

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky
Obor: Elektrotechnika, energetika a management
Zaměření: Energetika



Analýza účinníku v distribučních sítích
Power factor analysis in distribution networks

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Martin Synek
Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.

©2014 ČVUT v Praze

ZADÁNÍ

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma analýza účinníku v distribučních sítích vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů uvedených v seznam použité literatury.

V Praze dne 12. 5. 2014

.....
Martin Synek

Poděkování

Děkuji Ing. Zdeňku Müllerovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce a za podnětné návrhy, které ji obohatily. Dále bych chtěl poděkovat společnosti Pražská energetika, a. s. za poskytnuté podklady k praktické části této práce, především Stanislavu Votrubovi, M.Sc.RWTH a Ing. Zdeňku Hejpetrovi, kteří mi poskytli cenné informace v dané oblasti.

Analýza účinníku v distribučních sítích

Power factor analysis in distribution networks

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá současným stavem účinníku v distribučních sítích nízkého napětí, jeho měření a vyhodnocení. V současné době účinník v sítích nízkého napětí nepatří mezi zkoumané parametry a stává se stále více diskutovaným tématem. Práce je rozdělena do dvou hlavních částí, teoretické a praktické. Teoretická část je zpracována na základě prostudované odborné literatury. Tato část práce je zaměřena na teoretické znalosti důležité k analyzování účinníku, především na teorii výkonu, definici účinníku a obecné požadavky na účinník v elektrizační soustavě. Druhá část práce je zaměřena na praktické měření účinníku v distribuční síti nízkého napětí provozovatele PREdistribuce. Měření se skládá ze dvou hlavních částí. První část měření je provedena elektroměry v jednotlivých odběrných místech a druhou částí je měření na vývodech trafostanic pomocí PQ monitorů. Naměřená data jsou vyhodnocena dle limitů převzatých z cenového rozhodnutí Energetického úřadu, které jsou pro potřebu práce vztaženy i na síť nízkého napětí. Data jsou poté porovnána s předpokládanou hodnotou účinníku v sítích nízkého napětí. Posledním bodem praktické části je posoudit změnu zjištěných hodnot účinníku v závislosti na zvýšenou koncentraci malých fotovoltaických elektráren.

Abstract

This thesis is focused on current state of power factor in low voltage distribution networks, its measuring and evaluation. At present, the power factor in low voltage networks is not measuring and becomes more discussed topic. The thesis is divided into two main parts, theoretical and practical. The theoretical part of the thesis is based on technical literature read. This section is focused on theoretical knowledge essential to analyze power factor, especially on power theory, power factor definition and general requirement for power factor in power system. The second part is focused on the practical power factor measurement in low voltage distribution network operator PREdistribuce. The measurements consists of two of two main parts. The firsts parts of measurement is performed in the electricity supply points and the second parts is to measure outlets substations by PQ monitors. The measured data are evaluated according accepted limits of the price decision of Energy regulatory office and compared with the current concept of value power factor. The last point is a theoretic. We consider increased installation of small photovoltaic plants and possible change of power factor.

Klíčová slova

analýza, účinník, elektrický výkon, činný výkon, jalový výkon, zdánlivý výkon, měření energie, distribuční síť, harmonické

Key words

analysis, power factor, electric power, active power, reactive power, apparent power, energy measurement, distribution network, harmonic

OBSAH

Úvod	8
1 Cíl a metodika práce	10
1.1 Cíl práce	10
1.2 Metodika práce	10
2 Elektrický výkon	11
2.1 Výkon při harmonických podmínkách.....	11
2.1.1 Okamžitý výkon.....	12
2.1.2 Činný výkon.....	14
2.1.3 Jalový výkon	15
2.1.4 Zdánlivý výkon	17
2.2 Výkon při periodických podmínkách.....	18
2.2.1 Okamžitý výkon.....	20
2.2.2 Činný a jalový výkon	21
2.2.3 Deformační a zdánlivý výkon.....	22
2.3 Výkon v trojfázové soustavě.....	23
2.4 Souhrn	26
3 Účinník	28
3.1 Účinník - požadavky	29
3.2 Kompenzace	31
4 Měření elektrické energie	33
4.1 Rozdělení měření a odběratelů.....	33
4.2 Elektroměry.....	34
5 Měření účinníku v distribuční síti NN	37
5.1 Postup měření.....	37
5.2 Charakter měřené oblasti.....	39
5.3 Analýza dat.....	40
5.3.1 Analýza odběrných míst	41

5.3.2	Analýza vývodů TS	49
5.3.3	Shrnutí měření v distribuční síti NN.....	67
5.3.4	Vliv malých fotovoltaických elektráren na účinník.....	68
6	Závěr	72
7	Seznam použitých zdrojů	75
8	Seznam vyobrazení a příloh.....	76
9	Přílohy	I

Úvod

Dnešní doba je typická svými specifiky, mezi které patří snaha o maximalizování účinnosti zařízení, zvyšování efektivnosti procesů, minimalizování rozměrů, snižování nákladů a především minimalizace dopadů na životní prostředí. Z pohledu elektroenergetiky jde zejména o zvýšení účinnosti při výrobě, přenosu, distribuci a spotřebě elektrické energie. Tento trend vede k rozvoji efektivního řízení spotřebičů tak, aby se maximalizovala jejich účinnost a minimalizovala spotřeba energie. Tento trend dokládá i Evropské unie programem Evropa 2020. Jedním z cílů programu je zvýšit podíl produkce energie z obnovitelných zdrojů na 20 %. Zvýšit energetickou účinnost o 20 % a snížit emisi skleníkových plynů o 20 % ve srovnání se stavem v roce 1990. To vše do roku 2020. Program je také nazýván Strategie 20-20-20.

Tyto snahy spolu s rychlým technologickým vývojem vedly k mnoha změnám v oblasti energetiky. Mezi změny ve spotřebě elektrické energie patří především nasazení nových technologií, které vedou ke zvýšení efektivnosti využití energie a tím snížení spotřeby. Zaměříme-li se na sítě nízkého napětí (NN), jedná se o zařízení napájené napětím 230/400 V. Charakter těchto zařízení je velmi rozmanitý od malých spotřebičů instalovaných v rodinných domech, administrativních a komerčních budovách až po zařízení vyšších příkonů jako jsou např. elektrické pohony. Mezi nové technologie patří moderní trendy v osvětlování, jako jsou LED zdroje světla a kompaktní úsporné zářivky, nesprávně také nazývány jako úsporné žárovky. Dále spotřební elektronika typu osobních počítačů, notebooků, televizorů aj., která je napájena ze spínacích zdrojů. Tyto nové spotřebiče obsahují předřazené elektronické obvody, díky kterým mohou mít menší rozměry, vyšší účinnost a může být použita aplikovaná technologie. Příkladem těchto elektronických předřadných obvodů, které obsahují polovodičové součástky je např. elektronický předřadník v patici kompaktní zářivky, nebo usměrňovač u LED zdrojů světla. U počítače tento obvod tvoří spínaný zdroj, čímž je umožněna jeho miniaturizace. Velké úspory energie jsou dosaženy především u elektrických pohonů použitím výkonových měničů. Souhrnně se tak jedná o nelineární spotřebiče.

Výsledkem úsporných zařízení může být úspora spotřeby elektrické energie více jak 50% oproti starým spotřebičům. Ovšem tyto zařízení mají i své záporné stránky, projevující se

negativními zpětnými vlivy na napájecí síť. Spotřebiče ze sítě odebírají neharmonický (deformovaný) proud a ten zapříčiní, že odebírají ze sítě výkon, který je větší než skutečně potřebný. Napájecí síť tak přenáší celkově zdánlivý výkon, který je větší nežli požadovaný činný výkon. Výsledkem je neefektivní přenos a distribuce elektrické energie s navýšenými ztrátami. Objevuje se zde tedy prostor pro minimalizaci ztrát. Zvyšování efektivnosti na straně spotřeby tak způsobí nehospodárnost na straně dodávky energie.

1 Cíl a metodika práce

1.1 Cíl práce

Cílem této diplomové práce je zjistit obecný přehled o hodnotách účinníků, s kterými jsou uskutečňovány odběry elektrické energie z distribučních sítí nízkého napětí (NN). Z těchto sítí jsou napájeny domácnosti a energeticky méně náročné podniky. Tato problematika je v současné době stále více diskutované téma, jelikož účinník v sítích NN momentálně nepatří mezi zkoumané parametry. Existuje vžitá představa, že v síti NN se účinník pohybuje v rozmezí 0,95 -1 induktivního charakteru. Toto pravidlo vzniklo v době, kdy skladba spotřebičů připojených k síti byla především lineárního charakteru. Ovšem díky rychlému technickému pokroku jsou nyní do sítě NN připojeny zejména nelineární spotřebiče, které mají odlišný charakter odběru energie v porovnání se spotřebiči lineárními. V závěru práce bude uvedeno zhodnocení, zda je stále možné u sítí obsahující především nelineární spotřebiče uvažovat obecně účinník v rozmezí 0,95 -1 a případně zdali je významné se jeho analýzou zabývat.

1.2 Metodika práce

Literární rešerše této diplomové práce je zpracována na základě prostudované odborné literatury a odborných informací čerpaných z internetu. Tyto zdroje jsou uvedeny v seznamu použité literatury. V této části práce nalezneme fyzikální předpoklady k dané problematice. Praktická část práce je zpracována na základě měření uskutečněného v distribuční síti nízkého napětí provozovatele PREDistribuce. K vyhodnocení dat byly použity poznatky uvedené v teoretické části práce, především postup výpočtu a hodnocení účinníku dle cenové rozhodnutí ERU [5]. Závěrečná část praktické části rozvíjí teorii, jak by mohl být ovlivněn současný stav účinníku v případě zvýšené koncentrace malých fotovoltaických elektráren.

2 Elektrický výkon

Výkon je obecně definován jako množství vykonané mechanické práce W (J) za jednotku času t (s). Určuje, jak rychle byla práce vykonána. Elektrický výkon je fyzikální veličina vyjadřující vykonanou práci W (J) za jednotku času t (s), kde práci koná elektrická síla. Označujeme ho písmenem P a měříme jednotkou Watt (W). Výkon $1 W$ má tedy zařízení, které vykoná práci $1 J$ za $1 s$. Výkon je obecně dán součinem napětí a proudu. Rozlišujeme výkon okamžitý, který se vztahuje k určitému časovému okamžiku a průměrný výkon, který je vztažen k určitému časovému intervalu.

