

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Optimalizace napájení provozu Sušárna uhlí**

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan BOŠTÍK**  
Osobní číslo: **E19N0001K**  
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Téma práce: **Optimalizace napájení provozu Sušárna uhlí**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky**

### Zásady pro vypracování

1. Popište napájecí soustavu průmyslového provozu Sušárna uhlí, zhodnoťte její stávající stav a popište problémy vznikající při jejím provozu.
2. Na základě analýzy problémových stavů navrhněte možná opatření zamezující výpadkům napájecích transformátorů.
3. Proveďte potřebné výpočty a kontroly zatížení prvků napájecí soustavy.
4. Navrhněte optimální zapojení napájecí soustavy z pohledu zrovnomnění jejího zatížení.
5. V případě praktické realizace navržených opatření zhodnoťte přínosy opatření.


Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. MERTLOVÁ, J., NOHÁČOVÁ, L.: Elektrické stanice a vedení, ZČU v Plzni, 2008
2. KORENC, V., HOLOUBEK, J. Kompenzace jalového výkonu v praxi. IN-EL Praha, 1999
3. KRÍŽ, M.: Dimenzování a jistění elektrických zařízení – tabulky a příklady, IN-EL, 2015
4. Příručka elektrotechnika – Jisticí přístroje I a II, firemní materiály OEZ, 2012
5. ČSN 332000-5-523: Elektrická zařízení, část 5 Výběr a stavba el. zařízení – Dovolené proudy

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.**  
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**  
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**

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



  
**Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.**  
vedoucí katedry

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na analýzu provozu Sušárna uhlí. Je rozdělena na několik částí podle zásad pro její vypracování.

V práci je nejdříve popsán současný stav technologie, funkce, zapojení a napájení zařízení včetně základních parametrů uvedených v příloze.

Poté je uvedena analýza problémových a nevhodných stavů, možná opatření k optimalizaci napájení celého provozu a potřebné výpočty.

Pro správnou optimalizaci provozu jsou potřebná data, které jsou získány pomocí dálkového měření požadovaných parametrů napájení.

V závěru je shrnutí celé optimalizace a návrh na hospodárný provoz Sušárna.

## **Klíčová slova**

Napájecí síť, optimalizace provozu sítě, kompenzace účinníku, zatížení transformátoru.

## **Abstract**

The submitted diploma thesis is focused on the analysis of the operation of the Coal Dryer. It is divided into several parts according to the principles for its elaboration. The work first describes the current state of technology, its functions, connections and power supply, including the basic parameters of the device in the appendix. Then there is an analysis of problematic and uneconomical conditions, possible measures to optimize the power supply of the entire operation and the necessary calculations. For proper optimization of the operation, data is needed, which is obtained by remote measurement of the required power supply parameters. In the end, there is a summary of the whole optimization and a proposal for the economical operation of the dryer.

## **Key words**

Power grid, network traffic optimization, power factor correction, transformer load.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

.....

podpis

V Plzni dne 26.05.2021

Bc. Jan Boštík

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miloslavě Tesařové, Ph.D. konzultantovi Ing. Davidu Pavelkovi a Mgr. Tomáši Dvořákovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

## Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 POPIS TECHNOLOGIE A NAPÁJECÍ SOUSTAVY PRŮMYSLOVÉHO PROVOZU SUŠÁRNA UHLÍ ZÚ/ÚU</b> .....	<b>11</b>
1.1 TECHNOLOGICKÝ VÝZNAM PROVOZU SUŠÁRNA.....	11
1.1.1 Trubkový sušič.....	11
1.1.2 Transportní dopravníky.....	11
1.1.3 Mechanické odlučovače.....	12
1.1.4 Elektrostatické odlučovače (EF).....	12
1.1.5 Chlazení nečisté páry (ChNP).....	12
1.1.6 Kompresorová stanice K5/6 a K7.1/2.....	12
1.1.7 Kondenzátní stanice (KS).....	13
1.2 ZHODNOCENÍ STÁVAJÍCÍHO STAVU NAPÁJENÍ PROVOZU .....	13
1.2.1 Zdroje a rozvody VN a VVN .....	13
1.2.2 Rozvody NN .....	15
<b>2 OPTIMALIZACE NAPÁJENÍ PROVOZU</b> .....	<b>18</b>
2.1 KOMPENZACE ÚČINÍKU .....	18
2.1.1 Vyhodnocení měření výkonových poměrů.....	19
2.1.2 Návrh kompenzačního výkonu a počtu kompenzačních stupňů .....	24
2.1.3 Zhodnocení využitelnosti stávajících kompenzačních zařízení .....	26
2.1.4 Revize a modernizace prvků kompenzačních zařízení .....	28
2.2 ZATÍŽENÍ TRANSFORMÁTORŮ.....	33
2.2.1 Paralelní chod transformátorů.....	33
2.3 NASTAVENÍ OCHRAN NN .....	34
<b>3 MĚŘENÍ NAPÁJECÍ SOUSTAVY</b> .....	<b>37</b>
3.1 WONDERWARE HISTORIAN CLIENT .....	37
3.1.1 Nástroj TREND aplikace WHC .....	37
3.2 MĚŘÍCÍ TRANSFORMÁTOR PROUDU MTP .....	37
<b>4 ZÁVĚRY A NAVRHOVANÁ ŘEŠENÍ</b> .....	<b>40</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>42</b>
<b>PŘÍLOHY:</b> .....	<b>44</b>
Trubkový sušič (firmy ZEMAG – ZEITZ) .....	44
Mechanické odlučovače.....	44
Elektrostatické odlučovače (EF) .....	45
Chlazení nečisté páry (ChNP).....	45
Kompresorová stanice K5/6 a K7.1/2.....	46
Technologické schéma Sušárna.....	47
Návaznost provozů Úprava uhlí .....	48
Trubkový sušič.....	48
Transformátor T <sub>1</sub> , T <sub>2</sub> , T <sub>3</sub> .....	49
Transformátor T <sub>4</sub> , T <sub>5</sub> .....	49
Kompenzační rozvaděč s NOVAR 1214/S400.....	50
Kompenzační rozvaděč.....	51
Kondenzátory.....	52
NOVAR 1214/S400.....	52



## Seznam symbolů a zkratek

<i>PD</i> .....	pasový dopravník
<i>Z</i> .....	zásobník uhlí
<i>S</i> .....	sušič uhlí
<i>SR</i> .....	sítový řetězový dopravník
<i>R</i> .....	dopravník řetězový dopravník
<i>EF</i> .....	elektrostatický odlučovač
<i>MR</i> .....	dopravník mourový
<i>C</i> .....	ventilátor
<i>CHÚV</i> .....	chemická úpravna vody
<i>ZÚ</i> .....	zpracovatelský úsek
<i>VS</i> .....	vlastní spotřeba elny
<i>ÚU</i> .....	úprava uhlí
<i>KS</i> .....	kondenzátní stanice
<i>CNM</i> .....	centrální nakládka multiprachu
<i>S</i> .....	zdánlivý výkon
<i>P</i> .....	činný výkon
<i>cosφ</i> .....	účinník
<i>u<sub>k</sub></i> .....	napětí nakrátko
<i>TG</i> .....	turbogenerátor
<i>VS</i> .....	vlastní spotřeba elny
<i>NN</i> .....	nízké napětí
<i>VN</i> .....	vysoké napětí

## Úvod

Optimalizace napájení 500 VAC provozu Sušárna je nezbytná. Dříve docházelo k výpadkům části elektrického zařízení, dle vyjádření odborných pracovníků elektro-provozu. Provoz Sušárna dodává vysušené uhlí v požadovaných parametrech pro další zpracování v provozech ZÚ kombinátu Vřesová. Po restrukturalizaci podniku došlo k útlumu zpracování uhlí a již nemůže dojít k výpadku z důvodu velké rezervy činného výkonu transformátorů. Optimalizace je i tak na místě pro hospodárný provoz celého systému.

Celý provoz je napájen sedmi transformátory. Stávající stav kompenzace je ve špatném stavu. U některých kompenzačních skupin jsou vadné kondenzátory a u některých je nefunkční regulátor jalového výkonu. Od začátku je transformátor  $T_1$  určený k záložním účelům. Není tudíž ani kompenzován a měl by být v případě zálohy normálně bez zatížení. Během let byly připojovány další odběry, které byly z ekonomického hlediska nežádoucí.

Zhodnotím celý systém napájení provozu a upravím tak napájení, aby byla dostatečná záloha pro možné další modernizace provozu. Hlavními cíli této práce je zprovoznit kompenzaci jalového výkonu, rovnoměrně rozdělit zátěž mezi dané transformátory a znovu udělit transformátoru  $T_1$  funkci zálohy. Dále pak měřením odebíraného výkonu celého provozu zhodnotit provoz všech transformátorů a také zkontrolovat nastavení jisticích prvků celého napájení.

# 1 Popis technologie a napájecí soustavy průmyslového provozu Sušárna uhlí ZÚ/ÚU

## 1.1 Technologický význam provozu Sušárna

Sekce Úprava uhlí (dále jen „ÚU“) zpracovatelského úseku se dohromady dělí na 3 provozy. Drtírna, Sušárna a Mletí uhlí. Sušárna se dále dělí na dva úseky, a to na Sušárnu I a Sušárnu II (tzv. chalupy).

Provoz sušárna upravuje, respektive zkvalitňuje uhlí sušením a po vytrídění ho dopravuje k dalšímu technologickému zpracování na sekci Teplárna (kotelna). Výrobní kapacita provozu je 540 t/h sušeného uhlí, kapacita zauhlovací trasy kotelny je 210 t/hod a kapacita zauhlovacích pasů PD 1.1 a PD 2.1 je 500 t/hod. surového uhlí.

Drcené uhlí je dopravováno z provozu Drtírna pasovými dopravníky po dopravním mostě D na Sušárnu I a po mostě F na Sušárnu II. Na Sušárně I je uhlí shrnováno pomocí křídlových pluhů na pasové dopravníky a z nich do jednotlivých zásobníků Z 1 - 7. Ze zásobníků uhlí je pomocí plnicího zařízení vpouštěno do trubkových sušičů S. Vysušené uhlí vypadává ze sušiče do brýdové komory a výsypkou do síťových redlerů SR, kde dochází ke třídění na jemnou část o zrnitosti do 5 mm (sekce Teplárna) a hrubou část nad 5 mm (sekce Generátorovna).

Na Sušárně II přepadává uhlí do svodek umístěných pod hnacím bubnem pasů PD a klapkou je usměrňováno na pasy PD. Další postup uhlí je stejný jako na Sušárně I. (*Viz. příloha*)

Jemný uhelný prach (multiprach), který vzniká při sušení uhlí, je brýdovou komorou odváděn do elektrostatických odlučovačů EF, kde je zachycován a odváděn mourovými dopravníky MR k dalšímu zpracování na sekci Teplárna. [1]

### 1.1.1 Trubkový sušič

Sušení je důležitým článkem při zhodnocování méně hodnotného hnědého uhlí. Jeho účelem je zhospodárnit jak plynárenské, tak i teplárenské provozy. K sušení drceného uhlí se používá trubkových sušičů výrobků firmy ZEMAG - ZEITZ. Na každé z obou sušáren je zabudováno 7 trubkových sušičů. Do bubnu sušiče se přivádí technologická pára a do trubek sušiče surové drcené uhlí. Sušení probíhá nepřímou - přestupem tepla z páry přes stěnu trubky do uhlí. Z uhlí se odpařuje voda. Vzniklá vodní pára se vzduchem a jemným uhelným prachem proudí brýdovou komorou do prostoru elektrostatického odlučovače (elektrofiltru – EF). Sušené uhlí se odvádí přes výsytku do síťového redleru SR (transportní dopravník). Technologická pára se v sušiči ochlazuje a kondenzuje. Kondenzát se odvádí do sběrných nádrží a odtud k dalšímu použití. Uhlenný prach zachycený v EF se svádí do mourových redlerů MR. (*základní technické údaje viz. příloha*)

### 1.1.2 Transportní dopravníky

Dopravníky slouží k přepravě surového uhlí na sušárnu a sušeného uhlí na sekci Generátorovna a sekci Teplárna. Jsou konstrukčně řešeny tak, že snižují nebezpečí exploze uhelného prachu na minimum, a přitom vyhovují všem požadavkům přepravy uhlí ve směru vodorovném i šikmém. Na provozu jsou Pasové dopravníky a Řetězové dopravníky.

### 1.1.3 Mechanické odlučovače

Sušené uhlí, sypající se na pasový dopravník, má v sobě akumulovanou tepelnou energii, která způsobuje zbytkové uvolňování částí vázané vody, jež ve formě vodních par stoupá do prostoru. Tyto páry sebou unášejí velmi jemné částičky uhelného prachu a společně znečišťují prostředí v okolí. Jelikož jsou pasové dopravníky provozovány v uzavřeném prostoru, musí se tato směs odvádět a zpětně vzájemně oddělit. K tomuto účelu slouží mechanické odlučovače.

Vodní páry s jemným uhelným prachem jsou sacím potrubím a ventilátorem nasávány do tělesa srážecí, kde se pomocí rozptýlené vody oddělí prachové částice uhlí od parovzduchové směsi a proudem vody odvedou do mourové kanalizace. Čistý vzduch se odvádí komínem do volného ovzduší. Označení ventilátorů je C11, C12 – SI a C13, C14. (základní technické údaje viz. příloha) [2]

### 1.1.4 Elektrostatické odlučovače (EF)

Elektrostatické odlučovače jsou nedílnou součástí zařízení parních trubkových sušičů. S velkou účinností 90 - 99 % zajišťují oddělení uhelného prachu od vodních par uvolňujících se při procesu sušení v uvedených sušících linkách. Řeší problém velkých průmyslových objektů při zajištění čistoty ovzduší a životního prostředí.

Jedná se o stavbu komínového tvaru, kde je pohyb brýdových par zajištěn přirozeným tahem. V trubkách sušiče se z uhlí odpařuje povrchová a částečně i vnitřní voda. Vzniká tak velké množství vodní páry, která spolu se vzduchem a jemným uhelným prachem vstupuje jako brýdy do prostoru odlučovače. Působením elektrostatického silového pole se prachové částice negativně ionizují, zachycují se na kladných anodových elektrodách a odtud pak spadávají, zbaveny elektrického náboje do zásobníků a mourovou trasou dále k dalšímu využití pro potřeby sekce Teplárna a pro nakládku sušeného hnědouhelného prachu. (základní technické údaje viz. příloha) [2]

### 1.1.5 Chlazení nečisté páry (ChNP)

Technologické zařízení stavby ChNP slouží ke kondenzaci nespotřebované nečisté technologické páry vznikající v procesu chlazení generátorového plynu v provozu Generátorovny I a II ZÚ Vřesová. Tato technologická pára je částečně spotřebována v provozu Úpravna na sušení uhlí, nespotřebované množství je potom vypouštěno do atmosféry. Toto technologické zařízení je napájeno z provozu Sušárna a podílí se na spotřebě celého provozu. (základní technické údaje viz. příloha)

### 1.1.6 Kompresorová stanice K5/6 a K7.1/2

Kompresorová stanice je součástí objektu provozu Sušárny, a proto je napájena z tohoto provozu. Slouží k inertizaci a dopravě multiprachy který se vyrábí v dalším provozu Mletí uhlí ÚU. Jeho médium je dusík N<sub>2</sub> vytěsňující kyslík O<sub>2</sub>, který je nežádoucí vzhledem k výbuchu. Kompresorová stanice se skládá ze dvou turbokompresorů K5 a K6 pro dopravu multiprachy pomocí fulerova čerpadla a K7.1 a K7.2 pro inertizaci v provozu a zásobnících Z4 a Z5. (základní technické údaje viz. příloha)

### 1.1.7 Kondenzátní stanice (KS)

Kondenzátní stanice slouží k čerpání kondenzátu, který se tvoří srážením horké páry v sušících linkách z důvodu sušení uhlí pro další zpracování. Po použití se ukládá kondenzát do nádrží na dvoře v počtu 8 ks provozu Sušárny a pomocí čerpadel se přepravuje do dalšího provozu pro chemickou úpravu vody. (ChÚV) Medium v podobě vody je důležitou surovinou pro výrobu elektrické a tepelné energie. Musí mít požadované parametry, aby splňovala patřičné podmínky pro plynulý provoz. Teplota vody při čerpání má i 90 °C. Čerpadla, která kondenzát čerpají na ChÚV jsou regulována pomocí frekvenčního měniče otáček a tím dosahují požadované hladiny v nádržích. Počet čerpadel k zabezpečení přepravy kondenzátu je 4 ks. Štítkové hodnoty motorů čerpadel jsou: Č617, Č618 - F 280 S 02 P = 75 kW(500 V). Č614, Č615 P = 30 kW(500 V).

## 1.2 Zhodnocení stávajícího stavu napájení provozu

Provoz Sušárna uhlí byl vystaven v 60. letech 20. století a při výstavbě byly učiněny kroky k výpočtu zatížení a nastavení napájení celého technologického provozu. Od výstavby provozu se technologie velice změnila a důsledkem modernizace (odstavování či připojování nových částí provozu) se parametry napájení změnilly. Tím docházelo v určité fázi technologie k nežádoucím překročení zatížení transformátorů a výpadku zařízení. Při součinném spuštění největších pohonů, například ventilátorů 75 kW (viz. 1.1.3), čerpadel o výkonech 75 kW nebo transportních dopravnících o výkonu 90 kW (viz. 1.1.2).

### 1.2.1 Zdroje a rozvody VN a VVN

Celý průmyslový provoz je napájen ze 7 ks transformátorů (T1 – T7) o různých výkonech a sekundárních napětí. Transformátory chlazené olejem jsou umístěny v samostatných kobkách.

Tabulka 1: Základní parametry transformátorů

Označení	Výrobce	typ	zapojení	převod [kV]	výkon [MVA]	uk% [%]	množství oleje [kg]	váha [kg]	rok výr.
T1, T2, T3	BEZ	aTOHn399/10	Yy 0	10/0,5	1	6,54	465	2 660	2019
T4, T5	BEZ	oTO392/22	Yy 0	10/0,5	1	6,47	1 290	4 390	1964
T6, T7	EFACEC	N84.941	Dyn 1	10/0,4	0,63	5,8	330	1 630	1997

Transformátory T1 – T3 jsou 3-fázové olejové transformátory firmy BEZ, hermeticky uzavřené s odbočkami na primárním vinutí, a to kvůli regulaci napětí na sekundární straně. Transformátory T6 – T7 jsou také hermeticky uzavřené olejové od firmy EFACEC- Portugal s odbočkami. T4 a T5 jsou už starší transformátory s olejovou vyrovnávací nádrží a odbočkami firmy BEZ.

