



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

ANALÝZA PROVOZU MŘÍŽOVÉ SÍTĚ BRNO – STŘED

ANALYSIS OF THE OPERATION OF THE LATTICE NETWORK BRNO - STŘED

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lucie Frechová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Studentka: Bc. Lucie Frechová

ID: 154721

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Analýza provozu mřížové sítě Brno – střed

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Historický vývoj mřížové sítě Brno – střed:
 - návrh, realizace a rozvoj mřížové sítě,
 - výstavba kolektoru.
2. Popis možností provozu mřížových sítí a srovnání s dalšími typy sítí.
3. Stávající provoz mřížové sítě Brno – střed:
 - definice prvků zapojených do mřížové sítě a jejich parametrů (transformátory, ochrany, kabelové vedení atd.),
 - systematika provozu mřížové sítě.
4. Analýza dat naměřených v mřížové síti Brno – střed pomocí SW SO_MEG51:
 - analýza běžného provozu,
 - analýza namodelovaného poruchového stavu.
5. Výpočet chodu mřížové sítě Brno – střed v programu Pas Daisy Bizon.
6. Srovnání výsledků analýzy a návrh pro zlepšení chodu mřížové sítě Brno – střed.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- Technické normy společnosti E.ON Czech.
- Pavlovský, B. Elektrické sítě ve městech a sídlištích. Praha: STNL – Nakladatelství technické literatury, n.p., 1975, 432 stran. DT 621.316.12.17.001.1
- Štroblová, M., Hejtmánková, P. Elektrické sítě městské a průmyslové. Západočeská univerzita, fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky, 1994, 149 stran. ISBN 80-7082-154-X
- Další literatura je stanovena dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 22.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

FRECHOVÁ, L. Analýza provozu mřížové sítě Brno-střed. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2017, 73 stran. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Ptáček Ph.D..

Ráda bych poděkovala vedoucímu mé diplomové práce Ing. Michalu Ptáčkovi, Ph.D. za odborné rady, ochotu a vstřícnost při zpracování mé práce.

Děkuji také společnosti E.ON Česká republika s.r.o. za možnost zpracování diplomové práce a pracovníkům společnosti za odborné rady, ochotu a vstřícnost při zpracování mé práce.

Zároveň bych na tomto místě chtěla poděkovat svým rodičům za podporu během celé doby studia.

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Analýza provozu mřížové sítě Brno-střed jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 22.5.2017

.....

ABSTRAKT

Práce uvádí rozbor historického vývoje elektrizační soustavy jižní Moravy. Detailněji je ukázán vývoj elektrického rozvodu města Brna, především současná podoba sítě od okrajových částí města až po historické centrum. Mřížová síť, jako předmět analýzy diplomové práce, je blíže popsána také z hlediska možnosti provozu a spolehlivosti dodávky elektrické energie. Součástí práce je popis postupného vývoje technologie aplikované v mřížové síti Brno-střed od jejího založení až po současnost. V rámci praktické části práce je provedena teoretická a praktická analýza ustáleného a poruchového chodu mřížové sítě Brno-střed. Teoretická analýza je založena na simulaci a výpočtu uvedených chodů modelu mřížové sítě v programu PAS DAISY Bizon, kdy sledovaným parametrem je výkonové zatížení transformátorů. Analýza reálných dat je včetně posouzení výkonového zatížení transformátorů doplněna o vyhodnocení nejvyššího maximálního fázového proudu a maximálního výkonového zatížení jednotlivých transformátorů ve sledovaném období. Analýza naměřených dat je rozšířena o posouzení rozdílů fázových hodnot proudů, a také napětí, mezi fázemi transformátorů. V práci jsou dále hodnoceny přetoky ze strany nízkého napětí na stranu vysokého napětí.

KLÍČOVÁ SLOVA: Mřížová síť; Napáječ; Rozvaděč NN; Transformátor; Univerzální měřící jednotka MEg40⁺, Směrová ochrana MEg51; Ustálený chod mřížové sítě; Poruchový chod mřížové sítě.

ABSTRACT

The thesis shows the historical development of the South Moravian electricity system and the development of Brno's network is discussed in more detail, especially the current form of the network from the outskirts of the city to its historical centre. The lattice network, as a subject of the analysis, is described in terms of the operation and reliability of the power supply. It also informs about the gradual development of the technology applied in the lattice network Brno-střed. The practical part performs the analysis of theoretical data and recorded data with respect to steady-state and faulty-state operation of the lattice network Brno-střed. The theoretical analysis is based on the simulation and calculation of the lattice network model in the software PAS DAISY Bizon and the monitored parameter is the transformers power load. In addition, the analysis of the real data includes the assessment of the difference average phase current values, as well as voltage, between the transformer phases. There is also the evaluation of the energy flow from the low voltage side to the high voltage side of the analysed network.

KEY WORDS:

Lattice network; Power Supply; Switchboard; Transformer; Universal energy meter MEg40⁺; Directional Protection MEg51; Steady-state operation of the lattice network; Faulty-state operation of the lattice network.

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
1 ÚVOD	15
2 HISTORIE ELEKTRICKÉHO ROZVODU JIŽNÍ MORAVY	16
2.1 ELEKTRIFIKACE MĚSTA BRNA	17
3 ROZVODNÉ SÍTĚ MĚSTA BRNA	19
3.1 PAPERKOVÁ SÍŤ	19
3.2 OKRUŽNÍ SÍŤ.....	19
3.3 MŘÍŽOVÁ SÍŤ	20
3.3.1 HISTORIE MŘÍŽOVÉ SÍTĚ MĚSTA BRNA	22
3.3.2 PRIMÁRNÍ A SEKUNDÁRNÍ KOLEKTOR	23
4 STÁVAJÍCÍ PROVOZ MŘÍŽOVÉ SÍTĚ BRNO-STŘED.....	24
4.1 STRANA VN	24
4.1.1 KABEL 22-AXEKVCEY	24
4.1.2 ROZVADĚČ VN	25
4.1.3 KABEL 22-AXEKVCEY	26
4.2 TRANSFORMÁTOR 22/0,4 KV	26
4.3 STRANA NN	27
4.3.1 KABEL 1-YY	27
4.3.2 ROZVADĚČ NN	27
4.3.3 KABEL AYKY	30
4.3.4 VENKOVNÍ SKŘÍNĚ	30
5 VÝPOČET CHODU MŘÍŽOVÉ SÍTĚ BRNO-STŘED V PROGRAMU PAS DAISY BIZON	31
5.1 PŘEVEDENÍ A MODIFIKACE SÍTĚ	31
5.2 VÝPOČET	33
6 ANALÝZA REÁLNÝCH DAT MŘÍŽOVÉ SÍTĚ	39
6.1 ZÍSKÁVÁNÍ DAT	39
6.2 ZPRACOVÁNÍ DAT.....	40
6.2.1 ANALÝZA AKTUÁLNÍHO MĚSÍCE (LEDEN 2017)	40
6.2.2 ANALÝZA HODNOT CELÉHO MĚŘENÉHO OBDOBÍ (OD 06/2016 DO 02/2017)	47
6.2.3 PŘETOKY V MŘÍŽOVÉ SÍTĚ	55
7 SROVNÁNÍ TEORETICKÝCH A REÁLNÝCH DAT	57
8 MODELOVÁNÍ PORUCHOVÝCH STAVŮ V MŘÍŽOVÉ SÍTĚ.....	62
8.1 SIMULACE PORUCHOVÉHO STAVU V PROGRAMU PAS DAISY BIZON.....	62
8.1.1 PŘÍMÝ SPOJ TRANSFORMÁTORŮ DVOU TRAFOSTANIC PŘI SIMULACI	64

8.2 REÁLNÉ MĚŘENÍ PORUCHOVÉHO STAVU.....	64
8.2.1 PŘÍMÝ SPOJ TRANSFORMÁTORŮ DVOU TRAFOSTANIC PŘI REÁLNÉM MĚŘENÍ	66
8.2.2 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI TRAFOSTANICE 1961 NA ULICI ORLÍ.....	66
9 ZÁVĚR.....	68
POUŽITÁ LITERATURA	71

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Schéma paprskové sítě, upraveno z [7]</i>	19
<i>Obr. 2: Schéma okružní sítě, upraveno z [7]</i>	19
<i>Obr. 3: Zjednodušená mřížová síť, červeně znázorněné pojistky slabé vazby, upraveno z [8]</i>	20
<i>Obr. 4: Mřížová síť o jednom napáječi, upraveno z [8]</i>	21
<i>Obr. 5: Mřížová síť o dvou napáječích, upraveno z [8]</i>	21
<i>Obr. 6: Napáječe mřížové sítě města Brna, trvalé napáječe znázorněny červeně, záložní napáječe žlutě [27]</i>	24
<i>Obr. 7: Nadproudová spoušť jističe BL1000SE305 s vypínací charakteristikou, upraveno z [21]</i>	28
<i>Obr. 8: Převod schématu z NetViewer do PAS DAISY Bizon [27]</i>	31
<i>Obr. 9: Neupravené schéma při exportu z NetViewer do PAS DAISY Bizon [29]</i>	32
<i>Obr. 10: Znázornění topologie mřížové sítě v programu PAS DAISY Bizon [29]</i>	35
<i>Obr. 11: Rozložení proudu na vedení v mřížové síti podle programu PAS DAISY Bizon [29]</i>	36
<i>Obr. 12: Napětí úseků vedení v mřížové síti podle programu PAS DAISY Bizon [29]</i>	36
<i>Obr. 13: Výkonové zatížení transformátorů podle výsledků z analýzy v programu PAS DAISY Bizon</i>	37
<i>Obr. 14: Proudové zatížení transformátorů podle výsledků z analýzy v programu PAS DAISY Bizon</i>	38
<i>Obr. 15: Zatížení transformátorů podle reálných dat</i>	43
<i>Obr. 16: Maximální proud pro jednotlivé fáze transformátorů podle reálných dat</i>	44
<i>Obr. 17: Průměrné napětí na jednotlivých fázích transformátorů podle reálných dat</i>	45
<i>Obr. 18: Zatížení transformátoru v trafostanici 1924 na náměstí Svobody během celého týdne</i> ..	46
<i>Obr. 19: Porovnání zatížení transformátoru 1924 během pracovního dne a víkendového dne</i>	47
<i>Obr. 20: Ilustrační graf odolnosti zařízení, upraveno z [32]</i>	54
<i>Obr. 21: Porovnání hodnot zatížení jednotlivých transformátorů z hlediska teoretické a reálné analýzy (středa 11.1.2017 12:00 – 13:00)</i>	60
<i>Obr. 22: Porovnání průměrných hodnot proudu jednotlivých transformátorů z hlediska teoretické a reálné analýzy (středa 11.1.2017 12:00 – 13:00)</i>	61
<i>Obr. 23: Porovnání vypočítaných hodnot výkonového zatížení při jednotlivých stavech na transformátorech podle programu PAS DAISY Bizon</i>	67

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Srovnání parametrů suchého a olejového transformátoru o výkonu 630 kVA, upraveno z [17].....</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 2: Technické parametry jističe BL1000SE305, převzato z [21]</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 3: Pracovní podmínky pro jistič BL1000SE305, převzato z [21]</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 4: Technické a pracovní parametry jednotky MEg51, převzato z [23].....</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 5: Zvolené hodnoty koeficientů soudobosti pro dané typy energetický tarifů [27].....</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 6: Vypočítané hodnoty pro trafostanice příslušící k napáječi V1205</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 7: Proudové zatížení jednotlivých typů kabelů použitých v mřížové síti.....</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 8: Hodnoty požadovaných veličin stanovené pro trafostanici 1924 náměstí Svobody v měsíci lednu 2017</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 9: Minimální a maximální fázové hodnoty proudů transformátorů napáječe V1205.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 10: Minimální a maximální fázové hodnoty napětí transformátorů napáječe V1205</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 11: Maximální odchylky proudů jednotlivých fází transformátorů napáječe V1205.....</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 12: Maximální odchylky napětí jednotlivých fází transformátorů napáječe V1205</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 13: Klasifikace poklesů napětí [30]</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 14: Klasifikace poklesů, převýšení a přerušení napětí v mřížové síti (shodné pro všechny trafostanice vyjma 1903,1907, 1910, 1912, 1915, 1927, 1940, 1950, 1955, 1961, 1992 označené jako problematické, 1909 a 1925, které mají vlastní tabulku), upraveno z [32] ...</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 15: Klasifikace poklesu napětí v trafostanici 1925, upraveno z [32]</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 16: Klasifikace poklesu napětí v trafostanici 1909, upraveno z [32]</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 17: Události napětí na transformátoru T1 ve stanici 1901, upraveno z [32].....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 18: Maximální dodávaná energie na stranu VN fáze L1 pro uvedené transformátory</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 19: Maximální dodávaná energie na stranu VN fáze L2 pro uvedené transformátory</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 20: Data získána jako průměr naměřených dat ze dne 11.1.2017 z časového úseku</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 21: Výsledná data ze dne 11.1.2017 z časového úseku 12:00-13:00 využita k porovnání</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 22: Porovnání vypočítaných hodnot při bezporuchovém provozu a jednotlivých vypnutých stavech.....</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 23: Parametry jedné fáze transformátoru T1 v trafostanici 703085 před vypnutím</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 24: Parametry jedné fáze transformátoru T1 v trafostanici 1901 před a po vypnutí 703085</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 25: Parametry jedné fáze transformátoru T1 v trafostanici 1909 před vypnutím</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 26: Parametry na jedné fázi transformátoru T1 v trafostanici 1901 před a po vypnutí 1909</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 27: Porovnání jednofázových vypočítaných a naměřených hodnot v trafostanici 1901.....</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 28: Hodnoty naměřené v trafostanici 1961 při spuštění obou transformátorů</i>	<i>66</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Veličina	Popis	Jednotka
E_{P+}	energie odebíraná z vysokonapěťové strany	Wh
E_{P-}	energie dodávaná na vysokonapěťovou stranu	Wh
$E_{P+ L1}$	energie odebíraná fází L1 z vysokonapěťové strany	Wh
$E_{P- L1}$	energie dodávaná z fáze L1 na vysokonapěťovou stranu	Wh
$E_{P+ L2}$	energie odebíraná fází L2 z vysokonapěťové strany	Wh
$E_{P- L2}$	energie dodávaná z fáze L2 na vysokonapěťovou stranu	Wh
$E_{P+ L3}$	energie odebíraná fází L3 z vysokonapěťové strany	Wh
$E_{P- L3}$	energie dodávaná z fáze L3 na vysokonapěťovou stranu	Wh
I	efektivní hodnota proudu	A
I_{L1avg}	průměrná efektivní hodnota proudu fáze L1	A
I_{L2avg}	průměrná efektivní hodnota proudu fáze L2	A
I_{L3avg}	průměrná efektivní hodnota proudu fáze L3	A
I_{L1max}	maximální efektivní hodnota proudu fáze L1	A
I_{L2max}	maximální efektivní hodnota proudu fáze L2	A
I_{L3max}	maximální efektivní hodnota proudu fáze L3	A
I_{L1min}	minimální efektivní hodnota proudu fáze L1	A
I_{L2min}	minimální efektivní hodnota proudu fáze L2	A
I_{L3min}	minimální efektivní hodnota proudu fáze L3	A
I_R	redukovaný proud	A
I_i	hodnota zkratové spouště	A
I_n	jmenovitý proud	A
I_u	jmenovitý trvalý proud	A
ΔI	rozdíl dvou efektivních hodnot proudů	A
K	počet dat	-
L_{pA}	hladina akustického tlaku	dB
P	činný výkon	W
P_{L1avg}	průměrná hodnota činného výkonu fáze L1	W
P_{L2avg}	průměrná hodnota činného výkonu fáze L2	W
P_{L3avg}	průměrná hodnota činného výkonu fáze L3	W
$P_{k75^\circ C}$	ztráty nakrátko	W
P_0	ztráty naprázdno	W

P_{3f}	třífázový činný výkon	W
ΔP	rozdíl dvou hodnot činného výkonu	W
Q	jalový výkon	VAr
Q_{L1avg}	průměrná hodnota jalového výkonu fáze L1	VAr
Q_{L2avg}	průměrná hodnota jalového výkonu fáze L2	VAr
Q_{L3avg}	průměrná hodnota jalového výkonu fáze L3	VAr
Q_{3f}	třífázový jalový výkon	VAr
R	elektrický odpor vodiče	Ω
S	průřez vodiče	m ²
S	zdánlivý výkon	VA
S_n	jmenovitý zdánlivý výkon	VA
S_{3f}	třífázový zdánlivý výkon	VA
U	efektivní hodnota napětí	V
U_{L1avg}	průměrná efektivní hodnota napětí fáze L1	V
U_{L2avg}	průměrná efektivní hodnota napětí fáze L2	V
U_{L3avg}	průměrná efektivní hodnota napětí fáze L3	V
U_{L1max}	maximální efektivní hodnota napětí fáze L1	V
U_{L2max}	maximální efektivní hodnota napětí fáze L2	V
U_{L3max}	maximální efektivní hodnota napětí fáze L3	V
U_{L1min}	minimální efektivní hodnota napětí fáze L1	V
U_{L2min}	minimální efektivní hodnota napětí fáze L2	V
U_{L3min}	minimální efektivní hodnota napětí fáze L3	V
U_e	jmenovité pracovní napětí	V
U_{fmax}	maximální efektivní hodnota fázového napětí	V
U_{fmin}	minimální efektivní hodnota fázového napětí	V
U_{imp}	jmenovité impulzní výdržné napětí	V
U_n	jmenovité napětí	V
f	jmenovitý kmitočet	Hz
$i(k)$	okamžitá hodnota proudu	A
k	pořadové číslo naměřené hodnoty	-
l	délka vodiče	m
m	hmotnost	kg
u	procentní zbytkové napětí	%
$u(k)$	okamžitá hodnota napětí	V

$u_{k75^{\circ}\text{C}}$	napětí nakrátko	%
t	doba trvání	s
ε_P	přesnost výpočtové metody pro činný výkon	W
ε_Q	přesnost výpočtové metody pro jalový výkon	VAr
η	zatížení	%
$\Delta\eta$	rozdíl dvou hodnot zatížení	%
ϑ_{okoli}	teplota okolí	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_{prac}	pracovní teplota	$^{\circ}\text{C}$
ρ	měrný odpor materiálu vodiče	$\Omega \cdot \text{m}$

Zkratka	Popis
DS	Distribuční síť
E.ON	E.ON Česká republika s.r.o.
ES	Elektrizační soustava
GIS	Geografické informační systémy
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise
JME	Jihomoravské energetické závody
LPWAN	Nízkopříkonová rádiová technologie (z anglického Low Power Wide Area Network)
LTE	Širokopásmová mobilní síť (z anglického Long Term Evolution)
NN	Nízké napětí
PE	Polyetylen
PLC	Úzkopásmový a širokopásmový přenos zpráv po elektrické síti (z anglického Power Line Communication)
PVC	Polyvinylchlorid
SP	Přípojková skříň
SR	Rozpojovací skříň
SS	Smyčkovací skříň
VDE	Německé sdružení pro elektrotechnické, elektronické a informační technologie
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí
ZME	Západomoravské elektrárny

1 ÚVOD

Prvotně byla do města Brna přivedena elektrická energie za účelem osvětlení Městského divadla. Postupným růstem města a požadavky na elektrickou energii se formovala rozvodná síť a zdroje energie až do současné podoby. Dnešní hlavní zdroj napájení města představují rozvodny Sokolnice a Čebín, spolu s Teplárnami Brno. Město Brno je díky své rozlehlosti rozděleno na městské části. Každá městská část má vzhledem ke své poloze a účelu přizpůsobenou rozvodnou síť. Městská část Brno-střed je považována za centrum služeb a správy města. Nutnost udržovat nepřerušovanou dodávku elektrické energie v části Brno-střed vedla v roce 1951 k vybudování mřížové sítě, která je provozována dodnes. Podoba mřížové sítě Brno-střed je v České republice ojedinělá. Pro složitost provedení mřížové sítě je těžko dohledatelné, jak se síť chová při různých provozních stavech, např. při výpadku jednoho transformátoru. Za pomoci moderních technologií monitoringu sítí je nezbytné provádět analýzu fungování sítě zpětně a vytvořit si podrobnou a technicky věrohodnou představu dějů probíhajících v mřížové síti spolu s jejich charakteristickými parametry. Na základě výsledků analýzy je možno učinit následná optimalizační opatření a úpravy v provozu sítě.

Cílem diplomové práce je zpětná analýza naměřených dat získaných ze zařízení monitoringu sítě. Důraz je kladen především na výkonové a proudové zatížení jednotlivých transformátorů mřížové sítě jak z hlediska ustáleného, tak i poruchového stavu. Součástí zadání je také vytvoření modelu mřížové sítě ve výpočtovém programu a sestavení teoretické představy funkce sítě v ustáleném a poruchovém stavu. V závěru práce je požadováno provedení vyhodnocení dosažených výsledků a srovnání teoretických předpokladů s reálně dosaženými daty.

2 HISTORIE ELEKTRICKÉHO ROZVODU JIŽNÍ MORAVY

Roku 1880 se datuje první využití elektrické energie na jižní Moravě [1]. Elektrická energie byla tohoto roku zavedena do cukrovaru v Židlochovicích za účelem osvětlení. Bylo to dva roky poté, co bylo zprovozněno první zařízení na elektrické osvětlení v českých zemích.

Za oficiální položení základů jihomoravské energetiky je považován rok 1913, kdy byla postavena elektrárna v Oslavanech [1]. Elektrizace soustava (ES) se skládala především z velkoelektrárny v Oslavanech, přenosového vedení 44 kV a rozvodné sítě, transformátory se nacházely v Oslavanech a Černovicích. Soustava byla spravována Rakouskou akciovou společností a předními odběrateli energie bylo město Brno a Rosická báňská společnost. Elektrárna v Oslavanech nebyla jedinou elektrárnou na území jižní Moravy. Elektrárny se dělily na závodní, městské a obecní, družstevní a soukromé. V roce 1913 čítala západomoravská oblast spolu s Brnem 331 elektráren s 51 GWh vyrobené energie za rok. Pohon elektráren se v té době instaloval parní, vodní nebo kombinovaný (voda, pára, nafta a plyn).

V období první světové války 1914-1918 byl rozvoj moravské elektrifikace pozastaven [1]. Docházelo pouze k nepatrným změnám a spíše k úpadku elektráren. Díky růstu poptávky po válečném průmyslu Brna byla elektrárna v Oslavanech jednou z mála, která byla rozšířena. Z důvodu dvojnásobného zvýšení zatížení zde byla výroba rozšířena na 2 a roku 1917 na 6 kotlů. Po válce roku 1919 byl schválen československý elektrizační zákon a objevila se snaha převést správu ES do Československa. Roku 1921 přebírá po Rakouské akciové společnosti řízení ES společnost Západomoravské elektrárny (ZME). ZME působilo na území Českomoravské vysočiny a Moravském Slovácku. V roce 1921 vlastnilo ZME 400 km linek vysokého napětí (VN) a do sítě bylo připojeno 94 obcí. Významný krok byl proveden roku 1923, kdy byla připojena první Petersenova cívka v Oslavanech a Brně-Černovicích. Sítě VN tak byly provozovány jako kompenzované. V dalších letech dochází k postupnému rozvoji ES. Jsou budovány nové linky, připojování nových odběratelů, roste zatížení sítě, a tím i výroba energie v elektrárnách. Např. v roce 1928 byla jako reakce na růst zatížení zahájena výstavba teplárny v Brně (dokončeno 1930) a roku 1929 přehrady a elektrárny na Dyji u Vranova (dokončeno 1933). Roční výroba elektrické energie překročila v roce 1929 100 GWh. Přispěla k tomu instalace 6. turbogenerátoru v Oslavanech. Zavedením 100 kV vedení roku 1935 mezi Vranovem a Oslavany byl sestaven trojúhelník zdrojů Oslavany-teplárna Brno-Vranov na Dyji využívající pro výrobu energie různých zdrojů. Po 25 letech funkce společnosti ZME, roku 1938, bylo připojeno 1154 obcí, ZME disponovalo 7111 km rozvodných sítí a vyrobilo 2 TWh elektrické energie.

V období druhé světové války 1939-1945 bylo území obsazeno Němci, kteří přebírali zařízení ve správě ZME do svého vlastnictví [1]. Došlo k dosazení německých úředníků do podniku ZME. Vlivem vzrůstu válečného průmyslu se zvýšil odběr elektrické energie, a tím i její výroba. Pro potřeby válečného průmyslu bylo postupně odmontováno měděné vedení a nahrazeno železnými lany. Koncem války bylo značně poznamenáno město Brno, kdy došlo k poškození teplárny a jejímu odstavení a byl přerušen přenos energie z Oslavan. Ve válce odstavené doly byly zatopeny a uvedeny do provozu až po půl roce od konce války, kdy se vše vrátilo pod ZME s řízením v Brně.

Po znárodnění v roce 1946 připadlo na ZME 74 MW v parních, 12 MW ve vodních a 0,6 MW ve spalovacích elektrárnách [1]. Mezi hlavní patřily elektrárna v Oslavanech, teplárna Brno, elektrárna Vranov nad Dyjí, Kníničky a Komín. Velkoodběratelům bylo prodáno 140 GWh a maloodběratelům 107 GWh elektrické energie. Ve správě ZME bylo přes 5000 km VN vedení, přes 6000 km vedení nízkého napětí (NN) a přes 2500 kusů transformátorů. V následujících letech

byl zaznamenán růst odběru díky kovoprůmyslu, textilu a uhelným dolům. Rok 1948 byl stanoven rokem ukončení plošné elektrizace jižní Moravy. O rok později bylo provedeno rozdělení výroby elektrické energie od jejího rozvodu. Vznikly tak podniky Rosicko-oslavanské elektrárny, Brněnské energetické rozvodné závody, výrobní odbor Energotransporta, krajská správa Energostavu v Brně a Energetický výzkum v Brně.

Elektrárna v Hodoníně a teplárna II. Brno byly spuštěny roku 1954 [1]. Současně s tím byly spuštěny linky 100 kV Drásov-Blansko, Teplárna-Komárov, Sokolnice-Dluhonice. O 3 roky později byly Sokolnice propojeny s Rakouskem (Bisamberg) vedením 220 kV. Roku 1959 se do řízení elektráren zapojila automatizace v podobě dálkového ovládní vodní elektrárny Vír II a Trousnice. V následujícím roce byly založeny Jihomoravské energetické závody (JME) jako spojení Energetických rozvodných závodů a Gottwaldov. V činnosti společnosti bylo 670 km vedení velmi vysokého napětí (VVN) s 10 rozvodnami VVN, 5000 km venkovního a 400 km kabelového VN vedení, 8000 km venkovního a 800 km kabelového vedení NN. V dalších letech bylo pokračováno s výstavbou 110 kV vedení a rozvoden. Roku 1969 se začíná také s výstavbou vedení 400 kV Sokolnice-Hradec a Sokolnice-Prosenice a teplárny Otrokovice. Rozvodna Čebín byla uvedena do provozu roku 1972 a pro její připojení bylo poprvé využito dvojité vedení 400 kV. O 5 let později se přidala do seznamu rozvoden rozvodna v Otrokovicích a Slaveticích. Jihomoravské energetické závody přešly do stavu koncernového podniku a byly zařazeny do koncernu ČEZ. V 80. letech byly pro podporu rozvoje zemědělské energetiky instalovány v Třebíči a JZD Čechtín jedny z prvních slunečních kolektorů na ohřev užitkové vody u nás a roku 1978 se mezi výrobní elektrické energie na jižní Moravě připisují jaderná elektrárna Dukovany a přečerpávací vodní elektrárna Dalešice.