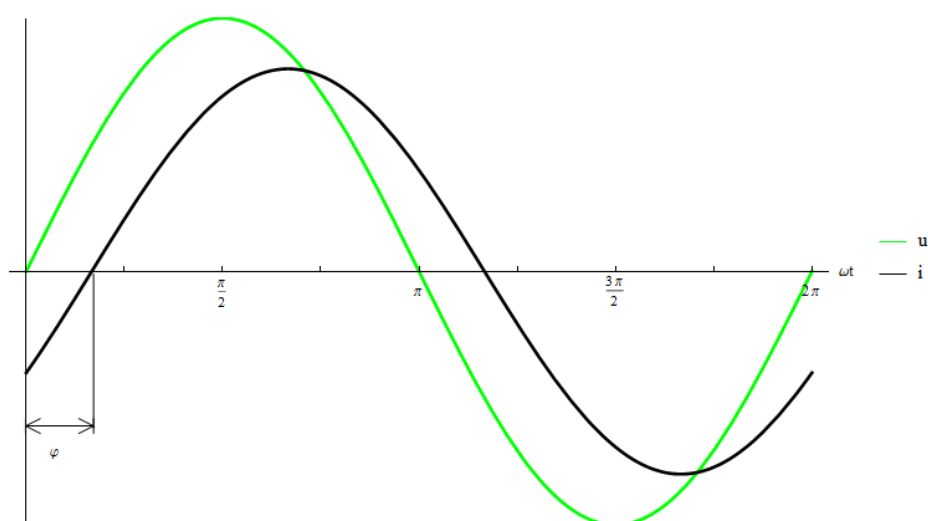
V obvodě napájeném stejnosměrným napětím je elektrický výkon tvořen pouze jednou složkou, jelikož průběhy napětí a proudu jsou konstantní. V sítích střídavého napětí je situace složitější. Elektrický výkon je závislý na tvaru signálu napájecího napětí a proudu odebíraného spotřebičem, dále na jejich vzájemném fázovém posuvu φ . V síti střídavého napětí, pokud jsou tvary signálu harmonické, rozlišujeme dvě složky okamžitého výkonu, výkon činný P (W) a jalový Q (var), výkony společně tvoří zdánlivý výkon S ($V \cdot A$). Pokud je napájecí napětí a odebíraný proud periodického ovšem neharmonického charakteru, vyskytuje se v obvodu třetí složka okamžitého výkonu, kterou je výkon deformační D ($V \cdot A$). Tato definice výkonu je v souladu s tzv. tříložkovou koncepcí výkonů [2]. Jelikož výkon je závislý na tvaru průběhu napětí a proudu, uvedeme definice výkon pro idealizované podmínky harmonického charakteru. V druhé části kapitoly uvedeme výkon pro deformované průběhy napětí a proudu obecného periodického charakteru. V závěru kapitoly pro úplnost popíšeme výkon v trojfázové soustavě.

Nutno uvést, že v současné době existuje více výkonových teorií. Doposud nebyla nalezena shoda mezi teoriemi, která postihuje správně celkový tok výkonu v sítích střídavého napětí. Některé z teorií nejsou vyjádřeny srozumitelně nebo mají nedostatečné fyzikální oprávnění. V této práci uvažujeme výše zmíněnou výkonovou teorii dle literatury [2].

2.1 Výkon při harmonických podmínkách

Harmonické podmínky jsou specifickým případem periodických podmínek. Elektrický výkon je závislý na tvaru napájecího napětí a proudu, který obvodem protéká. Za určitých

podmínek můžeme uvažovat idealizované průběhy střídavého napětí a proudu, které mají harmonický průběh s určitým fázovým posunem φ mezi průběhy napětí a proudu. Takovýto idealizovaný stav znázorňuje Obrázek 1. Velikost fázového posunu mezi napětím a proudem nabývá hodnot v rozmezí $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ a je dán charakterem zátěže. Harmonické průběhy napětí a proudu se v distribuční síti vyskytují pouze v případě, je-li obvod tvořen pouze lineárními prvky. Lineární spotřebič je zařízení, které je tvořeno pouze lineárními prvky s konstantními parametry. Takové prvky jsou rezistory ($\varphi = 0^\circ$), kapacitory ($\varphi = -90^\circ$) a induktory ($\varphi = 90^\circ$).



Obrázek 1: Průběh periody napájecího napětí a odebíraného proudu s harmonickým charakterem a fázovým posunem φ

2.1.1 Okamžitý výkon

Je-li spotřebič připojen na proměnné napětí u (V) tak jím protéká proměnný proud i (A) a odebírá ze zdroje výkon. Okamžitý výkon je fyzikální veličina, která popisuje výkon v daném časovém okamžiku, který spotřebič odebírá ze zdroje. Hodnota okamžitého výkonu je v každém okamžiku dána součinem okamžitých hodnot napětí a proudu [1]. Jelikož okamžité hodnoty napětí a proudů se ve střídavých obvodech neustále mění, je i okamžitá hodnota výkonu v čase proměnlivá.

$$p = u \cdot i \quad 2.1$$

Je-li průběh napájecího napětí harmonický o amplitudě $U_m = \sqrt{2} \cdot U$ s uhlovou frekvencí $\omega = 2\pi \cdot f$

$$u = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega t) \quad 2.2$$

poté lineárním spotřebičem protéká proud rovněž harmonického průběhu posunutý vůči napětí o fázový úhel φ daný charakterem zátěže.

$$i = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad 2.3$$

Dosadíme-li za napětí a proud do rovnice 2.1

$$p = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) \quad 2.4$$

a upravíme vztah dle vzorce pro součin goniometrických funkcí

$$\sin \alpha \cdot \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)] \quad 2.5$$

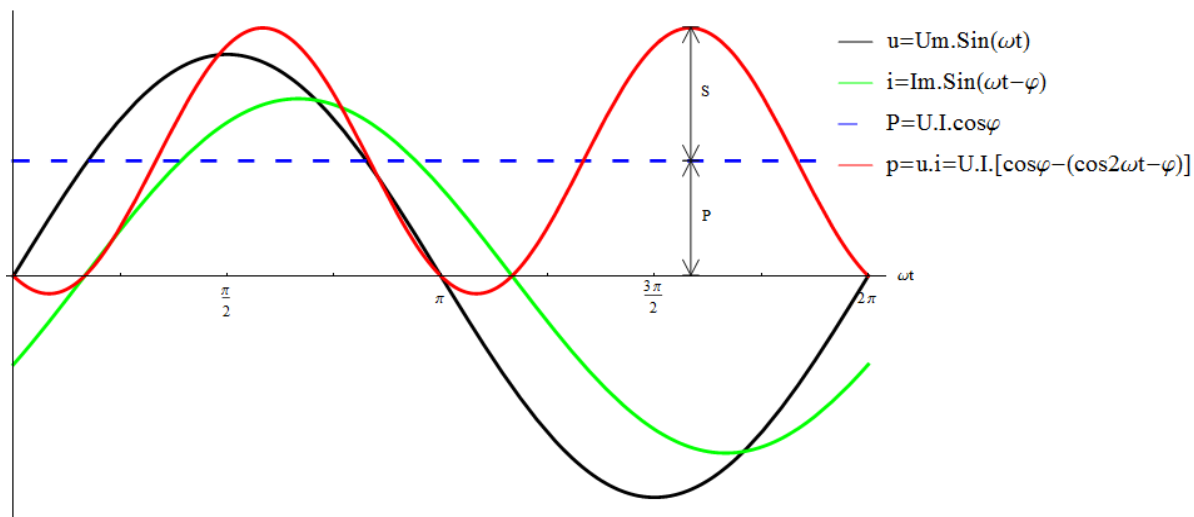
získáme okamžitý výkon, který je tvořen dvěma složkami.

$$p = U \cdot I \cdot [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] \quad 2.6$$

Z rovnice 2.6 vidíme, že okamžitý výkon se skládá ze dvou složek. První složka je konstantní, jejíž hodnota odpovídá činnému výkonu P [1].

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad 2.7$$

Druhá složka je periodického charakteru kmitající okolo stejnosměrné složky s dvojnásobnou uhlovou frekvencí než má napětí a proud, tedy 2ω . Amplituda periodické složky je rovna zdánlivému výkonu S . Grafické zobrazení rovnice 2.6 je znázorněno na Obrázek 2. Během kladných hodnot okamžitého výkonu p dodává zdroj činnou energii, která je nevratně přeměněna na jiný druh energie a energii jalovou, která slouží k vytvoření elektrického pole kapacitoru a elektromagnetického pole induktoru. Během záporných hodnot okamžitého výkonu už zdroj nedodá žádnou energii, ovšem jalová energie akumulovaná v kapacitoru, případně induktoru se vrací zpět do zdroje. Jalová energie tedy nevykonává žádnou práci a periodicky se přelévá mezi zdrojem a zásobníky energie.



Obrázek 2: Průběh okamžitého výkonu během periody napájecího napětí

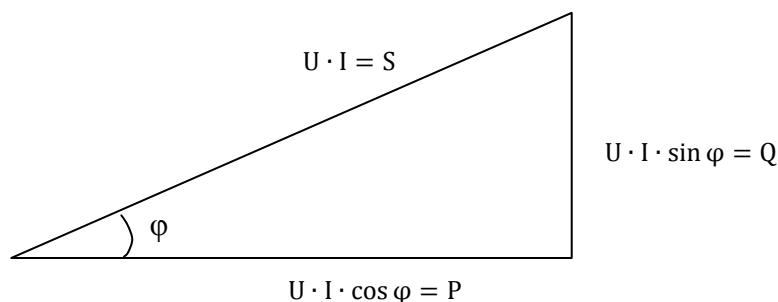
2.1.2 Činný výkon

Činný výkon koná ve spotřebiči činnou práci a kryje činné ztráty v obvodu vzniklé transportem energie a její přeměnu na jiný druh energie. Reprezentuje tedy elektrickou energii, která se nevratně přemění na jinou formu energie. Činný výkon představuje střední hodnotu okamžitého výkonu za dobu periody T . Činný výkon je vyjádřen v joulech za sekundu, tedy watech "W". Matematicky činný výkon vyjádříme jako [1]

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p \, dt = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u \cdot i \, dt \quad 2.8$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi. \quad 2.9$$

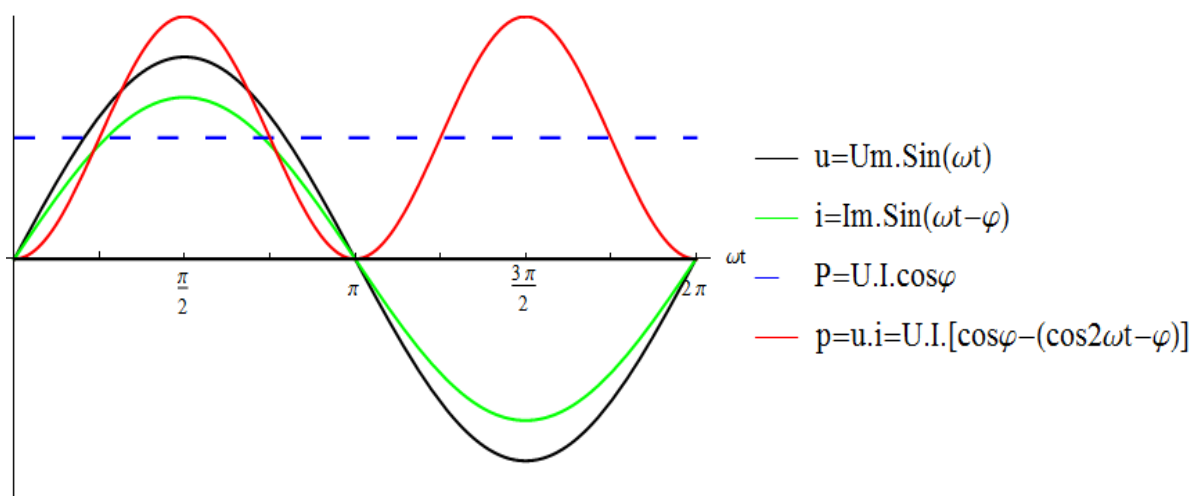
Vzorec pro činný výkon, viz 2.9, můžeme graficky znázornit jako pravoúhlý trojúhelník s přeponou $U \cdot I$ a odvěsnou $U \cdot I \cdot \cos \varphi$, které vzájemně svírají úhel φ – úhel fázového posunu mezi napětím a proudem. Zbývající odvěsna je dána vztahem pro goniometrické



Obrázek 3: Trojúhelník výkonů při harmonických podmínkách

funkce jako $U \cdot I \cdot \sin \varphi$. Získáme tak známý výkonový trojúhelník, který vidíme na Obrázek 3, který představuje vzájemnou souvislost mezi jednotlivými výkony.