Primární napětí transformátorů je 10 kV (VN) dodávané ze stávající kogenerační elektrárny vlastní spotřeby (dále jen „VS“). Provozu je umožněno hlavní napájení ze dvou přívodů (3R2.1 a 16R3.1), a tím je zajištěna dodávka elektrické energie dle stupňů důležitosti. Rozvodna R100.1 (10 kV) (obr. č.1.1) je dělena na dvě části, které se v případě potřeby spojují podélným spínačem přípojnic. V případě dalšího napájení a nebo zdroje energie je možné použít i propojení s provozem Mletí uhlí (14R368.1). Mletí uhlí je další z provozů

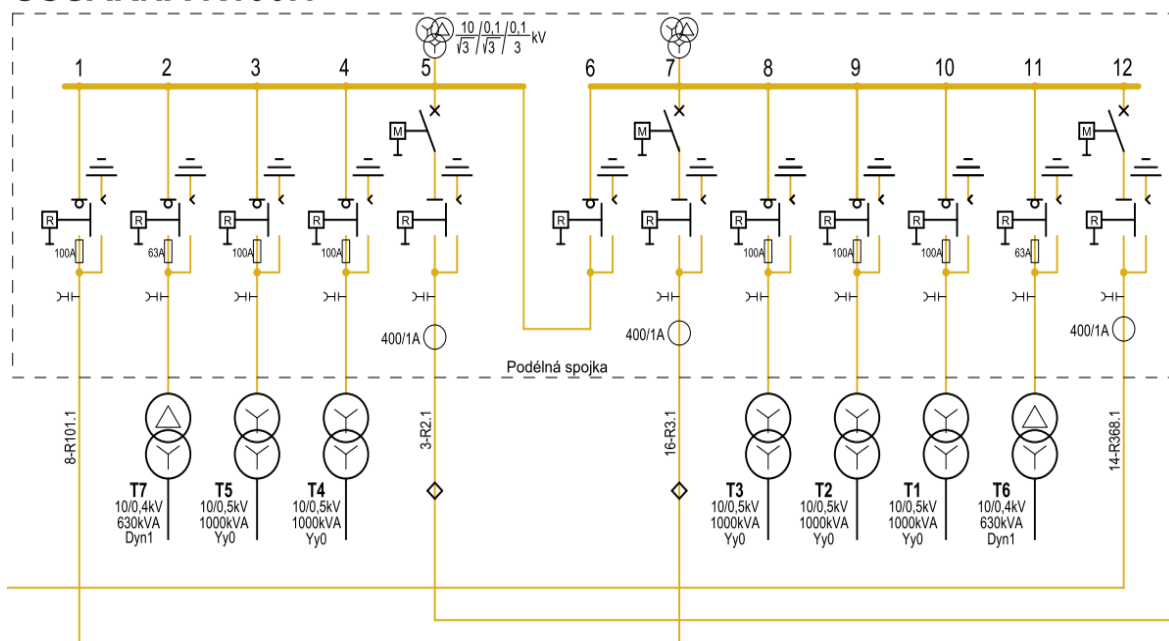
úpravy uhlí (ÚU). Provoz Sušárna je také alternativně možným zdrojem pro provoz Drtárna (8R101.1).

Sušárna disponuje také rozvodnou R100.1A (6 kV) která napájí a jistí pohony pasových dopravníků P1.1 a P2.1 dopravující drcené uhlí z provozu Drtárna. Rozvodna R100.1A je koncipována stejně jako R100.1 a je napájena z 13R9.1 a 3R347.1 VS. Rozvodna R100.1A není pro tuto DP nijak důležitá.

Všechny transformátory mají měření teploty oleje, která se každou směnu kontroluje a zapisuje. Další ochranou je Buchholzovo-plynové relé, které signalizuje a vypíná transformátory T4 až T5 při přetížení a v případě zkratu ve vinutí.

Součástí zamezení přetížení transformátoru je také jištění. Na primární (VN) straně jsou VN pojistky (HH-Sicherungs-Einsatz 3GD1 220-3B, 12 kV, 100 A) a na sekundární straně je jištění s požadovanou nadproudovou spouští. (viz. 2.4)

## SUŠÁRNA R100.1



Obr.č. 1.1 Rozvodna VN - R100.1

V rozvodně EF elektrostatických odlučovačů (EF) jsou zdroje napětí, které napájí transformátory s usměrňovací VVN pro funkci separace multiprachy při sušení uhlí v trubkových sušičích (viz. 1.1.4). Řídicí rozvaděče pro Sušárnu I (dále jen SI) jsou napájeny 0,5 kV a Sušárna II (dále jen SII) 0,4 kV. Rozvaděče (Filterschrank) SI jsou vybudovány firmou VEB Elektroprojekt Berlin 3x500 V Ds 50 Hz r.v.1963 a SII VEB Elektroprojekt und anlagenbau Berlin-DDR, typ: E15 AB0002 – EES 380/80–C, 3x380 V, 50 Hz, 80 A, r.v. 1990. Provozní hodnoty při chodu EF jsou tyto:  $I_n=70$  mA a  $U_n=40$  kV.

Kvůli předmagnetizaci jsou instalovány u řídicích rozvaděčů také transduktory. (základní technické údaje viz. příloha)

## 1.2.2 Rozvody NN

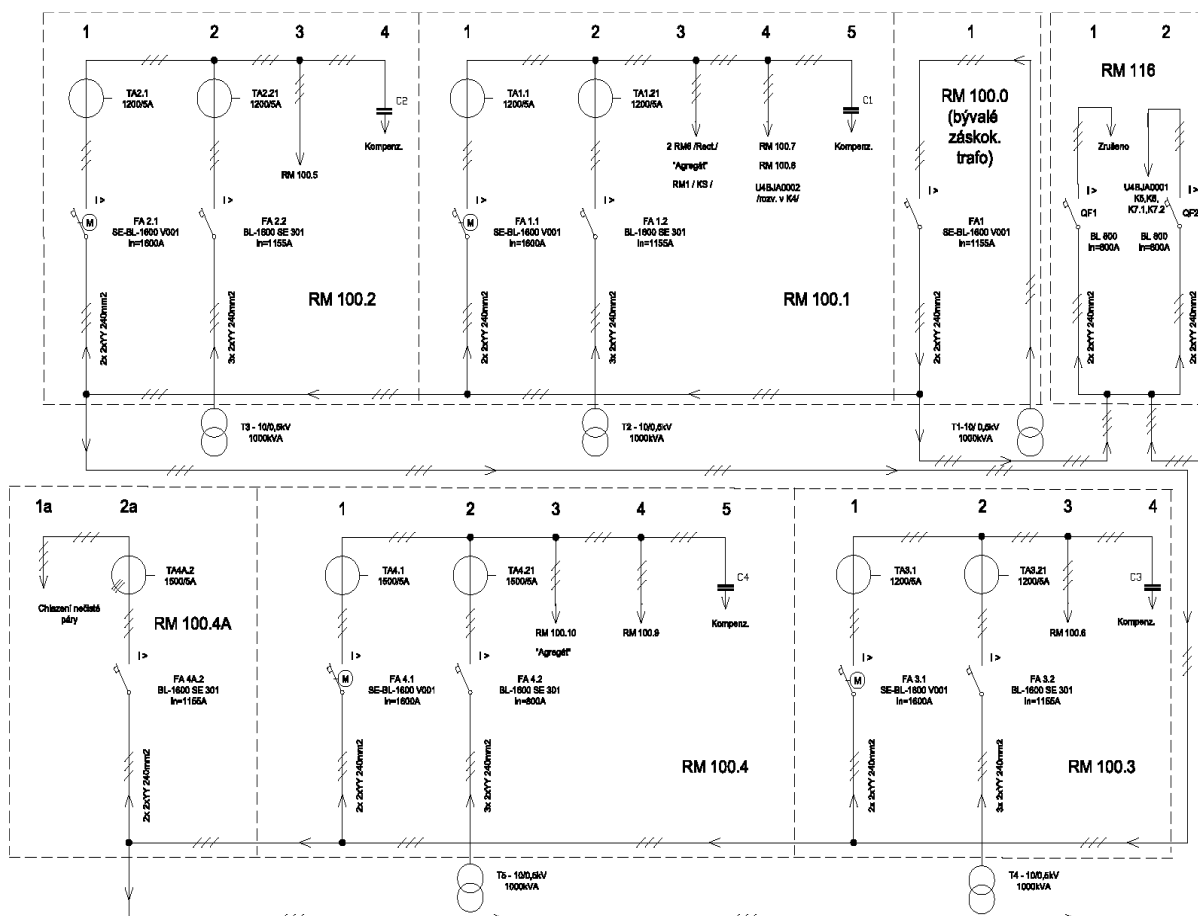
Napěťová pásma pro silová, ovládací a signalizační zařízení jsou různá. Způsob zapojení sítě je IT i TN-C-S. Ve většině případů je využito 500 VAC, 50 Hz v zapojení IT sítě (motorové rozvody). Pro rozvody zásuvek a osvětlení je napětí 400/230 VAC, 50 Hz v zapojení TN-C (světelné rozvody) a ve výjimečných případech i zásuvky 400/230 VAC v zapojení TN-C-S. Toto je u nově vystavěných zařízení.

Po provozu jsou rozmístěny rozvodny, které napájí silová zařízení. Tyto rozvodny jsou v zapojení paprskovitém. V daných rozvodnách jsou umístěny i rozvaděče řídicího systému pro ovládání celé technologie. Ovládací napětí je 230 VAC 50 Hz nebo 48 VDC. 24 VDC je pro signalizační elektrického zařízení.

V provozu je usměrňovač pro nabíjení akumulátorů pro napětí 2P 220 VDC, pro podpěťové cívký jističů.

Nouzové osvětlení pro celý provoz je realizován diesel agregátem, který je určen pro všechny provozní ÚÚ. Diesel agregát je DG SDMO 275 kW a na výstupu je napětí 0,5 kV, 317 A,  $\cos\phi = 0,8$ , RPM 1 500. Pro napájení Sušárny je transformováno na 0,4 kV pomocí transformátoru.

V rozvodně 500 VAC je hlavní rozvod s jištěním každého transformátoru. Způsob propojení je okružní (obr.č.1.2) s ohledem na paralelní chod transformátorů. Záskokový transformátor je  $T_1$ . Rozvodna 500 V se dělí na skupinu rozvaděčů RM 100.0, RM 100.1, RM 100.2, RM 100.3, RM 100.4, RM 100.4A a RM 116. Každá skupina obsahuje jištění všech vývodů a kompenzaci mimo RM 100.0 ( $T_1$ ), RM 116 (Kompresorovna) a RM 100.4A (ChNP).



PŘEHLEDOVÉ SCHÉMA ROZVODU 500V - sekce SUŠÁRNA

Obr.č. 1.2 Přehledové schéma rozvodny 500 V

Po seznámení s novými projekty modernizace během let jsou zásadní odběry z provozu Kompresorová stanice K5/K6 a K7.1/K7.2 (viz. 1.1.6) rozvaděče 2RM 116. Chlazení nečisté páry ChNP (viz 1.1.5) rozvaděče 1aRM 100.4A, je odstavené a proto bez odběru. Oba odběry jsou napájené ze záložního transformátoru T<sub>1</sub> a to bez kompenzace (Obr.č. 1.2).

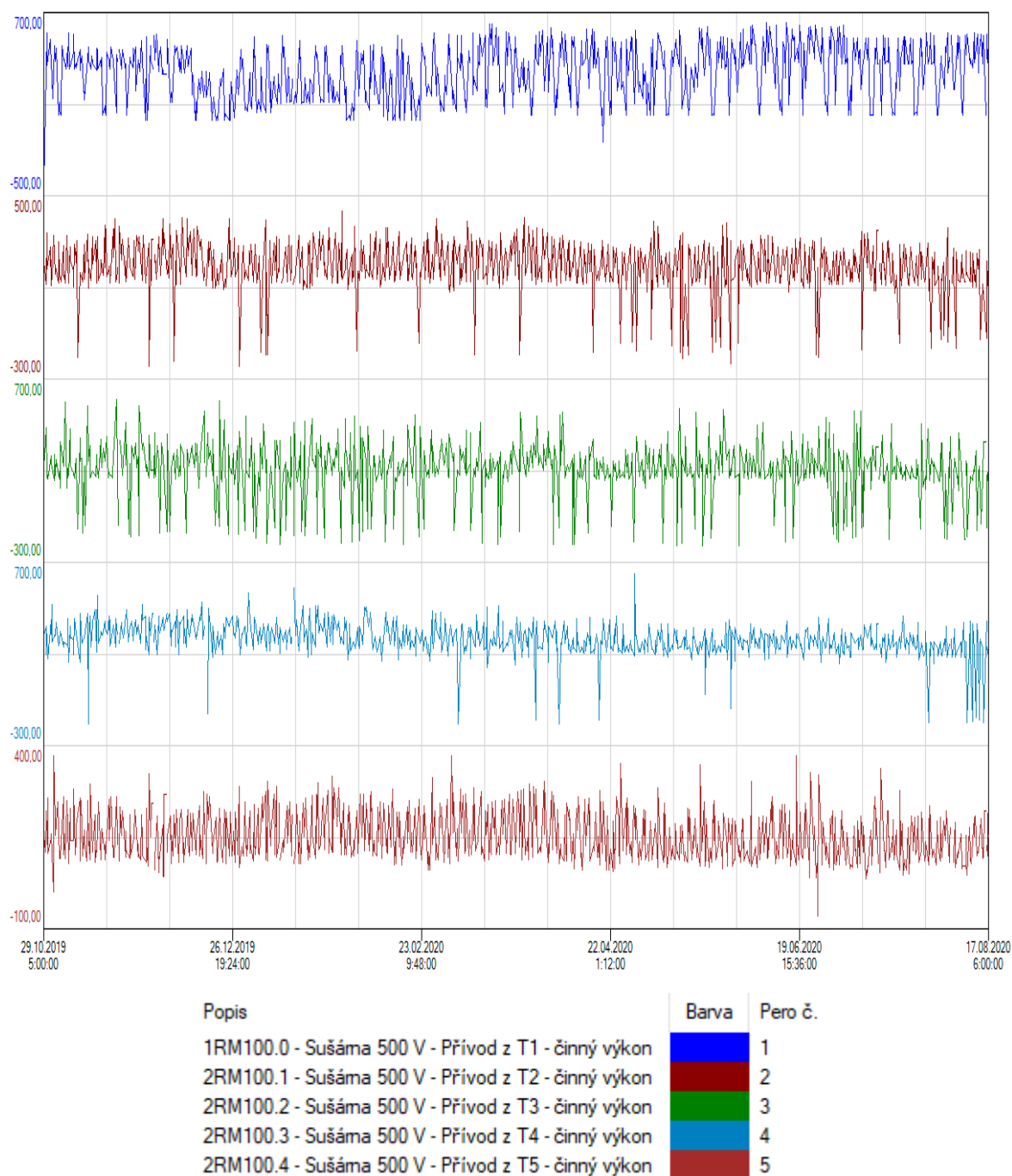
Výpadky mohou nastat v případě paralelního spojení a nerovnoměrného rozložení výkonu mezi transformátory. V paralelním chodu při rozdílném napětí na sekundárních vinutí dochází k vyrovnávacím proudům mezi transformátory. Při rozjezdu velkých zařízení s velkými výkony dochází k velkým proudovým špičkám.

Stávající kompenzace je instalována ve způsobu centrálním se statickými nehrazenými kondenzátory pro každý transformátor mimo T<sub>1</sub>. Celkové jalové výkony každé kompenzace jsou stejné. Počet stupňů je 12 a každý kondenzátor je 3-fázový (zapojení do D) s výkonem 22,7 kVAr. Celkový výkon je tedy  $12 * 22,7 = 272,4$  kVAr.

K dnešnímu dni tj. 12.3.2021 byla zastavena část technologie rozhodnutím vedení společnosti SU a.s. Jeden z důvodů je vysoká cena emisních povolenek. Celkové odstavení se dotklo provozů Generátorovna, Rectisol, Fenolka a Chlazení nečisté páry ChNP (viz.1.1.5). Celkový odběr sušeného uhlí tímto klesl a muselo se omezit i počet zařízení, které sloužilo pokrýt celkovou poptávku na zpracování. Jedná se o celkovou trasu na provoz Generátorovna a snížení počtu zařízení na Sušárně (sušiče). Energetika také snížila výkon ze 4 TG na 2 TG. Z tohoto vyplývá, že celkový odběr energie se rapidně snížil, a tím již nemůže dojít k výpadkům. Nicméně optimalizace má své opodstatnění a bude dokončena. Pro přehled jsem doplnil odběry všech transformátorů v období od 29.10.2019 do 17.8.2020 kdy byl provoz Sušárna v plném zatížení.



## Výkony v plném provozu Sušárna



Graf 1: Výkony v plném provozu Sušárna

Tabulka 2: Výkony v plném provozu Sušárna

Parametr	Minimum	Časová značka v minimu [den/čas]	Maximum	Časová značka v maximu [den/čas]	Průměr	Počet vzorků
$P_{T1}$ [kW]	57,11	29.10.2019 5:38:56	654,32	15.06.2020 12:58	322,4641	915
$P_{T2}$ [kW]	103,8	30.11.2019 21:09:34	447,97	29.01.2020 19:31	192,1525	917
$P_{T3}$ [kW]	118,75	12.05.2020 19:50:27	601,05	20.11.2019 19:55	209,909	917
$P_{T4}$ [kW]	169,8	06.04.2020 5:19:18	654,95	29.04.2020 17:59	286,8949	917
$P_{T5}$ [kW]	76,08	25.06.2020 13:28:14	381,31	01.11.2019 10:05	150,8946	917

## 2 Optimalizace napájení provozu

Mým úkolem je zhodnotit celkový stav napájení provozu Sušárna a optimalizovat celý systém na efektivní parametry. Během dlouhé doby provozu se stav napájení neřešil, a proto je dobré se tím zabývat. Chci se zaměřit na účinnost kompenzace, celkový odběr každého z transformátorů a nastavení jistění NN. Jelikož kompenzační provoz disponoval, provedu měření a zhodnotím, zda bude stávající jalový výkon dostatečný pro jeho funkci u každého z transformátorů.

Další hledisko optimalizace je celkové zatížení každého z transformátorů a rovnoměrné zatížení transformátorů. V případě paralelního chodu může dojít k přetížení a výpadku. Je možné přihlédnout i k odstavení jednoho z transformátorů z důvodu velmi malého odběru a efektivnosti kompenzace. Odstavení transformátorů by se snížily i náklady na jeho provoz.

Transformátor T<sub>1</sub> se přepojením všech svých odběrů nastaví na funkci záložního zdroje.

Správné nastavení všech ochran je důležité pro správnou funkci provozu. Při nesprávném nastavení zkratové spouště jističů může nastat výpadek.

