

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**  
**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Volba optimálního převodu transformátorů VN/NN a  
napěťové hladiny regulátoru transformátorů 110 kV/VN**

**Vedoucí práce: Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.**  
**Autor: Bc. Petr Muchna**

**2018**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2017/2018

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr MUCHNA**  
Osobní číslo: **E16N0109P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Volba optimálního převodu transformátorů VN/NN  
a napěťové hladiny regulátoru transformátorů 110 kV/VN**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Zmapujte úrovně napětí v distribuční síti NN a VN z hlediska legislativy.
2. Charakterizujte jednotlivé aspekty ovlivňující úrovně napětí v distribučních sítích VN a NN.
3. Vyhodnoťte odchylky napětí v síti VN a v distribuční trafostanici (DTS) VN/NN na základě měřených hodnot v síti 22kV.
4. Vzájemně porovnejte několik variant nastavení hladinového regulátoru transformátoru (HRT) 110 kV/VN a převodu transformátorů VN/NN.
5. Na základě vyhodnocení možných variant zvolte vhodná řešení.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. ČSN EN 50160: Charakteristiky napětí el. energie dodávané z veřejné distribuční sítě, 3.vydání 2012
2. Pravidla provozování distribuční soustavy, 2016
3. Tesařová, M., Štroblová, M.: Průmyslová elektroenergetika, ZČU, 2000
4. Příspěvky ve sbornících Konference CIRED z let 2006 až 2017


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

Datum zadání diplomové práce: 10. října 2017

Termín odevzdání diplomové práce: 24. května 2018

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



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

V Plzni dne 10. října 2017

## **Abstrakt**

Předkládaná práce se zabývá rozбором možností regulace napětí v distribučních sítích E.ON. Nejprve je provedeno shrnutí problematiky kvality napětí a současné koncepce regulace napětí v elektrizační, respektive distribuční soustavě v České republice. Dále je proveden rozbor regulačních možností používaných distribučních transformátorů na základě vyhodnocení dat z měření. Dle rozboru je doporučena nejvhodnější varianta nastavení hladinového regulátoru transformátoru a jednotný převod distribučního transformátoru. Nakonec jsou pomocí simulace potvrzeny výsledky vyplývající ze zmiňovaného rozboru.

## **Klíčová slova**

Distribuční soustava, regulace napětí, kvalita napětí, odchylky napětí, převod transformátoru, odbočkový transformátor.

## **Abstract**

The thesis deals with analysis of voltage regulation options in the distribution system of E.ON company. First part describes the issue of power quality and the current conception of voltage regulation in Czech power system. Further, analysis of voltage regulation capability of frequently used distribution transformers is made. The analysis is based on evaluation of measurement data. On basis of the analysis results, the most suitable variant for setting of automatic HV/MV transformer regulator and the uniform transformer ratio of the MV/LV distribution transformer is recommended. Finally, the analysis results are confirmed by simulation.

## **Key words**

Distribution system, voltage regulation, voltage quality, voltage variation, transformer ratio, tap-changing transformer.

## **Prohlášení**

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

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

V Plzni dne 23.05.2018

.....

podpis

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval Doc. Ing. Miloslavě Tesařové, Ph.D. za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Jiříčkovi za poskytnutá data a důležité informace nezbytné k jejich analýze.

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>11</b>
<b>1 LEGISLATIVNÍ RÁMEC</b> .....	<b>13</b>
1.1 ENERGETICKÝ ZÁKON 458/2000 SB.....	13
1.2 PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV.....	13
1.3 ČSN EN 50160.....	14
1.3.1 Odchyšky napájecího napětí.....	15
1.3.2 Rychlé změny napětí.....	16
1.3.3 Přerušování napájecího napětí.....	16
1.3.4 Poklesy napětí .....	16
1.3.5 Dočasná zvýšení napětí.....	17
<b>2 REGULACE NAPĚTÍ V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ</b> .....	<b>18</b>
2.1 TERCIÁRNÍ REGULACE .....	18
2.2 SEKUNDÁRNÍ REGULACE.....	19
2.3 PRIMÁRNÍ REGULACE.....	20
2.4 PROBLÉMY S PŘETOKY JALOVÉHO VÝKONU.....	20
<b>3 REGULACE NAPĚTÍ V DISTRIBUČNÍ SOUSTAVĚ</b> .....	<b>21</b>
3.1 KONCEPCE REGULACE NAPĚTÍ V DISTRIBUČNÍCH SÍTÍCH.....	21
3.2 ROZBOR PRVKŮ DS Z HLEDISKA REGULACE NAPĚTÍ .....	23
3.2.1 Transformátory 110 kV/VN.....	23
3.2.2 Distribuční transformátory VN/NN.....	27
3.2.3 Výrobní.....	28
3.3 NAPĚŤOVÝ PROFIL V DS S VNOŘENÝMI ZDROJI .....	30
3.4 ALTERNATIVNÍ MOŽNOSTI REGULACE NAPĚTÍ V DS .....	31
3.4.1 Regulace napětí v DS s velkým množstvím obnovitelných zdrojů.....	31
3.4.2 Distribuční transformátor s AC/AC měničem.....	32



---

<b>4</b>	<b>VYHODNOCENÍ MOŽNOSTÍ REGULACE NAPĚTÍ V SÍTÍCH E.ON .....</b>	<b>34</b>
4.1	NAMĚŘENÁ DATA .....	35
4.2	ROZBOR MOŽNOSTÍ REGULACE NAPĚTÍ V OBLASTI E.ON ZÁPAD .....	36
4.2.1	<i>Možnosti regulace napětí v blízkosti rozvoden .....</i>	<i>36</i>
4.2.2	<i>Možnosti regulace napětí na konci vývodů VN.....</i>	<i>39</i>
4.2.3	<i>Možnosti regulace napětí v celé oblasti E.ON západ .....</i>	<i>41</i>
4.3	ROZBOR MOŽNOSTÍ REGULACE NAPĚTÍ V OBLASTI E.ON VÝCHOD .....	42
4.3.1	<i>Možnosti regulace napětí v blízkosti rozvoden .....</i>	<i>42</i>
4.3.2	<i>Možnosti regulace napětí na konci vývodů VN.....</i>	<i>44</i>
4.3.3	<i>Možnosti regulace napětí v celé oblasti E.ON východ .....</i>	<i>46</i>
<b>5</b>	<b>POROVNÁNÍ VARIANT NASTAVENÍ HLADINOVÉHO REGULÁTORU A PŘEVODU DISTRIBUČNÍCH TRANSFORMÁTORŮ .....</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>SIMULACE ZOBECNĚNÉHO VÝVODU .....</b>	<b>50</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>53</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>54</b>
	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>56</b>

## Úvod

Z hlediska nemožnosti skladovat elektrickou energii je zapotřebí, aby její vyrobené množství odpovídalo množství spotřebovanému. Z důvodu nerealizovatelnosti přesné shody, způsobené neustálou změnou zátěže, dochází v elektrizační soustavě k odchylkám či poklesům napětí. Toto je kromě regulace vyrobené energie možné částečně eliminovat regulací napětí. Tu je možné provádět na transformátorech v pilotních uzlech a předávacích bodech. Poslední možností regulace napětí jsou transformátory VN/NN. Ty jsou však dosud regulovatelné pouze bez zatížení a je třeba u nich volit takovou odbočku, která vyhovuje všem provozním stavům.

S regulací napětí také souvisí regulace jalového výkonu, tedy  $Q$  ( $U$ ) regulace. Jalový výkon lze ovlivňovat na straně výroby i spotřeby.

Elektrické spotřebiče jsou konstruovány tak, aby dosahovaly optimálního chodu při jmenovitém napětí. Nastávají-li výkyvy napětí mimo toleranční meze, může dojít k ovlivnění funkce připojených zařízení či ke snížení jejich životnosti. Při zvýšeném napětí dochází ke zkrácení životnosti. Při sníženém napětí dochází například ke snížení světelného toku světelných zdrojů, snížení točivého momentu motorů a s tím k souvisejícímu přehřívání vlivem odběru vyššího proudu apod.

Motivace k vypracování této práce pramení ze současné situace, kdy není možné na celém území spravovaném společností E.ON dodržet stanovené meze napětí. Úkolem je doporučit jednotné nastavení hladinových regulátorů transformátorů a jednotný převod distribučních transformátorů.

Práce je v první části zaměřena na teoretický rozbor problematiky kvality a regulace napětí v elektrizační, respektive distribuční soustavě.

V druhé části je provedeno vyhodnocení odchylek napětí dle naměřených hodnot v síti 22 kV. Na základě tohoto vyhodnocení je provedeno porovnání několika variant nastavení hladinového regulátoru transformátoru 110 kV/VN a převodu distribučních transformátorů VN/NN. Podle posuzovaných variant je v závěru doporučeno nejvhodnější řešení.

Třetí část je zaměřena na simulaci obecného vývodu, kterou jsou potvrzeny závěry z části druhé.

## Seznam symbolů a zkratek

Symbol	Jednotka	Název
CAIDI	(minut/přerušení)	Customer average interruption duration index (průměrná doba trvání jednoho přerušení dodávky nebo distribuce)
$\cos \varphi$	(-)	Účinník
dU(distr.)	(%)	Pokles napětí vlivem zátěže
dU(G)	(%)	Zvýšení napětí po připojení výrobní
$I_N$	(A)	Jmenovitý proud transformátoru
$I_R$	(A)	Zatížení transformátoru
p	(-)	Převod transformátoru
P	(W)	Činný výkon
Q	(VAr)	Jalový výkon
R	( $\Omega$ )	Elektrický odpor
S	(VA)	Zdánlivý výkon
SAIDI	(minut/rok/zákazník)	System average interruption duration index (průměrná souhrnná doba přerušení dodávky)
SAIFI	(přerušení/rok/zákazník)	System average interruption frequency index (průměrná četnost přerušení dodávky)
U	(V)	Napětí
$U_f^{NN}$	(V)	Fázové napětí na straně NN DTR
$U_{max-DTS}$	(V)	Maximální hodnota napětí v rozvaděči distribuční trafostanice
$U_{max-lim}$	(V)	Limitní hodnota napětí dle normy
$U_{max-LIMIT}$	(V)	Maximální mezní hodnota napětí
$U_{max}$	(V)	Maximální průměrná hodnota napětí
$U_{min-LIMIT}$	(V)	Minimální mezní hodnota napětí
$U_{min}$	(V)	Minimální průměrná hodnota napětí
$U_n$	(V)	Jmenovité napětí
$u_R$	(%)	Regulované napětí
$U_S^{VN}$	(V)	Sdružené napětí na straně VN DTR
$u_Z$	(%)	Zadaná hladina napětí
X	( $\Omega$ )	Reaktance

Z	( $\Omega$ )	Impedance
$\Delta$	(%)	Proudová kompaundace
$\Delta u$	(%)	Zvýšení napětí po připojení výroby
$\Delta u_1$	(%)	Úbytek napětí v síti VN
$\Delta u_2$	(%)	Úbytek napětí v síti NN
$\delta u_{T1}$	(%)	Zvýšení napětí na transformátoru 110 kV/VN
$\Delta u_{T2}$	(%)	Úbytek napětí na transformátoru VN/NN
$\delta u_{T2}$	(%)	Zvýšení napětí na transformátoru VN/NN

Zkratka	Název
AC	Alternating current (střídavý proud)
ARN	Automatická regulace napětí
DS	Distribuční soustava
DTR	Distribuční transformátor
ERÚ	Energetický regulační úřad
EU	Evropská unie
HRT	Hladinový regulátor transformátoru
JČE	Jihočeská energetika
JME	Jihomoravská energetika
OTE a.s.	Operátor trhu s elektřinou a.s.
OZE	Obnovitelný zdroj energie
PPDS	Pravidla provozování distribučních soustav
PS	Přenosová soustava
PU	Pilotní uzel
PV <sub>1÷PV<sub>5</sub></sub>	Fotovoltaické elektrárny
SRN	Sekundární regulace napětí
SRQ	Sekundární regulace jalového výkonu
SRU	Skupinová regulace napětí
TRN	Terciární regulace napětí a jalového výkonu
U <sub>1÷U<sub>8</sub></sub>	Uzly v síti VN
U <sub>122÷U<sub>142</sub></sub>	Uzly v síti NN
V <sub>1÷V<sub>9</sub></sub>	Vedení
Z <sub>1÷Z<sub>7</sub></sub>	Zátěže

## 1 Legislativní rámec

Elektrickou energii zatím nelze ve velkém měřítku skladovat. Z tohoto důvodu je zapotřebí, aby množství vyrobené energie korespondovalo s energií spotřebovanou. K zajištění správného fungování tohoto systému jsou stanoveny požadavky na kvalitu napětí.

V této kapitole jsou popsány legislativní dokumenty, které se zabývají zmíněnými požadavky na kvalitu napětí.

### 1.1 Energetický zákon 458/2000 Sb.

Celým názvem: „Zákon o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů“. [1]

Obecně lze říci, že tento zákon upravuje podmínky podnikání ve všech energetických odvětvích. Tedy nejen v elektroenergetice, ale také v plynárenství a teplárenství. Dále stanovuje podmínky získání potřebných licencí. V neposlední řadě stanovuje působnost Energetického regulačního úřadu (ERÚ) a operátora trhu (OTE a.s.).

Jedním z jeho hlavních účelů je určení účastníků trhu, jejich práv a povinností. Provozovatel distribuční soustavy je povinen dodržet parametry kvality napětí. V související vyhlášce 540/2005 Sb. stanovené ERÚ je definován standard kvality napětí, odkazující na pravidla provozování distribuční soustavy. Tato vyhláška stanovuje mimo jiné i výše náhrad za nedodržení kvality dodávek elektrické energie, postupy a lhůty pro jejich uplatnění apod. [1; 2]

### 1.2 Pravidla provozování distribučních soustav

Tato pravidla (dále jen PPDS) vycházejí z energetického zákona a z navazujících vyhlášek Ministerstva průmyslu a obchodu a ERÚ. Vztahují se jak na provozovatele distribuční soustavy, tak na provozovatele přenosové soustavy, provozovatele lokálních distribučních soustav, provozovatele výroben připojených do distribučních soustav, obchodníky s elektřinou a zákazníky.

Nedílnou součástí PPDS jsou i přílohy. Z pohledu této práce pak zejména příloha 3 – *Kvalita napětí v distribuční soustavě, způsoby jejího zjišťování a hodnocení*. Ta vychází z normy ČSN EN 50160 a popisuje charakteristiky napětí týkající se odběratelů z distribučních soustav připojených ze sítě NN, VN a 110 kV. Vztahuje se také na dodávky elektřiny z přenosové soustavy a na dodávky elektřiny ze zdrojů připojených

v distribučních soustavách. Další důležitou přílohou je též příloha 4 – *Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulacních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy*. Zde jsou popsány všechny náležitosti související s připojením výroben do sítí NN, VN nebo 110 kV. [3]

### **1.3 ČSN EN 50160**

Celým názvem: *„Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí.“*

*„Tato evropská norma popisuje a udává hlavní charakteristiky napětí v místech připojení uživatelů z veřejných distribučních sítí nízkého, vysokého a velmi vysokého napětí za normálních provozních podmínek. Norma udává meze nebo hodnoty charakteristických hodnot napětí, jaké může za normálních provozních podmínek očekávat kterýkoliv uživatel sítě, nepopisuje průměrný stav veřejné distribuční sítě.“*

*„Předmětem této evropské normy je definování, popis a specifikace charakteristik napájecího napětí týkající se:*

- a) kmitočtu;*
- b) velikosti;*
- c) tvaru vlny;*
- d) symetrie třífázových napětí.*

*Tyto charakteristiky za normálního provozu napájecího systému kolísají vlivem změn zatížení, rušení vyvolaným určitým zařízením a výskytem poruch, které jsou většinou způsobeny vnějšími vlivy.*

*Charakteristiky se mění v čase náhodně ve vztahu k libovolnému místu napájení a náhodně pro každé místo napájení ve vztahu k danému časovému okamžiku. Vzhledem k této proměnlivosti mohou být očekávané hladiny charakteristik překročeny v malém počtu případech.*

*Některé z těchto jevů ovlivňujících napětí jsou zvláště nepředvídatelné, což ztěžuje udání závazných hodnot pro odpovídající charakteristiky. Hodnoty udané v této normě pro charakteristiky napětí, jako jsou např. poklesy a přerušování napětí je proto zapotřebí podle toho interpretovat.“ [4]*

Byla použita norma v platném znění, tedy ČSN EN 50160 ed. 3, která byla vydána v roce 2011.

Následující kapitoly se zabývají parametry napětí definovanými zmiňovanou normou a Pravidly provozování distribučních soustav.

V distribučních sítích nízkého napětí (NN) je hodnota jmenovitého napětí 230 V mezi fází a uzlem (čtyřvodičové trojfázové soustavy) a 230 V mezi fázovými vodiči (třívodičové trojfázové soustavy). V distribučních sítích vysokého napětí (VN) je dodávka zajišťována pomocí napětí zpravidla vyššího než 1 kV. V následujících kapitolách se pod označením VN myslí napětí od 1 kV do 36 kV včetně, jak uvádí norma ČSN EN 50160. V sítích velmi vysokého napětí (VVN) je dodávka zajišťována pomocí napětí zpravidla vyššího než 36 kV. Dle normy se za VVN považuje napětí až do 150 kV včetně. [4]

Pokud nebude řečeno jinak, platí uvedené pro sítě NN, VN i VVN.

### Rozdělení charakteristik napětí:

- |  |   |
|--|---|
| a) průběžné jevy:                            | b) napěťové jevy:                             |
| 1) kmitočet;                                 | 1) přerušení napájecího napětí;               |
| 2) odchylky napájecího napětí;               | 2) poklesy/dočasná zvýšení napájecího napětí; |
| 3) rychlé změny napětí;                      | 3) dočasná zvýšení napětí. [4]                |
| 4) nesymetrie napájecího napětí;             |   |
| 5) harmonická napětí;                        |   |
| 6) meziharmonická napětí;                    |   |
| 7) úrovně napětí signálů v napájecím napětí; |   |

Dále budou popsány pouze charakteristiky související s tématem práce.

#### **1.3.1 Odchylky napájecího napětí**

V sítích NN musí být za normálních podmínek, které jsou definované v [4], během každého týdne 95 % průměrných efektivních hodnot napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut v rozsahu  $U_n \pm 10\%$ . Dále musí platit pro všechny průměrné efektivní hodnoty napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut rozsah  $U_n +10\%/-15\%$ .

V sítích VN musí být za normálních podmínek během každého týdne 99 % průměrných efektivních hodnot napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut v rozsahu  $U_n \pm 10\%$ . Dále musí platit pro všechny průměrné efektivní hodnoty napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut rozsah  $U_n \pm 15\%$ .

Pro síť VVN norma neudává žádné limity pro odchylky napětí. Zdůvodňuje to omezeným počtem připojených uživatelů, kteří mají obvykle individuální smlouvy. Podotýká však, že předmětové normy pro zařízení VVN mají být brány na zřetel. [4]

### **1.3.2 Rychlé změny napětí**

Rychlá změna napětí je dána rychlou změnou efektivní hodnoty mezi dvěma nebo více po sobě jdoucími úrovněmi napětí, které trvají určitou, avšak nestanovenou dobu (více viz EN 61000-3-3).

K rychlým změnám napětí dochází například díky změnám zatížení, spínáním či poruchám. V PPDS jsou uvedeny závislosti změn napětí na jejich četnosti.

S rychlými změnami napětí souvisí také jev zvaný flickr. Ten je definován jako vjem nestálosti zrakového vnímání vyvolaný světelným podnětem, který má v čase proměnný jas nebo spektrální rozložení. Norma definuje míru vjemu flickru. [3; 4]

### **1.3.3 Přerušování napájecího napětí**

Je stav, při němž napětí v předávacím místě klesne pod 5 % hodnoty dohodnutého napětí (zpravidla jmenovité napětí sítě, pokud se provozovatel a uživatel sítě nedohodnou jinak).

Přerušování napájecího napětí lze rozdělit na:

- a) plánovaná – odběratelé jsou předem informováni;
- b) neplánovaná – způsobená důsledkem trvalých či přechodných poruch:
  - 1) dlouhodobá – delší než 3 minuty;
  - 2) krátkodobá – do 3 minut. [4]

Ukazatele nepřetržitosti dodávky (SAIFI, SAIDI, CAIDI) jsou definovány v příloze číslo 2 PPDS.

### **1.3.4 Poklesy napětí**

Jsou definovány jako poklesy napájecího napětí v napájecím bodě distribuční soustavy pod prahovou počáteční hodnotu 90 % dohodnutého napětí.

Příčinami poklesů napětí jsou obecně poruchy v síti či změny jejího zatížení. [4]



### **1.3.5 Dočasná zvýšení napětí**

Jsou definována jako dočasná zvýšení napájecího napětí v napájecím bodě distribuční soustavy nad prahovou hodnotu 110 % dohodnutého napětí.