Roku 1990 byly Jihomoravské energetické závody převedeny v samostatný státní podnik JME [1]. V tomto roce dodávalo JME přes 7 TWh elektrické energie. Dnes je energetické území jižní Moravy spravováno společností E.ON Česká republika, s.r.o., E.ON Energie, a.s. a E.ON Distribuce, a.s. Pod vedení těchto orgánů se území dostalo roku 2005.

2.1 Elektrifikace města Brna

Za zavedením elektrické energie v městě Brně stálo žárovkové osvětlení v Mahenově divadle (Městské divadlo) [1]. Osvětlení bylo uvedeno do provozu roku 1882 pobočkou firmy Edison Company po obnovení divadla. Bylo využito 1000 žárovek a 5 obloukovek. Pro zásobování osvětlení elektrickou energií byla postavena malá elektrárna na Ponávce 37, jelikož v té době nebylo město elektrifikováno. Propojení elektrárny s divadlem bylo provedeno podzemním kabelem o délce 350 m [2].

První městská elektrárna v Brně o výkonu 600 kVA byla spuštěna roku 1898 na Radlase [3]. K rozšíření napájení města Brna došlo roku 1905 připojením městské spalovny Smetárna. Postupně přibývaly další elektrárny. Roku 1911 elektrárna v Židenicích a v Husovicích, 1913 byla spuštěna elektrárna Oslavany a roku 1930 Teplárny Brno.

Vyvedení energie z městských elektráren bylo provedeno rozvodem o transformaci napětí 2/0,11 kV, a to původně jen ve vnitřním městě [3]. S rozvíjejícím se průmyslem rostla i potřeba elektrické energie, a tak došlo roku 1922 k zavedení rozvodu o napětí 6 kV. Ve stejném roce dochází ke změně sekundárního napětí ze 110 V na 220/380 V. Po dostavbě Teplárny Brno v roce 1954 přebírá prioritu napěťová úroveň 22 kV. Postupem času došlo k vytvoření transformačních stupňů 110/22/6/0,4 kV.

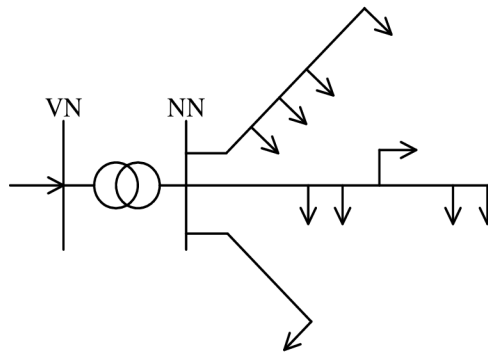
V současnosti je dodávka elektrické energie do města Brna zprostředkována z distribuční soustavy 110 kV z rozvodny Sokolnice a Čebín a Tepláren Brno. V rozvodně Sokolnice jsou v provozu dva transformátory 220/110 kV o výkonu 2x200 MVA a jeden transformátor 400/110 kV o výkonu 350 MVA [4]. Rozvodna Čebín má v provozu tři transformátory 400/110 kV o výkonu 3x350 MVA. U Tepláren Brno se jedná o provoz Červený mlýn o dosažitelném elektrickém výkonu 95 MWe a Špitálka o dosažitelném elektrickém výkonu 80 MWe [5]. Vedlejšími zdroji jsou průmyslové závody. Rozvodná síť VN je řešena jako síť paprsková (smyčková, rozepnutá). Sítě NN jsou také provozovány paprskově a v případě potřeby mohou být přepojeny na sousední transformátory [6]. Výjimku tvoří vnitřní město, jehož rozvod je proveden jako síť mřížová.

3 ROZVODNÉ SÍŤĚ MĚSTA BRNA

Město Brno je díky počtu obyvatel a rozloze druhým největším městem České republiky. Vzhledem k rozlehlosti města je možné se při studiu rozvodné soustavy setkat s různými způsoby propojení. Typy sítí se liší spolehlivostí a kvalitou dodávky elektrické energie. Na okrajových částech města převažuje paprskový rozvod. Směrem do středu města se nachází rozvod okružní a historické jádro je tvořeno sítí mřížovou.

3.1 Paprsková síť

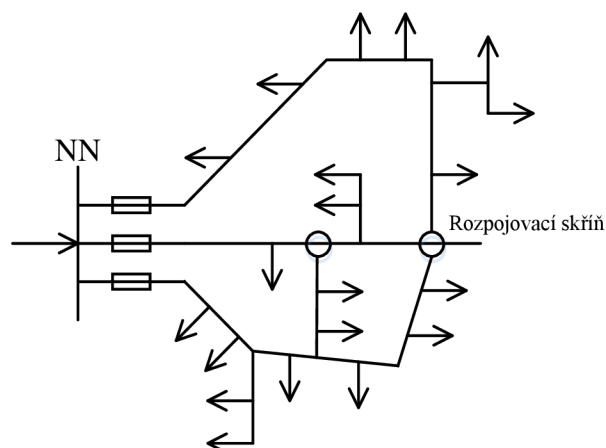
Jedná se o samostatné vývody vystupující ze společného napájecího místa [7]. Jednotlivé vývody není možno vzájemně spojovat. Výhodou je nízká nákladovost výstavby a provozu. Naproti tomu v případě výpadku elektrické energie může dojít k dlouhodobé odstavce. Je vhodná především pro okrajové části města bez speciálního požadavku na kvalitu a spolehlivost elektrické energie. Příklad paprskového rozvodu je uveden na obr. 1.



Obr. 1: Schéma paprskové sítě, upraveno z [7]

3.2 Okružní síť

Síť je představována paprsky, které je možno spínat do kruhu [7]. Při bezporuchové činnosti je síť provozována jako paprsková. V případě, kdy dojde k poruše, je možné přepojit porušený vývod na jiný a zajistit tak dodávku energie alespoň v části sítě. Vzhledem k paprskové síti je nákladnější na provoz. Díky možnosti spojení do kruhu je možné zabezpečit spolehlivější dodávku elektrické energie, popřípadě rovnoměrněji rozložit zatížení jednotlivých vedení. Ukázka provedení okružní sítě je vidět na obr. 2.

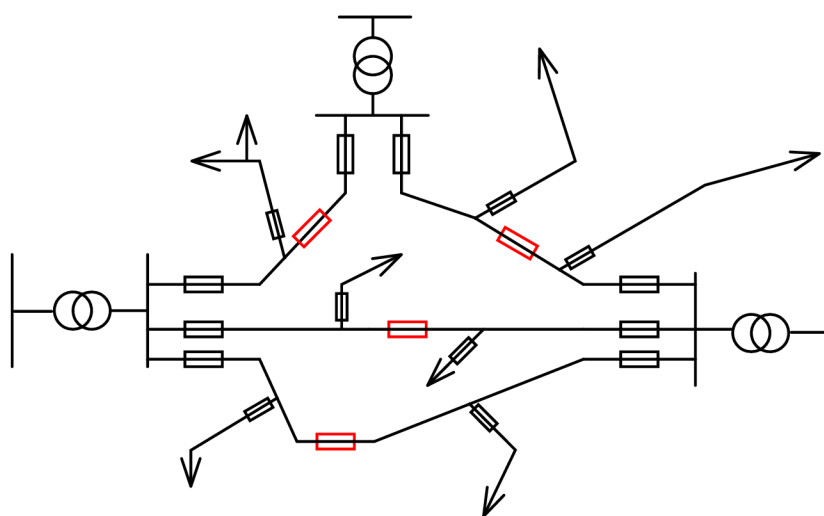


Obr. 2: Schéma okružní sítě, upraveno z [7]

3.3 Mřížová síť

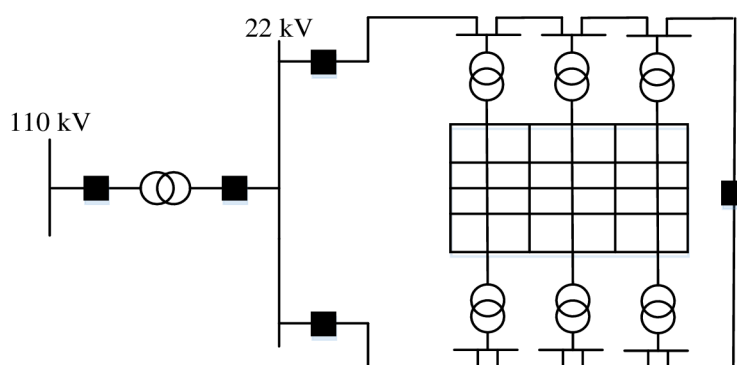
Klasická mřížová síť je charakterizována vyšším počtem transformoven, které jsou napájeny ze dvou a více napáječů VN [7]. NN vedení je provozováno jako kabelové a je propojeno na křižovatkách ulic do uzlů prostřednictvím skříní s pojistkami. V případě poruchy na straně NN sítě protéká pojistkami mezi dvěma nejbližšími skříněmi proud vyšší hodnoty než v ostatních místech sítě. Tento proud způsobí přetavení pojistek za kratší čas než zbývajících pojistek v síti. Od dodávky elektrické energie je tak odpojen pouze daný úsek a ostatní vývody zůstávají neporušeny. Nutnou součástí sítě je i směrová ochrana. V případě, kdy dojde k poruše na VN straně, teče do místa zkratu proud ze strany NN. Směrová ochrana vyhodnotí směr toku proudu a odešle pokyn k vypnutí jističe. Dochází také k vypnutí porušeného napáječe v rozvodně 110/22 kV, ale provoz mřížové sítě není omezen. Náklady klasické mřížové sítě jsou vyšší než předchozích dvou způsobů provozu. Jedním z důvodů je, že vedení musí být dimenzována s vysokou přenosovou rezervou pro přenos energie v případě výpadku některé větve. Klasická mřížová síť je náročná na obsluhu a vyhledávání poruch. Výhodou je vysoká spolehlivost a kvalita elektrické energie. Mřížová síť města Brna je příkladem klasické mřížové sítě.

Dalším typem mřížové sítě je zjednodušená mřížová síť. Síť je tvořena jedním napáječem spojeným do kruhu [8]. Kritériem je dostatečně dimenzovaný napáječ pro zatížení dané sítě. Provoz NN strany sítě je zajištěn venkovním vedením. Jedná se o zauzlenou síť s paralelním provozem distribučních transformačních stanic VN. Rozvaděče na sekundární straně distribučních transformátorů jsou propojeny magistralními vedeními o silnějším průřezu tvořící samostatné okruhy s jistěním výkonovými pojistkami. Z magistralních vedení vycházejí prosté odbočky. V určitých místech dochází k napájení vedení z obou stran. Tato místa se nazývají místa slabé vazby. Místa slabé vazby jsou jistěna pojistkami o 2 až 3 stupně nižšími, než jsou pojistky v distribučních transformačních stanicích. Při poruše se pak přeruší pojistky slabé vazby a je odpojena pouze poškozená část. Nízké investiční náklady, snadná obsluha a provozní údržba je zastíněna nižší spolehlivostí dodávky při výpadku NN strany a úplné ztrátě napájení při poruše napáječe. Možnost provedení zjednodušené mřížové sítě je uvedena na obr. 3.



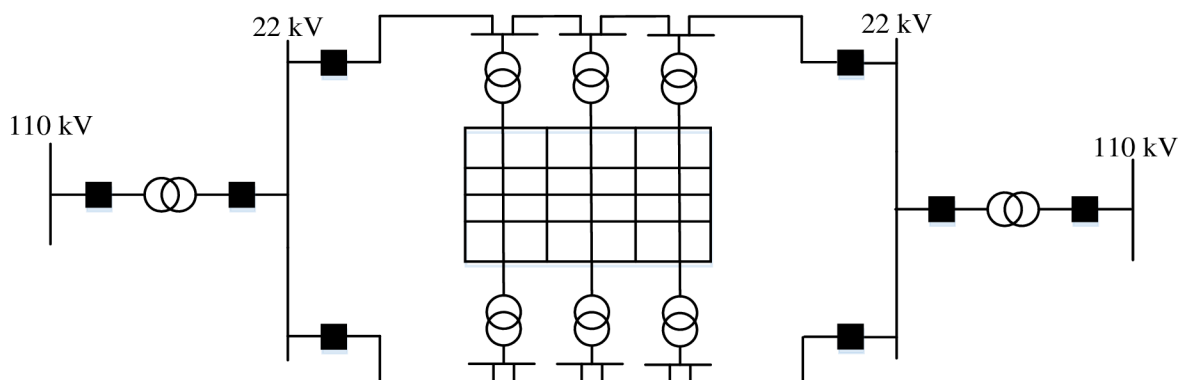
Obr. 3: Zjednodušená mřížová síť, červeně znázorněné pojistky slabé vazby, upraveno z [8]

Dělení mřížové sítě je možné i na mřížovou síť jednosystémovou a vícesystémovou. U jednosystémové mřížové sítě může být napětí přivedeno do stanice 110/22 kV jedním napáječem [8], jak je vidět na obr. 4. Napáječ je proveden jako okružní vedení, které je přivedeno do jedné stanice 110/22 kV. Požadavkem je, aby vedení bylo dimenzováno na zatížení celé zásobované oblasti. Musí být také splněna podstata mřížové sítě, aby distribuční transformátory byly schopny nést zatížení dané oblasti i při výpadku jednoho distribučního transformátoru. Napáječem zásobovanou NN síť představuje kabelové vedení. Jedná se o lokální síť, kdy mezi jednotlivými distribučními transformátory jsou vedeny posilovací kabely. Posilovací kabely jsou v normálním provozním stavu rozepnuty. K jejich sepnutí dochází v případě vzniku poruchy jednoho distribučního transformátoru. Posilovací kabely pak umožňují napájení postižené oblasti ze zbylých nepoškozených transformátorů. Výhodou tohoto typu rozvodu je vysoká kvalita energie, množství záložních transformátorů na NN straně. Oproti tomu při poruše napáječe je dodávka přerušena v celé síti.



Obr. 4: Mřížová síť o jednom napáječi, upraveno z [8]

U mřížové sítě vícesystémové je podle obr. 5 charakteristické, že primární strana se skládá ze dvou a více napáječů [8]. Opět zde platí podmínka na dimenzování distribučních transformátorů pro zásobování příslušné oblasti. Stejně jako u sítě s jedním napáječem je NN strana propojena kabelovým vedením. Na NN straně je možno se setkat se záložními kabely, které jsou v normálním provozním stavu rozpojeny. Záložní kabely jsou připojeny pouze v případě poruchy transformátoru a záložní napájení oblasti je zajištěno ze sousedních distribučních transformátorů. Nevýhodou jsou vysoké investiční a provozní náklady. Vysoké náklady jsou kompenzovány vysokou spolehlivostí dodávky (i při výpadku jednoho napáječe).



Obr. 5: Mřížová síť o dvou napáječích, upraveno z [8]

3.3.1 Historie mřížové sítě města Brna

Mřížová síť vnitřního města, v současnosti městské části Brno-střed, byla uvedena do provozu roku 1951 [1]. Byla vytvořena z původní paprskové sítě. Jednalo se o větve VN o napětí 6 kV a větve NN o napětí 0,22/0,38 kV. Připojené transformační stanice dosahovaly výkonu 160 kVA a byly vybaveny zpětnými ochranami.

Z důvodu růstu zatížení historického jádra města až na 8,1 MW byly roku 1975 průvodní transformátory nahrazeny novými o výkonu 400 kVA [1].

Po 30 let fungovala mřížová síť spolehlivě [1]. Až roku 1978 se objevila zvýšená poruchovost kabelu o napětí 6 kV. Reakcí na tuto situaci bylo sestavení plánu přechodu z primárního rozvodu elektrické energie o napětí 6 kV na rozvod o napětí 22 kV, který vytvořil odbor rozvoje JME roku 1979. Ve stejném roce vypracoval Výzkumný ústav energetický Brno (dnes EGÚ Brno, a.s.) studii řešící návrh nové mřížové sítě jako náhradu za síť dožitou. Město bylo rozděleno na 23 celků a u oblastí, které splnily podmínky, byla očekávána výstavba klasické mřížové sítě. O rok později zpracoval EGÚ Brno, a.s. studii, podle které měla být pro napájení vnitřního města vystavěna transformační stanice 110/22 kV Brno-Bratislavská (dnes Brno-Příkop) a Leitnerova. Z těchto plánů a studií byla sestavena určitá představa.

Mřížová síť měla být napájena ze tří okružních vedení VN uprostřed provozně rozpojených [1]. Mřížová síť tedy měla být tvořena šesti plně prostřídánými napáječi provedenými kabelem AXEKCEY 240 mm². Zásobování odběratelů připojených k mřížové síti mělo být zabezpečeno i za podmínky poruchy dvou napáječů. Předpokládalo se dokonalé prostřídání napáječů 22 kV, rovnoměrné rozdělení distribučních transformačních stanic na jednotlivé napáječe VN a bohatě dimenzovaná síť NN. U sítě NN bylo uvažováno s mřížovým provozem, kdy kabel NN měl být volen o průřezu 185 mm².

Ve skutečnosti byla v letech 1980–1990 vybudována síť 22 kV v plném rozsahu, ale síť 6 kV byla stále v provozu a k její likvidaci došlo až v roce 1995 po výstavbě stanice Příkop a vyvedení sítě 22 kV. Síť VN tak byla až do roku 1995 tvořena sítí o napětí 6 kV napájené z rozvodny 22/6 kV Radlas a sítí o napětí 22 kV napájené z rozvodny Brno-Teplárna. Záložní napájení bylo z rozvodny Brno-Sever a Brno-Špitálka. Transformační stanice v historickém jádru města byly vybaveny transformátory o výkonu 630 kVA zajišťující transformaci 22/0,4 kV z původních 6/0,4 kV. Mřížová síť byla v této době tvořena 38 transformačními stanicemi s 53 transformátory. Síť NN byla budována souběžně s VN sítí s využitím kabelu AYKY 3x185 + 95 mm² podle zásad tvorby mřížové sítě. Do roku 1995 byla NN síť provozována jako rozpojená z příčiny dvou různých napěťových hladin VN strany a nebylo tedy možno využít plného potenciálu mřížové sítě především z důvodu přetěžování a špatných napěťových poměrů. Po dokončení stanice Brno-Příkop a definitivní likvidaci hladiny 6 kV bylo historické jádro napájeno čtyřmi napáječi z rozvodny Brno-Teplárna.

V roce 2010 byla ve spínací stanici Brno-Příkop vybudována rozvodna 110 kV spolu s doplněním dvou transformátorů o výkonu 40 MVA a záložním vedením 22 kV. Rozvodna 110/22 kV Leitnerova nebyla vybudována. Vznikly úvahy o napojení napáječů VN strany do rozvodny Brno-Jih. Ve výsledku se však plánuje s výstavbou rozvodny Brno-Opuštěná a neuvažuje se s propojením s mřížovou sítí.

V roce 2014 byla zahájena výměna stávajících rozvaděčů NN strany za RST s motorovým pohonem jističe NN včetně směrové ochrany MEg51.

V současné době čítá mřížová síť městské části Brno-střed 71 transformačních stanic s transformátory 22/0,4 kV o výkonu 630 kVA v zapojení Dyn1. Celkový instalovaný výkon transformačních stanic dosahuje cca 65 MVA. Celkové zatížení naměřené v rozvodně Brno-Příkop od roku 2006 do roku 2014 se pohybuje mezi 9 až 10 MW.

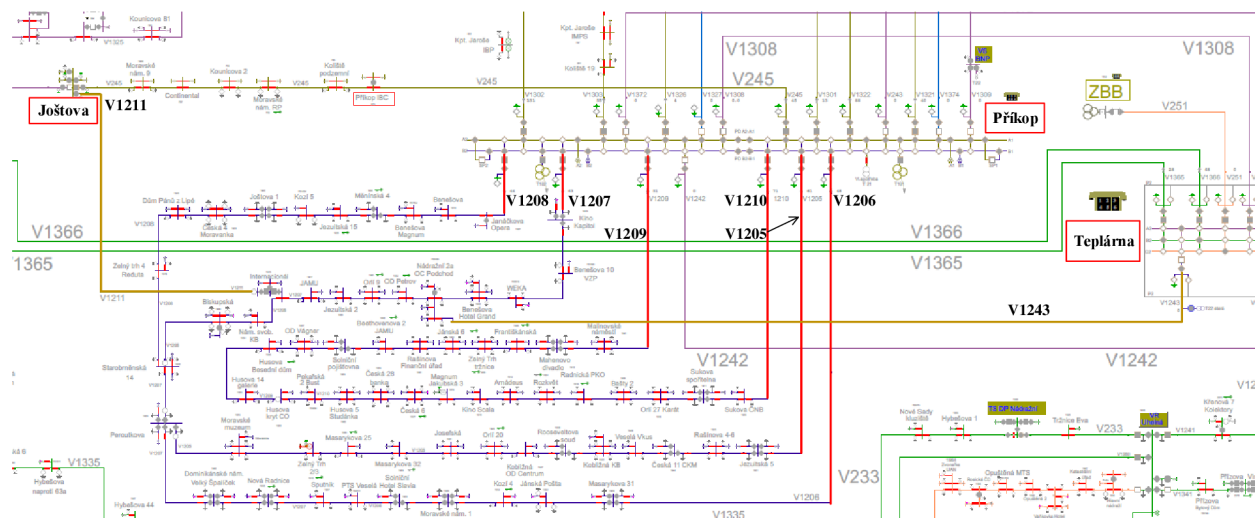
3.3.2 Primární a sekundární kolektor

S rozvojem mřížové sítě historického jádra města Brna je spojena také výstavba kolektoru. Kolektor je průchozí podzemní liniová stavba určená pro ukládání trubních nebo kabelových inženýrských sítí, např. vodovodního potrubí, kabelů elektrického rozvodu, telekomunikace, televize, internetu atd. [9]. Stavba primárního kolektoru v Brně byla zahájena v roce 1973 v úseku Dornych-Křenová a dále ve směru Radlas, Svitavské nábřeží, Tkalcovská a Tatranská. V roce 1978 byla vytvořena představa sestávající z realizace dvou okruhů primárního kolektoru, historické jádro a průmyslová zóna. Okruh průmyslové zóny byl ukončen roku 1994 dostavbou kolektoru v úseku Jugoslávská, Cejl, Malinovské náměstí a Hybešova. Hloubka primárního kolektoru se pohybuje kolem 30 m pod povrchem. Výstavba primárního kolektoru historického jádra v úseku Mendlovo náměstí, Špilberk, Moravské náměstí a Koliště nebyla realizována. Přednost se zde dala sekundárnímu kolektoru. Sekundární kolektor navazuje na primární kolektor, se kterým je spojen šachtou na Josefské ulici a na Kolišti.

Sekundární kolektor, jehož celková délka chodeb se pohybuje kolem 5,5 km, je oproti primárnímu kolektoru považován za distribuční soustavu, která slouží k rozvodu sítí do jednotlivých objektů na povrchu [10]. Je ražen v hloubkách cca 5–10 m pod povrchem a je opatřen nadzemními vstupními nebo ventilačními objekty. Podkladem pro sekundární kolektor byly stávající trasy inženýrských sítí.

4 STÁVAJÍCÍ PROVOZ MŘÍŽOVÉ SÍTĚ BRNO-STŘED

Mřížová síť části Brno-střed je trvale napájena 6 napáječi V1205, V1206, V1207, V1208, V1209, V1210 z rozvodny Příkop a záložními napáječi V1211 z rozvodny Joštova a V1243 z rozvodny Teplárna, které jsou bez zatížení. Napáječe jsou znázorněny v obr. 6. Stále provozovaný napáječ V1205 je připojen do rozvodny Jezuitská 5, napáječ V1206 do rozvodny Masarykova 31, napáječ 1207 do rozvodny Kino Kapitol, napáječ V1208 do rozvodny Janáčkova Opera a napáječ 1210 do rozvodny Sukova ČNB. Co se týče záložních napáječů, tak V1211 z rozvodny Joštova je přiveden do rozvodny Internacionál a napáječ V1243 z Teplárny do rozvodny Nádražní 2a OC Podchod.



Obr. 6: Napáječe mřížové sítě města Brna, trvalé napáječe znázorněny červeně, záložní napáječe žlutě [27]

Vývody napáječů z rozvodny Příkop 110/22 kV jsou osazeny ochranami SIPROTEC 7SJ62 od společnosti SIEMENS. Multifunkční ochrana SIPROTEC 7SJ62 slouží pro ochranu, ovládání a monitorování distribučních vývodů [11]. Umožňuje funkci nadproudové ochrany, směrové nadproudové ochrany, směrové/nesměrové citlivé detekce zemních poruch, ochrany proti přetížení, podpěťové/přepěťové ochrany, podfrekvenční/nadfrekvenční ochrany, aj. Ochrana zajišťuje kontrolu jističe, spínacích zařízení a automatik. Uživatel má možnost sám definovat ochranné funkce dle potřeb dané sítě. Ochrana je vybavena textovým nebo grafickým displejem.

4.1 Strana VN

Popis provozu mřížové sítě města Brna začíná od VN vývodu 22 kV z rozvodny Příkop 110/22 kV. Energie je vedena přes kabel typu AXEKVCEY a koncovky RAYCHEM RSTI se stíněnými T adaptéry do rozvaděče VN HOLEC, SIEMENS nebo ORMAZABAL. VN strana je zakončena kabelem AXEKVCEY, který propojuje rozvaděč VN s transformátorem 22/0,4 kV.

4.1.1 Kabel 22-AXEKVCEY

Napětí 22 kV je z rozvodny Příkop 110/22 kV přivedeno do dané trafostanice 22/0,4 kV prostřednictvím výše zmíněného napáječe, který je představován kabelem 22-AXEKVCEY. Kabel je sestaven z několika vrstev [12]. Vnitřní vrstva, tzv. laněné kruhové jádro je složeno z hliníkových vodičů. Následuje vnitřní polovodivá vrstva, na které je nanášena izolace ze zesíteného polyetyleny (PE). Zesítný PE je pokryt vnější polovodivou vrstvou, vodoblokující páskou a stíněním z měděných drátků s páskovou měděnou protispirálou. Sedmou vrstvou tvoří

vodoblokuující páska. Plášť sestává ze dvou vrstev, vnitřní představuje PE a vnější polyvinylchlorid (PVC). Složení je vidět na obr. A-1 v příloze A.

Strukturu kabelu je patrná i z označení kabelu [12]:

22	- jmenovité napětí 22/12,7 kV,
A	- hliníkové jádro,
XE	- izolace ze zesíťného PE,
K	- silnoproudý kabel,
VC	- měděné kovové stínění s ochranou proti podélnému šíření vody pod pláštěm,
E	- plášť z PE,
Y	- plášť z PVC.

Parametry kabelu jsou uvedeny v příloze A.

4.1.2 Rozvaděč VN

Napáječ je z rozvodny Příkop 110/22 kV přiveden k transformátoru 22/0,4 kV přes rozvaděč VN. V mřížové síti Brno-střed jsou rozvaděče VN zastoupeny třemi firmami: SIEMENS, ORMAZABAL a HOLEC.