Z rovnice 2.9 vidíme, že činný výkon závisí na fázovém posunu φ mezi napětím a proudem. Bude-li zátěž čistě odporová, jsou napětí i proud ve fázi. Fázový posun φ je tedy roven nule a $\cos \varphi = 1$. Průběh okamžitého výkonu nabývá pouze kladné hodnoty, je dodáván pouze činný výkon, viz Obrázek 4. Bude-li spotřebič obsahovat krom rezistorů i indukty nebo kapacitory, tak $\cos \varphi < 1$ a činný výkon konající činou práci bude nižší.



Obrázek 4: Průběh výkonů pro odporovou zátěž za harmonických podmínek

2.1.3 Jalový výkon

Jalový výkon slouží k vytvoření elektrického pole kapacitorů a magnetického pole induktorů. Tato přeměna energie je vratná. Indukty a kapacitory slouží jako zásobníky energie, které se během kladných hodnot okamžitého výkonu nabíjejí. V okamžicích, kdy okamžitý výkon nabývá záporných hodnot, zásobníky vracejí energii zpět do zdroje. Tato výměna energie mezi zdrojem a spotřebičem probíhá cyklicky. Jalový výkon značíme písmenem Q , matematické vyjádření je [1]

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi. \quad 2.10$$

Ze vztahu 2.10 vidíme, že jednotka jalového výkonu má stejný rozměr jako jednotka činného výkonu, ale pro rozlišení se udává ve voltampérech, značíme "*var*". Dříve označována voltampér reaktanční "*VAR*". K odvození jalového výkonu není vztah 2.6 pro

okamžitý výkon vhodný, tak jako tomu bylo pro činný výkon. Kde první složka vztahu $U \cdot I \cdot \cos \varphi$ představuje činný výkon, ale druhá složka neobsahuje požadovaný výraz $U \cdot I \cdot \sin \varphi$. Proto rovnici 2.6 upravíme vzorcem pro rozdíl goniometrických funkcí, viz 2.11.

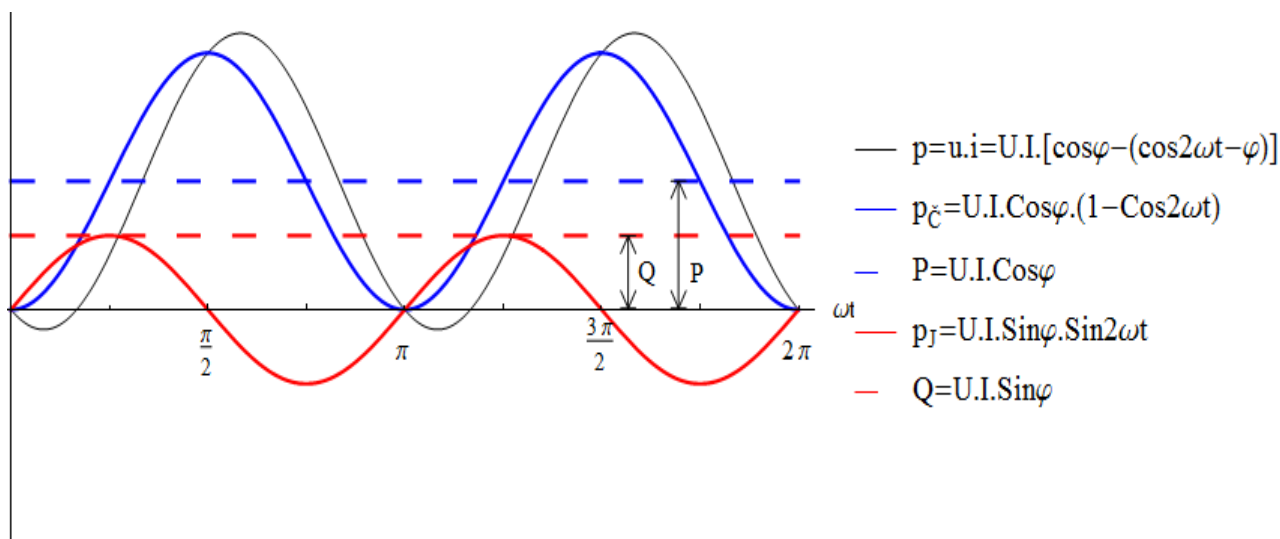
$$\cos(\alpha - \beta) = \cos \alpha \cdot \cos \beta + \sin \alpha \cdot \sin \beta \quad 2.11$$

$$p = U \cdot I \cdot [\cos \varphi - \cos(2 \cdot \omega \cdot t - \varphi)]$$

$$= U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot (1 - \cos 2 \cdot \omega \cdot t) - U \cdot I \cdot \sin \varphi \cdot \sin 2 \cdot \omega \cdot t \quad 2.12$$

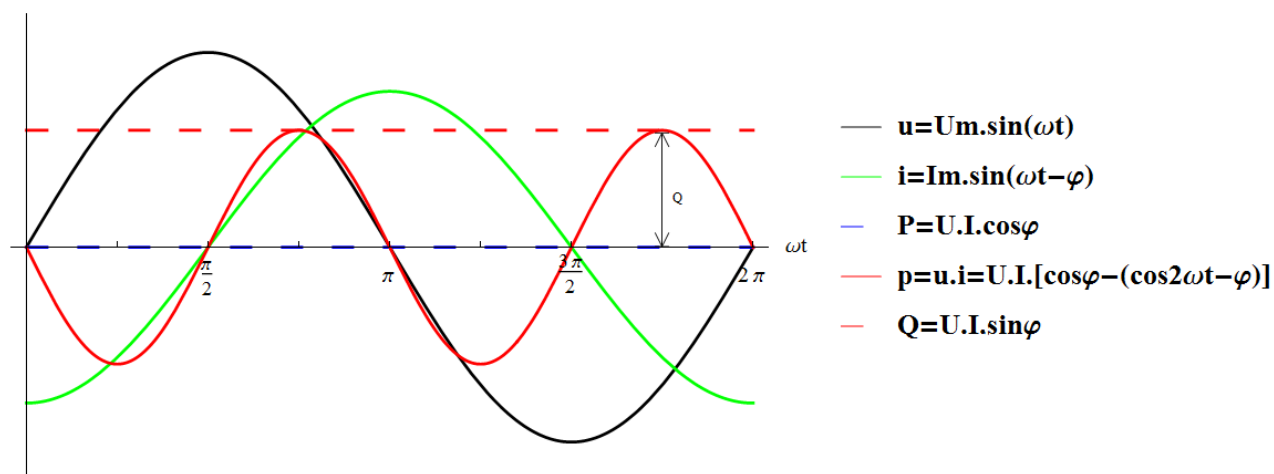
$$= p_{\text{č}} + p_{\text{j}}$$

Úpravou jsme získali opět dvě složky okamžitého výkonu, viz 2.12, jejichž průběh vidíme na Obrázek 5. Činná složka $p_{\text{č}}$ kmitá pouze v kladných hodnotách. Představuje tedy energii dodanou ze zdroje do spotřebiče. Její střední hodnota je činný výkon vyjádřený rovnicí 2.9. Jalová složka p_{j} nabývá kladných i záporných hodnot. Její střední hodnota za dobu periody je nulová, nekoná tedy práci. Jalová složka představuje přelévání energie mezi zdrojem a spotřebičem. Jalový výkon je určen jako amplituda jalové složky okamžitého výkonu p_{j} .



Obrázek 5: Průběh činné a jalové složky okamžitého výkonu při harmonických podmínkách, rovnice 2.12

Zjistili jsme, že poměr dodávky činného a jalového výkonu je závislý na fázovém posunu φ mezi napětím a proudem. Provedeme-li stejnou úvahu jako v odstavci 2.1.2, ovšem zátěž budeme uvažovat čistě induktivní (kapacitní). Fázový posun φ bude roven 90° (-90°), poté $\cos \varphi = 0$ a $\sin \varphi = 1$. Všechny dodávaný výkon, je tedy jalový a přelévá se mezi zdrojem a spotřebičem. Grafické znázornění vidíme na Obrázek 6. Název jalový výkon je výstižný, jelikož nekoná žádnou činnou práci.



Obrázek 6: Průběh výkonů pro induktivní zátěž při harmonických podmínkách

2.1.4 Zdánlivý výkon

Zdánlivý výkon nepředstavuje reálný výkon, ale je definován z praktických důvodů, jelikož je důležitý pro dimenzování obvodu z hlediska velikosti celkového proudu. Zdánlivý výkon je maximální možná hodnota činného výkonu dosažitelná za optimálních podmínek. Tedy za harmonického průběhu napájecího napětí a odebíraného proudu a při jejich nulovém vzájemném fázovém posunu φ . Nejsou-li tyto podmínky plně splněny, nevytěžíme z dodávaného napětí a odebíraného proudu možné maximum činného výkonu.

Zdánlivý výkon matematicky vyjádříme jako [1]

$$S = U \cdot I, \quad 2.13$$

případně dle Obrázek 3, můžeme vyjádřit zdánlivý výkon jako přeponu pravoúhlého trojúhelníku

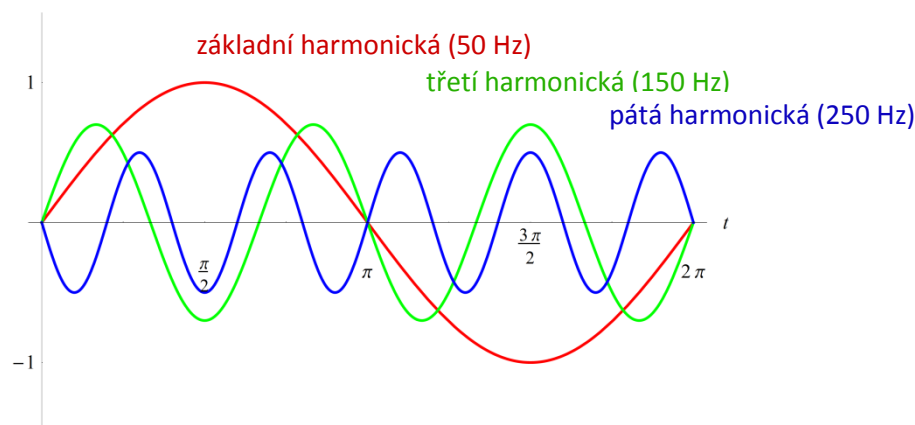
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad 2.14$$

Ze vztahu zobrazeném v 2.13 je zřejmé, že jednotkou zdánlivého výkonu je voltampér, značíme " $V \cdot A$ ". Jelikož výkon činný, jalový i zdánlivý je dán součinem napětí a proudu, mají všechny jednotky stejný rozměr. Aby bylo možné je rozlišit, nazýváme je odlišně (W , var , $V \cdot A$).