### 2.1 Kompenzace účinníku

S ohledem na stávající stav kompenzace účinníku u každého z transformátorů (10/0,5 kV), který je velice nedostatečný, je potřeba kompenzaci zrenovovat a nastavit na požadovaný účinník a snížit tak odebíraný zdánlivý výkon (viz. 2.1.1). Tímto odlehčíme turbogenerátorům (TG). Poklesem proudu můžeme zvýšit přenos výkonu (P) po vedeních a transformátorech. V této situaci to není důležitý pohled vzhledem k vlastní spotřebě (VS) elektrárny, ale v jiných případech je také dobré snížit sazby, a tím odpadnou peníze za překročení účinníku. U některé kompenzace nebyl kompenzační účinník na stanovené hodnotě kvůli vadným kondenzátorům a některé regulátory jalové energie nefungovaly vůbec. Uskutečním výměnu regulátorů jalového výkonu s možností dálkového přenosu hodnot včetně celkového odběru a připojím dálkové měření na centrální systém. Tak dostanu patřičné parametry k výpočtu požadovaného kompenzačního výkonu a celkového odběru každého transformátoru.

Díky kompenzaci se sníží odběr induktivního jalového výkonu. Při vyšším účinníku můžou transformátory dodávat vyšší činný výkon (rezervní výkon)(viz.2.1.5), čímž se celkové ztráty sníží. Ztráty se projeví nejvíce tepelnými účinky v činném odporu, které se v třífázovém systému projeví vztahem:

$$\Delta P = RI^2$$

Toto snížení se týká pouze odběru na transformátorech, a to je taky účelem. Kompenzace nemá vliv na odběr proudu zařízení v provozu.

Dle umístění dělíme kompenzaci na individuální, skupinovou nebo centrální. Podle principu činnosti kompenzace se části dělí na kompenzaci s rotačními, statickými pasivními nebo statickými kompenzátory aktivními. Regulace se zajišťuje s kompenzátory s konstantním výkonem, se stupňovitou kompenzací a nebo s plynulou kompenzací. Kompenzační výkony větší než 800 kVAr je vhodné řešit na straně VN. [4]

Po zhodnocení technických i ekonomických hledisek provozu Sušárna je výhodné zvolit ústřední (centrální) kompenzace s regulací stupňovitou pomocí statických kondenzátorů nehrazených. Výhodou těchto kompenzací je menší kompenzační výkon. Jelikož provoz již

měl kompenzace, je ekonomické obnovit její funkci. Dojde k výměně regulátorů jalového výkonu a vadných kondenzátorů bez známého požadovaného celkového kompenzačního výkonu u všech transformátorů. Kompenzace jsou u každého z transformátorů na straně NN v rozvaděčích RM 100.1 ( $T_2$ ), RM 100.2 ( $T_3$ ), RM 100.3 ( $T_4$ ), RM 100.4 ( $T_5$ ), RM 100.5 ( $T_5$ ).

Další možností zlepšení účinníku bez použití kompenzace je náhrada běžných asynchronních motorů (dále jen AM) za synchronní. Tato metoda je pro naši volbu nevhodná, neboť by to bylo nákladné a použití je možné pouze u výkonů nad 100 kW a pro trvalý chod zařízení.

Zlepšení účinníku lze také vhodnou volbou AM. V rozsahu zatížení 75 – 100 % (jmenovitý výkon  $P_n$ ) pracuje motor s nejlepším účinníkem. U motorů se zatížením do 45 % je výhodná výměna motoru s nižším výkonem a u zatížení od 45 – 75 % je nutné zvážit náhradu. AM v provozu jsou obvykle zatíženy v rozmezí 75 - 100 %.

Obecně je známo, že AM s kotvou vinutou mají horší účinník než s kotvou nakrátko. O této variantě se již neuvažuje z důvodu větších výhod využití AM s kotvou nakrátko z hlediska obslužnosti, spolehlivosti a spojení s frekvenčním měničem.

### 2.1.1 Vyhodnocení měření výkonových poměrů

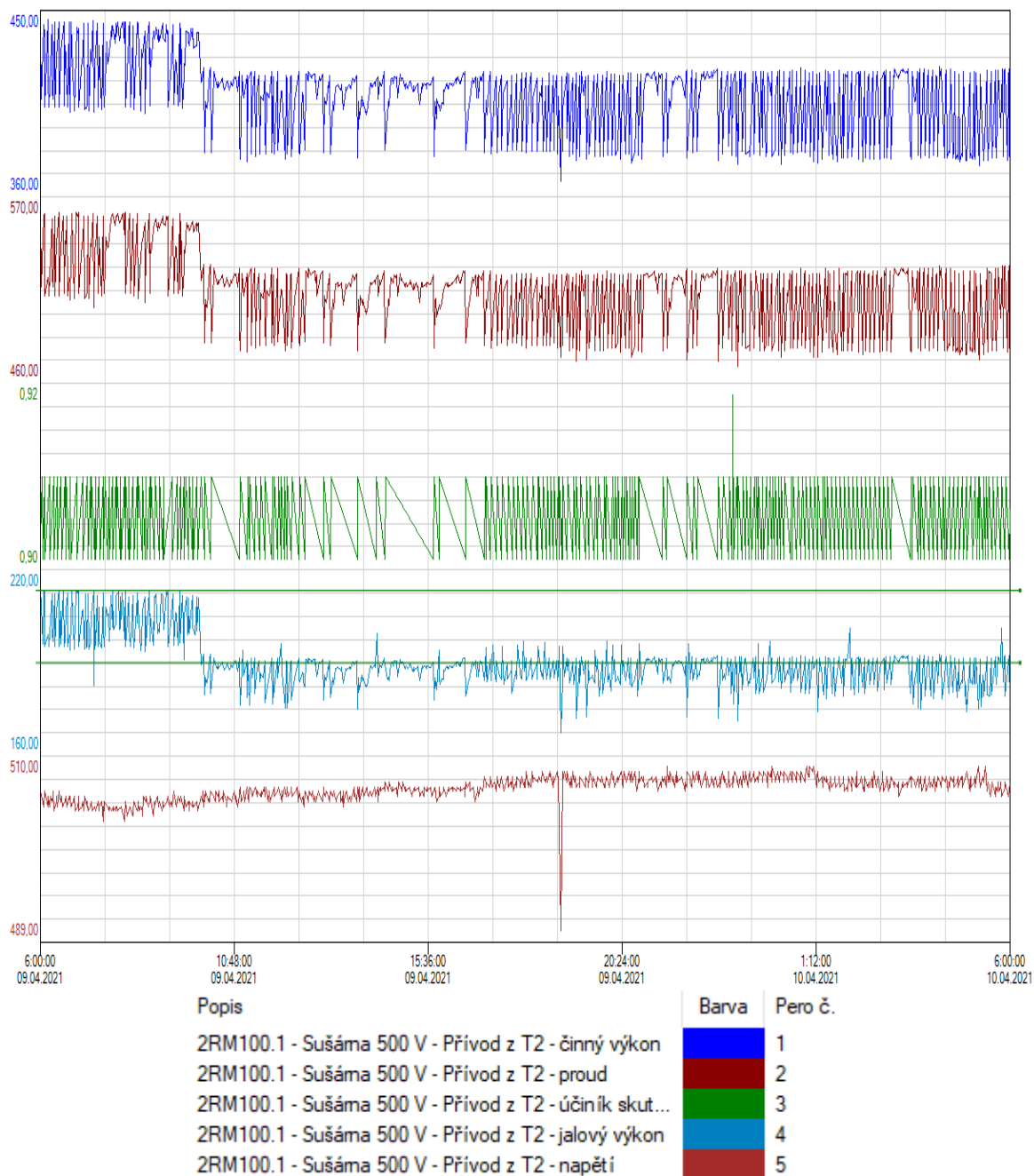
Měřením získám přesnější údaje o skutečných poměrech v síti, což povede k optimálnímu nastavení daných kompenzací, a tím i celkové zátěže na transformátorech. Mohu tím spočítat potřebný kompenzační výkon ( $Q_{kom}$ ) a jalový výkon jednoho stupně ( $Q_{Cl}$ ). Budu mít přehled o zatížení jednotlivých transformátorů a budu moci zvolit správné hodnoty pro jistící prvky. S kompenzovanou zátěží mohu získat rezervu činného výkonu, kterou mohu dále využít k rozšíření či modernizaci provozu.

Provoz Sušárna má stabilní odběr bez větších výkyvů, a proto jsem provedl měření pomocí regulátoru jalového výkonu NOVAR ve 24 hodinovém cyklu bez kompenzace při daném činném výkonu ( $P$ ). Časový cyklus je uveden od 06:00:00 do 06:00:00. Měřenými veličinami jsou proud ( $I$ ), činný výkon ( $P$ ), jalový výkon ( $Q$ ), účinník ( $\cos\varphi$ ) a napětí ( $U$ ). Měření probíhalo na transformátorech  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  a  $T_5$ . Výsledky měření byly zpracovány graficky, formou časových průběhů měřených veličin, a tabelární formou. (*Graf 2,3,4,5*) Odečtené byly minimální a maximální hodnoty měřených veličin a dopočítány průměrné hodnoty veličin z naměřených vzorků, které nebyly z měření vyloučeny.

V grafech jsem pomocí jezdců vyznačil průměrnou a maximální hodnotu jalového výkonu  $Q$ . Průměrné a maximální hodnoty  $Q$  jsou vyznačeny v pravém horním rohu v zelené barvě. Označení [1] je pro  $Q_{max}$  a [2] je pro  $Q_{průměr}$ . Hodnoty, které vykazují příliš velkou či malou velikost v krátkém časovém úseku, jsem do výpočtu nezahrnoval. Tyto hodnoty mohly být způsobeny přechodným jevem v obvodu nebo vlivem chyb měření.

RM100.1 – T2 - BEZ KOMPENZACE

Jezdce osy hodnot [1]: 214,07 [2]: 190,11 [Rozdíl]: -23,96



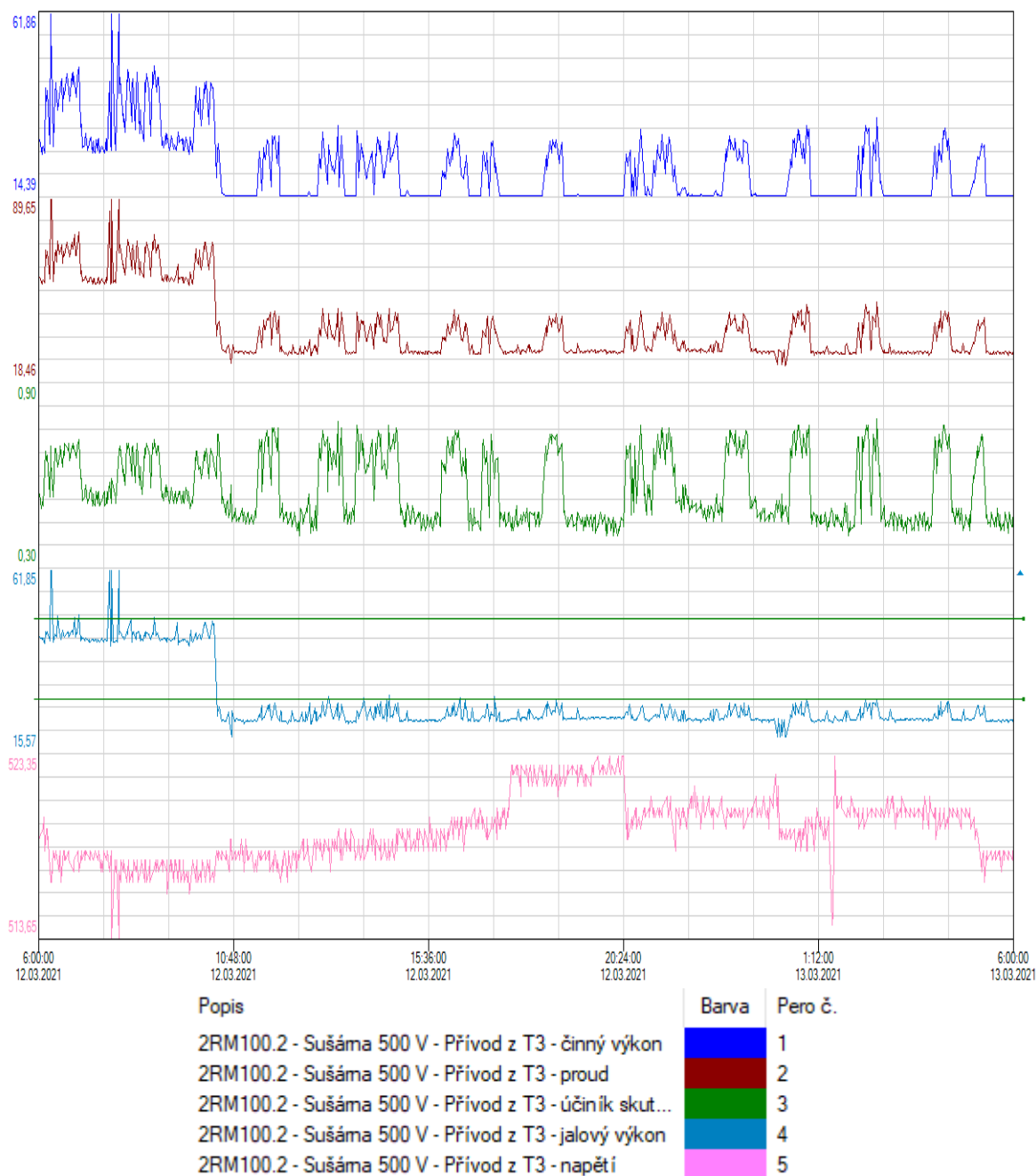
Graf 2: T2 – BEZ KOMPENZACE

Tabulka 3: T2 – BEZ KOMPENZACE

Parametr	Minimum	Časová značka v minimum [den/čas]	Maximum	Časová značka v maximum [den/čas]	Průměr	Počet vzorků
P [kW]	366,81	09.04.2021 18:53	446,98	09.04.2021 6:12	410,1862	856
I [A]	469,2	09.04.2021 23:16	564,15	09.04.2021 6:00	515,1988	840
cos φ [-]	0,9	09.04.2021 6:03	0,92	09.04.2021 23:09	0,905036	381
Q [kVAr]	177,14	09.04.2021 18:53	214,07	09.04.2021 6:00	190,11	853
U [V]	502,03	09.04.2021 18:53	509,1	09.04.2021 21:31	506,6294	753

## RM100.2 – T3 - BEZ KOMPENZACE

Jezdce osy hodnot [1]: 49,61 [2]: 28,97 [Rozdíl]: -20,64



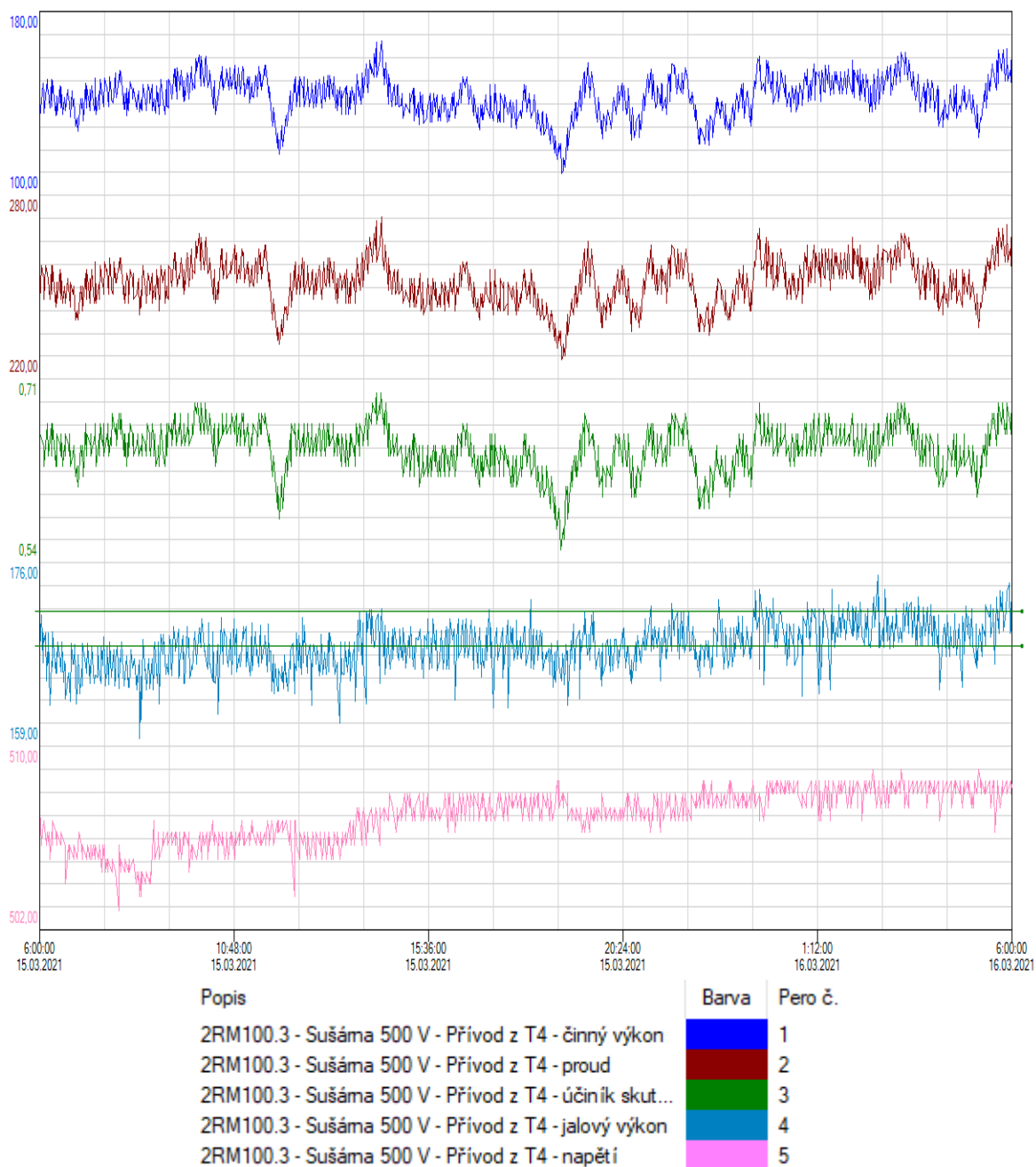
Graf 3: T3 – BEZ KOMPENZACE

Tabulka 4: T3 – BEZ KOMPENZACE

Parametr	Minimum	Časová značka v minimu [den/čas]	Maximum	Časová značka v maximu [den/čas]	Průměr	Počet vzorků
P [kW]	10,44	13.03.2021 0:20	44,85	12.03.2021 7:48	20,61	858
I [A]	24,6	13.03.2021 0:23	73,25	12.03.2021 7:48	39,78	852
cos φ [-]	0,4	12.03.2021 12:25:49.000	0,79	13.03.2021 2:39	0,56	847
Q [kVAr]	19,32	12.03.2021 10:46:11.049	49,61	12.03.2021 7:48	28,97	871
U [V]	508	12.03.2021 7:48	529,3	13.03.2021 1:36	519,37	686

