

# STANOVENÍ MOŽNOSTI ENERGETICKÝCH ÚSPOR INSTALACÍ MODERNÍCH VÝKONOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ



MINISTERSTVO  
PRŮMYSLU A OBCHODU



Dílo bylo zpracováno za finanční podpory Státního programu na podporu úspor energie na období 2017–2021 – program EFEKT 2 pro rok 2021



<b>Objednatel</b>	Ministerstvo průmyslu a obchodu	
<b>Zhotovitel</b>	Trafo CZ, a. s.	
<b>Evidenční čísla</b>	číslo dotace (MPO)	<b>I22D222001206</b>

## STANOVENÍ MOŽNOSTI ENERGETICKÝCH ÚSPOR INSTALACÍ MODERNÍCH VÝKONOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

Dílo bylo zpracováno za finanční podpory Státního programu na podporu úspor energie na období 2017–2021 – program EFEKT 2 pro rok 2021

**Zpracovali za zhotovitele** Ing. Vojtěch Kladívko, Ing. Aleš Radník, Bc. Michal Ficbauer, Josef Novotný (odpovědní pracovníci) a kolektiv Trafo CZ (zpracovatelé publikace)

**Spolupracovali za objednatele** Ing. Hana Schvarczová



## OBSAH

O publikaci.....	6
1 Úvod do problematiky snižování energetické náročnosti na území EU.....	8
2 Přenosová a distribuční soustava České republiky .....	10
3 Distribuční transformátor .....	13
3.1 Vlastnosti a zapojení.....	14
3.2 Typy chlazení .....	16
3.3 Poměrné napětí nakrátko .....	18
4 Hospodárnost, ztráty distribučních transformátorů a jejich ovlivnění.....	19
4.1 Činné ztráty.....	19
4.1.1 Ztráty naprázdno .....	19
4.1.2 Ztráty nakrátko .....	24
4.1.3 Přídavné ztráty.....	25
4.2 Účinnost transformátorů.....	26
4.3 Jalové ztráty .....	27
5 Požadavky legislativy EU na transformátory .....	31
6 Praktické dopady realizace požadavků legislativy EU na transformátory.....	33
6.1 Technické dopady.....	33
6.2 Ekonomické dopady.....	34
7 Vyhodnocení potenciálu úspory energií v České Republice .....	35
7.1 Na straně odběratele.....	35
7.2 Na straně dodavatele.....	41
Závěr .....	44
Zdroje.....	47
Seznam obrázků a tabulek.....	48

## O PUBLIKACI

Firma Trafo CZ, a. s., je dlouholetým a zavedeným výrobcem distribučních transformátorů v České republice. Zabývá se vývojem, konstrukcí, výrobou, testováním, servisem a opravami těchto koncových prvků distribuční soustavy. Ročně vyrábí stovky kusů těchto zařízení. V České republice je v provozu přibližně 150 až 200 tisíc kusů výkonových transformátorů, z nichž většina je za polovinou doby své životnosti, je předimenzovaná či poruchová. Právě v takových zařízeních vznikají zbytečné energetické ztráty, a to zejména předimenzováním (ztráty naprázdno). Tyto ztráty jsou relativně výrazné a je zde tak prostor pro zlepšení efektivity celé energetické soustavy.

Publikace má za cíl tento potenciál možných úspor identifikovat, a to ve vztahu s NAŘÍZENÍM KOMISE (EU) č. 548/2014 v současném stavu (stupeň Ekodesign II od 1. července 2021) a navíc i ve stavu navazujícím, tedy od července roku 2027. Publikace by měla definovat možný energetický potenciál k úsporám v průběhu navazujících let a objasnit systém návrhů výkonových transformátorů s cílem navrhnout progresivnější řešení ve vztahu k maximální energetické efektivitě.

Věcná náplň publikace je členěna do sedmi kapitol. První kapitola je věnována nezbytnému všeobecnému úvodu do problematiky snižování energetické náročnosti na území EU s ohledem na očekávaný budoucí vývoj spotřeby elektrické energie.

Druhá kapitola seznamuje s hlavními vlastnostmi a specifikacemi přenosové a distribuční soustavy České republiky a také s v tuzemsku používanými napět'ovými hladinami. Bezprostředně na ni navazuje třetí kapitola, popisující jeden z hlavních prvků distribuční soustavy, distribuční transformátor. Větší pozornost je věnována jeho vlastnostem, zapojení a konstrukci s ohledem na typ chlazení. Dále je uveden základní popis konstrukčních řešení a z nich pramenící vlastnosti a předpoklady praktického použití.

Ve čtvrté kapitole jsou detailně popsány fyzikální příčiny ztrát naprázdno, nakrátko a přídavných ztrát v transformátoru, jejich význam a možnosti jejich ovlivnění. Nedílnou součástí je také odvození účinnosti transformátoru, jakož i jeho jalových ztrát, které při provozu transformátoru nedílně vznikají. Jsou zde také uvedeny praktické možnosti kompenzace jalového výkonu na hladině VN.

Pátá kapitola uvádí aktuálně platné závazné požadavky legislativy EU na transformátory. Praktické dopady realizace těchto požadavků ilustruje šestá kapitola. Jedná se zejména o dopady technického a ekonomického směru, které mohou mít v souhrnu dalekosáhlejší důsledky na celou distribuční síť.

Poslední kapitola vyhodnocuje potenciál úspory energií v České republice na straně odběratele i dodavatele elektrické energie. První část, popisující potenciál úspory energií na straně odběratele, se věnuje především vyčíslení ztrát v transformátorech pro jejich jednotlivé prakticky používané jmenovité výkony. Na základě presumpce počtu provozovaných kusů jednotlivých jmenovitých výkonů transformátorů v distribuční soustavě je pak proveden výpočet celkových ztrát transformátorů v distribuční soustavě. Druhá část poslední kapitoly, jež se věnuje vyhodnocení potenciálu úspor na straně dodavatele, zdůrazňuje benefit energetických úspor plynoucích z použití nízkoztrátového transformátoru na příkladu fotovoltaické elektrárny.

Tato publikace se zaměřuje hlavně na možnosti ovlivnění ztrát vznikajících v koncových distribučních transformátorech pomocí úpravy jejich konstrukce v rámci koncepce Ekodesign II, která řeší maximální přípustné ztráty naprázdno a nakrátko u výkonových transformátorů. Závazná je pro všechny evropské výrobce distribučních transformátorů od 1. července roku 2021. Před tímto datem byl od 1. července roku 2015 v platnosti o stupeň nižší koncept, tzv. Ekodesign I, který v porovnání s požadavky Ekodesign II toleroval vyšší ztráty transformátorů.

Podklady pro zpracování publikace vycházely z veřejně publikované i firemní literatury o elektrických strojích, zejména distribučních transformátorech a energetice. Dále pak souvisejících norem EN a Nařízení komise EU, konzultací s odborníky z oblasti energetiky a akademické sféry a též zkušeností autora a jeho spolupracovníků.

Na tomto místě je autorovou milou povinností poděkovat všem, kteří byli nápomocni při zpracování publikace, v první řadě pak vedení společnosti Trafo CZ, a.s. za řadu podnětných připomínek a poskytnutí nezbytných technických údajů a specifikací, čímž bylo výrazně přispěno k vyšší úrovni a vyváženosti obsahu této publikace, jež bude ostatně na stránkách žadatele zveřejněna.

# I ÚVOD DO PROBLEMATIKY SNIŽOVÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI NA ÚZEMÍ EU

V poslední době je kladen stále větší důraz na všeobecné snižování energetické náročnosti prakticky ve všech oblastech každodenního života. Rozvoj nových výrobních postupů a použití moderních materiálů, například v oblasti stavebnictví, umožňuje nepřímo snížit energetické ztráty díky stále většímu počtu zateplených budov, což má za následek zejména snížení nákladů na vytápění. Stávající nevhodné elektrické přímotopy jsou nahrazovány moderními tepelnými čerpadly. V oblasti osvětlení jsou nahrazovány konvenční zdroje moderními s hospodárnějšími LED prvky. Dochází také k postupné obměně domácích elektrospotřebičů za nové a úspornější. V této oblasti je platná poměrně přísná legislativa, které nutí zákazníky pořizovat domácí spotřebiče s nižším příkonem, jak je tomu například u vysavačů nebo žárovek.



Obrázek I: Stožár vedení VN 35kV

Snahy o snížení energetické náročnosti již pronikly i do oblasti energetiky. Jedná se prvořadě o ztráty, které vznikají při přenosu elektrické energie od generátoru v elektrárně ke konečnému spotřebiteli zákazníkovi. Příčinou nejvýraznějších ztrát je úbytek na vedení způsobený proudem, který jim protéká, a mimo jiné také ztráty naprázdno v jednotlivých



transformátorech v celé přenosové a distribuční soustavě. Ačkoliv jsou fyzikální zákony, na jejichž principu transformátory fungují, od výroby prvního exempláře stále stejné, konstrukce transformátorů prošla značným vývojem s důrazem na ekonomičnost provozu a dosažení nejvyšší možné účinnosti. Dalšími významnými faktory vývoje transformátorů jsou snižování hmotnosti a velikosti transformátoru. V tomto ohledu byl technologický pokrok vývoje olejových transformátorů dovršen konstrukcí hermetizovaných distribučních transformátorů, jenž vykazují podstatně menší celkovou hmotnost vztahenou na konkrétní jmenovitý výkon, než mají transformátory s konzervátorem. S tím souvisí i menší obsažené množství oleje, které může být při případném úniku potenciální zátěží pro životní prostředí. Ačkoliv u dnešních moderních hermetizovaných distribučních transformátorů k průsakům oleje, vlivem technologického pokroku při výrobě, již prakticky nedochází. Právě ekologické a bezpečnostní požadavky, jako je například přijatelná úroveň hluku při provozu transformátoru, mají v současnosti, kromě ekonomických požadavků, na vývoj transformátorů značný vliv.

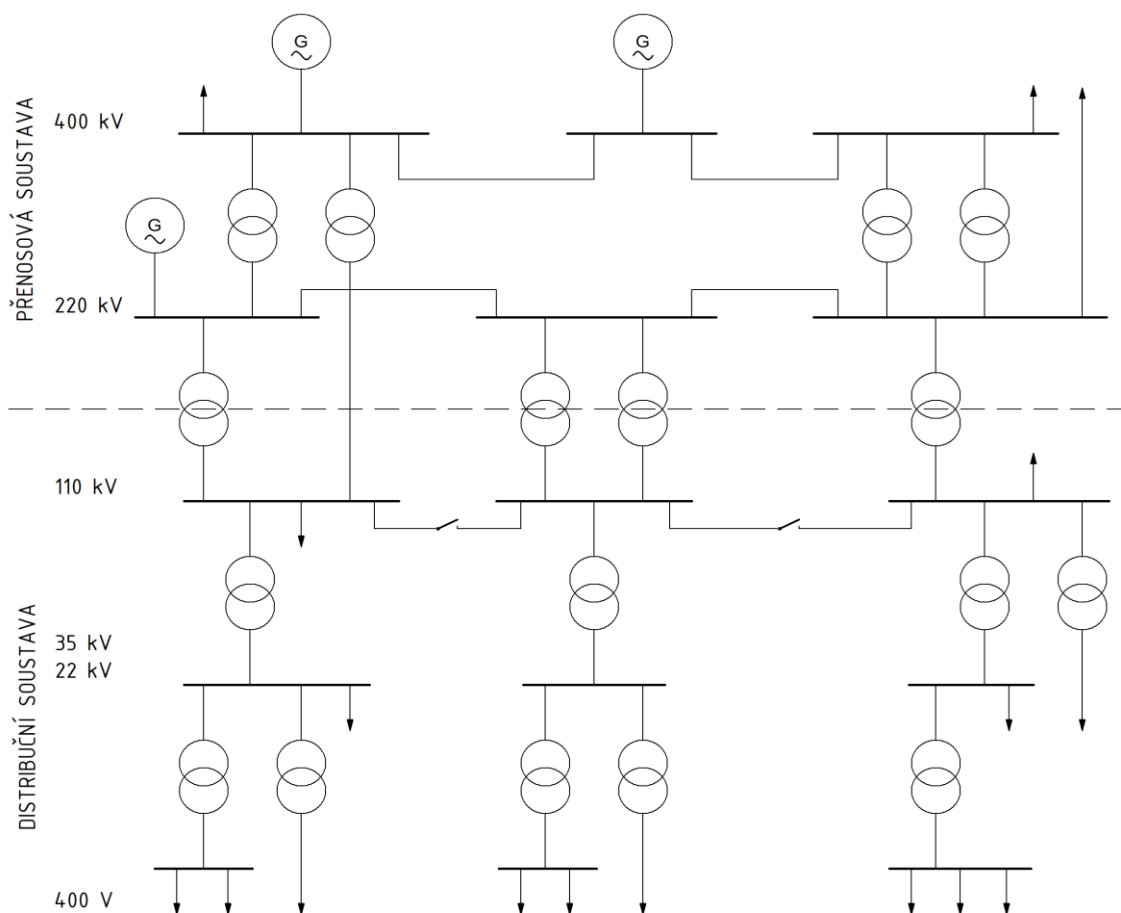
I přes snahy o snížení energetické náročnosti má meziroční spotřeba elektrické energie v České republice spíše rostoucí tendenci, čemuž přispívá mimo jiné prosperující hospodářství a zvyšující se životní úroveň domácností, které tlačí spotřebu elektřiny směrem vzhůru. I několik televizí, myčka, sušička prádla či klimatizace již začíná být standardem napříč českými domácnostmi. Do budoucna je také nutné počítat s nezanedbatelným rozvojem dopravy, jakožto jednoho z největších odběratelů vyrobené elektrické energie. Rozvoj elektromobility v osobní i městské hromadné dopravě, na železnici rozšiřování elektrické trakce na další neelektrifikované tratě a výstavba nových vysokorychlostních tratí bude jistě mít na množství odebírané elektrické energie značný vliv.

Případné úspory energií plynoucí ze zavedení požadavků Ekodesign II na distribuční transformátory mohou alespoň částečně výše popsanou očekávanou vyšší energetickou poptávku pomoci kompenzovat.

## 2 PŘENOSOVÁ A DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA ČESKÉ REPUBLIKY

Účelem elektrizační soustavy je přenos elektrické energie z místa její výroby do místa spotřeby. Až na několik výjimek se při přenosu na území České republiky výhradně využívá střídavého napětí, díky čemuž je možné za pomoci transformátorů velmi účinně a technicky nenáročně zvýšit jeho velikost, což umožňuje citelně omezit vysoké ztráty způsobené odporem vodičů. Hlavními články elektrizační soustavy jsou elektrárny, vlastní přenosové vedení, rozvodny, transformátory.

Elektrárny jsou nedílnou součástí elektrizační soustavy. K výrobě využívají různorodých fyzikálních či chemických procesů. Za pomoci například tepelné, vodní nebo větrné energie je poháněna turbína, která je připojena ke hřídeli generátoru, v jehož statoru se indukuje většinou třífázové napětí o hodnotě několik jednotek až nízkých desítek kV podle velikosti generátoru. Toto napětí je dále zvýšeno pomocí blokových transformátorů zpravidla na hodnotu 400 kV a 220 kV.