2.2 Výkon při periodických podmínkách

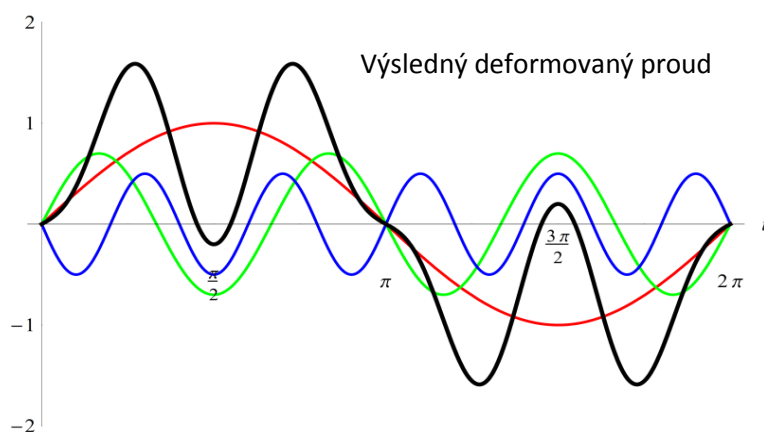
Až do této chvíle jsme uvažovali specifický případ periodických podmínek kdy napájecí napětí a proud protékající spotřebičem mají harmonický charakter, viz Obrázek 1. Rozlišovali jsme pouze dvě složky zdánlivého výkonu S , výkon činný P a jalový Q . V případě, kdy podmínka čistě harmonických průběhů nebude splněna a obvod obsahuje vyšší harmonické, jsou výsledné průběhy napětí a proudu deformované. Tato skutečnost zapříčiní vznik třetí složky zdánlivého výkonu, kterou je deformační výkon D .

Vyšší harmonické proudy, případně napětí jsou takové, jejich frekvence je dána celočíselným násobkem první harmonické. Upozorním, že základní (první) harmonická kmitá frekvencí 50 Hz, např. pátá harmonická bude mít tedy frekvenci 250 Hz.



Obrázek 7: Průběh základní, třetí a páté harmonické

Na Obrázek 7 je graficky tato situace zachycena. Obrázek 8 zobrazuje, jak by vypadal výsledný proud, který by obsahoval první, třetí a pátou harmonickou. Vidíme, že výsledný proud je periodická funkce opakující se za dobu periody ovšem nesinusového charakteru.



Obrázek 8: Deformovaný průběh proudu

Pro posuzování vyšších harmonických byly zavedeny následující dva pojmy. První pojem poměrná hodnota k -té harmonické je vyjádřen jako poměr efektivní hodnoty k -té harmonické a základní harmonické. Poměrnou hodnotou je možné vyjádřit napětí i proud bezrozměrně, nebo v procentech. [10]

$$u_k = \frac{U_k}{U_1}; u_{k\%} = \frac{U_k}{U_1} \cdot 100 \quad 2.15$$

$$i_k = \frac{I_k}{I_1}; i_{k\%} = \frac{I_k}{I_1} \cdot 100 \quad 2.16$$

kde U_k, I_k efektivní hodnota k -té harmonické složky napětí (proudu)

U_1, I_1 efektivní hodnota základní harmonické napětí (proudu)

u_k, i_k poměrná hodnota k -té harmonické napětí (proudu)

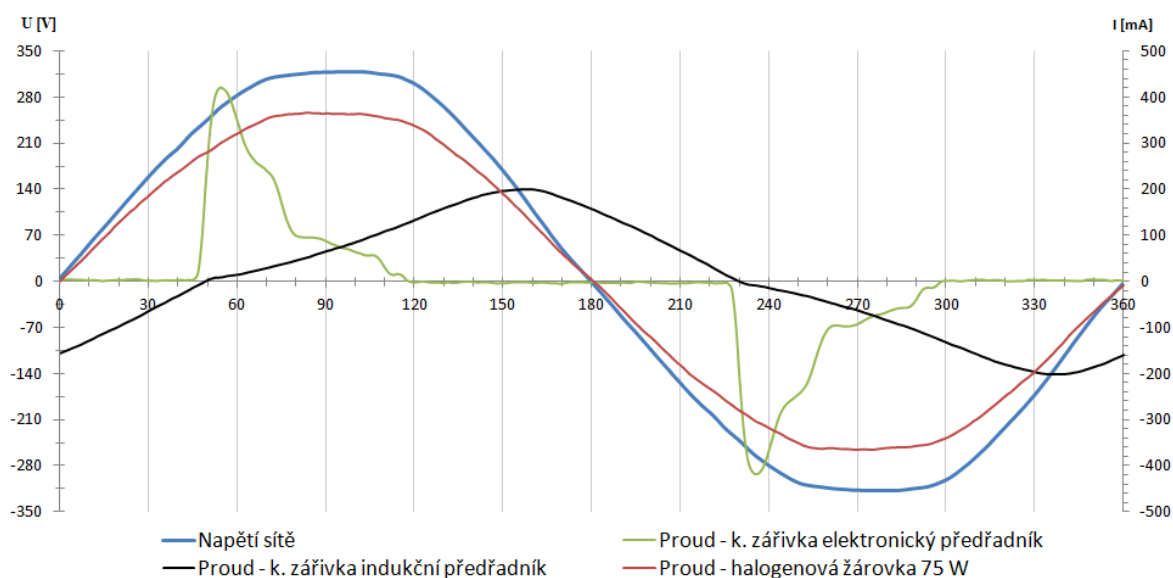
$u_{k\%}, i_{k\%}$ procentní hodnota k -té harmonické napětí (proudu)

Souhrnné posouzení obsahu vyšších harmonických v celém spektru je definováno činitelem harmonického zkreslení (THD – Total Harmonic Distortion). Parametr THD, který charakterizuje nelinearitu je opět definován pro napětí i proud. [10]

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{40} U_k^2}}{U_1}; THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{40} I_k^2}}{I_1} \quad 2.17$$

Na rozdíl od harmonického charakteru napětí a proudu jsou obecné periodické průběhy častým jevem v distribučních sítích. Tato skutečnost je dána rozvojem technologií cílených

na účinnost a nízkou spotřebu zařízení, které obsahují polovodičové součástky. Výsledkem je zařízení, které i když je napájeno sinusovým napětím neodebírá ze sítě sinusový proud. Typickým příkladem jsou např. kompaktní zářivky. Obrázek 9 zachycuje průběh odebíraného proudu takovýchto zářivek v porovnání s halogenovou žárovkou, která má obecně odporový charakter.



Obrázek 9: Průběh napětí a proudu nelineárních spotřebičů

2.2.1 Okamžitý výkon

Obecné periodické podmínky jsou převládajícím jevem vyskytujícím se v napájecí soustavě. Takové průběhy můžeme rozložit na jednotlivé harmonické složky a tak popsat výsledné deformované průběhy napětí a proudu. V popisu neuvažujeme konstantní složky U_0, I_0 [2].

$$u = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot U_h \cdot \sin(h\omega t + \psi_h); i = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot I_h \cdot \sin(h\omega t + \psi_h - \varphi_h) \quad 2.18$$

- Kde U_h, I_h jsou efektivní hodnoty napětí a proudu harmonické řádu h ,
 ω je úhlová frekvence základní harmonické,
 Ψ_h je úhel fázového posunu harmonického napětí řádu h proti první harmonické napětí,
 φ_h je úhel fázového posunu mezi harmonickým napětím a proudem řádu h .

Poté lze okamžitý výkon vyjádřit vztahem:

$$p = u \cdot i = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot U_h \cdot \sin(h\omega t + \psi_h) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot I_k \cdot \sin(k\omega t + \psi_k - \varphi_k), \quad 2.19$$

a úpravou dle vztahu 2.5 získáme okamžitý výkon ve tvaru

$$p = \sum_{h=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} U_h \cdot I_k \cdot \{\cos[(h-k)\omega t + \psi_h - \psi_k + \varphi_k]\} - \{\cos[(h+k)\omega t + \psi_h + \psi_k - \varphi_k]\}. \quad 2.20$$

Vznikl tak součet řady členů, které mají střídavý průběh s frekvencí daného rozdílem $(h-k)\cdot\omega t$ a součtem $(h+k)\cdot\omega t$, kde h a k jsou řádem harmonických složek napětí a proudu. Střední hodnota těchto členů je rovna nule, nepřispívá tedy ke vzniku činného výkonu P . Výjimkou jsou členy tvořeny součinem koeficientů $h = k$, kde rozdílový kmitočet mezi napětím a proudem je nulový a ve svém součtu tvoří střední hodnotu průběhu okamžitého výkonu, tedy činný výkon.[2]

2.2.2 Činný a jalový výkon

Na tvorbě činného výkonu se jako jediný podílí ty členy ze vztahu 2.20, které mají harmonické stejného řádu $h = k$, tedy členy se stejným kmitočtem. Tyto členy dále upravíme jako vztah 2.12 při harmonických podmínkách. Získáme tak opět činnou a jalovou složkou okamžitého výkonu pro harmonické stejného řádu.[2]

$$\begin{aligned} p_{h=k} &= I_h \cdot U_h \cdot [\cos \varphi_h - \cos(2h\omega t + 2\psi_h - 2\varphi_h)] \\ &= I_h \cdot U_h \cdot \cos \varphi_h [1 - \cos(2h\omega t + 2\psi_h)] - I_h \cdot U_h \cdot \sin \varphi_h \cdot \sin(2h\omega t + 2\psi_h) \\ &= p_{h\check{c}} + p_{hj} \end{aligned} \quad 2.21$$

Celkový činný výkon poté získáme jako součet středních hodnot jednotlivých harmonických složek činného okamžitého výkonu.