Rozvaděče HOLEC jsou vzduchem izolované rozvaděče. Rozvaděče tohoto typu se v dnešní době již neinstalují a jsou nahrazovány kompaktními rozvaděči s izolačním plynem SF₆.

Kompaktní rozvaděč je představován nerozebíratelným blokem, který je plně uzavřený a všechny jeho živé části jsou plně izolovány v jedné nádobě vyplněné plynem SF₆ [14]. Díky svým chemickým, tepelným a elektrickým vlastnostem (plynný, netečný, nehořlavý, atd.) vyhovuje izolační plyn SF₆ pro izolační a zhašecí funkce spínacích přístrojů, u kterých pak není potřeba provádět údržbu po celou dobu životnosti. Ke spínání je využito třípolohového odpínače s funkcí spínače a zkratovače. Pohony spínacích zařízení jsou ruční s mžikovými mechanismy [15]. Pružinový mžikový pohon ovládá pole kabelového vývodu a uzemňovače. Střadačovým pohonem je opatřeno pole transformátorového vývodu s možností nastřádání energie pro mžikové vypnutí. Manipulace s odpínačem a uzemňovačem se realizují samostatně s využitím dvou ovládacích pák, jednou pro pohon odpínače a druhou pro pohon uzemňovače. Výkonové pojistky pro jištění transformátoru jsou vloženy do pojistkových pouzder v kabelovém prostoru transformátorové odbočky a zabezpečeny krytem, který je přístupný pouze po zkratování odbočky transformátoru. Jednotlivé odbočky mají kabelové prostory uzavřeny blokovými zákryty. Ve spodní části rozvaděče jsou instalovány kabelové přichytky.

Kompaktní rozvaděče se využívají ve vnitřním prostředí ke spínání jednotlivých odboček vedení a transformátorů ve vnitřních transformovnách [14]. Na předním krytu rozvaděče je uvedeno schéma zapojení. U každé odbočky kabelu a transformátoru je štítek s označením odbočky. Nechybí typový štítek výrobce a indikátor stavu tlaku plynu SF₆.

Obecně se v mřížové síti Brno-střed využívá kompaktních rozvaděčů v zapojení se dvěma kabelovými odbočkami a jednou odbočkou s pojistkami pro jištění transformátoru nebo se dvěma kabelovými odbočkami a dvěma odbočkami s pojistkami pro jištění transformátorů [15]. Od společnosti SIEMENS se využívá rozvaděče typu 8DH10 nebo 8DH81. Od společnosti ORMAZABAL se jedná o typy GA 2K 1TS a GA 2K 2TS.

4.1.3 Kabel 22-AXEKVCEY

Rozvod VN zakončuje přivedení napětí z rozvaděče VN na průchodky transformátoru. Tento propoj je zabezpečován kabelem typu 22-AXEKVCEY [12], který je popsán v kapitole 4.1.1 a v příloze A.

4.2 Transformátor 22/0,4 kV

Transformátor funguje na principu elektromagnetické indukce, prostřednictvím které mění velikost střídavého napětí. Základ transformátoru tvoří jádro. Jádro neboli magnetický obvod je tvořen elektrotechnickými plechy z oceli s příměsí křemíku válcovanými za studena [16]. Plechy jsou navzájem odděleny nevodivou vrstvou, např. keramickou. Další důležitou součástí transformátorů je vinutí. Nízkonapěťové vinutí je představováno hliníkovou nebo měděnou folií navinutou na cívce. Mezi jednotlivými závity je vložena izolace z papíru napuštěného pryskyřicí, tzv. Prepreg. Vinutí vysokého napětí je složeno z měděného nebo hliníkového lakovaného drátu, který je navíjen na cívku. Závity jsou opět izolovány Prepregem. U suchých transformátorů je vinutí zalité do pryskyřice. U olejových transformátorů je vinutí uloženo do nádoby. Provedení nádoby je ze tří částí: olejové jímky, vlnovce a nosného rámu. Kromě rozdílu v provedení zakrytování vinutí se suché a olejové transformátory liší typem chlazení. U suchých transformátorů je chlazení provedeno vzduchem, u olejových olejem. Olejové hermetické transformátory jsou vzduchotěsně uzavřené. Kromě typu chlazení se dané transformátory liší také parametry a vlastnostmi, viz porovnání v tab. 1.

V mřížové síti městské části Brno-střed jsou v případě transformátoru 22/0,4 kV zastoupeny všechny výše uvedené typy. Suché transformátory se dnes již neinstalují pro svůj špatný odvod tepla a hlučnost. Přednost se dává olejovým hermeticky uzavřeným transformátorům. Z řady výrobců transformátorů jsou využívány výrobky firem ABB, BEZ TRANSFORMÁTORY, KONČAR a PAUWELS (dnes CG Power Systems). Jmenovitý výkon distribučních transformátorů 22/0,4 kV je jednotný 630 kVA. Celkový instalovaný výkon distribučních transformátorů v mřížové síti je přibližně 48 MVA. Podle interní informace provozovatele mřížové sítě se požaduje, aby jednotlivé transformátory byly zatíženy na 25 % svého jmenovitého výkonu a z důvodu zálohy nesmí být překročeno zatížení 50 %.

Tab. 1: Srovnání parametrů suchého a olejového transformátoru o výkonu 630 kVA, upraveno z [17]

	Suchý transformátor	Olejový hermetizovaný transformátor
Ztráty naprázdno P_0 [W]	1250	800
Ztráty nakrátko $P_{k75^\circ\text{C}}$ [W]	6800	6750
Napětí nakrátko $u_{k75^\circ\text{C}}$ [%]	6	6
Hladina akustického tlaku L_{pA} [dB]	57	50
Rozměry délka x šířka x výška [mm]	1810 x 880 x 1635	1555 x 840 x 1605
Hmotnost m [kg]	2080	1915

U některých transformačních stanic v mřížové síti je možné se setkat s více transformátory. V daném případě se jedná o paralelní provoz transformátorů. Charakteristické pro paralelní provoz dvou transformátorů je společná napájecí přípojnice vždy pro vinutí stejné napěťové hladiny (vstupní a výstupní). Pro správnou funkci paralelního chodu transformátorů je potřeba splnění čtyř podmínek [18]:

- stejný převod transformátorů,
- stejná hodnota napětí nakrátko,
- stejný hodinový úhel,
- poměr jmenovitých výkonů nepřesahující hodnotu 3:1.

4.3 Strana NN

Po transformaci je energie přenesena prostřednictvím kabelu 1-YY do rozvaděče NN a následně pak kabelem AYKY do rozpojovacích, smyčkovacích, případně přípojkových skříní.

4.3.1 Kabel 1-YY

Propoj mezi transformátorem 22/0,4 kV a rozvaděčem NN je zajištěn kabelem 1-YY. Řez kabelu je uveden na obr. A-2 v příloze A. Jedná se o kabel s měděným jádrem [19]. Na jádru je nanášena vrstva izolace z PVC. Plášť tvoří PVC.

Označení kabelu vychází z jeho složení [19]:

1	- jedna žíla,
Y	- izolace ze PVC,
Y	- plášť z PVC.

Parametry kabelu jsou uvedeny v příloze A.

4.3.2 Rozvaděč NN

Typově se jedná o rozvaděč RST 1099/4835. Rozvaděč je představován skříní, jejíž hlavní součástí je montážní panel [20]. Skříň může být provedena z nerezů nebo zinkovaná s lakováním. Stupeň krytí skříně je IP 43. Skříň může být zazděná nebo připevněná na nosnou konstrukci. Montážní panel je vybaven hlavním jistícím prvkem, přípojnými z měděné pásoviny, vývodovými pojistkami, měřicími transformátory proudu, elektronickým ampérmetrem, jednofázovou zásuvkou, omezovači přepětí. Číslice v označení rozvaděče definují jeho parametry. První 2 cifry udávají jmenovitý proud přípojníc 1000 A. Číslo 99 označuje jmenovitý proud hlavního jističe 1000 A. Číslice za lomítkem určují po řadě: jištění vývodů výkonovými pojistkami v odpínačích, počet vývodů, nepřímé měření zatížení, číslo schéma výrobce. Schematický rozbor označení rozvaděče je uveden na obr. A-3 v příloze A.

Jak bylo uvedeno výše, součástí montážního panelu je jistící prvek. V rámci mřížové sítě Brno-střed se jedná o jistič Modeion BL1000SE305 s motorovým pohonem od firmy OEZ. Jistič slouží pro jištění přívodu z distribučního transformátoru 22/0,4 kV do rozvaděče NN. Technické parametry jističe jsou uvedeny v tab. 2 a pracovní podmínky v tab. 3.

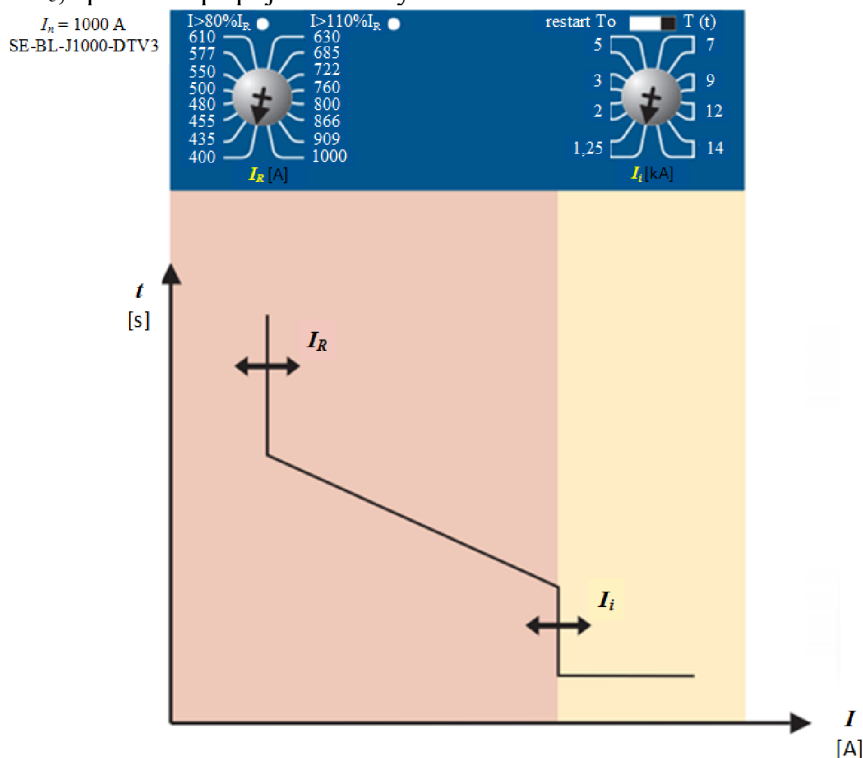
Tab. 2: Technické parametry jističe BL1000SE305, převzato z [21]

Jmenovitý trvalý proud I_u [A]	1000
Jmenovité pracovní napětí U_e [V]	Max. 690 a.c.
Jmenovitý kmitočet f [Hz]	50/60
Jmenovité impulzní výdržné napětí U_{imp} [kV]	8
Rozměry (šířka x výška x hloubka) [mm]	210 x 350 x 135
Hmotnost m [kg]	20

Tab. 3: Pracovní podmínky pro jistič BL1000SE305, převzato z [21]

Referenční teplota okolí ϑ_{okoli} [°C]	40
Rozsah teploty okolí [°C]	od -40 do +50
Pracovní prostředí	Suché a tropické klima

Součástí jističe je nadproudová spoušť typu DVT3. Její hlavní funkcí je jištění proti nadproudu a zkratu. Nastavení redukovaného proudu I_R je rovno 0,4 – 1 násobku jmenovitého proudu I_n jističe [21]. Nastavení hodnoty zkratové spouště I_i je možné v 8 krocích. Pro definování hodnoty I_R i I_i je využito otočných skokových přepínačů. Provedení nadproudové spouště jističe BL1000SE305 je znázorněno na obr. 7 spolu s vypínací charakteristikou. Důležitou součástí jističe je motorový pohon, který je určen pro místní ovládání zapínání a vypínání jističe. Je umožněno využití přechodu režimu z automatického na ruční podle potřeby. Mezi další části patří napěťová spoušť, která vypíná jistič po překročení 70 % U_e , podpěťová spoušť, která neumožňuje zapnutí jističe pod 35 % U_e , spínače a přípojovací sady.



Obr. 7: Nadproudová spoušť jističe BL1000SE305 s vypínací charakteristikou, upraveno z [21]

Vývodové pojistky v montážním panelu rozvaděče NN mřížové sítě Brno-střed jsou zastoupeny tavnými nožovými pojistkovými vložkami PN2 s charakteristikou gG typu Varius od společnosti OEZ uloženými v lištovém pojistkovém odpínači FD2 do 400 A. Pojistkové vložky o hodnotě jmenovitého proudu 400 A jsou použity ve smyčkovacích skříních v kolektoru. V trafostanicích se využívají výhradně pojistky o hodnotě jmenovitého proudu 315 A. V případě vyvedení již ke spotřebiteli se zavádí pojistky o nižší hodnotě jmenovitého proudu 250 A, 200 A, 160 A, 125 A.

Na montážním panelu rozvaděče NN se nachází také zařízení společnosti MEG A. Jde o jednotky MEG40⁺ a MEG51. Universal Energy Meter MEG40⁺ má dvě hlavní funkce. Je využíván jako elektroměr [22], kdy pro každou fázi disponuje šesticí registrů energií. Druhou hlavní funkcí je monitoring, kdy dochází k zaznamenávání průběhu napětí, proudů a výkonů. Současně také ve funkci monitoru sleduje stavy napětí a stanovuje jejich odchylky. Získaná data jsou uložena v interní datové paměti o kapacitě 4 MB, popřípadě může být tato interní paměť nahrazena vyjímatelnou paměťovou kartou o kapacitě 16 MB. Jednotka MEG40⁺ je zároveň doplněna o funkci vyhodnocení poruch [23]. Spolu s jednotkou stykových obvodů MEG51 vytváří soustavu směrové ochrany na hladině NN. Podstatou směrové ochrany je sledovat směr toku proudu a při nesprávném toku proudu z NN strany na stranu VN dochází k optické signalizaci a vypnutí poruchových relé. Směrová ochrana umožňuje také vyhodnocování každé fáze samostatně, tedy upozornění na nesprávný tok proudu jen v jedné fázi. Při poklesu napětí mřížové sítě pod 80 % jmenovité hodnoty dochází k okamžitému působení ochrany, v čase 50 ms, jelikož jde o napájení poruchy sítě VN. Při vybavování dává ochrana popud napěťové spouští jističe. Směrová ochrana se skládá ze dvou monostabilních relé se spínacími kontakty. Technické a pracovní parametry jednotky MEG51 jsou uvedeny v tab. 4 a jsou srovnatelné s jednotkou MEG40⁺.

Tab. 4: Technické a pracovní parametry jednotky MEG51, převzato z [23]

Jmenovité napětí U_n [V]	230
Jmenovitý proud I_n [A]	3 x 5 nebo 3 x 1
Jmenovitý kmitočet f [Hz]	50
Pracovní teplota ϑ_{prac} [°C]	-20 až +55
Rozměry (šířka x výška x hloubka) [mm]	90 x 90 x 95
Krytí	IP20

Důležitou součástí rozvaděče NN je logický modul LOGO 230RC společnosti Siemens. Zařízení slouží pro automatické zapínání jističe Modeion. V případě poklesu napětí mřížové sítě pod 80 % nominálního napětí nastává přetok ze strany NN na stranu VN, dochází k napájení poruchy VN a směrová ochrana dává povel k vypnutí jističe. Po vypnutí jističe se spouští automatika LOGO. Pokud automatika vyhodnotí, že se hodnota napětí vyskytuje po dobu 5 minut v nastavených mezích, dochází k zapnutí jističe.

4.3.3 Kabel AYKY

Od rozvaděče NN ke spotřebiteli je rozvod energie realizován kabelem typu AYKY. Kabel je tvořen čtyřmi žilami s hliníkovým jádrem [24]. Průřez každé žily je stejný. Obecně do velikosti průřezu 70 mm² je tvar jádra kulatý, od 90 mm² je tvar pak sektorový. Tři žily jsou určeny pro fáze, jedna žila pro uzemnění. Jádro je chráněno izolací z PVC obarvené podle určení žily, černá, hnědá a šedá pro fázi a žlutozelená pro uzemnění. Mezi izolací a pláštěm je výplňový obal. Svrchní plášť je složen z PVC. Struktura kabelu je na obr. A-4 v příloze A.

Název kabelu definuje jeho složení [24]:

A	- hliníkové jádro,
Y	- izolace z PVC,
K	- silnoproudý kabel,
Y	- plášť z PVC.

Parametry kabelu jsou uvedeny v příloze A.

4.3.4 Venkovní skříně

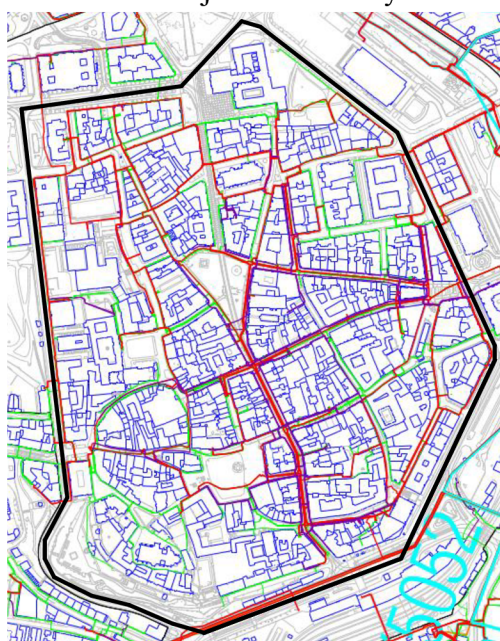
Větší objekty, např. školy, hotely, pojišťovny, banky, nacházející se v blízkosti transformační stanice jsou připojeny kabelem AYKY přímo. V ostatních případech je kabel AYKY vyveden do rozpojovací (SR), smyčkovací (SS) nebo přípojkové (SP) skříně. Rozvod je pak veden dále do místa spotřeby. Zavedením těchto typu skříní je umožněno v rámci sítě provádět různá přemostění a úpravy. Přípojkové skříně jsou využívány pro koncové připojení objektů do maximálního průřezu přívodních vodičů 50 mm² a kjištění přívodního vedení [25]. Pokud se jedná o přívody nad 50 mm², pak je potřeba použít smyčkovací skříně pro připojení koncového objektu a jištění přívodního vedení. Kromě toho je možné ji také využít pro průběžné tzv. smyčkové připojení kabelové elektrorozvodné sítě. Na rozdíl od předchozích dvou skříní je skříně rozpojovací určena pouze pro rozbočování, rozpojování, průběžné připojení a jištění kabelových elektrorozvodných sítí. Skříně mohou být v provedení celoplastovém, buď z polyesteru nebo z polykarbonátu, betonovém s plastovými nebo nerezovými dveřmi a plechovém. Skříně může být uložena ve výklenku ve stěně nebo zděném pilíři, uchycena na stěně, posazena na kompaktním pilíři nebo připevněna na opěrný bod venkovního vedení. Označení skříně je definováno deseti pozicemi, kdy každá pozice charakterizuje určitou vlastnost nebo určení skříně. Příklad označení je uveden na obr. A-5 v příloze A. V mřížové síti Brno-střed je možné se setkat se skříněmi od výrobců DCK Holoubkov Bohemia, ESTA Ivančice, SLOUPÁRNA Majdalena (pouze dožívající betonové provedení skříní, nově se nezavádí).

5 VÝPOČET CHODU MŘÍŽOVÉ SÍTĚ BRNO-STŘED V PROGRAMU PAS DAISY BIZON

Před uvedením navržené sítě do provozu je vhodné simulovat chod dané sítě ve výpočtovém programu z hlediska různých provozních stavů. V rámci diplomové práce se jedná o model funkce sítě v případě ustáleného chodu v programu PAS DAISY Bizon. Pro získání potřebných teoretických dat je v první řadě potřeba definovat území analyzované sítě. K tomu se využívá program podporující geografické informační systémy (GIS) NetViewer. Následně je síť převedena do programu PAS DAISY Bizon, kde je proveden samotný výpočet.

5.1 Převedení a modifikace sítě

S ohledem na rozsáhlost a náročnost není vhodné kreslit mřížovou síť v programu PAS DAISY Bizon ručně. K vymezení prostoru mřížové sítě je využito programu NetViewer společnosti Intergraph Corporation. Jedná se o program umožňující propojení mapy s databází s polohopisnými a popisnými charakteristikami objektů [26]. Obecně software s podporou GIS je aplikován v nejrůznějších sférách. Vzhledem k využití v energetice je možné si do reálné mapy území zobrazit sítě VVN, VN a NN spolu s vlastnostmi daných energetických prvků včetně vlastnictví a informací o zákazníkovi. Ohraničení mřížové sítě Brno-střed v programu NetViewer je znázorněno na obr. 8. Území mřížové sítě je v obrázku vyznačeno černou čarou.



Obr. 8: Převod schématu z NetViewer do PAS DAISY Bizon [27]

Zvolenou oblast sítě lze exportovat do programu PAS DAISY Bizon, kdy na emailovou adresu přihlášeného uživatele je zaslán odkaz s podkladem k otevření v PAS DAISY Bizon. Doba generování odkazu je 10–15 minut. Přenáší se jak obrazový podklad, tak i parametry soustavy. Po otevření schématu je potřeba zkontrolovat jeho správnost (funkčnost, dostatečný rozsah ohraničeného území atd.). V případě problémů je potřeba generovat odkaz znova. Program PAS DAISY Bizon slouží pro výpočet stavů energetických sítí [28]. Je využíván pro plánování rozvoje, projektování a dlouhodobou přípravu provozu sítí. Před samotným výpočtem je potřeba odstranit chyby a nepřesnosti vzniklé exportem dat z programu NetViewer. Jde především o doplnění chybějících parametrů prvku, odstranění odběratelských trafostanic a vedení, která nejsou součástí mřížové sítě.



Obr. 9: Neupravené schéma při exportu z NetViewer do PAS DAISY Bizon [29]

Při převodu schématu z programu NetViewer do PAS DAISY Bizon došlo k nezdůvodnitelnému rozeptnutí úseků, které jsou v reálném provozu propojeny. Svědčí o tom odlišná barevnost jednotlivých úseků schématu na obr. 9. Jednotlivé barvy zobrazují oblast napájenou uvedenou trafostanicí, kdy při výpadku není zajištěn automatický zások ostatními trafostanicemi. Síť funguje jako okružní, popř. paprsková. Aby síť pracovala jako mřížová, je potřeba spojit rozeptané vývody. Mřížová síť vykazuje jednotné zbarvení schématu a dané transformátory se podílí na napájení celé oblasti, tj. je zabezpečen automatický zások při výpadku některého z transformátorů.

Důležitým krokem vedoucím ke správnému výpočtu je upravení koeficientů soudobosti v charakteristikách jednotlivých odběratelů podle tarifů energetické společnosti. Program automaticky přiřazuje koeficient soudobosti 0,15 nezávisle na typu energetického tarifu. Uvedená hodnota však neodpovídá skutečnosti a pro dosažení věrohodných výpočtů je potřeba koeficienty upravit. V tab. 5 jsou uvedeny typy energetických tarifů odběratelů v mřížové síti, počet odběratelů s daným tarifem a zvolené koeficienty soudobosti.

Tab. 5: Zvolené hodnoty koeficientů soudobosti pro dané typy energetických tarifů [27]

Označení tarifu	Zvolený koeficient soudobosti	Počet odběratelů
EC01, EC02, EC03, ED01, ED02	0,1	643
EC25, EC26, EC35, EC45, EC55, EC56, EC62, ED25, ED26, ED35, ED45	0,2	271
Speciální tarify (EODO_XXXX*, EOPO_XXXX)	0,1	2921

* X nahrazuje číselnou hodnotu tarifu

Volba hodnoty koeficientu soudobosti není v případě mřížové sítě jednoduchá. Není snadné odhadnout charakter spotřebičů jednotlivých odběratelů a jejich součinnost. Koeficienty jsou určeny z interních technických informací provozovatele mřížové sítě.

5.2 Výpočet

Výpočet ustáleného chodu provádí program s využitím iterační metody Newton-Raphson. Podrobný popis této iterační metody je možné nalézt v uživatelské příručce k programu PAS DAISY Bizon. Pro simulaci funkce mřížové sítě je ponecháno výchozí nastavení výpočtu s přesností pro činný výkon $\varepsilon_P = 0,25$ kW, jalový výkon $\varepsilon_Q = 0,35$ kVAr a počtem iterací v rozmezí od 4 do 14.

Výsledkem výpočtu je konkrétní protokol. Protokol obsahuje hodnoty napětí, dodávaného a odebraného činného i jalového výkonu pro jednotlivé uzly. Napětí, proud, přenášený činný a jalový výkon jednotlivých úseků vedení. Pro transformátory je stanoveno napětí, proud, činný a jalový výkon primární a sekundární strany. Vzhledem k požadavkům zadavatele E.ON Česká republika s.r.o. jsou blíže analyzovány pouze hodnoty vypočítané na transformátorech. Programem automaticky generovaný protokol je rozsáhlý a nepřehledný. Vypočítané hodnoty jsou zpracovány v prostředí programu Microsoft Excel, který umožňuje přehlednější zpracování dat a je zadavatelem standardně využíván. S ohledem na rozsáhlost dat je pouze pro příklad uvedena tab. 6 s hodnotami určenými pro trafostanice příslušící k napáječi V1205, který byl zvolen náhodně. V následující analýze jsou trafostanice označovány inventárním číslem a ulicí jejich umístění. Pro podrobnější informace o trafostanici je možno nahlédnout do tabulky B-1 přílohy B. Hodnoty pro další napáječe jsou přiloženy v příloze B v tab. B-2–B-6. Data jsou v tabulkách rozdělena podle VN napáječe.

Tab. 6: Vypočítané hodnoty pro trafostanice příslušící k napáječi V1205

Napáječ V1205	U_f	I	P_{3f}	Q_{3f}	S_{3f}	η
	V	A	kW	kVAr	kVA	%
1901 Josefská T1	230,04	132,81	89,35	20,45	91,66	14,55
1901 Josefská T2	230,04	132,81	89,35	20,45	91,66	14,55
1903 Petrská T1	229,81	176,82	119,09	26,05	121,91	19,35
1903 Petrská T2	229,81	176,82	119,09	26,05	121,91	19,35
1910 Zelný trh	229,11	218,05	139,73	54,21	149,88	23,79
1921 Jezuitská	230,10	148,10	100,94	16,15	102,22	16,23
1923 Peroutkova	229,55	193,32	128,10	36,26	133,13	21,13
1938 Masarykova	228,87	231,54	145,30	64,51	158,98	25,23
1943 Rašínova T1	229,52	175,79	114,17	40,20	121,04	19,21
1943 Rašínova T2	229,52	175,79	114,17	40,20	121,04	19,21
1944 Česká, Skrytá	229,91	145,80	97,31	25,38	100,57	15,96
1945 Veselá	229,41	196,46	128,34	42,58	135,22	21,46
1946 Kobližná T1	228,81	250,19	159,03	64,84	171,74	27,26
1946 Kobližná T2	228,81	250,19	159,03	64,84	171,74	27,26
1947 Kobližná	228,61	255,94	159,39	73,54	175,54	27,86
1948 Orlí T1	229,03	230,18	147,63	56,72	158,15	25,10
1948 Orlí T2	229,03	230,18	147,63	56,72	158,15	25,10
1956 Rooseveltova	229,59	190,61	126,54	34,98	131,29	20,84
1965 Masarykova	230,05	141,52	95,82	18,93	97,67	15,50

Jelikož nejsou hodnoty třífázového zdánlivého výkonu S_{3f} a výkonového zatížení η programem počítány, jsou v tab. 6 hodnoty S_{3f} a η stanoveny podle následujících vzorců:

$$S_{3f} = \sqrt{P_{3f}^2 + Q_{3f}^2}, \quad (5.1)$$

$$\eta = 100 \cdot \frac{S_{3f}}{S_n}, \quad (5.2)$$

kde P_{3f} je třífázový činný výkon (W), Q_{3f} představuje třífázový jalový výkon (VAr) a S_n definuje jmenovitý výkon transformátoru (VA), který je jednotný pro všechny transformátory v mřížové síti a je roven 630 kVA.