Obrázek 2: Elektrizační soustava ČR

Sítě se zmíněnými napětovými hladinami tvoří v České republice páteř celé elektrizační soustavy a jsou nazývány přenosovou soustavou. Díky velkým hodnotám napětí umožňují přenos velkých výkonů na značné vzdálenosti při minimálních ztrátách. Proto tyto sítě primárně propojují velké elektrárny a zajišťují napojení na zahraniční elektrizační soustavy.

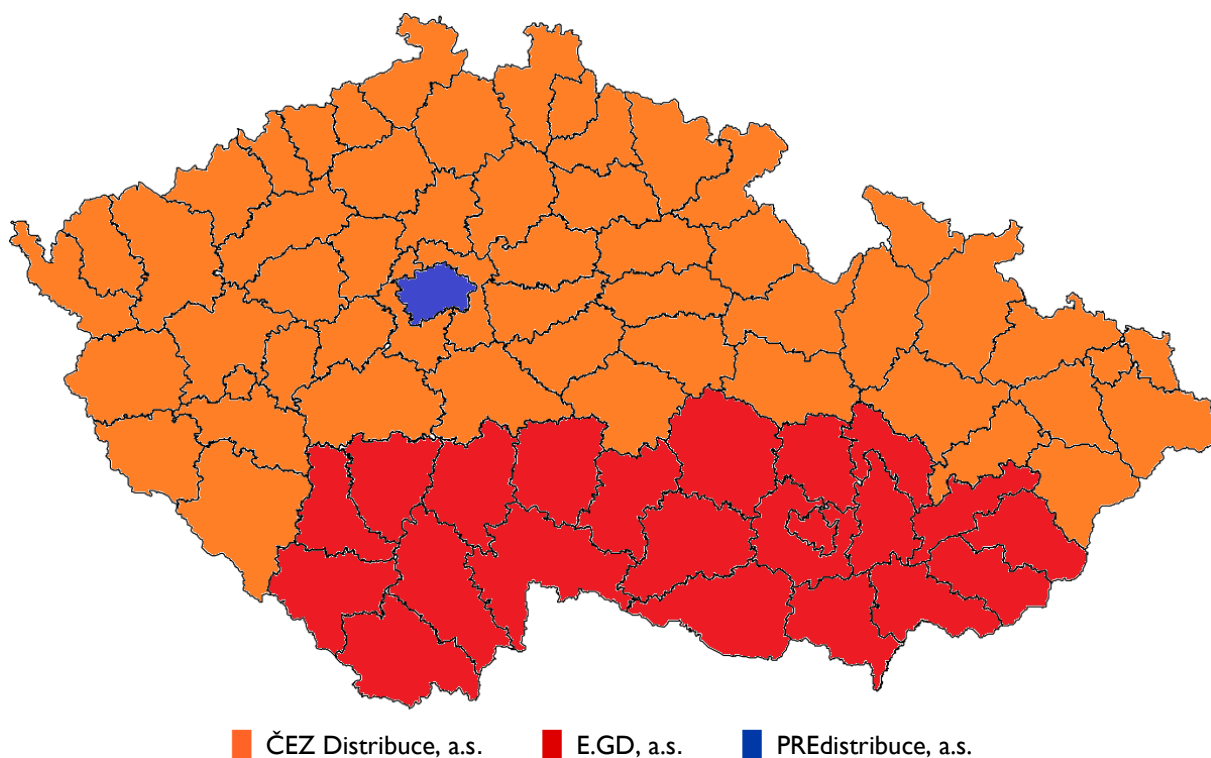
Přenosovou soustavu lze rozdělit do dvou základních skupin. Přenosové sítě, zajišťující připojení elektrárenských bloků do přenosové soustavy, jsou nazývány blokovým vedením. Dále jsou pak vedení přenosová, která propojují jednotlivé rozvodny. Přenosovou soustavu České republiky tvoří 3 735 km vedení zvláště vysokého napětí 400 kV a 1 909 km vedení velmi vysokého napětí 220 kV. Uzly přenosové soustavy tvoří rozvodny. Těch je na obou napětových hladinách celkem 40. Provozovatelem přenosové soustavy v České republice je společnost ČEPS, a.s.



Obrázek 3: Rozvodna 220 kV, Praha Malešice

Na přenosovou soustavu bezprostředně navazuje distribuční soustava, které slouží k distribuci elektrické energie koncovým odběratelům. Česká distribuční soustava je tvořena sítěmi 110 kV a všech nižších napětových úrovní. Hlavním rozdílem mezi přenosovou a distribuční soustavou je, kromě velikostí provozních napětových hladin, také způsob zapojení obou sítí. V případě přenosové soustavy jsou téměř všechna vedení a transformátory mezi sebou propojeny. Jedná se o tzv. okruhovou síť, kde se všechny prvky vzájemně elektricky

ovlivňují. Při poruše nebo vypnutí vedení je zajištěn přenos výkonu díky ostatním prvkům, které zůstaly v provozu, čímž je zajištěn kontinuální přenos elektrické energie. Naproti tomu distribuční soustava se vyznačuje vzájemně nepropojenými oblastmi, které jsou napájeny z přenosové soustavy transformátory. Jednotlivé oblasti distribuční soustavy lze v případě potřeby propojit a umožnit tak flexibilní převedení výkonu mezi jednotlivými částmi v případě jeho nadbytku či nedostatku. Distribuční soustava České republiky má, v závislosti na jejím územním rozdělení, více provozovatelů. Jsou jimi společnost ČEZ Distribuce, a.s., která pokrývá převážnou část území republiky, E.G.D, a.s. (dříve E.ON Distribuce, a.s.) pokrývající zejména oblast jižních Čech a Moravy a společnost PREdistribuce, a.s., která pokrývá území hlavního města Prahy.



Obrázek 4: Územní rozdělení ČR dle provozovatelů distribuční soustavy

Nedílnou součástí distribuční soustavy jsou také vedení vysokého napětí provozované převážně v napět'ové hladině 22 kV, respektive 35 kV používaných ve východních Čechách a také částečně v severních Čechách. Kromě těchto normalizovaných hladin jsou ještě stále v částech distribuční soustavy v provozu napět'ové hladiny 6 kV a 10 kV, které jsou již nahrazovány v rámci unifikace napět'ovou hladinou 22 kV, respektive 35 kV.

Pro umožnění následné distribuce elektrické energie konečným odběratelům v napět'ové hladině soustavy nízkého napětí 230/400 V je určen distribuční transformátor.

### 3 DISTRIBUČNÍ TRANSFORMÁTOR

Transformátor je netočivý elektrický stroj určený ke změně hodnoty střídavého napětí na jinou hodnotu bez změny frekvence tohoto napětí. Pracuje na principu elektromagnetické indukce, který byl popsán již v první polovině 19. století fyzikem Michaelem Faradayem. Distribuční transformátory jsou určeny k transformaci vysokého napětí z distribučních hladin 22 a 35 kV na hladinu nízkého napětí 230 V, respektive 400 V sdruženého napětí. V České republice jsou zpravidla využívány třífázové distribuční transformátory s různým zdánlivým jmenovitým výkonem. Společnost ČEZ Distribuce, a.s., v roce 2019 provozovala celkem 59 552 transformačních stanic VN/NN [1]. Jejich počet meziročně roste řádově o několik stovek.

V oblasti energetiky mají transformátory naprosto nezastupitelnou funkci, tudíž je kladen důraz na jejich neustálý vývoj, spolehlivost a ekonomičnost provozu. Jako každý jiný elektrický stroj i transformátor pracuje s určitou účinností, jejíž zvýšení přináší značné finanční úspory z provozu elektrizační soustavy. Neopomenutelným výsledkem mnoholetého vývoje distribučních transformátorů je také zmenšení velikosti, hmotnosti a také hluku, který během provozu vzniká.



Obrázek 5: Olejové distribuční transformátory ELIN (Trafo CZ, a.s.)

### 3.1 Vlastnosti a zapojení

V třífázovém distribučním transformátoru jsou na společném magnetickém obvodu, tzv. jádru, umístěny celkem tři páry primárního a sekundárního vinutí, pro každou fázi jeden pár. Jednotlivé cívky vinutí lze zapojit do trojúhelníka (značí se D), kdy je konec předchozí fáze vinutí vždy spojen se začátkem následující fáze vinutí a uzly jsou připojeny k jednotlivým fázím sítě. Další možností je zapojení do hvězdy (Y), kde konce všech fází vinutí tvoří společný uzel a začátky jsou připojeny na jednotlivé fáze sítě, případně do lomené hvězdy (Z, dříve Yz). Vinutí každé fáze jsou rozděleny na polovinu, přičemž jedna polovina je přesunuta na vedlejší sloupek magnetického obvodu. Toto zapojení se používá pouze na výstupní, tedy sekundární straně transformátoru pro vyrovnání nesymetrického zatížení jednotlivých fází.

Vinutí zapojená do hvězdy mají proud fází roven proudu fázovému  $I_f$  v síťových přívodech a fázové napětí  $U_{if}$  fází je  $1/\sqrt{3} \times$  menší než síťové sdružené napětí  $U_{is}$ . U vinutí zapojených do trojúhelníku je fázový proud  $I_{if}$  fází  $1/\sqrt{3} \times$  menší než sdružený proud  $I_{is}$  v síťových přívodech a napětí fází je rovno síťovému sdruženému napětí  $U_{is}$ .

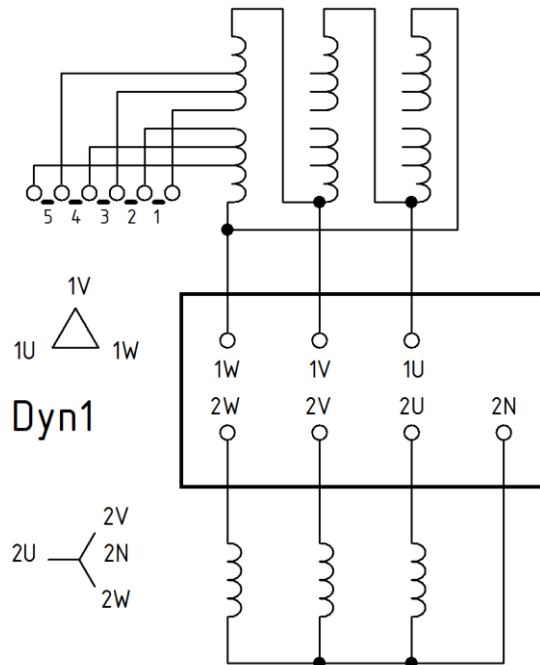
V případě označení zapojení vinutí primární strany transformátoru jsou typy zapojení značeny velkými písmeny, v případě vinutí sekundární strany transformátoru malými písmeny. Označení zapojení transformátoru bývá doplněno znaky N nebo n, pokud je vyveden střední vodič primárního, respektive sekundárního vinutí.

Vhodnou kombinací zapojení cívek na primární a sekundární straně lze zásadně ovlivnit parametry celého transformátoru. Jeden z těchto parametrů je hodinový úhel, někdy označován jako skupina spojení. Vyjadřuje fázový posun mezi fázory odpovídajícího vstupního a výstupního napětí fáze. Je udáván v hodinách, jedna hodina odpovídá úhlovému fázovému posunu  $30^\circ$ .

Pro každé zapojení (Y, D, z) je možné teoreticky vytvořit 12 různých skupin s fázovým posunem 0 až  $330^\circ$  (po  $30^\circ$ ). Fázor vyššího napětí představuje velkou hodinovou ručičku a jeho poloha je vždy na 0 (12). Fázor nižšího napětí (malá ručička) zaujímá polohy od 0 do 11. Toto jednoduché a jednoznačné značení je připisováno českému vědci prof. Vladimíru Listovi.

Například pro skupinu spojení YznI je vinutí vyššího napětí spojeno do hvězdy a vinutí nižšího napětí do lomené hvězdy s fázovým posunem jedna hodina, tzn.  $30^\circ$ . Tato skupina spojení byla pro své vlastnosti dříve hojně využívána u distribučních transformátorů menších jmenovitých výkonů. Dalším příkladem je skupina spojení transformátoru DynI, jenž je zároveň

momentálně v české distribuční soustavě nejrozšířenější. Cívky sekundárního vinutí jsou zapojeny do hvězdy s vyvedeným středem, potažmo středním vodičem. Cívky primárního vinutí jsou zapojeny do trojúhelníka, hodinový úhel je  $30^\circ$ .



Obrázek 6: Zapojení transformátoru Dyn I

Součástí obvodu primárního vysokonapětového vinutí transformátoru je také třípólový pětipolohový přepojovač odboček, který umožňuje přemostit určitý počet závitů primárního vinutí, čímž dojde ke změně převodového poměru, což v jistých mezích umožňuje regulovat výstupní napětí transformátoru (řádově jednotky %), s ohledem na různé napětové poměry v různých místech distribuční soustavy. Manipulace s tímto přepojovačem je možná pouze v beznapětovém stavu.

V některých situacích je technicky a ekonomicky výhodné použít paralelní zapojení dvou a více distribučních transformátorů. Příkladem použití takového řešení může být výrazné nerovnoměrné zatížení během dne. Aby nedocházelo k protékání vyrovnávacího proudu sekundárními vinutími paralelně zapojených distribučních transformátorů, je nutné splnit základní podmínky:

- a) Stejně jmenovité napětí
- b) Stejný převod
- c) Stejný hodinový úhel
- d) Stejný úbytek napětí způsobený proudem naprázdno

Poslední uvedená podmínka je v praxi většinou zanedbávána.

Naprostá většina distribučních transformátorů v české distribuční síti pracuje jako snižovací. Z toho důvodu je v celé této publikaci, pokud není uvedeno jinak, primárním vinutím distribučního transformátoru myšlena jeho vysokonapěťová strana. Sekundární vinutí pak představuje nízkonapěťovou stranu. Výjimkou jsou například fotovoltaické elektrárny, kde je nízké napětí ze střídačů přivedeno na nízkonapěťovou stranu distribučního transformátoru. Tato strana je tedy pak označována jako primární, vysokonapěťová jako sekundární.

### 3.2 Typy chlazení

Během běžného provozu transformátoru vznikají ztráty, které se projevují oteplením stroje. Pokud jeho teplota přesáhne přijatelnou mez, dochází k degradaci izolace a jejích izolačních vlastností, což nevyhnutelně vede k poškození až zničení transformátoru. Pro jeho efektivní provoz, delší životnost a také vyšší účinnost je nezbytné zajistit dostatečný odvod tepla do okolí. Dle konstrukce a použitého hlavního chladicího média můžeme distribuční transformátory dělit na olejový (oil O), kde je jako chladící médium použit transformátorový olej, a suchý, kde je chlazení zajištěno proudem vzduchu (air A). Toho lze docílit různými druhy aktivního (značí se A) či pasivního (přirozeného, naturálního N) chlazení proudem vzduchu. Pokud je například na štítku transformátoru uvedeno označení ONAN, jedná se o olejový transformátor s přirozeným oběhem oleje a přirozenou výměnou teplem ohřátého okolního vzduchu chladným vzduchem.

V české distribuční soustavě jsou převážně používány olejové distribuční transformátory. Jádro a vinutí jsou ponořeny v nádobě s olejem. Při zahřívání aktivní části transformátoru roste také teplota oleje, čímž dojde k jeho přirozenému proudění chladícími kanálky uvnitř vinutí. Ohřátý olej předá teplo okolnímu prostředí pomocí chladících žebér nádoby transformátoru. Ochladené chladící médium pak znovu prochází vinutím. Dochází tak k jeho přirozené cirkulaci.