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p_{h\check{c}} dt = \sum_{h=1}^{\infty} U_h \cdot I_h \cdot \cos \varphi_h \quad 2.22$$

Analogicky, jako při harmonických podmínkách je jalový výkon dán jako součet amplitud jednotlivých harmonických složek jalového okamžitého výkonu. Ovšem tato definice je

z fyzikálního hlediska sporná, jelikož sčítáme amplitudy střídavých průběhů o různém kmitočtu a fázovém posunu.[2]

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} U_h \cdot I_h \cdot \sin \varphi_h \quad 2.23$$

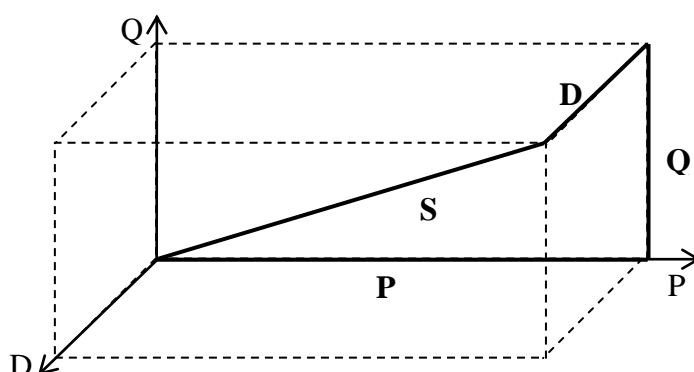
2.2.3 Deformační a zdánlivý výkon

Do této chvíle jsme se zabývali pouze členy okamžitého výkonu dané vztahem 2.20, které měly stejný kmitočet ($h = k$). Opomínali jsme ty členy, které mají rozdílný řád harmonických a nepodílí se tak na tvorbě činného ani jalového výkonu. Celkový přínos členů, pro které platí $h \neq k$ je definován, jako deformační výkon D . Deformační výkon je v třísložkové koncepci výkonu popsán tak, aby jednotlivé složky okamžitého výkonu, tedy výkon činný, jalový a deformační společně popsali zdánlivý výkon S při obecných periodických podmínkách.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad 2.24$$

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad 2.25$$

Popis jednotlivých složek výkonu ze vztahu 2.24 zachycuje Obrázek 10, tzv. kvádr výkonů. Zdánlivý výkon je geometricky popsán jako tělesová úhlopříčka kvádrů o hranách P , Q a D .



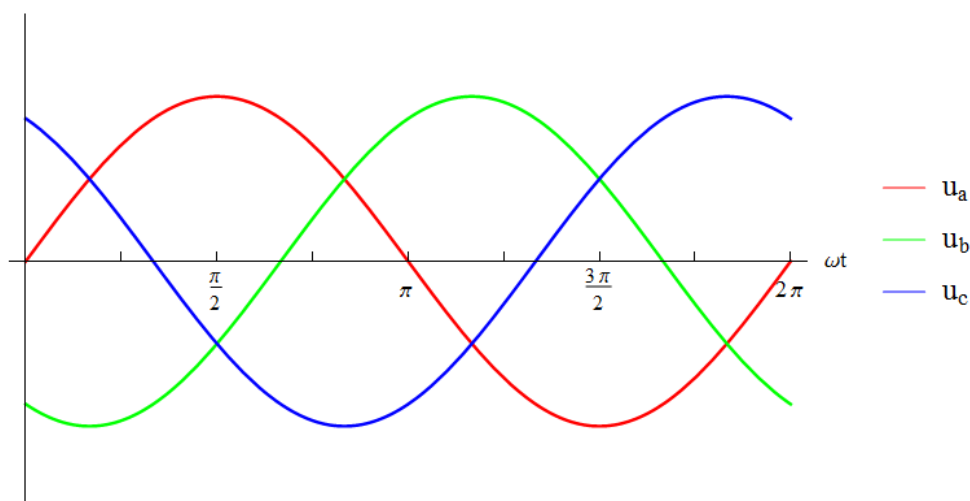
Obrázek 10: grafický popis třísložkové koncepce výkonu

Situace kdy spotřebič odebírá neharmonický proud s obsahem vyšších harmonických i když je napájen harmonickým napětím nastane v případě, kdy obvod obsahuje nelineární spotřebiče obsahující polovodičové součástky. Většina spotřebičů v síti NN jsou právě tohoto charakteru. Deformační výkon je tvořen vyššími harmonickými proudy a napětí různého řádu harmonické. Jednotka je voltampér, značíme " $V \cdot A$ ". Střední hodnota deformačního výkonu za dobu periody je rovna nule, energie se přelévá mezi zdrojem a spotřebičem a nekoná tak činnou práci. Byl zaveden z důvodu, že při obecných periodických podmínkách neplatí vztah 2.14 tak jako při harmonických podmínkách.

$$S > \sqrt{P^2 + Q^2} \quad 2.26$$

2.3 Výkon v trojfázové soustavě

Elektrická energie je běžně přenášena trojfázovou střídavou soustavou, proto je vhodné definovat elektrický výkon i pro tyto podmínky. Většina domácích spotřebičů jsou jednofázové a připojí se mezi jednotlivé fáze tak, aby zatížení jednotlivých fází bylo co nejvíce souměrné. Vznikne tak síť s převážně souměrným zatížením. Trojfázový systém se vyznačuje třemi fázovými napětími vzájemně posunutými o 120° v jednotlivých fázích a, b, c , viz Obrázek 11. Definování výkonu v trojfázové soustavě je ovšem obtížnější, jelikož mezinárodní elektrotechnický slovník [1] postihuje vesměs pouze jednopólové



Obrázek 11: Trojfázová symetrická soustava - průběh fázových napětí

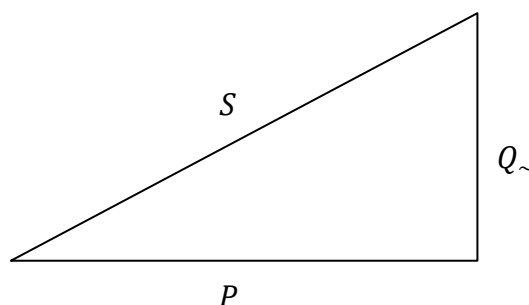
obvody, mezi které patří jednofázové systémy. Výjimkou je definice okamžitého výkonu pro n -pólové obvody, která definuje okamžitý výkon jako součet okamžitých výkonů vztahující se k jednotlivým pólovým párům. Jelikož činný výkon představuje střední hodnotu okamžitého výkonu za dobu jedné periody, tak s přihlédnutím k výše uvedené definici lze činné výkony jednotlivých fází také sčítat. V trojfázové soustavě a, b, c bude činný fázový výkon dán součtem jednotlivých činných fázových výkonů.

$$P = P_a + P_b + P_c \quad 2.27$$

Pro činné výkony jednotlivých fází při obecných periodických podmínkách platí vztah 2.22. Mezi tyto podmínky patří i případ, kdy se v soustavě nachází napětí a proudy harmonického charakteru, pouze o základní harmonické. V takovémto případě jsou jednotlivé činné výkony dány vztahem 2.9.

Mezinárodní elektrotechnický slovník [1] už dále nedefinuje zbylé složky zdánlivé výkonu a ani celkový zdánlivý výkon pro trojfázový systém. V této situaci je výhodnější použít tzv. dvousložkovou koncepci výkonu, která je oproti třísložkové koncepci výrazně jednodušší. Grafické rozdělení zdánlivého výkonu do dvou, případně tří složek zobrazuje Obrázek 14. Neaktivní výkon Q_{\sim} zde reprezentuje všechny složky okamžitého výkonu, které se nepodílí na tvorbě činného výkonu. [2]

$$Q_{\sim} = \sqrt{S^2 - P^2} \quad 2.28$$



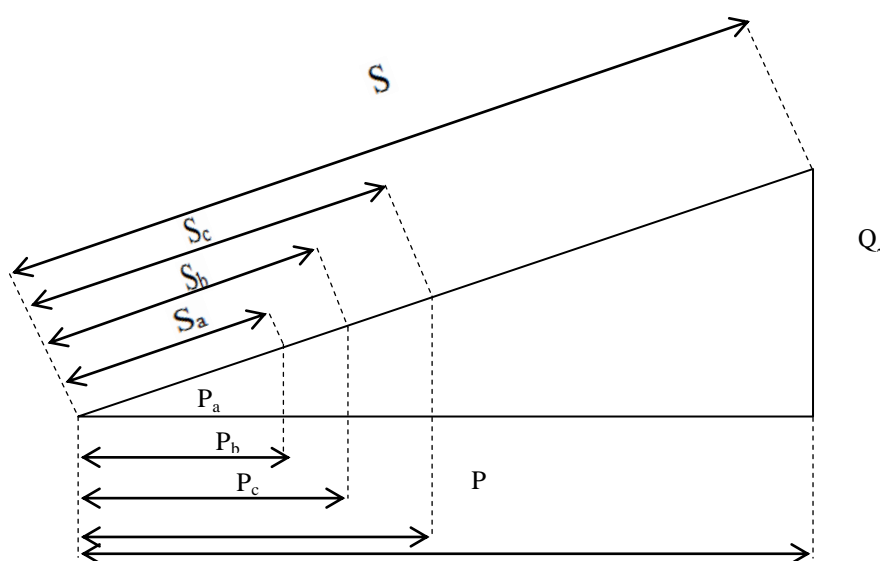
Obrázek 12: Výkonový trojúhelník při obecných periodických podmínkách

Pomocí vztahu 2.28 definujeme známý výkonový trojúhelník i pro obecné periodické podmínky, viz Obrázek 12. Na rozdíl od harmonických podmínek, úhel svíraný stranami P a S , nemá žádný fyzikální význam a ani na průbězích napětí a proudu ho nelze identifikovat.[2]

Pokusíme se tedy určit celkový zdánlivý a neaktivní výkon tak, aby to bylo fyzikálně přijatelné. Celkově zdánlivý výkon určíme metodou algebraických součtů jednotlivých zdánlivých fázových výkonů tak jako tomu bylo u činného výkonu.

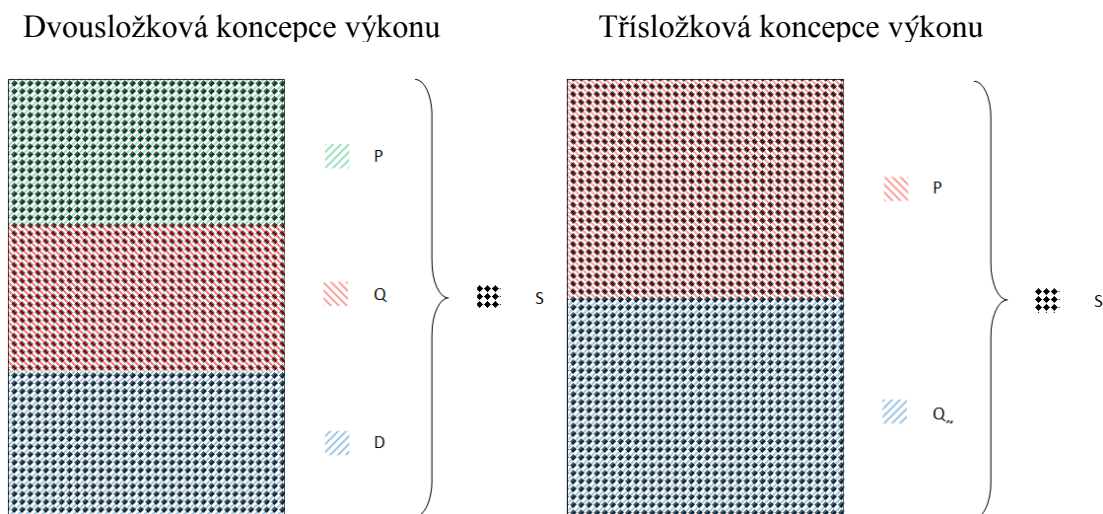
$$\begin{aligned} S &= S_a + S_b + S_c \\ &= U_a \cdot I_a + U_a \cdot I_b + U_c \cdot I_c \end{aligned} \quad 2.29$$

Tento výpočet je fyzikálně platný, pouze v případě, jsou-li v jednotlivých fázích stejné účinníky (poměr P/S), viz další kapitola. Jelikož účinníky se z pravidla v jednotlivých fázích příliš neliší, je tento postup přijatelný. S hodnotou aritmetického zdánlivého výkonu se běžně pracuje a pro naše potřeby je postačující. [2], [3]



Obrázek 13: Aritmetický zdánlivý výkon v trojfázové soustavě

Grafické zobrazení aritmetické součty celkového zdánlivého výkonu vidíme na Obrázek 13. Z obrázku je také vidět, že i celkový neaktivní výkon je možné aritmeticky sečíst.