Příčinami dočasných zvýšení napětí jsou obecně provozní spínání, odpojení zátěže či atmosférická přepětí. [4]

## 2 Regulace napětí v elektrizační soustavě

Napětí lze měnit:

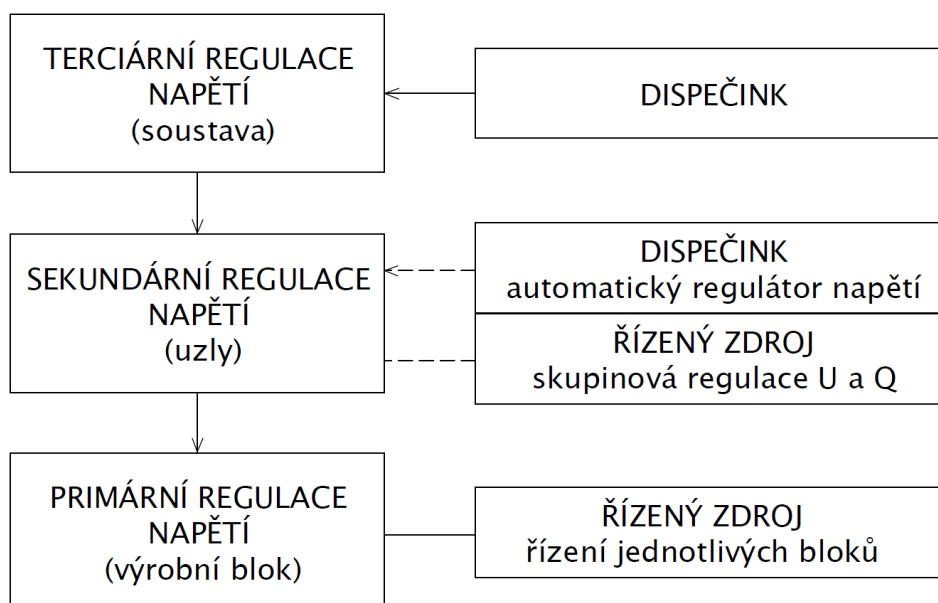
- a) změnou hodnoty jalového výkonu:
  - 1) na straně odběru – pomocí kompenzace;
  - 2) na straně dodávky – změna jalových výkonů u výrobců, synchronní kompenzátory, kompenzační tlumivky;
- b) změnou napětí – pomocí nastavení převodu transformátorů.

### Koncepce regulace napětí:

V České republice se provádí regulace v tzv. pilotních uzlech (PU). Je založena na poměru  $\frac{dU}{dQ}$  v daném uzlu. PU jsou rozvodny 400 a 220 kV.

Pro řízení napětí byla zavedena třístupňová hierarchie:

- a) terciární regulace – na úrovni celé soustavy;
- b) sekundární regulace – na úrovni jednoho uzlu soustavy;
- c) primární regulace – na úrovni jednoho výrobního bloku.



Obr. 2.1 Blokové schéma hierarchie regulace napětí [5]

### 2.1 Terciární regulace

Terciární regulace napětí a jalového výkonu (TRN) v soustavě je důležitou podmínkou pro optimální funkci celého regulačního systému. Je žádoucí, aby tato regulace probíhala v reálném čase, proto probíhá automaticky. Dispečer není schopen určovat zadaná napětí v PU a řídit optimální nastavení regulačních prostředků, nastavení odboček

transformátorů a kompenzačních zařízení.

Koordinace zadaných napětí v PU je uskutečňována pro zajištění bezpečného a ekonomického provozu. Součástí souboru dispečerských funkcí je optimalizační program, jehož úkolem je TRN. Jedním z hlavních požadavků je minimalizace ztrát v regulované soustavě. Napětí v jednotlivých PU jsou vypočtena programem z aktuálního chodu sítě. Výstupy z programu, tedy hodnoty zadávaných napětí, jsou vstupy automatických regulátorů napětí (ARN). Ty jsou již součástí sekundární regulace (SRN).

Při terciární regulaci je třeba dbát na tato omezení:

- a) technická omezení – tolerance napětí v uzlech;
- b) aktuální hodnoty rezervy regulačního jalového výkonu pro jednotlivé PU;
- c) toky jalového výkonu přes hraniční vedení nebo transformátory PS/110 kV v případě distribuční sítě 110 kV apod.

Na základě místních podmínek mohou být stanovena další omezení. [6]

## **2.2 Sekundární regulace**

Je realizována v jednotlivých PU elektrizační soustavy a je pro její provoz nepostradatelná. Dle požadavků terciární regulace řídí koordinaci regulačních prvků v daném PU. Tímto je zajišťována rovnováha mezi spotřebou a výrobou jalového výkonu. Automatický sekundární regulátor napětí se skládá z:

- a) automatické regulace napětí (ARN) – vyhodnocuje aktuální regulační odchylku a vypočítává požadovanou změnu jalového výkonu potřebnou k její eliminaci, poté ji rozděljuje na SRU, které jsou v PU k dispozici;
- b) skupinové regulace napětí (SRU) – v elektrárně rozdělí požadavek ARN dle rezervy na jednotlivé SRQ generátorů;
- c) sekundární regulace jalového výkonu (SRQ) – provedení mechanismu změny zadané hodnoty napětí primárního regulátoru (PRN) – změna jalového výkonu;
- d) regulátoru odboček transformátorů PS/110 kV – hladinová regulace (HRT) zajišťuje udržení zadané hodnoty hladiny napětí na sekundární straně transformátoru.

Regulační proces nesmí být delší než 120 s a měl by mít aperiodický průběh. Je požadován maximálně jeden překmit. [6]

## **2.3 Primární regulace**

Jak již bylo řečeno, jedná se o regulaci na úrovni jednoho výrobního bloku. Jejím úkolem je za pomoci buzení udržovat konstantní napětí na svorkách generátoru. Časové působení se pohybuje v rozmezí 1÷2 s. V tomto čase musí být regulace schopna reagovat na rychlé změny zátěže, topologie systému a další přechodné jevy. Její působení má lokální charakter. Ovlivňuje přímo stabilitu celého systému, a to pomocí nastavených mezí. Ty jsou dány maximálním proudem statoru, maximálním proudem rotoru a mezí podbuzení. [6]

## **2.4 Problémy s přetoky jalového výkonu**

Distribuční soustava sloužila primárně jako prostředek k distribuci elektrické energie z předávacích míst ke konečnému spotřebiteli. S rozvojem distribuovaných zdrojů se k tomuto přidalo ještě vyvedení jejich výkonu. Díky vnořené výrobě dochází k poklesu průměrného zatížení distribuční sítě. Tím pádem mohou mít některé uzlové oblasti z hlediska přenosové soustavy charakter výroby.

Dalším nezanedbatelným vlivem na změnu toku jalových výkonů je narůstající podíl kabelových vedení, zejména na hladině VN. V neposlední řadě mohou mít vliv i jalové výkony běžných spotřebičů, které se na rozdíl od těch starších vyznačují změnou charakteru odběru jalového výkonu.

Výše zmíněné skutečnosti mohou mít ve svém důsledku vliv na přetoky jalového výkonu do přenosové soustavy. Tyto potom vyčerpávají regulační rozsahy regulačních prostředků.

V Kodexu přenosové soustavy je pro uživatele, tedy provozovatele distribuční soustavy, stanoven požadavek na odběr elektřiny s trvale induktivním účínkem  $\cos \varphi > 0,95$ , pokud není dopředu dohodnuto jinak. Z tohoto vyplývá:

- a) účíník nesmí být nižší než 0,95 (režim odběru činného i jalového výkonu);
- b) účíník nesmí být kapacitní, tedy do přenosové soustavy nesmí být dodáván jalový výkon induktivního charakteru;
- c) činný výkon nesmí být, pokud není dohodnuto jinak, dodáván do přenosové soustavy. [7; 8]

### 3 Regulace napětí v distribuční soustavě

Distribuční soustava v České republice pracuje na hladinách VVN, VN a NN. Předávacími místy mezi přenosovou (PS) a distribuční (DS) sítí jsou označovány transformátory 400/110 kV a 220/110 kV. Napětí 110 kV v těchto místech je drženo PS. DS má za úkol dodržovat hladinu napětí v předávacích místech pro odběratele.

#### Regulační prostředky v distribučních sítích

- a) odbočkové transformátory – pro regulaci napětí v distribučních sítích mají hlavní význam; transformátory VVN/VN jsou přepínatelné pod zatížením na rozdíl od transformátorů VN/NN;
- b) generátory – do sítě 110 kV se připojují generátory s výkonem v řádu desítek MVA; do sítě VN se připojují generátory s výkony v řádu stovek kVA až jednotek MVA;
- c) kompenzace účinníku – zlepšení napěťových poměrů se zde pokládá za druhořadé.

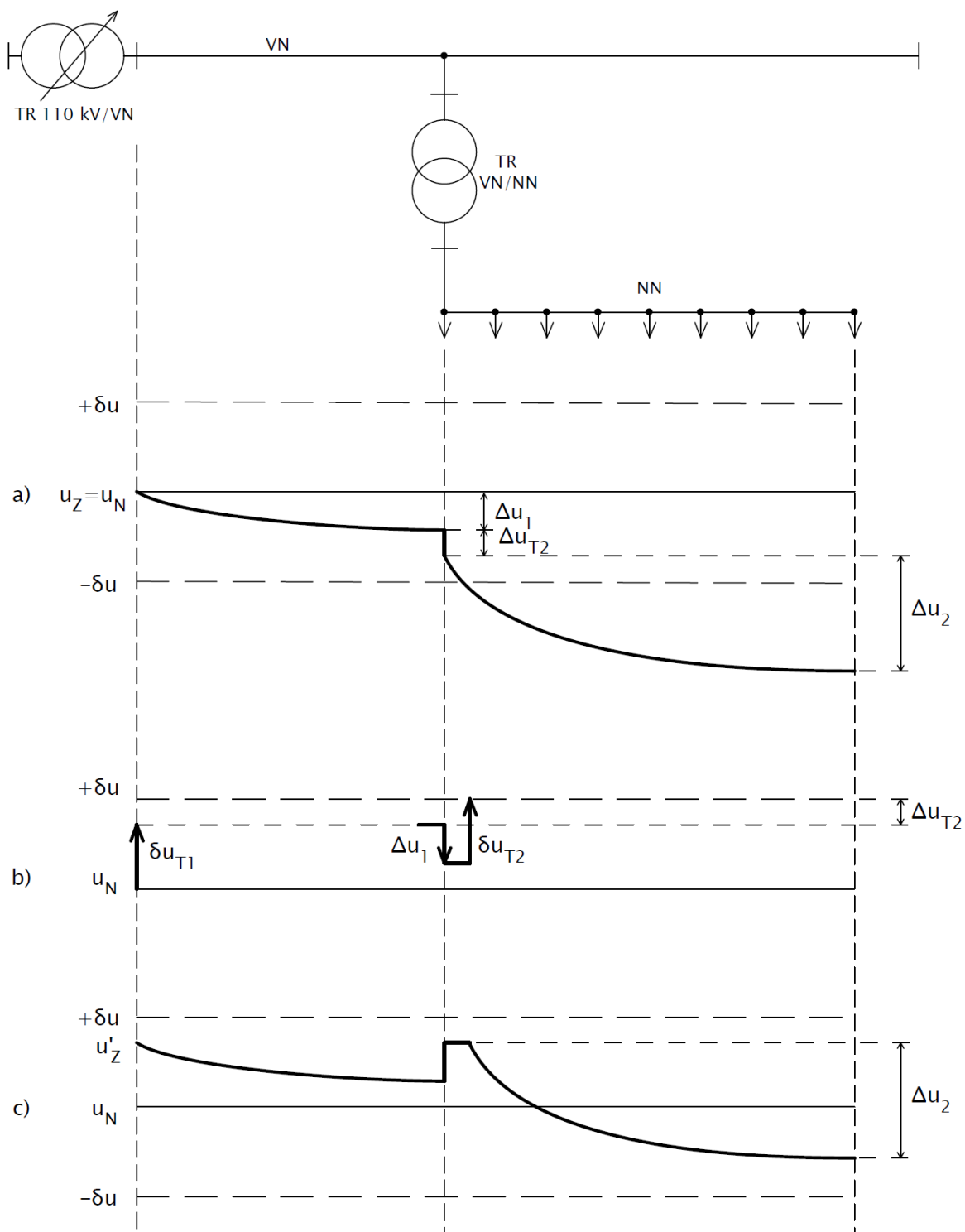
#### 3.1 Koncepce regulace napětí v distribučních sítích

Na Obr. 3.1 je znázorněno zjednodušené schéma distribuční soustavy napájené z uzlu 110 kV/VN. Obr. 3.1a ukazuje případ, kdy je napětí na přípojnicích rovno jmenovitému napětí a ani na dalších prvcích není zvýšeno. To může zapříčinit situaci, ve které je napětí téměř u všech odběratelů v síti NN mimo toleranční meze. Rozdíl vyjadřující odchylku mezi napětím na začátku sítě VN a na konci sítě NN má tři složky:

- úbytek napětí v síti VN, tedy  $\Delta u_1$ ;
- úbytek napětí na transformátoru VN/NN, tedy  $\Delta u_{T2}$ ;
- úbytek napětí v síti NN, tedy  $\Delta u_2$ .

V praxi se proto pro zlepšení průběhu napětí využívá regulace pomocí odbočkových transformátorů (110 kV/VN a VN/NN). Tím lze získat dvojí zvýšení hladiny napětí, tedy  $\delta u_{T1}$  a  $\delta u_{T2}$  (Obr. 3.1b). Křivka se posune dovnitř tolerančního pásma, jak lze pozorovat na Obr. 3.1c.

Ve většině skutečných sítí však tento postup nelze tak jednoduše využít. Napětí musí být v tolerančních mezích ve všech sítích NN při všech režimech zatížení. Regulace je limitována technickou úrovní regulačních prostředků uvedených v kapitole 3.2.



Obr. 3.1 Zjednodušené průběhy napětí pro jeden uzel sítě VN a vývod NN [9]

Úkolem regulace je zajistit s přijatelnými odchylkami přibližně stejné napětí na sekundární straně všech transformátorů VN/NN bez ohledu na jejich umístění či průběh zatížení. [9]

## 3.2 Rozbor prvků DS z hlediska regulace napětí

### 3.2.1 Transformátory 110 kV/VN

Představují poslední možnost změny napětí pod zatížením. Tyto transformátory mají nejčastěji převod naprázdno  $110 \pm 8 \times 2\% / 23$  kV. Jsou vybaveny přepínači odboček a hladinovými regulátory (HRT). Tyto regulátory se starají o udržení konstantního napětí na sekundární straně transformátorů. Pracují s určitou necitlivostí a časovým zpožděním. Necitlivost daného regulátoru musí být větší než regulační krok mezi dvěma odbočkami. Pokud by byla necitlivost nižší nebo nebyla uvažována, docházelo by k neustálému přepínání odboček a tím pádem k rychlému opotřebení přepínače. Díky časovému zpoždění dochází k eliminaci časově krátkých změn napětí, které by také zapříčinily rychlejší opotřebení přepínače. Po nastavení automatického regulátoru je proto nutné provést kontrolu počtu přepnutí. Revizi přepínačů je třeba provádět po překročení výrobcem stanoveného počtu přepnutí. [10]

#### Přepínače odboček pod zatížením

Tyto přepínače jsou používány ke změně převodu transformátoru, který je pod napětím nebo zatížený. Existují přepínače jednofázové i třífázové. Třífázová varianta je řešena jako tři samostatné jednotky. Přepínače mohou být umístěny přímo v nádobě transformátoru nebo mimo ni. Každý přepínač umožňuje tzv. neutrální převod, což je převod při nastavení nulté odbočky.

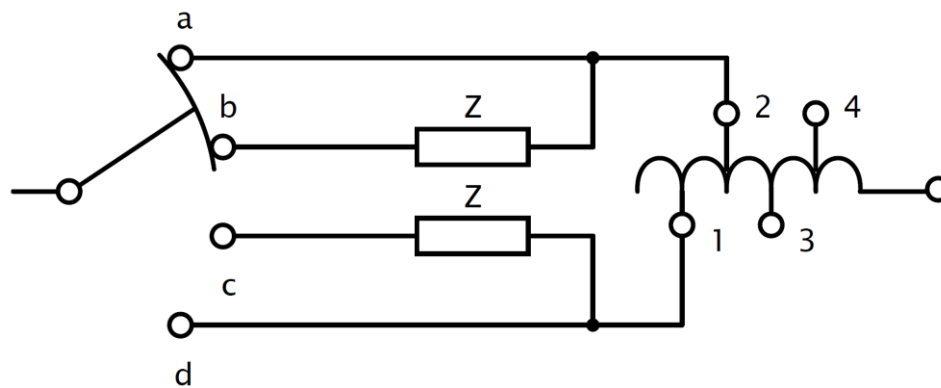
Hlavní částí každého přepínače je výkonový spínač, který provádí přepnutí odbočky bez přerušení proudu a bez zkratování cívky. Toto je možné díky vybavení přepínacími impedancemi, které zabrání zkratu mezi dvěma odbočkami. Tyto impedance mohou být realizovány buď pomocí rezistorů, nebo tlumivek. Ty jsou pak zapojeny do obvodu mezi provozovanou odbočkou a odbočkou zapínanou. Dojde tak k přepnutí odboček bez přerušení či výraznější změny proudu a zároveň se omezí vyrovnávací proud vznikající v čase, kdy jsou spojeny dvě odbočky. [11; 12]

Přepínače odboček pod zatížením lze rozdělit na:

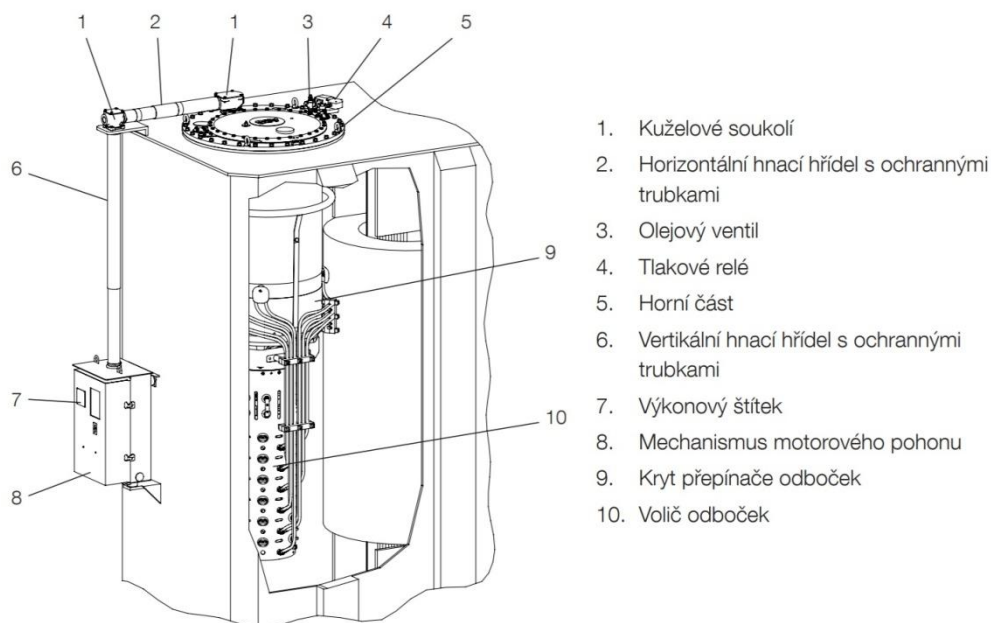
a) přepínače s voličem odboček

Postup přepnutí odbočky:

- ve výchozím stavu je použita 2. odbočka;
- pomocí voliče dojde nejprve k volbě potřebné odbočky;
- výkonový spínač poté přes přepínací impedance přepne mezi odbočkami.



Obr. 3.2 Přepínač odboček pod zatížením – s voličem odboček [11]



Obr. 3.3 Uspořádání přepínače odboček při zatížení – s voličem odboček [13]

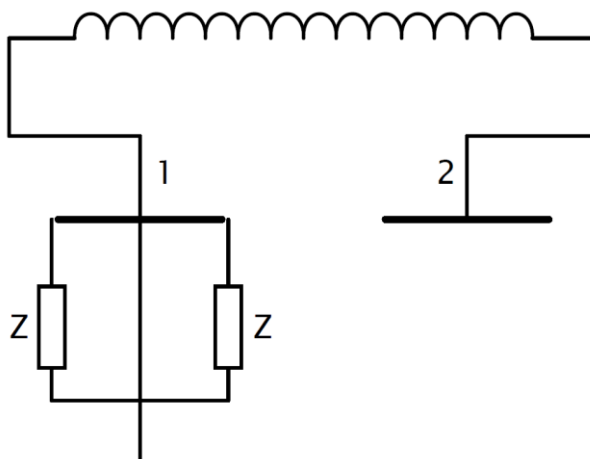
b) přepínače bez voliče odboček:

Schéma je naznačeno pouze pro dvě odbočky.

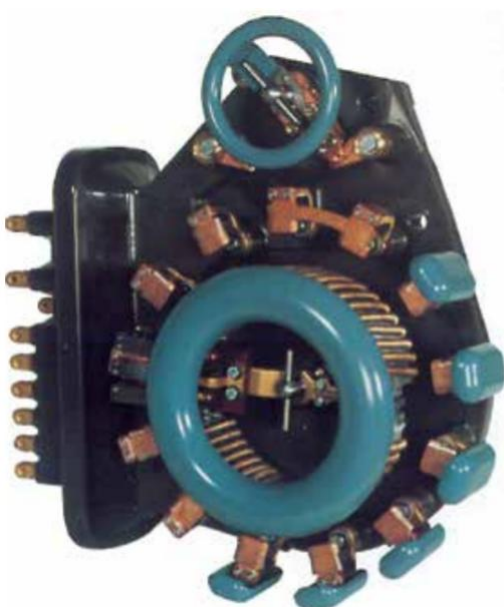
Postup přepnutí odboček:

- ve výchozím stavu je použita 1. odbočka;
- při přechodu z 1. odbočky na 2. dojde nejprve k propojení obou odboček přes přepínací impedanci;
- následně dojde k převzetí proudu 2. odbočkou.