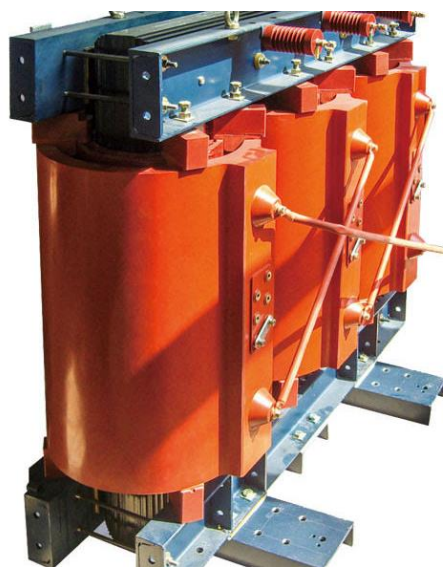
Dnešní moderní olejové distribuční transformátory se výhradně konstruují jako hermeticky uzavřené. Veškerý nabytý objem oleje vlivem jeho ohřátí je absorbován pružnými chladícími žebry nádoby transformátoru. Hlavní výhodou olejového chladicího média je velmi dobrá elektrická pevnost a odvod tepla. Olejové transformátory jsou vhodné pro instalaci ve venkovním prostředí i do kioskových trafostanic, které jsou konstrukčně vybaveny jímkou pro případný nežádoucí únik oleje, který by zatěžoval životní prostředí. Provozem transformátoru nedílně dochází ke stárnutí oleje. Rozbor jeho odebraného vzorku umožňuje detailní



diagnostiku kondice transformátoru bez toho, aniž by byl rozebrán. Zásadní nevýhodou transformátorového oleje je hořlavost.

Právě parametr hořlavosti chladicího média distribučních transformátorů vedl v některých případech k použití suchých distribučních transformátorů. Jedná se zejména o svařovací roboty v automobilovém průmyslu, kde je nutné zajistit dostatečnou tvrdost sítě mimo jiné blízkým umístěním transformátoru. S ohledem na riziko vzniku požáru by bylo umístění olejového distribučního transformátoru do podobného prostředí velmi problematické a nákladné. Samozhášecího efektu u suchých distribučních transformátorů v případě jejich požáru lze docílit přidáním vhodných aditiv během výroby při zalévání jejich vinutí syntetickou pryskyřicí. Tato zalévací hmota je vynikající izolační prvek. Hodnota elektrického odporu na jeden centimetr se pohybuje v rozmezí  $10^{13}$  až  $10^{15}$   $\Omega/\text{cm}$ . Má také velmi dobrou přilnavost a mechanickou odolnost. Správně zalité vinutí neobsahuje žádné dutinky, je 100% neporézní. Obdobně jako olejový transformátor se i suchý transformátor skládá z magnetického obvodu, tj. jádra, nosné konstrukce a mechanických stahovacích prvků, primárního a sekundárního vinutí a příslušenství.

Suchý transformátor umožňuje umístění v těsné blízkosti místa spotřeby, případně přímo ve výrobní hale. Vzduch, jako chladící médium, má oproti oleji horší izolační vlastnosti. Tyto transformátory se také vyznačují vyššími ztrátami, vyšší hlučností a v určitých prostředích nutností zajištění dodatečného krytí. Tyto vlastnosti je předurčují pro použití v průmyslu, pro trakční účely v oblasti MHD a všude tam, kde je požadována zvýšená ochrana vod a životního prostředí.



Obrázek 5: Suchý distribuční transformátor Altrafo

### 3.3 Poměrné napětí nakrátko

U distribučních transformátorů je velmi důležitý štítkový údaj *poměrné napětí nakrátko*, někdy též nazývané zkratové napětí. Jedná se o ukazatel proměnlivosti sekundárního, respektive výstupního napětí při změnách zatěžovacího proudu. Poměrné napětí nakrátko je takové napětí na primárním vinutí transformátoru, při kterém jím protéká jmenovitý primární proud při zkratovaném sekundárním, respektive výstupním vinutí. Při dodržení jmenovitého proudu primárním vinutím nedojde při měření poměrného napětí nakrátko k destruktivnímu poškození vinutí transformátoru.

Poměrné napětí nakrátko je na štítkách distribučních transformátorů většinou udáváno v procentech. Lze ho určit z následujícího vztahu:

$$u_k = \frac{U_k}{U_n} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

Kde  $u_k$  je poměrné napětí nakrátko,  $U_k$  je naměřená hodnota primárního napětí, při které protéká primárním vinutím jmenovitý proud  $I_N$  a  $U_n$  značí jmenovité napětí primárního vinutí transformátoru.

Velikost poměrného napětí nakrátko je ukazatelem zdánlivého vnitřního odporu transformátoru. Udává tvrdost výstupního napětí. Nízká hodnota poměrného napětí nakrátko znamená malý zdánlivý vnitřní odpor. U reálných distribučních transformátorů se pohybuje kolem 4 až 6 %. U velkých výkonových transformátorů v přenosové soustavě VVN/VN nebo například u trakčních transformátorů, které jsou umístěny v drážních trakčních měnárnách 3 kV, dosahuje hodnota poměrného napětí nakrátko až 10 %.

Pomocí poměrného napětí nakrátko lze určit skutečnou velikost ustáleného zkratového proudu pomocí vztahu:

$$I_k = \frac{I_N}{u_{k\%}} \cdot 100 [A] \quad (2)$$

Kde  $I_k$  je skutečná velikost ustáleného zkratového proudu,  $I_N$  označuje jmenovitý proud primárního vinutí transformátoru a  $u_{k\%}$  představuje hodnotu poměrného napětí nakrátko v procentech. Jelikož Jouleovy ztráty rostou s druhou mocninou proudu, trvalý zkratový proud působí na vinutí transformátoru destruktivními účinky.

## 4 HOSPODÁRNOST, ZTRÁTY DISTRIBUČNÍCH TRANSFORMÁTORŮ A JEJICH OVLIVNĚNÍ

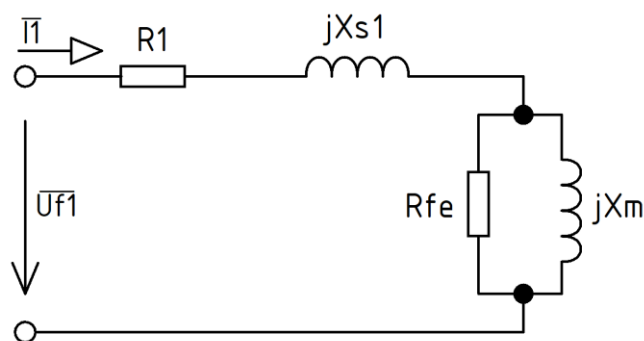
Transformátory jsou nedílnou součástí distribuční soustavy, na jejichž hospodárnost mají zcela zásadní podíl. Ztráty, vznikající během provozu transformátoru, dělíme na ztráty naprázdno a ztráty nakrátko. Celkové činné ztráty v transformátoru lze pak vyjádřit jako součet ztrát naprázdno a ztrát nakrátko. Mimo těchto uvedených ztrát se ještě u reálných transformátorů vyskytují přídavné ztráty průsakem izolací, dielektrické ztráty a ztráty rozptylovým magnetickým tokem z vinutí, který indukuje vířivé proudy v kovových částech transformátoru, tedy zejména ve stěnách nádoby, konstrukcích stahovacích prvků jádra a svornících.

Výkon transformátoru obsahuje kromě činné složky také nezanedbatelnou jalovou indukční složku. Obdobně jako u všech elektrických strojů, jejichž funkce je založena na principu elektromagnetické indukce, jako jsou například asynchronní motory atd.

### 4.1 Činné ztráty

#### 4.1.1 Ztráty naprázdno

Tyto ztráty, nazývané též ztrátami v železe, jsou nezávislé na zatížení transformátoru. Mají také konstantní hodnotu. Vycházejí ze zapojení transformátoru naprázdno, tedy s rozpojeným sekundárním vinutím, kterým v důsledku toho neprotéká žádný proud. Primárním vinutím protéká pouze magnetizační proud tvořící magnetický tok, který se uzavírá v magnetickém obvodu. Ztráty vlivem průtoku budícího proudu primárním vinutím jsou zanedbatelné. Hlavní složku ztrát naprázdno tvoří ztráty, které jsou způsobeny magnetickým tokem, který je uzavírán magnetickým obvodem.

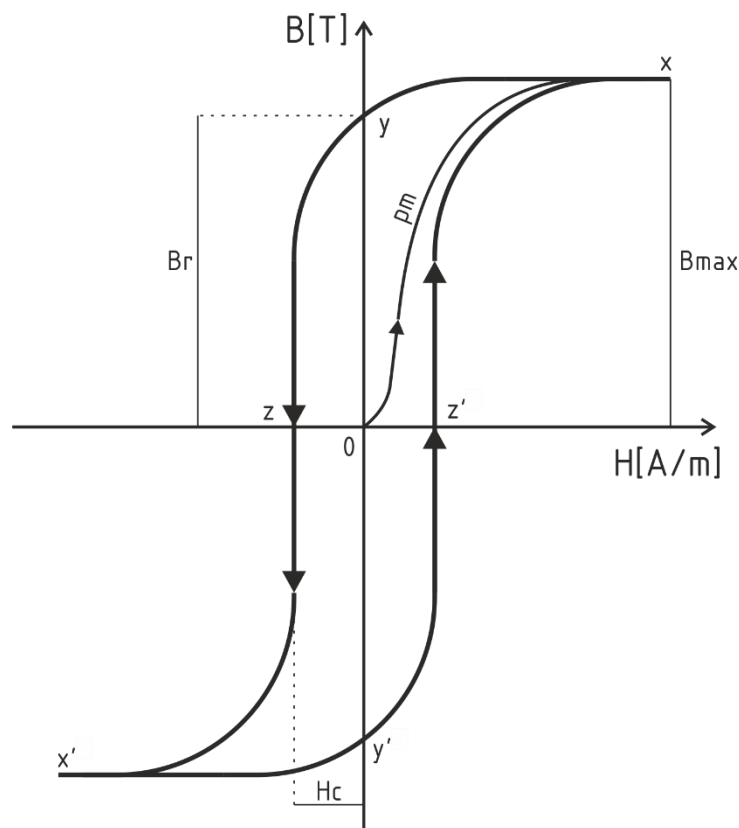


Obrázek 6: Náhradní schéma transformátoru naprázdno (jedné fáze)

Primární fázový budící proud je v náhradním schématu transformátoru označen jako  $\bar{I}_{f1}$ ,  $R_1$  reprezentuje ohmický odpor primárního vinutí,  $jX_{s1}$  je rozptylová reaktance primárního vinutí,  $R_{fe}$  symbolizuje ztráty v železe,  $jX_m$  je magnetizační reaktance transformátoru a  $\bar{U}_{f1}$  je primární fázové napětí transformátoru.

Ztráty naprázdno se dělí na hysterezní ztráty (přemagnetizací) a ztráty vířivými proudy.

**Hysterezní ztráty** jsou příčinou zahřívání jádra transformátoru při jeho střídavém zmagnetování a odsmagnetování. Je to de facto tepelná energie, odpovídající ploše ohraničené křivkou, která vznikne při jednom oběhu po hysterezní smyčce. Hysterezní ztráty jsou tedy úměrné ploše hysterezní křivky. Čím menší je plocha hysterezní smyčky, tím menší jsou i hysterezní ztráty. Tvar této smyčky lze ovlivnit chemickým složením materiálu a jeho tepelným a mechanickým zpracováním. Příkladem tradičního materiálu používaného pro magnetický obvod transformátorů je křemíková magneticky orientovaná ocel válcovaná za studena. Tyto, v současné době používané, trafoplechy obsahují okolo 3 % křemíku, jehož přidáním se výrazně zlepšují magnetické vlastnosti plechu. Tím se sníží hysterezní ztráty a zároveň se zvýší odpor plechu, což má za následek eliminaci ztrát vířivými proudy.



Obrázek 7: Hysterezní smyčka feromagnetického materiálu

Při magnetizaci nezmagnetizovaného materiálu (trafoplechu), tzv. prvotní magnetizace materiálu, se mění magnetická indukce  $B$  v závislosti na intenzitě magnetického pole  $H$  nejprve podle křivky prvotní magnetizace ( $p_m$ ) z bodu 0 do bodu nasycení, který je označen jako  $x$ . Další zvyšování budícího proudu vinutí nevede ke zvýšení indukce, materiál nelze již více zmagnetizovat. Zánik budícího proudu způsobí pokles intenzity magnetického pole na nulu. Ve zmagnetizovaném materiálu ovšem zůstane zbytková, někdy označovaná jako remanentní, magnetická indukce  $B_r$ , odpovídající bodu  $y$  na hysterezní smyčce.

Opačně orientovaná intenzita magnetického pole, způsobená opačnou polaritou budícího proudu vinutím, odstraní remanentní magnetickou indukci. Vinutí je v tento moment zdrojem intenzity magnetického pole. V materiálu magnetického obvodu ovšem není žádná magnetická indukce. Intenzita magnetického pole, která je nutná k odstranění remanentního magnetismu se nazývá koercitivní intenzita magnetického pole. Označuje se  $H_c$ , na hysterezní smyčce odpovídá bodu  $z$ . Bude-li se nyní dále zvětšovat záporný budící proud vinutí, dojde opět ke zmagnetizování materiálu magnetického obvodu a jeho nasycení při opačné orientaci  $B$  i  $H$  (v absolutní velikosti). Tato situace na hysterezní smyčce odpovídá bodu  $x'$ . Po zániku budícího proudu zůstane opět remanentní magnetismus, odpovídající bodu  $y'$  na hysterezní smyčce, který lze odstranit koercitivní intenzitou magnetického pole. Při dalším zvyšování budícího proudu dojdeme opět do bodu nasycení  $x$ .

Pro úplné odmagnetování je třeba v materiálu opět nastolit neuspořádaný stav elementárních domén. Toho lze docílit postupným slábnutím střídavého magnetického pole tvořeného vinutím, které je buzeno proudem s pozvolna klesající amplitudou. Intenzita odmagnetizujícího pole tak mění stále svůj směr a zmenšuje svoji velikost. Odpovídajícím způsobem se tak zmenšuje i hysterezní smyčka [6].

Podle velikosti plochy hysterezní smyčky lze rozdělit materiály na magneticky měkké, které se obecně pro své příznivé vlastnosti uplatňují při konstrukci magnetických obvodů elektrických strojů, a magneticky tvrdé materiály, jenž se využívají primárně pro výrobu permanentních magnetů.

Hysterezní ztráty v transformátoru lze vyjádřit pomocí následujícího vztahu:

$$P_h = k_1 \cdot f \cdot B_{mp}^n [W] \quad (3)$$

Kde  $P_h$  jsou hysterezní ztráty v transformátoru,  $k_1$  je konstanta závislá na materiálu,  $B_{mp}$  značí maximální hodnotu magnetické indukce (amplituda),  $f$  značí frekvenci,  $n$  představuje

Steinmetzovu konstantu nabývající hodnot  $1,6 \div 2$  pro plechy válcované za tepla a  $>2$  pro plechy válcované za studena.