Obrázek 14: Dvou a třísložková koncepce výkonu

2.4 Souhrn

Okamžitá hodnota výkonu při harmonických podmínkách se skládá z konstantní složky P a střídavé složky, která kmitá okolo konstantní složky s dvojnásobným uhlovým kmitočtem než má napětí a s amplitudou S , viz Obrázek 2. Jelikož konstantní složka během každé periody představuje střední hodnotu okamžitého výkonu je rovna činnému výkonu, viz vztah 2.9. Amplituda S kmitavé složky představuje zdánlivý výkon. Zdánlivý výkon udává největší možnou hodnotu činného výkonu, které by mohl dosáhnout za ideálních podmínek. Takové podmínky nastávají, jsou-li napětí a proud sinusové funkce s nulovým fázovým posunem φ . Upravíme-li vztah pro okamžitý výkon tak, abychom získali činnou a jalovou složku okamžitého výkonu, viz vztah 2.12, získáme tzv. jalový výkon, který je určen jako amplituda jalové složky okamžitého výkonu viz Obrázek 5. Jalový výkon je tedy míra střídavé složky výkonu, která představuje přelévání energie mezi zdrojem a energetickými zásobníky zátěže. Získali jsme tak dvě složky okamžitého výkonu, výkon činný a jalový, které společně tvoří zdánlivý výkon, viz 2.14. Jalový výkon nekoná ve spotřebiči žádnou činnou práci, je ovšem důležitý pro chod určitých zařízení. U klasických strojů jako např. u asynchronního motoru, který představuje induktivní zátěž, je jalový výkon potřebný k vytvoření magnetického pole uvnitř motoru.

Obtížnější situace nastává, obsahují-li napětí a proud vyšší harmonické a mají tak deformované průběhy. Takovéto deformované průběhy lze rozložit na jednotlivé

harmonické. Okamžitý výkon je tak dán součtem řady členů součinu napětí a proudu, které mají buď stejnou, nebo rozdílnou úhlovou frekvenci. Pro činný a jalový výkon v tomto případě platí, že jsou dány součinem napětí a proudů pouze harmonických stejného řádu, které mají stejný úhlový kmitočet. Pro tyto členy platí stejné úvahy a postupy jako tomu bylo za sinusových podmínek. Činný výkon je dán vztahem 2.22 a jalový vztahem 2.23. Ovšem fyzikální význam jalového výkonu je sporný, jelikož sčítáme amplitudy střídavých průběhů jalové složky okamžitého výkonu o různých frekvencích. Produkty od součinů napětí a proudů s různým úhlovým kmitočtem tvoří třetí složku zdánlivého výkonu nazývanou deformační výkon. Deformační výkon postihuje skutečnost, kdy je zdánlivý výkon za obecných periodických podmínek (neharmonických) vyšší než udává vztah 2.14, viz vztah 2.24. Má-li napájecí soustava dostatečně malou zkratovou impedanci, pak připojené nelineární spotřebiče neovlivní tvar napájecího napětí. Můžeme uvažovat jen průběh proudu za deformovaný a napětí za přibližně harmonické s malým obsahem vyšších harmonických. Tato situace je běžně platný jev v napájecí soustavě. Poté se na tvorbě činného výkonu podílí pouze první harmonická proudu a všechny vyšší harmonické přispívají ke vzniku deformačního výkonu. Jalový i deformační výkon mají nulovou střední hodnotu, nekonají tedy činnou práci. Energie se pouze přelévá mezi zdrojem a spotřebičem. Přenos činného výkonu je tak doprovázen vyjma jalového výkonu i výkonem deformačním. Tyto výkony způsobují přítomnost neúčinných složek proudu pro přenos energie. Pro přenos požadovaného činného výkonu tak obvodem protéká vyšší proud, který způsobuje ztráty na vedení. Z výše uvedeného je zřejmé, že činný výkon za obecně periodických neharmonických podmínek bude vždy nižší než výkon zdánlivý.

U jednofázového systému jsme uvažovali třísloužkovou koncepci výkonu. Zdánlivý výkon se skládal ze tří složek, a to činného, jalového a deformačního výkonu. Tato koncepce byla vhodná pro posouzení vlivu odebíraného proudu spotřebičem na skladbu výkonu. Jelikož trojfázový systém je složitější, je vhodné pro tuto situaci použít dvousložkovou koncepci výkonů. Zde je zdánlivý výkon tvořen činným a neaktivním výkonem, který reprezentuje všechny složky okamžitého výkonů, které se nepodílí na činném výkonu. Tato koncepce je pro praktické použití výrazně jednodušší. U trojfázového systému získáme celkový činný výkon jako součet činných výkonů v jednotlivých fázích, viz vztah 2.27. K určení celkového zdánlivého výkonu jsou různé řešení, k praktickým účelům se však opět používá algebraický součet zdánlivých výkonů v jednotlivých fázích, viz vztah 2.29.

3 Účinník

Účinník slouží ke kvantitativnímu vyjádření míry využití dodávaného napětí a odebíraného proudu pro přenos činného výkonu. Jinými slovy udává, jak velkou část zdánlivého výkonu lze přeměnit na užitečnou energii – činný výkon. Účinník je dán poměrem činného a zdánlivého výkonu, nabývá hodnot v rozsahu $0 \leq \lambda \leq 1$. Jedná se o bezrozměrnou veličinu.

$$\lambda = \frac{P}{S} \quad 3.1$$

- $\lambda = 0$: celý přenesený výkon je jalový a zátěž je čistě induktivního, nebo jalového charakteru (fázový posun $\varphi = \pm\pi/2$)
- $0 < \lambda < 1$: určitá část zdánlivého výkonu je přeměněna na činný výkon. Zátěž je kombinací RL, nebo RC (fázový posun $-\pi/2 < \varphi < \pi/2$)
- $\lambda = 1$: celý přenesený výkon je činný a zátěž je čistě odporového charakteru (fázový posun $\varphi = 0$)

Podíváme-li se na Obrázek 3, je zřejmé že platí vztah

$$\lambda = \frac{P}{S} = \cos \varphi. \quad 3.2$$

Účinník je všeobecně znám a používán pod názvem $\cos \varphi$. Toto označení je samozřejmě oprávněné, ovšem pouze při harmonických podmínkách, kde lze úhel φ jednoznačně definovat. Při harmonickém průběhu napětí a proudu je totiž shodou náhod poměr činného a zdánlivému výkonu roven $\cos \varphi$, viz 3.2. V českém znění normy [1] je účinník za harmonických ($\cos \varphi$) i obecných periodických podmínek (λ) nazýván stejně. Ovšem v původním anglickém a francouzském znění citované normy [1] dochází nově k rozlišení účinníků za různých podmínek, $\cos \varphi$ (active factor) a λ (power factor). Dříve byl souhrnně používán název power factor (PF). Z výše uvedeného je zřejmé, že při obecných periodických podmínkách mají $\cos \varphi$ a λ odlišný význam.[2] Přičemž platí že $\lambda \leq \cos \varphi$, dle charakteru průběhu napětí a proudu. Jak jsme uvedli dříve, tento charakter ovlivní velikost zdánlivého výkonu S , který je jmenovatelem zlomku.

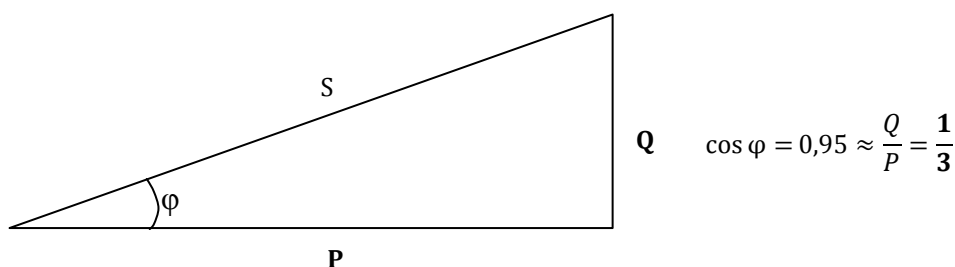
Řada zařízení provozovaných v elektrické síti spotřebovává mimo činného výkonu i výkon jalový, který z fyzikálního hlediska potřebují pro svou činnost. Mezi takové zařízení patří např. motory, transformátory, zařízení obsahující induktory a kapacitory atd. Podíváme-li se na spotřební elektroniku, zjistíme, že se jedná především o nelineární zařízení, která odebírají ze sítě neharmonický (deformovaný) proud a tak i jalový a deformační výkon. Je to dáno tím, že elektronika má na vstupu usměrňovač a kondenzátor. Mezi tyto spotřebiče patří zařízení s elektronickými předřadnými obvody jako informační technika, televizory, úsporné zdroje světla, bodové osvětlení atd. Důsledkem odběru elektrické energie se špatným účinníkem je vedle přenosu potřebného činného výkonu i výkon jalový a případně deformační. Elektrizace sítí tak navíc protékají další složky proudu, které nejsou pro transport činné energie důležité. Výsledkem je vyšší zatížení celé elektrizační soustavy a snížení využití rozvodných zařízení pro přenos činného výkonu. Zvýší se tak pořizovací náklady na jednotlivé prvky soustavy (vedení, transformátory, vybavení rozveden apod.) z důvodu dimenzování na vyšší proudy, nežli je proud činný. Mezi další nežádoucí důsledky patří zvýšení tepelných ztrát a úbytků napětí na vedení.