Obr. 3.4 Přepínač odboček pod zatížením – bez voliče odboček [12]



Obr. 3.5 Jedna fáze přepínače odboček pod zatížením – bez voliče odboček [12]

### Automatický regulátor s kompaundací

Proudový transformátor snímá proud procházející transformátorem. Tento proud vytváří úbytek napětí v kompaundační smyčce, ten se odečítá od regulovaného napětí  $u_R$ . Rozdíl se následně porovná se zadanou hladinou napětí  $u_Z$ . Vzniklá regulační odchylka potom nepřímo ovládá přepínač odboček.

$$u_R = u_Z + \frac{I_R}{I_N} \cdot \Delta \quad (\%) \quad (3-1)$$

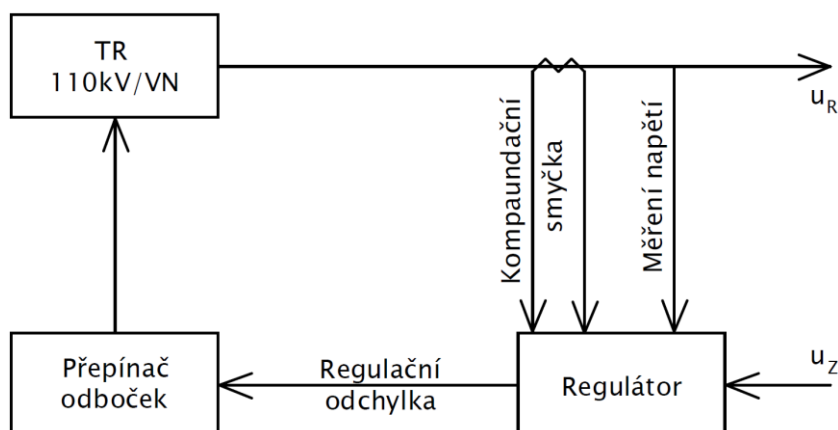
Kde:  $u_Z$  (%) .....zadaná hladina napětí

$I_R$  (A) .....zatížení transformátoru

$I_N$  (A) .....jmenovitý proud transformátoru

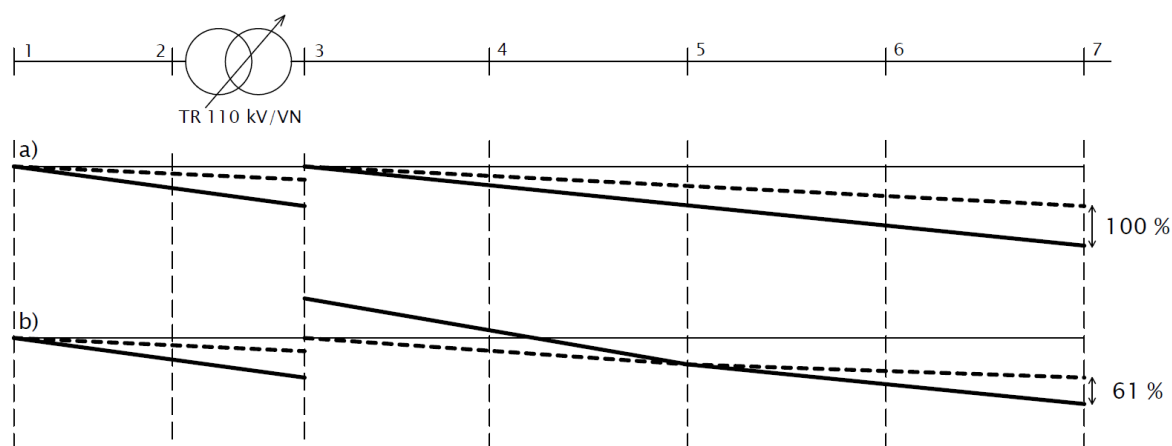
$\Delta$  (%) .....proudová kompaundace

Aby nedocházelo k nadměrnému využívání přepínače, je třeba nastavit nejen časové zpoždění a necitlivost regulátoru, ale také hladinu napětí a proudovou kompaundaci. [10]



Obr. 3.6 Blokové schéma automatického regulátoru s kompaundační smyčkou [10]

Na Obr. 3.7 jsou dvě možnosti regulace napětí s automatickým regulátorem.



Obr. 3.7 Průběhy napětí na vývodu VN [14]

Obr. 3.7a ukazuje v současnosti používanou možnost, tedy regulaci na konstantní napětí v rozvodně VN. Regulační smyčka je kompletní, včetně kompaundace, která je ovšem nastavena na nulovou hodnotu.

Na Obr. 3.7b je znázorněna regulace s kompaundací. Regulátor zde udržuje stálé napětí v charakteristickém bodě, který se volí v místě, kde se předpokládá přibližně poloviční úbytek napětí. Tento způsob se hojně využíval dříve. Dnes se díky ještě zvýšené složitosti nastavení, způsobené vnořenými zdroji, nepoužívá.

### 3.2.2 Distribuční transformátory VN/NN

Distribuční transformátory (DTR) mají nejčastěji převod naprázdno  $22 \pm 2 \times 2,5\% / 0,4$  kV respektive  $22 \pm 2 \times 2,5\% / 0,42$  kV. Jejich odbočky nejsou však přepínatelné pod zatížením. Tudiž jejich přestavení vyžaduje přerušení dodávky elektrické energie. Nastavení odboček by tedy mělo vyhovovat všem provozním stavům. Úbytek napětí na transformátoru se v závislosti na zatížení pohybuje obvykle okolo  $3 \div 4$  %. Toto je respektováno zvýšením sekundárního napětí o přibližně 5 %. [10]

Pokud by bylo v ideálním případě zajištěno napětí na sekundární straně transformátoru na horní toleranční mezi, mohl by být úbytek napětí na síti NN roven celému rozpětí tolerančního pásma. Ve skutečnosti se však musí uvažovat s několika aspekty, které toto napětí posunou níže:

- odbočky distribučních transformátorů lze měnit pouze skokově;
- jednotlivé distribuční transformátory nejsou rovnoměrně zatíženy;
- necitlivost regulátoru transformátoru 110 kV/VN je větší, než jeden stupeň přepínané odbočky (asi 2,5 %) [10].

#### Přepínače odboček bez zatížení

Tyto přepínače jsou používány ke změně převodu transformátoru, který není pod napětím nebo zatížený. Z toho vyplývá, že se tyto transformátory musejí před přepnutím odboček odpojit od sítě. Změnou polohy přepínače se volí převod transformátoru. Přepínač je zpravidla umístěn na straně vyššího napětí. Standardně se dá napětí regulovat v rozsahu  $\pm 5$  % v pěti krocích, tedy po 2,5 % včetně kroku 0 %, který odpovídá neutrálnímu převodu.

Konstrukčně je přepínač řešen jako rotační nebo lineární. [15]



Obr. 3.8 Rotační přepínač odboček bez zatížení [15]



Obr. 3.9 Lineární přepínač odboček bez zatížení [15]

### 3.2.3 Výrobní

Dalším prvkem jsou připojované výrobní elektrické energie do sítě. Každá nově připojovaná výrobní musí dle [16] splnit podmínky pro připojení. Za normálních provozních podmínek nesmí v přípojném bodě dojít ke zvýšení napětí, vyvolané provozem výroben, nad stanovenou mez. Toto se porovnává s napětím bez připojení těchto výroben. Současně platí i limity napětí stanovené [4]. Pro výrobní připojené do sítí VN a 110 kV musí platit:  $\Delta u \leq 2 \%$ . Pro výrobní připojené do sítí NN musí platit:  $\Delta u \leq 3 \%$ .

Při náhradních dodávkách, tedy mimořádném zapojení sítě, nesmí provoz připojených výroben, případně připojování nebo odpojování jednotlivých generátorů v nejméně příznivém případě způsobit zvýšení napětí o více než 5 %. Toto platí pro výrobní připojené do sítí VN a v porovnání s napětím bez jejich připojení. Dále musí být tento předpoklad splněn zároveň s podmínkou pro normální provoz.

K zajištění bezpečného a spolehlivého provozu za normálních podmínek i při přechodných stavech je vyžadováno sjednocení technických parametrů i požadavků na chování výroben. Proto vzniklo NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2016/631. Zde jsou dle jmenovitých činných výkonů definovány třídy výrobních modulů A až D. [16]

Tab. 3.1 Výkonové kategorie výrobních modulů [16; 17]

Kategorie výrobního modulu	Limit	Podkategorie	Hranice provozovatele DS	Nejvýznamnější požadavky
A	800 W	A1	$\geq 800 \text{ W};$ $\leq 11 \text{ kW}$	dle čl. 13 [17]
		A2	$> 11 \text{ kW};$ $< 100 \text{ kW}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• komunikace s řídicím systémem provozovatele DS</li> <li>• snížení činného výkonu</li> <li>• regulace U/Q s dálkovým zadáváním</li> <li>• dále dle čl. 13, 14.2÷14.5, 20 [17]</li> </ul>
B	1 MW	B1	$\geq 100 \text{ kW};$ $< 1 \text{ MW}$	dle čl. 14, 17, 20 [17]
		B2	$\geq 1 \text{ MW};$ $< 30 \text{ MW}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zvýšení P při podfrekvenci</li> <li>• rozšířený P-Q diagram</li> <li>• dále dle čl. 14, 15.2÷15.5, 15.6a÷c, 17, 18, 21 [17]</li> </ul>
C	50 MW	C	$\geq 30 \text{ MW};$ $< 75 \text{ MW}$	dle čl. 15, 18, 21 [17]
D	75 MW	D	$\geq 75 \text{ MW}$	dle čl. 16, 19, 22 [17]

Výkonové limity neurčují přímo napěťovou hladinu, do které daná výrobní pracuje. Dle čl. 5 [17] platí pro skupinu A až C, že napětí v místě připojení je nižší než 110 kV. Pro skupinu D potom platí, že napětí v místě připojení je 110 kV nebo vyšší.

Výrobní musejí být schopny podílet se na udržování napětí. Rozlišuje se statická a dynamická podpora sítě.

- a) Statická podpora sítě: udržování napětí ve smluvně stanovených mezích za normálního provozu a při pomalých změnách napětí. Provozovatel distribuční soustavy může uplatnit požadavek na statické řízení napětí pomocí jalového výkonu, a to v rozsahu 0,9 kapacitní až 0,9 induktivní.
- b) Dynamická podpora sítě: výrobní musejí být schopné zůstat připojené i při poklesech napětí způsobených poruchami v síti (všemi druhy zkratů). [16]

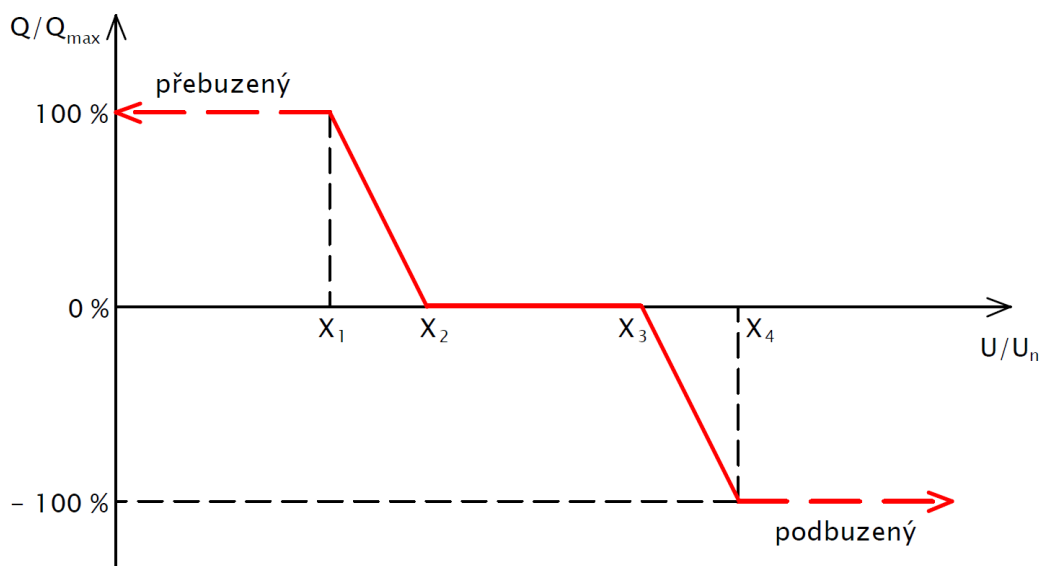
### Řízení jalového výkonu

Provozovatel distribuční soustavy po konzultaci s provozovatelem výrobní stanoví způsob řízení jalového výkonu. Toto se týká výroben od instalovaného výkonu 100 kVA. Provozovatel distribuční soustavy zadává buď pevnou, nebo dálkově nastavitelnou hodnotu. Touto hodnotou může být:

- a) pevná hodnota jalového výkonu ..... Q;
- b) hodnota jalového výkonu závislá na napětí ..... Q (U);
- c) hodnota jalového výkonu závislá na činném výkonu ..... Q (P);
- d) pevná hodnota účinníku .....  $\cos \varphi$ ;
- e) hodnota účinníku závislá na napětí .....  $\cos \varphi$  (U);
- f) hodnota účinníku závislá na činném výkonu .....  $\cos \varphi$  (P);
- g) zadaná hodnota napětí ..... U.

Charakteristická křivka (Obr. 3.10) musí být nastavitelná. Dle místních síťových podmínek určuje příslušné nastavení provozovatel distribuční sítě. Na svislé ose je poměr dodávaného/odebraného jalového výkonu a maximální hodnoty jalového výkonu. Na vodorovné ose je poměr měřené hodnoty napětí v místě připojení výrobní a jmenovité hodnoty napětí.

- a) Bod X<sub>1</sub>:  $U/U_n < 1$  ..... maximální dodávaný Q pro zvýšení napětí;
- b) Bod X<sub>2</sub>:  $U/U_n < 1$  ..... počáteční hodnota pro dodávku Q pro zvýšení napětí;
- c) Bod X<sub>3</sub>:  $U/U_n > 1$  ..... počáteční hodnota pro odběr Q pro snížení napětí;
- d) Bod X<sub>4</sub>:  $U/U_n > 1$  ..... maximální odebíraný Q pro snížení napětí. [16]



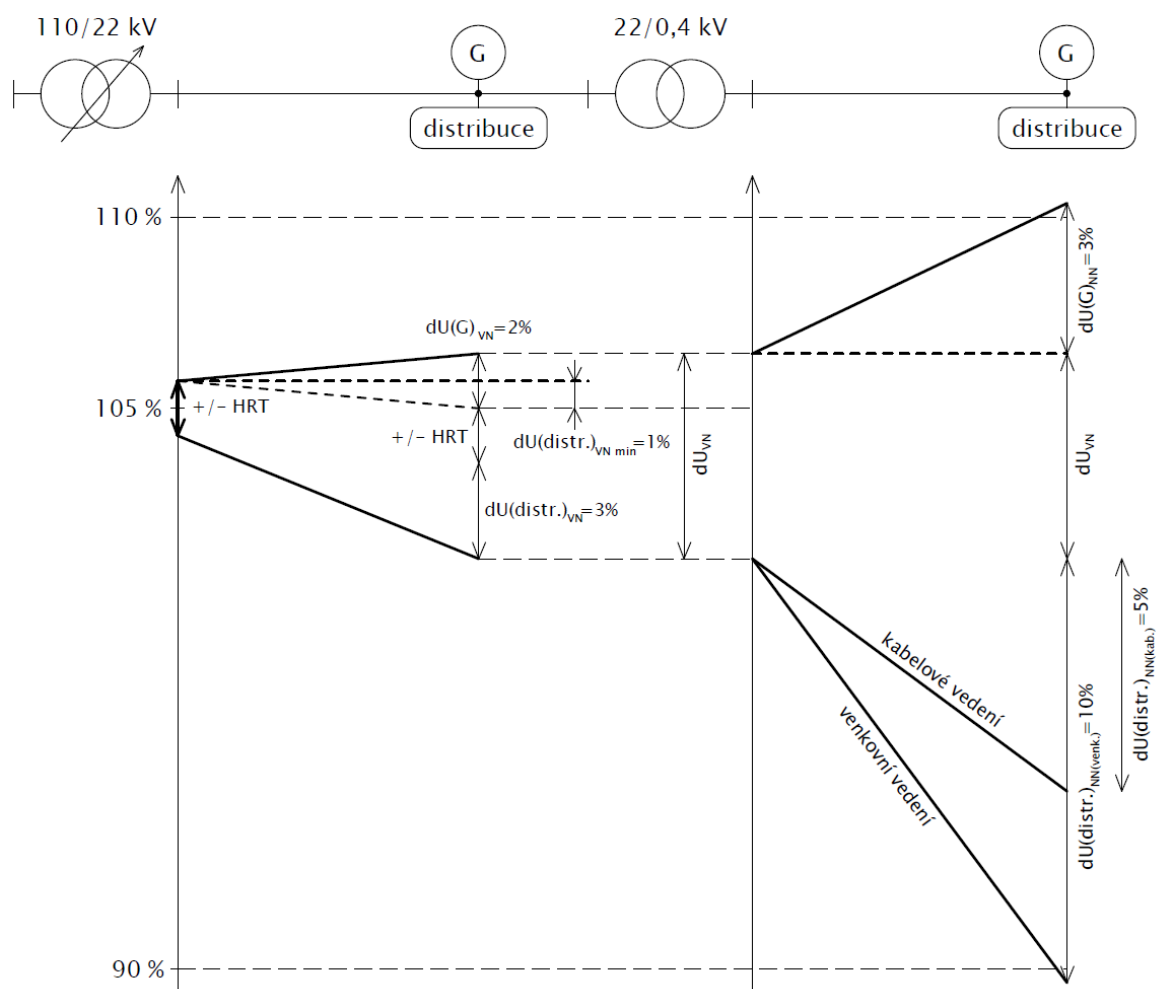
Obr. 3.10 Charakteristika funkce  $Q(U)$  [16]

### 3.3 Napěťový profil v DS s vnořenými zdroji

V předchozích kapitolách byly uvažovány případy bez vnořených zdrojů. Tudiž napětí směrem od sítě VN ke konci sítě NN klesalo, pomineme-li regulaci na transformátorech. V posledních letech se do distribučních sítí ve velkém počtu připojují zdroje, a to zejména fotovoltaické. Jde o zdroje o velikosti několika kW, ale i několika desítek MW. Tyto zdroje potom více rozevírají tzv. „napěťové nůžky“ (Obr. 3.11). U kabelových vedení jsou díky menší reaktanci méně rozevřené. Poměry v síti NN jsou dány nastavenou odbočkou na transformátoru VN/NN. V extrémních případech zde může nastat možnost, kdy bude napětí mimo dovolené toleranční meze, tedy  $\pm 10\%$ .

Tomuto lze zabránit:

- a) přísnější regulací  $Q(U)$  – zmenšení rozpětí v síti VN (v síti NN jsou v převážné většině střešní instalace – nedají se řídit);
- b) dynamickým řízením HRT – regulace dle nejkrizovějšího bodu sítě – složité;
- c) sezónní regulací napětí (dle např. letního a zimního provozu);
- d) nasazením transformátorů VN/NN regulovatelných pod zatížením – drahé.



Obr. 3.11 Napěťové nůžky [18]

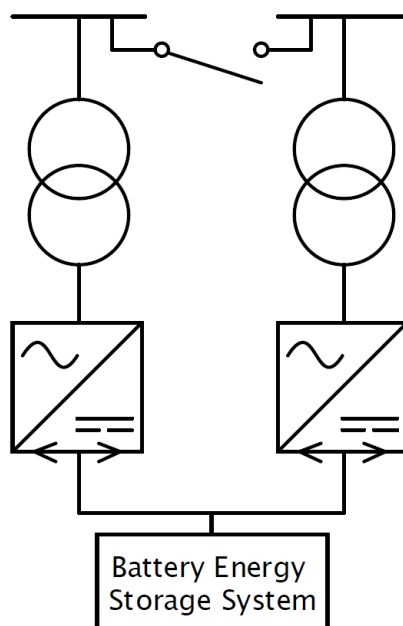
### 3.4 Alternativní možnosti regulace napětí v DS

Ve světě proběhla a probíhá celá řada studií zkoumajících možnosti regulace napětí v distribučních sítích. Tato kapitola přináší pohled na dvě takovéto studie.

#### 3.4.1 Regulace napětí v DS s velkým množstvím obnovitelných zdrojů

První ze zmiňovaných studií [19] se zabývá regulací napětí v distribučních sítích s velkou koncentrací obnovitelných zdrojů energie (OZE). Je zde porovnávána běžně používaná koncepce s navrhovanou koncepcí. Tato nová koncepce využívá tzv. inteligentních uzlů, které přináší možnost řízení toků činného výkonu. Vstřik či spotřeba činného výkonu ovlivňuje napěťové profily v sítích VN. Toto je způsobeno impedančním poměrem  $R/X \cong 1$ .

Topologie inteligentních uzlů je složena ze dvou antiparalelně spojených PWM měničů. Na jejich stejnosměrné straně je připojen systém baterií.



Obr. 3.12 Topologie inteligentních uzlů [19]

Regulace probíhá prioritně pomocí přepínače odboček transformátoru 110 kV/VN. Teprve v případě neúspěšného pokusu přichází na řadu tzv. inteligentní uzel. Ten poté jedním ze šesti pracovních režimů provede potřebnou operaci vedoucí k dodržení požadované úrovně napětí. Nutno podotknout, že tzv. inteligentní uzly jsou zde nasazovány do předem určených uzlů sítě a nejsou tedy přímo součástí vybavení rozvodny.