Souhrnné porovnání vypočítaných hodnot v programu PAS DAISY pro jednotlivé transformátory v mřížové síti ukazuje obr. 13, na kterém je znázorněno výkonové zatížení jednotlivých transformátorů. Z obrázku je patrné, že jednotlivé transformátory nedosahují stejného zatížení, a to i přesto, že jsou obdobného provedení (tj. mají stejné parametry, zapojení, nastavení odboček). Příčinou rozdílnosti zatížení jednotlivých transformátorů je především rozdílná velikost odběru a odlišná délka jednotlivých vedení.

Podle interní informace provozovatele je základním kritériem správné funkce mřížové sítě Brno-střed požadavek, aby při běžném provozu byly transformátory zatíženy kolem hodnoty 25 %, maximálně na 50 % svého jmenovitého výkonu. Důvodem uvedeného kritéria je schopnost nepostižených transformátorů přenést na sebe zatížení porušeného transformátoru, aby byl udržen nepřerušovaný provoz mřížové sítě i při výpadku transformátoru. Minimálního zatížení $\eta = 12,36$ % dosahují transformátory umístěné v trafostanici 1942 Joštova. Maximálního zatížení $\eta = 36,25$ % nabývá transformátor v trafostanici 1914 na náměstí Svobody. Z obr. 13 vychází, že nedošlo k překročení hranice 50 %. Z hlediska výpočtové analýzy je splněno provozní kritérium mřížové sítě. Simulace konfigurace mřížové sítě v městské části Brno-střed potvrdila správnou funkci sítě v ustáleném stavu.

Výpočtový program PAS DAISY Bizon bere v úvahu stejné proudové zatížení jednotlivých fází, proto je uveden proud pouze jednou fází. Fázový proud jednotlivých transformátorů je zachycen na obr. 14. Průběh proudového zatížení kopíruje zatížení výkonové. Důvodem je fakt, že zatížení transformátorů je stanoveno z výkonů, které se vypočítávají z proudu a napětí transformátorů. Maximálního proudového zatížení dosahují stejné transformátory jako v případě zatížení výkonového. Transformátory umístěné v trafostanici 1942 Joštova mají proud nejnižší a dosahuje hodnoty $I = 112,70$ A na fázi. Nejvyšší fázový proud $I = 334,94$ A protéká transformátory v trafostanici 1914 na náměstí Svobody.

Program Pas Daisy Bizon umožňuje také vykreslení výpočtového schématu podle proudového, napěťového a výkonového zatížení nebo podle topologie sítě. Pro názornost je uveden obr. 10, kde je znázorněno vykreslení schématu podle topologie. Obr. 10 je možno porovnat s obr. 9. Je vidět, že celé schéma na obr. 10 má jednotné barvené provedení na rozdíl od obr. 9, tj. transformátory jsou vzájemně propojeny a síť funguje jako mřížová síť.

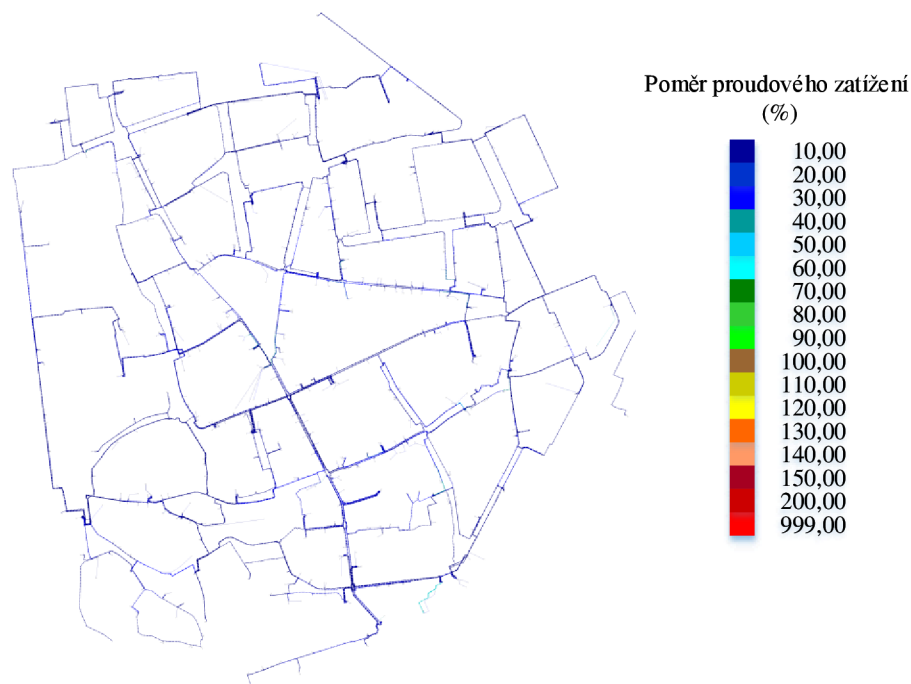


Obr. 10: Znárodnění topologie mřížové sítě v programu PAS DAISY Bizon [29]

Proudové zatížení jednotlivých vodičů spolu s jejich délkou je uvedeno v tab. 7. Nejčastěji využívaným typem vodiče v rámci NN strany mřížové sítě je AYKY 3x185 + 95 mm². Tento typ kabelu je zatížen maximálně na 51 % své jmenovité proudové zatížitelnosti. Ostatní kabely využity pro propojení jednotlivých transformátorů, jednotlivých skříní, transformátorů a skříní jsou zatíženy do hodnoty 40 % své jmenovité proudové zatížitelnosti. Nejsou uvažovány kabely vývodů ke spotřebitelům. Na obr. 11 je barevně provedeno proudové zatížení jednotlivých úseků.

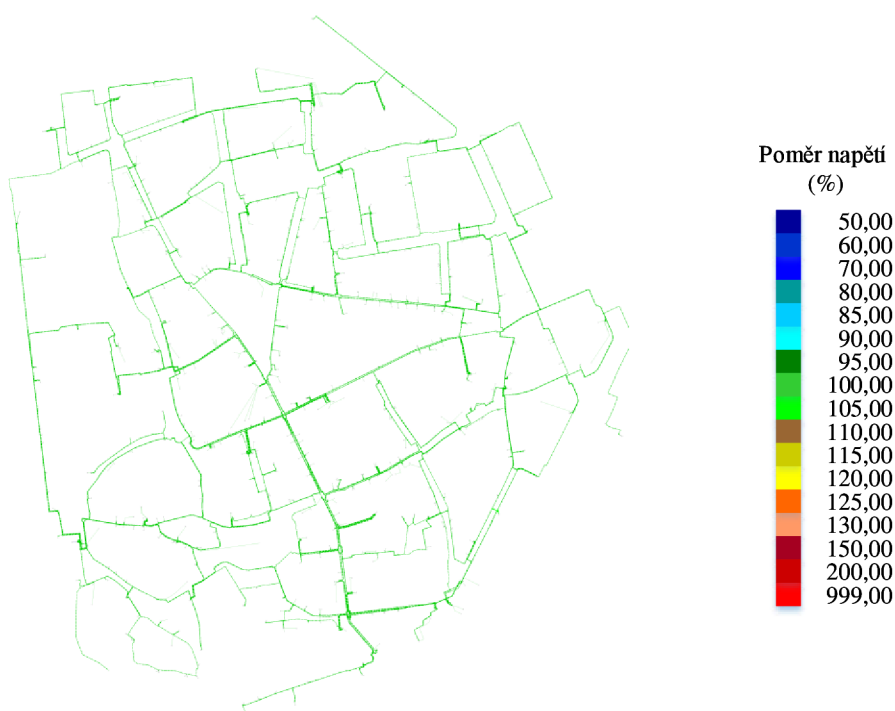
Tab. 7: Proudové zatížení jednotlivých typů kabelů použitých v mřížové síti

Typ vodiče	Počet a průřez žil	Maximální dosažené proudové zatížení vodiče	Délka vodiče <i>l</i>
		%	m
AYKY	3x95 + 70	11	358
AYKY	3x120 + 70	12	275
AYKY	3x150 + 70	14	248
AYKY	3x185 + 95	51	43382
AYKY	3x240 + 120	38	1392
1-NAYY-J	4x150	7	15
1-NAYY-J	4x240	26	2229

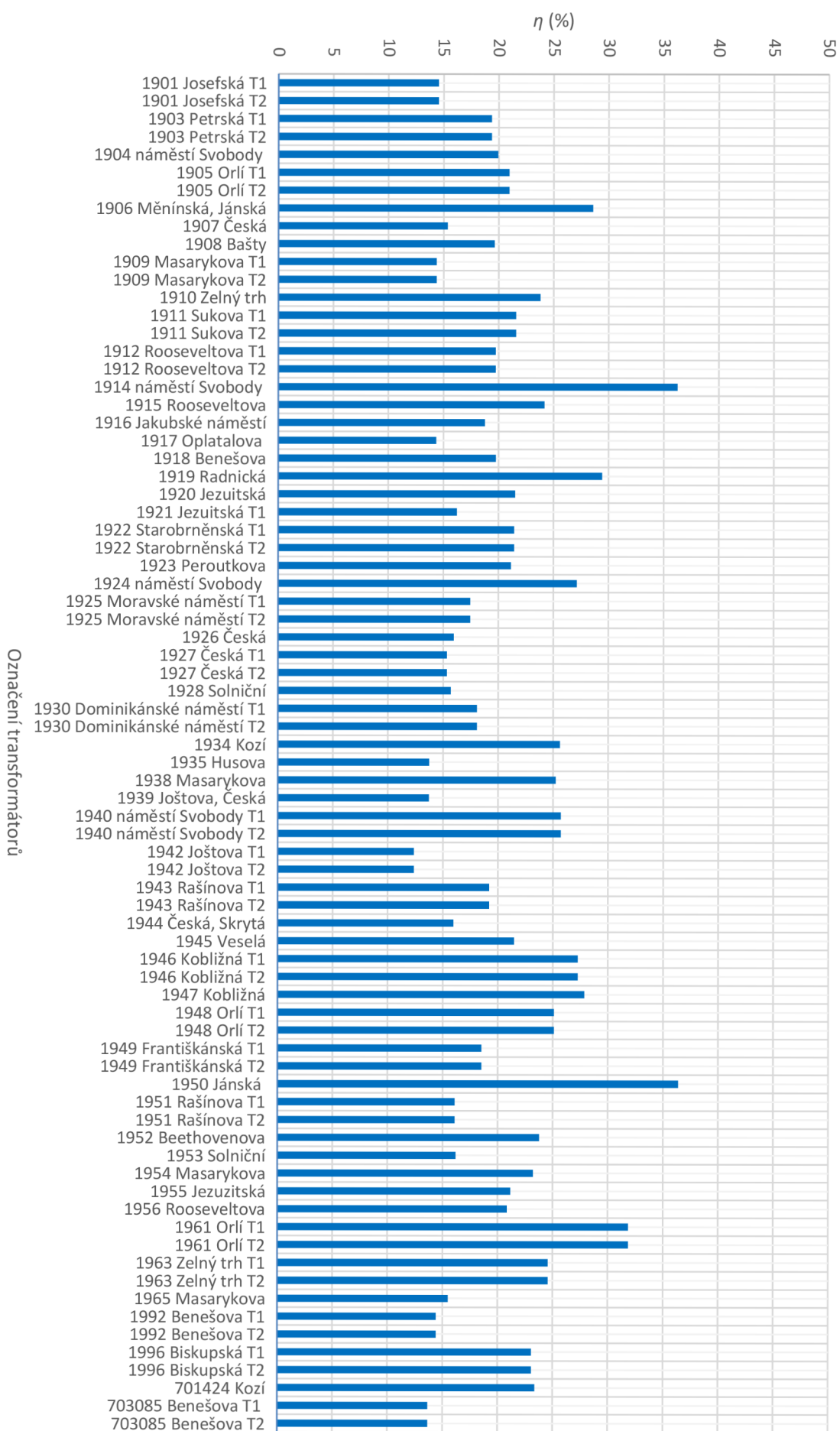


Obr. 11: Rozložení proudu na vedení v mřížové síti podle programu PAS DAISY Bizon [29]

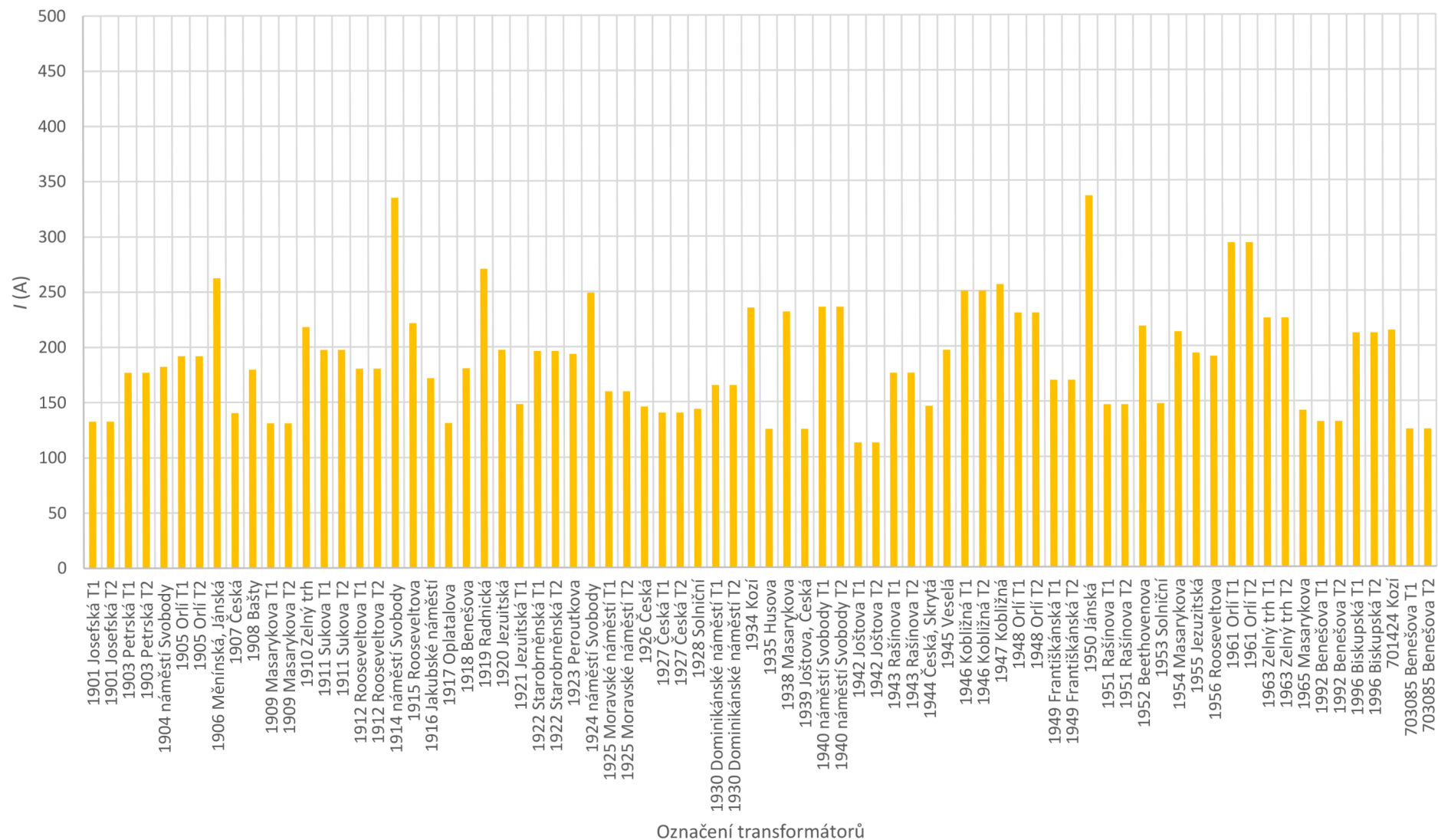
Z hlediska rozložení napětí na NN straně mřížové sítě nedochází k velkým odchylkám. Napětí se pohybuje v rozmezí od $U_{min} = 227,3$ V do $U_{max} = 230,4$ V. Jednotné napětí v síti dokazuje i obr. 12, kdy síť je z napěťového hlediska vykreslena jednotnou barvou.



Obr. 12: Napětí úseků vedení v mřížové síti podle programu PAS DAISY Bizon [29]



Obv. 13: Výkonové zařízení transformátorů podle výsledků z analýzy v programu PAS DAISY Bizon



Obr. 14: Proudové zatížení transformátorů podle výsledků z analýzy v programu PAS DAISY Bizon

6 ANALÝZA REÁLNÝCH DAT MŘÍŽOVÉ SÍTĚ

Jak je uvedeno v kapitole 4, v mřížové síti Brno-střed jsou aplikována zařízení společnosti MEGa, konkrétně jednotky MEG40⁺ a MEG51. Hlavní funkcí jednoty MEG40⁺ je monitoring, kdy dochází k zaznamenávání hodnot napětí, proudů a výkonů. Jednotka MEG40⁺ je doplněna o funkci vyhodnocení poruch a spolu s jednotkou stykových obvodů MEG51 vytváří soustavu směrové ochrany na hladině NN. Bližší informace o jednotkách jsou uvedeny v uživatelských příručkách v příloze F [22], [23].

6.1 Získávání dat

Zařízení MEG40⁺ využívá číslicového měření okamžitých hodnot 3 napětí a 3 proudů. Z časového průběhu dané veličiny se vzorkováním a digitalizací stanoví posloupnost dat k určení okamžité hodnoty [22]. Vzorkovací kmitočet je 32krát vyšší než síťový, tj. okamžité hodnoty proudů jsou určeny z 32 dat za jednu síťovou periodu. Z okamžitých hodnot jsou dopočítány efektivní hodnoty napětí a proudu podle vzorce (6.1) a (6.2) [22]

$$U = \sqrt{\frac{1}{K} \cdot \sum_{k=0}^{K-1} u^2(k)}, \quad (6.1)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{K} \cdot \sum_{k=0}^{K-1} i^2(k)}, \quad (6.2)$$

kde U je efektivní hodnota napětí (V), K je počet dat (-) s pořadovým číslem k (-), $u(k)$ označuje okamžitou hodnotu napětí (V), I je efektivní hodnota proudu (A) a $i(k)$ okamžitá hodnota proudu (A). Efektivní hodnoty jsou uloženy na paměťovou kartu. Činný výkon P (W) je vypočítán z okamžitých hodnot napětí a proudů ze vzorce (6.3) [22]

$$P = \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=0}^{K-1} u(k) \cdot i(k). \quad (6.3)$$

Obdobně je určen i jalový výkon Q (VAr). Hodnoty výkonů jsou rovněž zapsány do paměti. Jednotka ne vždy dopočítá hodnotu činného a jalového výkonu. Není tedy vhodné spoléhat se při výpočtu zdánlivého výkonu na hodnoty činného a jalového výkonu. Pro stanovení hodnoty zdánlivého výkonu S (VA) v daném okamžiku je pro analýzu použito efektivní hodnoty napětí a proudu a zdánlivý výkon je dopočítán dle vzorce (6.4)

$$S = U \cdot I. \quad (6.4)$$

Ze zdánlivého výkonu je dle vzorce (5.2) určena hodnota zatížení transformátoru η (%) vzhledem k jeho jmenovitému výkonu.

Paměťové karty jsou jednou za 3–6 měsíců vyměňovány za prázdné a naměřená data jsou na sběrných místech stahována do počítače a připravena k analýze. Přímá stažená data je možné otevřít pouze v programu DVMEg Data Viewer výrobce měřící jednoty. Program sice disponuje funkcemi analýzy dat, ale v rámci práce je využito převedení dat do formátu textového souboru a jejich zpracování je provedeno v programu Microsoft Excel. Program Microsoft Excel

je standardně využíván ve společnosti E.ON Česká republika s.r.o. pro práci s daty, a proto i v rámci analýzy mřížové sítě je vyhodnocení dat provedeno prioritně v tomto programu.

6.2 Zpracování dat

Na paměťových kartách jednotlivých trafostanic jsou k dispozici data od 06/2016 do 02/2017, tj. za dobu delší než půl roku. Při postupném procházení jednotlivých souborů s naměřenými daty jsou zjištěny následující problémy/nedostatky:

- u trafostanic 1903 Petrská, 1927 Česká a 1940 náměstí Svobody nelze soubory otevřít,
- u trafostanic 1907 Česká, 1912 Rooseveltova chybí data z analyzovaného období,
- 1910 Zelný trh, 1915 Rooseveltova, 1950 Jánská a 1992 Benešova je chybně nastaven čas měření,
- u trafostanice 1955 Jezuitská a 1961 Orlí došlo k chybě měření nebo technické chybě na transformátoru či v rozvaděči NN, jelikož jsou naměřeny nízké, popř. nulové hodnoty proudu.

Ačkoli jsou měřicí jednoty zaváděny do trafostanic od roku 2014, je první souhrnná analýza naměřených dat provedena až v roce 2017 v rámci této diplomové práce. O uvedených problémech se dosud nevědělo a jsou zjištěny až díky analýze. Seznam problému u jednotlivých trafostanic byl předán odpovědné osobě a jednotlivé chyby jsou v řešení. Vzhledem k chybějícím nebo chybným datům nejsou výše uvedené trafostanice zahrnuty do následné analýzy. V přehledové tabulce B-1 v příloze B jsou tyto trafostanice označeny červeně.

Dále součástí analýzy nejsou trafostanice 1922 na ulici Starobrněnská a 1923 na ulici Peroutkova. V uvedených trafostanicích nejsou zavedeny jednotky pro měření. Důvodem je plánovaná demolice obou trafostanic a jejich následné znovuvybudování a sloučení do jedné trafostanice.

6.2.1 Analýza aktuálního měsíce (leden 2017)

Vzhledem k velkému časovému rozmezí a množství dat na paměťových kartách je po domluvě se zadavatelem rozhodnuto, že z hlediska běžného provozu je analyzován pouze jeden měsíc, leden 2017. Měsíc leden byl zvolen proto, že v daném období nebyly provedeny žádné odstávky trafostanic, ani není známo, že by v mřížové síti došlo k nějakému nežádoucímu jevu. V uvedeném měsíci je možno provést analýzu ustáleného chodu sítě.

Hlavními sledovanými veličinami v analýze jsou nejvyšší hodnoty z maximálních proudů jednotlivých fází transformátorů a maximální výkonová zatížení jednotlivých transformátorů vzhledem k jmenovitému výkonu. Měřicí jednotka ukládá na paměťovou kartu efektivní hodnoty vždy po 5 minutách. Jelikož se hodnoty v rozmezí jedné hodiny liší maximálně v jednotkách, je vypočítaná průměrná hodnota maximálního proudu a výkonového zatížení z 12 hodnot, tedy za jednu hodinu. Sjednocení dat za jednu hodinu je také vhodné z důvodu přehlednosti a prezentace dat. První hodina je brána jako časový interval od 0:00 do 1:00, druhá hodina od 1:00 do 2:00 atd. Z vypočítaných hodnot je určena nejvyšší hodnota maximálního proudu jednotlivých fází a maximálního zatížení transformátorů. V tab. 8 jsou pro příklad uvedeny hodnoty stanovené pro transformátor umístěný v trafostanici 1924 OC Pasáž Rozkvět na náměstí Svobody. V tabulce je uvedeno označení trafostanice, sledovaná veličina, datum, kdy nabyla veličina nejvyšší hodnoty, a jednotlivé veličiny. Sledovaná veličina je v tabulce označena žlutě. Hodnoty určené u dalších transformátorů jsou vzhledem k rozsáhlosti uvedeny v tab. C-1 až C-6 v příloze C, kde jsou rozříděny podle napáječe VN, ke kterému jsou připojeny. Porovnání maximálního zatížení

jednotlivých transformátorů podle reálných hodnot naměřených prostřednictvím jednotky MEg40⁺ je provedeno na obr. 15. Nejvyššího zatížení $\eta = 48,34 \%$ dosahuje transformátor 701424 Kozí. Nejnižší maximální zatížení $\eta = 14,29 \%$ je naměřeno na transformátoru v trafostanici 1939 Česká investiční banka na ulici Joštova 5 / Česká 28. Pro úplnost jsou v obr. 15 uvedeny i transformátory, které vykazují chyby zmíněné v úvodu kapitoly. Ačkoli se jedná o maximální hodnoty zatížení, jsou splněna provozní kritéria mřížové sítě, tj. zatížení transformátorů dosahuje hodnoty kolem 25 %, maximálně 50 % jmenovitého výkonu.

Zatížení transformátorů dosahuje různých hodnot. Příčina tohoto jevu je stejná jako u teoretické analýzy, tedy různá velikost odběru a odlišná délka vedení. Podle předchozích zkušeností technika zde navíc může být příčinou použití transformátorů různých výrobců. Jednotliví výrobci transformátorů využívají při výrobě odlišných postupů, kdy transformátory mají sice stejné parametry, ale při provozu se mohou chovat rozdílně a přebírat větší či menší zatížení. Důsledkem rozlišného zatížení transformátorů může být také rozdílná poloha a stáří transformátorů.

Jednotka MEg40⁺ umožňuje měřit proud procházející jednotlivě každou fází. Porovnání nejvyšších maximálních proudů daných fází je provedeno na obr. 16. Nejvyšší hodnoty proudu $I_{L1max} = 454,33 \text{ A}$, $I_{L2max} = 441,42 \text{ A}$, $I_{L3max} = 446,73 \text{ A}$ dosahuje transformátor 701424 na ulici Kozí. Nejnižší hodnota maximálního proudu $I_{L1max} = 136,19 \text{ A}$, $I_{L2max} = 135,61 \text{ A}$, $I_{L3max} = 134,36 \text{ A}$ je naměřena na transformátoru 1939 Česká investiční banka v ulici Joštova 5/Česká 28. Rozložení maximálních proudů na jednotlivých transformátorech odpovídá maximálnímu zatížení transformátorů, i když se neshodují okamžiky naměření maximálních hodnot jednotlivých veličin na fázi. Nejvyšší zatížení nemusí nutně souhlasit s maximální hodnotou proudu, jelikož se neshoduje datum naměření nejvyššího proudu na fázích a také hodnota napětí nemusí být nejvyšší v okamžiku maximálního proudu. Nejvyšší zatížení transformátoru se většinou objevuje v blízkosti data, kdy alespoň jedna fáze nabývá nejvyššího maximálního proudu. U pěti transformátorů nastala shoda nejvyššího zatížení a nejvyššího maximálního proudu na všech fázích ve stejnou dobu. Jedná se o transformátory 1930 na Dominikánském náměstí (30.1.2017), 1918 na ulici Benešova (23.1.2017), 1926 na ulici Česká (23.1.2017), 1951 na ulici Rašínova (31.1.2017) a 1939 na ulici Joštova (10.1.2017). Tyto transformátory dosáhly v daný den (uvedený v závorce) svého nejvyššího lednového zatížení proudového i výkonového. Při pohledu do tabulek v příloze C lze pozorovat, že nejvyšší zatížení výkonové i proudové nastává v pracovní dny.

