoru bylo opět podle výrobce odjištěno tavnými pojistkami F1A. Pojistky byly vřazeny do obou přívodních vodičů (L i N) z toho důvodu, že analyzátor lze napájet i stejnosměrným napětím. To by mohlo způsobovat problém při použití jen jedné pojistky v případě, že střed baterií by byl uzemněn. Napájení analyzátoru je doplněno signalizační LED diodou, která byla umístěna nad hlavním vypínačem. Dále byl k analyzátoru zakoupen rozšiřovací modul, který obsahuje dva nezávislé přepínací kontakty a jejich ovládání si může uživatel programovat. Kontakty jsou propojeny se svorkami na zadním panelu zařízení. Komunikační USB modul je propojen s USB konektorem typu A na čelním panelu zařízení UTP kabelem CAT5. Podle uvedených požadavků na zařízení byla nakreslena následující schémata, uvedená na obrázcích v příloze, podle nichž je zařízení zapojeno. Schéma zapojení a spínání přepínačů viz. přílohy A, B a C.

4. Konstrukční provedení zařízení

4.1. Skříň

Celé zařízení je umístěno ve skříni o rozměrech 405x129x340 mm, která byla vyrobena pro D/A převodník BM572 od firmy TESLA. Jedná se o kovovou skříň s hliníkovým rámem. Čelní a zadní panel byly odmontovány a nahrazeny novými s požadovaným rozmístěním otvorů. Boční, horní a spodní panel, vyrobené z hliníkového plechu byly vyrovnány, opatřeny novým lakem a namontovány zpět na kostru skříně. Na čelní straně je skříň opatřena dvěma držadly, která usnadňují manipulaci se zařízením. Na spodní straně je skříň opatřena plastovými nožičkami, které zamezují klouzání zařízení po podložce.

4.2. Čelní panel

Čelní panel je tvořen dvěma deskami hliníkového plechu o rozměrech 405x129x0,5 mm a 405x129x2 mm. Silnější deska s tloušťkou 2 mm je nosná, tedy jsou k ní připevněny veškeré komponenty čelního panelu. Tenčí deska s tloušťkou 0,5 mm je polepena samolepicí fólií, na které jsou vytištěny popisy k jednotlivým ovládacím prvkům zařízení a slouží pouze ke krytí nosné desky. Tato krycí deska je k nosné desce připevněna šesti černěnými šrouby M4. Čelní panel je zleva osazen hlavním vypínačem napájení, nad kterým je indikační LED dioda. Pod hlavním vypínačem je umístěn USB konektor typu A, který zajišťuje propojení analyzátoru s počítačem. Vpravo od hlavního vypínače je umístěn přepínač proudových rozsahů. Ve stejné rovině jsou následovně umístěny vypínač BYPASS a přepínač napěťových vstupů. Na konci řady je umístěn samotný analyzátor. Výkres čelního panelu viz. příloha D.

4.3. Zadní panel

Zadní panel je tvořen jednou deskou hliníkového plechu o rozměrech 405x129x2 mm. Samolepicí fólie s vytištěnými popisy je přilepena přímo na zadní panel. V levé části panelu (při pohledu na zařízení zezadu) je umístěn euro konektor pro napájení analyzátoru a zemnicí svorka, která je připojena na kostru zařízení. Zbytek zadního panelu je rozdělen do tří částí. Ve spodní části panelu jsou vstupní a výstupní proudové svorky. Jedná se o svorky vyráběné firmou METRA BLANSKO se svorníky M8 určené pro montáž do nevodivých materiálů. Z tohoto důvodu jsou svorky podloženy izolačním pruhem, který je vyroben z textitu. Stejný

izolační pruh je umístěn na vnitřní straně zadního panelu, aby nemohlo dojít ke zkratování svorek přes hliníkový plech tvořící zadní panel. V levé horní části panelu jsou umístěny svorky pro připojení externího napětí a svorka pro připojení nulového vodiče v případě potřeby měření fázových hodnot napětí. V pravé horní části jsou umístěny svorky binárních výstupů, které jsou propojeny na programovatelný modul s dvěma přepínacími kontakty. Všechny čtyři části jsou od sebe graficky odděleny tak, aby byly zdůrazněny funkce jednotlivých bloků. Zadní panel je přišroubován čtyřmi šrouby M3. Výkres zadního panelu viz. příloha E.