Hysterezní ztráty jsou také ovlivňovány rozložením magnetické indukce v celém magnetickém obvodu. Rozložení spojek a jader by mělo být takové, aby nedocházelo k prostupu magnetického toku kolmo k vrstvení. Řešením tohoto problému je odstupňování spojek magnetického obvodu. Hysterezní ztráty tvoří polovinu až ze 70 % celkových ztrát naprázdno, zbytek tvoří ztráty vířivými proudy.

**Ztráty vířivými proudy** vznikají v transformátoru kvůli působení proměnného magnetického toku, který indukuje v materiálu jádra elektromotorické napětí. Pokud by byl materiál jádra celistvý monoblok, byly by ztráty vířivými proudy nepřijatelně velké – klesají úměrně s druhou mocninou tloušťky materiálu. Proto je jádro složeno z tenkých, vzájemně izolovaných plechů. Mimo to je také lze ovlivnit velikostí magnetické indukce a frekvencí napájecího napětí. Ztráty vířivými proudy tvoří od 30 % až po 50 % ztrát naprázdno.



Obrázek 8: Detail sloupku jádra před složením horní spojky

Ztráty vířivými proudy lze vyjádřit pomocí následujícího vztahu:

$$P_e = k_2 \cdot f^2 \cdot t^2 \cdot B_{RMS}^2 [W] \quad (4)$$

Kde  $P_e$  jsou ztráty vířivými proudy v transformátoru,  $k_2$  značí konstantu závislou na materiálu,  $B_{RMS}$  představuje efektivní hodnotu magnetické indukce,  $f$  značí frekvenci a  $t$  je tloušťka plechu.

Obecně lze velmi zásadně ovlivnit celkové ztráty naprázdno vhodnou volbou materiálu magnetického obvodu, tj. trafoplechů. Transformátorové plechy jsou charakterizovány ztrátovým číslem, které udává magnetizační energii v jednotkách watt. Ztrátové číslo bývá určeno v  $l$  kg materiálu plechu při jmenovité frekvenci 50 Hz a při magnetické indukci  $l$  T. Magnetická kvalita a praktická využitelnost křemíkové elektrotechnické oceli závisí nejen na obsahu křemíku, tloušťce plechu, ale také technologii jeho výroby.

První skupinou materiálů jsou plechy válcované za tepla. Tyto plechy se vyznačují poměrně nízkou výrobní cenou. Nicméně mají drsnější povrch, což způsobí horší činitel plnění. Tyto plechy jsou válcovány na pláty o síle 0,35, 0,5 nebo 1 mm.

Druhou skupinou, která se dnes při výrobě magnetických obvodů transformátorů velmi hojně v praxi používá, jsou magneticky orientované plechy válcované za studena. Tento materiál vykazuje výrazně lepší vlastnosti v jednom směru, a to ve směru válcování. V tomto směru klesnou měrné magnetické ztráty na zhruba poloviční hodnotu ztrát plechů válcovaných za tepla. Mají také lepší činitel plnění, tloušťka plechů je obvykle 0,5 nebo 0,35 mm.

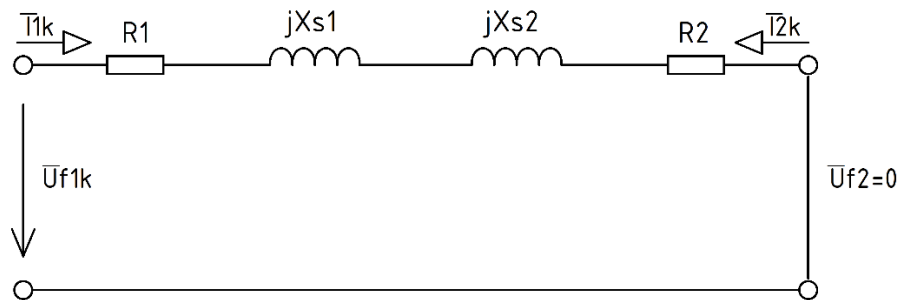
Posledním, poměrně novým, materiálem jsou plechy z amorfni oceli. Technologie využívající amorfni plechy je založena na rychlém ochlazení tekutého kovu. Díky tomu je možné vyrábět pásy o tloušťce řádově několika setin milimetru, obvykle 0,02 mm. V porovnání s dosud používanou elektrotechnickou ocelí nejlepší jakosti vykazuje materiál vyrobený touto technologií až o dvě třetiny menší ztráty. Amorfni magnetické materiály mají také velkou permeabilitu a extrémně malé magnetizační ztráty – v porovnání s plechy válcovanými za tepla jsou ztráty až desetkrát nižší, řádově 0,16 W/kg (při frekvenci 50 Hz a  $B_{max}$  1,45 T). S ohledem na tyto vlastnosti mají distribuční transformátory s magnetickým obvodem využívající tuto technologii velmi nízké ztráty. Magnetický obvod těchto transformátorů ovšem vyžaduje, vzhledem k vysoké tvárnosti amorfni plechů, specifickou konstrukci [7].

Pro dosažení minimálního zkreslení magnetického toku ve stykových oblastech jednotlivých částí, tzn. sloupků a spojek jádra, je nutné optimalizovat tvar stříhu trafoplechů a jejich překrytí. Trafoplechy jsou řezány pod úhlem  $45^\circ$ , což zajistí maximální možný průtok magnetického toku ve směru válcování, čímž lze dosáhnout nižších ztrát. Následně jsou plechy

skládány ve vzájemném přesahu, a to buď jednotlivě, nebo po více kusech. Na pečlivé složení jádra, respektive magnetického obvodu, transformátoru je nutné klást důraz, neboť kvalita spojů se projeví na velikosti ztrát naprázdno a také na hlučnosti během následného provozu transformátoru.

#### 4.1.2 Ztráty nakrátko

Na rozdíl od ztrát naprázdno jsou ztráty nakrátko, jinak nazývané též ztrátami ve vinutí, závislé na zatížení. Jouleovy ztráty vznikají při průchodu proudu vodiči primárního a sekundárního vinutí, kde se část energie mění na teplo.



Obrázek 9: Náhradní schéma transformátoru nakrátko (jedné fáze)

Primární fázový budící proud je v náhradním schématu transformátoru označen jako  $\bar{I}_{1k}$ ,  $R_1$  reprezentuje ohmický odpor primárního vinutí,  $jX_{s1}$  je rozptylová reaktance primárního vinutí,  $R_{fe}$  symbolizuje ztráty v železe,  $\bar{I}_{2k}$  je sekundární fázový proud,  $R_2$  je ohmický odpor sekundárního vinutí,  $jX_{s2}$  je rozptylová reaktance sekundárního vinutí,  $\bar{U}_{f1k}$  je primární fázové napětí transformátoru a  $\bar{U}_{f2}$  je nulové sekundární fázové napětí transformátoru.

Jouleovy ztráty ve vinutí lze vyjádřit následujícím vztahem:

$$P_J = n \cdot R_1 \cdot I_1^2 + n \cdot R_2 \cdot I_2^2 \text{ [W]} \quad (5)$$

Kde  $n$  je počet fází,  $R_1$  a  $R_2$  jsou fázové odpory primárního a sekundárního vinutí změřené stejnosměrným proudem,  $I_1$  a  $I_2$  představují efektivní hodnoty proudu v primárním a sekundárním vinutí.

Ztráty ve vinutí jsou také ovlivňovány teplotou. S rostoucí teplotou dochází k lineárnímu nárůstu Jouleových ztrát, což je důsledek lineární závislosti odporu na teplotě. Je také zřejmé, že výsledné ztráty ve vinutí lze přímo ovlivnit materiálem vodiče vinutí a jeho průřezem. Typicky se pro konstrukci vinutí používá zejména elektrovodná měď nebo hliník.



Ve vodičích s velkým průřezem, typicky u sekundárních vinutí distribučních transformátorů vyšších výkonů, se také uplatňuje povrchový jev, tzv. skin efekt, v jehož důsledku je proudová hustota nerovnoměrně rozložena na průřezu vodiče, čímž klade vodič procházejícímu proudu větší odpor. Jedná se o fyzikální děj, při kterém dochází k vytlačování elektrického proudu k povrchu vodiče. Střídavý proud procházející vodičem uzavírá kolem sebe siločáry indukčního toku. Část tohoto toku prochází i tím samým vodičem a indukuje v něm uzavřené vířivé proudy. Tyto vířivé proudy mají blíže ke středu vodiče opačný směr než původní elektrický proud a odečítají se od něj, kdežto blíže k povrchu jsou směry souhlasné a proudy se sčítají. Tento jev se při jmenovité síťové frekvenci 50 Hz uplatňuje jen nepatrně a lze ho v praxi zanedbat. Může mít však vliv na případné složky proudových vyšších harmonických složek.

#### **4.1.3 Přídavné ztráty**

U transformátorů větších výkonů dosahují přídavné ztráty nezanedbatelné velikosti. Jedná se zejména o ztráty v konstrukčních částech transformátoru, které mohou způsobit jeho další oteplení, čímž se může negativně ovlivnit jeho životnost.

Největší podíl na velikosti přídavných ztrát mají konstrukční části s velkou plochou, typicky nádoba a víko transformátoru. Příčinou těchto přídavných ztrát ve stěnách nádoby je radiálně odloučený rozptylový tok z vinutí, který indukuje v konstrukci nádoby vířivé proudy. Ačkoliv je hustota rozptylového magnetického toku ve stěnách nádoby nízká, indukované ztráty mohou být vzhledem k velké ploše stěn nádoby vysoké. Díky účinnému olejovému chlazení stěn nádoby a dobré tepelné vodivosti materiálu, ze kterého je nádoba vyrobena, k jejímu lokálnímu přehřátí prakticky nedochází. Pozornost je však nutné věnovat konstrukčním částem s malou plochou, kde jsou sice přídavné ztráty malé, ale jelikož je zde výrazně větší hustota rozptylového toku, může snáze dojít k nepřijatelnému místnímu přehřátí dané konstrukční části.

Přídavné ztráty v nádobě transformátoru lze eliminovat například použitím magnetického stínění spojek jádra, které svede rozptylový magnetický tok vycházející z vinutí zpět do jádra. Magnetické stínění má nízký magnetický odpor, čímž zabraňuje pronikání rozptylového toku do konstrukčních částí transformátoru. Uzavřením rozptylového magnetického toku pomocí stínění lze přímo ovlivnit ztráty vířivými proudy v nádobě, které jsou způsobeny radiálním magnetickým polem na koncích vinutí. Pro dosažení největšího účinku stínění je nutné, aby

mezera mezi stíněním a jádrem byla dostatečně malá. Velikost rozptylového toku, který je přenášen zpět k jádru, závisí na vzdálenosti stínění od jádra.

## 4.2 Účinnost transformátorů

Obecně je účinnost elektrických strojů udávána jako poměr výstupního výkonu  $P_1$  ke vstupnímu výkonu, respektive příkonu  $P_2$ . Pokud se zaměříme na účinnost transformátorů, lze ji vyjádřit několika stejnými způsoby:

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} [-] \quad (6)$$

Kde  $\eta$  je účinnost,  $P_1$  představuje činný příkon transformátoru,  $P_2$  značí činný výkon transformátoru a  $\Delta P$  jsou ztráty v transformátoru. V praxi dosahuje hodnota účinnosti u transformátorů 85-99 %. Distribuční transformátory, a obecně transformátory větších výkonů, mívají vyšší účinnost. Je to parametr, který je závislý na velikosti zatížení. S rostoucím zatížením úměrně klesá, protože se více projevují ztráty nakrátko, které jsou na zatížení transformátoru závislé.

Celkové činné ztráty v transformátoru jsou závislé na zatížení. Lze je vyjádřit jako:

$$\Delta P = P_0 + P_k \frac{S_m^2}{S_n^2} + P_p [W] \quad (7)$$

Kde  $\Delta P$  jsou celkové činné ztráty v transformátoru,  $P_0$  zahrnuje veškeré ztráty naprázdno,  $P_k$  jsou veškeré ztráty nakrátko,  $S_m$  značí zatížení transformátoru,  $S_n$  představuje jeho jmenovitý výkon a  $P_p$  jsou případné přídavné ztráty, jejichž hodnota se v praxi většinou zanedbává, respektive bývá již započítána ve ztrátách nakrátko. Pokud do vztahu (7) zahrneme časovou oblast, dostaneme následující vztah:

$$W_{zr} = P_0 \cdot T_{pr} + P_k \cdot \frac{S_m^2}{S_n^2} \cdot T_z [Wh] \quad (8)$$

Kde  $W_{zr}$  jsou roční ztráty elektrické práce v transformátoru,  $P_0$  jsou ztráty naprázdno,  $T_{pr}$  značí roční dobu provozu transformátoru,  $P_k$  zahrnuje ztráty nakrátko,  $S_m$  značí roční maximum zatížení transformátoru,  $S_n$  je jmenovitý výkon a  $T_z$  představuje roční dobu plných ztrát.

Účinnost transformátoru je maximální při takovém zatížení, při kterém se ztráty nakrátko rovnají ztrátám naprázdno [8].

### 4.3 Jalové ztráty

Distribuční transformátory jsou netočivé elektrické stroje, které ke své funkci využívají principy elektromagnetické indukce. Z principu funkce představují v distribuční síti značnou indukčnost. V podstatě každou fázi si lze představit jako sériový RL obvod. Pokud je takový obvod připojen na zdroj střídavého napětí, odebírá ze sítě vlivem fázového posunu mezi vektorem napětí a proudu, kromě činného výkonu, také výkon jalový, který potřebuje k vytvoření magnetického pole. Tento jalový výkon, jenž se přelévá mezi zdrojem a spotřebičem, v našem příkladu RL zátěží, nekoná žádnou činnou práci. Naopak se dodatečně přičítá k činnému výkonu, čímž nadbytečně dochází k přetěžování veškerých prvků v elektrizační síti.

U reálné indukčnosti není fázor napětí a proudu ve fázi jako u ideálního rezistoru. Mezi fázorem napětí a proudu leží úhel  $\varphi$ . Právě tento fázový posun je příčinou vzniku jalového výkonu, který je možné určit pomocí vztahu:

$$Q = U \cdot I \cdot \cos \varphi = S \cdot \cos \varphi \text{ [VAr]} \quad (9)$$

Kde  $Q$  je jalový výkon,  $U$  je fázové napětí a  $I$  značí proud. V obvodech střídavého proudu je součin napětí a proudu označován jako zdánlivý výkon  $S$ . Hodnota  $\cos \varphi$  je označována jako účinník. Právě hodnota účinníku  $\cos \varphi$  je jedním z klíčových ukazatelů popisujících kvalitu elektrické energie z hlediska její dodávky a odběru. Pokud se zvětšuje hodnota fázového posunu  $\varphi$ , zvětšuje se jalový výkon, ale hodnota  $\cos \varphi$  naopak klesá. Závislost mezi zdánlivým, činným a jalovým výkonem určuje následující vztah:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ [VA]} \quad (10)$$

Uvedený vztah udává pouze výkony pro první proudovou harmonickou složku. Jestliže se v síti vyskytují vyšší harmonické složky proudu, nutně se tím zvyšuje i zdánlivý výkon. Pro zahrnutí i tzv. deformačního výkonu, který je způsoben obsahem vyšších harmonických proudů, se rozšíří vztah (10) o člen deformačního výkonu  $D$ :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \text{ [VA]} \quad (11)$$

Opravdový účinník, jenž zahrnuje také vliv deformačního výkonu, lze pak vyčíslit pomocí vztahu:

$$\lambda = \frac{P}{S} \text{ [-]} \quad (12)$$

Obecně lze snížení indukčního jalového výkonu dosáhnout paralelním připojením kondenzátoru k indukčnímu spotřebiči. V důsledku toho je jalový výkon, který v indukčním spotřebiči vytvořil magnetické pole, předán kondenzátoru a následně koluje již mezi ním a indukčním spotřebičem. Kondenzátor vykazuje kapacitní charakter, který je směřován proti smyslu indukčního charakteru výkonu spotřebiče. Pokud se budou kapacitní a indukční složka rovnat, nedojde k žádnému přenosu jalového výkonu mezi zdrojem a spotřebičem.