V této studii došli její autoři k zajímavým výsledkům. Nejenže došlo k omezení kolísání napětí, ale také došlo k 75 % poklesu počtu přepnutí odboček při nárůstu kapacity OZE o 52 %. [19]

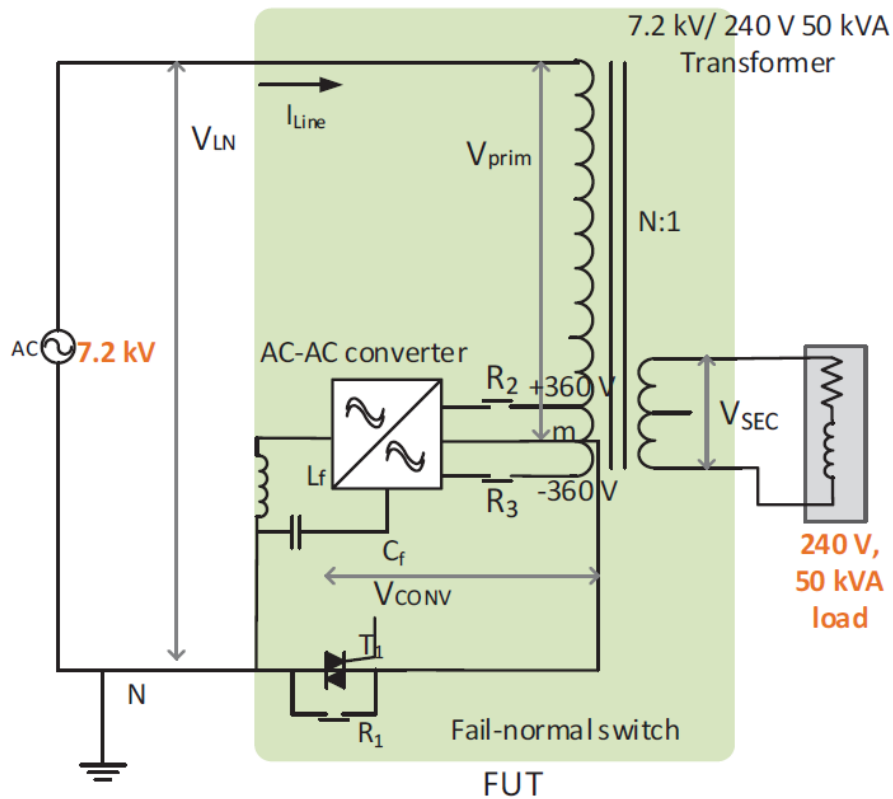
### 3.4.2 Distribuční transformátor s AC/AC měničem

V další studii [20] se autoři zabývali myšlenkou kombinace AC/AC měniče a distribučního transformátoru regulovatelného pod zatížením. Měnič má za úkol regulaci napětí na primární straně. Funguje napříč všemi odbočkami a díky vhodnému zapojení dokáže napětí snižovat i zvyšovat. Referenční hodnota může být nastavena přímo v řídicí jednotce nebo může být řízena dálkově.

Funkce celého zařízení je zde ověřena pomocí simulačních i experimentálních výsledků. Díky sledování napětí v uzlu dokáže zařízení pružně reagovat na kolísání napětí, a tak ho omezovat. [20]



Dle mého názoru by se mělo provést zkoumání vzniku a vlivu vyšších harmonických, které se díky tomuto zařízení dostanou do sítě. Uvedené filtry se zdají být nedostatečné.



Obr. 3.13 Schéma distribučního transformátoru s AC/AC měničem [20]

## **4 Vyhodnocení možností regulace napětí v sítích E.ON**

Během posledních více jak dvaceti let došlo díky harmonizaci v rámci EU ke sjednocení napěťových hladin. Toto sjednocení proběhlo na základě převzetí evropských norem. Jmenovitě se jednalo o normu ČSN IEC 38, která byla nahrazena normou ČSN 33 0120, jež byla později nahrazena normou ČSN EN 60 038. V důsledku této harmonizace došlo k významné změně na hladině NN, tedy ke zvýšení napětí z původních 220/380 V na dnešních 230/400 V. Změna byla respektována postupnými změnami tolerance napětí.

Jako zdroj je na hladině NN chápán distribuční transformátor. Na území spravovaném společností E.ON se používal transformátor s převodem 22/0,4 kV, který je postupně nahrazován transformátorem s převodem 22/0,42 kV. Životnost distribučních transformátorů je až 40 let. Proto z důvodu relativně krátkého období přechodu na nové jmenovité hodnoty došlo ke zvýšení úrovně napětí i na hladině VN. Konkrétně na území bývalé Jihočeské energetiky (JČE), dnes E.ON západ, se používá hladina 23,1 kV. Na území bývalé Jihomoravské energetiky (JME), dnes E.ON východ, se používá hladina 22,8 kV.

V polovině roku 2015 byl vydán interní prováděcí pokyn společnosti E.ON „Pravidla pro řízení napětí v DS NN“ ECZR-PP-DS-175 [21]. Zde je stanovena maximální doporučená hodnota napětí v rozvaděči distribuční trafostanice při stavu transformátoru naprázdno na  $U_{MAX}=244$  V. Tato hodnota byla určena s přihlédnutím k bezpečnostní rezervě od hodnoty maximálního napětí stanovené v [4]. V potaz byl brán i možný výskyt zdrojů v síti NN, jež mohou dle [16] zvyšovat napětí až o 3 %  $U_N$ . Rezerva pro necitlivost HRT a možné zvýšení napětí od zdrojů v síti VN je zahrnuta v předpokladu měření zvoleného napětí ve stavu distribučního transformátoru naprázdno. Tedy za běžného provozu sítě VN.

V současné době není možné na celém území spravovaném společností E.ON dodržet meze požadované ve zmiňovaném prováděcím pokynu. Proto za účelem určení budoucí jednotné hladiny napětí HRT a jednotného převodu používaných distribučních transformátorů proběhla mezi lety 2007 a 2017 měřicí kampaň. Naměřená data slouží jako podklad pro rozbor daného problému.

## 4.1 Naměřená data

Měření byla provedena na sekundárních stranách transformátorů 110/23 kV (161 měření kvality napětí) i na koncích vývodů 22 kV (89 měření u velkoodběratelů a výroben VN). Následující rozbor týkající se možností regulace napětí proto bude proveden zvlášť pro místa v blízkosti rozvoden VVN/VN a pro místa na koncích vývodů VN. Tyto dva úhly pohledu zde budou samostatně aplikovány na obě oblasti spravované společností E.ON, tedy E.ON západ a E.ON východ.

Každé měření kvality napětí probíhalo po dobu minimálně jednoho týdne. Ze všech zaznamenaných parametrů byly pro tento rozbor důležité pouze průměrné efektivní hodnoty napětí měřené v desetiminutových intervalech.

Z jednotlivých měření byly vyexportovány záznamy ve formátu ASC, případně TXT. Tyto soubory bylo zapotřebí převést do formátu XLS, respektive XLSX, který je mnohem vhodnější pro další zpracování. Ze všech měření poté byly vyfiltrovány minimální a maximální hodnoty napětí ze všech fází.

Získaná data byla dále zpracována v programu Microsoft Excel. Bylo uvažováno s necitlivostí HRT  $\pm 0,3$  kV v oblasti západ,  $\pm 0,264$  kV v oblasti východ. Tyto hodnoty vycházejí z předpokladu uvedeného v kapitole 3.2.1, kde je uvedeno, že necitlivost regulátoru musí být větší než regulační krok mezi odbočkami. Zde je regulační krok 2 %, což odpovídá 0,44 kV. Ke konkrétním hodnotám se dospělo postupem času. V obou oblastech byla dále zohledněna chyba měřícího řetězce. Na této chybě se podílí měřicí přístroj (s chybou až  $\pm 0,1$  % z  $U_N$ ), měřicí transformátor (s chybou až  $\pm 0,5$  % z  $U_N$ ) a měřicí převodník (s chybou až  $\pm 0,5$  % z  $U_N$ ). Pravděpodobnost, že všechny chyby budou ve svém plusovém, respektive minusovém maximu, je velmi malá. Proto byla určena hodnota  $\pm 0,2$  kV.

K jednotlivým rozvodnám a vývodům byly přiřazeny příslušné minimální a maximální hodnoty. Dále byly vyhodnocovány pouze hodnoty maximální. Minimální hodnoty jsou s nimi svázány úbytkem napětí v síti VN a nejsou z hlediska provozu sítě NN problematické. Tyto hodnoty byly poté přepočteny na hladinu NN pomocí převodů obou používaných distribučních transformátorů. Zmíněné převody uvádí Tab. 4.1. Z této tabulky je patrné, že na transformátoru s převodem 22/0,4 kV můžeme volit odbočky symetricky od jmenovité hodnoty. Lze napětí jak snižovat, tak zvyšovat, a to s krokem 2,5 % na rozsahu 95÷105 %. Na rozdíl od toho transformátor s převodem 22/0,42 kV umožňuje napětí pouze udržovat na 100 % nebo zvyšovat až na 110 % se stejným krokem.

Tab. 4.1 Regulační možnosti používaných distribučních transformátorů

	Odbočka (%)	Převod odbočky (-)	Sekundární napětí odbočky (%)	Odbočka (%)	
Transformátor 22±2x2,5%/0,4 kV	-	49,76	110,0	-5	Transformátor 22±2x2,5%/0,42 kV
	-	51,07	107,5	-2,5	
	-5	52,38	105,0	0	
	-2,5	53,63	102,5	+2,5	
	0	55,00	100,0	+5	
	+2,5	56,38	97,5	-	
	+5	57,75	95,0	-	

Na základě kritérií popsanych níže pak byla určena vhodnost jednotlivých odboček těchto transformátorů.

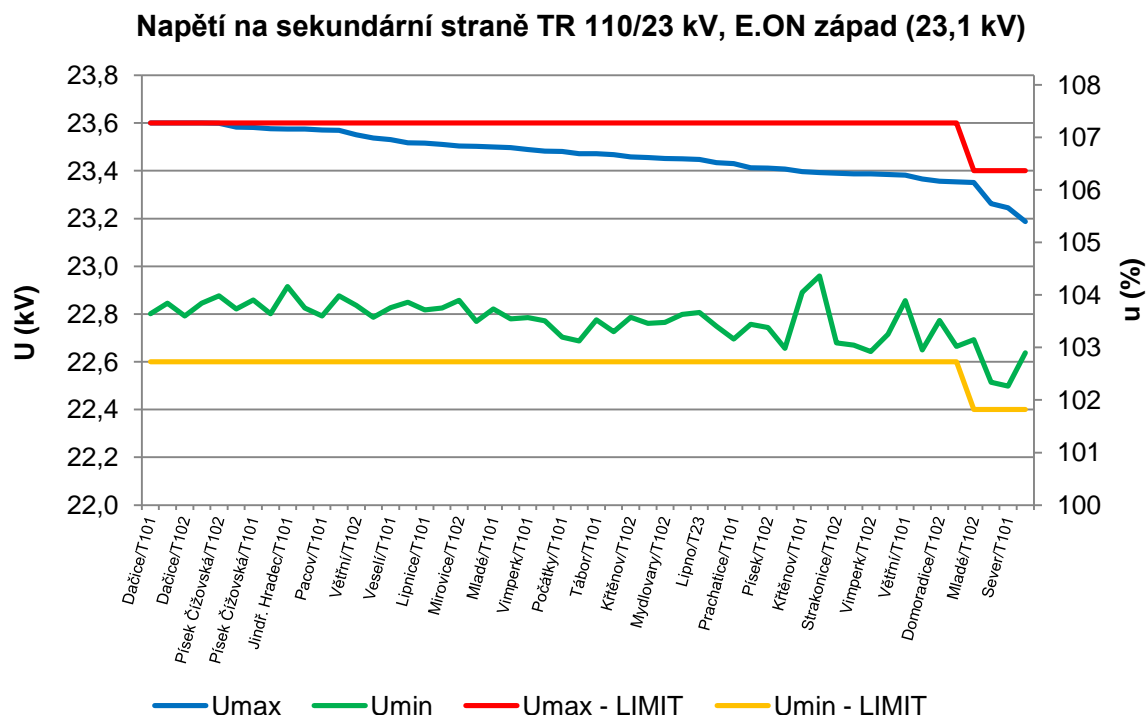
Pro úplnost je nutno podotknout, že hodnota 244 V platí pro transformátor ve stavu naprázdno, měření však probíhala za standardního provozu sítě. Maximální napětí však odpovídají nejméně zatížené síti. K tomuto dochází v noci, kdy je síť téměř nezatížena.

## 4.2 Rozbor možností regulace napětí v oblasti E.ON západ

Jak již bylo uvedeno, v této oblasti se používá hladina 23,1 kV. Měření v blízkosti rozvoden bylo provedeno na sekundární straně 52 transformátorů 110/23 kV. Měření na koncích vývodů VN bylo provedeno na 45 místech.

### 4.2.1 Možnosti regulace napětí v blízkosti rozvoden

Obr. 4.1 ukazuje výsledky měření na transformátorech 110/23 kV v oblasti E.ON západ. Křivky  $U_{max}$  a  $U_{min}$  jsou maximální a minimální desetiminutové průměrné hodnoty během doby měření. Křivky  $U_{max-LIMIT}$  a  $U_{min-LIMIT}$  jsou dány mezními hodnotami, tedy 23,1 kV ±0,3 kV necitlivost HRT a ±0,2 kV chyba měřicího řetězce. U posledních čtyřech měření jsou tyto limity sníženy. Snížení vyplývá z použití nižší hladiny HRT, a to 22,9 kV.



Obr. 4.1 Výsledky měření na transformátorech 110/23 kV v oblasti E.ON západ

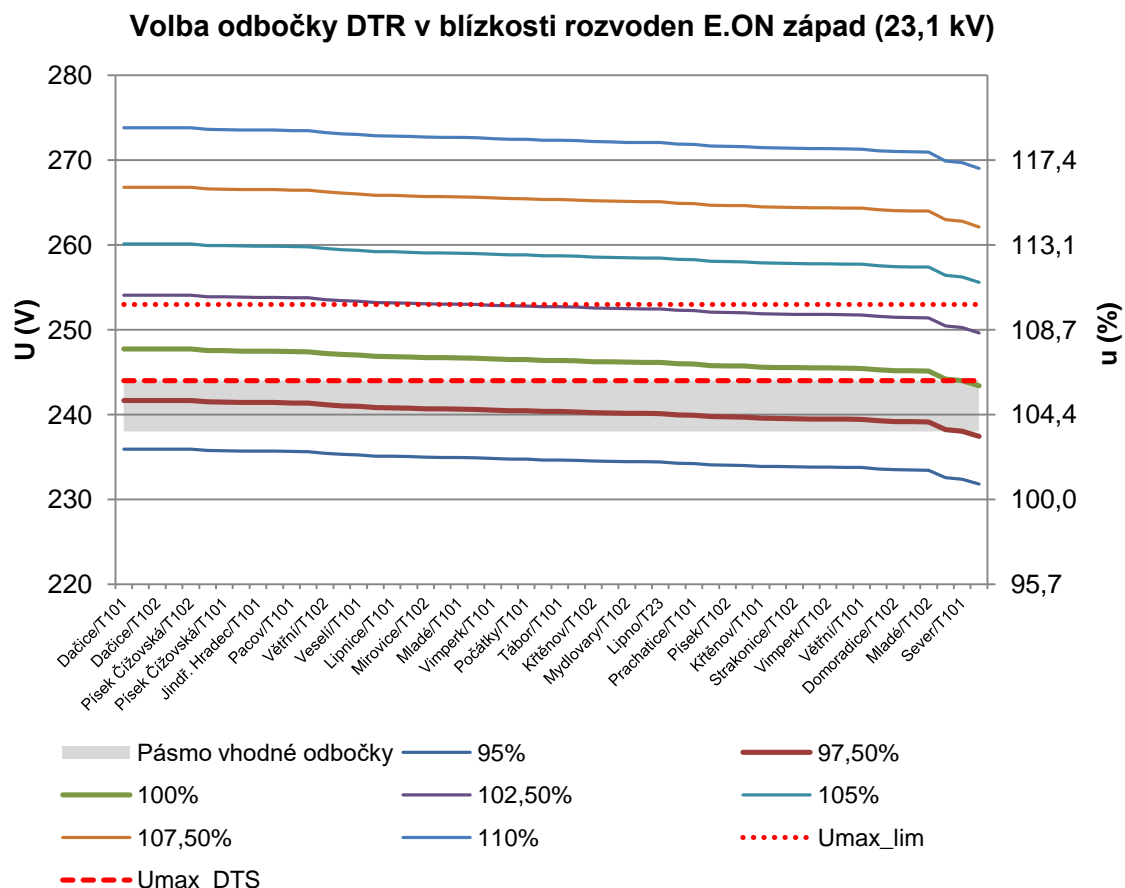
Na Obr. 4.2 jsou zobrazeny vypočtené regulační možnosti obou používaných distribučních transformátorů. Křivky 95 % až 110 % vznikly přepočtem měřené křivky  $U_{max}$  z Obr. 4.1. Přepočet byl proveden na základě rovnice (4-1).

$$U_f^{NN} = \frac{U_S^{VN}}{p \cdot \sqrt{3}} \quad (4-1)$$

Kde:  $U_f^{NN}$  (V).....fázové napětí na straně NN distribučního transformátoru  
 $U_S^{VN}$  (V)....sdužené napětí na straně VN distribučního transformátoru  
 $p$  (-) .....převod dané odbočky, dle Tab. 4.1

Ze změřených sdužených napětí na hladině VN tak vzešly fázové hodnoty přepočtené na hladinu NN pro všechny odbočky obou používaných distribučních transformátorů.

Křivka  $U_{max} - lim$  vychází z [4], tedy 230 V +10 %. Křivka  $U_{max} - DTS$  vychází z prováděcího pokynu [21], tedy 244 V.



Obr. 4.2 Vypočtené regulační možnosti distribučních transformátorů 22/0,42 kV a 22/0,4 kV v blízkosti rozveden E.ON západ

Jak vyplývá z Obr. 4.2, odbočkou 100 %, která je nejnižší možnou odbočkou transformátoru 22/0,42 kV, lze se splněním požadavku z [21] pokrýt pouze 1,9 % území v blízkosti rozveden v oblasti západ. Zbytek, tedy 98,1 %, tomuto požadavku nevyhoví. Napětí v této zbývající části by se pohybovalo v rozmezí 244÷248 V.

Na Obr. 4.2 je rovněž znázorněno pásmo vhodné odbočky. Šíře tohoto pásma byla stanovena na 238÷244 V. Hodnota 244 V (~106 %) vychází z prováděcího pokynu [21]. Hodnota 238 V (~103,5 %) vychází z regulačního kroku transformátoru a odpovídá přibližně hodnotě 244 V – 2,5 % z  $U_N$ . Větší rozptýl hodnot by mohl znamenat vhodnost více odboček v jednom sledovaném místě.

Tab. 4.2 Volba optimální odbočky distribučních transformátorů 22/0,42 kV a 22/0,4 kV v blízkosti rozveden E.ON západ

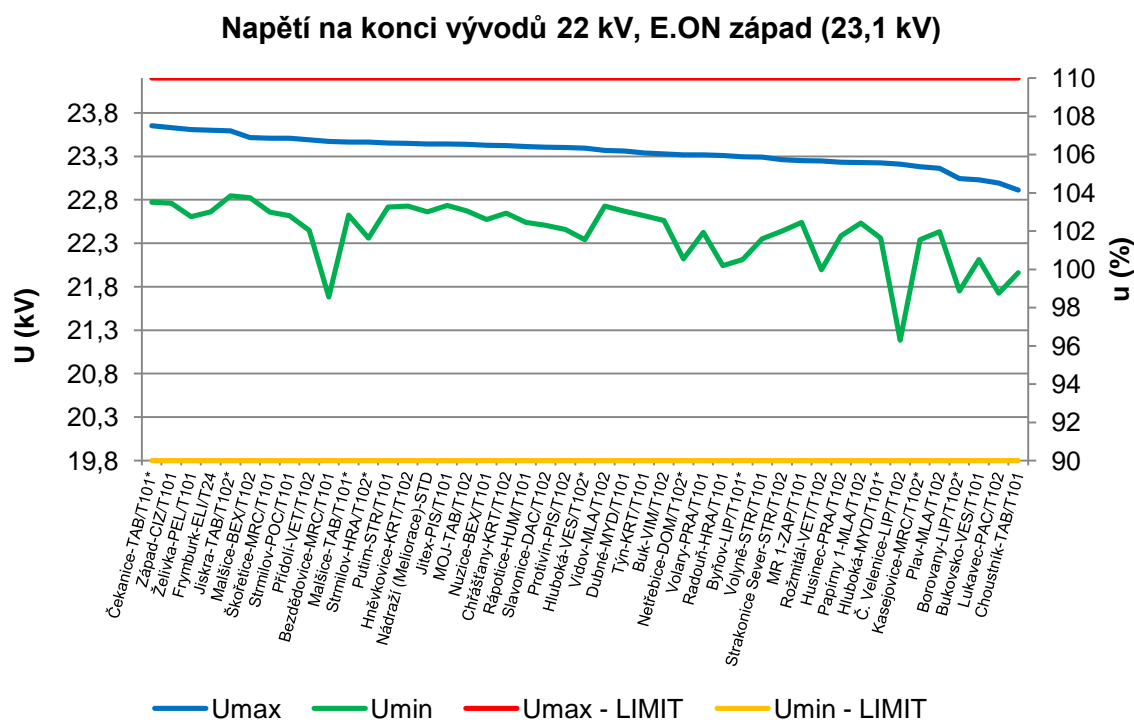
Volba odbočky DTR 22/0,42kV v blízkosti rozveden	
Odbočka (%)	Použitelnost 238V<Umax<244V (%)
110,0	0,0
107,5	0,0
105,0	0,0
102,5	0,0
100,0	1,9

Volba odbočky DTR 22/0,4kV v blízkosti rozveden	
Odbočka (%)	Použitelnost 238V<Umax<244V (%)
105,0	0,0
102,5	0,0
100,0	1,9
97,5	98,1
95,0	0,0

V Tab. 4.2 je názorně vidět, že pro pokrytí 100 % sledovaného území jsou zapotřebí odbočky 97,5 a 100 %. Odbočkou 97,5 % však disponuje pouze transformátor 22/0,4 kV.