Jednou z měřených veličin je průměrné napětí na jednotlivých fázích transformátoru. Na obr. 17 je znázorněn průběh průměrných hodnot napětí daných fází během měsíce ledna v trafostanici 1924 na náměstí Svobody. Podobného trendu dosahují jednotlivá fázová napětí i ve zbývajících trafostanicích mřížové sítě. Obecně je požadováno, aby se hodnota napětí v distribuční síti o napěťové hladině 0,4 kV pohybovala v rozmezí $\pm 10 \%$, tj. $U_{fmin} = 216 \text{ V}$ a $U_{fmax} = 264 \text{ V}$ [30]. Při procházení dat uvedené trafostanice z ledna 2017 je minimální naměřená hodnota napětí rovna $U_{fmin} = 228,44 \text{ V}$ a maximální naměřená hodnota napětí dosahuje $U_{fmax} = 242,50 \text{ V}$. Povolená odchylka není překročena. Dovolovaný rozsah napětí je znázorněn i v obr. 17.

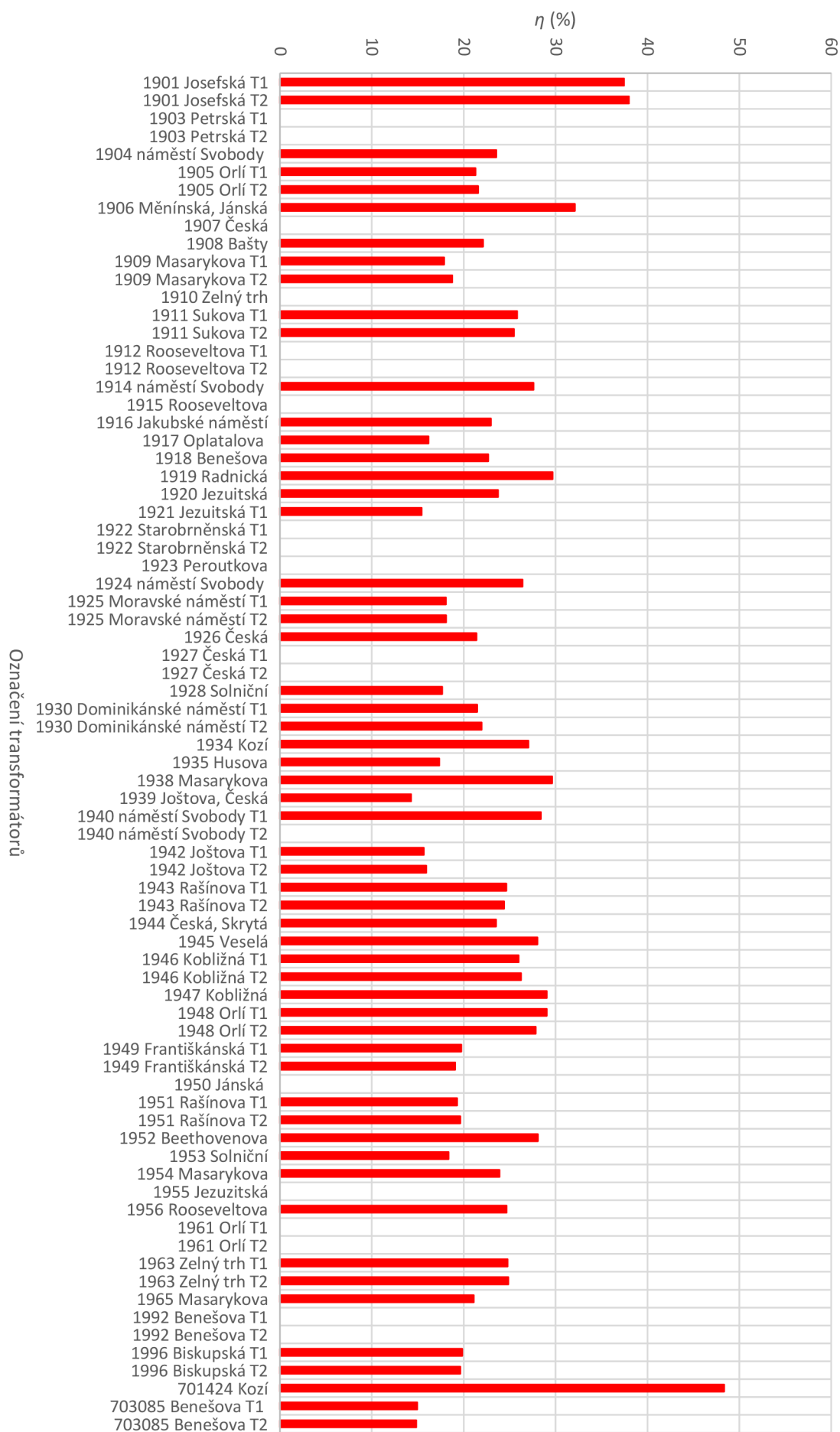
Tab. 8: Hodnoty požadovaných veličin stanovené pro trafostanici 1924 náměstí Svobody v měsíci lednu 2017

Napáječ V1210		Datum	U_{L1avg}	I_{L1max}	I_{L1avg}	U_{L2avg}	I_{L2max}	I_{L2avg}	U_{L3avg}	I_{L3max}	I_{L3avg}	S_{3f}	η
		dd.mm.rrrr hh:mm:ss	V	A	A	V	A	A	V	A	A	kVA	%
1924 náměstí Svobody	Nejvyšší I_{L1max}	31.01.2017 13:00:00	235,602	249,507	236,833	236,167	236,826	224,870	236,122	239,681	228,978	162,972	25,87
	Nejvyšší I_{L2max}	10.01.2017 16:00:00	234,805	237,739	227,420	235,345	241,370	232,065	235,222	239,442	229,812	162,071	25,73
	Nejvyšší I_{L3max}	11.01.2017 14:00:00	236,928	232,333	222,710	237,460	236,456	225,659	237,297	247,757	236,746	162,531	25,80
	Nejvyšší η	30.01.2017 14:00:00	237,833	244,964	233,746	238,272	240,609	229,174	238,455	244,681	235,023	166,242	26,34

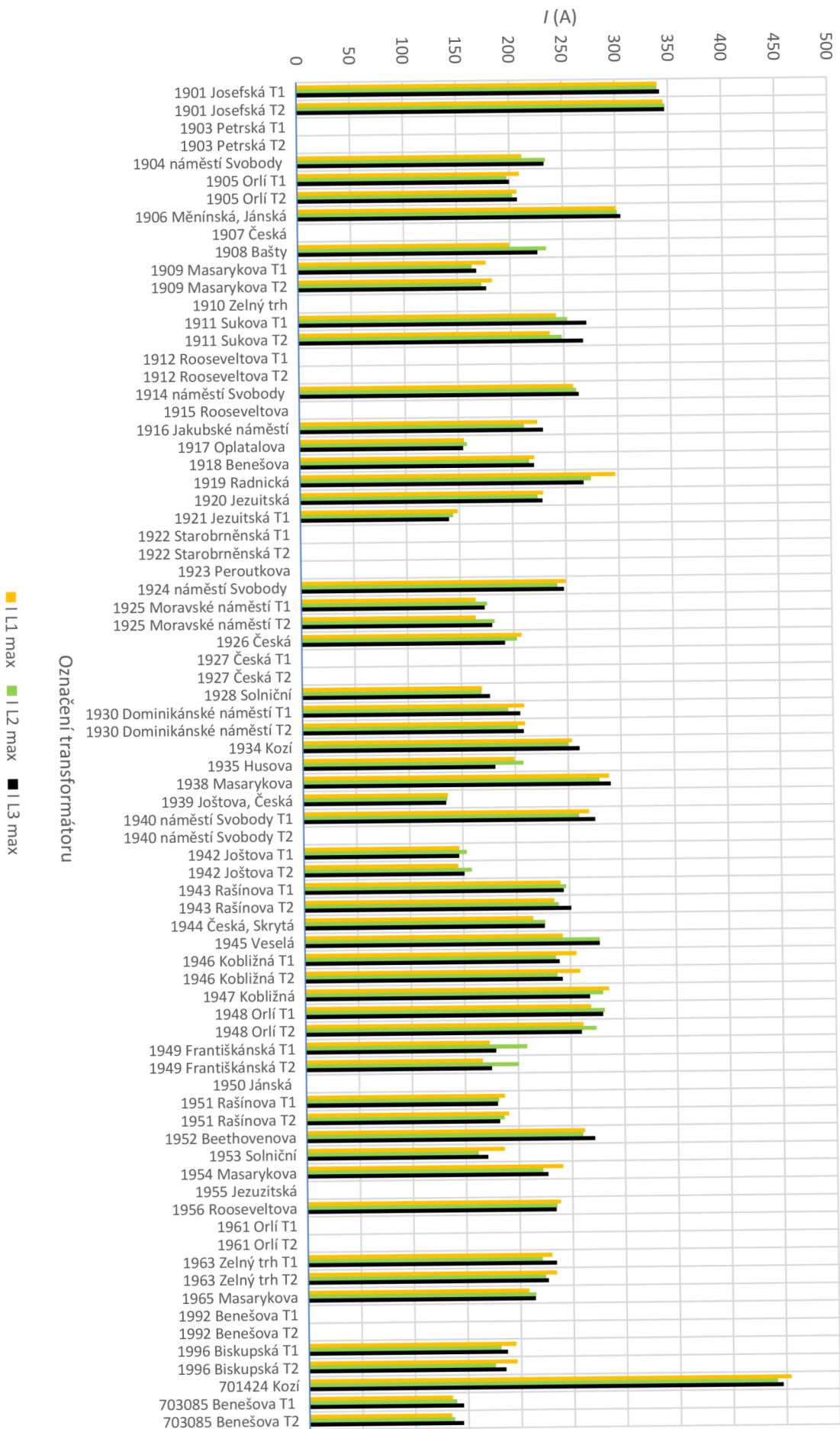
Třífázový zdánlivý výkon S_{3f} v tab.8 je vypočítán podle vzorce (6.5)

$$S_{3f} = \frac{(U_{L1avg} \cdot I_{L1avg} + U_{L2avg} \cdot I_{L2avg} + U_{L3avg} \cdot I_{L3avg})}{1000} \quad (6.5)$$

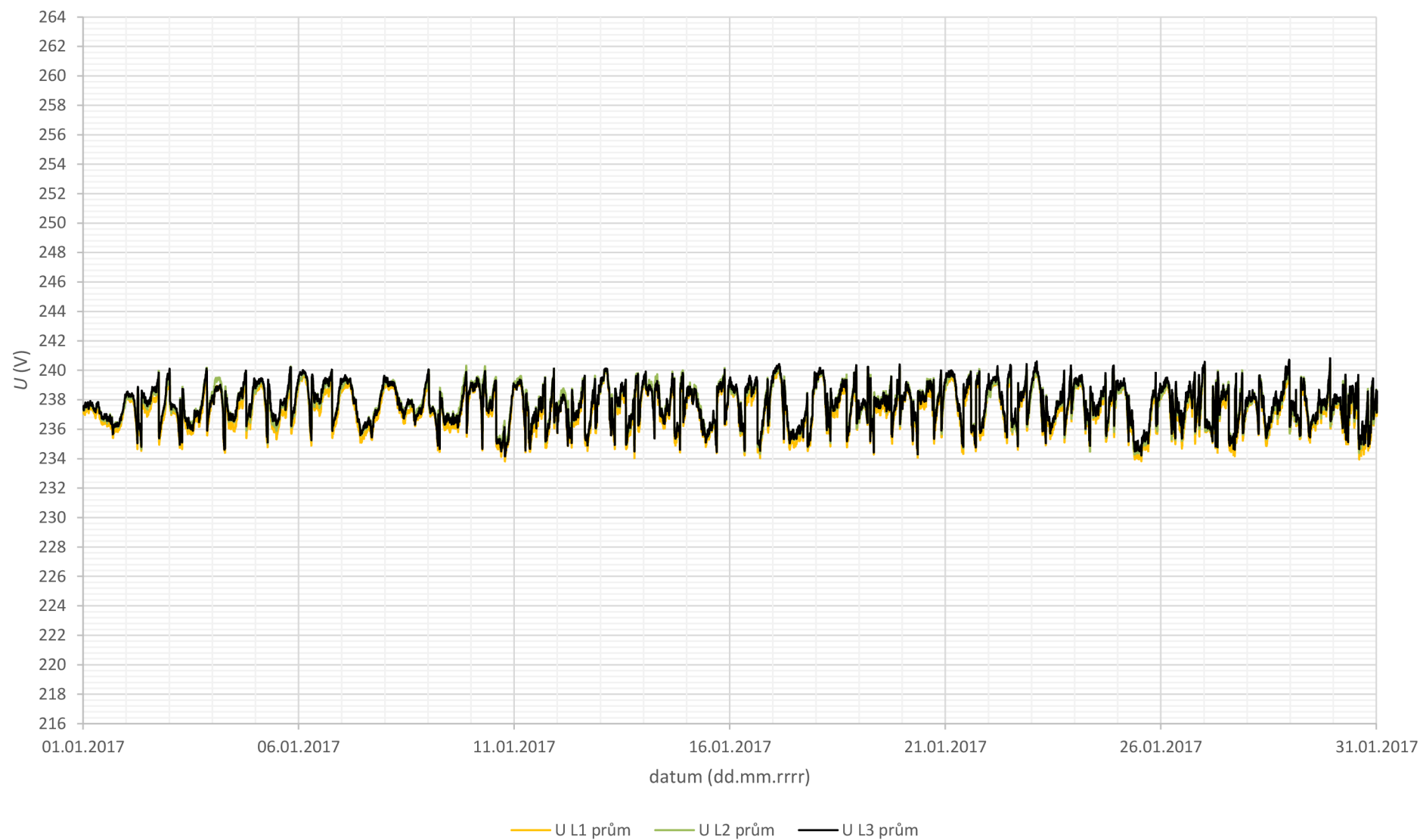
Hodnota výkonného zatížení je stanovena na základě vzorce (5.2).



Obr. 15: Zatížení transformátorů podle reálných dat

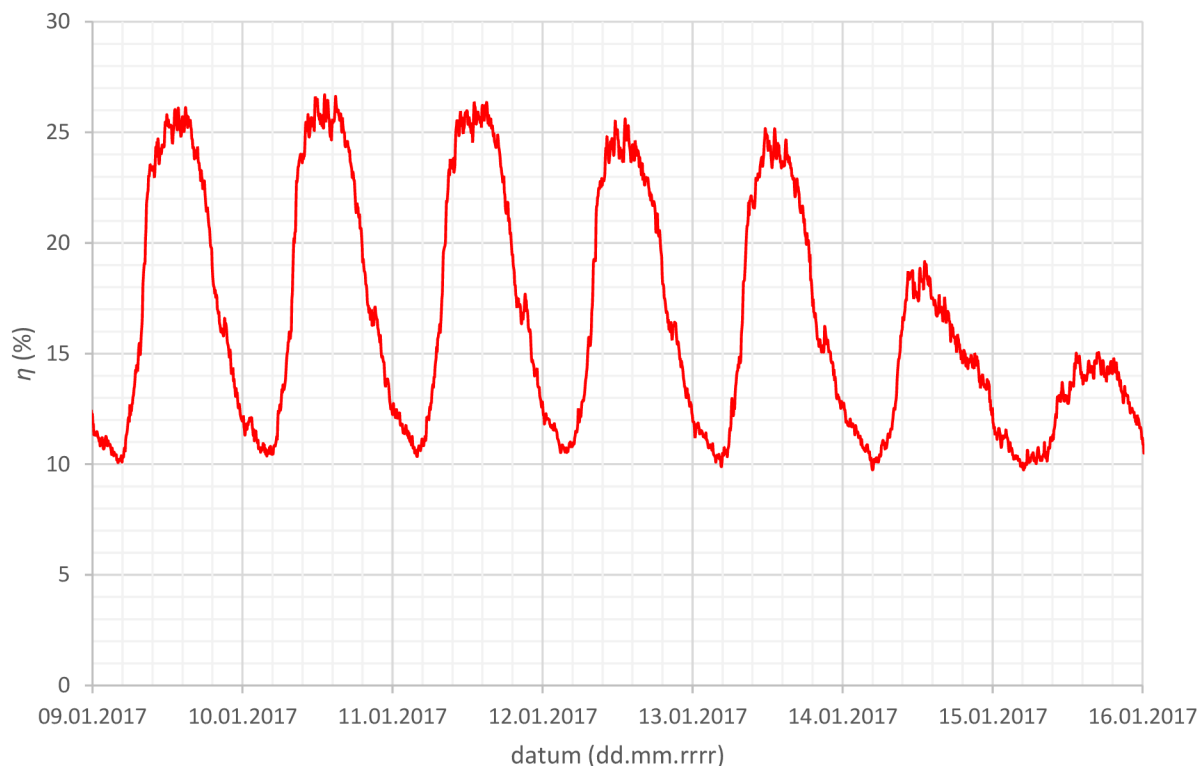


Obr. 16: Maximální proud pro jednotlivé fáze transformátorů podle reálných dat



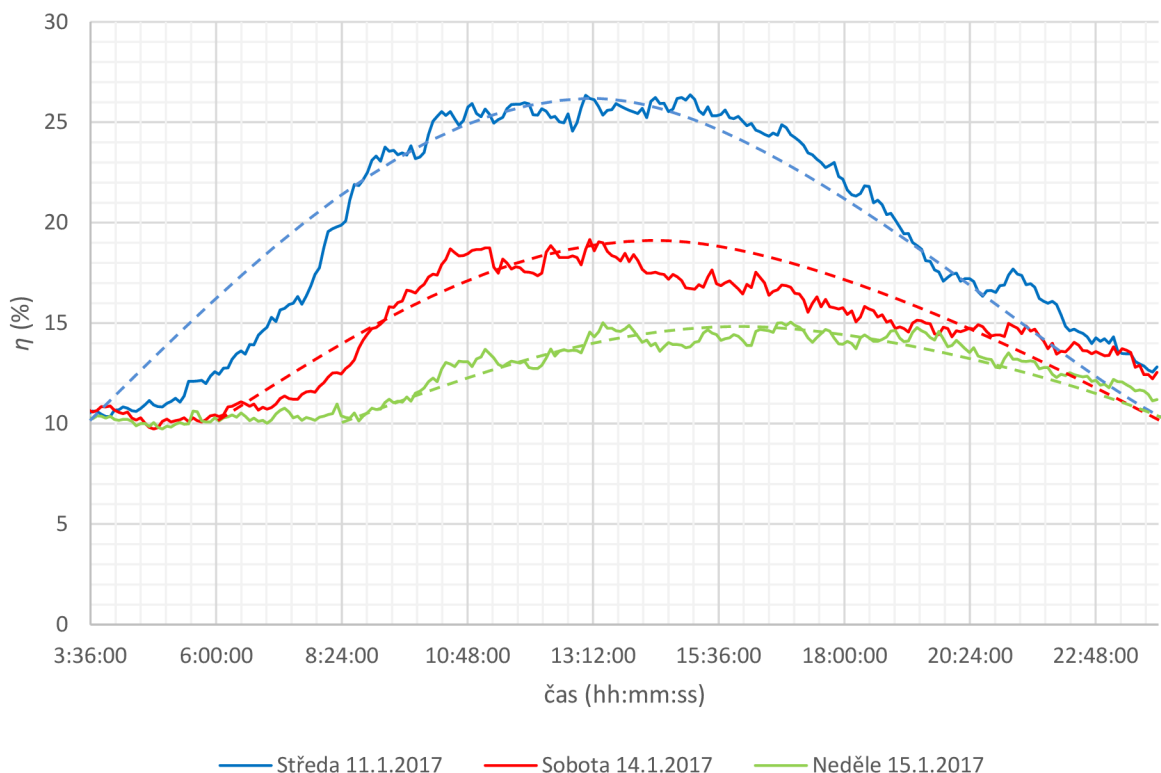
Obr. 17: Průměrné napětí na jednotlivých fázích transformátorů podle reálných dat

Díky záznamu dat v čase je možno vyhodnotit naměřené hodnoty i vzhledem k časovému okamžiku. Na obr. 18 je pro příklad zobrazeno zatížení transformátoru umístěného v trafostanici 1924 OC Pasáž Rozkvět na náměstí Svobody během týdne v období od 9.1.2017 do 15.1.2017. Podobný průběh zatížení se objevuje u všech transformátorů v mřížové síti.



Obr. 18: Zatížení transformátoru v trafostanici 1924 na náměstí Svobody během celého týdne

Z obr. 18 je vidět, že zatížení během celého jednoho týdne zachycuje aktivitu obyvatelstva ve městě. V pracovní dny dosahuje zatížení až $\eta = 26,39\%$, naopak o víkendu klesá zatížení na polovinu. Podrobnější rozbor zatížení vzhledem k pracovnímu a víkendovému dni je uveden na obr. 19. Nejvyššího zatížení v pracovní den je dosaženo mezi 12:00 – 16:00, v období, kdy je aktivita obyvatel ve městě největší, tj. jsou v provozu obchody, restaurace, úřady atd. V čase od 2:00 do 4:00 zatížení transformátoru nabývá pouze $\eta = 9,49\%$. Činnost obyvatel ve městě je minimální, jsou uvažovány podniky s noční směnou, veřejné a bezpečnostní osvětlení, restaurační zařízení.



Obr. 19: Porovnání zatížení transformátoru 1924 během pracovního dne a víkendového dne

6.2.2 Analýza hodnot celého měřeného období (od 06/2016 do 02/2017)

Z průměrných naměřených hodnot proudu a napětí na jednotlivých fázích transformátorů za celé měřené období od 06/2016 do 02/2017 jsou stanoveny minimální a maximální průměrné hodnoty fázových proudů a napětí pro jednotlivé transformátory. Pro příklad jsou v tab. 9 a tab. 10 uvedeny výsledky pro transformátory příslušící napájecí V1205. Výsledky pro zbylé transformátory jsou v tab. C-7 až tab. C-16 v příloze C. Z tabulek s proudovým porovnáním je zřejmé, že většina transformátorů má minimální hodnotu proudu v rozmezí od 25 A do 70 A a maximální hodnotu proudu v intervalu od 150 A do 300 A. Výjimku tvoří transformátory v trafostanici 1909 Masarykova, kdy nejnižší hodnota proudu dosahuje 0,9 A a nejvyšší 590 A. Příčinou rozdílnosti proudů od vysledovaného typického rozmezí je výměna transformátorů v dané trafostanici a jejich seřízení na paralelní chod. Stejný jev nastal i na transformátoru ve stanici 1956 na ulici Rooseveltova. Další odlišnosti od určených intervalů minimálního a maximálního proudu jsou naměřeny u transformátorů ve stanici 1901 na ulici Josefská a 701424 na ulici Kozí. Především v 701424 dosahují transformátory hodnot $I_{L2min} = 290,09$ A a $I_{L2max} = 474,26$ A. Důsledkem může být špatně nastavená odbočka transformátoru nebo chyba v měřící jednotce. Může se však také jednat o stav, kdy transformátor je zatížen velkým odběrem oproti ostatním trafostanicím. Skutečná příčina je v řešení techniků.

Z hlediska minimálního a maximálního průměrného fázového napětí nedochází k výrazným odchylkám mezi transformátory. Největší rozdíl 13,94 V mezi maximální a minimální hodnotou průměrného napětí je naměřen na transformátorech 1909 na ulici Masarykova, kde byla provedena výměna transformátorů a jejich připojení k paralelnímu chodu, což mohlo být příčinou kolísání napětí.

Tab. 9: Minimální a maximální fázové hodnoty proudů transformátorů napáječe V1205

Napáječ	Transformátor	I_{L1min}	I_{L1max}	I_{L2min}	I_{L2max}	I_{L3min}	I_{L3max}
		A	A	A	A	A	A
V1205	1901 Josefská T1	152,35	375,83	156,52	383,83	152,78	378,70
	1901 Josefská T2	152,26	380,44	157,30	391,22	152,09	383,57
	1903 Petrská T1						
	1903 Petrská T2						
	1910 Zelný trh						
	1921 Jezuitská	37,57	236,70	37,57	228,35	35,48	230,00
	1923 Peroutkova						
	1938 Masarykova	45,04	294,87	53,04	310,17	53,39	300,17
	1943 Rašínova T1	50,70	239,57	50,43	246,26	49,65	247,22
	1943 Rašínova T2	48,96	232,96	48,78	239,39	50,17	254,87
	1944 Česká	76,52	222,26	68,43	220,35	70,78	222,70
	1945 Veselá	45,57	258,26	54,78	308,09	50,96	296,61
	1946 Kobližná T1	53,65	269,39	46,70	252,87	47,91	256,87
	1946 Kobližná T2	54,70	272,61	46,96	254,78	47,65	260,00
	1947 Kobližná	44,52	285,57	44,17	271,65	42,70	263,74
	1948 Orlí T1	42,70	261,39	42,17	276,70	47,91	280,00
	1948 Orlí T2	40,26	255,13	40,61	269,30	42,87	259,91
	1956 Rooseveltova	0,09	238,78	29,22	232,09	0,09	229,22
1965 Masarykova	25,91	266,17	39,04	270,52	32,70	270,35	

Tab. 10: Minimální a maximální fázové hodnoty napětí transformátorů napáječe V1205

Napáječ	Transformátor	U_{L1min}	U_{L1max}	U_{L2min}	U_{L2max}	U_{L3min}	U_{L3max}
		A	A	A	A	A	A
V1205	1901 Josefská T1	235,50	245,02	235,14	244,54	235,48	245,10
	1901 Josefská T2	235,08	244,58	234,96	244,38	235,32	245,00
	1903 Petrská T1						
	1903 Petrská T2						
	1910 Zelný trh						
	1921 Jezuitská	233,60	243,18	232,54	242,28	233,22	242,76
	1923 Peroutkova						
	1938 Masarykova	232,10	242,66	232,78	243,22	232,76	242,72
	1943 Rašínova T1	233,12	242,74	232,02	241,90	232,84	242,28
	1943 Rašínova T2	233,34	243,02	232,38	242,34	233,22	242,76
	1944 Česká	235,00	244,62	234,60	244,38	233,90	243,90
	1945 Veselá	234,14	243,48	233,24	242,90	232,76	242,50
	1946 Kobližná T1	233,70	243,04	232,62	242,46	233,42	242,70
	1946 Kobližná T2	233,74	243,16	232,74	242,46	233,58	242,98
	1947 Kobližná	233,12	242,96	233,14	242,86	232,28	242,08
	1948 Orlí T1	233,12	242,60	232,58	242,08	231,70	241,68
	1948 Orlí T2	233,22	242,70	232,54	242,10	231,86	241,76
	1956 Rooseveltova	233,90	242,96	232,06	242,14	232,72	242,82
1965 Masarykova	232,84	244,02	232,86	243,86	233,20	244,80	

Z hlediska provozu sítě je důležitá znalost rozdílů proudového zatížení jednotlivých fází transformátorů. Odchytky ve fázových prouděch dávají přehled o rozdělení zátěže na jednotlivé fáze. V tab. 11 jsou uvedeny maximální rozdíly mezi průměrnými hodnotami proudu jednotlivých fází pro trafostanice napáječe V1205 za období 06/2016 až 02/2017. Zbylé trafostanice jsou uvedeny v příloze C v tab. C-17 až C-26. Největší rozdíly proudu:

- mezi fázemi L1 a L2 nastaly 5.12.2016 v trafostanici 1945 na ulici Veselá, proud fáze L2 o 78,35 A vyšší než ve fázi L1,
- mezi fázemi L1 a L3 nastaly 21.12.2016 v trafostanici 1945 na ulici Veselá, proud fáze L3 o 74,52 A vyšší než ve fázi L1,
- mezi fázemi L2 a L3 nastaly 29.7.2016 v trafostanici 1949 na transformátoru T1 na ulici Františkánská, proud fáze L2 o 53,04 A vyšší než ve fázi L3.