V technické praxi, na základě platné legislativy, jsou povinni velkooběratelé před připojením k distribuční soustavě kompenzovat jalový výkon na hodnotu účinníku stanovenou Technickými podmínkami připojení. Podle těchto podmínek by měla být hodnota účinníku konstantní v rozmezí 0,95 až 1 indukivní.

V zásadě je možné provádět kompenzaci místně, jinými slovy individuálně, nebo centrálně. Při místní kompenzaci jalového výkonu je kompenzační kondenzátor umístěn v bezprostřední blízkosti indukčního spotřebiče, čímž je výrazně zkrácena cesta jalového proudu pouze mezi spotřebič a kompenzační kondenzátor. Tento způsob je vhodný pro dílčí kompenzaci spotřebičů, jako jsou například motory v trvalém provozu. Jedná se o pevná kompenzační zařízení. Naopak při centrální kompenzaci je využívána ústřední kompenzační jednotka, která většinou umožňuje regulovat výkon kompenzačního zařízení na hodnotu žádaného účinníku v závislosti na aktuálně dodávaném indukčním výkonu spotřebiči. Toho je dosaženo stupňovaným připojováním a odpojováním jednotlivých sériovoparalelních skupin kompenzačních kondenzátorů.

V technických podmínkách připojení je také požadavek na kompenzaci jalové složky výkonu, která je u transformátoru způsobena ztrátami naprázdno, před připojením transformátoru do sítě. Pro tento účel by bylo nutné určit jalový výkon transformátoru, který lze vypočítat ze vztahu:

$$Q_0 = \frac{i_0}{100} \cdot S \text{ [kVAr]} \quad (13)$$

Kde  $i_0$  je poměrný proud naprázdno, většinou udávaný v procentech, a  $S$  představuje jmenovitý výkon transformátoru. Pro zjednodušení výpočtu lze uvažovat, že proud naprázdno je prakticky shodný s magnetizačním proudem, ačkoliv reálně je proud naprázdno vektorovým součtem činného proudu na ztráty naprázdno a magnetizačního proudu.

Následující tabulka shrnuje výpočtem určené hodnoty jalového indukčního výkonu pro vybrané jmenovité výkony distribučních transformátorů pro různá primární napětí:

Tabulka 1: Jalový indukční výkon vybraných jmenovitých výkonů transformátorů

S [kVA]	10kV		22kV		35kV	
	$i_0$ [%]	$Q_0$ [kVAr]	$i_0$ [%]	$Q_0$ [kVAr]	$i_0$ [%]	$Q_0$ [kVAr]
50			0,3402	0,17	0,4133	0,21
100	0,3972	0,40	0,3212	0,32	0,3333	0,33
160	0,5147	0,82	0,4283	0,69	0,2667	0,43
250	0,3869	0,97	0,3004	0,75	0,3583	0,90
400	0,2439	0,98	0,1466	0,59	0,2684	1,07
630	0,2116	1,33	0,2479	1,56	0,1745	1,10
800					0,1557	1,25
1000			0,1057	1,06	0,1506	1,51

Transformátory jsou v distribuční soustavě zcela zásadním zdrojem indukčního jalového výkonu. Naproti tomu v současnosti stále častěji využívané vysokonapěťové kabely jsou zdrojem značného kapacitního jalového výkonu, jak uvádí následující tabulka:

Tabulka 2: Vypočítané hodnoty kapacitních jalových výkonů ve VN kabelech [9]

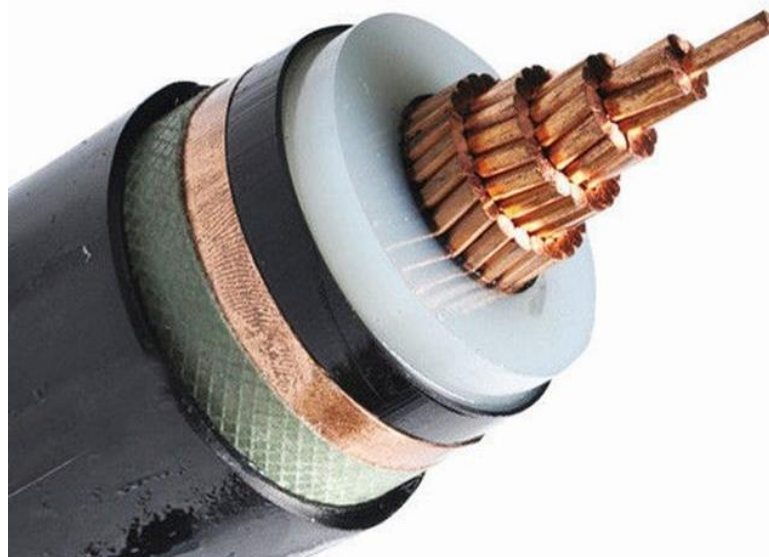
Trojžilový kabel						
Průřez [mm <sup>2</sup> ]	10kV		22kV		35kV	
	$I_z$ [A.km <sup>-1</sup> ]	$Q_c$ [kVAr.km <sup>-1</sup> ]	$I_z$ [A.km <sup>-1</sup> ]	$Q_c$ [kVAr.km <sup>-1</sup> ]	$I_z$ [A.km <sup>-1</sup> ]	$Q_c$ [kVAr.km <sup>-1</sup> ]
70	1,90	32,91	2,30	87,64	3,80	230,36
95	2,10	36,37	3,30	125,75	4,20	254,61
120	2,40	41,57	3,60	137,18	4,60	278,86
150	2,55	44,17	3,90	148,61	5,00	303,11
185	2,70	46,77	4,30	163,85	5,30	321,30
240	2,90	50,23	4,60	175,28	5,90	357,67
Kabel XLPE						
Průřez [mm <sup>2</sup> ]	10kV		22kV		35kV	
	$I_z$ [A.km <sup>-1</sup> ]	$Q_c$ [kVAr.km <sup>-1</sup> ]	$I_z$ [A.km <sup>-1</sup> ]	$Q_c$ [kVAr.km <sup>-1</sup> ]	$I_z$ [A.km <sup>-1</sup> ]	$Q_c$ [kVAr.km <sup>-1</sup> ]
70	1,53	26,50	2,13	81,16	2,46	149,13
95	1,71	29,62	2,34	89,17	2,70	163,68
120	1,89	32,74	2,55	97,17	2,91	176,41
150	2,04	35,33	2,76	105,17	3,12	189,14
185	2,22	38,45	2,97	113,17	3,36	203,69
240	2,49	43,13	3,30	125,75	3,72	225,51

V první části tabulky jsou uvedeny hodnoty kapacitního jalového proudu pro jednotlivé průřezy vodiče na používaných hladinách VN pro běžný trojžilový kabel. Výpočet jalového kapacitního výkonu byl proveden pomocí vztahu:

$$Q_c = U_{prim} \cdot \sqrt{3} \cdot I_z \text{ [kVAr} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (14)$$

Kde  $U_{prim}$  je jmenovitá hodnota primárního napětí transformátoru a  $I_z$  značí hodnotu kapacitního proudu vztaženou na 1 km délky vodiče.

Lze vypořádat, že větší průřez vodiče obecně znamená větší kapacitní jalové ztráty, potažmo větší kapacitní proud  $I_z$ . Stejně tak druhá část tabulky obsahuje výpočty kapacitních jalových ztrát, tentokrát při použití jednožilového kabelu XLPE. Kapacitní jalové ztráty a kapacitní proud  $I_z$  dosahují u tohoto druhu kabelu, zejména u větších průřezů, asi o třetinu menších hodnot než v případě běžného trojžilového kabelu.



Obrázek 10: Jednožilový kabel XLPE [10]

Pokud porovnáme hodnoty induktivních jalových ztrát naprázdno transformátoru a kapacitních jalových ztrát odpovídajícího kabelového vedení zjistíme, že pouhých několik kilometrů kabelového vedení dodá do distribuční sítě takový kapacitní jalový výkon, pomocí něhož je možné vykompenzovat indukční jalový výkon až několika desítek distribučních transformátorů. V praxi se tedy jalový odběr naprázdno distribučních transformátorů v rozsáhlých kabelových sítích, typicky v rozsáhlé městské zástavbě, obvykle účelně, pomocí zvláštních kompenzačních prostředků, individuálně nekompenzuje. To s sebou přináší několik výhod, zejména úsporu finančních prostředků za instalaci a údržbu kompenzačních kondenzátorů, které také mohou být zdrojem poruch.

Kromě vysokonapěťových kabelů přispívají jistou mírou k eliminaci jalového induktivního výkonu transformátorů také kabely na nízké napětí na sekundární straně transformátorů.

## 5 POŽADAVKY LEGISLATIVY EU NA TRANSFORMÁTORY

S účinností od 1. července 2015 vstoupilo v platnost nařízení Evropské komise pro navrhování transformátorů s ohledem na životní prostředí, tzv. Ekodesign.

Konkrétně se jedná o nařízení komise EU č. 548/2014 ze dne 21. května 2014 pro realizaci Směrnice 2009/125/ES ze dne 21. října 2009 stanovující požadavky na Ekodesign výrobků spojených s významnou spotřebou energie.

Podle článku 7 nařízení Komise EU č. 548/2014 Komise v roce 2017 přezkoumala uvedené nařízení s ohledem na technologický pokrok a výsledky tohoto přezkumu předložila konzultačnímu fóru. Za účelem přezkumu byla provedena studie, která analyzovala konkrétní aspekty stanovené v článku 7 nařízení EU č. 548/2014. Tato studie potvrdila, že nařízení EU č. 548/2014 má pozitivní dopad na účinnost výkonových transformátorů uváděných na trh, a zjistila, že dostupné modely transformátorů mohou bez obtíží splňovat minimální požadavky stanovené ve stupni I (červenec 2015 – tzv. Ekodesign I).

Studie rovněž potvrdila, že pro výrobce transformátorů neexistují žádné závažné technické překážky, které by bránily výrobě transformátorů splňujících minimální požadavky stanovené ve stupni 2 (Ekodesign II), které vstoupí v platnost v červenci 2021. Načež vyšlo v platnost nařízení komise EU 2019/1783 ze dne 1. října 2019, kterým se mění nařízení EU č. 548/2014, kterým se provádí směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/125/ES, pokud jde o malé, střední a velké výkonové transformátory. [2][3]

V praxi to znamená, že od 1. července 2021 jsou výrobci povinni držet se při výrobě transformátorů požadavků tzv. Ekodesignu II.

Transformátory musí splňovat maximální povolené hodnoty ztrát pod zatížením (nakrátko) a bez zatížení (naprázdno) nebo hodnoty indexu špičkové účinnosti (PEI) stanovené v příloze nařízení komise EU č. 548/2014, s výjimkami, které jsou v témže dokumentu uvedeny [2].

Maximální ztráty pod zatížením i při chodu naprázdno v případě třífázových středních výkonových transformátorů ponořených do kapaliny, tj. olejové distribuční transformátory, jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 3: Maximální ztráty naprázdno a nakrátko pro olejové distribuční transformátory s  $S \leq 2500$  kVA a sekundárním napětím 0,4 kV [2]

S [kVA]	$U_{\text{prim}} = \leq 22$ kV					
	Nevyhovující		Ekodesign I		Ekodesign II	
	P <sub>k</sub> [W]	P <sub>0</sub> [W]	P <sub>k</sub> [W]	P <sub>0</sub> [W]	P <sub>k</sub> [W]	P <sub>0</sub> [W]
50	1100	125	1100	90	750	81
100	1750	210	1750	145	1250	130
160	2350	300	2350	210	1750	189
250	3250	425	3250	300	2350	270
400	4600	610	4600	430	3250	387
630	6500	860	6500	600	4600	540
800	9500	950	8400	650	6000	585
1000	11600	1100	10500	770	7600	693
1250	14300	1300	11000	950	9500	855
1600	16800	1600	14000	1200	12000	1080
2000	20000	1700	18000	1450	15000	1305
2500	23000	1900	22000	1750	18500	1575

S [kVA]	$U_{\text{prim}} = 35$ kV					
	Nevyhovující		Ekodesign I		Ekodesign II	
	P <sub>k</sub> [W]	P <sub>0</sub> [W]	P <sub>k</sub> [W]	P <sub>0</sub> [W]	P <sub>k</sub> [W]	P <sub>0</sub> [W]
50	1200	125	1210	104	825	93
100	1950	210	1925	167	1375	150
160	2700	300	2585	242	1925	217
250	3700	425	3575	345	2585	311
400	5100	610	5060	495	3575	445
630	7700	840	7150	690	5060	621
800	9500	950	9240	748	6600	673
1000	10500	1250	11550	886	8360	797
1250	14300	1300	12100	1093	10450	983
1600	16800	1600	15400	1380	13200	1242
2000	21000	1800	19800	1668	16500	1501
2500	25000	2150	24200	2013	20350	1811

Kde S je jmenovitý výkon, P<sub>0</sub> značí ztráty naprázdno a P<sub>k</sub> odpovídá ztrátám nakrátko. Kromě závazných hodnot ztrát pro splnění Ekodesign I a Ekodesign II jsou v tabulce uvedeny i hodnoty ztrát deklarované výrobcem před zavedením Ekodesign.



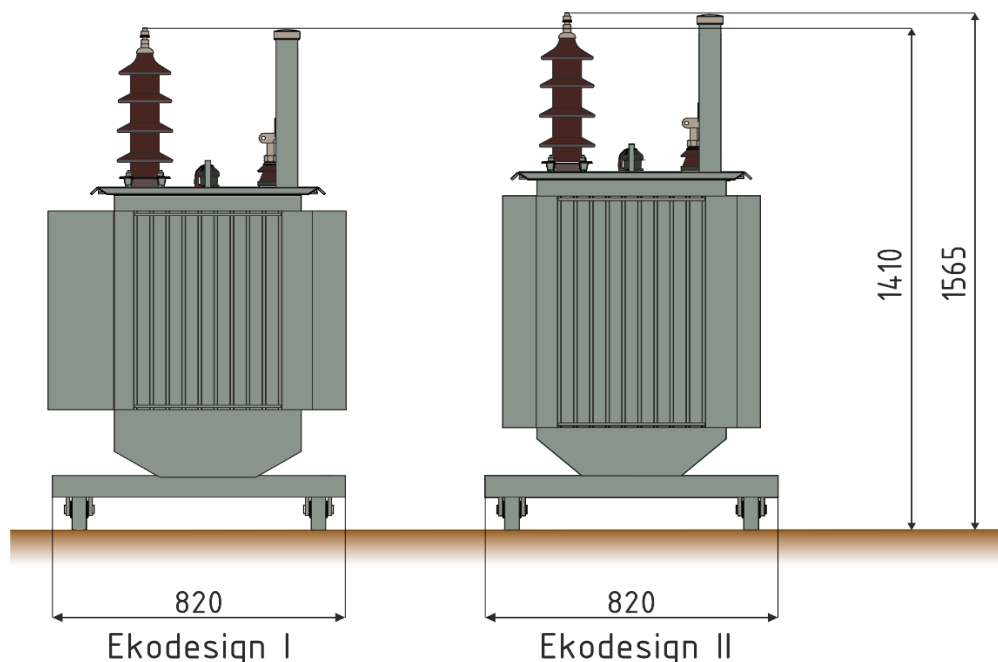
## 6 PRAKTICKÉ DOPADY REALIZACE POŽADAVKŮ LEGISLATIVY EU NA TRANSFORMÁTORY

### 6.1 Technické dopady

Pro splnění nových požadavků legislativy Evropské unie na distribuční transformátory - Ekodesign II bylo nutné optimalizovat technická řešení konstrukce transformátorů s cílem maximálně minimalizovat ztráty naprázdno i nakrátko.