4.4. Vnitřní provedení zařízení

Veškeré vnitřní vybavení zařízení je montováno k bočním resp. k čelnímu a zadnímu panelu tak, aby bylo možné odejmout horní i spodní kryt bez jakékoliv demontáže dalších prvků. V zadní části skříně jsou umístěny proudové transformátory T1 - T3. Jsou přišroubovány k dvěma železným lištám, které jsou uchyceny do bočních stěn, šrouby M4. Před proudovými transformátory je umístěno kabelové koryto, ve kterém jsou uloženy vodiče. V přední části jsou vlevo umístěny hlavní vypínač Sw1, signalizační LED dioda a USB konektor. Všechny tři komponenty jsou připevněny na předním panelu. USB konektor je přišroubován dvěma zapuštěnými šrouby M3. Hlavní vypínač je připevněn maticí M12x0,75. Signalizační LED dioda je připevněna pomocí objímky s maticí M8x1. Další jsou v řadě přepínač proudových rozsahů Sw2 a spínač bypass Sw3. Ty jsou také připevněny k čelnímu panelu vždy dvojicí zapuštěných šroubů M5. Následuje přepínač napětíových vstupů Sw4. Ten, vzhledem k lepšímu přístupu k připojovacím svorkám, není připevněn k čelnímu panelu, ale ke dvěma železným lištám připevněných k rámu skříně. Nad přepínačem napětíových vstupů je ke stejným lištám připevněna DIN lišta, na které jsou osazeny patice přístrojových tavných pojistek FU3 – FU8. Vedle přepínače napětíových vstupů je do čelního panelu připevněn analyzátor. Je osazen do otvoru ve tvaru čtverce o rozměrech 92x92 mm pomocí výrobcem dodaných přichytek. Za analyzátozem je připevněna DIN lišta, na které jsou osazeny dvě patice přístrojových tavných pojistek jisticích napájení analyzátoru FU1, FU2 a PE svorkovnice typu RSA. Celkové vnitřní provedení viz. příloha F.

4.5. Provedení primárních cívek proudových transformátorů

Pro proudový rozsah 60 A je použit vodič CYA 16 mm², který je provlečen jádrem transformátoru pouze jednou. Pro proudový rozsah 30 A je použit vodič CYA 10 mm², který je provlečen jádrem transformátoru dvakrát. Vodič je provlečen jádrem volně a na vnější straně transformátoru je vložen do kabelového koryta. Pro proudový rozsah 10 A je použit vodič CuL, 2B, Ø 1,7 mm opředený. Tento vodič je jádrem proudového transformátoru provlečen šestkrát. Cívka, kterou tvoří, je vyvázána provázkem a zalita impregnačním nitrocelulozovým lakem tak, aby dobře držela požadovaný tvar. Pro proudový rozsah 2 A je použit vodič CuL, 2B, Ø 1 mm opředený. Tento vodič je jádrem proudového transformátoru provlečen třicetkrát. Cívka, kterou tvoří, je vyvázána provázkem a zalita impregnačním nitrocelulozovým lakem jako tomu je u předchozí cívky. Vývody z těchto dvou cívek ke svorkám jsou vedeny společnou bužírkou a jsou zakončeny lisovacími oky. Vývody k přepínači jsou vedeny samostatně každý ve vlastní bužírce. Viz příloha G.