RM100.3 – T4 - BEZ KOMPENZACE

Jezdce osy hodnot [1]: 171,63 [2]: 168,32 [Rozdíl]: -3,30



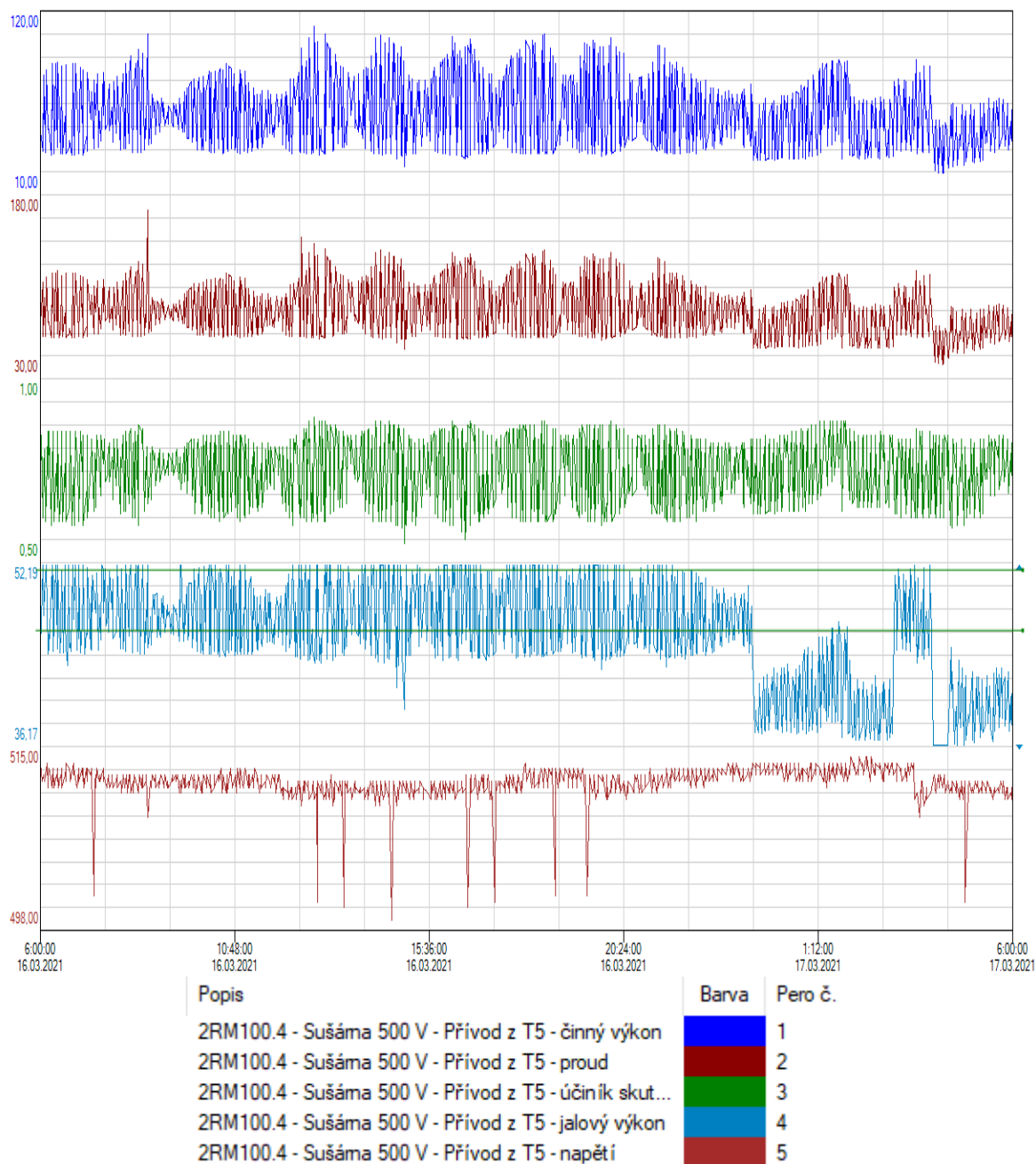
Graf 4: T4 – BEZ KOMPENZACE

Tabulka 5: T4 – BEZ KOMPENZACE

Parametr	Minimum	Časová značka v minimu [den/čas]	Maximum	Časová značka v maximu [den/čas]	Průměr	Počet vzorků
P [kW]	123,43	15.03.2021 18:53	159,1	15.03.2021 14:27	143,32	876
I [A]	233,77	15.03.2021 18:53	265,33	15.03.2021 14:27	251,82	863
cos φ [-]	0,55	15.03.2021 18:52	0,7	15.03.2021 14:19	0,65	808
Q [kVAr]	163,66	15.03.2021 8:28	171,63	16.03.2021 2:42	168,32	891
U [V]	503,92	15.03.2021 7:58	508,59	16.03.2021 2:34	507,01	665

## RM100.4 – T5 - BEZ KOMPENZACE

Jezdce osy hodnot [1]: 51,79 [2]: 46,38 [Rozdíl]: -5,41



Graf 5: T5 – BEZ KOMPENZACE

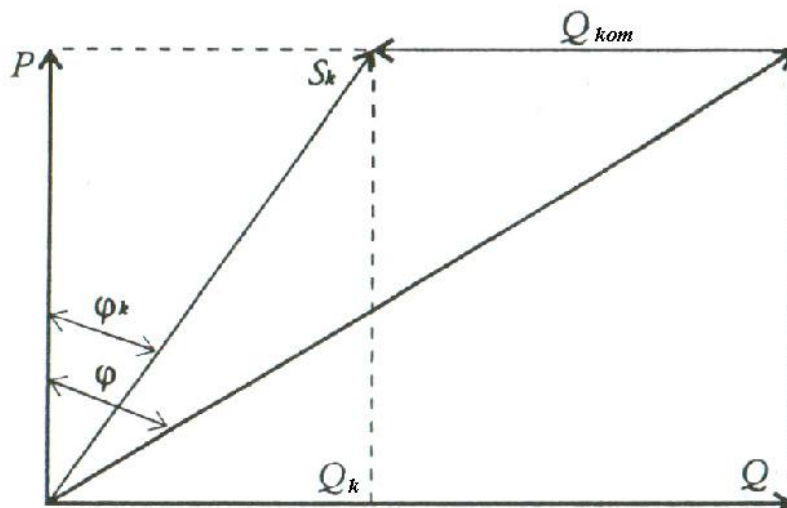
Tabulka 6: T5 – BEZ KOMPENZACE

Parametr	Minimum	Časová značka v minimu [den/čas]	Maximum	Časová značka v maximu [den/čas]	Průměr	Počet vzorků
P [kW]	22,31	17.03.2021 4:16	103,84	16.03.2021 12:46	59,44	467
I [A]	54,14	17.03.2021 4:16	129,59	16.03.2021 8:39	85,92	468
cos φ [-]	0,61	16.03.2021 15:00	0,9	16.03.2021 12:46	0,76	461
Q [kVAr]	35,42	17.03.2021 4:16	51,79	16.03.2021 8:39	46,38	470
U [V]	508,33	16.03.2021 14:40	514,3	17.03.2021 2:01	511,71	432

## 2.1.2 Návrh kompenzačního výkonu a počtu kompenzačních stupňů

Potřebný kompenzační výkon se určuje ze známých hodnot těchto veličin: zdánlivý výkon  $S$ , činný výkon  $P$ , účinník  $\cos\varphi$  před kompenzací (účinník zařízení) a účinník  $\cos\varphi_k$  po kompenzaci. [4]

$$Q_{kom} = Q - Q_k = P * \operatorname{tg}\varphi - P * \operatorname{tg}\varphi_k = P * (\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_k)$$



Obr.č. 2.1 Kompenzace podle požadovaného zlepšení účinníku [4]

Výkon kondenzátorové baterie je dán rozdílem odebíraného jalového výkonu  $Q_{(x)}$  (měřením) před a po kompenzaci  $Q_{k(x)}$  (výpočtem). Jalové a činné výkony jsem dosadil z měření, a to maximální v daném časovém období. Požadovaný nastavený účinník bude  $\cos\varphi_k = 0,98$ . Celkový jalový výkon je lepší zaokrouhlit na nejbližší nižší hodnotu, neboť je lepší nedokompenzovat než překompenzovat. V případě překompenzování dochází k opačnému směru toku jalové energie.

$$Q_{kom(x)} = Q_{(x)} - Q_{k(x)} = Q_{(x)} - (P_{(x)} * \tan [\cos^{-1}\varphi_k])$$

### Transformátor T2:

$$Q_{kom2} = Q_2 - (P_2 * \tan\varphi_k) = Q_2 - (P_2 * \tan [\cos^{-1}\varphi_k])$$

$$Q_{kom2} = 214,07 - (446,98 * \tan [\cos^{-1}(0,98)])$$

$$Q_{kom2} = 123,31 \text{ [kVAr]}$$

### Transformátor T3:

$$Q_{kom3} = Q_3 - (P_3 * \tan\varphi_k) = Q_3 - (P_3 * \tan [\cos^{-1}\varphi_k])$$

$$Q_{kom3} = 49,61 - (44,85 * \tan [\cos^{-1}(0,98)])$$

$$Q_{kom3} = 40,5 \text{ [kVAr]}$$

### Transformátor T4:

$$Q_{kom4} = Q_4 - (P_4 * \tan\varphi_k) = Q_4 - (P_4 * \tan [\cos^{-1}\varphi_k])$$

$$Q_{kom4} = 171,63 - (159,1 * \tan [\cos^{-1}(0,98)])$$

$$Q_{kom4} = 139,32 \text{ [kVAr]}$$

### Transformátor T5:

$$Q_{kom5} = Q_5 - (P_5 * \tan\varphi_k) = Q_5 - (P_5 * \tan [\cos^{-1}\varphi_k])$$

$$Q_{kom5} = 51,79 - (103,84 * \tan [\cos^{-1}(0,98)])$$

$$Q_{kom5} = 30,7 \text{ [kVAr]}$$



## Počet kompenzačních stupňů

Minimální počet kompenzačních stupňů ( $N$ ) musí být větší či roven poměru kompenzačního výkonu a velikosti jalového výkonu jednoho výkonového stupně (kondenzátoru).  $Q_{kom(x)}$  (viz.2.1.1) je kompenzační výkon daného transformátoru a  $Q_{c1}$  je kompenzační výkon jednoho stupně kondenzátorové baterie.  $Q_{c1} = 22,7 \text{ kVar.}$ (viz.2.2) V současné době je instalováno 12 kompenzačních stupňů.

$$N \geq \frac{Q_{kom}}{Q_{c1}}$$

Transformátor T2

$$12 \geq \frac{Q_{kom2}}{Q_{c1}} \geq \frac{123,31}{22,7} \geq 5,43$$

Transformátor T3

$$12 \geq \frac{Q_{kom3}}{Q_{c1}} \geq \frac{40,5}{22,7} \geq 1,78$$

Transformátor T4

$$12 \geq \frac{Q_{kom4}}{Q_{c1}} \geq \frac{139,32}{22,7} \geq 6,14$$

Transformátor T5

$$12 \geq \frac{Q_{kom5}}{Q_{c1}} \geq \frac{30,7}{22,7} \geq 1,35$$

## Rezerva činného výkonu před kompenzací

Tato rezerva je dána rozdílem maximálního činného výkonu, který je možný odebrat z transformátoru (jmenovitý výkon transformátoru) a odebíraného činného výkonu. Zdánlivý výkon transformátorů je  $S_{nT} = 1\,000 \text{ kVA.}$  (Tabulka 1)

$$\Delta P_{(x)} = \sqrt{S_{nT(x)}^2 - Q_{(x)}^2} - P_{(x)}$$

Transformátor T2

$$\Delta P_2 = \sqrt{S_{nT2}^2 - Q_2^2} - P_2$$

$$\Delta P_2 = \sqrt{1\,000^2 - 214,07^2} - 446,98 = 529,84 \text{ kW}$$

Transformátor T3

$$\Delta P_3 = \sqrt{S_{nT3}^2 - Q_3^2} - P_3$$

$$\Delta P_3 = \sqrt{1\,000^2 - 49,61^2} - 44,85 = 953,92 \text{ kW}$$

Transformátor T4

$$\Delta P_4 = \sqrt{S_{nT4}^2 - Q_4^2} - P_4$$

$$\Delta P_4 = \sqrt{1\,000^2 - 171,63^2} - 159,1 = 826,06 \text{ kW}$$

Transformátor T5

$$\Delta P_5 = \sqrt{S_{nT5}^2 - Q_5^2} - P_5$$

$$\Delta P_5 = \sqrt{1\,000^2 - 51,79^2} - 103,84 = 894,82 \text{ kW}$$

## Rezerva činného výkonu po kompenzaci

Zdánlivý výkon transformátorů je  $S_{nT} = 1\,000\text{ kVA}$ . (Tabulka 1) a požadovaný účinník je nastaven na regulátorech jalového výkonu  $\cos\varphi = 0,98$ .

$$\Delta P_{k(x)} = \sqrt{S_{nT(x)}^2 - Q_k^2} - P_{(x)} = \sqrt{S_{nT(x)}^2 - (P_{(x)} * \tan\varphi_k)^2} - P_{(x)}$$

Transformátor T2

$$\Delta P_{k2} = \sqrt{S_{nT2}^2 - (P_2 * \tan[\cos^{-1}\varphi_k])^2} - P_2$$

$$\Delta P_{k2} = \sqrt{1\,000^2 - (446,98 * \tan[\cos^{-1}(0,98)])^2} - 446,98 = 548,89\text{ kW}$$

Transformátor T3

$$\Delta P_{k3} = \sqrt{S_{nT3}^2 - (P_3 * \tan[\cos^{-1}\varphi_k])^2} - P_3$$

$$\Delta P_{k3} = \sqrt{1\,000^2 - (44,85 * \tan[\cos^{-1}(0,98)])^2} - 44,85 = 955,11\text{ kW}$$

Transformátor T4

$$\Delta P_{k4} = \sqrt{S_{nT4}^2 - (P_4 * \tan[\cos^{-1}\varphi_k])^2} - P_4$$

$$\Delta P_{k4} = \sqrt{1\,000^2 - (159,1 * \tan[\cos^{-1}(0,98)])^2} - 159,1 = 840,38\text{ kW}$$

Transformátor T5

$$\Delta P_{k5} = \sqrt{S_{nT5}^2 - (P_5 * \tan[\cos^{-1}\varphi_k])^2} - P_5$$

$$\Delta P_{k5} = \sqrt{1\,000^2 - (103,84 * \tan[\cos^{-1}(0,98)])^2} - 103,84 = 895,94\text{ kW}$$

## Změna velikosti rezervy činného výkonu po kompenzaci

$$\Delta P_{c(x)} = \Delta P_{k(x)} - \Delta P_{(x)}$$

Transformátor T2

$$\Delta P_{c2} = \Delta P_{k2} - \Delta P_2 = 548,89 - 529,84 = 19,05\text{ kW}$$

Transformátor T3

$$\Delta P_{c3} = \Delta P_{k3} - \Delta P_3 = 955,1 - 953,92 = 1,18\text{ kW}$$

Transformátor T4

$$\Delta P_{c4} = \Delta P_{k4} - \Delta P_4 = 840,38 - 826,06 = 14,32\text{ kW}$$

Transformátor T5

$$\Delta P_{c5} = \Delta P_{k5} - \Delta P_5 = 895,94 - 894,82 = 1,12\text{ kW}$$

### 2.1.3 Zhodnocení využitelnosti stávajících kompenzačních zařízení

Rozdíly zatížení jsou u transformátorů dost velké, a tím pádem jsou velké rozdíly i u kompenzačního výkonu. Celkový stávající instalovaný výkon jednotlivých kompenzací u každého z transformátorů je stejný a to  $12 * 22,7 = 272,4\text{ kVAr}$  bez ohledu na potřebný kompenzační výkon po zhodnocení současného stavu. Tento stávající výkon převyšuje více jak jeden krát největší kompenzační výkon spočtený u T<sub>4</sub>.  $Q_{kom4} = 139,32\text{ kVAr}$ .

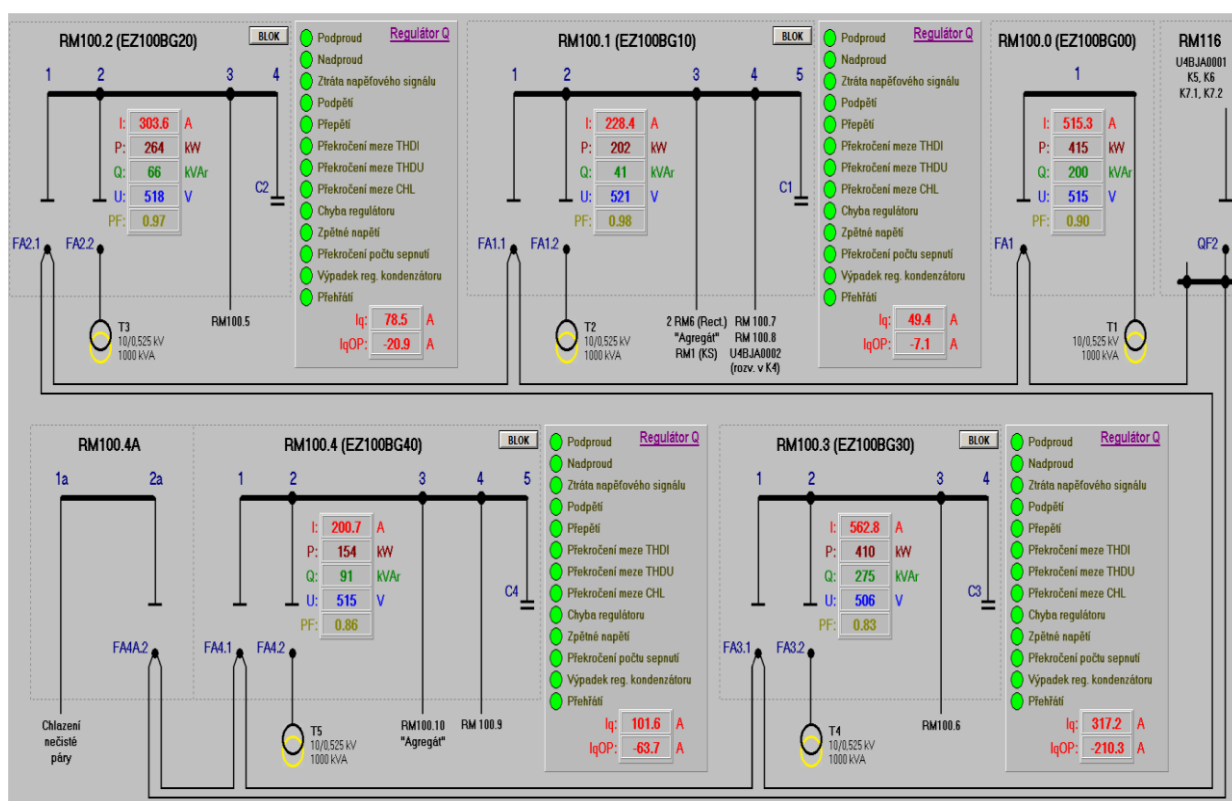
U transformátorů  $T_3$  a  $T_5$  nemůže dojít k dosažení požadovaného účinníku ( $\cos\varphi_k = 0,98$ ), neboť je velice malý počet stupňů (1 – 2) s velkou hodnotou jalového výkonu každého stupně ( $Q_{C1} = 22,7 \text{ kVAr}$ ). A tímto dochází k nedokompenzování zařízení na požadovaný účinník.