Pro snížení ztrát ve vinutí transformátoru je nutné zvětšit průřez vodiče, kterým je vinutí tvořeno, čímž dojde k nabytí rozměrů navinuté cívky. To pak vyžaduje i patřičnou úpravu magnetického obvodu, respektive jádra transformátoru. V důsledku těchto úprav dojde k celkovému zvětšení rozměrů stroje, včetně většího objemu transformátorového oleje v něm obsaženého.

Následující obrázek ilustruje porovnání rozměrů dvou transformátorů se stejným zdánlivým výkonem 400 kVA a napětovým převodem 35/0,4 kV českého výrobce Trafo CZ, a.s.



Obrázek 11: Porovnání transf. 400 kVA 35/0,4 kV Ekodesign I a Ekodesign II (rozměry v mm)

V levé části je zobrazen transformátor splňující požadavky Ekodesign I, v pravé části pak transformátor reflektující nejnovější požadavky Ekodesign II. Je zřejmé, že došlo k nezanedbatelnému zvětšení absolutní výšky transformátoru, což může být v některých aplikacích problematické. Zejména v kioskových trafostanicích může být nárůst rozměrů

transformátoru komplikace při montáži i následné údržbě. S většími rozměry nedílně související vyšší hmotnost může způsobit, typicky u transformátorů vyšších výkonů, problém s nosností příhradových trafostanic. Například hmotnost distribučního transformátoru se zdánlivým jmenovitým výkonem 630 kVA, který vyhovuje požadavkům Ekodesign II, je oproti svému předchůdci se ztrátami odpovídajícím Ekodesign I zhruba o 500 kg vyšší.



Obrázek 12: Příhradová trafostanice 35 kV

## 6.2 Ekonomické dopady

Odlišné technické řešení transformátorů splňující Ekodesign II je příčinou celkově vyšší spotřeby materiálů, které se při výrobě používají. Kalkulujeme s větším průřezem vodiče, odlišnou konstrukcí magnetického obvodu, většími rozměry nádoby a větším objemem transformátorového oleje. To vše se v důsledku nepopíratelně podepíše na výrobní ceně transformátoru.

I přes vyšší výrobní náklady je ovšem distribuční transformátor, který splňuje Ekodesign II, při běžně uvažované době provozu jednotky až desítky let plně rentabilní díky nižším provozním nákladům. Zejména díky snížení činných a potažmo i jalových ztrát, které nedílně při jeho provozu vznikají.

## 7 VYHODNOCENÍ POTENCIÁLU ÚSPORY ENERGIÍ V ČESKÉ REPUBLICE

Pro vyhodnocení potenciálu úspory energií v České republice se nejprve pojdme zaměřit na ztráty energie v samotném distribučním transformátoru. Pro vyčíslení energetických ztrát lze využít zmíněný vztah (8):

$$W_{zr} = P_0 \cdot T_{pr} + P_k \cdot \frac{S_m^2}{S_n^2} \cdot T_z [Wh] \quad (15)$$

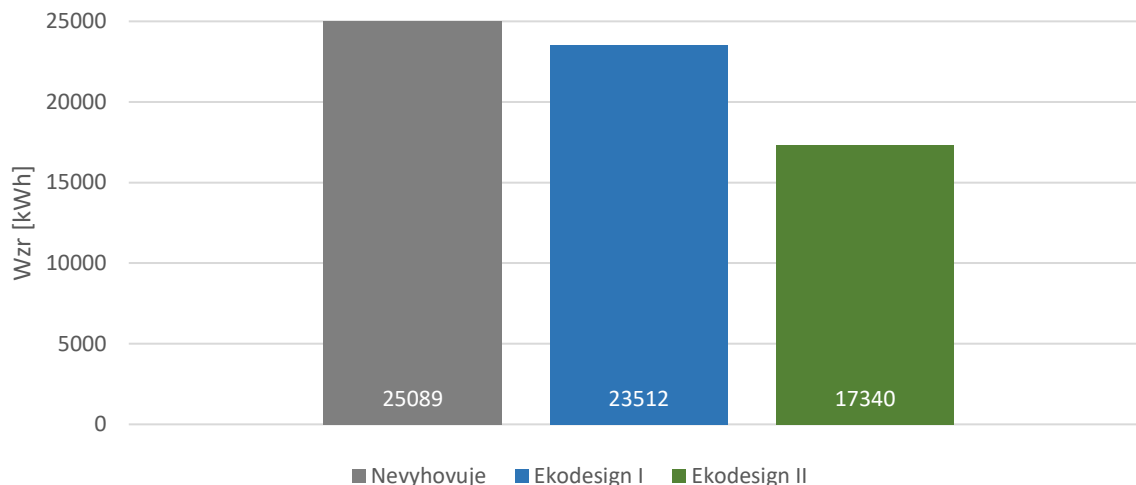
Kde  $W_{zr}$  jsou roční ztráty elektrické práce v transformátoru,  $P_0$  značí ztráty naprázdno,  $T_{pr}$  je roční doba provozu transformátoru,  $P_k$  představuje ztráty nakrátko,  $S_m$  je roční maximum zatížení transformátoru,  $S_n$  jmenovitý výkon a  $T_z$  značí roční dobu plných ztrát.

### 7.1 Na straně odběratele

Většina transformátorů v české distribuční síti pracuje jako snižovací, tedy na primární stranu je přivedeno vysoké napětí jedné z definovaných hodnot, na sekundární straně je pak transformované nízké napětí o hodnotě převážně 400 V sdružených, v některých případech 420 V. V tomto snižovacím režimu se počítá s tokem energie z vysokonapěťové sítě směrem do nízkonapěťové k odběrateli.

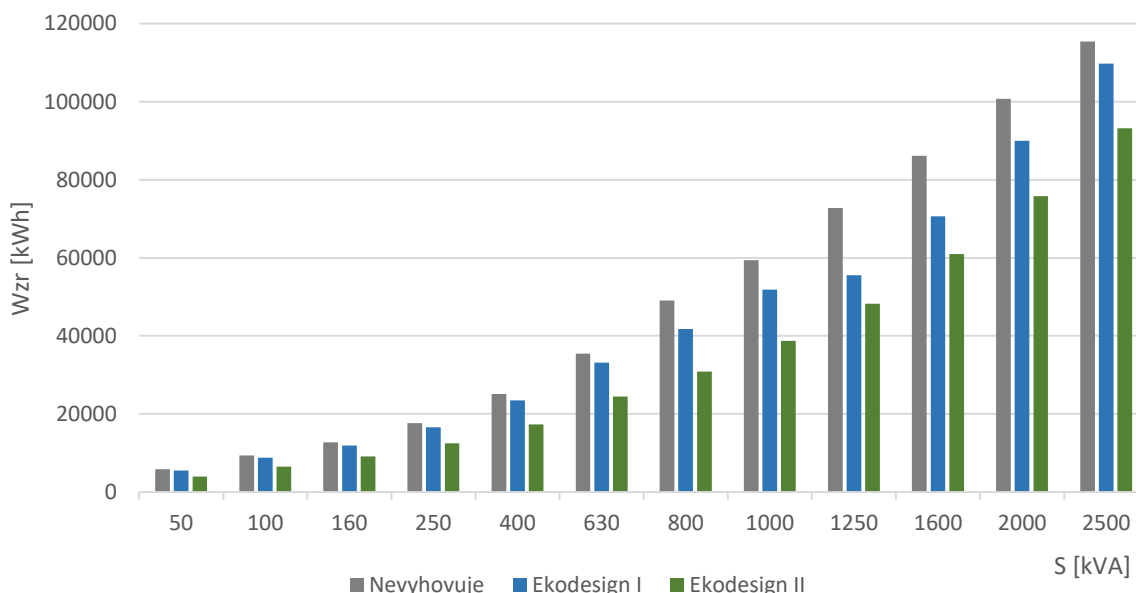
V tuzemské distribuční síti je v tomto pracovním režimu nejpočetněji zastoupen transformátor 22/0,4 kV se jmenovitým zdánlivým výkonem 400 kVA. Při uvažování ztrát naprázdno a nakrátko, které nevyhovují požadavkům Ekodesign (viz tabulka 3), jsou roční ztráty elektrické práce v jednom transformátoru 400 kVA vyčísleny dosazením do vztahu (8) na přibližně 25089 kWh. Ve výpočtu je uvažována celoroční doba provozu a plných ztrát, tedy 8760 hodin/rok, a 70% zatížení transformátoru.

Pro srovnání, pokud použijeme hodnoty ztrát platné pro Ekodesign I, jsou roční ztráty v transformátoru o stejném zdánlivém výkonu přibližně 23512 kWh. V případě Ekodesign II je to poté 17340 kWh, což znamená téměř o třetinu menší roční ztráty oproti transformátorům nesplňující hodnoty Ekodesign I. Následující graf zobrazuje porovnání celkových, výpočtem určených ročních ztrát ve zmíněném distribučním transformátoru 400 kVA s převodem 22/0,4 kV. Na vodorovné ose jsou zobrazeny jednotlivé, dle možné míry ztrát rozdělené kategorie, a na svislé ose jsou pak vypočítané celkové roční ztráty v distribučním transformátoru.



Obrázek 13: Graf vypočítaných ročních ztrát pro transformátor S=400 kVA 22/0,4 kV

Z hodnot ztrát naprázdno a nakrátko udaných v tabulce 3 je zřejmé, že velikost ztrát elektrické práce v transformátoru roste v závislosti s jeho rostoucím jmenovitým výkonem. Právě u transformátorů s největším jmenovitým výkonem je i nejvíce patrná úspora vlivem snížení ztrát naprázdno a nakrátko v rámci Ekodesign II. Následující graf zobrazuje na vodorovné ose jednotlivé jmenovité zdánlivé výkony distribučních transformátorů. Na svislé ose je pak opět hodnota ročních ztrát, které jsou uvedeny pro každý jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru.



Obrázek 14: Graf vypočítaných ročních ztrát pro transformátory S≤2500 kVA 22/0,4 kV

Hodnoty vypočítaných ročních ztrát elektrické práce v transformátoru pro užívanou řadu jednotlivých jmenovitých výkonů jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 4: Roční ztráty elektrické práce v transformátoru pro jednotlivé výkony, udáváno v [kWh]

S [kVA]	U <sub>prim</sub> ≤ 22 kV			U <sub>prim</sub> = 35 kV		
	Nevyhovuje	Ekodesign I	Ekodesign II	Nevyhovuje	Ekodesign I	Ekodesign II
50	5817	5510	3929	6246	6100	4357
100	9351	8782	6504	10210	9724	7212
160	12715	11927	9167	14217	13211	10167
250	17673	16578	12452	19605	18368	13816
400	25089	23512	17340	27235	26051	19244
630	35434	33157	24475	40410	36735	27160
800	49100	41750	30879	49100	46210	34223
1000	59428	51815	38693	56020	57334	42866
1250	72769	55538	48268	72769	61508	53469
1600	86128	70606	60970	86128	78192	67540
2000	100740	89965	75818	105908	99597	83971
2500	115369	109763	93206	126144	121506	103217

Tabulka je rozdělena na dvě části, podle velikosti primárního napětí U<sub>prim</sub>. Pro transformátory s U<sub>prim</sub> = 35 kV jsou přípustné vyšší ztráty nakrátko a naprázdno, což v důsledku znamená vyšší ztráty elektrické práce v transformátoru v porovnání s transformátory s U<sub>prim</sub> ≤ 22 kV.

Pro vyčíslení celkových ztrát v transformátorech v české distribuční síti, na hladině vysokého napětí, je nutné znát počet transformátorů a rozdělení dle výkonů a napětových hladin primárního vinutí. Tyto informace jsou veřejně nedostupné, proto byly pro účely vyhodnocení potenciálu úsporu energií rámcově odhadnuty na základě mnohaletých zkušeností českého výrobce Trafo CZ, a.s. v oblasti distribučních transformátorů a energetiky. Presumpci počtů transformátorů dle jednotlivých výkonů v druhé polovině roku 2021 shrnuje tabulka 5:

Tabulka 5: Presumpce počtu transformátorů jednotlivých výkonů a napětových hladin, udáváno v [ks]

S [kVA]	U <sub>prim</sub> ≤ 22 kV		U <sub>prim</sub> = 35kV	
	Nevyhovuje	Ekodesign I	Nevyhovuje	Ekodesign I
50	850	250	300	50
100	2500	1400	1300	600
160	3500	2000	2400	600
250	7000	2800	3200	800
400	15000	5100	2600	1000
630	11400	2800	300	700
800	15	0	30	10
1000	1100	50	50	5
1250	130	10	5	5
1600	150	10	5	0
2000	200	5	1	0
2500	70	5	1	0

Tabulka je opět rozdělena na dvě části, podle velikosti primárního napětí  $U_{\text{prim}}$ . V české distribuční soustavě na úrovni vysokého napětí převládá napěťová hladina 22 kV, v části severních a východních Čech se lze setkat s napětím 35 kV. Tomu odpovídají i nižší počty distribučních transformátorů s tímto jmenovitým primárním napětím. Spíše lokálně se vyskytují distribuční sítě s napětím, které je nižší než 22 kV (obvyčně 10, 6 a 3 kV). Například 10 kV síť je dosud provozována v horských oblastech Krkonoš. To je dáno zejména estetikou a drsnými klimatickými a terénními podmínkami, které vyžadují kabelové vysokonapěťové přípojky místních transformoven umístěných obvykle přímo v budově horské boudy. Z historického hlediska bylo technicky jednodušší napěťově dimenzovat izolaci vysokonapěťového kabelu na nižší hladinu napětí než v této oblasti standardně používaných 35 kV. Distribuční transformátory, které v těchto sítích pracují, nejsou s ohledem na minoritní význam díky jejich počtu pro účely výpočtu potenciálu úspory energií v rámci této publikace uvažovány.

Obě kategorie uvedené napěťové hladiny transformátorů jsou rozděleny na dvě části podle uvažovaných ztrát. V druhé polovině roku 2021 se počet provozovaných distribučních transformátorů, které splňují požadavky Ekodesign II, pohybuje v řádech několika desítek kusů. Jejich vliv na celkové ztráty v distribučních transformátorech, provozovaných na hladině vysokého napětí, je tak prozatím zanedbatelný.