4.6. Provedení přepínačů

a) Přepínač proudových rozsahů Sw2

Aby přepínač proudových rozsahů vyhovoval spínacímu schématu je složen z několika kusů vypínačů dodávaných firmou SEZ Krompachy typu S63V. Z důvodu ušetření dvou pater přepínače a tím i celkového zmenšení jsou dvě vačky přepínače upraveny. Jeden ze dvou původních výřezů je zalitý epoxidovou pryskyřicí typu ChS EPOXY 1200, která je vyztužena železným drátem Ø 0,5 mm. Pod úhlem 45° od původního výřezu je vypilován nový výřez stejného tvaru jako původní výřezy. Viz příloha H. V uvedeném výkresu jsou okótovány pouze základní rozměry vzhledem k tomu, že se nejednalo o výrobu nové vačky, ale o úpravu typizované součásti. S ohledem na minimalizaci rozměrů je odstraněna svorka pro spojení vodičů PE.

b) Spínač bypass Sw3

Tento spínač nebylo potřeba nijak upravovat, protože požadovanému schématu odpovídá vypínač dodávaný firmou SEZ Krompachy typu S63V 01 (třífázový vypínač s polohami zapnuto/vypnuto).

c) Přepínač napěťových vstupů Sw4

Tento přepínač je složen z reverzačního přepínače dodávaného firmou Obzor Zlín typu VS16. V tomto případě nebylo potřeba vačky přepínače nijak upravovat a potřebné propojky jsou provedeny pomocí originálních dílů. Protože přepínač není umístěn přímo na čelním panelu je jeho hřídel prodloužen. Prodloužení je provedeno šroubovaným spojem dvou hřídelí. Spoj je zajištěn proti povolení maticí M5 a pérovou podložkou.

4.7. Propojení jednotlivých komponentů zařízení

Proudové obvody jsou propojeny vodiči, které odpovídají danému proudovému rozsahu. Pro proudový rozsah 60 A a pro funkci bypass je použit vodič CYA 16 mm² černé barvy zakončený lisovacími oky nebo dutinkami. Pro proudový rozsah 30 A je použit vodič CYA 10 mm² černé barvy zakončený lisovacími oky nebo dutinkami. Pro proudový rozsah 10 A je použit vodič CuL, 2B, Ø 1,7 mm a pro proudový rozsah 2 A je použit vodič CuL, 2B, Ø 1 mm. Oba vodiče jsou chráněny společnou bužírkou (červené barvy) a zakončeny společným lisovacím okem 6mm²/M8. Sekundární vinutí proudových transformátorů jsou s proudovými vstupy analyzátoru propojeny vodiči CYA 1,5 mm² černé barvy. Pomocné obvody (napájení analyzátoru) je provedeno vodičem CYA 1 mm² černé barvy. Propojení sekundárních svorek proudových transformátorů S₂ s kostrou zařízení je provedeno vodičem CY 1,5 mm² zelenožluté barvy. Pospojení skříně se svorkou PE je provedeno vodičem CYA 2,5 mm² zelenožluté barvy. Programovatelné kontakty (binární výstupy) jsou s příslušnými svorkami propojeny vodičem CYA 1 mm² oranžové barvy. Propojení komponentů viz. příloha I.

5. Shrnutí dosažených výsledků

V prvním bodě této práce byl na základě uvedených parametrů vybrán nejvhodnější analyzátor 3f sítě. Jedná se o typ DMG800 dodávaný firmou Lovato. V druhém bodě byly popsány základní veličiny, které daný analyzátor měří. Jedná se o popis elektrického napětí, proudu, výkonů, harmonické analýzy a THD. Navržené zapojení s přístrojovými transformátory proudu je plně funkční. Zařízení je uživatelsky velice příjemné. Nedostatkem zařízení je malý průřez vodiče použitého pro proudový rozsah 2 A a velký počet závitů v primární cívce, což má za následek nezanedbatelný odpor a indukčnost cívky. Hodnoty těchto nežádoucích veličin by bylo možné snížit použitím vodiče s větším průřezem. Toto řešení

však nebylo možné z důvodu malé plochy průvlečného okénka transformátoru. Celé zařízení bylo realizováno s ohledem na minimální náklady a proto byly používány komponenty z jiných starších zařízení, které byly před montáží pečlivě zkontrolovány, nebo starší typy komponentů (např. použité přepínače). Zařízení bylo odzkoušené a již se ve školních laboratořích používá k praktickému měření.