V případě počtu stupňů je pravidlo splněno.

Dle výsledků v tabulce 7 je patrná velice malá rezerva činného výkonu ( $\Delta P_c$ ), kterou mohou využít v případě dalšího odběru formou nového projektu nebo zvýšení stávajícího výkonu zařízení se stejným účinníkem.

Tabulka 7: Hodnoty kompenzace, počet stupňů a výkonů

	$Q_{kom}$ [kVAr]	$N$ [-]	$\Delta P$ [kW]	$\Delta P_k$ [kW]	$\Delta P_c$ [kW]
$T_2$	123,31	5,43	529,84	548,89	19,05
$T_3$	40,5	1,78	953,92	955,1	1,18
$T_4$	139,32	6,14	826,06	840,38	14,32
$T_5$	30,7	1,35	894,82	895,94	1,12



Obr.č. 2.2 Vizualizace kompenzace na PC ještě bez zálohy  $T_1$

## 2.1.4 Revize a modernizace prvků kompenzačních zařízení

Stávající regulátory jalového výkonu byly autonomní a neměly paměť měřených veličin. Kvůli posouzení stávajícího stavu kompenzace u každého z transformátorů, jsem provedl výměnu regulátorů za regulátory jalového výkonu s dálkovým měřením přes komunikační rozhraní. (viz. 2.1.6) Typ regulátorů nemá vliv na velikost kompenzačního výkonu v případě jeho změny. S výměnou a dálkovým měřením regulátorů má provoz Sušárna navíc i přehled o výkonových bilancích napájení.

Dále jsem změřil odebírající proud  $I_C$  (viz. 2.1.5) stávajících kondenzátorů a vyměnil dva nevyhovující kondenzátory za nové stejné hodnoty v rozvaděči RM100.3.

Z měření je patrné že odběry mají mnohem menší velikost než dříve navrhnutá kompenzace (hlavně u  $T_3$ ,  $T_4$  a  $T_5$ ) a proto ostatní prvky kompenzačního zařízení budou dle dimenze vyhovovat.

Kompenzační zařízení se skládá z různých prvků vzhledem k použití (IPxx). Nejčastěji je složeno z rozvaděče, který obsahuje potřebné sběrnice, pojistkové spodky (odpínač), jistící prvky (pojistky), dimenzované kabelové vedení (ovládací, silové), regulátor jalového výkonu či měřicí přístroje výkonu s dálkovým přenosem hodnot, spínací prvky (stykače), vybíjecí odpory a samotné kondenzátory.

### Použité komponenty stávající kompenzace

Kondenzátory - Zn. VISHAY 500VAC, 50 Hz, 22,7 kVAr, 3x96,28  $\mu$ F

Stykače - Zn. ELEKTROPŘÍSTROJ C32C + PK31C

Jištění – Nožové pojistky 50 A, PN000 gG/gl, 500 VAC,  $I_1 = 120$  kA

Regulátor jalového výkonu - NOVAR 1214/S400, KMB Systems s.r.o.,  $U_{\text{nap.}}$  90 – 275 V,  $U_{\text{měř.}}$  57,7 – 690 VAC, 43 – 67 A,  $P = 7$  VA, IP 4x

Měřič výkonu Simeas P fi.SIEMENS pro měření elektrických veličin na transformátoru T1 (RM100.0).

### Jištění kompenzačních kondenzátorů

U NN se používají kondenzátory třífázové zapojené do trojúhelníka z důvodu trojnásobného kompenzačního výkonu oproti v zapojení do hvězdy. Kondenzátory v zapojení do hvězdy se využívají v hladině VN.

Kvůli bezpečnosti jsou instalovány u válcových kondenzátorů vybíjecí rezistory, které při odpojení kondenzátoru od napětí, vybíjí elektrický náboj kondenzátoru. U třífázových kondenzátorů jsou dva nebo tři rezistory umístěny na svorkovnici kondenzátoru. Dle požadavku je nutné, aby napětí na kondenzátoru kleslo do jedné minuty na bezpečnou hodnotu 50 V bezpečného napětí. Vybíjecí rezistory mají také význam snížení nežádoucího přechodného děje dalším připojováním výkonového stupně. Tím se šetří kontakty stykačů. [15]

Pro kompenzaci jsou zvoleny nožové pojistky s provozní třídou gL/gG, což je pomalá pojistka jistící v celém proudovém rozsahu proti přetížení i proti zkratu. Funkce pojistky je při nárůstu proudu k přetavení vodiče, a tím odpojit elektrické zařízení od napájení a následně k uhašení elektrického oblouku. Materiál tavného drátku či pásku je měď (Cu), stříbro (Ag) pro výkonové pojistky a cín (Sn), hliník (Al), zinek (Zn) pro malé výkony. Kontakt nožových pojistek je měď (Cu) nebo mosaz. Pro uhašení elektrického oblouku se používá křemičitý písek (Si) v 99% čistotě o velikosti 0,1 až 0,2 mm.

Mezi výhody pojistek patří nízká cena, vysoká spolehlivost, jednoduchá konstrukce atd.

Napětí kondenzátoru:

$$U_C = U = 500 \text{ [V]}$$

Výkon kondenzátoru: ( $C_1 = 96,28 \cdot 10^{-6} \text{ F}$ ) (viz. 2.2)

$$Q_C = 3 \cdot Q_{C1} = 3 \cdot U^2 \cdot \omega \cdot C_1 = 3 \cdot 500^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 96,28 \cdot 10^{-6} = 22,69 \cdot 10^3 \text{ [var, V, s}^{-1}, \text{ F]}$$

Kapacita kondenzátoru:

$$C = 3 \cdot C_1 = 3 \cdot \frac{Q_{C1}}{\omega U^2} = \frac{Q_C}{\omega U^2} = \frac{22,69 \cdot 10^3}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 500^2} = 2,89 \cdot 10^{-4} \text{ [F, var, V, s}^{-1}]$$

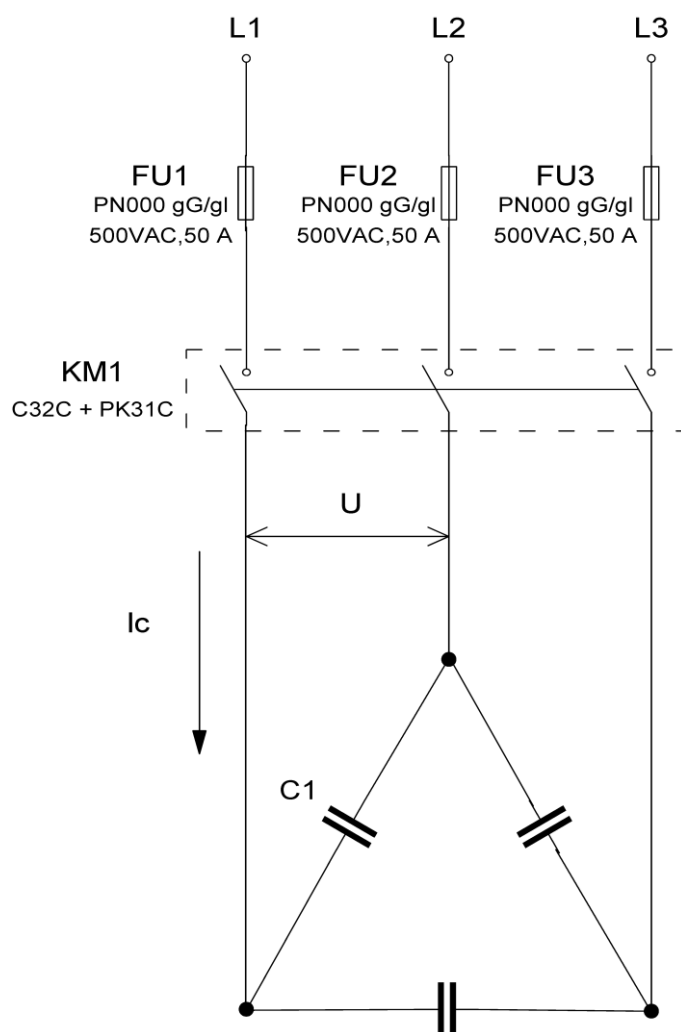
Proud kondenzátoru:

$$I_C = \frac{Q_C}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{\sqrt{3} \cdot Q_{C1}}{U} = \sqrt{3} \cdot U \cdot \omega \cdot C = \frac{22,69 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 500} = 26,2 \text{ [A, var, V]}$$

Pro dimenzování se dle výrobce uvádí (1,3 až 2) x  $I_C$  pro každou fázi kondenzátoru.

$$I_n = 1,7 \cdot I_C = 1,7 \cdot 26,2 = 44,5 \text{ [A]}$$

Z toho vyplývá proudová velikost jističového prvku, a to nejbližší vyšší hodnota řady nožové pojistky (PN000 gG/gI, 500 VAC) pro jištění každé fáze kondenzátoru 50 A.



Obr.č. 2.2.1 Kondenzátor do trojúhelníka

## Regulátor jalového výkonu

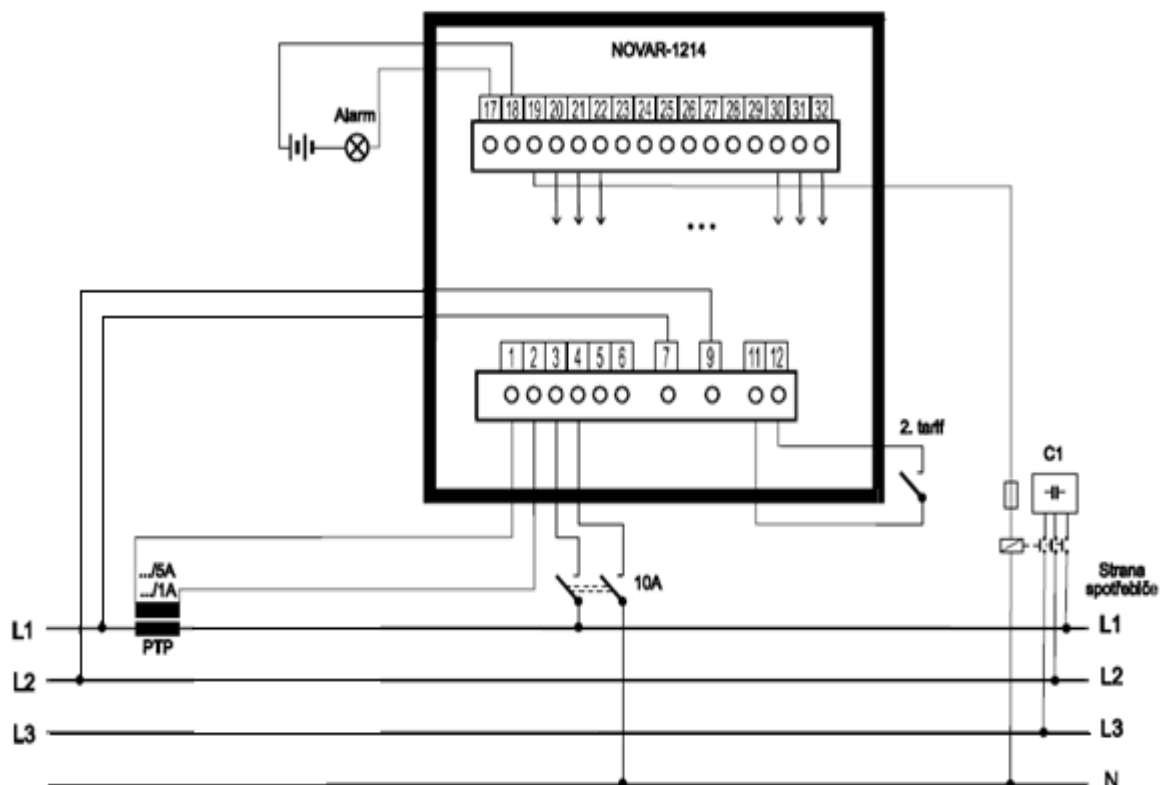
Je řada regulátorů na trhu, které se mohou použít pro kompenzaci jalového výkonu. Například RQ 5U, WOR nebo EFR 7. Pro naši kompenzaci jsem zvolil **NOVAR 1214/S400**. Tyto regulátory jsou plně automatické přístroje umožňující optimální řízení kompenzace jalového výkonu. Využívají se pro nasazení v izolovaných soustavách IT (bez středního vodiče). Mají zvýšené maximální napájecí napětí pro náš provoz až 500 V (AC či DC) a společné kontakty relé, které jsou vyvedeny na samostatné svorky. Jsou určeny pro aplikace, které vyžadují vysokou přesnost regulace i při malém zatížení. Regulace probíhá ve všech čtyřech kvadrantech a její rychlost je závislá jak na velikosti regulační odchylky, tak na její polaritě (překompenzování či nedokompenzování). Připínání a odpínání kompenzačních kondenzátorů je prováděno tak, aby optimální stav kompenzace byl dosažen jediným regulačním zásahem a minimálním počtem přepínaných stupňů. Přitom přístroj volí jednotlivé stupně s ohledem na jejich rovnoměrné zatěžování a přednostně připíná stupně, které byly odepnuty nejdéle a jejichž zbytkový náboj je tedy minimální.

Přístroje jsou vybaveny přesným napěťovým a proudovým měřicím obvodem a digitálním zpracováním naměřených hodnot je dosaženo vysoké přesnosti vyhodnocení skutečné efektivní hodnoty napětí, proudu i účinníku. Interní teplotní čidlo slouží pro měření teploty uvnitř rozvaděče.

Přístroje provádějí výpočet základní harmonické složky činného a jalového proudu algoritmem FFT. Obdobným způsobem je vyhodnocena i základní harmonická složka napětí, a tím je zajištěna přesná funkce měření a regulace i v podmínkách zkreslení vyššími harmonickými složkami.

Proudový měřicí vstup je univerzální pro nominální hodnotu sekundárního proudu PTP 1A nebo 5A. V našem případě je proud přiveden z měřicího transformátoru proudu MTP s převodem 1500/5 A na přívodu s jističem transformátorů. Měření napětí je připojeno standardně vodiči ze společných silových sběrnic. Měřicí vstupy lze připojit k regulátoru v libovolné kombinaci, tedy libovolné fázové nebo sdružené napětí a proud libovolné fáze. Regulátor je v provedení rozšířenou galvanicky oddělenou komunikační linku typu RS-485, případně Ethernet. Ve spojení se vzdáleným počítačem pak lze dálkově sledovat všechny měřené hodnoty a provádět parametrizaci regulátoru. [7]

Regulátor využívá kruhového spínání. To znamená, že velikost jalového výkonu každého stupně je stejný a regulátor proto může i volit čas, aby byly kondenzátory v provozu stejnou dobu, a tím prodloužil jejich životnost.



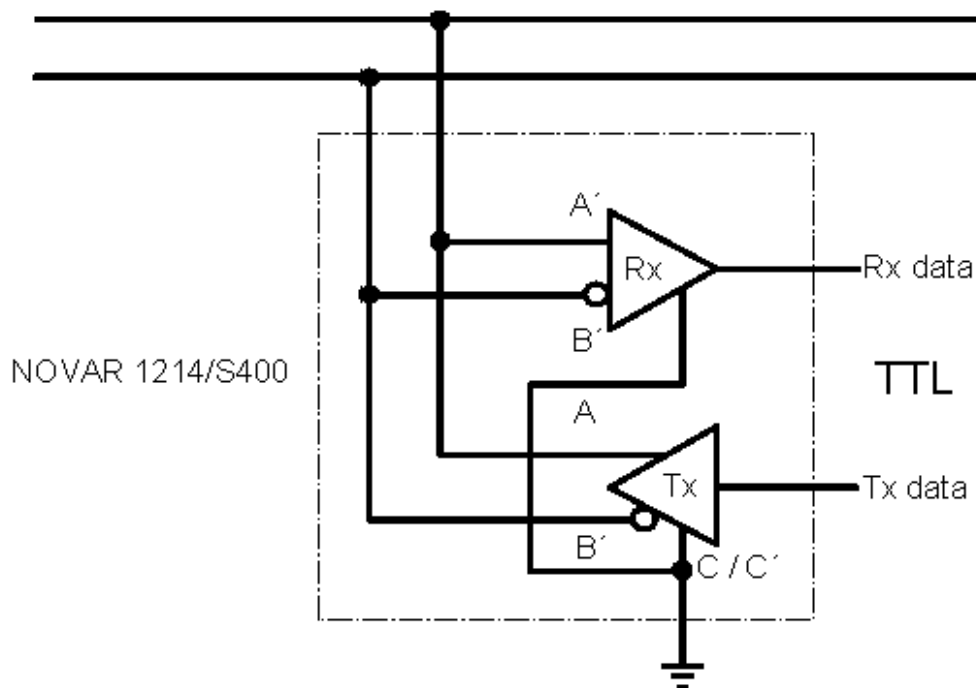
Obr.č. 2.3 Schéma zapojení NOVAR 1214/S400 [7]

### Komunikační rozhraní RS-485

Regulátor NOVAR 1214/S400 disponuje komunikačním rozhraním RS-485. Norma pro sběrnici RS-485 je EIA – RS 485 (USA 1983) a později ISO 8482. Sběrnice je součástí PROFIBUS systému. Rozhraní umožňuje připojení až 32 přístrojů na vzdálenost maximálně asi 1 km. Doporučovaný kabel je stíněný kroucený (twisted) metalický dvoj pár. Signály DATA A a DATA B se připojí jedním párem, signál GND/C druhým párem. [8]

Tabulka 8: Zapojení komunikační linky [8]

Signál	Svorka č.
TR	13
DATA A	14
DATA B	15
GND/C	16



Obr.č. 2.4 Blokové schéma sběrnice RS-485 [9]