3.1 Účinník - požadavky

Účinník podává informaci o efektivnosti využití soustavy. Existují normy a především smluvní vztahy, které mezi odběratelem a dodavatelem elektrické energie stanovují hodnoty účinníku, mimo jiné, které odběratelé a dodavatelé musí dodržovat. V této části kapitoly se podíváme na současný přístup monitorování účinníku v elektrizační soustavě. Dále uvedeme požadavky na hodnoty účinníku, s kterými jsou odběry elektrické energie uskutečňovány. Jelikož elektrická síť je definována harmonickými průběhy proudu a napětí, účinník vyjádřen klasickým známým " $\cos \varphi$ ". Z tohoto důvodu jsou meze pro účinník stanoveny jako " $\cos \varphi$ " [5]. V případě, že síť obsahuje vyšší harmonické, znamená úhel φ fázový posun mezi základní harmonickou složkou napětí a základní harmonickou složkou proudu.

Dodávky elektrické energie v elektrizační soustavě jsou standardně uskutečňovány s hodnotou induktivního účinníku 0,95 – 1, pokud se odběratel a distributor nedohodnou jinak. Účinník je vyhodnocován v každém místě, kde je uskutečňován odběr z distribuční sítě na napěťových hladinách VN a VVN. V sítích NN doposud není účinník vyhodnocován. [5], [6]

Odběr elektrické energie se špatným účíníkem snižuje efektivitu přenosu a distribuce elektrické energie a také zvyšuje ztráty v elektrizační soustavě. Z tohoto důvodu jsou odběratele odebírající energii z napěťových hladin VN a VVN nuceni dodržovat tzv. neutrální pásmo účíníku. Toto pásmo je vymezeno hodnotou 0,95 – 1 induktivního charakteru. Povinnost dodržení neutrálního pásma je vymáhána pomocí finančního nástroje, který spravuje Energetický regulační úřad v cenovém rozhodnutí [5], kterým se stanovují regulované ceny související s dodávkou elektřiny v sítích o hladinách VN a VVN. V cenovém rozhodnutí pro sítě NN tato problematika není specifikována a účíník není vyhodnocován. V sítích NN je uvažováno, že odběr elektrické energie je uskutečňován s hodnotou účíníku v rozmezí 0,95 – 1 induktivního charakteru. Hodnota účíníku $\cos \varphi = 0,95$ odpovídá odběru činného a jalového výkonu v poměru 1:3. Grafické znázornění je zobrazeno na Obrázek 15.



Obrázek 15: Grafické znázornění $\cos \varphi = 0,95$

Pro účel výpočtu účíníku $\cos \varphi$ se měří odběr činné a jalové energie ve shodných časových úsecích. Z naměřených hodnot jalové energie v *kvarh* a činné energie v *kWh* za vyhodnocované období se vypočte

$$\tan \varphi = \frac{\textit{kvarh}}{\textit{kWh}} \quad 3.3$$

A dále $\cos \varphi$ odpovídající tomuto poměru. Pokud se hodnota $\cos \varphi$ pohybuje v neutrálním pásmu $0,95 \leq \cos \varphi \leq 1$ neplatí zákazník žádnou přírážku. Pokud je vypočtený účíník nižší než 0,95 platí zákazník provozovateli distribuční sítě přírážku za odběr elektrické energie stanovené dle Tabulka 1. Tabulka je rozdělena v šesti pásmech účíníku, pro které jsou stanoveny jednotlivé procentní přírážky za odběr energie. Detailní postup stanovení hodnoty přírážky je uveden v literatuře [5].

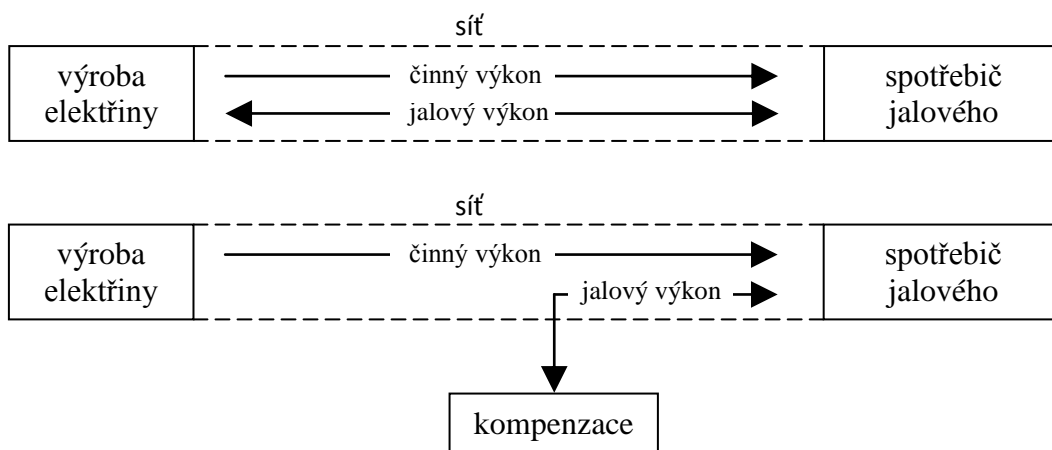
Závěrem upozorníme, že účinník by neměl být kapacitního charakteru. Jelikož kapacitní výkon snižuje stabilitu sítě a je tak náročnější ji řídit. Např. odběr s hodnotou účinníku $\cos \varphi = 0,99$ kapacitní charakteru už je nežádoucí.

Pásma účinníku	Procentní přírážka za nedodržení účinníku				
	tg φ min	tg φ max	cos φ min	cos φ max	Přirážka
	(-)	(-)	(-)	(-)	(%)
1	0,000	0,328	0,95	1,000	0,00
2	0,329	0,484	0,90	0,949	2,85
3	0,485	0,750	0,80	0,899	12,38
4	0,751	1,020	0,70	0,799	28,07
5	1,021	1,333	0,60	0,699	48,58
6	1,334	a více	0,00	0,599	100,00

Tabulka 1: Procentní přírážka za nedodržení účinníku

3.2 Kompenzace

Kompenzací je myšlena dodatečná úprava spotřeby elektrické energie tak, abychom docílili odběru s hodnotou účinníku blízké jedné, nejlépe rovné. Poté bude energie přenášena efektivně, bez navýšených ztrát a většina zdánlivého výkonu bude přeměněna na činný výkon. Cílem tedy je upravit charakter spotřebiče tak, aby se choval co nejpodobněji jako odporová zátěž. Taková zátěž odebírá ze sítě proud stejného tvaru jako je napájecí napětí a s nulovým fázovým posunem φ . Tento ideální průběh zobrazuje Obrázek 4. Takovéto řešení omezí přenášený jalový výkon v soustavě a zároveň zařídí, aby odebíraný proud neobsahoval vyšší harmonické. Tím se omezí i deformační výkon, který je další nežádoucí složkou celkového přenášeného výkonu. U spotřebičů vyšších výkonů jako jsou např. motory, slouží ke kompenzaci samostatné zařízení, které může kompenzovat i více spotřebičů najednou. U malých spotřebičů by dodatečné zařízení pro kompenzaci bylo neefektivní, proto by toto zařízení mělo být již integrováno v návrhu elektronických předřadných obvodů, tzv. PFC (Power Factor Correction). Tato skutečnost je dána i normou [7], která stanovuje meze harmonických složek odebíraného proudu spotřebiči s vstupním proudem do 16 A a další různé předpisy.



Obrázek 17: kompenzace účíníku

4 Měření elektrické energie

S elektrickou energií se nakládá jako se zbožím, které je distributorem poskytováno koncovému uživateli, případně odebíráno od výrobce. Aby mohlo být množství spotřebované, případně vyrobené elektrické energie vyúčtováno, je nutné předanou energii vhodně měřit. K tomuto účelu slouží elektroměry¹, které měří množství předané elektrické energie, činnou energii v *kWh* a případně jalovou energii v *kvarh*.

4.1 Rozdělení měření a odběratelů

Měření elektřiny může být provedeno různými metodami s odlišnými požadavky, které plynou především z charakteru odběratele. Z tohoto důvodu se měření i odběratelé dělí do různých skupin.

Měření elektřiny může být provedeno přímo nebo nepřímo. U přímé metody měření je elektroměr připojen přímo k elektrické síti a prochází jím veškerá energie. U nepřímé metody měření je elektroměr připojen k elektrické síti přes jeden nebo více přístrojových transformátorů. Nepřímé měření je vhodné tam, kde měříme velké proudy a napětí, které nelze elektroměrem měřit přímo. Elektroměrem tak prochází nižší proudy, případně napětí, a celková energie se poté přepočítá na skutečnou hodnotu

Typy měření² definuje vyhláška číslo 82/2011 Sb. o měření elektřiny [8], kterou se stanoví podrobnosti měření elektřiny a předávání technických údajů. K měření množství elektrické energie se používají měření typu:

- měření typu A, kterým je průběhové měření s dálkovým denním přenosem údajů, a průběžný záznam střední hodnoty výkonu za měřicí interval provádí přímo měřicí zařízení, nebo
- měření typu B, kterým je průběhové měření s dálkovým jiným než denním přenosem údajů, a průběžný záznam střední hodnoty výkonu za měřicí interval provádí přímo měřicí zařízení, pokud není možné uskutečnit dálkový přenos údajů z technických důvodů, je možné přenos údajů provést jiným způsobem, nebo

¹ Přístroj určený k měření energie integrováním výkonu (činného, jalového) za daný čas. [9]

² Měření elektřiny je instalace, provozování, obsluha, kontrola a údržba měřicích zařízení včetně zařízení

² Měření elektřiny je instalace, provozování, obsluha, kontrola a údržba měřicích zařízení včetně zařízení hromadného dálkového ovládání, odečítání, zpracovávání, přenos a uchovávání údajů měření. [8]

- měření typu C, kterým jsou ostatní měření. [8]

Nově vznikl také typ S používaný ve specifických případech. U měření typu A a B je základní měřicí interval patnáct minut. Vyhodnocení měření probíhá po jedné hodině. Výsledné zpracování a přenos naměřených dat probíhá u měření typu A po jednom kalendářním dni. U měření typu B je tento interval jeden měsíc. U měření typu C je zpracování a přenos údajů prováděn nejméně jednou za rok.

Pro úplnost je nutné definovat typy odběratelů. Odběratel je fyzická či právnická osoba odebírající elektrickou energii. Odběratelé jsou členěni do čtyř kategorií.

- Kategorie A: velkoodběratelé, kteří odebírají energii z distribuční sítě o napětí mezi fázemi vyšším než 52 kV.
- Kategorie B: velkoodběratelé, kteří odebírají energii z distribuční sítě o napětí mezi fázemi od 1 kV do 52 kV.
- Kategorie C: je ten, který odebírá energii z distribuční soustavy s napětím mezi fázemi do 1 kV a jehož odběr neslouží k účelům uvedených v kategorii D.
- Kategorie D: je ten, který odebírá energii z distribuční soustavy s napětím mezi fázemi do 1 kV a jeho odběr slouží pouze k uspokojování jeho osobních potřeb a potřeb ostatních příslušníků domácnosti.

V sítích NN jsou zapojeni odběratelé typu C a D, přičemž do kategorie C spadají podnikatelé a do kategorie D domácnosti a případně odběry ve společných bytových prostorech, kde nedochází k podnikatelské činnosti. Hromadně můžeme kategorie C a D nazývat maloodběrateli odebírající elektrickou energii z distribuční sítě na hladině napětí do 1 kV.