6. Seznam literatury a použitých zdrojů

- [1] Manual ANR96-24 – ABB. <https://www.slo.lv> [online]. [cit. 2015-06-04]. Dostupné z: https://www.slo.lv/uploads/2012/katalogi/slo_abb_multimetri_un_analizatori.pdf
- [2] Manual P50 – Siemens. <http://w3.siemens.com> [online]. [cit. 2015-06-04]. Dostupné z: <http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/power-quality-measurements/power-meter/Pages/sicam-p50.aspx>
- [3] Manual DMG800. www.lovatoelectric.com [online]. [cit. 2015-06-04]. Dostupné z: http://www.lovatoelectric.com/Download/I272IGB11_09_Digital_multimeter_DMG800.pdf
- [4] Manual A2000 – Gossen metrawatt. <https://www.gossenmetrawatt.com> [online]. [cit. 2015-06-04]. Dostupné z: https://www.gossenmetrawatt.com/resources/ec/a2000/db_gb.pdf
- [5] BLAHOVEC, A. Základy elektrotechniky v příkladech a úlohách. Praha : SNTL, 1989
- [6] KUZNĚCOV, M. Elektrotechnika. Praha : SNTL, 1953
- [7] VOBECKÝ, J., ZÁHLAVA, V. Elektronika. Praha : Grada Publishing, a.s., 2005
- [8] JAVORSKÝ, L., BOBEK, A., MUSIL, R. Základy elektrotechniky pro SPŠ elektrotechnické. Praha : SNTL, 1970
- [9] VOŽENÍLEK, L., ŘEŠÁTKO, M. Základy elektrotechniky I pro 1. ročník SOU elektrotechnických. Praha : SNTL, 1984
- [10] DEMBOVSKÝ, L., NĚMEČEK, F. Elektroenergetika. Praha : SNTL, 1972
- [11] JAN, J. Číslíková filtrace, analýza a restaurace signál. VUT Brno : Vitium, 2002