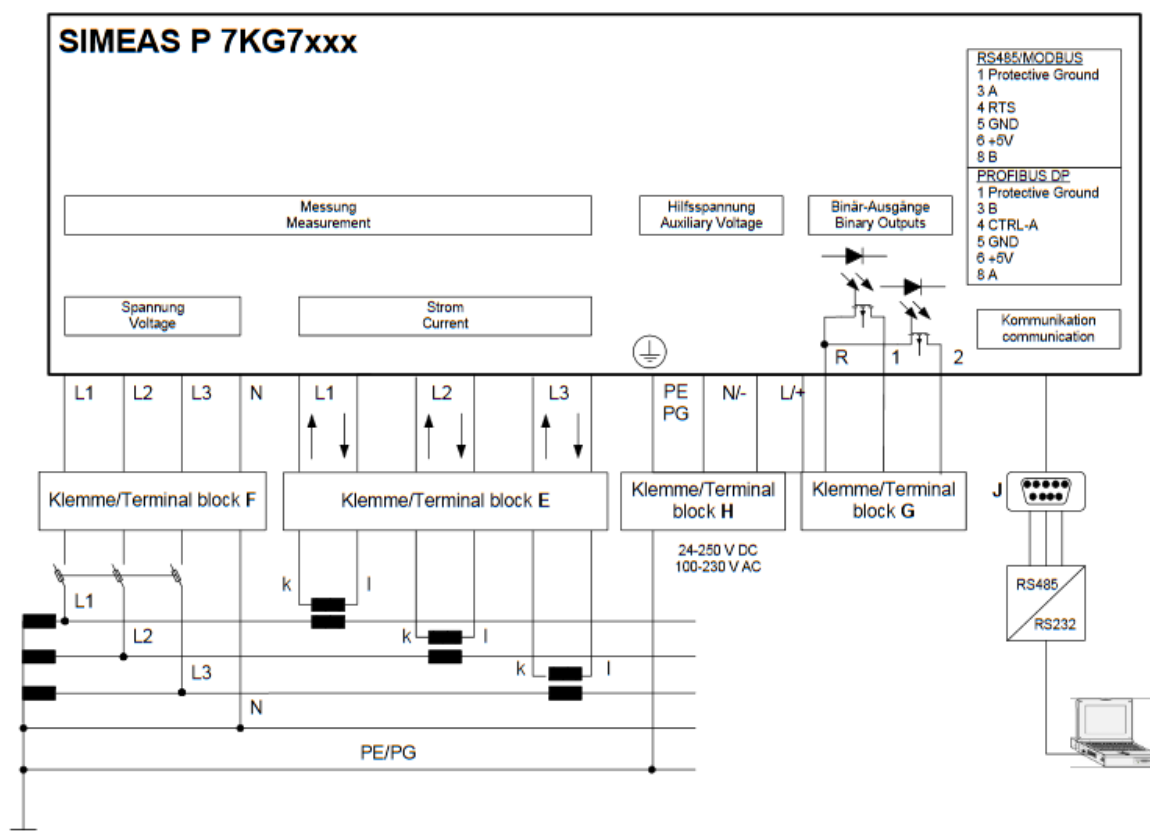
Vlastnosti:

- Topologie: sběrnice
- Přenos: sériový, poloduplexní, diferenciální
- Maximální rychlost: 10 Mbit/s
- Maximální délka: 1000 m
- Maximální počet zařízení: 32 (jednotková zátěž) 12 k $\Omega$
- Vysílač: min. výstupní napětí 1,5 V, min. proud 60 mA
- Přijímač: min. vstupní napětí 200 mV
- Odolnost vůči souhlasnému rušení: -7 až +12 V [9]

## Simeas P

Přístroj Simeas P fa.SIEMENS je využit pro měření v rozvaděči RM 100.0 pro transformátor T<sub>1</sub> a je určen pro měření a zobrazení elektrických veličin P, Q, U, I, f a také dalších. Disponuje taktéž dálkovým přenosem veličin přes sběrnici RS-485.





Obr.č. 2.5 Blokové schéma Simeas P [11]

## 2.2 Zatížení transformátorů

Celý provoz je napájen z pěti transformátorů  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$ ,  $T_5$  na hladině 0,5 kV. Každý transformátor má samostatný odběr a centrální kompenzaci mimo transformátoru  $T_1$ , který je považován za záložní napájení. V případě poruchy, revize nebo jiné podmínky pro odstavení transformátoru, je možné paralelní spojení transformátorů na sekundární straně. (Obr.č.1.2) Transformátory jsou propojeny na straně NN mezi sebou, a proto jsou schopny jakékoliv kombinace spojení. Proto se musejí dodržet podmínky paralelního chodu transformátorů. (viz. 2.3.1.) V případě paralelního chodu je potřeba také s úvahou rovnoměrného zatížení, aby nedošlo k přetížení a následným i výpadkem zařízení jím napájený. Musí se hledět na různé kombinace zapojení, a tím i celkové zatížení.

### 2.2.1 Paralelní chod transformátorů

1. Stejný převod napětí
2. Stejně procentní napětí nakrátko ( $u_k$ )
3. Stejný sled fází
4. Stejný hodinový úhel

Kontrola sekundárního jmenovitého napětí. K nežádoucím vyrovnávacím proudům ( $I_v$ ) mezi transformátory dochází v případě rozdílu napětí, jehož velikost je dána rozdílem okamžitých hodnot napětí mezi sekundárními vinutími a impedancí obou spojených transformátorů.

$$I_v = \Delta U / (Z_1 + Z_2)$$

Rozdělení přenášeného výkonu při nesterjých hodnotách  $S_N$  a  $u_k$

- a) Jsou-li stejná napětí nakrátka  $u_k$  a nesterjné zdánlivé jmenovité výkony  $S_N$ . Přenášený výkon se rozdělí na oba transformátory v poměru jmenovitých výkonů.

$$S_A/S_B = S_{NA}/S_{NB}$$

- b) Jsou-li stejné jmenovité zdánlivé výkony  $S_N$  a nesterjná napětí nakrátka  $u_k$ . Přenášený výkon se rozdělí v opačném poměru napětí nakrátka  $u_k$ . Transformátor s menším  $u_k$  bude přetížený dříve. [5]

$$S_A/S_B = u_{kB}/u_{kA}$$

Tabulka 9: Sdružená napětí transformátorů  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5$

U <sub>s</sub>	T1	T2	T3	T4	T5
[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]
L <sub>12</sub>	506	512	511	503	508
L <sub>23</sub>	506	512	511	502	509
L <sub>13</sub>	505	511	510	502	509

Měřeno digitálním multimetrem zn. METEX M-3800, inv.č. 698798

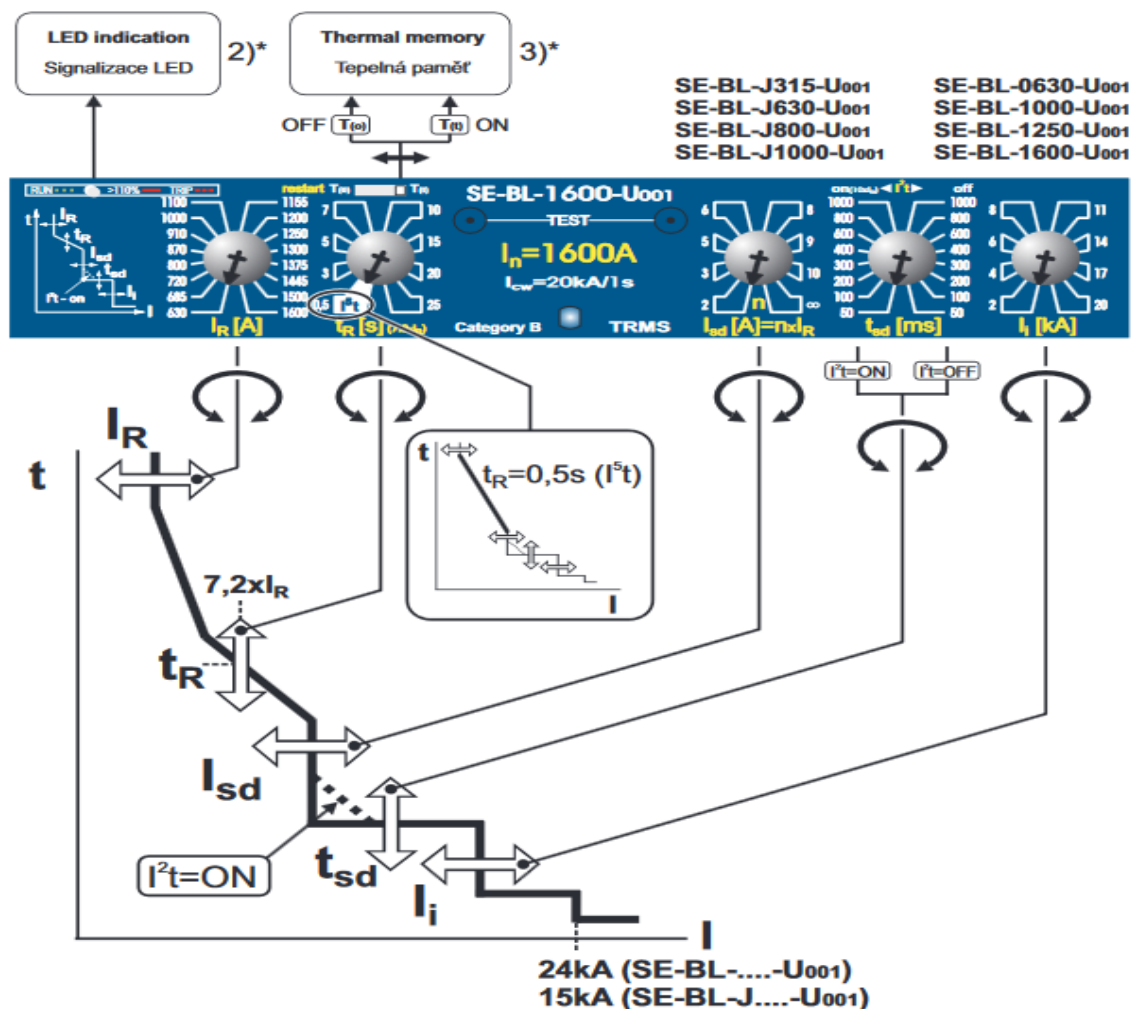
S ohledem na to, že stávající transformátory nemůžeme vyměnit, musíme se spokojit s malým rozdílem napětí nakrátka  $u_k$ .  $\Delta u_k = 0,07\%$  (Tabulka 1.1). Tím jsou dané i velikosti rozložení výkonu poměrem zatížení. Hodinové číslo, převod napětí, sled fází i zapojení transformátorů jsou totožné. Transformátory mají tak malý odběr výkonu, že může dojít k jakékoli kombinaci zapojení a nedojde k přetížení nebo výpadku.

## 2.3 Nastavení ochran NN

Stávající jističe pro zajištění ochrany transformátorů jsou od firmy O EZ a to **BL 1600 SE 301**. Jističe obsahují nadproudové spouště **U001** ( $I_R = 630 - 1600$  A). Spoušť je určena pro jištění složitých nebo předem nespécifikovaných zátěží. U jističů je možno nastavit jednotlivé části charakteristiky tak, aby odběry při žádném nadproudu nemohly překročit dovolenou teplotu při přetížení. [6]

Vypínací schopnost v síti IT provozu Sušárna 500 VAC se nemusí vztahovat pouze na třífázový zkratový proud v uvažovaném místě, ale také na předpokládaný proud dvojitě poruchy izolace. Podle konvence musí jisticí přístroj při napětí mezi fázemi odpojit proud dvojitě poruchy procházející jedním pólem, který je rovný:

- 0,15násobku zkratového trojfázového proudu v uvažovaném bodě, jestliže ten je menší nebo rovný 10 000 A,
- 0,25násobku zkratového trojfázového proudu v uvažovaném bodě, jestliže ten je větší než 10 000 A. [12]



Obr.č. 2.6 Nastavení nadproudové spouště U001 [6]

### Redukovaný jmenovitý proud ( $I_R$ )

Konkrétní nastavená, redukována hodnota  $I_n$  (regulovatelná závislá časová spoušť), může být jističem vedena trvale. Maximální nastavitelná hodnota se rovná  $I_n$ . Změnou  $I_R$  se posouvá vypínací charakteristika spouště vzhledem k proudové ose. Platí:  $I_R = k \times I_n$  kde  $k \leq 1$

### Vypínací čas při uvedeném násobku $I_R = I_n$ ( $t_R$ )

Čas, za který se jistič vypne, prochází-li jím proud, se rovná uvedenému násobku  $I_R$ . Změnou  $t_R$  se posouvá vypínací charakteristika vzhledem k časové ose. Tento parametr ovlivňuje oblast přetížení dle daných charakteristik. V případě na přetížení bez možnosti nastavení je hodnota  $I_r$  rovna jmenovitému proudu  $I_n$ .

### Vybavovací proud nezávislé časově zpožděné (selektivní) spouště ( $I_{sd}$ )

Minimální hodnotou proudu rozumíme takovou hodnotu, při které působí nezávislá časově okamžitá spoušť v oblasti nízkých zkratových proudů.

### Zpoždění nezávislé časově zpožděné spouště ( $t_{sd}$ )

Prochází-li jističem proud rovnající se alespoň  $I_{sd}$  a nedosahující  $I_{sd}$ , vypne jistič s časovým zpožděním  $t_{sd}$ . Celková doba vypnutí je vlivem vypínání vlastního jističe cca o 10 až 20 ms delší. Tato oblast je oblastí vysokých zkratových proudů.

**Vybavovací proud nezávislé časové okamžitě (zkratové) spouště ( $I_i$ )**

Minimální hodnota proudu, při které působí nezávislá časově okamžitá spoušť. [6]

Výhodou jističů je vypnutí ve všech fázích. Spouště jsou nastavitelné v daném rozmezí, vypínají velké zkratové výkony, po vybavení lze jističe opět zapnout, umožňují dálkové ovládání, atd.

Nevýhodou je vyšší cena, složitý mechanismus, a tím i menší spolehlivost atd.

Tabulka 10: Proudové transformátorů

Parametr	Minimum	Časová značka v minimu [den/čas]	Maximum	Časová značka v maximu [den/čas]	Průměr	Počet vzorků
$I_{T2}$ [A]	469,2	09.04.2021 23:16	564,15	09.04.2021 6:00	515,2	840
$I_{T3}$ [A]	24,6	13.03.2021 0:23	73,25	12.03.2021 7:48	39,78	852
$I_{T4}$ [A]	233,77	15.03.2021 18:53	265,33	15.03.2021 14:27	251,82	863
$I_{T5}$ [A]	54,14	17.03.2021 4:16	129,59	16.03.2021 8:39	85,92	468

Vypínač fi. OEZ je BL 1600 SE 301 ( $U_e = 500$  V).

Dle naměřených maximálních hodnot proudů (tabulka 9) v měřeném období jsem nastavil redukováný proud  $I_R$  dle nejvyšší hodnoty  $I_{T2}$ . V případě paralelního chodu bude vždy menší protékající proud díky prvnímu Kirchhoffovu zákonu, který popisuje zákon zachování elektrického náboje. Tento zákon říká, že v každém bodě či uzlu elektrického obvodu platí tvrzení. Součet proudů vstupujících do uzlu se rovná součtu proudů z uzlu vystupujících.

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0$$

$I_k$  jsou jednotlivé proudy vstupující do uzlu. Podle konvence je proud tekoucí do uzlu záporný, zatímco proud tekoucí z uzlu kladný.

Tabulka 11: Hodnoty nastavené na vypínači BL 1600 SE 301(U001)

pozice rozvaděč	$I_R$ [A]	$t_r$ [s]	$I_{sd}$ [A]	$t_{sd}$ [ms]	$I_i$ [kA]
1RM 100.0	600	10	2	400	6
2RM 100.1	600	10	2	400	6
2RM 100.2	600	12	2	400	6
2RM 100.3	600	10	2	400	6
2RM 100.4	600	10	2	400	6
1RM 100.4	600	10	2	400	6

### 3 Měření napájecí soustavy

Při výpočtu jsem vycházel z hodnot získaných pomocí dálkového měření regulátorů jalového výkonu NOVAR 1214/S400 a měřič výkonu fa SIEMENS – Simeas P přes rozhraní RS-485. (viz. 2.1.3.)

#### 3.1 Wonderware historian client

Software Wonderware Historian Client (dále jen WHC) je aplikace, která poskytuje řadu klientských nástrojů k řešení konkrétních požadavků na reprezentaci dat a analýzu.

WHC může uspořádat, prozkoumat, analyzovat, prezentovat a šířit procesní data v nejrůznějších formátech. To vše lze provést ze stolního počítače. Software WHC je komplexní sada aplikací, které maximalizují hodnotu dat ve Wonderware Historian. Software WHC je úzce integrován s nejoblíbenějšími nástroji Microsoft Office. Se softwarem WHC lze:

- Graficky prozkoumávat svá data a najít důležité informace.
- Analyzovat data, abychom získali relevantní informace.
- Vizualizovat aktuální stav procesu.
- Vytvářejte bohaté automatizované zprávy.