Celkově byl v případě 20 transformátorů proud fáze L1 největší ze všech tří fázových proudů za celé měřené období. Na 17 transformátorech byl maximální proud fáze L2. Proud ve fázi L3 byl nejvyšší u 20 transformátorů. Za nejzatíženější fáze v období 06/2016 až 02/2017 lze považovat fáze L1 a L3. Je však potřeba si uvědomit, že nebyla k dispozici data ze všech transformátorů a že hodnoty byly stanoveny z průměrných hodnot. Zároveň vzhledem k množství dat a transformátorů nelze s jistotou označit proudově nejzatíženější fázi. Hodnoty je potřeba brát pouze orientačně.

Sledovaným parametrem z pohledu rozdílnosti hodnot jednotlivých fází může být také napětí. Výsledky rozdílů průměrných napětí jednotlivých fází transformátorů napáječe V1205 jsou v tab. 12. Hodnoty odchylek fázových napětí zbývajících transformátorů jsou v příloze C v tab. C-17 až C-26. Nejvyšší odchylka napětí:

- mezi fázemi L1 a L2 nastala 10.10.2016 v trafostanici 1952 na ulici Beethovenova, napětí na fázi L1 o 2,5 V vyšší než na fázi L2,
- mezi fázemi L1 a L3 nastala 10.10.2016 v trafostanici 1945 na ulici Veselá, napětí na fázi L1 o 2,80 V vyšší než na fázi L3,
- mezi fázemi L2 a L3 nastala 10.10.2016 v trafostanici 1928 na ulici Solniční; napětí na fázi L2 o 2,24 V vyšší než na fázi L3.

Souhrnným porovnáním napětí jednotlivých fází vychází, že u 25 transformátorů byla nejvyšší průměrná hodnota napětí naměřena na fázi L1. Napětí ve fázi L2 bylo nejvyšší u 10 transformátorů. Na 22 transformátorech bylo nejvyšší napětí v měřeném období ve fázi L3. Hodnoty je třeba chápat jako orientační.

Na jednotlivé rozdíly fázových napětí nelze pohlížet jako na nesymetrii napětí. Ke stanovení nesymetrie je potřeba znalosti hodnot sdružených napětí nebo fázových úhlů napětí. Měřicí jednotka MEG40⁺ neumožňuje měření ani jednoho z těchto dvou parametrů. Je tedy na zvážení přínos rozšíření funkcí přístroje MEG40⁺ i o měření těchto veličin.

Tab. 11: Maximální odchylky proudů jednotlivých fází transformátorů napáječe V1205

Napáječ	Transformátor	Datum	$I_{L1}-I_{L2}$	Datum	$I_{L2}-I_{L3}$	Datum	$I_{L1}-I_{L3}$
		(dd.mm.rrrr. hh:mm:ss)	A	(dd.mm.rrrr. hh:mm:ss)	A	(dd.mm.rrrr. hh:mm:ss)	A
V1205	1901 Josefská T1	21.09.2016 13:46	-27,22	16.12.2016 14:36	-22,26	22.11.2016 9:36	-28,09
	1901 Josefská T2	21.09.2016 13:46	-30,70	28.09.2016 7:26	25,04	22.11.2016 9:36	-29,57
	1903 Petřská T1						
	1903 Petřská T2						
	1910 Zelný trh						
	1921 Jezuitská	15.09.2016 9:11	22,78	15.07.2016 16:31	23,04	07.10.2016 8:46	23,91
	1923 Peroutkova						
	1938 Masarykova	10.07.2016 18:10	-41,83	21.07.2016 11:25	41,22	10.01.2017 17:35	-41,39
V1205	1943 Rašínova T1	08.12.2016 10:45	-33,57	09.11.2016 12:30	37,83	19.12.2016 20:25	-38,17
	1943 Rašínova T2	16.09.2016 11:45	-32,17	12.01.2017 22:25	-44,00	19.12.2016 20:25	-46,09
	1944 Česká	18.10.2016 13:12	34,44	13.12.2016 10:37	-27,57	09.02.2017 9:42	-26,09
	1945 Veselá	05.12.2016 10:33	-78,35	01.12.2016 9:18	47,04	21.12.2016 13:53	-74,52
	1946 Kobližná T1	20.01.2017 14:41	42,26	03.12.2016 18:16	-32,61	30.11.2016 11:36	42,61
	1946 Kobližná T2	20.01.2017 14:41	43,04	03.12.2016 18:16	-32,87	30.11.2016 11:36	43,48
	1947 Kobližná	30.11.2016 14:33	43,83	10.01.2017 19:08	47,48	05.12.2016 14:08	51,91
	1948 Orlí T1	13.02.2017 20:44	-34,96	28.06.2016 12:44	-48,61	24.06.2016 12:14	-50,96
	1948 Orlí T2	13.02.2017 20:43	-33,22	26.09.2016 12:43	-35,22	24.06.2016 12:13	-36,09
	1956 Rooseveltova	19.10.2016 8:28	-34,17	23.11.2016 6:48	-33,83	04.10.2016 6:58	-31,57
1965 Masarykova	03.08.2016 17:00	-37,39	06.01.2017 9:00	-30,52	25.09.2016 13:50	-35,91	

Tab. 12: Maximální odchylky napětí jednotlivých fází transformátorů napáječe V1205

Napáječ	Transformátor	Datum	$U_{L1}-U_{L2}$	Datum	$U_{L2}-U_{L3}$	Datum	$U_{L1}-U_{L3}$
		(dd.mm.rrrr. hh:mm:ss)	A	(dd.mm.rrrr. hh:mm:ss)	A	(dd.mm.rrrr. hh:mm:ss)	A
V1205	1901 Josefská T1	04.07.2016 10:36	1,24	11.10.2016 5:16	1,50	02.07.2016 6:01	1,22
	1901 Josefská T2	10.10.2016 17:16	-1,28	11.10.2016 5:16	1,46	02.07.2016 6:01	0,98
	1903 Petřská T1						
	1903 Petřská T2						
	1910 Zelný trh						
	1921 Jezuitská	03.11.2016 6:16	1,96	10.10.2016 16:11	-1,94	25.10.2016 14:36	1,74
	1923 Peroutkova						
	1938 Masarykova	10.10.2016 17:00	-2,00	10.10.2016 16:55	1,66	25.10.2016 15:40	-1,48
	1943 Rašínova T1	10.10.2016 17:20	2,24	09.08.2016 10:50	-1,44	10.10.2016 17:45	1,80
	1943 Rašínova T2	10.10.2016 17:40	2,12	25.10.2016 12:30	-1,46	10.10.2016 17:45	1,68
	1944 Česká	25.10.2016 15:12	1,62	10.10.2016 17:12	2,08	18.02.2017 11:17	2,10
	1945 Veselá	10.10.2016 13:18	2,12	18.02.2017 11:33	1,94	10.10.2016 16:58	2,80
	1946 Kobližná T1	09.08.2016 10:51	1,64	10.10.2016 17:26	-1,88	03.11.2016 8:51	1,60
	1946 Kobližná T2	03.11.2016 7:16	1,70	10.10.2016 17:26	-1,94	03.11.2016 8:51	1,62
	1947 Kobližná	03.11.2016 7:53	1,98	10.10.2016 16:18	2,14	09.08.2016 9:53	2,10
	1948 Orlí T1	11.10.2016 5:14	1,74	03.11.2016 7:19	1,90	10.10.2016 17:24	2,66
	1948 Orlí T2	10.10.2016 16:53	1,78	03.11.2016 7:18	1,66	10.10.2016 16:58	2,50
	1956 Rooseveltova	29.11.2016 7:33	2,40	10.10.2016 17:23	-2,18	24.11.2016 10:33	2,00
1965 Masarykova	10.10.2016 17:00	-1,54	03.11.2016 8:55	-1,58	25.10.2016 11:55	-1,26	

Měřicí jednotka MEG40⁺ umožňuje záznam událostí napětí na základě normy ČSN EN 50160 ed. 3 [30]. Norma uvádí jako jmenovité napětí U_n pro veřejnou síť nízkého napětí $U_n = 230$ V fáze proti zemi. Norma stanoví [30]: „Za normálních provozních podmínek, kromě období s přerušením, odchylka napájecího napětí nemá přesáhnout ± 10 % jmenovitého napětí U_n . V případech, kdy elektrické napájení v sítích není připojeno k přenosovým sítím nebo pro speciální dálkově ovládané uživatele, nemají odchylky napájecího napětí přesáhnout ($+10$ %/ -15 %) U_n . Uživatelé sítě mají být o těchto podmínkách informováni.“

Jako události jsou zaznamenány pokles nebo růst napětí kterékoli fáze o 10 % oproti jmenovitému napětí. Většinou se jedná o dočasné poklesy napětí s dobou trvání od 10 ms do 1 min, popř. do 3 min. Ke klasifikaci poklesu napětí se využívá dvou parametrů: zbytkového napětí u , stanoveno v procentech jmenovitého napětí U_n , a doby trvání t , v milisekundách [30]. Dle normy ČSN EN 50160 ed. 3 musí být v případě dostupnosti statistických údajů sestavena tabulka klasifikace poklesů napětí podle zbytkového napětí a doby trvání, kde je uveden odpovídající počet poklesů vzhledem k daným údajům tabulky. Tab. 13 představuje klasifikační tabulku stanovenou normou.

Tab. 13: Klasifikace poklesů napětí [30]

Zbytkové napětí u	Doba trvání t				
	ms				
%	$10 < t \leq 200$	$200 < t \leq 500$	$500 < t \leq 1000$	$1000 < t \leq 5000$	$5000 < t \leq 60000$
$90 > u \geq 80$	CELL A1	CELL A2	CELL A3	CELL A4	CELL A5
$80 > u \geq 70$	CELL B1	CELL B2	CELL B3	CELL B4	CELL B5
$70 > u \geq 40$	CELL C1	CELL C2	CELL C3	CELL C4	CELL C5
$40 > u \geq 5$	CELL D1	CELL D2	CELL D3	CELL D4	CELL D5
$5 > u$	CELL X1	CELL X2	CELL X3	CELL X4	CELL X5

Norma určuje, že by zařízení měla odolat poklesům napětí [30]:

- A1, B1, A2, B2 pro třídu elektromagnetického prostředí 2,
- A1, B1, C1, A2, B2, A3, A4 pro třídu elektromagnetického prostředí 3,

kde velké písmeno A, B, C značí výkonnostní kritérium (A – normálním používáním zařízení se nesmí snížit výkonnost nebo dojít k výpadku funkce pod stanovenou úroveň, B – je připuštěno snížení výkonnosti zařízení, C – může dojít k dočasnému výpadku funkce) a elektromagnetická třída průmyslového prostředí 2 podle normy ČSN EN 61000-4-11 umožňuje instalaci prvků navržených pro napájení z veřejných rozvodných sítí [31]. Třída 3 se vyznačuje vyšší kompatibilní úrovní než třída 2.

Program DVMEg DataViewer od firmy MEGa umožňuje přímo zobrazení dané klasifikační tabulky poklesů včetně tabulky převýšení a přerušení napětí. Příkladem je tab.14, která uvádí počet poklesů napětí o danou hodnotu napětí a v daném časovém intervalu. Jedná se o poklesy naměřené v mřížové síti ve sledovaném období 06/2016 až 02/2017.

Uvedená tab. 14 neodpovídá hodnotám událostí naměřené v trafostanici 1925 na Moravském náměstí. V uvedené trafostanici došlo pouze k jednomu poklesu, jak uvádí tab. 15, jelikož zde proběhla odstávka transformátoru a data jsou měřena až od poloviny listopadu 2016, kdy byly transformátory spuštěny.

Hodnoty poklesů uvedené v tab. 14 nesouhlasí s údaji uvedenými u trafostanice 1909 na ulici Masarykova, kde je zaznamenáno o jednu událost méně v intervalu napětí $90 > u \geq 80$ a času $10 < t \leq 200$, jak ukazuje tab. 16.

Tab. 14: Klasifikace poklesů, převýšení a přerušeni napětí v mřížové síti (shodné pro všechny trafostanice vyjma 1903, 1907, 1910, 1912, 1915, 1927, 1940, 1950, 1955, 1961, 1992 označené jako problematické, 1909 a 1925, které mají vlastní tabulku), upraveno z [32]

POKLESY					
Zbytkové napětí u	Doba trvání t				
%	ms				
	$10 < t \leq 200$	$200 < t \leq 500$	$500 < t \leq 1000$	$1000 < t \leq 5000$	$5000 < t \leq 60000$
$90 > u \geq 80$	4	0	0	0	0
$80 > u \geq 70$	3	0	0	0	0
$70 > u \geq 40$	2	0	0	0	0
$40 > u \geq 5$	0	0	0	0	0
$5 > u$	0	0	0	0	0
PŘEVÝŠENÍ					
Zbytkové napětí u	Doba trvání t				
%	ms				
	$10 < t \leq 500$	$500 < t \leq 5000$	$5000 < t \leq 60000$		
$u \geq 120$	0	0	0		
$120 > u \geq 110$	0	0	0		
PŘERUŠENÍ					
Zbytkové napětí u	Doba trvání t				
%	s				
	$t \leq 1$	$1 > t \geq 180$	$t > 180$		
$5 > u$	0	0	0		

Tab. 15: Klasifikace poklesu napětí v trafostanici 1925, upraveno z [32]

POKLESY					
Zbytkové napětí u	Doba trvání t				
%	ms				
	$10 < t \leq 200$	$200 < t \leq 500$	$500 < t \leq 1000$	$1000 < t \leq 5000$	$5000 < t \leq 60000$
$90 > u \geq 80$	1	0	0	0	0
$80 > u \geq 70$	0	0	0	0	0
$70 > u \geq 40$	0	0	0	0	0
$40 > u \geq 5$	0	0	0	0	0
$5 > u$	0	0	0	0	0

Tab. 16: Klasifikace poklesu napětí v trafostanici 1909, upraveno z [32]

POKLESY					
Zbytkové napětí u	Doba trvání t				
%	ms				
	$10 < t \leq 200$	$200 < t \leq 500$	$500 < t \leq 1000$	$1000 < t \leq 5000$	$5000 < t \leq 60000$
$90 > u \geq 80$	3	0	0	0	0
$80 > u \geq 70$	3	0	0	0	0
$70 > u \geq 40$	2	0	0	0	0
$40 > u \geq 5$	0	0	0	0	0
$5 > u$	0	0	0	0	0

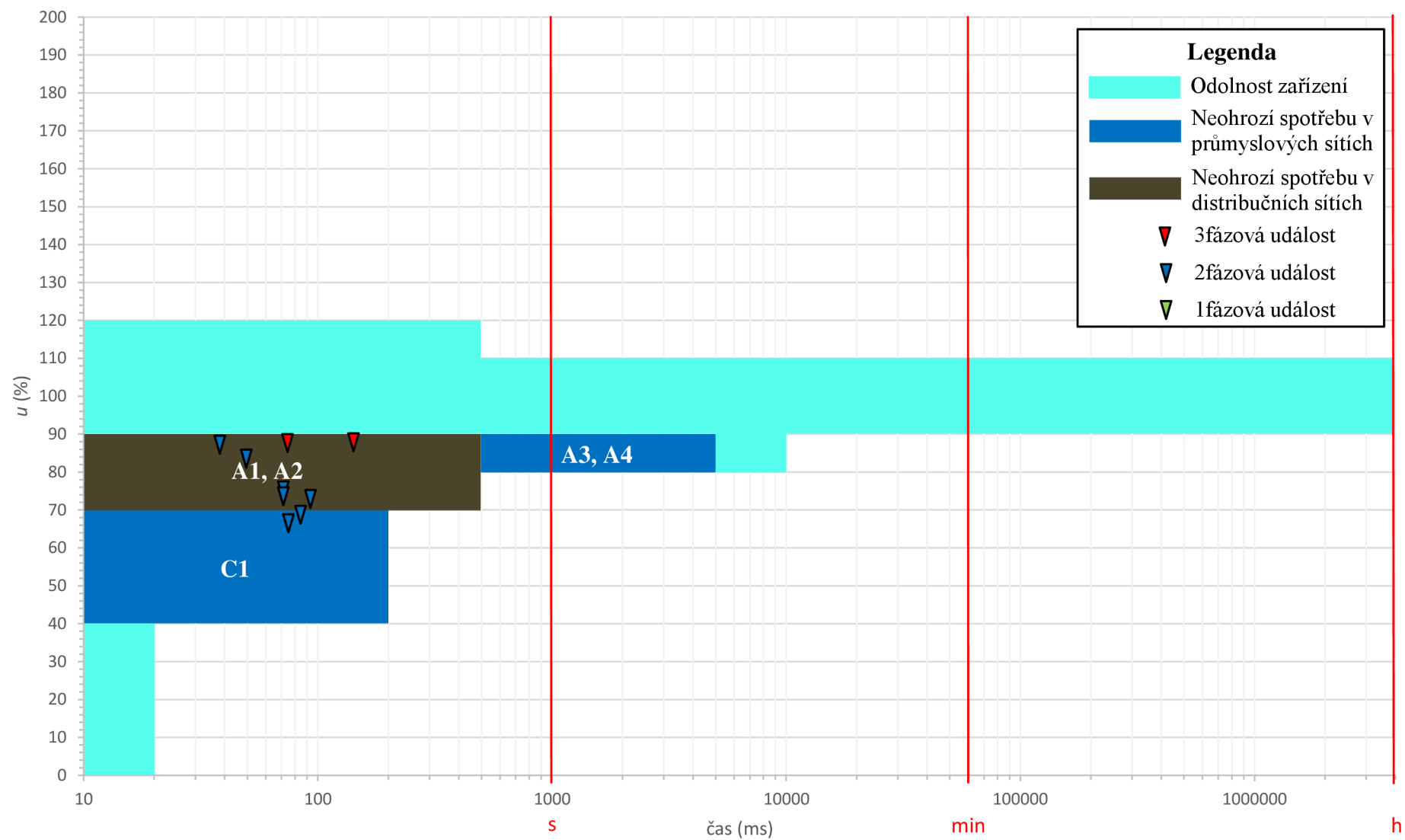
Celkové informace o událostech jsou pro příklad uvedeny v tab. 17, kde jsou zaznamenány události na transformátoru T1 ve stanici 1901 na ulici Josefská. Každá událost je popsána počátkem události, dobou trvání, minimálním a maximálním napětí každé fáze v procentech jmenovitého napětí, minimálním a maximálním proudem v uvedené fázi. Souhrnné výsledky událostí pro jednotlivé transformátory jsou uvedeny v příloze C v tab. C-27 až C-32, kde jsou transformátory rozděleny podle napáječe VN.

Na všech transformátorech došlo k napěťovým událostem ve stejný den a přibližně stejný čas. Vzhledem k neznalosti charakteru odběru jednotlivých zákazníků připojených k mřížové síti není možné určit přesný původ poklesu napětí.

Tab. 17: Události napětí na transformátoru T1 ve stanici 1901, upraveno z [32]

Transformátor	Počátek události	Doba trvání	$U_{L1min}/$ U_{L1max}	$U_{L2min}/$ U_{L2max}	$U_{L3min}/$ U_{L3max}	$I_{L1min}/$ I_{L1max}	$I_{L2min}/$ I_{L2max}	$I_{L3min}/$ I_{L3max}
	dd.mm.rrrr hh:mm	mm:ss,ms	%/%	%/%	%/%	A/A	A/A	A/A
1901 Josefská T1	02.08.2016 13:11	00:00,070	88,7/ 92,2	89,0/ 90,7	89,1 /95,7	263,98/ 309,42	274,78/ 296,71	259,99/ 328,83
	04.08.2016 3:49	00:00,070	100,6/ 104,4	76,4/ 88,4	78,1/ 90,1	256,52/ 259,32	164,09/ 219,28	165,35 /215,18
	07.08.2016 4:57	00:00,070	101,2/ 103,9	75,7/ 96,9	76,1/ 84,4	256,66/ 259,06	173,22/ 253,95	140,26/ 246,26
	24.08.2016 5:34	00:00,070	70,9/ 97,9	67,7/ 84,9	102,5/ 103,3	161,60/ 273,56	133,55/ 267,77	266,08/ 280,98
	01.09.2016 5:56	00:00,040	88,7/ 90,6	102,1/ 102,8	88,1/ 89,4	216,03/ 221,98	272,14/ 274,94	223,89/ 233,29
	02.09.2016 4:57	00:00,090	73,1/ 89,6	73,8/ 90,5	100,3/ 103,9	158,85/ 232,98	166,00/ 236,34	254,84/ 260,23
	20.09.2016 6:40	00:00,080	101,3/ 102,3	76,0/ 96,2	69,2/ 85,2	273,56/ 283,29	193,56/ 288,51	130,96/ 255,33
	09.11.2016 5:42	00:00,060	86,4/ 88,7	101,9/ 104,5	83,6/ 86,1	129,88/ 138,97	176,15/ 179,88	135,28/ 146,75
	19.11.2016 22:08	00:00,090	89,9/ 91,8	90,1/ 90,4	89,8/ 96,0	146,78/ 162,25	157,56/ 161,71	150,30/ 182,04

Kromě zobrazení klasifikační tabulky poklesů napětí umožňuje program DVMEg Data Viewer společnosti MEGa zobrazení grafu odolnosti zařízení. Ilustrační příklad grafu odolnosti zařízení je zachycen na obr. 20. Jedná se o grafické znázornění klasifikační tabulky poklesů, kdy není potřeba dohledávat v normě definice jednotlivých kategorií výkonnosti a tříd kompatibility. Pomocí barevných trojúhelníků graf odolnosti zařízení přehledně zobrazuje na kolika fázích došlo k poklesu pod stanovené meze a ve stanovený čas. Zároveň prostřednictvím barevných obdélníků zachycuje odolnost zařízení v dané síti.



Obr. 20: Ilustrační graf odolnosti zařizení, upraveno z [32]

6.2.3 Přetoky v mřížové síti

Jednotka energy meter MEG40⁺ a jednotka stykových obvodů MEG51 tvoří směrovou ochranu MEG51 [23]. Při toku energie z napěťové hladiny NN na napěťovou hladinu VN jsou odpovídající hodnoty zaznamenány zařízením MEG40⁺ do speciálního souboru. V případě poruchového stavu, tj. při nesprávném toku proudu hodnoty nad nastavené meze po dobu delší než dané zpoždění, dochází k optické signalizaci v jednotce stykových obvodů a působení poruchových relé. Podrobnější informace o směrové ochraně jsou k nahlédnutí v příloze F [22], [23].

Měřicí jednotka MEG40⁺ umožňuje jak záznam fázových napětí, proudů, činných a jalových výkonů, energií a událostí podle normy ČSN EN 50160 ed. 3, tak zapsání posledních dvanácti hodnot poruch, tj. efektivní hodnoty fázových napětí, proudů, činných a jalových výkonů v okamžiku aktivace směrové ochrany včetně data a času aktivace [23].

V mřížové síti městské části Brno-střed dochází k aktivaci směrové ochrany při překročení jmenovité hodnoty proudu transformátoru o 25 %. Ve sledovaném období 06/2016 až 02/2017 nedošlo k zaznamenání žádné poruchy, kdy by byla překročena nastavená mez proudu. V uvedeném období však nastaly přetoky proudů o nižší hodnotě, než je nastavená mez, tj. v rámci ustáleného chodu.

Přetok energie na stanu VN je zapsán jako nenulová hodnota u veličiny dodávané energie E_P pro každou fázi. Nenulová hodnota E_P je za sledované období 06/2016 až 02/2017 nalezena u trafostanic 1908 Bašty, 1949 Františkánská a 703085 Benešova. Hodnoty maximální dodávané energie E_P , a tomu odpovídající maximální výkonové a proudové toky, na stranu VN pro první fázi L1 jsou uvedeny v tab. 18. V případě 1908 protéká na stranu VN maximální proud $I_{maxL1} = 90,52$ A, u transformátoru T1 ve stanici 1949 $I_{maxL1} = 55,04$ A a u T2 $I_{maxL1} = 54,78$ A. Zbylé dvě fáze dodávají energii ke spotřebiteli. Maximální tok proudu z první fáze na stranu VN v trafostanici 703085 u transformátoru T1 dosahuje hodnoty $I_{maxL1} = 116,78$ A a u T2 $I_{maxL1} = 116,24$ A. Druhá fáze L2 také dodává energii na VN, ale není maximální. Třetí fáze L3 neodebírání ani nedodává energii. V tab. 19 jsou uvedeny hodnoty při maximálním přetoku z fáze L2. U trafostanic 1908 a 1949 v této fázi k dodávce energie na VN nedochází. Ve druhé fázi L2 trafostanice 703085 je na transformátoru T1 naměřen maximální proud $I_{maxL2} = 114,09$ A a na T2 $I_{maxL2} = 112,17$ A. Fáze L3 je opět nevyužita pro přenos energie. Maximální přetokový proud ze všech transformátorů je zjištěn u T1 ve stanici 703085, kdy $I_{maxL1} = 116,78$ A, tedy 12,85 % jmenovitého proudu transformátoru. Není překročena hranice 25 % a směrová ochrana správně vyhodnotila situaci a nereagovala. V naměřených datech z MEG40⁺ není zapsána porucha.

Maximální přetoky energie v opačném směru, než je požadováno, jsou naměřeny vždy mezi 2:00 až 5:00. V tuto dobu je zároveň zjištěno nejnižší ztížení transformátorů v mřížové síti. Pravděpodobně tedy transformátory, které v tuto dobu nejsou zatíženy, tj. nulová hodnota odebrané energie E_{P+} a nenulová hodnota dodávané energie E_P , vrací přebytečnou energii z NN strany zpět na VN stranu. V některých případech nastává stav, že MEG40⁺ naměří nenulovou hodnotu E_{P+} i E_P . V této situaci transformátor dodává energii ke spotřebiteli a přebytek vrací zpět na VN stranu.