7. Přílohy

Příloha A – Celkové schéma zapojení

Příloha B – Schéma zapojení rozšiřujících modulů

Příloha C – Spínací schéma přepínačů

Příloha D – Výkres čelního panelu

Příloha E – Výkres zadního panelu

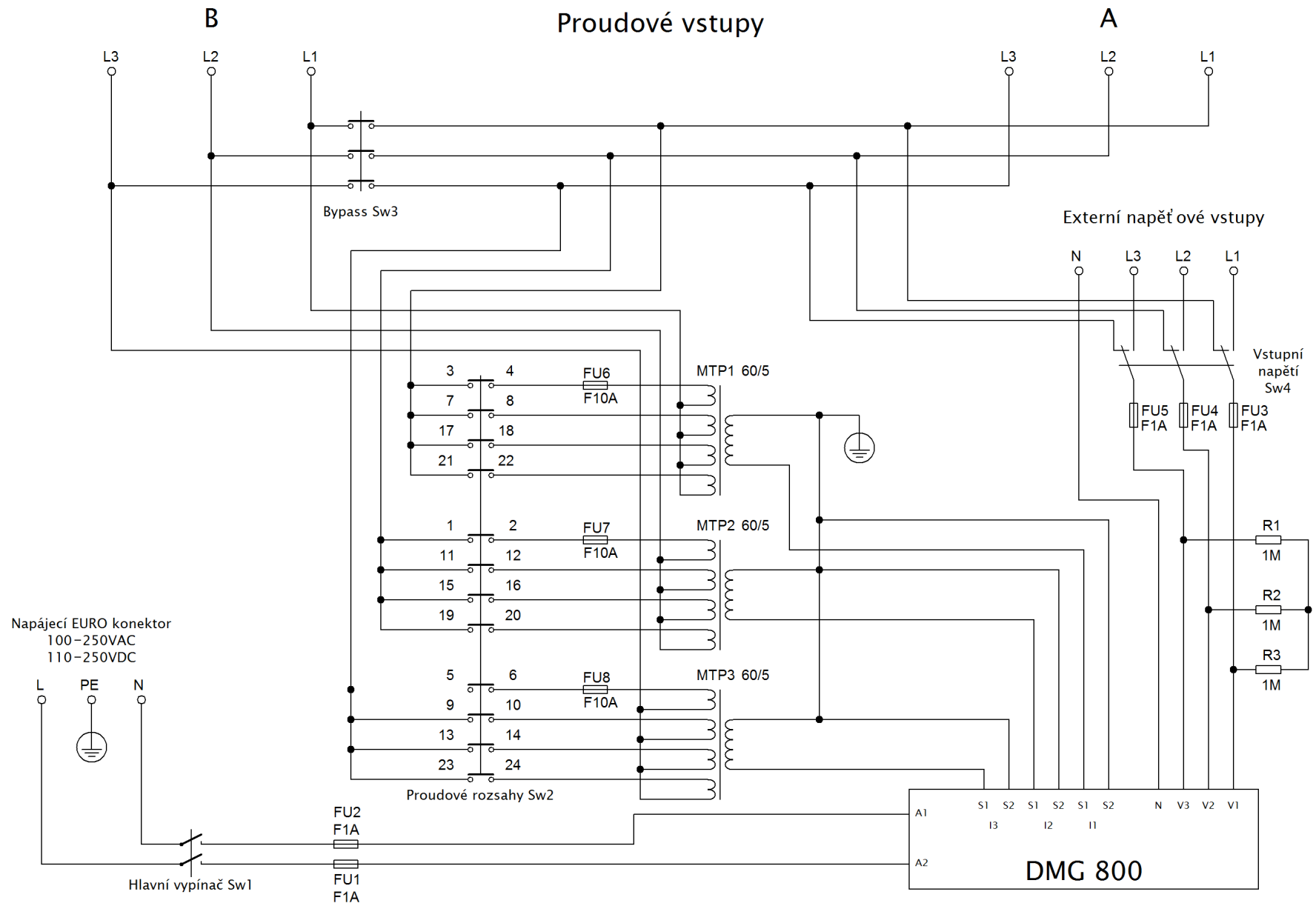
Příloha F – Vnitřní provedení

Příloha G – Provedení cívek PTP

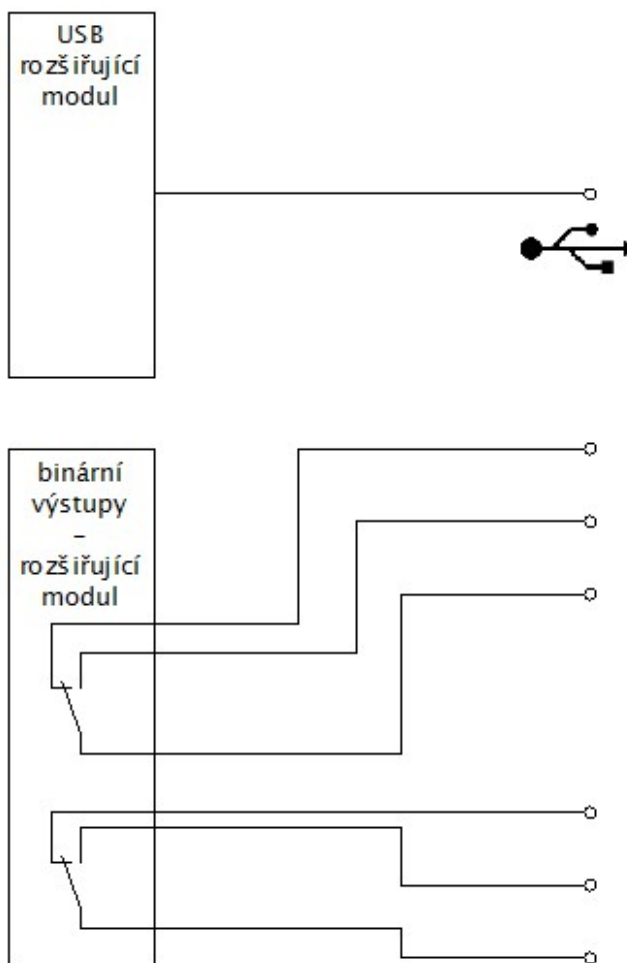
Příloha H – Výkres vačky přepínače proudových rozsahů

Příloha I – Realizace propojení komponentů (průběh výroby)