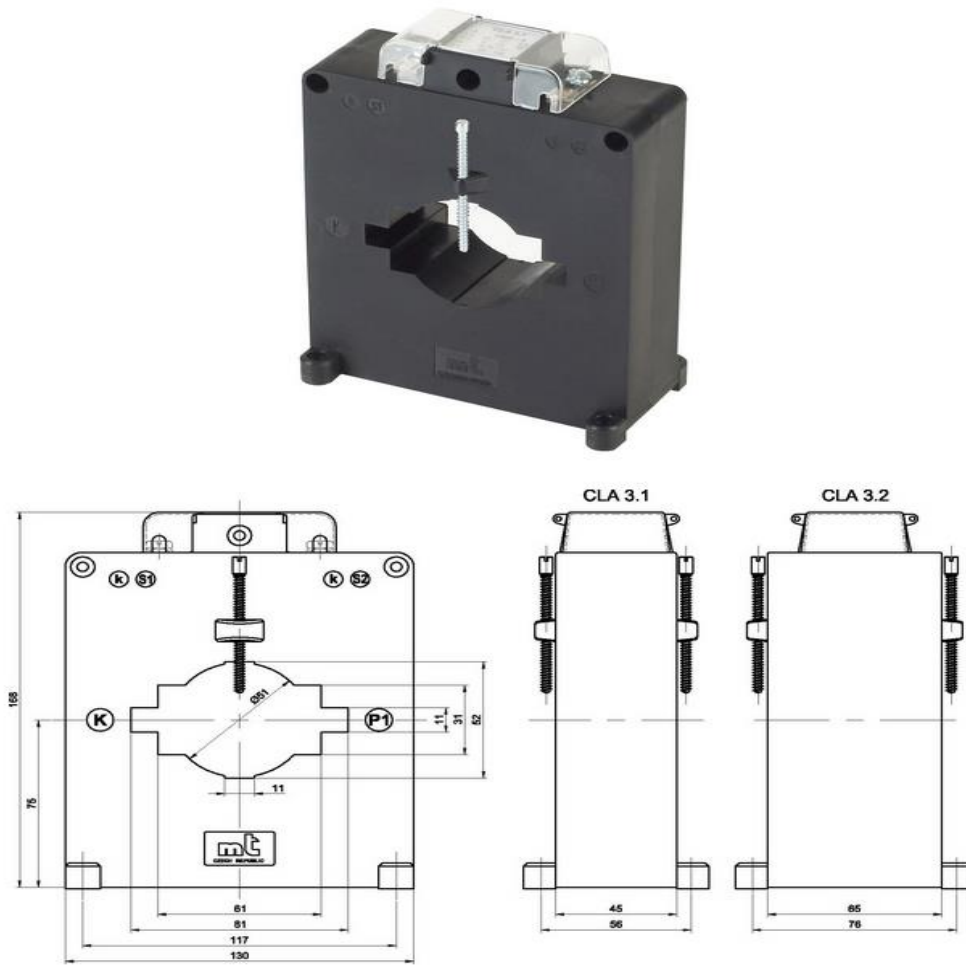
##### 3.1.1 Nástroj TREND aplikace WHC

Umožňuje trendy historických a reálných dat v čase. Výkonné funkce umožňují srovnání dat s jinými daty z různých období. Alarmy a mezní odchylky jsou snadno viditelné. Ve svých trendech je také možné přidávat a zobrazovat poznámky. [10]

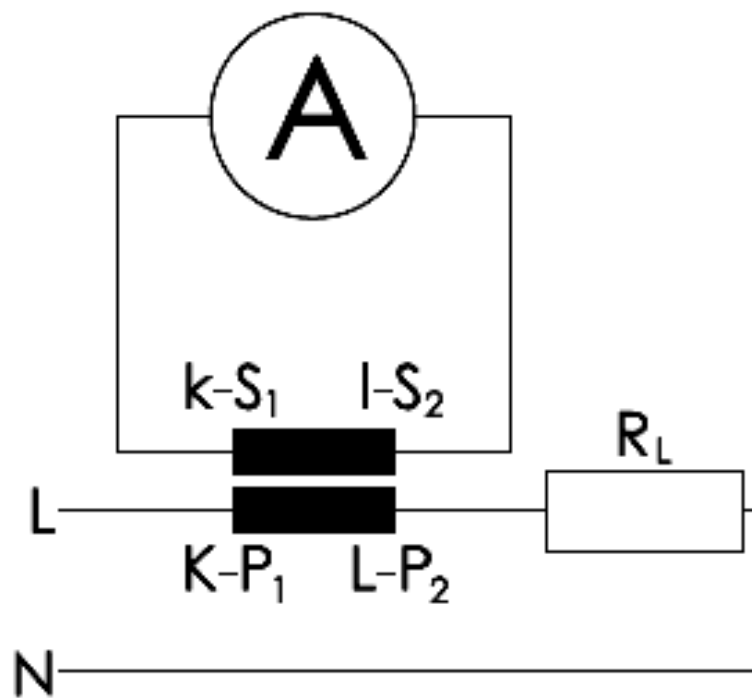
#### 3.2 Měřicí transformátor proudu MTP

Pro plnohodnotnou funkci kompenzace je nutné měření napětí a proudu. Regulátor jalového výkonu značky NOVAR 1214/S400 musí měřit napětí i proud. Měření napětí v rámci nízkého napětí (dále jen NN) není složité, ale v případě proudu se u velkých hodnot musí použít měřicího transformátoru proudu (MTP). Přístrojové transformátory proudu pro NN jsou určeny k použití v rozvodných zařízeních NN se jmenovitými proudy do 10 000 A a s izolačním napětím do 720 V. Jmenovité proudy na primární straně vinutí MTP jsou v rozmezí 1 až 2 500 A. Standardní hodnota jmenovitého sekundárního proudu transformátoru je 5 A, lze však použít i provedení se sekundárním proudem 1 A. Pro účely měření jsou MTP vyráběny s třídou přesnosti (dále jen TP) 0,5 ; 0,5S ; 1 a 3 (*tabulka 11*). MTP s TP 5P a 10P jsou vhodné pro jištění s větším nadproudovým činitelem (FS). S ohledem na vzdálenost měřicího místa, je nutné uvažovat i o vlastní spotřebě ve vedení. Pro nejčastější vedení se volí materiál Cu. V tabulce 12 jsou uvedeny vlastní spotřeby u převodníků 5 A a 1 A vzhledem ke vzdálenosti mezi měřícím místem a MTP. [14]

V mém případě jsou použity MTP značky CLA 3.1 s převodem 1 500/5 A, provedení násuvném na silovou sběrnici jakožto primární vinutí o výkonu 10 VA, TP 0,5S a nadproudovým číslem FS 10. Trvalá přetížitelnost je 120 % (*Obr.č.3.1*). Vzdálenost mezi MTP a regulátorem jalového výkonu je u všech rozvaděčů (RM100.0/1/2/3/4) s kompenzací 6 m. Tj. v případě průřezu 2,5 mm<sup>2</sup> je vlastní spotřeba 5,14 W. Umístění MTP je hned za jističem každého z transformátorů. Při manipulaci je důležité mít MTP vždy na výstupních svorkách zkratován. V opačném případě by mohl vzniknout úraz elektrickým proudem.



Obr.č. 3.1 MTP Měřící transformátor proudu CLA 3.1 [13]



Obr.č. 3.2 Schéma zapojení MTP [13]

Tabulka 12: Třída přesnosti MTP [14]

Třída	Třídy přesnosti transformátorů proudu											
	Chyba proudu [ +/- % ] při % In						Chyba úhlu [ +/- minut ] při % In					
	1%	5%	20%	50%	100%	120%	1%	5%	20%	50%	100%	120%
<b>Měřicí transformátor</b>												
0,2S	0,75	0,35	0,20	-	0,20	0,20	30	15	10	-	10	10
0,2	-	0,75	0,35	-	0,20	0,20	-	30	15	-	10	10
0,5S	1,50	0,75	0,50	-	0,50	0,50	90	45	30	-	30	30
0,5	-	1,50	0,75	-	0,50	0,50	-	90	45	-	30	30
1	-	3,00	1,50	-	1,00	1,00	-	180	90	-	60	60
3	-	-	-	3,00	3,00	3,00	-	-	-	120	120	120
<b>Jistící transformátor</b>												
5P(n)	-	3,00	1,50	-	1,00	1,00	-	180	90	-	60	60
10P(n)	-	-	-	3,00	3,00	3,00	-	-	-	120	120	120

Tabulka 13: Vlastní spotřeba Cu vedení [14]

Vlastní spotřeba Cu vedení při 5 A										
	1m	2m	3m	4m	5m	6m	7m	8m	9m	10m
2,5 mm <sup>2</sup>	0,36	0,71	1,07	1,43	1,78	2,14	2,50	2,86	3,21	3,57
4 mm <sup>2</sup>	0,22	0,45	0,67	0,89	1,12	1,34	1,56	1,79	2,01	2,24
6 mm <sup>2</sup>	0,15	0,30	0,45	0,60	0,74	0,89	1,04	1,19	1,34	1,49
10 mm <sup>2</sup>	0,09	0,18	0,27	0,36	0,44	0,54	0,63	0,71	0,80	0,89
Vlastní spotřeba Cu vedení při 1 A										
	10m	20m	30m	40m	50m	60m	70m	80m	90m	100m
1 mm <sup>2</sup>	0,36	0,71	1,07	1,43	1,78	2,14	2,50	2,86	3,21	3,57
2,5 mm <sup>2</sup>	0,14	0,29	0,43	0,57	0,72	0,86	1,00	1,14	1,29	1,43
4 mm <sup>2</sup>	0,09	0,18	0,27	0,36	0,45	0,54	0,63	0,71	0,80	0,89
6 mm <sup>2</sup>	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60
10 mm <sup>2</sup>	0,04	0,07	0,11	0,14	0,18	0,21	0,25	0,29	0,32	0,36

## 4 Závěry a navrhovaná řešení

Práce obsahuje zhodnocení stavu a optimalizaci napájení provozu Sušárna. Po velkých restrukturalizačních změnách v kombinátu SU a.s. během zpracování diplomové práce, se situace velice změnila a odběry jsou mnohem menší než při zadání. Odstavení části provozů má za následek snížení poptávky po sušeném uhlí, a tím i celkového odběru energie. To znamená, že již nedochází k přetěžování napájecích transformátorů, které by měly být zatížené optimálně na cca. 70 %  $P_{NT}$ . Na základě vyjádření odborných pracovníků elektroprovozu, docházelo dříve k ojedinělým výpadkům. Velký odběr je patrný z tabulky 2, a to hlavně pro transformátor  $T_3$ ,  $T_4$  a  $T_5$ .

Nejdříve jsem přiblížil princip a skladbu všech zařízení, která mají technologický význam pro jeho komplexní fungování včetně podrobných parametrů, které jsem uvedl v příloze.

V diplomové práci jsem se dále zabýval stávajícím stavem na hladinách VVN, VN a NN napětí, dále pak typy a počtem transformátorů, které napájí celý systém s potřebným jištěním. Nastínil jsem princip zapojení a spínání s možností paralelního chodu transformátorů s využitím transformátoru pro záložní provoz  $T_1$ .

Následně jsem popsal stav stávající kompenzace, která neplnila svůj význam a nepřispívala k hospodárnému provozu. Uskutečnil jsem ohledně kompenzace výměnu regulátorů jalového výkonu a připojil je do systému pro dálkové měření. Nové regulátory zůstanou na pozici i v případě změny celého jalového výkonu kompenzace. Provoz Sušárna dálkovým měřením tak získala navíc i přehled o celkových odběrech v čase. Tím může mapovat změny měřených veličin a tím odhalit i nežádoucí stavy.

Pokračoval jsem přepojením všech odběrů, které byly napájené ze záložního transformátoru  $T_1$  na transformátor  $T_2$ , a tím jsem docílil jeho záložní funkce. Transformátor  $T_1$  nebyl kompenzován, neboť rozvaděč RM100.0 není kompenzací vybaven.

Provedl jsem měření na každém transformátoru bez zapojení kompenzace a z daných výsledků jsem dopočetl požadovaný kompenzační výkon na zvolený účinník ( $\cos \varphi = 0,98$ ). Dle výsledků (Tabulka 7) je patrné, že u transformátorů  $T_2$  a  $T_4$  je dostatečný jalový výkon pro kompenzaci na požadovaný účinník. U transformátorů  $T_3$  a  $T_5$  je jalový výkon velice malý a regulátor by nebyl schopný kompenzace na požadovaný účinník z důvodu velkého kondenzátoru jednoho stupně ( $Q_{C1} = 22,7 \text{ kVAr}$ ).

Jako první varianta se nabízí ponechat transformátory  $T_3$  a  $T_5$  v provozu a zvolit u každého nový kompenzační výkon dle požadovaných stupňů. Tím bude dosaženo dostatečného rozsahu jalového výkonu v počtu stupňů pro požadovaný účinník.

Například  $12 \times 5 = 60 \text{ kVAr}$ , Značky: CSADG-0,525/5-HD, 5 kVAr,  $C = 3 \times 19,2 \mu\text{F}$ ,  $I_N = 5,5 \text{ A}$ ,  $U = 525 \text{ V} / 50 \text{ Hz}$ , rozměr  $85 \times 175$ , hmotnost 0,8 kg. Z toho plyne i změna jištění pro menší proud kondenzátoru ( $I_C$ ).

$$I_C = \frac{Q_C}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{\sqrt{3} \cdot Q_{C1}}{U} = \sqrt{3} \cdot U \cdot w \cdot C = \frac{5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 500} = 5,77 \text{ [A, var, V]}$$

Volba proudové hodnoty nožové pojistky dle výrobce. (viz. 2.2.1)

$$I_n = 1,7 \cdot I_C = 1,7 \cdot 5,77 = 9,81 \text{ [A]}$$

Bude potřeba nožových pojistek PN000 gG/gl, 500 VAC, 10 A.

Nebo druhá varianta, která se jeví jako výhodnější, je (s přihlédnutím na celkový malý odebraný činný výkon u  $T_3$  a  $T_5$ ) sloučení veškerého odběru daných transformátorů a



odstavení jednoho z transformátorů do studené zálohy. Ve výsledku by nebyla nutná výměna celkového kompenzačního výkonu s požadovanou hodnotou jalového výkonového stupně. Sloučením by se zvýšil kompenzační výkon na hodnoty uvedené v Tabulce 7.

$$Q_{\text{kom}35} = Q_{\text{kom}3} + Q_{\text{kom}5}$$

$$Q_{\text{kom}35} = 40,5 + 30,7$$

$$Q_{\text{kom}35} = 71,2 \text{ kVAr}$$

A tím pádem by byl i větší počet stupňů, který by měl za následek docílení požadovaného účinníku: ( $N = 12$ )

$$N \geq \frac{Q_{\text{kom}35}}{Q_{c1}} \geq \frac{71,2}{22,7} \geq 3,14$$

Rezerva činného výkonu před kompenzací se zvoleným transformátorem  $T_3$ : (Tabulka 3 a Tabulka 5)

$$Q_{35} = Q_3 + Q_5 = 49,61 + 51,79 = 101,4 \text{ kVAr}$$

$$P_{35} = P_3 + P_5 = 44,85 + 103,84 = 148,69 \text{ kW}$$

$$\Delta P_{35} = \sqrt{S_{nT3}^2 - Q_{35}^2 - P_{35}}$$

$$\Delta P_{35} = \sqrt{1\,000^2 - 101,4^2 - 148,69} = 846,16 \text{ kW}$$

Rezerva činného výkonu po kompenzací se zvoleným transformátorem  $T_3$ :

$$\Delta P_{k35} = \sqrt{S_{nT3}^2 - (P_{35} * \tan [\cos^{-1} \varphi_k])^2 - P_{35}}$$

$$\Delta P_{k35} = \sqrt{1\,000^2 - (148,69 * \tan [\cos^{-1}(0,98)])^2 - 148,69} = 850,85 \text{ kW}$$

Změna velikosti rezervy činného výkonu po kompenzací:

$$\Delta P_{c35} = \Delta P_{k35} - \Delta P_{35} = 850,85 - 846,16 = 4,69 \text{ kW}$$

Při odstavení jednoho z transformátorů se bude předcházet nadbytečným ekonomickým nebo technickým ztrátám. Případný odstavený transformátor by byl v záloze jako záskokový. Do provozu by mohl být připojen jen s platnou revizní zprávou. Výsledné celkové rezervní činné výkony ( $\Delta P_{kx}$ ) nejsou nijak zajímavé svou velikostí pro další uplatnění.

Vlivem přepojení všech odběrů transformátoru  $T_1$  se stal záložním a může být použit k odstavení jiných transformátorů či paralelního provozu z důvodu měření, údržby nebo opravy. Díky rozdílnému štitkovému parametru napětí nakrátko  $u_k$  je velikost rozložení výkonu při paralelním provozu různá.  $\Delta u_k = 0,07 \%$ . (viz. 2.3.1)

V případě jištění jsem zvolil největší možný zatěžovací proud dle měřeného období a nastavil tak hodnotu proudu  $I_R$  na všech jističích proudových ochran. V případě paralelního chodu transformátorů, nemůže dojít k překročení nastavené hodnoty proudu. Hodnota  $I_R = 600 \text{ A}$ . (Tabulka 10)

Pomocí nástrojů zařízení (viz. 2.2.2 a 2.2.4) pro měření parametrů sítě a vzdálený přenos jsem zjistil okamžité hodnoty, a tím vzhledem k směnnému provozu Sušárny mohl nastavit a vypočítat potřebné hodnoty kompenzace a nastavení proudových spouští jističů.

Výsledkem této práce je výhodnější redukce množství transformátorů na optimální počet, z důvodu malého odběru celého provozu a zefektivnění stávající kompenzace, bez výměny kondenzátorů na menší jalové výkony jednotlivých stupňů a také obnovení transformátoru  $T_1$  pro záložní napájení.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Místní provozní řád – *Provozní řád sekce Úprava uhlí – 000.MPŘ.Z.ÚU.005.12*
- [2] Místní provozní řád – *Provozní řád sekce Úprava uhlí – 000.MPŘ.Z.ÚU.008.12*
- [3] Elektrotechnické předpisy – *Elektrický silnoproudý rozvod v průmyslových provozovnách ČSN 34 1610*
- [4] TESAŘOVÁ, Miloslava a ŠTROBLOVÁ, Milada. *Průmyslová elektroenergetika*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, 154 s. ISBN 80-708-2703-3.
- [5] Paralelní chod transformátorů [29.4.2021] Dostupné z:  
<https://slideplayer.cz/slide/2725790>
- [6] Jistič BL 1600 SE 301 [29.4.2021] Dostupné z:  
[http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/bl1600s-m001-2017\\_cz\\_sk.pdf](http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/bl1600s-m001-2017_cz_sk.pdf)
- [7] Princip a funkce regulátoru NOVAR [29.4.2021] Dostupné z:  
<http://www.kmb.cz/index.php/cs/regulatory-ucinniku/novar-11xx-a-12xx>
- [8] Regulátor jalového výkonu. NOVAR\_1xxx-Manual-v18-cze [29.4.2021] Dostupné z:  
<http://www.kmb.cz/index.php/cs/ke-stazeni/category/4-docspfc>
- [9] VOBORNÍK, Aleš. *Průmyslové sběrnice*. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra materiálů a technologií.
- [10] Software Wonderware Historian Client [29.4.2021] Dostupné z:  
<https://cdn.logic-control.com/media/HistClient.pdf>
- [11] Měřicí přístroj Simeas fa.Siemens [29.4.2021] Dostupné z:  
[http://sm-industry.ru/titan\\_img/ecatalog/SIMEAS\\_P\\_Manual\\_Complete\\_A7\\_en.pdf](http://sm-industry.ru/titan_img/ecatalog/SIMEAS_P_Manual_Complete_A7_en.pdf)
- [12] Nastavení ochran nízkého napětí [27.4.2021] Dostupné z:  
<https://elektrika.cz/data/clanky/jisteni-a-dimenzovani-elektricky-ch-ved>

- [13] Měřicí transformátor proudu MTP [27.4.2021] Dostupné z:  
<https://www.mtbrno.cz/cz/produkty/detail/?typ=CLA%203.1>
- [14] Měřicí transformátor proudu MTP [27.4.2021] Dostupné z:  
<http://obchod.eximus.cz/merici-transformatory-cm>
- [15] SÝKOROVSKÝ, Jan. *Kompenzace jalového výkonu v průmyslovém podniku*. Plzeň, 2013. 138 s. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky a ekologie.

## Přílohy:

### Trubkový sušič (firmy ZEMAG – ZEITZ)

#### Základní technické údaje:

##### Parametry sušiče – typ Schulze RT 5 x 8

- průměr sušiče 5 208 mm
- délka sušiče 7 990 mm
- délka trubek 8 000 mm
- síla pláště 16 mm
- počet trubek 1 581
- průměr trubek 108 mm
- počet základních trubek 1302 ks
- počet matečních trubek 279 ks
- síla stěny předního čela 60 mm
- síla stěny zadního čela 55 mm
- ø nosné děrované hřídelní trouby 1030 mm o síle stěny 25 mm
- sklon sušiče 9°
- výhřevná plocha 4 000 m<sup>2</sup>
- teplota páry max. 180°C
- tlak páry max. 0,4 MPa
- objem sušiče 53 200 l

#### **Pohon sušiče**

Převodovka s přírubovým motorem

motor – SIEMENS - 3 x 500V  
výkon 30 KW

převodovka – NORD - SK 8382 AGBH – 225S/4WE  
převodový poměr 30,9  
výkon 37 KW

frekvenční měnič - SIEMENS – SIMOVERT MASTER – DRIVES  
výkon 37 – 400 KW

Umožňuje plynulou regulaci otáček 0 až 9 ot/min.