Tab. 18: Maximální dodávaná energie na stranu VN fáze L1 pro uvedené transformátory

Označení transformátoru	Datum	U_{L1avg}	I_{L1max}	I_{L1avg}	P_{L1avg}	Q_{L1avg}	E_{P+L1}	E_{P-L1}	E_{P+L2}	E_{P-L2}	E_{P+L3}	E_{P-L3}
	(dd.mm.rrrr hh:mm)	V	A	A	kW	kVAr	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
1908 Bašty	20.10.2016 4:04	237,300	90,522	86,609	-0,513	-20,546	0,000	0,104	0,207	0,000	0,104	0,000
1949 Františkánská T1	01.11.2016 3:13	237,960	55,044	53,478	-1,311	-12,658	0,000	0,207	0,415	0,000	0,104	0,000
1949 Františkánská T2	01.11.2016 3:46	238,500	54,783	52,435	-1,311	-12,437	0,000	0,104	0,311	0,000	0,104	0,000
703085 Benešova T1	31.10.2016 2:44	241,140	116,783	115,739	-4,075	-27,610	0,000	0,311	0,000	0,207	0,000	0,000
703085 Benešova T2	31.10.2016 3:44	241,260	116,261	115,217	-3,875	-27,526	0,000	0,311	0,000	0,104	0,000	0,000

Tab. 19: Maximální dodávaná energie na stranu VN fáze L2 pro uvedené transformátory

Označení transformátoru	Datum	U_{L2avg}	I_{L2max}	I_{L2avg}	P_{L2avg}	Q_{L2avg}	E_{P+L2}	E_{P-L2}	E_{P+L1}	E_{P-L1}	E_{P+L3}	E_{P-L3}
	(dd.mm.rrrr hh:mm)	V	A	A	kW	kVAr	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
1908 Bašty	20.10.2016 4:04	237,760	84,435	79,304	2,223	-18,724	0,207	0,000	0,000	0,104	0,104	0,000
1949 Františkánská T1	01.11.2016 3:13	237,620	41,391	38,957	5,414	-7,509	0,415	0,000	0,000	0,207	0,104	0,000
1949 Františkánská T2	01.11.2016 3:46	237,940	48,957	47,217	4,046	-10,481	0,311	0,000	0,000	0,104	0,104	0,000
703085 Benešova T1	31.10.2016 2:29	241,120	114,087	112,957	-1,824	-27,175	0,000	0,207	0,000	0,311	0,000	0,000
703085 Benešova T2	31.10.2016 3:29	241,300	112,174	111,043	-1,738	-26,738	0,000	0,207	0,000	0,311	0,000	0,000

7 SROVNÁNÍ TEORETICKÝCH A REÁLNÝCH DAT

V rámci teoretické analýzy není rozlišeno časové období výpočtu dat. Vypočítané hodnoty jsou stanoveny na základě koeficientů soudobosti nastavené u jednotlivých odběratelů a jmenovitého výkonu daného odběru (při dané délce vedení) jako průměrné hodnoty výkonového a proudového zatížení na transformátor. Aby bylo možné vzájemně porovnat data z teoretické a reálné analýzy, je potřeba hodnoty sjednotit. Nelze využít hodnoty maximálního zatížení a nejvyššího maximálního proudu reálné analýzy z předchozí kapitoly. Maximální hodnoty sledovaných veličin nebyly naměřeny ve stejný den, časový okamžik a porovnání s výpočtem by nebylo adekvátní. Při procházení dat a odborným odhadem je zvoleno, že nejbližší vypočtenému stavu jsou data naměřená v pracovní den mezi 12. a 13. hodinou. Pro účel srovnání jsou vybrána data ze středy 11.1.2017 mezi 12:00-13:00. Tento den byl vybrán náhodně.

Teoretická analýza vypočítává průměrné fázové napětí a proud transformátoru. Vypočtený činný a jalový výkon se zobrazuje již jako třífázový. Data naměřená v mřížové síti jsou měřena pro každou fázi zvlášť, a to jak napětí a proud, tak i činný a jalový výkon. I zde je vidět rozpor a pro porovnání je potřeba provést sjednocení podoby dat. V tab. 20 jsou vidět data naměřená prostřednictvím jednotky MEG40⁺ pro transformátor T1 v trafostanici 1901 na ulici Josefská.

Tab. 20: Data získána jako průměr naměřených dat ze dne 11.1.2017 z časového úseku 12:00-13:00

Napáječ V1205	U_{L1avg}	I_{L1avg}	P_{L1avg}	Q_{L1avg}	U_{L2avg}	I_{L2avg}	P_{L2avg}	Q_{L2avg}	U_{L3avg}	I_{L3avg}	P_{L3avg}	Q_{L3avg}
	V	A	kW	kVAr	V	A	kW	kVAr	V	A	kW	kVAr
1901 Josefská T1	239,23	311,41	51,01	54,29	239,03	319,09	52,47	55,35	239,02	319,09	52,24	55,57

Data proudu a napětí naměřená pro jednotlivé fáze jsou přes funkci průměru sloučena do jedné průměrné hodnoty napětí a proudu. Jednofázové hodnoty činného a jalového výkonu jsou přes funkci součtu přepočteny na třífázové výkony. Výsledné hodnoty jsou pro srovnání uvedeny v tab. 21.

Tab. 21: Výsledná data ze dne 11.1.2017 z časového úseku 12:00-13:00 využita k porovnání

Napáječ V1205	U_f	I	P_{3f}	Q_{3f}	S_{3f}	η
	V	A	kW	kVAr	kVA	%
1901 Josefská T1	239,09	316,53	155,72	165,21	227,04	36,04

Příklad výpočtu hodnot tab. 21 na základě dat z tab. 20

$$U_f = \frac{U_{L1avg} + U_{L2avg} + U_{L3avg}}{3} = \frac{239,23 + 239,03 + 239,02}{3} = 239,09 \text{ V}$$

$$I = \frac{I_{L1avg} + I_{L2avg} + I_{L3avg}}{3} = \frac{311,41 + 319,09 + 319,09}{3} = 316,53 \text{ A}$$

$$P_{3f} = P_{L1avg} + P_{L2avg} + P_{L3avg} = 51,01 + 52,47 + 52,24 = 155,72 \text{ kW}$$

$$Q_{3f} = Q_{L1avg} + Q_{L2avg} + Q_{L3avg} = 54,29 + 55,35 + 55,57 = 165,21 \text{ kVAr}$$

$$S_{3f} = 3 \cdot U_f \cdot I = 3 \cdot 239,09 \cdot 316,53 = 227037,47 \text{ VA}$$

$$S_{3f} = 227,04 \text{ kVA}$$

$$\eta = 100 \cdot \frac{S_{3f}}{S_n} = 100 \cdot \frac{227,04}{630} = 36,04 \%$$

Pro lepší orientaci v porovnávaných datech jsou uvedeny obr. 21 a obr. 22. Tabulky přepočítaných hodnot jsou uvedeny v příloze D v tab. D-1 až D-6. Transformátory jsou v tabulkách rozděleny podle příslušnosti k napájecí.

Porovnání výkonového zatížení je znázorněno na obr. 21. Rozdíly mezi vypočítanou a naměřenou hodnotou výkonového zatížení jednotlivých transformátorů dosahují hodnoty do $\Delta\eta = 5\%$. Větší odlišnosti jsou u trafostanice 1901 na ulici Josefská, kde na obou transformátorech je naměřena hodnota výkonového zatížení o $\Delta\eta = 21,49\%$ vyšší než vypočítaná. Podobný případ je i u trafostanice 701424 na ulici Kozí, u které je rozdíl naměřeného a vypočítaného zatížení roven $\Delta\eta = 24,61\%$. Opačná situace, kdy vypočtená hodnota výkonového zatížení dosahuje vyšší hodnoty než naměřená, nastala u trafostanice 1914 Amádeus na náměstí Svobody. Rozdíl zatížení je $\Delta\eta = 9,29\%$.

Příčinou rozdílných hodnot mohou být špatně stanovené koeficienty soudobosti. Podle tab. 5 jsou odběratelé rozděleni na jedno a dvou tarifní a na základě tohoto rozdělení je odběratelům přiřazen koeficient soudobosti. Při podrobnějším prozkoumání tabulky odběratelů je patrné, že by někteří odběratelé měli být posouzeni individuálně. Na základě jejich charakteru odběru a potřeby dodávky energie by jim měl být přidělen koeficient soudobosti tak, aby lépe odrážel realitu. Vzhledem k množství odběrných míst není možné v rámci této práce provést detailnější rozbor odběratelů. Zároveň není zcela známá skladba spotřebičů jednotlivých odběratelů, a i zde by docházelo k odhadům a tím k nepřesnostem.

Jednou z dalších příčin rozdílností může být fakt, že výpočtový program PAS DAISY Bizon neuvažuje některé rozdílnosti transformátorů:

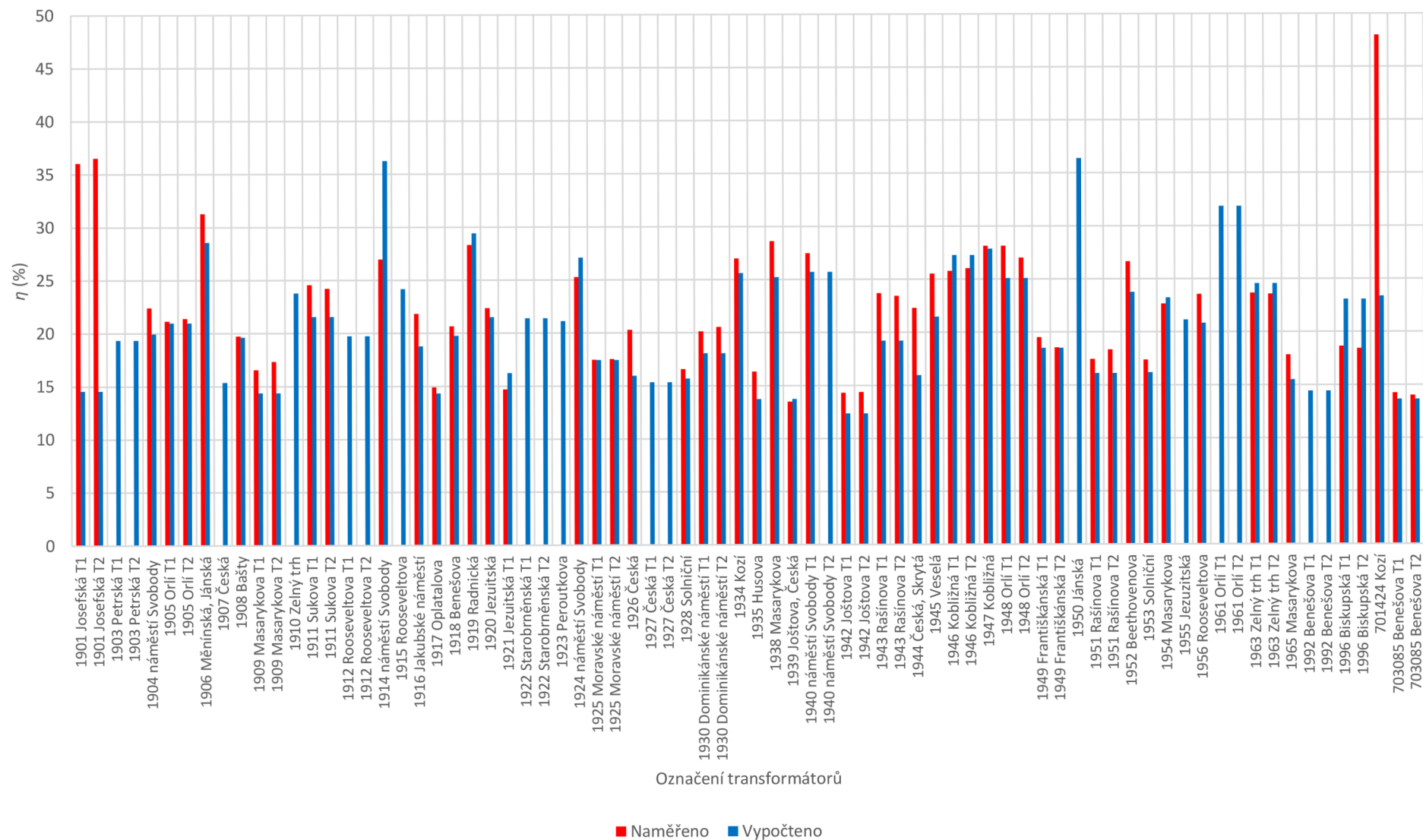
- různí výrobci, kteří využívají různé metody výroby;
- různé stáří, nový transformátor má jiné vlastnosti než 10 let starý;
- různá poloha, transformátory jsou umístěny v úrovni zemského povrchu, podzemí.

V obrázcích jsou zachyceny i problematické trafostanice, u kterých není možné analyzovat data. Například u trafostanice 1961 na ulici Orlí se dvěma transformátory nebyla naměřena přítomnost proudu, což vede k domněnce, že transformátory jsou reálně nevyužity a jejich zatížení přebraly jiné transformátory v síti. Vzrostlo tak zatížení ostatních transformátorů v reálné síti. U teoretické analýzy je však počítáno i těmito transformátory a je vypočítáno, že jsou zatíženy na $\eta = 32,85\%$. Při nahlédnutí do obr. 22 zachycujícího srovnání proudového zatížení je v případě transformátoru v trafostanici 1961 vypočítáno proudové zatížení $I = 293,4$ A na fázi na jeden transformátor. V reálné analýze je tedy těchto 586,8 A jednofázově rozděleno na další transformátory. Obdobný případ je v případě trafostanice 1955 v ulici Jezuitská. Vypočítané výkonové zatížení je rovno $\eta = 21,15\%$. V případě měření je zatížení nulové. Z hlediska proudu je 193,58 A na jednu fázi rozděleno na zbývající transformátory v mřížové síti. S ohledem na nemožnost provedení kontroly daných trafostanic není známo, zda nedošlo k chybě měření a uvedené transformátory tedy byly při simulaci v programu PAS DAISY Bizon ponechány v zapnutém stavu.

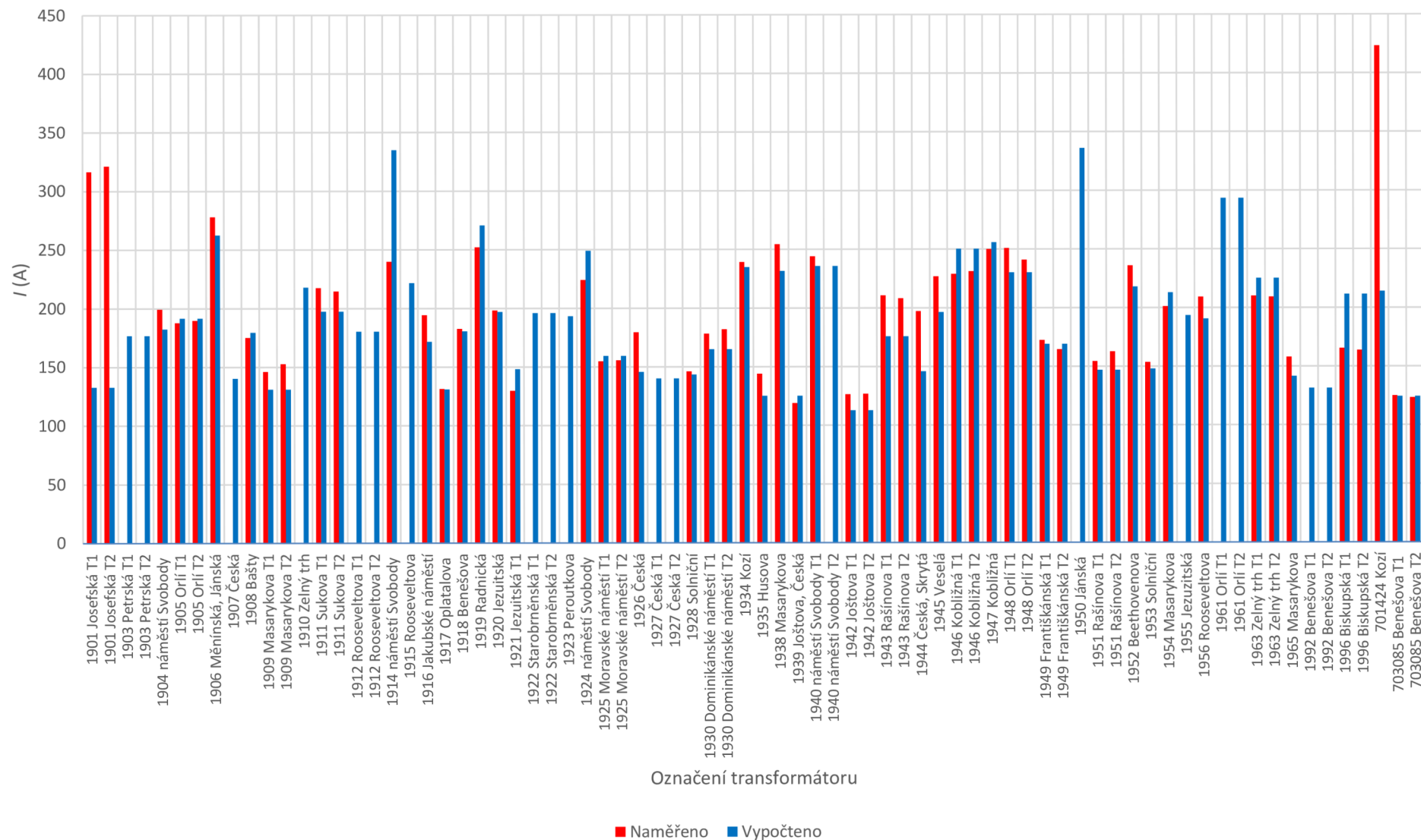
Problematika odchylek je také způsobena chybou měřících přístrojů, přepočtem hodnot a dalšími chybami lidského faktoru. Při převodu schématu sítě z programu NetViewer mohlo dojít k změně nebo ztrátě dat. Nejistota správné funkce programu PAS DAISY Bizon. Problémů může být více. Jedná se pouze o domněnky. Skutečné chyby jsou těžko dohledatelné.

Proudové zatížení na obr. 22 kopíruje průběhy výkonového zatížení, jelikož výkon je stanoven výpočtem z proudu a napětí.

V příloze D je na obr. D-1 obdobný graf jako na obr. 21, ale je zde navíc provedeno rozdělení trafostanic podle příslušnosti k napájecí VN. Proudové porovnání i s rozdělením podle napáječe je uvedeno na obr. D-2 v příloze D.



Obr. 21: Porovnání hodnot zatížení jednotlivých transformátorů z hlediska teoretické a reálné analýzy (středa 11.1.2017 12:00 – 13:00)



Obr. 22: Porovnání průměrných hodnot proudu jednotlivých transformátorů z hlediska teoretické a reálné analýzy (středa 11.1.2017 12:00 – 13:00)

8 MODELOVÁNÍ PORUCHOVÝCH STAVŮ V MŘÍŽOVÉ SÍTI

Pro lepší pochopení chování mřížové sítě je důležitá znalost její funkce v případě poruchových jevů. V získaných datech nebyly nalezeny žádné výjimečné provozní stavy. Domluvou se zadavatelem práce E.ON Česká republika s.r.o. bylo rozhodnuto, že bude porucha vyvolána uměle.

8.1 Simulace poruchového stavu v programu PAS DAISY Bizon

Před provedením reálného měření neobvyklého stavu v síti je vhodné namodelovat situaci ve výpočtovém programu pro zjištění, zda pokusem nedojde k porušení provozních podmínek. K simulaci je využit opět program PAS DAISY Bizon. Poruchový stav je vyvolán vypnutím transformátorů. Cílem je zjistit chování mřížové sítě při výpadku některého z transformátorů v síti. Konkrétně je snahou určit přelévání zátěže v rámci sítě a využití přímých kabelových spojů mezi transformátory.

Vypínaným objektem je trafostanice 703085 OC Podchod na ulici Benešova. Tato trafostanice je zvolena vzhledem k její dostupnosti pro reálné měření. V trafostanici jsou vypnuty oba transformátory. Změna stavu zatížení transformátorů je sledována v trafostanici 1901 na ulici Josefská a 1992 na ulici Benešova, tj. v nejbližších trafostanicích. Jelikož nedošlo k výraznému růstu zatížení transformátorů ve stanici 1901 a 1992, je provedeno odstavení další nejbližší trafostanice 1909 na ulici Masarykova, kde jsou také vypnuty dva transformátory.

Na obr. 23 je provedeno srovnání změn zatížení na jednotlivých transformátorech v mřížové síti při popsáných stavech z hlediska simulace ve výpočtovém programu. U většiny transformátorů dojde vypnutím výše uvedených transformátorů k nepatrné změně zatížení. Trafostanice, u kterých dochází k výraznějšímu zvýšení zatížení, jsou uvedeny v tab. 22, kde jsou uvedeny vypočítané hodnoty při bezporuchovém provozu a při jednotlivých poruchových stavech. Jedná se o transformátory nejbližší vypnutým transformátorům. Podle teoretické simulace přebírá největší zatížení jak v případě vypnutí transformátorů v 703085, tak v 1909, trafostanice 1901 na ulici Josefská. Transformátory v 1901 zvyšují své zatížení o přibližně $\Delta\eta \approx 4\%$ při každém vypnutí. Jedná se o trafostanici, která je umístěna mezi vypínanými trafostanicemi. Při odstavení pouze 703085 na ulici Benešova dále přebírají zatížení především transformátory v 1992 na stejnojmenné ulici, 1908 na ulici Bašty, 1949 na ulici Františkánská a 1909 na ulici Masarykova. V případě současného vypnutí i 1909 na ulici Masarykova přebírají zatížení také transformátory nacházející se nejbližší 1909, tj. 1938, 1954 a 1965 na ulici Masarykova a 1910 na Zelném trhu. Celkové tabulky vypočtených hodnot na jednotlivých transformátorech pro jednotlivé napáječe při sledovaných stavech jsou uvedeny v příloze E v tab. E-1 až E-6.

8.1.1 Přímý spoj transformátorů dvou trafostanic při simulaci

Mezi trafostanicí 1901 a 703085 a 1901 a 1909 je proveden přímý spoj prostřednictvím kabelového vedení. Při vypnutí transformátorů v trafostanicí 703085 se předpokládá, že se na přímém spoji objeví přítomnost chybějícího proudu vypnuté stanice. Předpoklad je odvozen ze závislosti odporu vedení na délce podle vzorce (8.1)

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (8.1)$$

kde R je elektrický odpor vodiče (Ω), ρ je měrný elektrický odpor materiálu vodiče ($\Omega \cdot \text{m}$), l je délka vodiče (m) a S je průřez vodiče (m^2). S rostoucí délkou vodiče odpor roste. Jednotlivé úseky vedení v mřížové síti jsou provedeny stejným typem kabelu, tj. průřez a rezistivita se nemění. Přímé kabelové spojení představuje nejkratší cestu mezi dvěma transformátory a zároveň se jedná o přímou cestu bez přítomnosti pojistkových skříní. Odpor dané cesty je nejmenší a podle platnosti Ohmova zákona by měl proud téct vzhledem k poměrům odporů jednotlivých cest, tedy v případě mřížové sítě především přímou cestou.

Při simulaci poruchových stavů v programu PAS DAISY Bizon jsou sledovány hodnoty proudu na přímých kabelových spoji. V bezporuchovém stavu je vypočítána hodnota proudu na přímém kabelovém spoji mezi 1901 a 703085 $I = 54,42$ A. Po vypnutí trafostanice 703085 klesá proud na přímém kabelovém vedení dle výpočtu na hodnotu $I = 7,8$ A. Podobná situace nastává i na přímé kabelové spojení mezi trafostanicí 1901 a 1909, kde v bezporuchovém stavu protéká proud $I = 22,79$ A a po vypnutí trafostanice 1909 $I = 9,54$ A. V případě teoretické analýzy poruchového stavu se nepotvrdil předpoklad předávky zatížení přes přímé kabelové spojení. Místo nárůstu proudu došlo naopak k jeho snížení. Pravděpodobně jsou kratší, a tím vhodnější cesty pro dodávku energie než přes přímé kabelové spojení.

8.2 Reálné měření poruchového stavu

V pondělí 20.3.2017 bylo provedeno měření reálné simulace poruchy, která spočívala ve vypnutí transformátorů. Porucha byla provedena stejně jako u výpočtové analýzy na dvou transformátorech v trafostanicí 703085 na ulici Benešova. Po provedení poruchového stavu došlo ke sběru dat z mřížové sítě. Před vyjmutím paměťové karty však nebyla uložena naměřená data a hodnoty z měření poruchového stavu byly ztraceny. Při posouzení poruchového stavu bylo možno vycházet pouze z hodnot opsaných z měřících jednotek během měření. Před vypnutím transformátorů ve stanici 703085 vykazovaly transformátory na každou fázi hodnoty uvedené v tab. 23. Pro přehlednost jsou uvedeny pouze přibližné hodnoty proudu a výkonu pro jednu fázi, jelikož veličiny jednotlivých fází nebyly časově stálé a mezi sebou se lišily jen nepatrně. Předpokládalo se, že po vypnutí převzme většinu proudového, a tím i výkonového zatížení nejbližší transformátory v trafostanicích 1901 na ulici Josefská a 1992 v Hotelu Grand na ulici Benešova, jak určila výpočtová simulace. V těchto trafostanicích byly přítomny dvojce techniků pro sledování parametrů transformátorů.

Tab. 23: Parametry jedné fáze transformátoru T1 v trafostanicí 703085 před vypnutím

Veličina	I_{Lavg}	P_{Lavg}
Jednotka	A	kW
Hodnota	94	17

V 9:00 byly vypnuty oba transformátory v trafostanici 703085 v OC Podchod na ulici Benešova. Při komunikaci s techniky v trafostanici 1901 na ulici Josefská byla naměřena data uvedená v tab. 24. Transformátory v trafostanici 1901 přebraly proud $I = 25$ A z chybějícího $I = 94$ A na fázi. Výkonově přebraly transformátory $P = 10$ kW na fázi. Vzhledem ke skutečnosti, že jsou k dispozici pouze hodnoty změny proudu a činného výkonu, není možné dopočítat změny výkonového zatížení transformátorů po provedení vypnutí.

Tab. 24: Parametry jedné fáze transformátoru T1 v trafostanici 1901 před a po vypnutí 703085

Veličina	Před vypnutím		Po vypnutí	
	I_{Lavg}	P_{Lavg}	I_{Lavg}	P_{Lavg}
Jednotka	A	kW	A	kW
Hodnota	295	42	320	52

Pro zhoršení podmínek byly o půl hodiny později vypnuty další dva transformátory v trafostanici 1909 na ulici Masarykova, které v ustáleném stavu mají proud a výkon na fázi podle tab. 25. Po vypnutí bylo potřeba vynahradit proud $I = 280$ A a výkon $P = 66$ kW na fázi. Před a po vypnutí trafostanice 1909 byl na transformátorech ve stanici 1901 naměřen proud a výkon na fázi podle tab. 26.

Tab. 25: Parametry jedné fáze transformátoru T1 v trafostanici 1909 před vypnutím

Veličina	I_{Lavg}	P_{Lavg}
Jednotka	A	kW
Hodnota	140	33

Tab. 26: Parametry na jedné fázi transformátoru T1 v trafostanici 1901 před a po vypnutí 1909

Veličina	Před vypnutím		Po vypnutí	
	I_{Lavg}	P_{Lavg}	I_{Lavg}	P_{Lavg}
Jednotka	A	kW	A	kW
Hodnota	320	52	346	59

Podle hodnot naměřených po vypnutí proud vzrostl o $\Delta I = 26$ A a výkon o $\Delta P = 7$ kW na fázi, jak ukazuje tab. 26.