Příloha A



Příloha B



Příloha C

Přepínač proudových rozsahů Sw2

poloha	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1 (2 A)	X	X	X	X	X	X																			
2 (10 A)							X	X	X	X	X	X													
3 (30 A)													X	X	X	X	X	X							
4 (60 A)																			X	X	X	X	X	X	X

Přepínač napěťových vstupů Sw4

poloha	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1 (int)	X	X			X	X			X	X		
2 (ext)			X	X			X	X			X	X

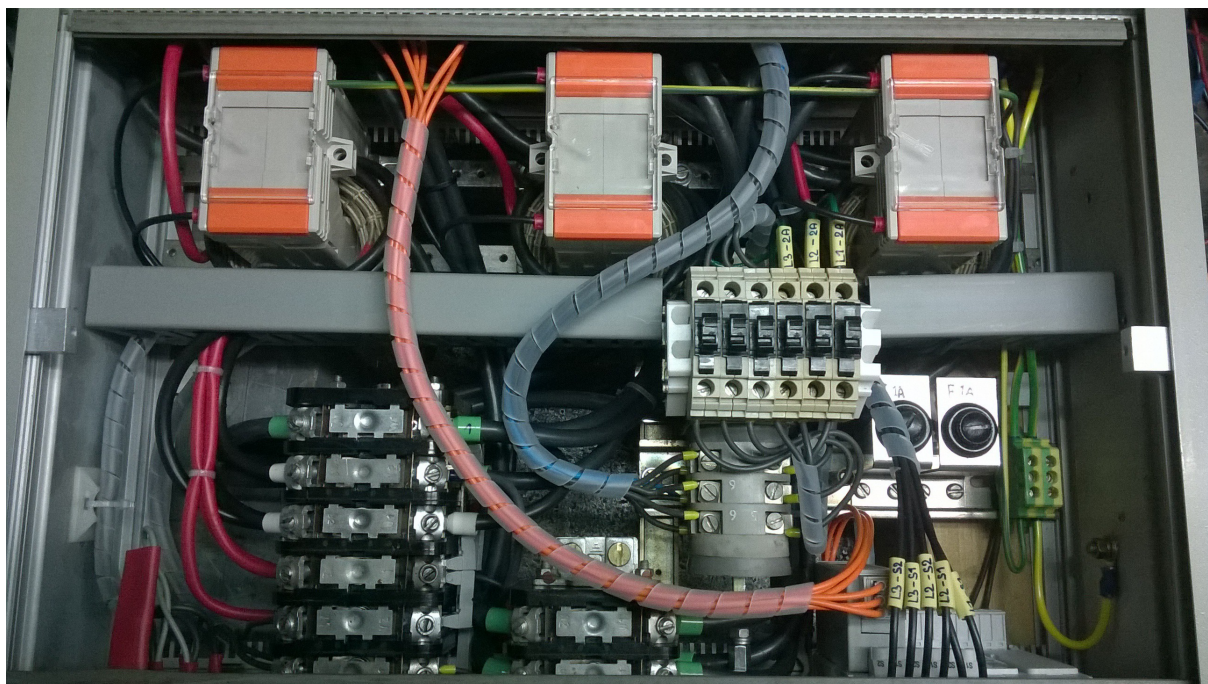
Spínač bypass Sw3

poloha	1	2	3	4	5	6
1 (vyp)						
2 (zap)	X	X	X	X	X	X

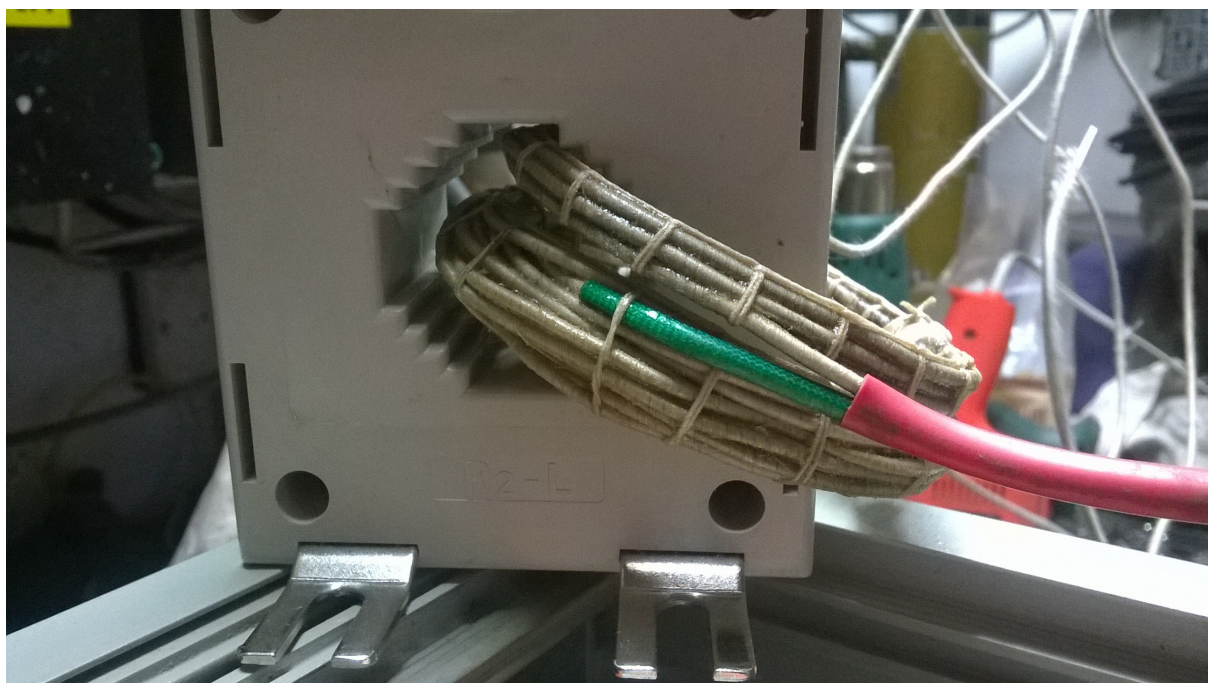
Příloha D (výkres A3)

Příloha E (výkres A3)

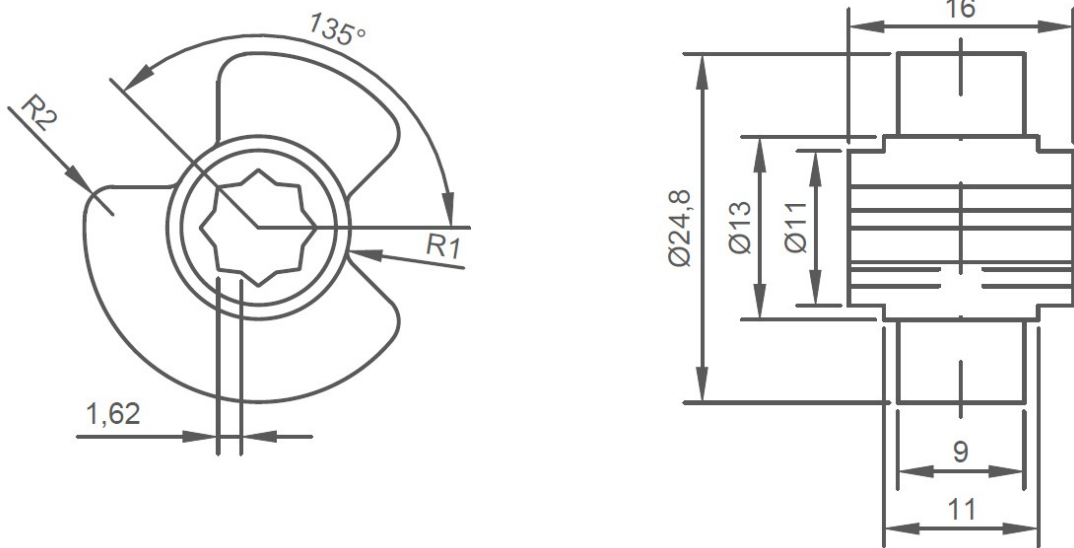
Příloha F



Příloha G



Příloha H



Příloha I