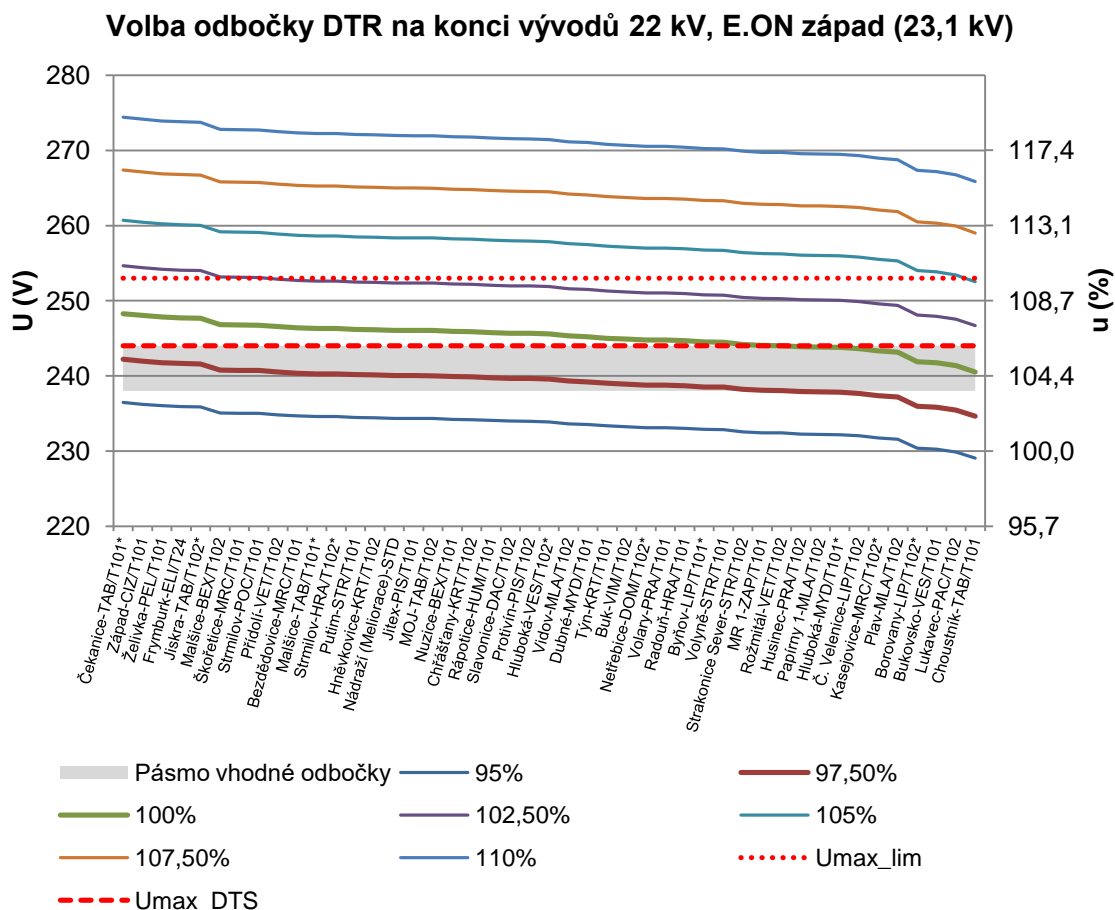
#### 4.2.2 Možnosti regulace napětí na konci vývodů VN

Obr. 4.3 ukazuje výsledky měření na koncích vývodů 22 kV v oblasti E.ON západ. Křivky  $U_{max}$  a  $U_{min}$  jsou maximální a minimální desetiminutové průměrné hodnoty během doby měření. Křivky  $U_{max} - LIMIT$  a  $U_{min} - LIMIT$  vycházejí z [4], tedy  $22 \text{ kV} \pm 10 \%$ .



Obr. 4.3 Výsledky měření na konci vývodů 22 kV v oblasti E.ON západ

Na Obr. 4.4 jsou zobrazeny vypočtené regulační možnosti obou používaných distribučních transformátorů. Křivky 95 % až 100 % vznikly přepočtem měřené křivky  $U_{max}$  z Obr. 4.3 pomocí rovnice (4-1). Limitní křivky  $U_{max} - lim$  a  $U_{max} - DTS$  vycházejí z předpokladů popsanych v kapitole 4.2.1.



Obr. 4.4 Vypočtené regulační možnosti distribučních transformátorů 22/0,42 kV a 22/0,4 kV na konci vývodů 22 kV v oblasti E.ON západ

Jak vyplývá z Obr. 4.4, nejnižší odbočkou transformátoru 22/0,42 kV, tedy 100 %, lze dle [21] pokrýt pouze 22,2 % území na konci vývodů 22 kV. Zbytek, tedy 77,8 %, zmíněnému kritériu nevyhovuje. Napětí této zbývající části by se pohybovalo přibližně mezi 244 a 248 V.

Šíře pásma vhodné odbočky byla určena dle kritérií popsanych v kapitole 4.2.1.

Tab. 4.3 Volba optimální odbočky distribučních transformátorů 22/0,42 kV a 22/0,4 kV na konci vývodů 22 kV v oblasti E.ON západ

Volba odbočky DTR 22/0,42kV na konci sítě		Volba odbočky DTR 22/0,4kV na konci sítě	
Odbočka (%)	Použitelnost 238V<Umax<244V (%)	Odbočka (%)	Použitelnost 238V<Umax<244V (%)
110,0	0,0	105,0	0,0
107,5	0,0	102,5	0,0
105,0	0,0	100,0	22,2
102,5	0,0	97,5	77,8
100,0	22,2	95,0	0,0

Tab. 4.3 názorně ukazuje, že pro pokrytí sledovaného území jsou zapotřebí odbočky 97,5 % a 100 %. První zmiňovanou však disponuje pouze transformátor 22/0,4 kV.



### 4.2.3 Možnosti regulace napětí v celé oblasti E.ON západ

Pokud lze najít vhodné odbočky pro začátky i konce vývodů, dá se předpokládat jejich vhodnost i kdekoli podél daných vývodů.

Použitelnost jednotlivých odboček v celé síti lze vyhodnotit dle Tab. 4.4. Zde je patrné, že pro pokrytí celého sledovaného území jsou nejvhodnější odbočky 97,5 % a 100 %.

Tab. 4.4 Volba optimální odbočky distribučních transformátorů 22/0,42 kV a 22/0,4 kV v celé síti VN v oblasti E.ON západ

Volba optimální odbočky transformátoru 22±2x2,5%/0,42 kV v celé síti VN		
Odbočka (%)	Opt. odbočka v blízkosti rozveden (%)	Opt. odbočka na konci sítě (%)
110	0	0
107,5	0	0
105	0	0
102,5	0	0
100	1,9	22,2

Volba optimální odbočky transformátoru 22±2x2,5%/0,4 kV v celé síti VN		
Odbočka (%)	Opt. odbočka v blízkosti rozveden (%)	Opt. odbočka na konci sítě (%)
105	0	0
102,5	0	0
100	1,9	22,2
97,5	98,1	77,8
95	0	0

Na transformátoru 22/0,42 kV nelze v celém sledovaném území nastavit vhodnou odbočku. Tímto transformátorem je možné pokrýt pouze malou část celé sítě. Transformátor poskytuje čtyři volné odbočky pro zvýšení napětí, nicméně při jejich použití by byli překročeny limity dané [4; 21].

Dle výše uvedeného by v oblasti E.ON západ stačilo využívat pouze transformátory s převodem 22/0,4 kV s tím, že poskytují rezervní možnosti jak pro zvýšení, tak pro snížení napětí.

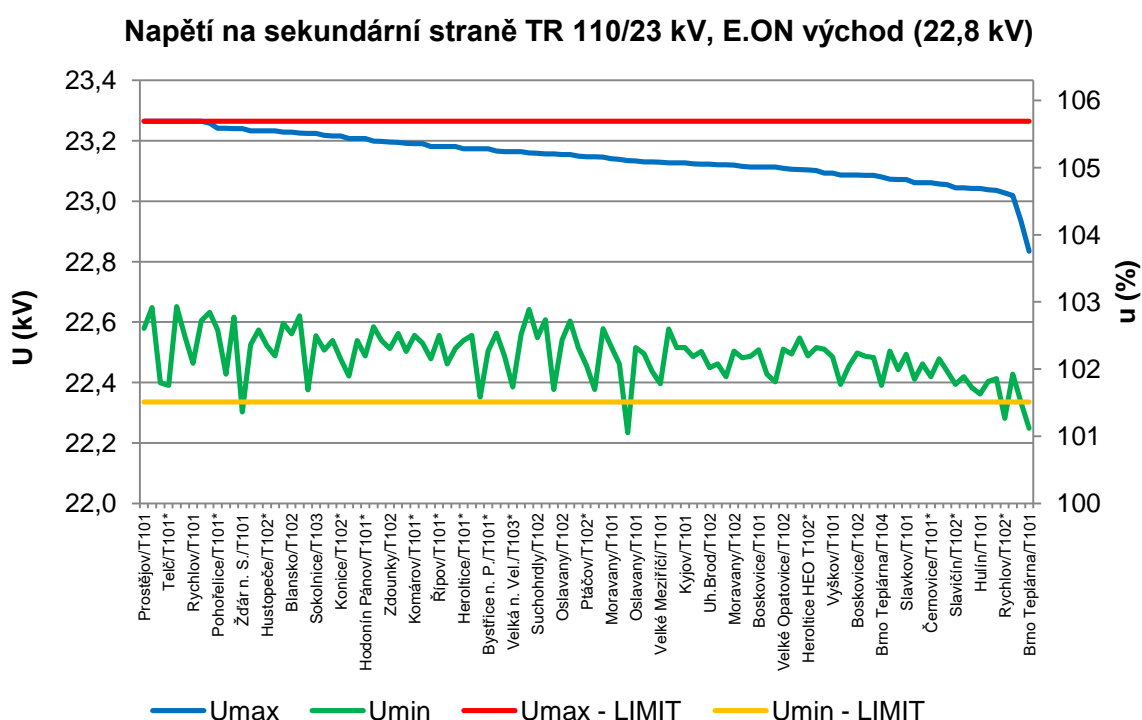
### 4.3 Rozbor možností regulace napětí v oblasti E.ON východ

V této oblasti se využívá hladina 22,8 kV. Měření v blízkosti rozveden bylo provedeno na sekundární straně 109 transformátorů 110/23 kV. Měření na koncích vývodů VN bylo provedeno na 44 místech.

#### 4.3.1 Možnosti regulace napětí v blízkosti rozveden

Na Obr. 4.5 jsou znázorněny výsledky měření na sekundárních stranách transformátorů 110/23 kV v oblasti E.ON východ. Křivky  $U_{max}$  a  $U_{min}$  reprezentují maximální a minimální desetiminutové průměrné hodnoty během doby měření.

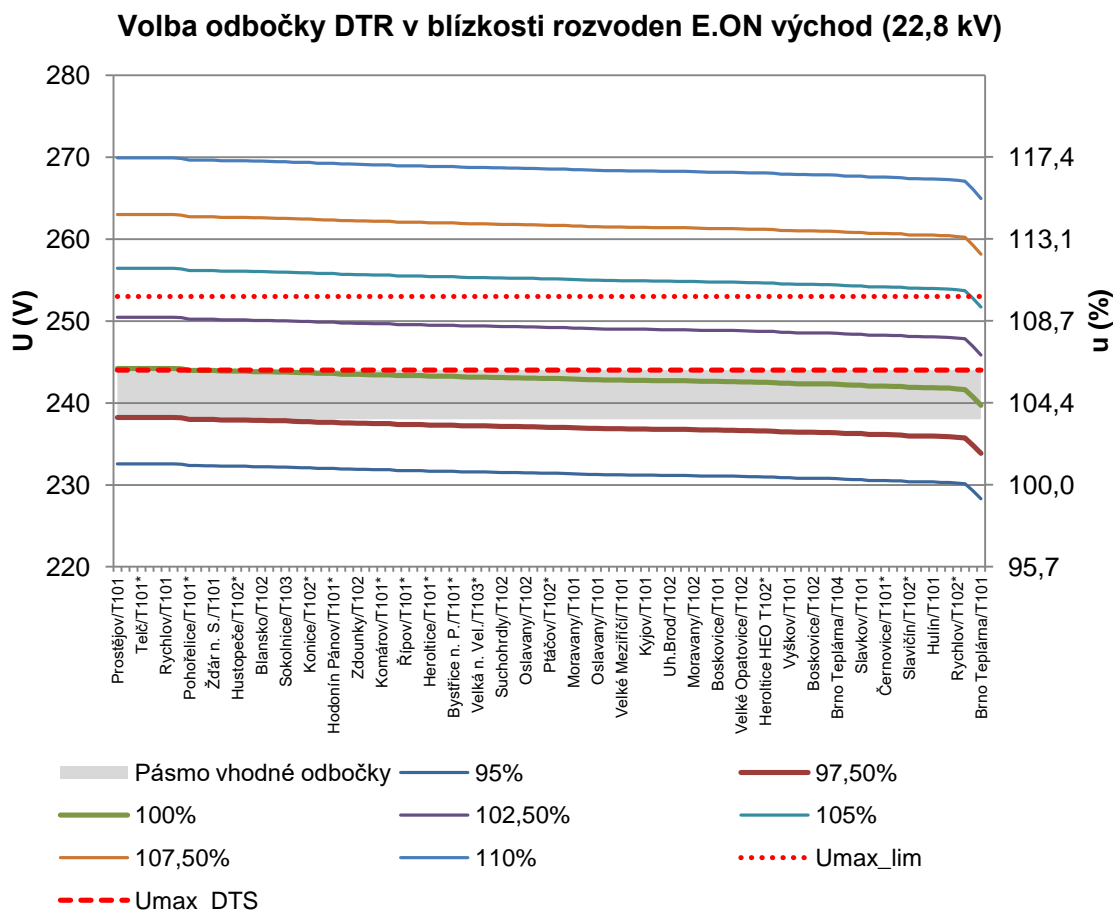
Křivky  $U_{max} - LIMIT$  a  $U_{min} - LIMIT$  jsou dány mezními hodnotami, tedy 22,8 kV  $\pm 0,264$  kV necitlivost HRT a  $\pm 0,2$  kV chyba měřicího řetězce. Poklesy pod spodní hranici jsou s největší pravděpodobností způsobeny zvýšenou chybou měření.



Obr. 4.5 Výsledky měření na transformátorech 110/23 kV v oblasti E.ON východ

Obr. 4.6 ukazuje vypočtené regulační možnosti obou používaných distribučních transformátorů. Křivky odpovídající jednotlivým odbočkám vznikly přepočtem měřené křivky  $U_{max}$  z Obr. 4.5 dle rovnice (4-1).

Předpoklady, z nichž vycházejí limitní křivky a pásmo vhodné odbočky, jsou popsány v kapitole 4.2.1.



Obr. 4.6 Vypočtené regulační možnosti distribučních transformátorů 22/0,42 kV a 22/0,4 kV v blízkosti rozveden E.ON východ

Z Obr. 4.6 vyplývá, že odbočkou 100 %, která je zároveň nejnížší odbočkou transformátoru 22/0,42 kV, lze se splněním požadavku z [21] pokrýt 91,7 % sledovaného území. Ve zbytku tohoto území je zapotřebí odbočka 97,5 %.

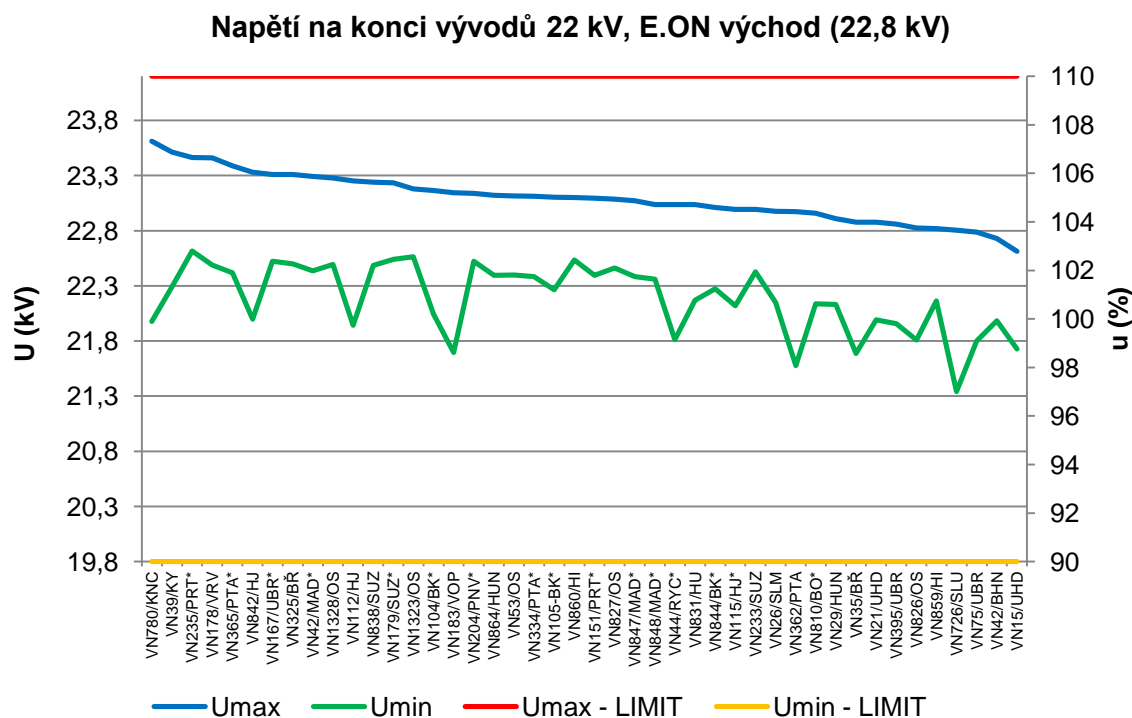
Tab. 4.5 Volba optimální odbočky distribučních transformátorů 22/0,42 kV a 22/0,4 kV v blízkosti rozveden E.ON východ

Volba odbočky DTR 22/0,42kV v blízkosti rozveden		Volba odbočky DTR 22/0,4kV v blízkosti rozveden	
Odbočka (%)	Použitelnost 238V<Umax<244V (%)	Odbočka (%)	Použitelnost 238V<Umax<244V (%)
110,0	0,0	105,0	0,0
107,5	0,0	102,5	0,0
105,0	0,0	100,0	91,7
102,5	0,0	97,5	8,3
100,0	91,7	95,0	0,0

Tab. 4.5 názorně ukazuje, že pro pokrytí celého sledovaného území jsou zapotřebí odbočky 97,5 a 100 %. Nižší ze zmiňovaných odboček však disponuje pouze transformátor 22/0,4 kV.

### 4.3.2 Možnosti regulace napětí na konci vývodů VN

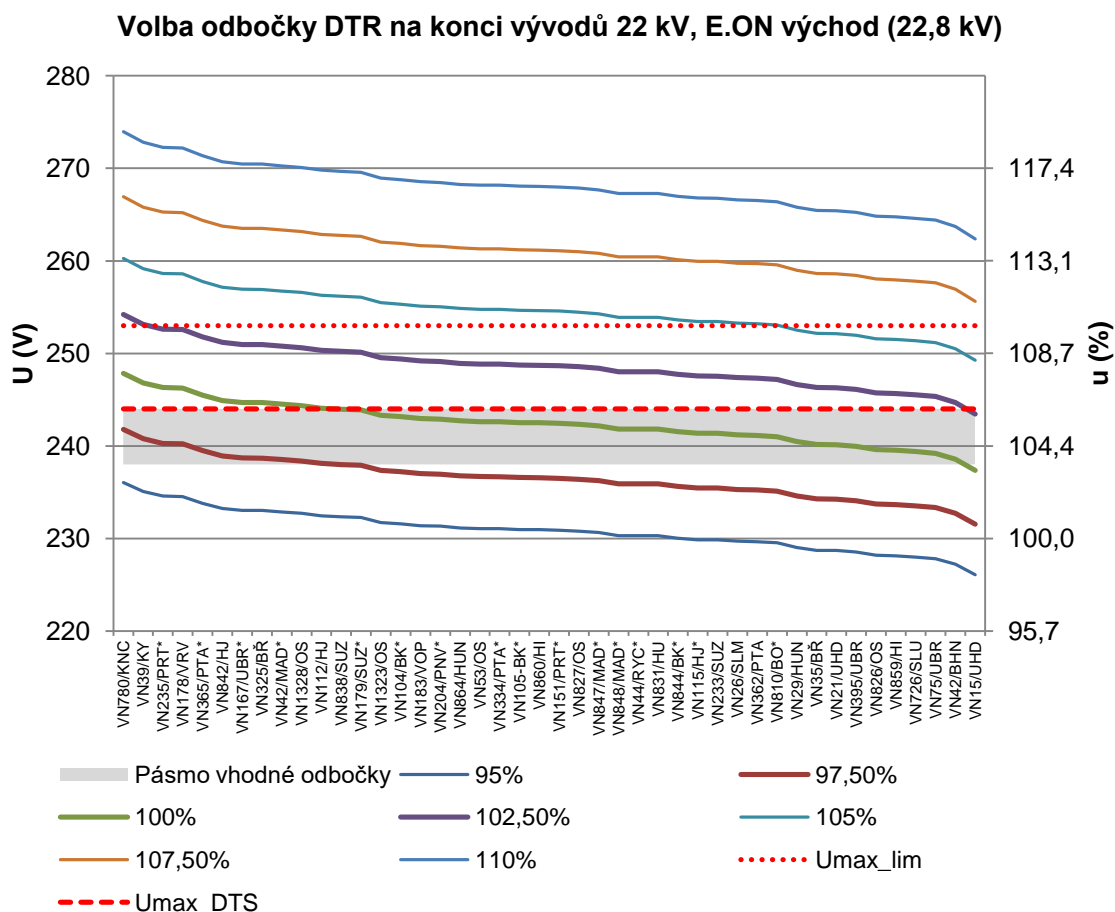
Na Obr. 4.7 jsou vidět výsledky měření na koncích vývodů 22 kV v oblasti E.ON východ. Znárodněné křivky  $U_{max}$  a  $U_{min}$  jsou maximální a minimální desetiminutové průměrné hodnoty během doby měření. Limitní křivky vycházejí z [4], tedy 22 kV  $\pm 10$  %.