Maximální výkon sušiče: 75 t/hod. surového uhlí  
60 t/hod. sušeného uhlí

#### **Mechanické odlučovače**

#### Základní technické údaje:

- Ventilátory na Sušárně I: - C11, C12 na odsávání a přesypů PD 303, PD 304 typ K 80 L 90, výkon 39 600 m<sup>3</sup>/hod. 30 MPa/m<sup>2</sup> - elektromotor KMR 280 S 6 provedení M 101, výkon 75 kW 985 ot/min., napětí 500 V
- Ventilátory na Sušárna II: - C 13, C14 na odsávání přesypů PD 303, PD 304, typ K 80 P 90, výkon 39 600 m<sup>3</sup>/hod., 30 MPa/m<sup>2</sup>, elektromotor KMR 280 S 6 provedení M 101, výkon 75 kW 985 ot/min., napětí 500 V

## Elektrostatické odlučovače (EF)

### Základní technické údaje:

výška	23 220 mm
průřez	5 720 x 5 080 mm
rozteč elektrod	200 mm
počet řad elektrod	27
aktivní délka elektrod	9 270 mm
usazovací plocha	2 300 m <sup>2</sup>
provozní napětí	20 - 40 kV
provozní proud	do 200 mA
odlučovací účinnost	99 %

### *Parametry usměrňovacího transformátoru:*

Výrobce	VEB Transformatoren
Typ	FGEG 200/70DTO
Výkon	30 kVA
Sekundární napětí	70 000 V
Sekundární proud	0,2 A
Rok výroby	1963
Hmotnost	1 600 kg

## Chlazení nečisté páry (ChNP)

### Základní technické údaje:

Parní výkon kondenzátoru (2 sekce)	2*30 t/h
Tepelný výkon kondenzátoru	35,25 MW
Elektrický příkon motorů ventilátorů (4 ventilátory)	4*22kW
Napětí	290/500VAC
Hmotnost kondenzátoru suchá/provozní maximální	62,665t / 70,575t
Teplota páry maximální provozní	160 °C
Tlak páry pracovní maximální	0,45 MPa (a)
Výstupní teplota kondenzátu z kondenzátoru maximální	148 °C
Hladina akustického tlaku	< 80 dB (A)

### *Základní parametry expandéru a potrubí kondenzátů*

Průměr nádoby	800 mm
Výška válcové části	2000 mm
Návrhové parametry teplota / tlak	200 °C / 0,5MPa
Tlak v expandéru, provozní (tlak NT páry ve sběrně)	0,15 MPa (a)
Teplota v expandéru pracovní	110 °C
Tlak v systému vratných kondenzátů pracovní	0,3 MPa (a)
Tlak v systému vratných kondenzátů maximální	0,5 MPa (a)

### *Hlavní parametry čerpadel kondenzátu*

Počet čerpacích jednotek	3 ks
Výrobce	KSB
Typ	ETB 080-065-250 GC
Provedení	AA06D300754
Poloha / počet stupňů	horizontální / 1°

Příkon motoru / napětí	7,5kW/500VAC
Příkon čerpadla v maximálním pracovním bodě	6,35 kW
Dopravní množství Qm	10-40 t/h
Dopravní výška celková Hc	20-40 m
Způsob regulace výkonu	frekvenční měnič
Pracovní teplota média	110 °C
Návrhová teplota	140 °C
Minimální nátoková výška (NPSH)	1,55 m [2]

## Kompresorová stanice K5/6 a K7.1/2

### Hlavní parametry kompresorů

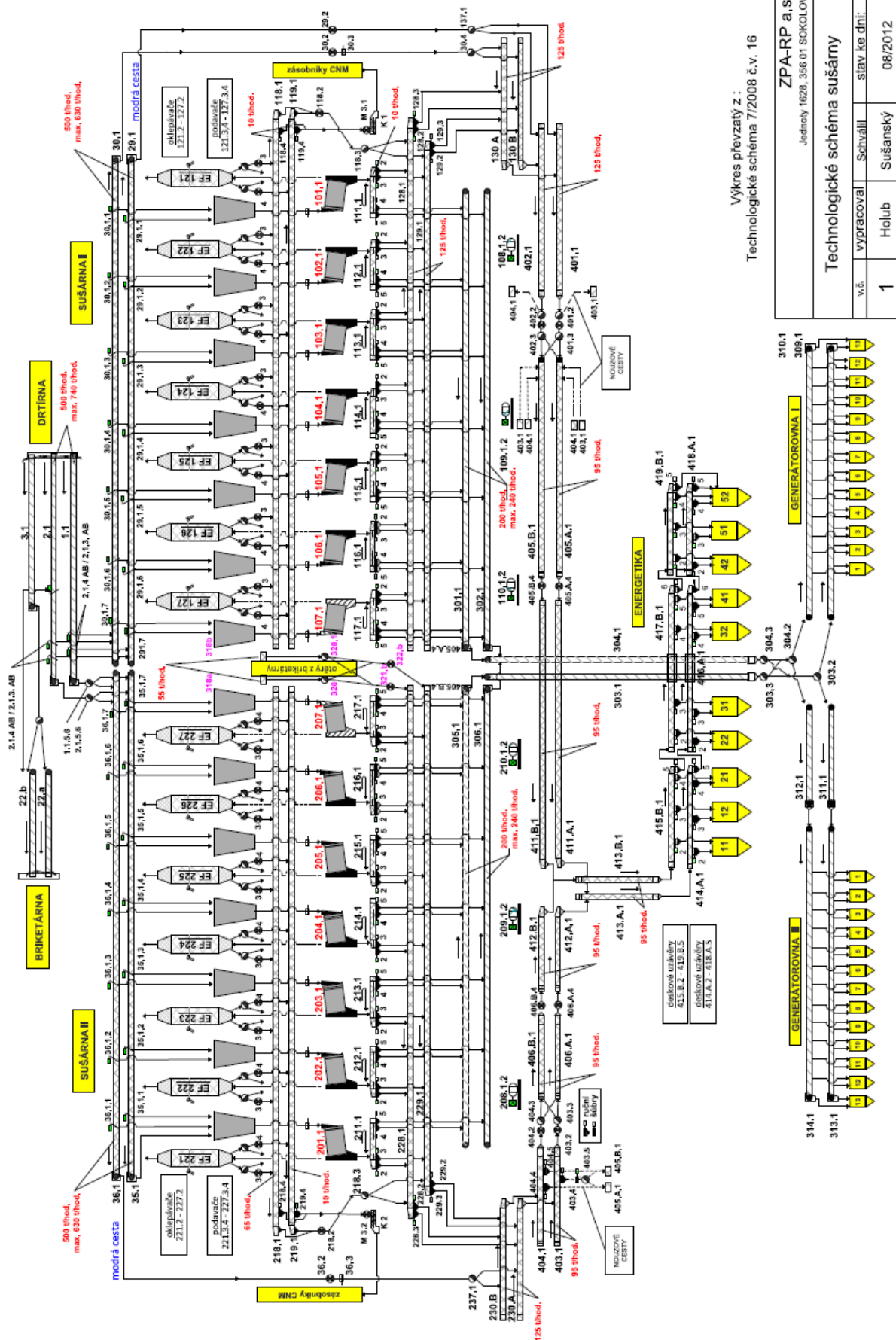
#### K5 a K6:

Výrobce	CAMERON TA – 2000
Typ	18E313Y461G1
Výkon motoru(HP/kW)	150kW/200HP
Napětí	500 VAC
Proud	197 A
RPM	2 975 otáček

#### K7.1 a K7.2:

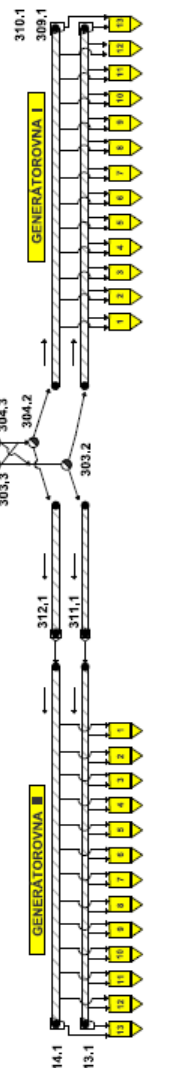
Výrobce	ATMOS SEC 370
Typ	HGLIE3 250M-2 S3
Výkon motoru	45 kW
Napětí	500Δ VAC
Proud	78 A
RPM	2 165 otáček
cosφ	0,90

# Technologické schéma Sušárna

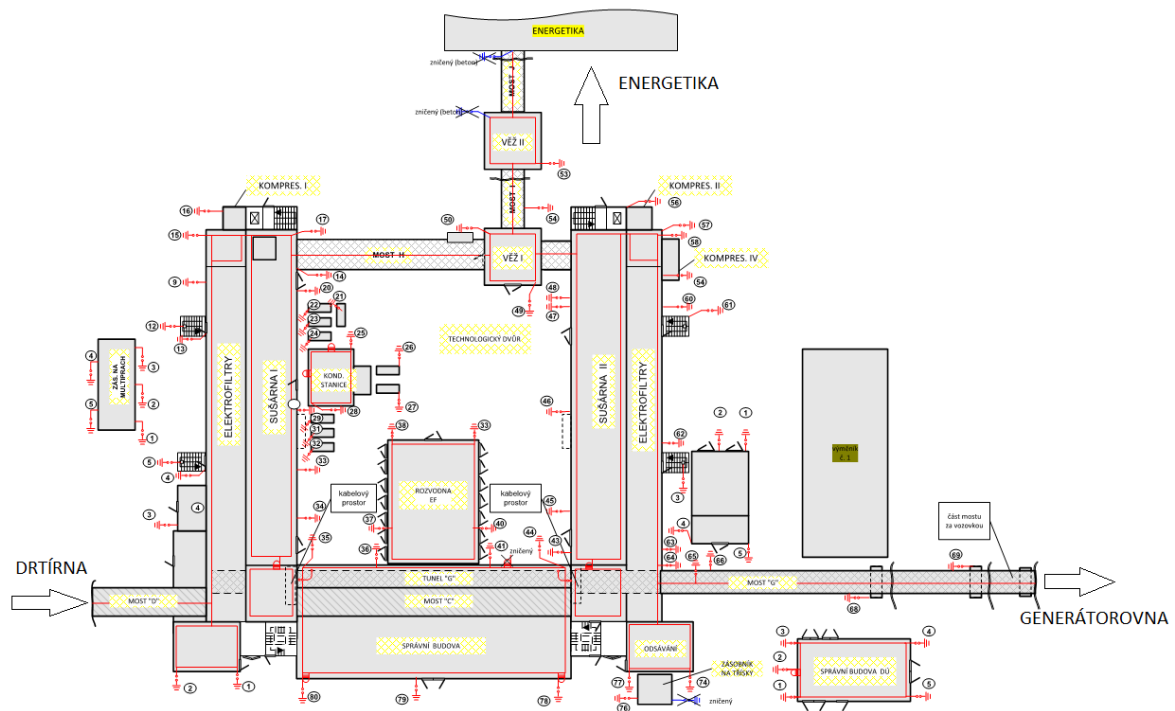


Výkres převzatý z:  
Technologické schéma 7/2008 č.v. 16

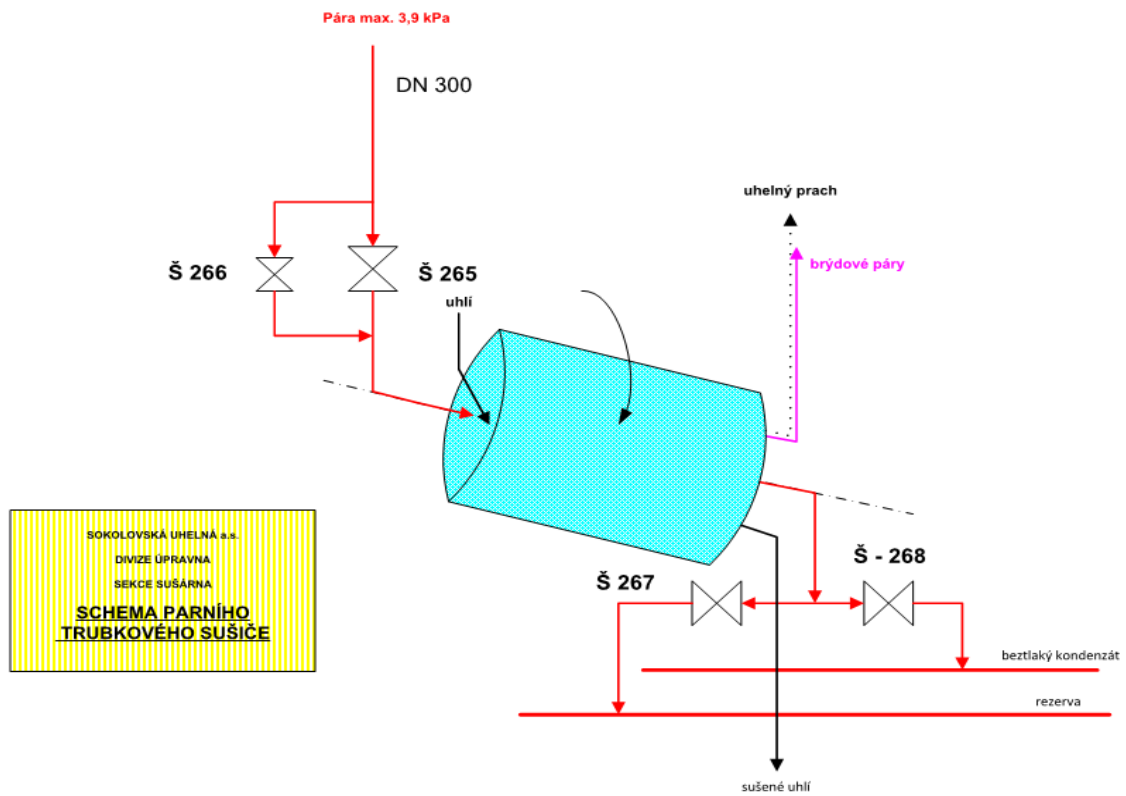
ZPA-RP a.s. Jednoty 1628, 566 01 SOKOLOV	
Technologické schéma sušárny	
v.č.	vypracoval Schválil stav ke dni:
1	Holub Sušárnský 08/2012



## Návaznost provozů Úprava uhlí



## Trubkový sušič





### Transformátor T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>



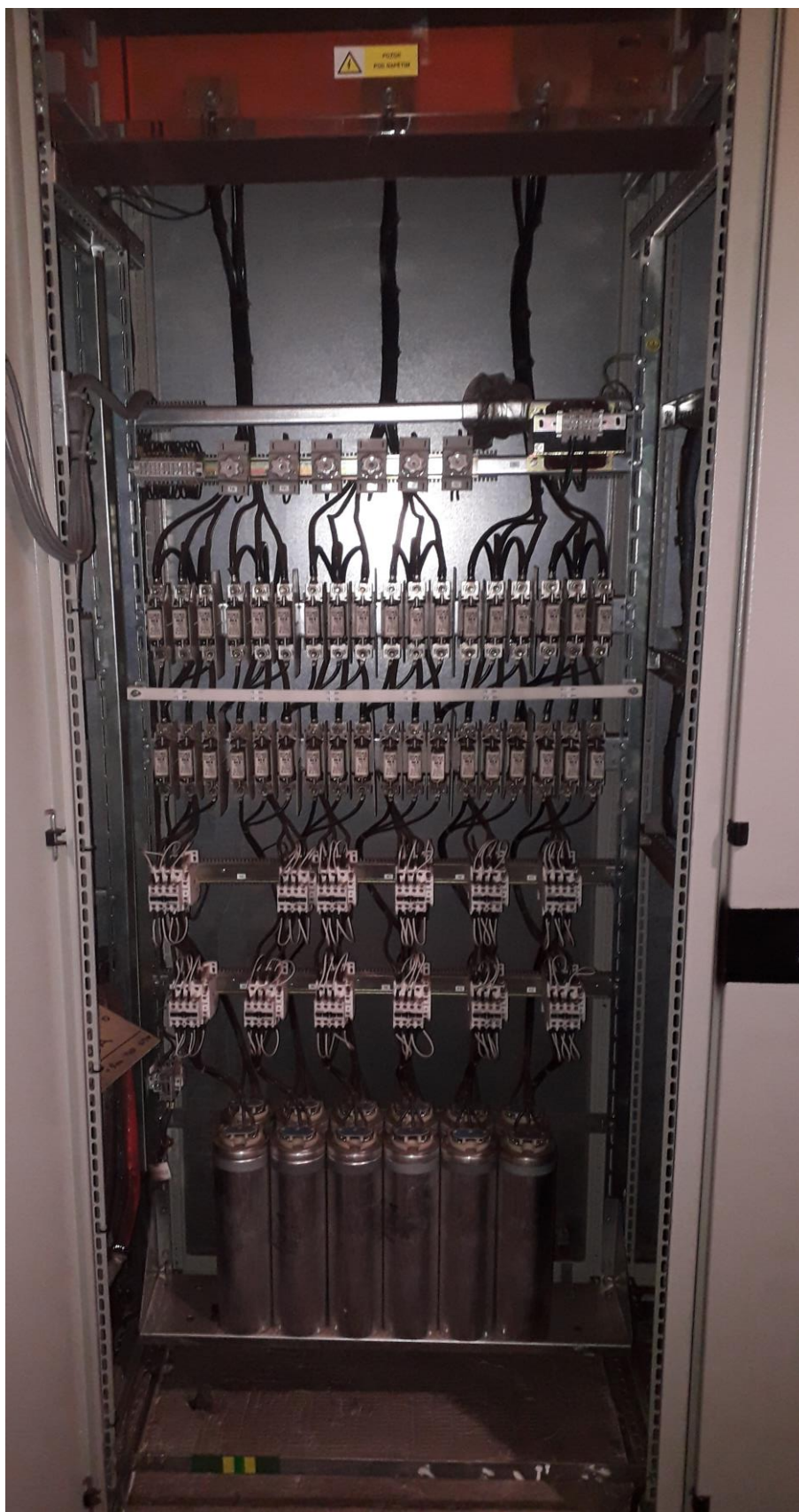
### Transformátor T<sub>4</sub>, T<sub>5</sub>



## Kompenzační rozvaděč s NOVAR 1214/S400



## Kompenzační rozvaděč



## Kondenzátory



## NOVAR 1214/S400