Obecně početně nejzastoupenější u obou napěťových hladin jsou zdánlivé jmenovité výkony transformátorů 400 a 630 kVA. Naopak výkony nad 1000 kVA jsou zastoupeny pouze počtem několika stovek kusů. S ohledem na jejich poměrně vysoký zdánlivý výkon bývají tyto transformátory v praxi používány převážně v těžkém průmyslu.

Na základě odhadu počtů transformátorů v české distribuční síti, které uvádí předchozí tabulka, lze nyní vyčíslit celkové ztráty distribučních transformátorů o jednotlivých jmenovitých výkonech, dle následujícího vztahu:

$$W_{S_{jm}} = n_{S_{jm}} \cdot W_{z_{jm}} [Wh/rok] \quad (16)$$

Kde  $W_{S_{jm}}$  jsou celkové roční ztráty všech transformátorů daného jmenovitého zdánlivého výkonu,  $n_{S_{jm}}$  značí předpokládaný počet transformátorů v distribuční síti a  $W_{z_{jm}}$  představuje roční ztráty elektrické práce v transformátoru daného jmenovitého zdánlivého výkonu.

V následující tabulce jsou uvedeny roční ztráty pro všechny jednotlivé transformátory daného jmenovitého zdánlivého výkonu o daných přípustných ztrátách.

Tabulka 6: Celkové roční ztráty v distribučních transformátorech jednotlivých výkonů a napětových hladin, udáváno v [GWh/rok]

S [kVA]	U <sub>prim</sub> ≤ 22kV		U <sub>prim</sub> = 35kV	
	Nevyhovuje	Ekodesign I	Nevyhovuje	Ekodesign I
50	4,94	1,38	1,87	0,31
100	23,38	12,29	13,27	5,83
160	44,50	23,85	34,12	7,93
250	123,71	46,42	62,74	14,69
400	376,33	119,91	70,81	26,05
630	403,95	92,84	12,12	25,71
800	0,74	0,00	1,47	0,46
1000	65,37	2,59	2,80	0,29
1250	9,46	0,56	0,36	0,31
1600	12,92	0,71	0,43	0,00
2000	20,15	0,45	0,11	0,00
2500	8,08	0,55	0,13	0,00

Nyní provedeme sumu všech ztrát uvedených transformátorů s jednotlivými jmenovitými výkony dle následujícího vzorce:

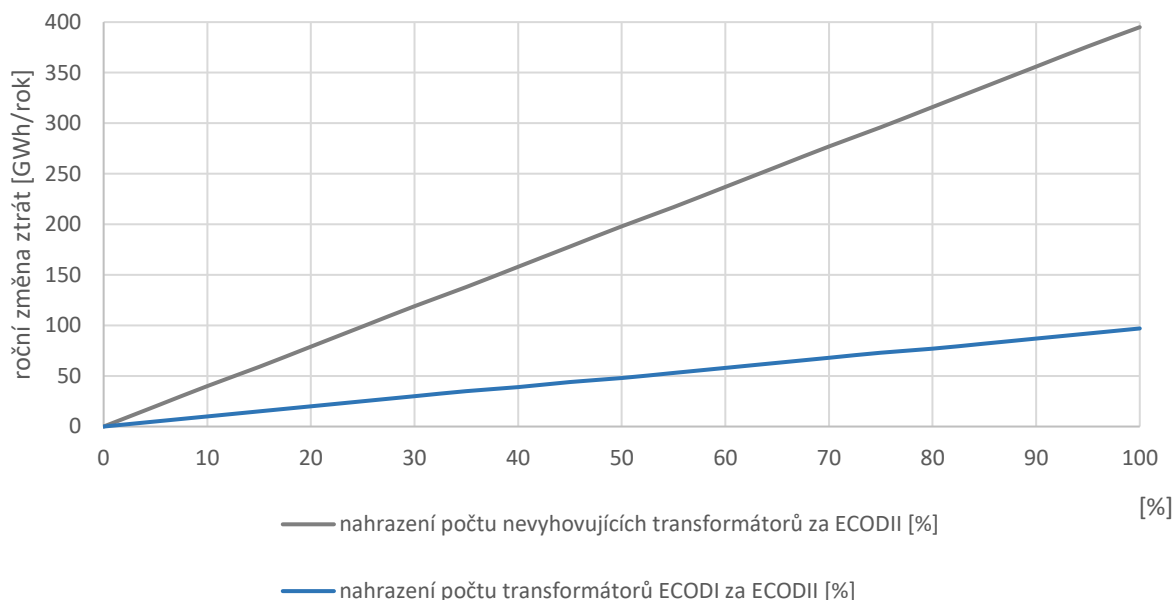
$$W_{celk} = \sum_{S_{jm}} W_{S_{jm}} = W_{S50} + W_{S100} + \dots + W_{S2500} [Wh/rok] \quad (17)$$

Kde  $W_{celk}$  jsou výsledné celkové roční ztráty elektrické práce v transformátorech všech daných jmenovitých zdánlivých výkonů,  $W_{S_{jm}}$  jsou celkové roční ztráty všech transformátorů daného jmenovitého zdánlivého výkonu a index  $S_{jm}$  značí jednotlivý jmenovitý zdánlivý výkon transformátorů.

Po provedení sumace dle vzorce (17) se dostaneme u transformátorů s jmenovitým primárním napětím ≤22 kV na roční hodnotu ztrát 1396 GWh. V případě dosazení hodnot platných pro druhou skupinu transformátorů se jmenovitým primárním napětím 35 kV činí roční hodnota ztrát 281 GWh. V součtu tedy činí roční hodnota ztrát v distribučních transformátorech 1677 GWh.

Tato hodnota ročních ztrát v distribučních transformátorech je odhadována pro konfiguraci počtů transformátorů jednotlivých výkonů a rozložení míry jejich hospodárnosti v druhé polovině roku 2021. Tedy zatím bez zásadního procentuálního zastoupení distribučních transformátorů splňujících Ekodesign II, což se v průběhu následujících let změní. Dojde totiž vlivem postupné končící životnosti zejména nehermetizovaných transformátorů s konzervátorem, které lze považovat za jedny z typických zástupců kategorie nevhodných a provozně takřka nejstarších transformátorů, k postupné generační obměně za transformátory moderní, splňující požadavky Ekodesign II.

Následující graf zobrazuje roční změnu ztrát v transformátorech v závislosti na procentuálním nahrazení nevhodných transformátorů, nesplňujících Ekodesign, za transformátory splňující Ekodesign II. Vzhledem k předpokládanému budoucímu dovršení životnosti mnohých transformátorů, splňujících Ekodesign I, je také uvažováno s jejich možnou náhradou za Ekodesign II.



Obrázek 15: Graf roční změny ztrát v závislosti na procentuálním nahrazení transf. za Ekodesign II

Například pokud se nahradí 50 % všech transformátorů, které nesplňují ani požadavky Ekodesign I, za stroje vyhovující požadavkům Ekodesign II, je výsledkem celková roční hodnota ztrát 1479 GWh. To činí úsporu 200 GWh oproti současnému stavu za předpokladu, že dojde k obměně rovnoměrně napříč všemi výkony a napět'ovými hladinami transformátorů. Pakliže by v tomto případě došlo dále k nahrazení 50 % transformátorů splňujících Ekodesign I za Ekodesign II, lze výpočtem určit, že výsledná úspora by činila 250 GWh, atd.

Při vykreslení grafu je uvažováno, že počet distribučních transformátorů zůstává stejný, mění se jen procentuální zastoupení jednotlivých skupin transformátorů s různými deklarovanými ztrátami. Jinak by došlo vlivem případné změny jejich počtu k zanesení chyby do přesnosti odhadu při částečném nahrazení za hospodárnější transformátory splňující požadavky Ekodesign II. V praxi se ovšem dá očekávat, že počet provozovaných transformátorů bude mít spíše rostoucí tendenci. Nicméně v případě nově budovaných distribučních trafostanic se vždy bude jednat o nový transformátor splňující požadavky Ekodesign II.

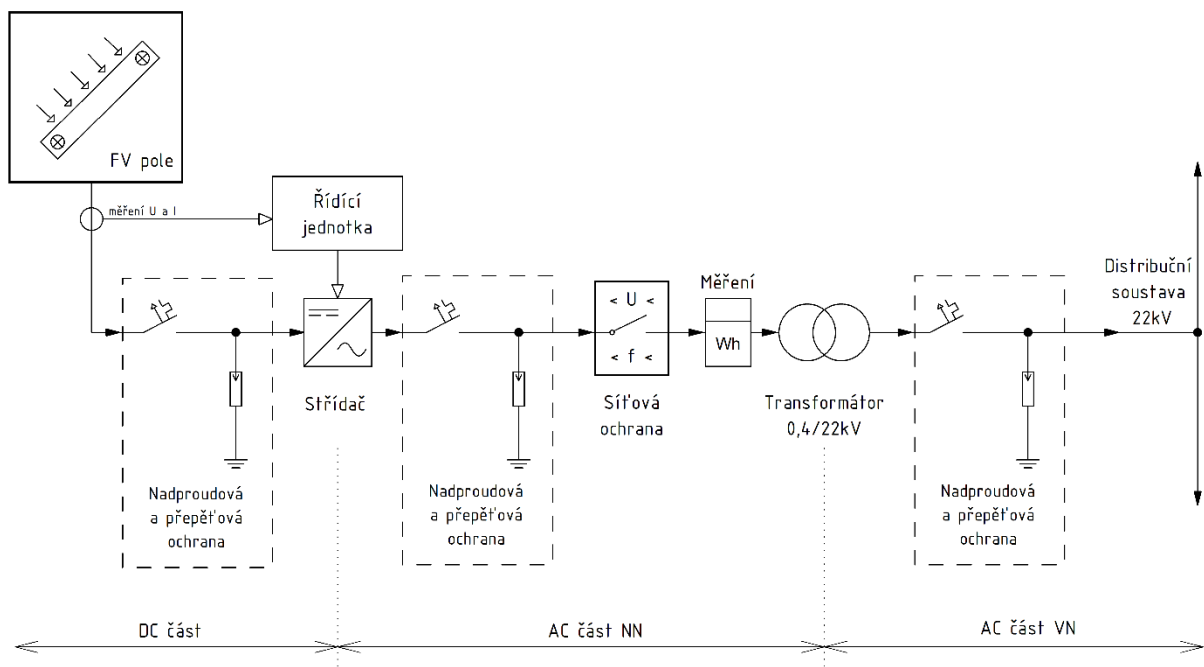


## 7.2 Na straně dodavatele

České energetika zažívá v posledních letech rozmach budování obnovitelných zdrojů elektrické energie, jež se vyznačují, na rozdíl od elektráren využívající neobnovitelná fosilní paliva, částečnou nebo úplnou obnovitelností. Ačkoliv z hlediska množství vyrobené elektrické energie nehrají rozhodující roli, jejich hlavním přínosem je šetrný přístup k životnímu prostředí, jelikož právě tyto elektrárny při svém provozu neprodukují prakticky žádné škodlivé látky, emise, které by se negativně podepisovaly na změně klimatu. V roce 2020 bylo v České republice vyrobeno v zařízeních skupiny ČEZ díky využití vody, větru, biomasy a slunečního záření celkem 3143 GWh elektrické energie. Přímé využití energie ze slunečního záření je z hlediska ochrany životního prostředí jeden z nejčistších a nejšetrnějších způsobů výroby elektrické energie. V České republice je průměrná intenzita slunečního záření udávána na přibližně  $300 \text{ W/m}^2$  [11].

Roční úhrn energie je udáván v rozsahu  $800\text{--}1250 \text{ kWh/m}^2$ , čehož využívají fotovoltaické elektrárny (FVE). Právě tyto elektrárny, z principu své funkce, využívají transformátory netypicky jako zvyšovací, kdy je nízkonapěťové vinutí využíváno jako primární a vysokonapěťové vinutí jako sekundární.

Na následujícím obrázku je jednoduché blokové schéma fotovoltaické elektrárny.



Obrázek 16: Blokové schéma fotovoltaické elektrárny

Fotovoltaickou elektrárnou rozumíme zařízení, kde dochází k přímé přeměně sluneční energie na elektrickou s definovanou napět'ovou hladinou a frekvencí. Tato energie je následně dodávána do ostrovní sítě nebo do distribuční soustavy.

Jednotlivé fotovoltaické panely jsou sdružovány do fotovoltaických polí (FV pole), které mohou být umístěny na pevném nebo pohyblivém stojanu. Orientovány bývají zpravidla přední stranou na jih a mají takový sklon, aby v poledne dopadaly sluneční paprsky kolmo na panel, čímž je dosaženo jejich maximální účinnosti. Všechny fotovoltaické panely jsou zdrojem stejnosměrného napětí. Pro zajištění možnosti transformování napětí na vyšší napět'ovou hladinu je nutné využít střídač. Ten zajišťuje přeměnu stejnosměrného napětí a proudu na střídavý, přičemž musí být zajištěna synchronizace dle parametrů sítě, do které je vyrobená elektrická energie následně přes distribuční transformátor dodávána.

V současnosti se zpravidla jedná o běžné komerčně vyráběné distribuční transformátory s unifikovaným jmenovitým napětím 22 kV, respektive 35 kV vysokonapět'ového vinutí a jmenovitým napětím 400 V na nízkonapět'ovém vinutí. Vzhledem k toku energie z nízkonapět'ového vinutí do vysokonapět'ového je v tomto případě jako primární vinutí transformátoru označeno to s nižším napětím, sekundární je pak vinutí s vyšším napětím.

Zcela zásadním parametrem u transformátorů, jež se používají ve fotovoltaických elektrárnách za účelem dodávání vyrobené elektrické energie do sítě, jsou jejich ztráty. Právě velikost ztrát v transformátoru má nezanedbatelný vliv na rozdíl mezi vyrobenou energií ve fotovoltaické elektrárně a energií dodanou do distribuční sítě.

V současné době již musí veškeré vyráběné distribuční transformátory splňovat požadavky Ekodesign II. Pro aplikaci ve fotovoltaických elektrárnách jsou tak z hlediska ztrát používány stejné, nově vyrobené transformátory jako v běžné síti pro distribuci koncovým odběratelům. Nízkých hodnot ztrát v transformátorech, reflektujících požadavky Ekodesign II, je dosaženo díky samotné hranici konstrukčních možností současné technologie.

Dosažení nižších ztrát v transformátorech, než jaké jsou požadavky Ekodesign II, může být umožněno výrobou jádra z amorfních plechů. Jedná se o poměrně technologicky náročný proces vyžadující zcela odlišnou konstrukci magnetického obvodu transformátoru. Od toho se odvíjí násobně vyšší pořizovací cena transformátoru a také jeho výrazně vyšší hlukové zatížení okolí. Nicméně v některých aplikacích může být transformátor této konstrukce žádoucí a rentabilní.