Obr. 4.7 Výsledky měření na konci vývodů 22 kV v oblasti E.ON východ

Obr. 4.8 ukazuje vypočtené regulační možnosti obou používaných distribučních transformátorů. Křivky 95 % až 100 % vznikly přepočtem měřené křivky  $U_{max}$  z Obr. 4.7 pomocí rovnice (4-1). Limitní křivky a pásmo vhodné odbočky vycházejí z předpokladů popsaných v kapitole 4.2.1.

Z Tab. 4.6 vyplývá, že nejnižší odbočkou transformátoru 22/0,42 kV, tedy 100 %, lze se splněním požadavku vycházejícího z [21] pokrýt 72,7 % sledovaného území. V téměř zanedbatelné části lze použít odbočku 102,5 % a ve zbytku je nutno použít odbočku 97,5 %. Tou však disponuje pouze transformátor 22/0,4 kV.



Obr. 4.8 Vypočtené regulační možnosti distribučních transformátorů 22/0,42 kV a 22/0,4 kV na konci vývodů 22 kV v oblasti E.ON východ

Tab. 4.6 Volba optimální odbočky distribučních transformátorů 22/0,42 kV a 22/0,4 kV na konci vývodů 22 kV v oblasti E.ON východ

Volba odbočky DTR 22/0,42kV na konci sítě	
Odbočka (%)	Použitelnost 238V<U <sub>max</sub> <244V (%)
110,0	0,0
107,5	0,0
105,0	0,0
102,5	2,3
100,0	72,7

Volba odbočky DTR 22/0,4kV na konci sítě	
Odbočka (%)	Použitelnost 238V<U <sub>max</sub> <244V (%)
105,0	0,0
102,5	2,3
100,0	72,7
97,5	22,7
95,0	0,0

### 4.3.3 Možnosti regulace napětí v celé oblasti E.ON východ

Pokud se najdou vhodné odbočky pro začátky i konce vývodů, lze předpokládat, že budou vyhovovat i pro místa podél sledovaných vývodů.

Vhodnost využití jednotlivých odboček v celé síti lze vyhodnotit dle Tab. 4.7. Ze zobrazených výsledků je patrné, že pro pokrytí sledovaného území jsou nejvhodnější odbočky 97,5÷102,5 %.

Tab. 4.7 Volba optimální odbočky distribučních transformátorů 22/0,42 kV a 22/0,4 kV v celé síti VN v oblasti E.ON východ

Volba optimální odbočky transformátoru 22±2x2,5%/0,42 kV v celé síti VN		
Odbočka (%)	Opt. odbočka v blízkosti rozveden (%)	Opt. odbočka na konci sítě (%)
110	0,0	0,0
107,5	0,0	0,0
105	0,0	0,0
102,5	0,0	2,3
100	91,7	72,7

Volba optimální odbočky transformátoru 22±2x2,5%/0,4 kV v celé síti VN		
Odbočka (%)	Opt. odbočka v blízkosti rozveden (%)	Opt. odbočka na konci sítě (%)
105	0,0	0,0
102,5	0,0	2,3
100	91,7	72,7
97,5	8,3	22,7
95	0,0	0,0

Transformátorem 22/0,42 kV nelze pokrýt celé sledované území. Poskytuje sice tři respektive čtyři odbočky pro zvýšení napětí, jejich použitím by však byly překročeny limity dané [4; 21].

Na základě uvedených skutečností postačí pro oblast E.ON východ pouze transformátor 22/0,4 kV. Navíc poskytuje jednu rezervní odbočku pro zvýšení a jednu pro snížení napětí.

## **5 Porovnání variant nastavení hladinového regulátoru a převodu distribučních transformátorů**

V potaz byly jako možné alternativy řešení brány tyto doporučené varianty:

- a) Napětí HRT západ 23,1 kV a východ 22,8 kV, převod DTR 22/0,4 kV;
- b) Napětí HRT 22,8 kV, převod DTR 22/0,42 kV;
- c) Napětí HRT 22,8 kV, převod DTR 22/0,4 kV;
- d) Napětí HRT 22,5 kV, převod DTR 22/0,42 kV;
- e) Napětí HRT 22,5 kV, převod DTR 22/0,4 kV.

Ve variantách b) až e) bylo uvažováno jednotné napětí HRT pro celé území E.ON. Pro přepočítání dat na jednotnou napěťovou hladinu byl zvolen postup ponížení měřených hodnot o 0,3 kV, respektive o 0,6 kV.

Následující tři předpoklady podmiňují výběr optimálního řešení:

- 1) Možnost nastavení napětí v distribuční transformátorové stanici v rozsahu  $238 \text{ V} < U_{\text{max}} < 244 \text{ V}$  dle kapitoly 4.2.1;
- 2) Možnost nastavení  $U_{\text{max}} > 244 \text{ V}$ , tedy alespoň jedna rezervní odbočka pro zvýšení napětí;
- 3) Možnost nastavení  $U_{\text{max}} < 238 \text{ V}$ , tedy alespoň jedna rezervní odbočka pro snížení napětí.

Postup řešení byl obdobný jako v kapitolách 4.2 a 4.3, proto je zde pouze celkové shrnutí. Grafy s jednotlivými průběhy variant b) až e) jsou v Příloha 1 a Příloha 2. Průběhy varianty a) jsou obsaženy v řešení předchozích kapitol.

Vyhodnocení lze provést na základě dat uvedených v Tab. 5.1 až Tab. 5.3. Přičemž varianty se stejným nastavením napětí HRT, tedy b) a c); d) a e), byly řešeny společně. Vyhodnocení je však provedeno pro každou variantu zvlášť.

Varianta a)

Z Tab. 5.1 vyplývá, že transformátor 22/0,4 kV vyhovuje všem výše zmíněným předpokladům. Z hlediska zvolení jednotné hladiny napětí HRT je však tato varianta vhodná pouze na přechodné období.

Tab. 5.1 Volba optimální odbočky distribučního transformátoru 22/0,4 kV v celé síti VN, E.ON západ (23,1 kV) a E.ON východ (22,8 kV)

Volba optimální odbočky transformátoru 22±2x2,5%/0,4 kV v celé síti VN, E.ON západ (23,1 kV)		
Odbočka (%)	Opt. odbočka v blízkosti rozveden (%)	Opt. odbočka na konci sítě (%)
105	0	0
102,5	0	0
100	1,9	22,2
97,5	98,1	77,8
95	0	0

Volba optimální odbočky transformátoru 22±2x2,5%/0,4 kV v celé síti VN, E.ON východ (22,8 kV)		
Odbočka (%)	Opt. odbočka v blízkosti rozveden (%)	Opt. odbočka na konci sítě (%)
105	0,0	0,0
102,5	0,0	2,3
100	91,7	72,7
97,5	8,3	22,7
95	0,0	0,0

Varianty b) a c)

Z Tab. 5.2 rovněž jasně vyplývá, že všechny stanovené požadavky splňuje pouze transformátor 22/0,4 kV. Variantu nastavení HRT na 22,8 kV ve spojení s transformátorem 22/0,4 kV lze tudíž považovat za vhodnou.

Tab. 5.2 Volba optimální odbočky distribučních transformátorů 22/0,42 kV a 22/0,4 kV v celé síti VN, E.ON (22,8 kV)

Volba optimální odbočky transformátoru 22±2x2,5%/0,42 kV v celé síti VN		
Odbočka (%)	Opt. odbočka v blízkosti rozveden (%)	Opt. odbočka na konci sítě (%)
110	0,0	0,0
107,5	0,0	0,0
105	0,0	0,0
102,5	0,0	2,2
100	86,3	79,8

Volba optimální odbočky transformátoru 22±2x2,5%/0,4 kV v celé síti VN		
Odbočka (%)	Opt. odbočka v blízkosti rozveden (%)	Opt. odbočka na konci sítě (%)
105	0,0	0,0
102,5	0,0	2,2
100	86,3	79,8
97,5	13,7	18,0
95	0,0	0,0



### Varianty d) a e)

V Tab. 5.3 jsou znázorněny výsledky hodnocení variant s nastavením HRT na 22,5 kV. Všechny stanovené požadavky splňuje opět pouze transformátor 22/0,4 kV. Varianta nastavení HRT na 22,5 kV ve spojení s distribučním transformátorem 22/0,4 kV by se mohla považovat za vhodnou. Nutno však zmínit, že při takto velké změně nastavení HRT, zejména v oblasti západ, by bylo nutné neprodleně přestavit odbočky distribučních transformátorů. Toto si však žádá nutnost odstavení dodávky elektřiny na minimálně 2 hodiny. Tudíž je reálná možnost využití této varianty velmi malá.

Tab. 5.3 Volba optimální odbočky distribučních transformátorů 22/0,42 kV a 22/0,4 kV v celé síti VN, E.ON (22,5 kV)

Volba optimální odbočky transformátoru 22±2x2,5%/0,42 kV v celé síti VN		
Odbočka (%)	Opt. odbočka v blízkosti rozveden (%)	Opt. odbočka na konci sítě (%)
110	0,0	0,0
107,5	0,0	0,0
105	0,0	0,0
102,5	3,1	28,1
100	96,9	70,8

Volba optimální odbočky transformátoru 22±2x2,5%/0,4 kV v celé síti VN		
Odbočka (%)	Opt. odbočka v blízkosti rozveden (%)	Opt. odbočka na konci sítě (%)
105	0,0	0,0
102,5	3,1	28,1
100	96,9	70,8
97,5	0,0	1,1
95	0,0	0,0

### Celkové zhodnocení

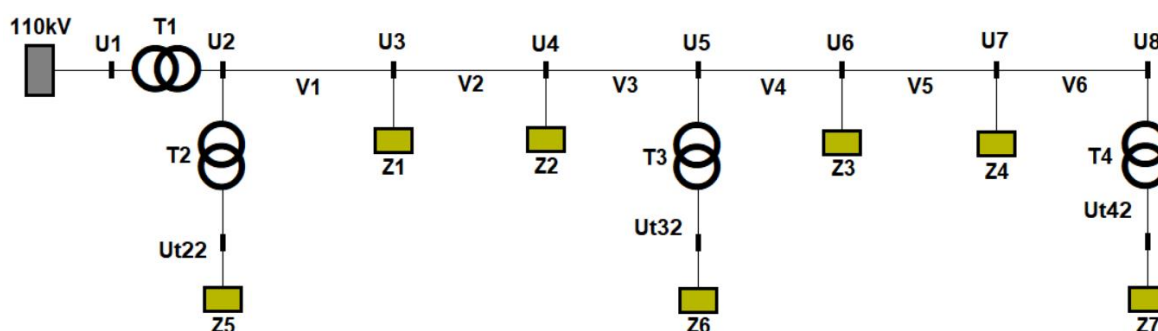
Dle výše uvedených zhodnocení jednotlivých variant se jako nejvhodnější a nejjednodušejí implementovatelná jeví varianta s napětím HRT 22,8 kV ve spojení s distribučním transformátorem 22/0,4 kV.

Se snížením napětí HRT v oblasti západ je třeba uvažovat ekvivalentní navýšení ztrát v síti VN. Vzhledem k době plných ztrát sítě VN, podílu oblasti západ na celkových ztrátách v síti 22 kV a podílu ztrát v síti 22 kV na ztráty v celé distribuční síti by toto navýšení nemělo být nikterak výrazné.

## 6 Simulace zobecněného vývodu

Pro teoretické ověření získaných výsledků byla provedena simulace na zcela obecném vývodu VN. K tomu byl využit program E-vlivy. Parametry prvků byly voleny tak, aby odpovídaly průměrnému vývodu VN. Jejich rozložení potom bylo voleno za účelem dosažení možných extrémů, proto je například zátěž na hladině NN připojena přímo k distribučnímu transformátoru.

Simulační schéma ukazuje Obr. 6.1. Parametry jednotlivých prvků jsou zaznamenány v Tab. 6.1.



Obr. 6.1 Schéma zapojení zobecněného vývodu

Tab. 6.1 Parametry prvků zobecněného vývodu

Transformátory	Název	U <sub>1</sub> (kV)	U <sub>2</sub> (kV)	S <sub>t</sub> (MVA)	P <sub>k</sub> (kW)	u <sub>k</sub> (%)
	T <sub>1</sub>	110	23	40	226,2	11
	T <sub>2</sub> ÷T <sub>4</sub>	22	0,4	0,63	8	6

Vedení	Název	Druh	Typ	R (Ω/km)	X (Ω/km)	Délka (km)
	V <sub>1</sub> ÷V <sub>6</sub>	venkovní	110/22 AlFe6	0,259	0,368	5
	V <sub>7</sub> ÷V <sub>9</sub>	kabelové	150AYKY70	0,207	0,069	0,8

Zátěže	Název	U (kV)	I (A)	S (kVA)	cos φ (-)	P (kW)
12:00	Z <sub>1</sub> ÷Z <sub>4</sub>	22	11,05	421,05	0,95	400
	Z <sub>5</sub> ÷Z <sub>7</sub>	0,4	144,34	100	1	100
20:00	Z <sub>1</sub> ÷Z <sub>4</sub>	22	17,96	684,21	0,95	650
	Z <sub>5</sub> ÷Z <sub>7</sub>	0,4	454,66	315	1	315

Elektrárny	Název	U (kV)	S (kVA)	cos φ (-)
12:00	PV <sub>1</sub>	22	2350	1
	PV <sub>2</sub>	22	1200	1
	PV <sub>3</sub>	0,4	26	1
	PV <sub>4</sub>	0,4	27	1
	PV <sub>5</sub>	0,4	26	1

Jsou zde uvedeny i parametry prvků, které nejsou v Obr. 6.1. V rámci vyhodnocení byly porovnávány varianty, které postihují různé kombinace připojení fotovoltaických elektráren, jak na hladině VN, tak na hladině NN. Místa připojení byla volena s ohledem na předpokládaný rozhodný vliv na napěťové poměry v dané části vývodu. Výkon těchto elektráren byl volen tak, aby došlo k maximálnímu možnému zvýšení napětí a zároveň byly splněny podmínky pro připojení dle [16].

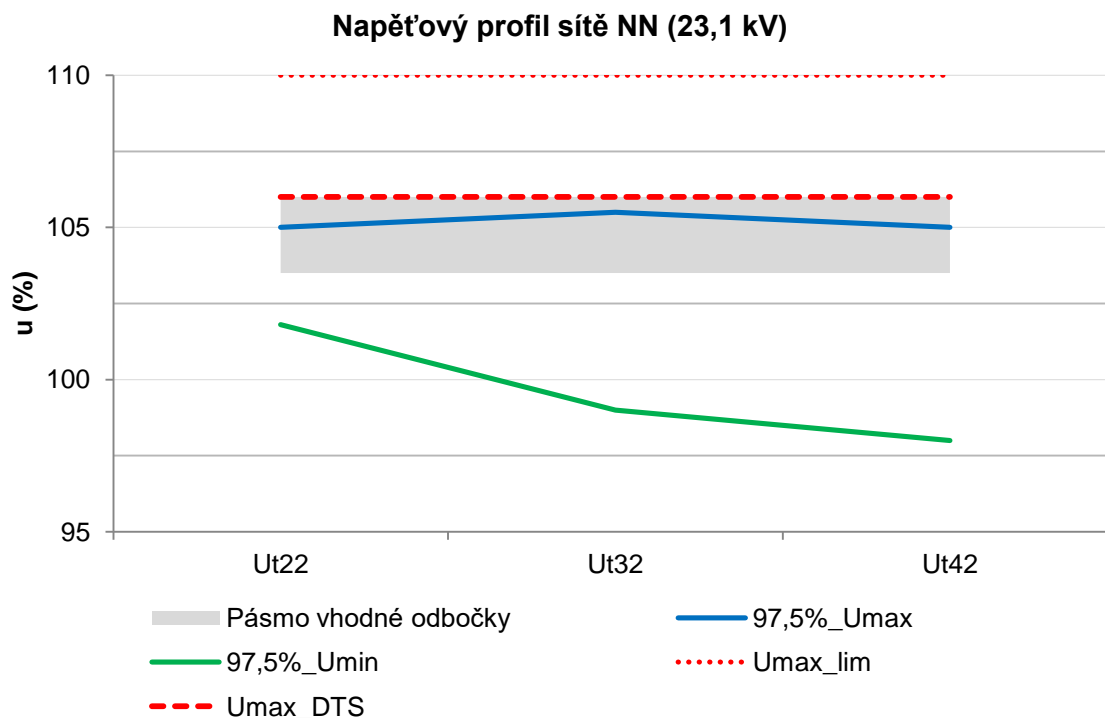
První i druhá varianta odpovídá Obr. 6.1, liší se pouze uvažovaným časem, tedy 12:00 a 20:00. V poledne je uvažována nízká spotřeba a zároveň plný výkon elektráren. Večer naopak spotřeba roste a elektrárny nevyrábí téměř nic. V dalších variantách je proto uvažováno pouze s časem 12:00. Ve třetí variantě je přes  $V_7$  do bodu  $U_{122}$  připojena elektrárna  $PV_3$ . Schéma je v Příloha 3. Čtvrtá varianta uvažuje připojení  $PV_1$  do bodu  $U_5$ . Schéma je v Příloha 4. V páté variantě je připojena elektrárna  $PV_1$  a zároveň  $PV_4$ , ta je připojena přes  $V_8$  do bodu  $U_{132}$ . Schéma je v Příloha 5. V šesté variantě je do bodu  $U_8$  připojena elektrárna  $PV_2$ . Schéma je v Příloha 6. Sedmá varianta uvažuje připojení elektrárny  $PV_5$  přes  $V_9$  do bodu  $U_{142}$ . Schéma je v Příloha 7. V poslední variantě jsou zároveň připojeny elektrárny  $PV_2$  i  $PV_5$ . Schéma je v Příloha 8.

Simulace všech variant byly provedeny s udržovaným konstantním napětím v bodě  $U_2$ . S odkazem na předchozí kapitolu byla uvažována napětí 23,1 kV a 22,8 kV.

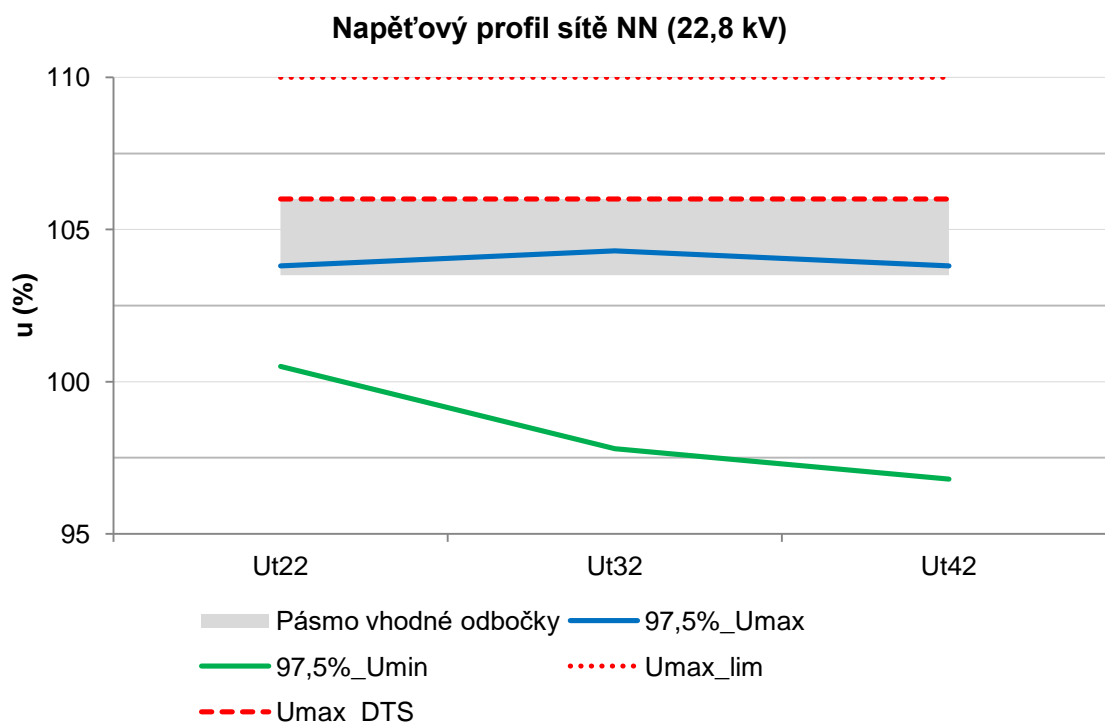
Ze všech těchto možností byly vybrány „extrémní“ stavy, z nichž byly vytvořeny napěťové profily. Všechny minimální hodnoty vycházejí z druhé varianty, tedy varianty pouze s odběry v čase 20:00. Maximální hodnota v bodě  $U_{122}$  vychází ze třetí varianty, v bodě  $U_{132}$  z páté varianty a v bodě  $U_{142}$  z osmé varianty.

Pro zvolení vhodné odbočky distribučních transformátorů byla uvažována kritéria uvedená výše. Napěťové profily sítě VN jsou v příloze, konkrétně pro napětí 23,1 kV v Příloha 9 a pro napětí 22,8 kV v Příloha 10. Napěťové profily sítě NN jsou uvedeny níže. Všechny simulace byly provedeny jak pro transformátor 22/0,4 kV, tak pro transformátor 22/0,42 kV. Z důvodu zachování přehlednosti uváděných výsledků jsou v grafech ponechány pouze průběhy zasahující do pásma vhodné odbočky.

Na Obr. 6.2 a Obr. 6.3 je názorně vidět, že pro obě uvažované hladiny napětí je zapotřebí odbočka 97,5 %. Touto odbočkou disponuje pouze transformátor 22/0,4 kV, který splňuje i ostatní stanovená kritéria. Transformátor s převodem 22/0,42 kV se i zde jeví jako nevhodný.



Obr. 6.2 Napěťový profil sítě NN (23,1 kV)



Obr. 6.3 Napěťový profil sítě NN (22,8 kV)

Obě napěťové hladiny ve spojení s transformátorem 22/0,4 kV se zdají být vhodné. Vzhledem k doporučeným zkoumaným variantám z předchozí kapitoly a možnému budoucímu zvýšení penetrace distribuovaných zdrojů bych i na základě simulace doporučoval použít spíše hladinu 22,8 kV.