Pokud porovnáme jednofázové hodnoty vypočtené a naměřené v trafostanici Josefská při jednotlivých stavech, získáme tab. 27. Po vypnutí pouze trafostanice 703085 přebírá podle programu PAS DAISY Bizon proud $I = 38,27$ A jednofázově a výkon $P = 7,67$ kW jednofázově. V případě měření je na měřáku znázorněn proud o $\Delta I = 25$ A a výkon o $\Delta P = 10$ kW na fázi vyšší než v bezporuchovém stavu. Při současném vypnutí 1909 se proud podle výpočtu v programu zvýšil o $\Delta I = 35,34$ A a výkon o $\Delta P = 7,3$ kW oproti bezporuchovému stavu. U reálného měření se hodnota proudu zvýšila o $\Delta I = 26$ A a výkon o $\Delta P = 7$ kW. Porovnáním změny výkonu u trafostanice 1901 Josefská před a po vypnutí transformátorů s hodnotami vypočtenými nedochází k velkému rozdílu. Jestliže v rámci výpočetní analýzy převzala trafostanice Josefská největší část chybějícího výkonu, vzhledem k podobnosti hodnot naměřených a vypočtených je možno říci, že i v reálné síti doplnily největší část chybějícího výkonu transformátory ve stanici Josefská. Hodnoty výpočtu a měření nejsou přesné. V případě reálného měření je brána pouze přibližná hodnota pro všechny fáze a jednotná hodnota pro oba transformátory. Zároveň u obou analýz vstupují nedostatky popsané již v kapitole 7.

Tab. 27: Porovnání jednofázových vypočítaných a naměřených hodnot v trafostanici 1901

Transformátor	Stav	Vypočteno		Naměřeno	
		I_{avg}	P_{avg}	I_{avg}	P_{avg}
		A	kW	A	kW
1901 Josefská T1 vypočteno	Bezporuchový	132,81	89,35	295,00	42,00
	Vypnuto 703085	171,08	112,32	320,00	52,00
	Vypnuto 703085 a1909	206,42	134,23	346,00	59,00

8.2.1 Přímý spoj transformátorů dvou trafostanic při reálném měření

I při reálném měření byly sledovány hodnoty proudu na přímých kabelových spojích. V ustáleném stavu při zapnutých transformátorech v trafostanici 703085 byla naměřena hodnota proudu na přímém jednofázovém kabelu mezi 703085 a 1901 $I = 39$ A. Při přiložení klešťového ampérmetru na dané vedení po vypnutí 703085 byla naměřena hodnota proudu $I = 25$ A. Ani v případě reálného měření nepřijala nejbližší trafostanice podle předpokladu přes přímé kabelové spojení chybějící velikost proudu. Došlo ke snížení hodnoty proudu. V případě přímého kabelového spoje mezi 1901 a 1909 byl před vypnutím trafostanice 1909 na kabelovém spoji naměřen proud $I = 37$ A. Po vypnutí 1909 stoupla hodnota proudu na $I = 45$ A.

V jednom případě došlo k poklesu proudu na přímém spoji, ve druhém k nárůstu. Příčina tohoto jevu není známa a po měření byla překvapující a neobjasnitelná. Lze však říci, že přímý spoj nepřevzme většinu chybějícího proudu. Patrně se tedy nejedná o cestu nejmenšího odporu, jak bylo předpokládáno. Porovnání teoretických a reálných hodnot není možné. Hodnoty se liší v desítkách ampér. Vzhledem k výsledkům měření poruchového stavu bylo rozhodnuto, že bude nutné provést měření podle jiné strategie. Vzhledem k časovému prostoru nebylo nové měření provedeno do odevzdání práce a nebylo možno zde popsat jeho výsledky.

8.2.2 Ověření funkčnosti trafostanice 1961 na ulici Orlí

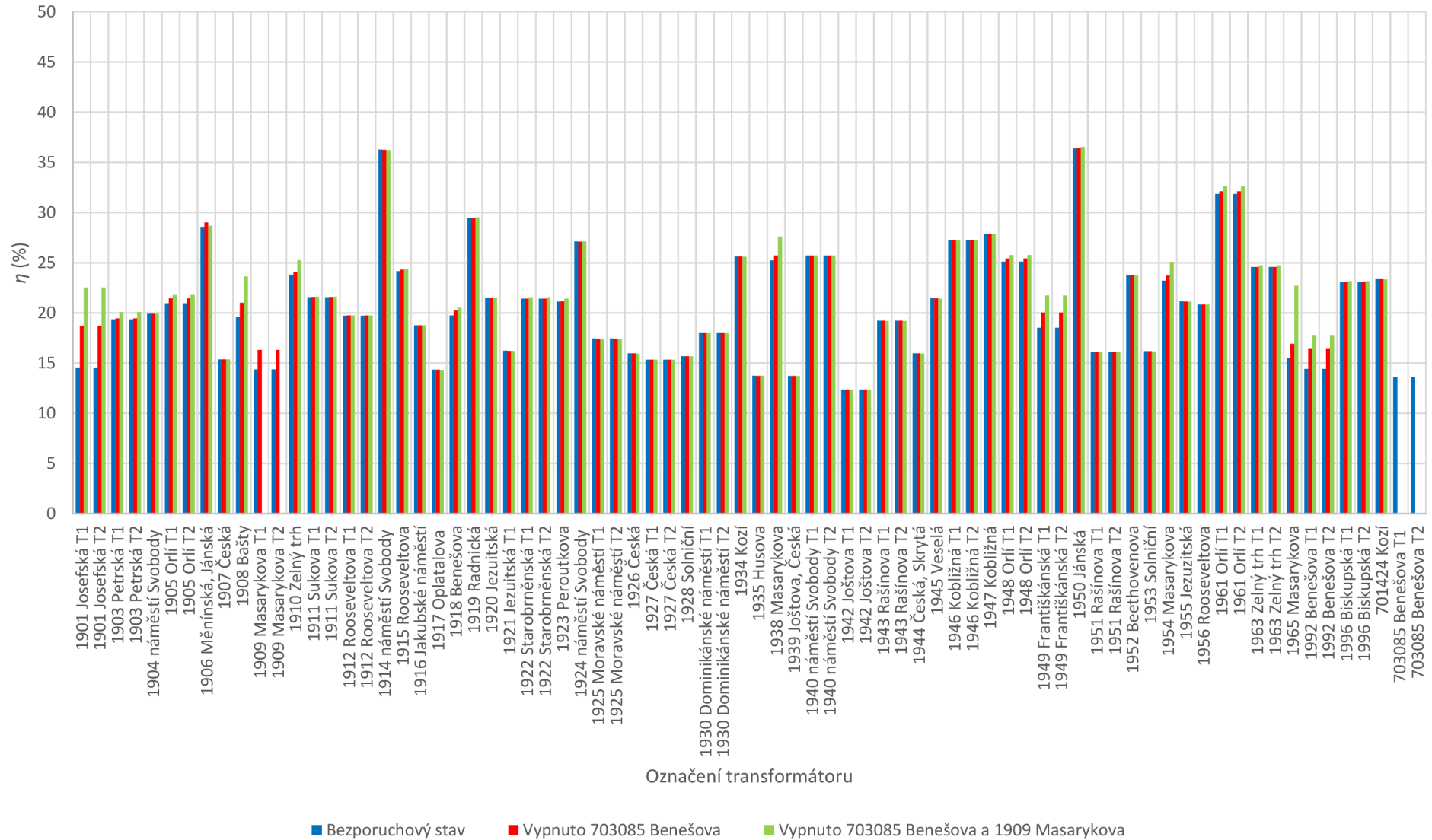
Při reálné analýze v kapitole 6 byly zjištěny problémy s trafostanicí 1961 Orlí, kde byly naměřeny nulové hodnoty proudu na obou transformátorech. V rámci simulace poruchy 20.3.2017 byla provedena kontrola této stanice. Při zjišťování problému bylo odhaleno, že na druhém transformátoru byl z neznámých důvodů vypnut jistič transformátoru. Na prvním transformátoru se vizuálně nedaly dohledat problémy, které by vedly k chybnému měření.

Postupným proměřováním a pokusy byly zjištěny na prvním transformátoru v trafostanici 1961 problémy s automatickým ovládním jističe. Při manuálním ovládním byl jistič vypnut a znovu zapnut, byla tak obnovena funkce transformátoru. Po zapnutí prvního transformátoru se zatížení na transformátory v trafostanici 1961 rozložilo podle tab. 28.

Tab. 28: Hodnoty naměřené v trafostanici 1961 při spuštění obou transformátorů

Veličina	1961 Orlí 9 T1		1961 Orlí 9 T2	
	I_{avg}	P_{avg}	I_{avg}	P_{avg}
Jednotka	A	kW	A	kW
Hodnota	196	42	193	42

I nadále je potřeba sledovat správnou funkci jističů v trafostanici 1961 Orlí a případně řešit problémy s technickou podporou výrobců jističů.



Obr. 23: Porovnání vypočítaných hodnot výkonového zatížení při jednotlivých stavech na transformátorech podle programu PAS DAISY Bizon

9 ZÁVĚR

Mřížová síť městské části Brno-střed byla založena roku 1951, a to kvůli strategické poloze centra města a nutnosti zajistit nepřerušenu dodávku elektrické energie pro důležité administrativní, finanční a vzdělávací instituce, průmysl, dopravu, obchodní a kulturní budovy. Mřížová síť je pro svou jedinečnost provozována dodnes, přestože se infrastruktura města Brna za více než 60 let změnila a současný průmysl je soustředěn zejména do okrajových částí, správa města, finanční instituce jsou rozptýleny po celém území města a zajištění spolehlivosti dodávky elektrické energie by bylo možno řešit i jinou koncepcí. Za dobu fungování mřížové sítě nebyl vytvořen ucelený přehled historického vývoje, popis instalované technologie a chování sítě v ustáleném a poruchovém stavu. Na základě iniciativy – E.ON Česká republika s.r.o. odstranit tento nedostatek vznikla tato diplomová práce.

Problematika mřížové sítě je započata jejím historickým vývojem, v návaznosti na dějiny elektrické sítě celé jižní Moravy, především města Brna, spolu s teoretickými možnostmi provozu mřížových sítí. Jelikož je mřížová síť součástí elektrické sítě města Brna, jsou uvedeny i další alternativy rozvodných sítí aplikovaných ve městě. Pro vytvoření představy o aktuální podobě mřížové sítě je teoretická část práce doplněna o popis stávající technologie instalované v mřížové síti a o způsob propojení mřížové sítě s napájecí rozvodnou Brno-Příkop na straně vysokého napětí a se spotřebiteli na nízkonapěťové straně.

Simulace modelu mřížové sítě ve výpočtovém programu PAS DAISY Bizon nebyla doposud provedena. V rámci diplomové práce se jednalo o experiment, zda je možné vůbec výpočet chodu tak rozsáhlé sítě provést a jaká jsou kritéria a problémy s jeho realizací. Pro zadavatele (tj. E.ON Česká republika s.r.o.) je vytvořen aktuální model, ve kterém jsou odstraněny nedostatky vzniklé při exportu z programu NetViewer. Model je možno využít pro stanovení orientačních provozních hodnot a zjištění chování mřížové sítě, například před provedením plánovaných zásahů v mřížové síti. Tím lze předejít a eliminovat nežádoucí stavy, ke kterým by mohlo dojít při přímém provedení změny. Na vypočtené hodnoty je potřeba pohlížet jako na orientační. Pro přesnější hodnoty by bylo potřeba blíže specifikovat koeficienty soudobosti jednotlivých odběrů. Další nedokonalostí je neuvážování stáří a polohy transformátorů při výpočtu. Tyto jevy mají vliv na chování transformátorů v reálném provozu a je potřeba na ně při výsledcích pohlížet. V případě, že by došlo k nějakým změnám v mřížové síti, např. přidání či odstranění odběru, je potřeba model aktualizovat. Popis výpočtu je doplněn o možnosti vyobrazení proudového a napěťového zatížení.

Při zpracování reálně naměřených dat v síti byly zjištěny nedostatky u některých paměťových karet. Vzhledem k časovému omezení nebylo možné provést odstranění problémů s měřenými daty. Aby bylo možné v budoucnu sledovat dění v mřížové síti, bylo by vhodné odstranit uvedené nedostatky. U trafostanic 1903 Petrská, 1927 Česká a 1940 náměstí Svobody, kde nelze soubory otevřít, je potřeba ověřit, zda je problém v paměťové kartě, ukládání dat nebo měřící jednotce. Nepředpokládá se, že by chybou byla nedbalost techniků při odběru paměťových karet. V takovém případě by se paměťové karty daly vyčistit, ale byly by prázdné. Data z trafostanice 1907 Česká a 1912 Rooseveltova nebylo možno analyzovat, jelikož data nebyla zapsána na kartě. Zde pravděpodobně došlo k pochybení techniků a před vyjmutím karty nebyla data uložena. Přesto mohlo dojít k chybě na měřící jednotce a bylo by vhodné měření zkontrolovat. U měření v trafostanicích 1910 Zelný trh, 1915 Rooseveltova, 1950 Jánská a 1992 Benešova je potřeba přenastavit čas měření, aby bylo možno správně vyhodnotit data a nedošlo k časově neodpovídajícímu posouzení. Chybné měření v trafostanici 1961 Orlí bylo vyřešeno v rámci měření poruchového stavu. Přítomnost nulových hodnot proudu v uložených datech

byla způsobena vypnutým jističem bez obnovení funkce. Po manuálním uvedení jističe do zapnutého stavu převzal transformátor odpovídající zatížení. Je potřeba i nadále sledovat funkci jističe a případné problémy řešit s technickou podporou výrobce. Trafostanice 1955 Jezuitská nebyla zkontrolována z důvodu nedostatku času. Zde byly v naměřených datech vysledovány nízké hodnoty činného výkonu, který dosáhl za celé sledované období 06/2016 až 02/2017 maximálně $P = 2,33$ kW. Vzhledem k výsledkům teoretické analýzy a hodnotám naměřeným na ostatních transformátorech není možné považovat výsledky za správné. Prohlídkou trafostanice by bylo vhodné posoudit správnost funkce všech instalovaných jednotek.

I přes nemožnost analyzovat všechny transformátory mřížové sítě bylo provedeno vyhodnocení bezproblémových transformátorů podle zadání provozovatele s prioritou na posouzení maximálního proudového a výkonového zatížení jednotlivých fází transformátorů či standardního využití transformátoru v běžný pracovní den. Výsledky jsou k dispozici v odpovídajících tabulkách a grafech. Diplomová práce nabízí i jiné možnosti zpracování dat. Příkladem jsou rozdíly v proudovém zatížení jednotlivých fází, kdy je možno posoudit rovnoměrnost rozdělení zátěže. Zároveň jsou poskytnuty hodnoty přetoků ze strany nízkého napětí na stranu vysokého napětí, ke kterým dochází i v ustáleném stavu. Zpracování naměřených dat bylo prioritně provedeno za pomoci programu Microsoft Excel, jsou však uvedeny i přednosti programu Data Viewer MEg, především co se týče přehledu poklesů napětí v síti. Události poklesu napětí umožňuje program vypsat v tabulce s přesně stanoveným datem počátku poklesu, trváním poklesu, dosažených maximálních a minimálních zbytkových napětí a proudů na jednotlivých fázích. Je možné vyobrazení událostí v klasifikační tabulce podle normy ČSN EN 50160 nebo graficky v grafu odolnosti zařízení, kdy není potřeba dohledávat v normě vysvětlení jednotlivých stavů, ale jsou přehledně zachyceny problémy způsobené poklesy napětí.

Posouzením výsledků výkonového zatížení transformátorů vypočítaného z modelu sítě a stanoveného z reálného provozu je možno říci, že v obou případech je splněno provozní kritérium mřížové sítě o zatíženosti transformátorů na 25 %, maximálně 50 %, svého jmenovitého výkonu. Při srovnání výsledků obou analýz došlo u většiny transformátorů k odchylce mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami, kdy naměřené hodnoty byly vyšší, popřípadě nižší než vypočítané do 5 % zatížení. Příčinou je pravděpodobně nedostatečné rozlišení koeficientů soudobosti jednotlivých odběrů, neuvažování stáří a polohy transformátorů při výpočtu chodu v programu. Rozdílnost hodnot může být způsobena také přenesením zátěže problematických transformátorů na bezporuchové transformátory a tím mohlo dojít ke zvýšení zatížení bezproblémových transformátorů. Transformátory v trafostanici 1901 na ulici Josefská a 701424 na ulici Koží dosáhly při měření o více než 20 % vyššího zatížení než při výpočtu. Problém může být v nevhodně nastavené odbočce transformátoru. Popřípadě je potřeba zavést další měření pro odstranění mínění špatně fungující jednoty MEg40⁺. Opačný případ vyšší vypočtené hodnoty zatížení, než naměřené nastal na trafostanici 1914 na náměstí Svobody. Při výpočtu v programu PAS DAISY Bizon mohl být uvažován odběr, který je reálně odpojen a tím patrně došlo k zvýšení zatížení transformátoru ve výpočtu oproti skutečnému stavu.

V rámci práce byla provedena i simulace poruchového stavu spočívajícího ve vypnutí čtyř transformátorů. Dva transformátory byly vypnuty v trafostanici 703085 na ulici Benešova a další dva transformátory ve stanici 1909 na ulici Masarykova. Při výpočtu v programu PAS DAISY Bizon bylo zjištěno, že zatížení vypnutých transformátorů přebírají transformátory nejbližší vypínaným. Především trafostanice 1901 na ulici Josefská, která zvyšuje své zatížení o 4 % na každou vypnutou trafostanici. Data z reálné simulace poruchy v síti nebyla uložena. Porovnáním hodnot opsaných z měřících zařízení v trafostanici Josefská a hodnot vypočtených

bylo zjištěno, že i v případě reálné sítě přebírá největší část chybějícího výkonu trafostanice Josefská.

Pro optimalizaci práce s naměřenými daty by bylo vhodné zavést dálkovou komunikaci mezi měřicí jednotkou a sídlem správy mřížové sítě. Získávání naměřených dat z měřicí jednotky probíhá v současné době přímo propojením počítače se zařízením přes USB rozhraní. Stahování dat trvá desítky minut. Výměnou plných paměťových karet za prázdné a následným vyčítáním dat přes čtečku karet se proces získání dat zkrátí na dobu do deseti minut. V obou případech je však potřeba projít všechny trafostanice, což navyšuje dobu trvání stahování dat. Tento způsob sběru dat je dnes již považován za neefektivní. Při současném vývoji technologií existují již možnosti vhodného nahrazení sběru dat přes paměťové karty za způsob dálkového odečtu. Na základě interní studie vyhotovené pro společnost E. ON jsou vybrány dva způsoby dálkové komunikace vhodné pro mřížovou síť. Jestliže je v rozvodné stanici dostatečné pokrytí signálem, je možno vysílat data bezdrátově pomocí technologií Low Power Wide Area Network (LPWAN), Long Term Evolution (LTE). Rozvodné stanice v mřížové síti se nachází převážně podzemí, kde je nedostatečné pokrytí signálem pro vysílání dat. V tomto případě je pak možno využít komunikace po silovém vedení v kolektoru, Power Line Communication (PLC). Data jsou přes silové vedení přivedena do rozpojovací skříně s komunikační jednotkou v oblasti dostatečně pokrytou signálem. Komunikační jednotka pak přes bezdrátové technologie přenosu dat umožňuje posílat data do nadřazeného systému. Zavedením dálkové komunikace by se kromě výše zmíněného zjednodušení získávání a přístupu k datům také odstranily problém se ztrátou dat způsobenou jejich neuložením před vyjmutím paměťové karty.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] KUBÍN, M. A KOL. Rozvoj energetiky Jižní Moravy. Brno: Jihomoravské energetické závody, státní podnik Brno, 1993, 384 stran.
- [2] MACHOLÁN, J. O brněnském divadle. Elektřina v Brně před 100 lety. In: profiElektrika.cz [online]. Elektrika. info s.r.o., 2001. [cit. 2016-8-19]. Dostupné na: <http://elektrika.cz/data/clanky/vnmobe011217>
- [3] NEZNÁMÝ AUTOR. Zahájení elektrizace na území města Brna. ... pár okamžiků z historie elektrizace Jižní Moravy... [online]. [cit. 2016-7-9]. Dostupné na: <http://www.zmehistory.cz/ZME1.htm>
- [4] E.ON DISTRIBUCE, A.S. Popis distribuční soustavy E.ON Distribuce, a.s. [online]. 2016. [cit. 2016-10-25]. Dostupné na: <https://www.eon-distribuce.cz/o-nas/distribucni-soustava/technicke-informace/elektrina/-a12371?field=data>
- [5] Provozy [online]. Teplárny Brno, a.s. [cit. 2016-10-25]. Dostupné na: <http://www.teplarny.cz/provozy>
- [6] PAVLOVSKÝ, B. Elektrické sítě v městech a sídlištích. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, n.p., 1975, 432 stran. DT 621.316.12.17.001.1
- [7] ŠTROBLOVÁ, M. A HEJTMÁNKOVÁ, P. Elektrické sítě městské a průmyslové. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky, 1994, 149 stran. ISBN80-7082-154-X.
- [8] RICHTER, M. Návrh rekonstrukce distribuční sítě v zadané oblasti. Brno: VUT 2008. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky.
- [9] Historie kolektorů [online]. Technické sítě Brno, a.s. [cit. 2016-7-9]. Dostupné na: <http://www.tsb.cz/sluzby/tsb-kolektory-brno/historie-kolektoru/>
- [10] ENVI WEB. Historie kolektorů. Krátce z historie kolektorů v Brně. In: EnviWeb [online]. EnviWeb s.r.o., březen 2009. [cit. 2016-7-9]. Dostupné na: <http://www.enviweb.cz/clanek/obecne/75335/kratce-z-historie-kolektoru-v-brne>
- [11] SIPROTEC 7SJ62 Multifunction Protection Relay [online]. SIEMENS . [cit. 2016-9-8]. Dostupné na: <http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/protection/overcurrent-feeder-protection/pages/7sj62.aspx>
- [12] VRZAL, J. Kabelové vedení VN. Kabel typu AXEKVCEY. Hlach J., 2007. Technická norma TNS 52 1712.00 společnosti E.ON Česká republika, s.r.o.
- [13] Silové kabely s izolací ze zesíťovaného polyetylénu, 22-AXEKVCEY [online]. NKT cables. [cit. 2016-8-30]. Dostupné na: http://www.nktcables.cz/fileadmin/user_upload/Products/Data_sheets/22-AVXEKVCVEY+DS+CZ+EN.pdf
- [14] VRZAL, J. Rozváděče vysokého napětí. Kompaktní rozváděče izolované plynem SF₆ od firmy Siemens. Votruba S., 2007. Technická norma ECR-TNS-AO-36 7210.00 společnosti E.ON Česká republika, s.r.o.
- [15] VRZAL, J. Rozváděče vysokého napětí. Kompaktní rozváděče izolované plynem SF₆ od firmy Ormazabal. Volek J., 2016. Technická norma TNS 36 7220.03 společnosti E.ON Česká republika, s.r.o.

- [16] Suché transformátory, Olejové transformátory [online]. Elpro - Energo s.r.o. [cit. 2016-8-30]. Dostupné na: <http://www.elpro-energo.cz>
- [17] Souhrnný catalog Kočí Valášek [online]. KOČÍ - VALÁŠEK, s.r.o. [cit. 2016-9-9]. Dostupné na: <http://transformatory.cz/files/file/souhrnny-katalog-KV.pdf>
- [18] Paralelní chod [online]. Vysoká škola baňská – Technická univerzita Ostrava, Katedra elektroenergetiky (2011) [cit. 2014-7-30]. Dostupné na: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/pves/paralelni_chod.pdf
- [19] Silové kabely do 1 kV s PVC izolací a PVC pláštěm, 1-YY [online]. NKT cables. [cit. 2016-9-6]. Dostupné na: http://www.nktcables.cz/fileadmin/user_upload/Products/Data_sheets/1-YY+DS+CZ+EN.pdf
- [20] Distribuční rozvaděče venkovního provedení RST a RD 2 [online]. ESB Rozvaděče, a.s., katalog 2013. [cit. 2016-9-1]. Dostupné na: <http://www.esb-rozvadece.cz/unify/esb-rozvadece/download/rozvadece-nn/ESB-katalog-RST-a-RD2-2013.pdf>
- [21] Kompaktní jističe MODEION [online]. OEZ, s.r.o., katalog 2013. [cit. 2016-9-5]. Dostupné na: http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/2144-z03-15_cz_sk.pdf
- [22] Universal energy meter MEg40+ a MEg 40+/supra [online]. MEgA - Měřicí Energetické Aparáty, a.s., uživatelský návod MEg40+ říjen 2015. [cit. 2016-9-6]. Dostupné na: <http://www.e-mega.cz/doc/cz/MEg40+.pdf>
- [23] Směrová nn ochran MEg51 [online]. MEgA - Měřicí Energetické Aparáty, a.s., uživatelský návod MEg51 listopad 2013. [cit. 2016-9-6]. Dostupné na: <http://www.e-mega.cz/doc/cz/MEg51.pdf>
- [24] Silové kabely do 1 kV s PVC izolací a PVC pláštěm, 1-AYKY [online]. NKT cables. [cit. 2016-9-6]. Dostupné na: http://www.nktcables.cz/fileadmin/user_upload/Products/Data_sheets/1-AYKY+DS+CZ+EN.pdf
- [25] Technický katalog 2014 [online]. DCK Holoubkov Bohemia, a.s., katalog výrobků© 2014. [cit. 2016-9-7]. Dostupné na: http://www.dck.cz/podpora/katalog/DCK_katalog_vyrobku_2014.pdf
- [26] Co je GIS [online]. Geoportal Praha. [cit. 2017-2-9]. Dostupné na: http://www.geoportalpraha.cz/cs/clanek/11/co-je-gis#.WJyoD4p_fIU
- [27] INTERGRAPH CORPORATION. Net Viewer [software]. 2016 [přístup 2017-02-15]. Dostupnost: E.ON Česká republika, s.r.o., Hády 968/2, 614 00 Brno.
- [28] DAISY, SPOL. S.R.O. Výpočty elektrických sítí všech napěťových úrovní [online]. DAISY, spol. s.r.o. (2017). [cit. 2014-10-18]. Dostupné na: <http://www.daisy.cz/daisycz/800/>
- [29] DAISY, SPOL. S.R.O. PAS DAISY Off-Line ver. 4.4x Bizon [software]. Leden 2004 [přístup 2017-02-15]. Dostupnost: E.ON Česká republika, s.r.o., Hády 968/2, 614 00 Brno.
- [30] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN 50160 ed.3 Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě. Únor 2011.
- [31] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN 61000-4-11 ed.2 Elektromagnetická kompatibilita – Část 4: Zkušební a měřicí technika – Oddíl 11: Krátkodobé poklesy napětí, krátká přerušení a pomalé změny napětí – Zkoušky odolnosti. Březen 2005.

-
- [32] MEgA – MĚŘÍCÍ ENERGETICKÉ APARÁTY, A.S.. DVMEg DataViewer ver. 2.1.0 [software]. 2016[přístup 2017-01-20]. Dostupné na: <http://e-mega.cz/DL/>