Počet fotovoltaických elektráren v tuzemsku se bude do budoucna jistě zvyšovat, stejně tak podíl jimi dodané elektrické energie. Ačkoliv je rozmach těchto zdrojů žádaný a v mnoha ohledech značně prospěšný, přináší s sebou i rizika spojená s kontinuitou dodávek vyrobené elektrické energie vlivem rozmarů počasí a také s jejich provozem. S rostoucím podílem obnovitelných zdrojů v energetickém mixu České republiky bude nutné tato rizika zvažovat a řešit jejich přímé a nepřímé důsledky na celou rozvodnou soustavu, která byla vytvořena pro zdroje zcela jiného typu a není pro provoz nestálých zdrojů uzpůsobena. Tím jsou myšleny zejména rostoucí požadavky na její regulaci a neprodleně dostupné rezervní zdroje, jako jsou například přečerpávací elektrárny, které představují jistou formu akumulace elektrické energie ve formě potenciální energie naakumulované vody. Množství těchto zdrojů je ovšem velice omezené a jsou nepravidelně rozmístěné, čímž se v distribuční soustavě, kde jsou převážně připojeny, snižuje jejich efekt.

Řešením by mohla být rozsáhlejší akumulace vyrobené elektrické energie, což by umožnilo výrobcům uchovat nadbytečnou vyrobenou energii pro pozdější dobu. Provozovatel by tak měl k dispozici další možnost regulace. Toto řešení se v našich zeměpisných šířkách dotýká právě fungování fotovoltaických elektráren, jejichž současný instalovaný výkon již přestává být zanedbatelný, stejně jako jejich vliv na elektrizační soustavu. Akumulace by proto u nich měla své opodstatnění. Kromě toho jsou zde díky použití střídače nejlepší podmínky pro připojení akumulátorových úložišť do distribuční sítě.



Obrázek 17: FVE f. ČEZ Obnovitelné zdroje [11]

## ZÁVĚR

Účelem této publikace je vyčíslit potenciál úspory energií v oblasti energetiky se zaměřením na ztráty a účinnost distribučních transformátorů, které jsou nezbytným prvkem distribuční soustavy. Konstrukce distribučních transformátorů dle závazných požadavků Evropské unie je při používaných a dostupných materiálech a současných technologických postupech mnohdy již na hranici realizovatelnosti, nicméně dnešní energeticky úsporné transformátory jsou, zejména z pohledu jejich provozovatele, přínosné a v případě výměny za nějaký, typicky dříve vyráběný a více ztrátový transformátor i relativně brzy rentabilní.

Případné nižší ztráty transformátoru se kladně podepíší také na velikosti indukčního jalového výkonu, který je transformátory dodáván do distribuční sítě. Jeho zásadní část je v kabelových sítích kompenzována díky kapacitnímu jalovému výkonu kabelových vedení. Dá se očekávat, že stále více nadzemních vedení bude přeloženo do země, čímž bude docházet k další eliminaci indukčního jalového výkonu, tudíž odpadne potřeba v některých případech využívané individuální kompenzace distribučních transformátorů pomocí kondenzátorů na straně nízkého napětí.

V distribuční soustavě je provozováno několik desítek tisíc distribučních transformátorů, jejichž roční činný ztrátový výkon byl v rámci této publikace vyčíslen na přibližně 1700 GWh, což je pro srovnání více než 10 % roční výroby elektrické energie Jaderné elektrárny Temelín v roce 2020 nebo více než polovina celkové vyrobené elektrické energie v obnovitelných zdrojích skupiny ČEZ v témže roce [5][11]. Ve spojitosti se zavedením požadavků Ekodesign II na nově vyráběné transformátory se dá předpokládat, že tento podíl se bude v čase se zvyšujícím se poměrným zastoupením těchto transformátorů v distribuční síti postupně snižovat. Dojde tak k vytvoření určité volné distribuční kapacity, kterou lze využít při budování zcela nových přípojných míst s vlastní trafostanicí, jako mohou být například nabíjecí stanice pro elektromobily.

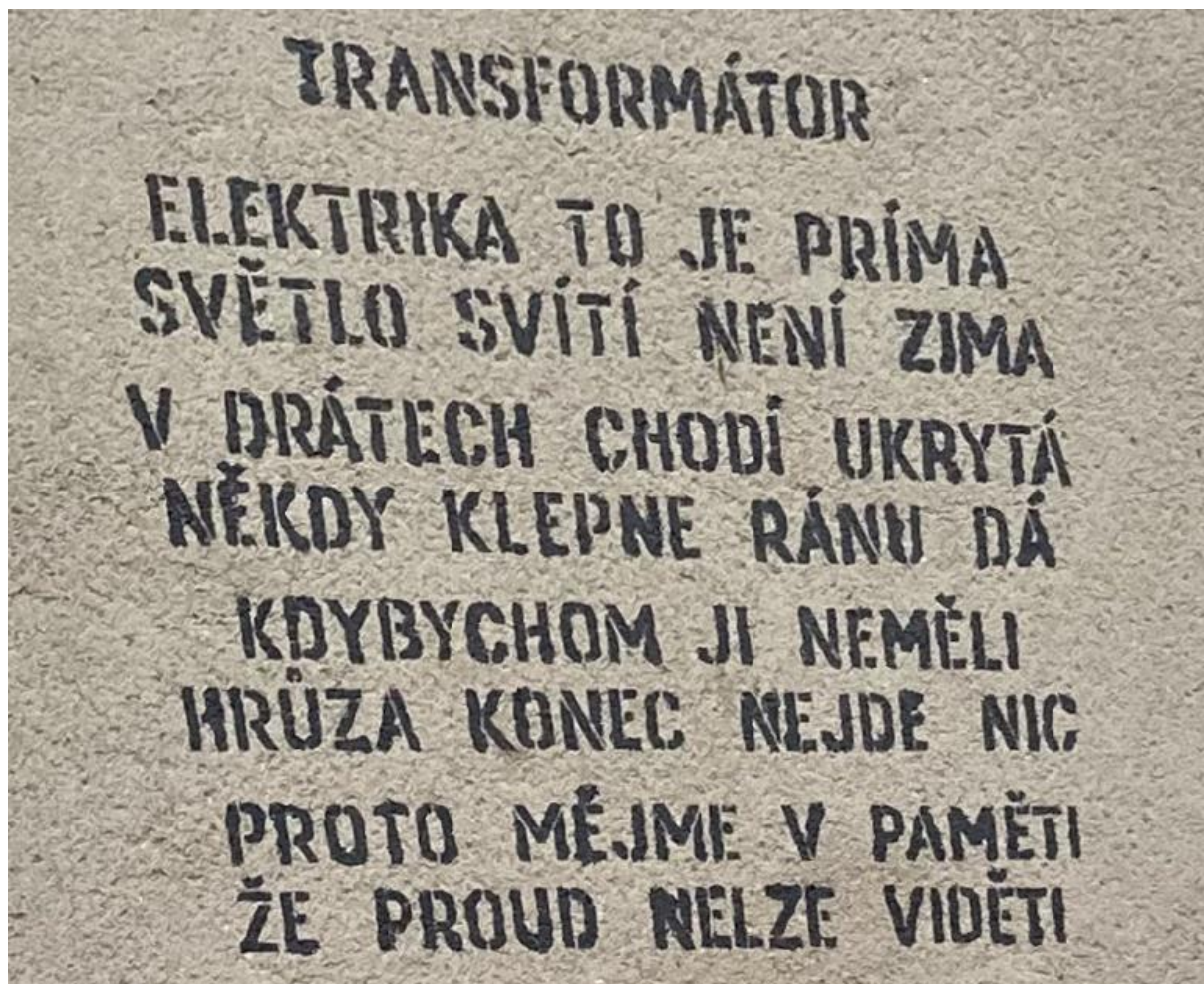
Pro úplnost je nutné doplnit, že se nejedná o zcela exaktní výpočet. Zejména informace o reálném počtu transformátorů pracujících v distribuční síti a jejich parametrech jsou prakticky jen velmi obtížně dohledatelné, případně veřejně nedostupné. Celkový počet distribučních transformátorů bylo tedy nutné kvalifikovaně odhadnout. Dá se předpokládat, že celkové reálné ztráty v distribučních transformátorech budou spíše vyšší, především kvůli pravděpodobně většímu počtu pracujících transformátorů v distribuční síti, než bylo pro účely výpočtu uvažováno. Bylo také kalkulováno se zatížením všech transformátorů na 70 %

jmenovitého výkonu, což reálně ne vždy bývá dodrženo. Nicméně už na uvedené teoretické množině pracujících transformátorů je jasně vidět pozitivní přínos zavedení Ekodesign II na snížení ztrát v distribuční síti, a to s potenciálem až několik stovek gigawatthodin ročně.

V české distribuční soustavě jednoznačně dominují transformátory, které pracují ve snižovacím režimu. Tok energie jde tedy ze sítě přes transformátor k odběrateli. Rozvoj obnovitelných zdrojů v posledních několika letech, a to zejména rozvoj fotovoltaických elektráren, vyžaduje využití distribučních transformátorů v pro ně netypickém zvyšovacím režimu, kdy je nízkonapětové vinutí použito jako primární a vysokonapětové jako sekundární. Čili tok výkonu je z nízkonapětové strany do vysokonapětové a dále do sítě. Velikost přeneseného toku je zásadně ovlivněna ztrátami v transformátoru. Fotovoltaické elektrárny vyžadují použití transformátorů s minimálními ztrátami, čehož je nástupem standardu Ekodesign II dosaženo. V případě požadavku na další snížení ztrát v transformátoru je možné volit jeho alternativní konstrukce, jejichž magnetický obvod je založen na použití amorfních plechů.

Vzhledem k maximálnímu využití stávajících technologických možností při výrobě současných olejových transformátorů pro běžnou distribuční síť, splňujících požadavky Ekodesign II, je případné další zpřísnování požadavků na jejich ztráty nakrátko a naprázdno, tedy případný Ekodesign III, prakticky současnou výrobní technologií nerealizovatelné. Při případném požadavku na další eliminaci ztrát v distribučních transformátorech by patrně bylo nutné vydat se cestou výroby jádra transformátoru z amorfních plechů, jak se již v dnešní době děje v případě některých fotovoltaických elektráren. Předmětem mnohých odborných diskuzí by mohlo jistě být, zda by náročná technologie výroby a potažmo výrobní cena takových transformátorů byla i při jejich případném plošném rozšíření i mimo fotovoltaické elektrárny, v porovnání s úsporou jejich ztrát, ještě rentabilní. Kromě toho se transformátory s amorfním jádrem vyznačují zvýšeným hlukovým znečištěním okolí, což by mohlo být, zejména v městské zástavbě, nežádoucí.

Je otázkou ještě minimálně několika let, než dojde k zásadnímu praktickému rozšíření transformátorů, které odpovídají současným požadavkům Ekodesign II. Jejich budoucí četnější nasazení zcela jistě vytvoří na straně odběratelů značný potenciál pro úsporu energií v České republice, a to řádově až ve stovkách gigawatthodin ročně.



Obrázek 18: Báseň zvěčněná na zděné trafostanici, Studnice (Trutnovsko)

## ZDROJE

- [1] *Výroční zpráva 2019 ČEZ Distribuce, a.s.* [online]. 2019 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: [https://www.cezdistribuce.cz/webpublic/file/edee/dist/fileotherexport/distribuce/o-spolecnosti/vyrocní\\_zpravy/vyrocní-zprava-2019.pdf](https://www.cezdistribuce.cz/webpublic/file/edee/dist/fileotherexport/distribuce/o-spolecnosti/vyrocní_zpravy/vyrocní-zprava-2019.pdf)
- [2] *NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) č. 548/2014.* In: . 2014, číslo 548. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0548&from=EN>
- [3] *NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) č. 2019/1783.* In: . 2019, číslo 1793. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1783&from=CS>
- [4] Svět energie: Distribuční soustava [online]. [cit. 2021-09-14]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/distribuce-elektriny/distribuce-elektricke-energie-podrobne/distribucni-soustava/vyklad>
- [5] Jaderná elektrárna Temelín. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1\\_elektr%C3%A1rna\\_Temel%C3%ADn](https://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_elektr%C3%A1rna_Temel%C3%ADn)
- [6] TKOTZ, Klaus. *Příručka pro elektrotechnika*. 2. 624 s. ISBN 978-3-8085-3034-4.
- [7] HLÁSKOVÁ, Aneta. *Optimalizace výkonů transformátorů v distribuční soustavě*. Plzeň, 2015. Diplomová práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ.
- [8] VOŽENÍLEK, Petr, Vladimír NOVOTNÝ a Pavel MINDL. *Elektromechanické měniče*. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-800-1048-757.
- [9] PNE 33 0000- 1. *Ochrana před úrazem elektrickým proudem v distribučních soustavách a přenosové soustavě*. 5. 2011.
- [10] *1 Core XLPE Cable 300mm XLPE Insulated Medium Voltage Cables* [online]. [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: <https://www.vwcable.com/1-core-xlpe-cable-300mm-xlpe-insulated-medium-voltage-cables/>
- [11] ČEZ: *Obnovitelné zdroje* [online]. [cit. 2021-12-02]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/obnovitelne-zdroje>

## SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obrázek 1: Stožár vedení VN 35kV .....	8
Obrázek 2: Elektrizční soustava ČR .....	10
Obrázek 3: Rozvodna 220 kV, Praha Malešice.....	11
Obrázek 4: Územní rozdělení ČR dle provozovatelů distribuční soustavy.....	12
Obrázek 5: Olejové distribuční transformátory ELIN (Trafo CZ, a.s.).....	13
Obrázek 6: Zapojení transformátoru Dyn I .....	15
Obrázek 7: Hysterezní smyčka feromagnetického materiálu .....	20
Obrázek 8: Detail sloupku jádra před složením horní spojky .....	22
Obrázek 9: Náhradní schéma transformátoru nakrátko (jedné fáze).....	24
Obrázek 10: Jednožilový kabel XLPE [10].....	30
Obrázek 11: Porovnání transf. 400 kVA 35/0, 4kV Ekodesign I a Ekodesign II (rozměry v mm) .....	33
Obrázek 12: Příhradová trafostanice 35 kV.....	34
Obrázek 13: Graf vypočítaných ročních ztrát pro transformátor S=400 kVA 22/0,4 kV .....	36
Obrázek 14: Graf vypočítaných ročních ztrát pro transformátory S≤2500 kVA 22/0,4 kV .....	36
Obrázek 15: Graf roční změny ztrát v závislosti na procentuálním nahrazení transf. za Ekodesign II .	40
Obrázek 16: Blokové schéma fotovoltaické elektrárny .....	41
Obrázek 17: FVE f. ČEZ Obnovitelné zdroje [11] .....	43
Obrázek 18: Báseň zvětšená na zděné trafostanici, Studnice (Trutnovsko) .....	46
Tabulka 1: Jalový indukční výkon vybraných jmenovitých výkonů transformátorů .....	29
Tabulka 2: Vypočítané hodnoty kapacitních jalových výkonů ve VN kabelech [9] .....	29
Tabulka 3: Maximální ztráty naprázdno a nakrátko pro olejové distribuční transformátory s S≤2500 kVA a sekundárním napětím 0,4 kV [2].....	32
Tabulka 4: Roční ztráty elektrické práce v transformátoru pro jednotlivé výkony, udáváno v [kWh] .....	37
Tabulka 5: Presumpce počtu transformátorů jednotlivých výkonů a napět'ových hladin, udáváno v [ks] .....	37
Tabulka 6: Celkové roční ztráty v distribučních transformátorech jednotlivých výkonů a napět'ových hladin, udáváno v [GWh/rok].....	39