## **Závěr**

Tato práce je zaměřena na doporučení jednotné hladiny napětí HRT, který pracuje v režimu udržování konstantního napětí na přípojnicích rozvodny VN a jednotného převodu distribučních transformátorů. Tato unifikace je výhodná nejen z hlediska technického, ale i z hlediska ekonomického.

Na základě dat z proběhlé měřicí kampaně bylo provedeno vyhodnocení regulačních možností obou v současnosti používaných distribučních transformátorů v oblastech spravovaných společností E.ON. Transformátor s převodem 22/0,42 kV se zde projevil jako zcela nevhodný. Nejenže za pomoci jeho odboček nelze pokrýt celé vyšetřované území, ale dokonce ani v jedné z oblastí nedisponuje rezervní odbočkou pro snížení napětí.

Dále bylo porovnáno několik doporučených variant lišících se nejen hladinou napětí HRT, ale také použitým distribučním transformátorem. První z variant, která uvažovala ponechání dvou hladin napětí HRT v kombinaci s transformátorem 22/0,4 kV sice vyhověla, ale z hlediska požadavku jednotné hladiny napětí HRT je vhodná pouze jako dočasné řešení. Další čtyři varianty uvažovaly dvě možné budoucí hladiny napětí. Lišily se pouze použitím transformátoru 22/0,4 kV nebo 22/0,42 kV. Z příslušných tabulek je zřejmé, že všechny požadavky podmiňující optimální řešení splnily pouze varianty s transformátorem 22/0,4 kV. Na základě hodnocení jednotlivých variant, uvedených v 5. kapitole, bych doporučil použití varianty nastavení napětí HRT na 22,8 kV v součinnosti s transformátorem 22/0,4 kV.

Nakonec bylo za pomoci simulace provedeno ověření výsledků vzešlých z vyhodnocení měření. Z obrázků uvedených v 6. kapitole vyplývá, že výsledky simulace naznačují stejné závěry. Již dříve bylo zmíněno, že vzhledem k doporučeným zkoumaným variantám a možnému budoucímu nárůstu penetrace distribuovaných zdrojů v distribuční soustavě se i zde jako nejvhodnější a zároveň nejjednodušeji implementovatelná jeví varianta s napětím HRT 22,8 kV s použitím distribučního transformátoru s převodem 22/0,4 kV.

Z uvedeného vyplývá, že simulaci pro zvolení parametrů regulace lze použít. Vzhledem k různorodosti skutečných sítí a jednotlivých vývodů bych však simulační postup volil pouze pro hrubý nástin situace, který by měl být následně ověřen vyhodnocením dat vzešlých z měření v dané části zkoumané sítě.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Zákon č. 458/2000 Sb. v platném znění. *Energetický zákon*.
- [2] Vyhláška 540/2005 Sb. v platném znění.
- [3] Pravidla provozování distribučních soustav. Praha : Energetický regulační úřad, 2016.
- [4] ČSN EN 50160. Ed. 3 *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [5] Uhlík, Stanislav. *Regulace napětí v distribuční soustavě*. Plzeň : Diplomová práce. Západočeská univerzita, 2011. Vedoucí práce: Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.
- [6] Dvorský, Emil. *Přednášky z předmětu. Měření, regulace a řízení ES*. Plzeň : ZČU, 2017.
- [7] Jiříčka, Jan, Kašpírek, Martin a Tesařová, Miloslava. *Časopis Energetika, ročník 67, číslo 3. Analýza toků jalových výkonů mezi přenosovou a distribuční soustavou s dílčím rozbořem sítě 110 kV*. 2017.
- [8] *Kodex přenosové soustavy. Část I. - Základní podmínky pro užívání přenosové soustavy*. Praha : Energetický regulační úřad, 2018.
- [9] RENA. *verze 1.5: Popis programu*. Brno : EGÚ Brno, 1992.
- [10] *Provozně technická pravidla. Regulace napětí v distribučních sítích*. Praha : ČEZ, 1977. 14 s.
- [11] On-load tap-changers, type UC. *Technical guide*. [Online] [Citace: 06. 12. 2017.] <http://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1ZSC000562-AAW&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
- [12] On-load tap-changers, type UZ. *Technical guide*. [Online] [Citace: 06. 12. 2017.] <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1ZSE%205492-104&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
- [13] Přepínač odboček pod zatížením, typ UC a VUC. *Uživatelská příručka*. [Online] [Citace: 16. 12. 2017.] <https://library.e.abb.com/public/ecf65a85fdac9c9dc1257bc100301232/1ZSE%205492-2-155%20cs%20Rev%203.pdf?filename=1ZSE%205492-155%20cs%20Rev%203.pdf>.
- [14] Tesařová, Miloslava a Štroblová, Milada. *Průmyslová elektroenergetika*. 1. vydání. Plzeň : Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-703-3.

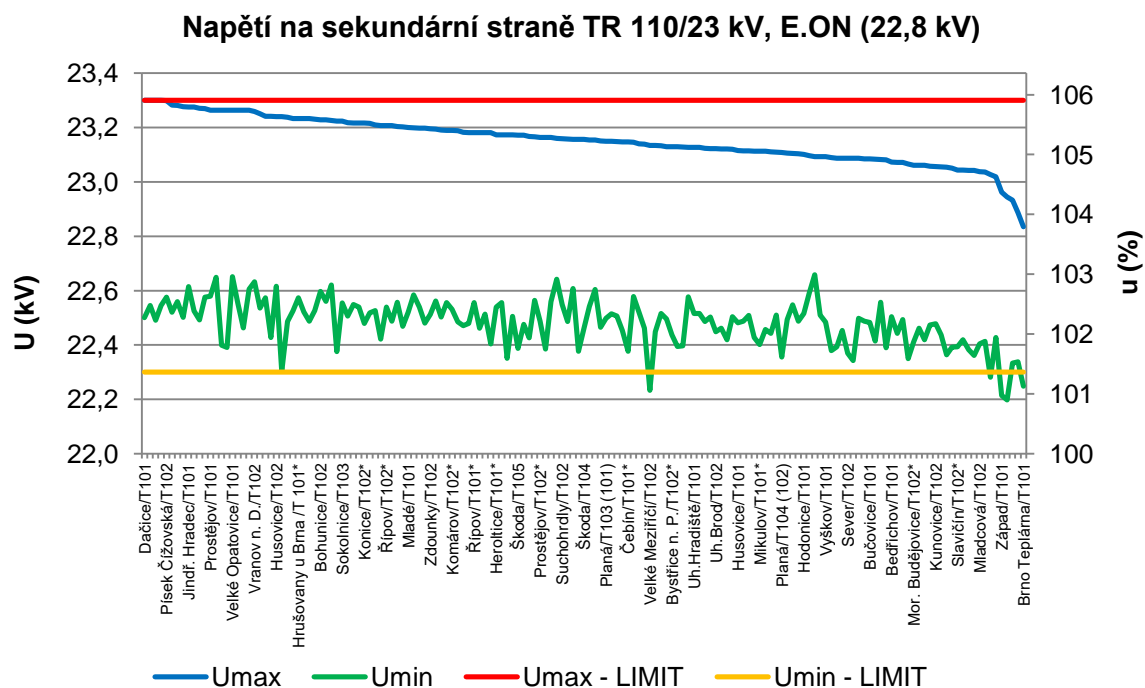
- [15] Tap-changers for power transformers. *Product guide*. [Online] [Citace: 07. 12. 2017.] <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1ZSC000562-AAV&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
- [16] Pravidla provozování distribučních soustav. *Příloha 4: Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy*. Praha : Energetický regulační úřad, 2017.
- [17] NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2016/631 ze dne 14. dubna 2016, kterým se stanoví kodex sítě pro požadavky na připojení výroben k elektrizační soustavě.
- [18] Tesařová, Miloslava. Přednášky z předmětu. *Průmyslová energetika*. Plzeň : ZČU, 2017.
- [19] Papazacharopoulos, Nikolaos, Gibescu, Madeleine a Vaessen, Peter. Smart voltage control in distribution networks with a large share of distributed renewable generation. *IEEE Eindhoven PowerTech*. [Online] IEEE, 03. 09. 2015. [Citace: 01. 03. 2018.] <http://ieeexplore.ieee.org/document/7232497/>. DOI: 10.1109/PTC.2015.7232497.
- [20] Kandula, R P, a další. Field upgradeable transformer: A fractionally-rated voltage regulator for the distribution system. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. [Online] IEEE, 18. 09. 2016. [Citace: 01. 03. 2018.] <http://ieeexplore.ieee.org/document/7855116/>. DOI: 10.1109/ECCE.2016.7855116.
- [21] Pravidla pro řízení napětí v DS NN. *ECZR-PP-DS-175*. E.ON, 2015.

## **Přílohy**

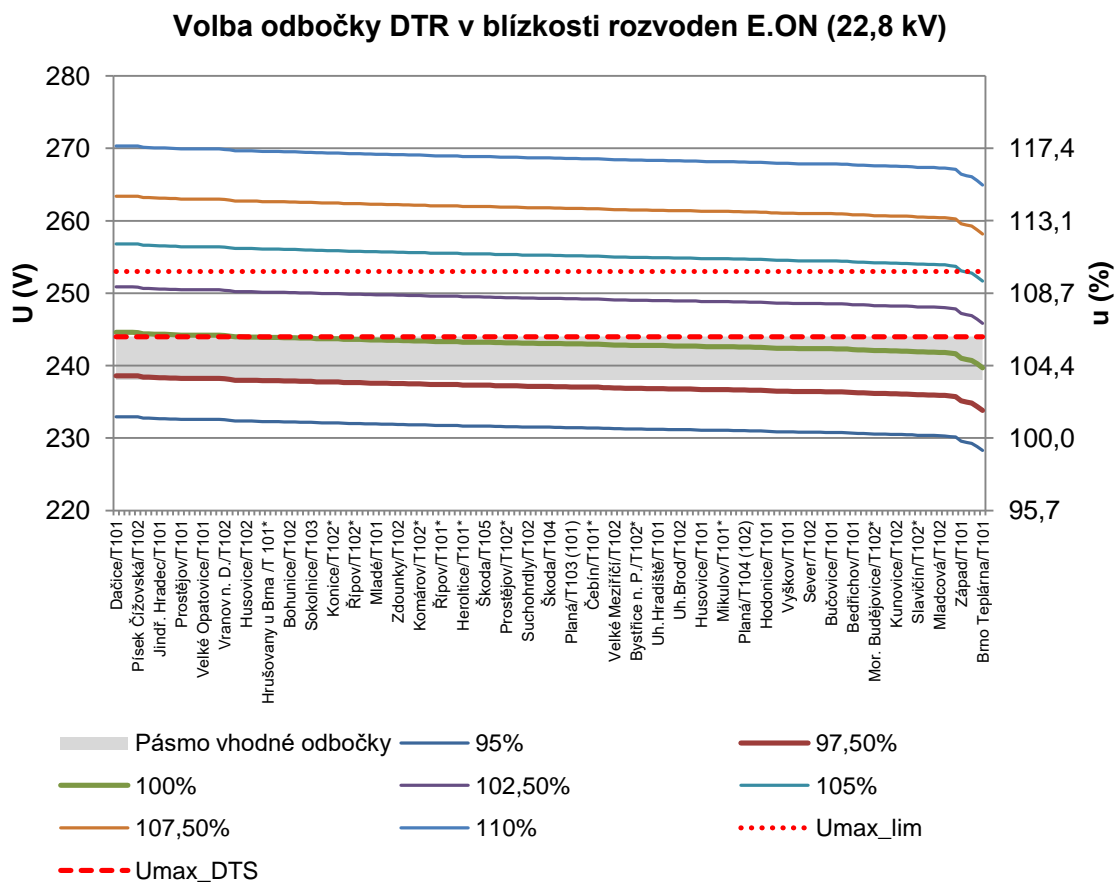
Příloha 1 – Varianty nastavení napětí HRT 22,8 kV .....	57
Příloha 2 – Varianty nastavení napětí HRT 22,5 kV .....	59
Příloha 3 – Třetí varianta simulace .....	61
Příloha 4 – Čtvrtá varianta simulace .....	61
Příloha 5 – Pátá varianta simulace .....	61
Příloha 6 – Šestá varianta simulace .....	62
Příloha 7 – Sedmá varianta simulace .....	62
Příloha 8 – Osmá varianta simulace .....	62
Příloha 9 – Napěťový profil sítě VN (23,1 kV) .....	63
Příloha 10 – Napěťový profil sítě VN (22,8 kV) .....	63



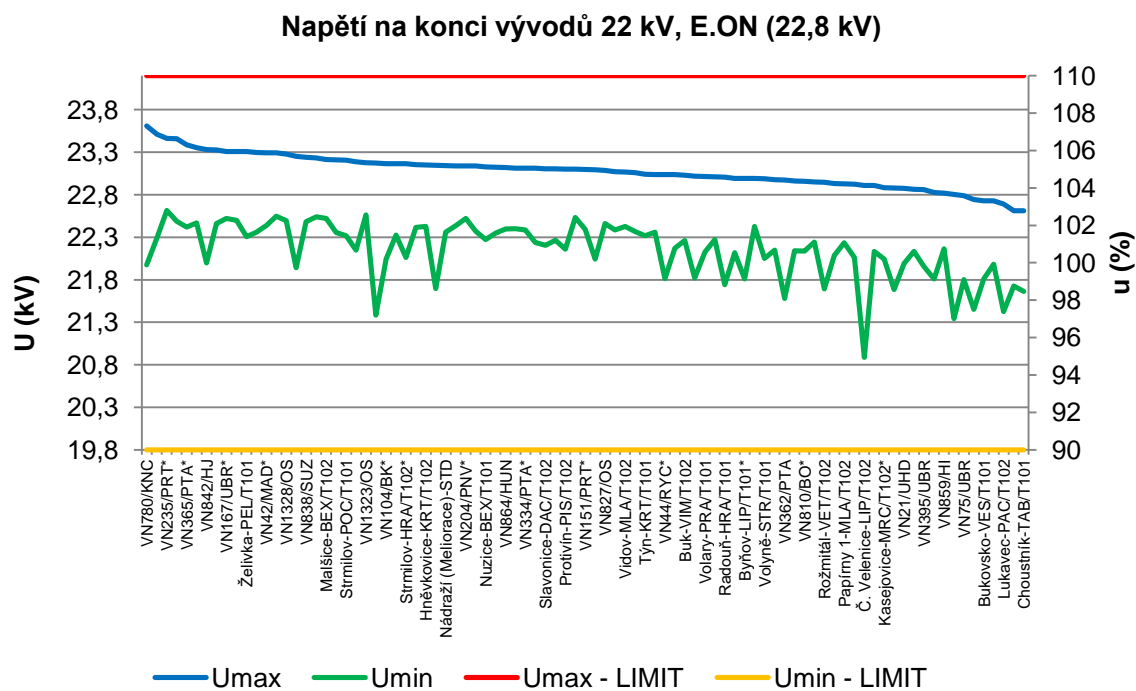
### Příloha 1 – Varianty nastavení napětí HRT 22,8 kV



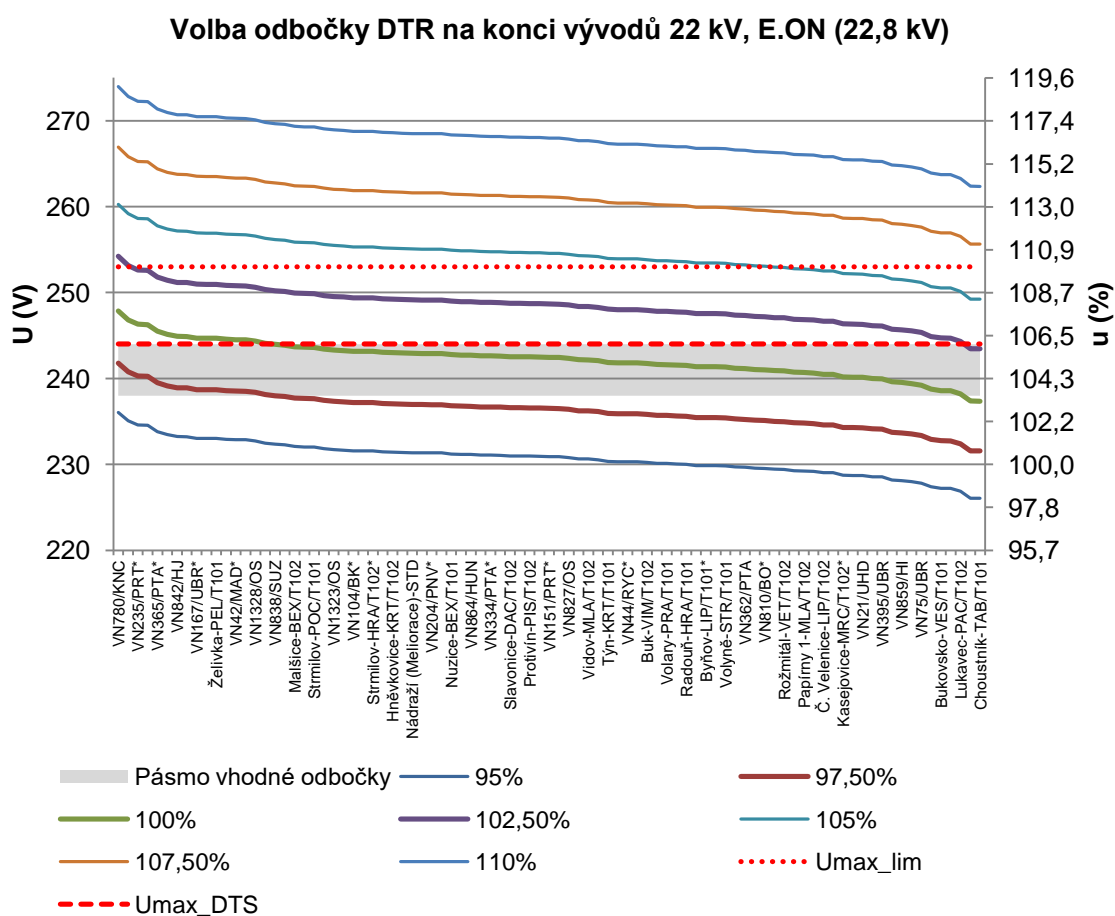
Obr. 1 Výsledky měření na transformátorech 110/23 kV pro nastavení HRT 22,8 kV



Obr. 2 Vypočtené regulační možnosti distribučních transformátorů 22/0,42 kV a 22/0,4 kV v blízkosti rozveden pro nastavení HRT 22,8 kV

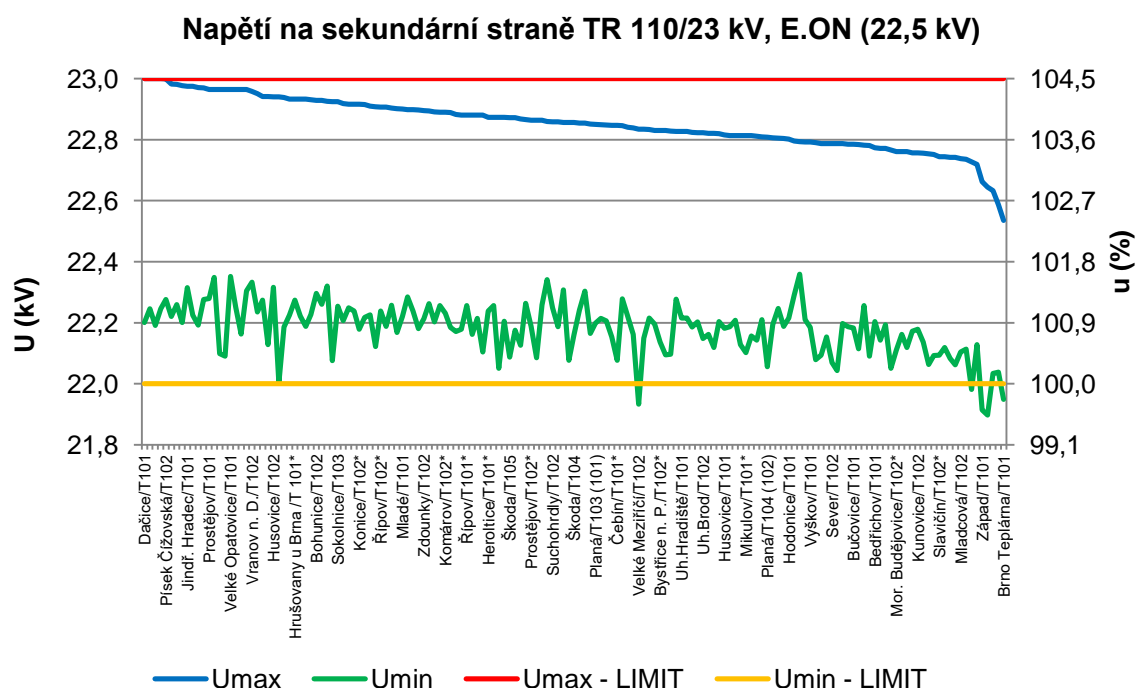


Obr. 3 Výsledky měření na konci vývodů 22 kV pro nastavení HRT 22,8 kV

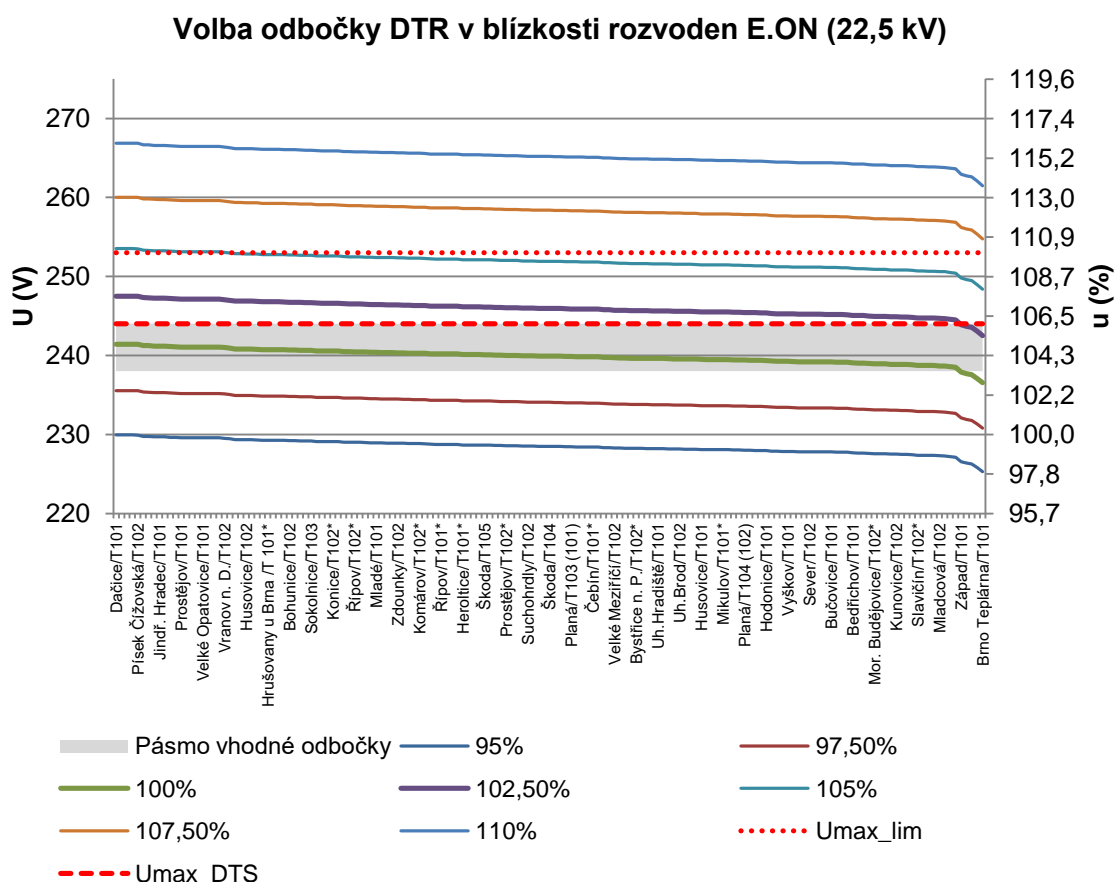


Obr. 4 Vypočtené regulační možnosti distribučních transformátorů 22/0,42 kV a 22/0,4 kV na konci vývodů 22 kV pro nastavení HRT 22,8 kV

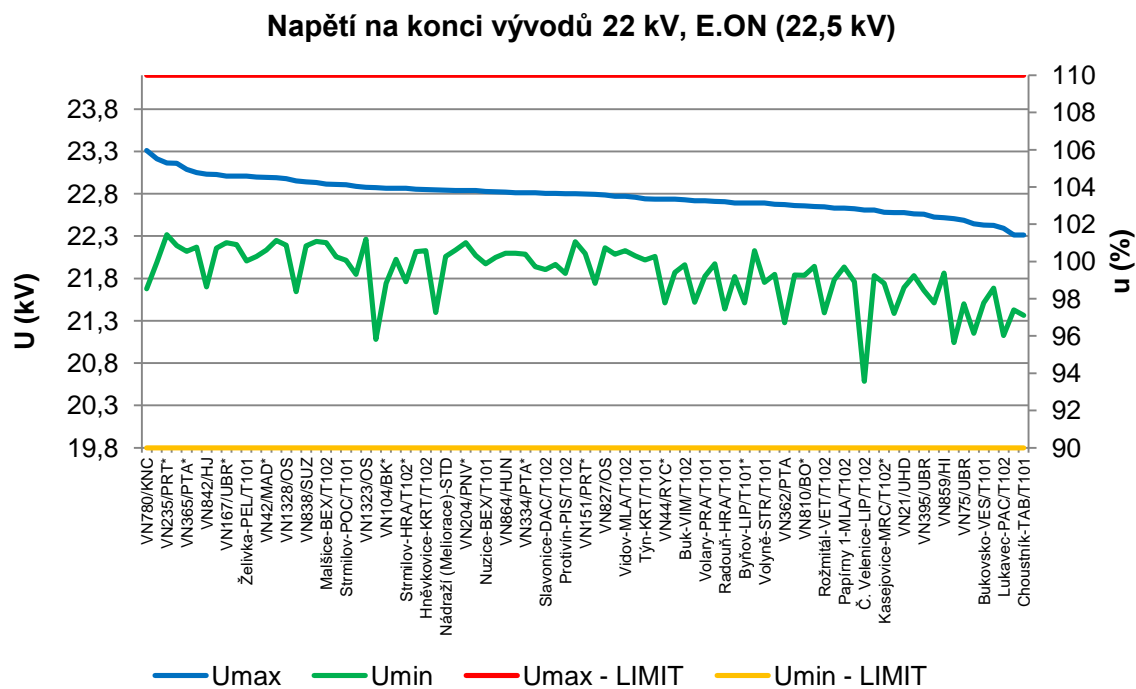
## Příloha 2 – Varianty nastavení napětí HRT 22,5 kV



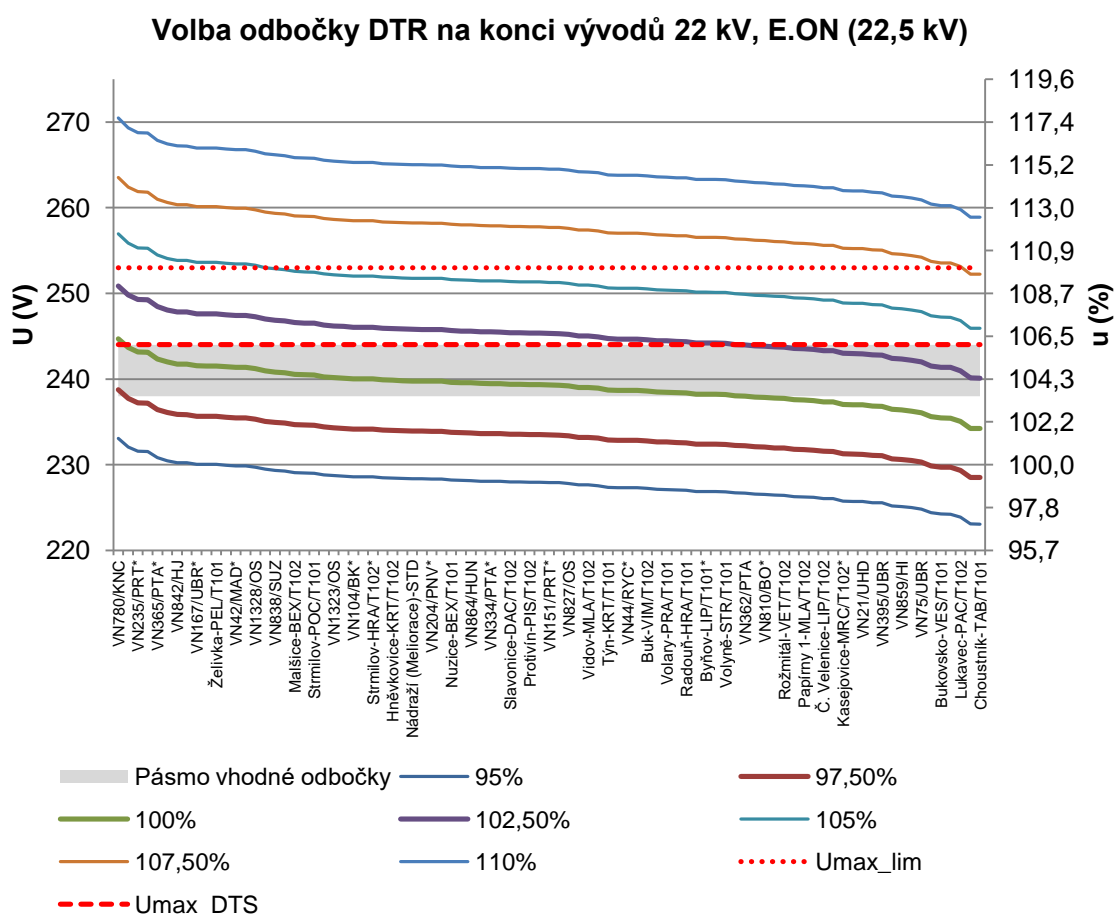
Obr. 5 Výsledky měření na transformátorech 110/23 kV pro nastavení HRT 22,5 kV



Obr. 6 Vypočtené regulační možnosti distribučních transformátorů 22/0,42 kV a 22/0,4 kV v blízkosti rozvoden pro nastavení HRT 22,5 kV

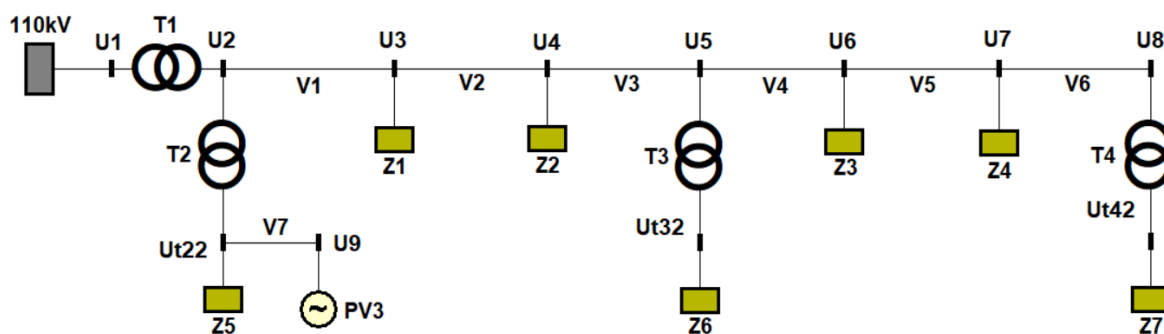


Obr. 7 Výsledky měření na konci vývodů 22 kV pro nastavení HRT 22,5 kV



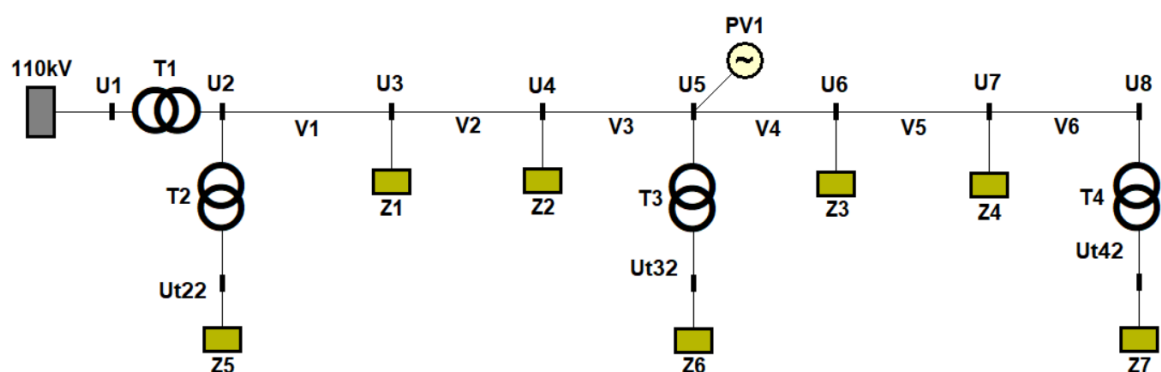
Obr. 8 Vypočtené regulační možnosti distribučních transformátorů 22/0,42 kV a 22/0,4 kV na konci vývodů 22 kV pro nastavení HRT 22,5 kV

### Příloha 3 – Třetí varianta simulace



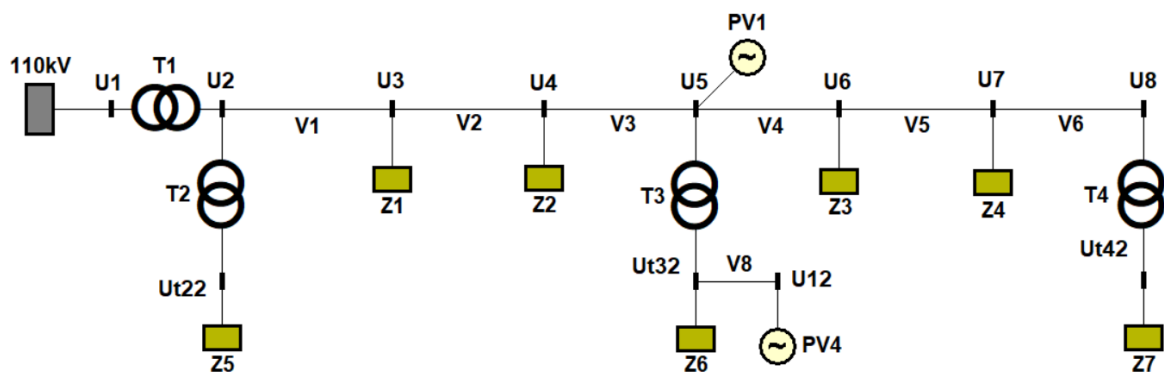
Obr. 9 Schéma třetí varianty simulace

### Příloha 4 – Čtvrtá varianta simulace



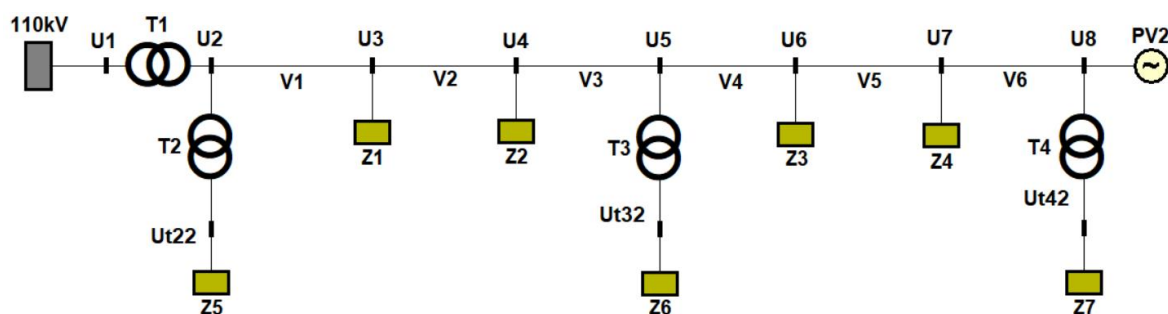
Obr. 10 Schéma čtvrté varianty simulace

### Příloha 5 – Pátá varianta simulace



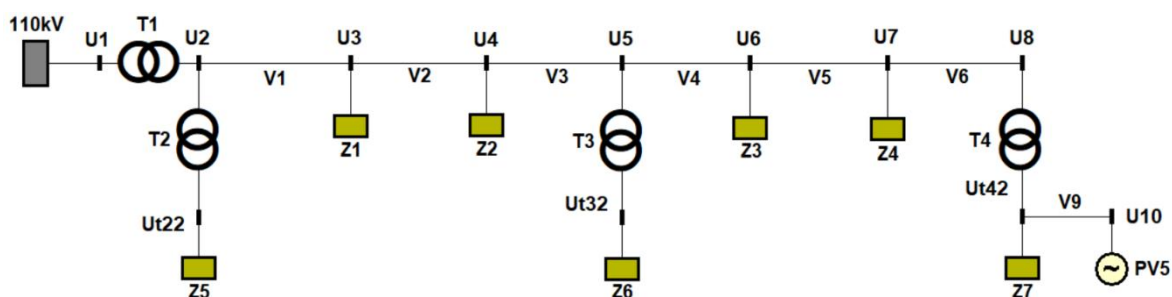
Obr. 11 Schéma páté varianty simulace

## Příloha 6 – Šestá varianta simulace



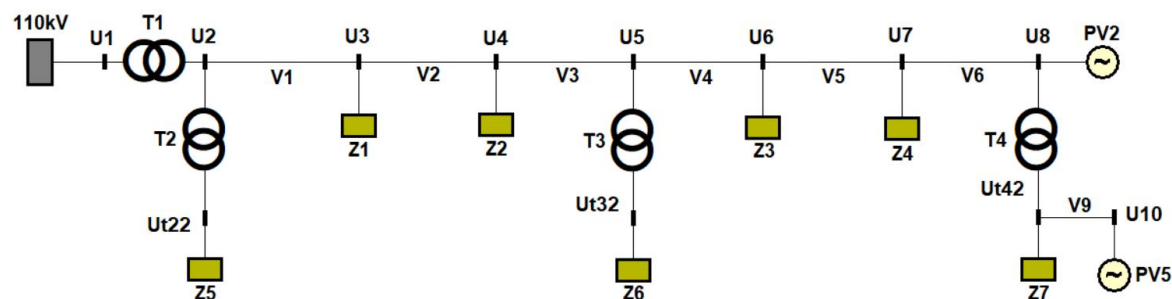
Obr. 12 Schéma šesté varianty simulace

## Příloha 7 – Sedmá varianta simulace



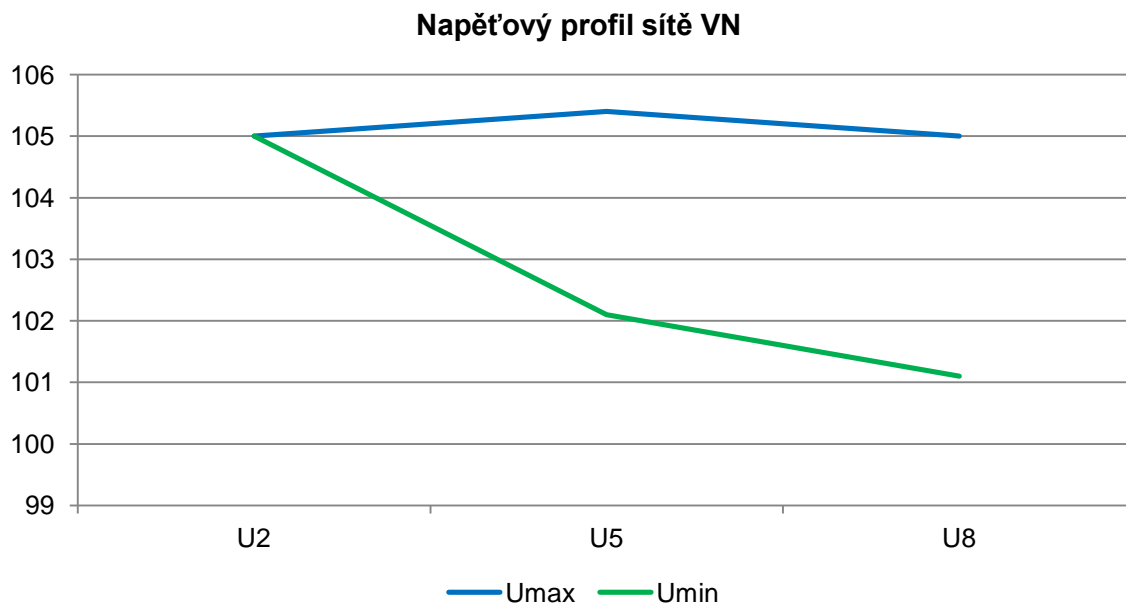
Obr. 13 Schéma sedmé varianty simulace

## Příloha 8 – Osmá varianta simulace



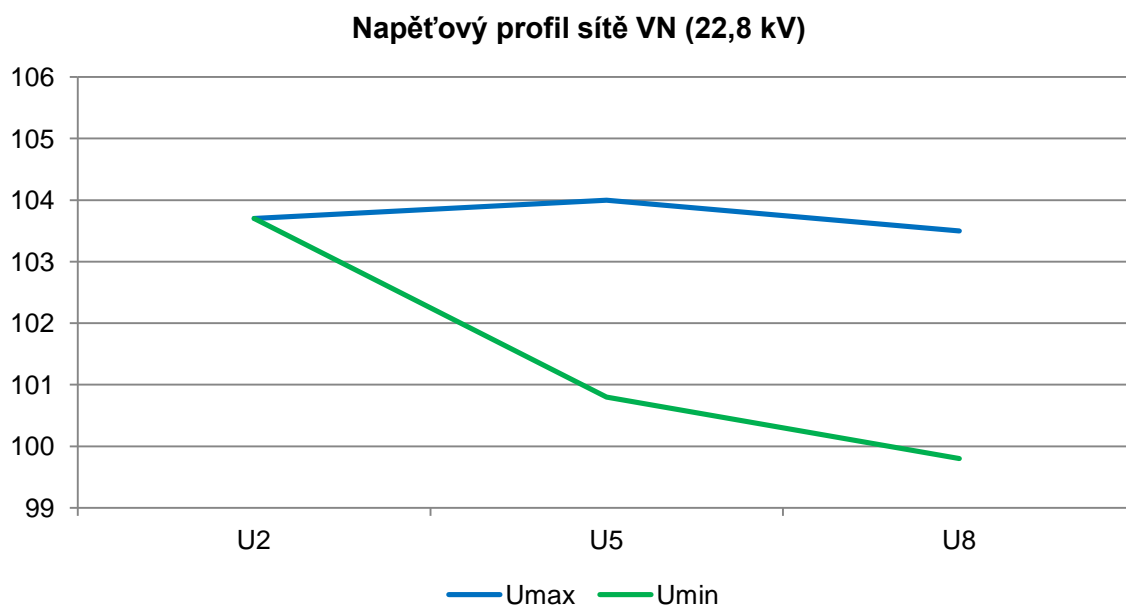
Obr. 14 Schéma osmé varianty simulace

## Příloha 9 – Napěťový profil sítě VN (23,1 kV)



Obr. 15 Napěťový profil sítě VN (23,1 kV)

## Příloha 10 – Napěťový profil sítě VN (22,8 kV)



Obr. 16 Napěťový profil sítě VN (22,8 kV)