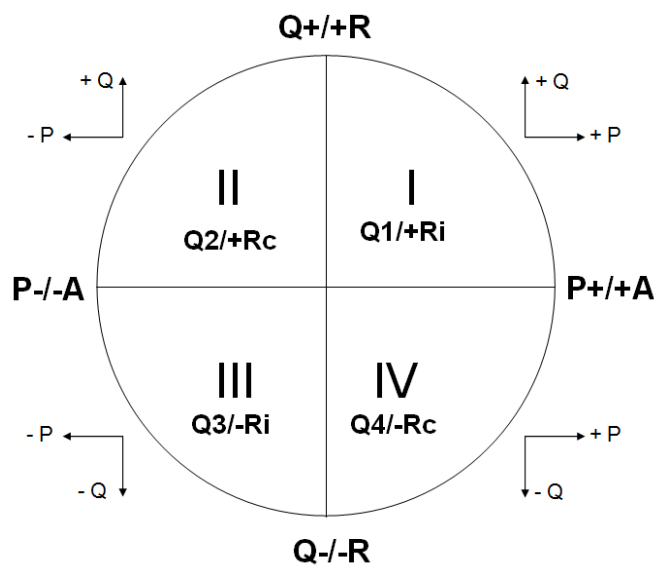
4.2 Elektroměry

Elektroměr je zařízení určené ke stanovení množství spotřebované nebo vyrobené elektrické energie. Na základě naměřených dat z elektroměrů je energie vyúčtována mezi odběratelem a distributorem, případně výrobcem a distributorem. Elektroměry lze dělit dle mnoha hledisek. Dle konstrukce dělíme elektroměry na elektromechanické³ (indukční)

³ Elektroměr, ve kterém proudy v pevných cívkách vzájemně působí s proudy indukovanými ve vodivém pohyblivém rotoru (rotorech), což způsobuje jeho (jejich) pohyb úměrný měřené energii. [9]

a statické⁴. V současné době jsou indukční elektroměry nahrazovány statickými, pro svou přesnost, stabilitu a multifunkčnost měřicích zařízení. Dále elektroměry můžeme rozlišit dle počtu sledovaných fází, kde mohou měřit v jedné nebo ve třech fázích. Dalším členěním je dle kvadrantů, do kterých je elektroměr schopen přiřadit energii. Obrázek 18 graficky znázorňuje energie, které mohou elektroměry měřit.

- činný výkon – odběr
- činný výkon – dodávka
- jalový výkon Q1 – induktivní odběr
- jalový výkon Q2 – kapacitní dodávka
- jalový výkon Q3 – induktivní dodávka
- jalový výkon Q4 – kapacitní odběr



Obrázek 18: 4 kvadranty energií měřené elektroměry

Dále můžeme elektroměry dělit dle funkcí a veličin, které měří a dalších hledisek.

Základní veličiny měřené elektroměrem jsou efektivní hodnota napětí, efektivní hodnota proudu, činný, jalový a zdánlivý výkon. V elektrotechnice se hodnoty napětí a proudů udávají běžně v efektivních hodnotách, označují velkými písmeny bez indexu (U , I). Efektivní hodnota U (I) je hodnota napětí (proudu) která odevzdá na ohmické zátěži takový

⁴ Elektroměr, v němž proud a napětí působí na pevné statické (elektronické) prvky tak, že vytváří výstupní signál úměrný měřené energii. [9]

výkon jako stejně velké stejnosměrné napětí (proud). Pro měřené efektivní napětí a proud platí:

$$U = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{m=1}^N i_m^2} \quad 4.1$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{m=1}^N u_m^2} \quad 4.2$$

kde U, I je efektivní hodnota napětí, proudů,
 u_m, i_m je okamžitá hodnota napětí, proudu v čase mT_{vz} ,
 T_{vz} je perioda vzorkování časového průběhu u, i ,
 N je počet vzorků u_m, i_m v řadě.

Činný výkon představuje střední hodnotu okamžitého výkonu, který získáme vynásobením okamžitých hodnot napětí a proudů.

$$P = \frac{1}{N} \cdot \sum_{m=1}^N u_m \cdot i_m \quad 4.3$$

Integrací činného výkonu v čase získáme činnou energii v kW. Měření jalového výkonu je v praxi často omezeno na jalový výkon základní harmonické napětí a proudu.

$$Q_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 \quad 4.4$$

kde U_1, I_1 je efektivní hodnota základní harmonické napětí, proudů,
 φ_1 je fázový posun mezi základními harmonickými napětí a proudu.

Zdánlivý výkon získáme vynásobením efektivních hodnot napětí a proudu.

$$S = U \cdot I \quad 4.5$$

Jak jsme již konstatovali, vyšší harmonické napětí a proudu způsobují, že výpočty výkonu jsou odlišné od situace s čistě harmonickými průběhy. Na řešení těchto podmínek existují různé metody a výrobci elektroměrů k řešení přistupují individuálně. Přesnost elektroměrů měřící jalovou energii je deklarována pouze pro první harmonickou.

5 Měření účinníku v distribuční síti NN

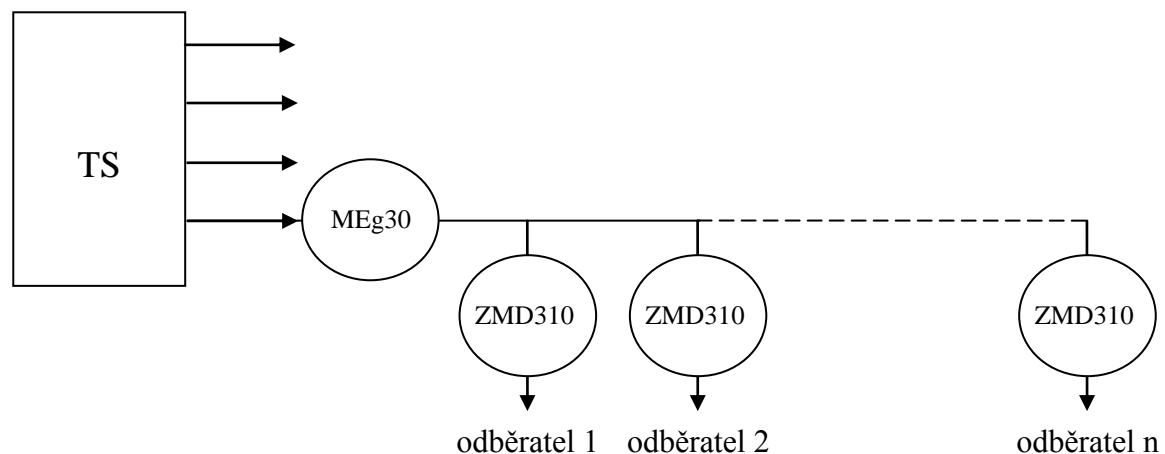
Měření si klade za cíl získat obecný přehled o hodnotách účinníků, s kterými se uskutečňují odběry elektrické energie v sítích NN, kde účinník doposud nepatří mezi sledované parametry. Účinník je jedním z parametrů, který podává informaci o tom jak efektivně je soustava využívána. Důvodem zkoumání tohoto parametru je fakt, že charakter elektrických spotřebičů se dynamicky mění a tím i charakter odběrů energie. Ovšem náhled na hodnoty účinníku je neměnný. V současné době se uvažuje, že spotřebitelé elektrické energie v sítích NN odebírají energii s hodnotou účinníku v rozmezí 0.95 – 1 induktivního charakteru.

Měření bylo uskutečněno v distribuční síti NN provozovatele PREdistribuce. V měřených lokalitách se nachází maloodběratelé typu C a D různého charakteru čímž je dosaženo obecného náhledu na danou problematiku.

Cílem této práce je ověřit současný stav účinníku, který bude možné porovnat se stávajícím předpokladem. Práce má především informativní charakter o stávajícím stavu distribučních sítí NN, založený na vyhodnocení reálného měření.

5.1 Postup měření

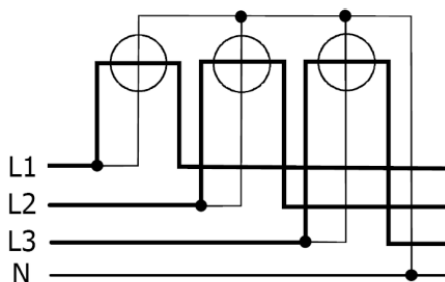
Měření se uskutečnilo po dobu 30 dnů pomocí elektroměrů ZMD310 firmy Landys+Gyr a PQ monitory MEg30 firmy MEGA. Data z elektroměru pokrývají celé sledované období. PQ monitory sledovaly lokality v pěti dnech. K získání dat tak byly použity elektroměry ve vybraných lokalitách a dále PQ monitory osazeny na příslušné vývody trafostanic (TS). Tímto je dosaženo komplexního náhledu na stav dané části napájecí sítě. Grafické zobrazení topologie měření je zobrazena na Obrázek 19.



Obrázek 19: Topologie zapojení měření v distribuční síti - obecně

ZMD310

ZMD310 je statický elektroměr určen k měření trojfázových čtyřvodičových sítí nízkého napětí v přímém zapojení. Elektroměr je schopen měřit energie (+A, +Ri, -Rc, -A, -Ri, +Rc), jedná se o čtyřkvadrantní elektroměr. Elektroměr vyhovuje průběhovému měření typu B. Střední hodnoty výkonů byly zaznamenávány průběžně za dobu měřicího intervalu



Obrázek 20: Vstup napětí a proudů do elektroměru

15 minut. Zaznamenávané výkony jsou: činný výkon, jalový výkon induktivní a jalový výkon kapacitní zaokrouhleny na jednotky *kWh*, *kvarh*. Zaokrouhlení je dáno skutečností, že elektroměry určené pro měření typu B běžně měří vyšší odběry. Elektroměry měřily výkony v jednotlivých fázích a mikroprocesor vypočte celkový výkon trojfázové soustavy. Princip snímání proudů a napětí elektroměrem znázorňuje Obrázek 20.

- Základní technické údaje

Jmenovité napětí U_{jm} :	3 x 230/380 V - 240/415 V
Napětový rozsah:	80 – 115 % U_{jm}
Jmenovitý proud I_{jm} :	5, 10, 20, 40 A
Minimální proud I_{min} :	0,25; 0,5; 0,75; 1,0 A
Maximální proud I_{max} :	120 A
Přechodový proud I_{tr}^5 :	0,5; 1; 1,5; 2,0 A
Přesnost měření činné energie:	třída B (tř. 1)
Přesnost měření jalové energie:	třída 1
Náběhový proud:	0,3 % I_n

⁵ Přechodový proud I_{tr} : hodnota proudu, od níž až do I_{max} platí v plném rozsahu požadavky předpisu [9] na přesnost.

MEg30

MEg30 je přenosný PQ monitor určený k měření všech parametrů kvality napětí v trojfázových sítích NN. Monitor slouží k měření až čtyř napětí a čtyř proudů, činných i jalových výkonů a energií. Ze zaznamenaných průměrných hodnot napětí, proudů a výkonů počítá PQ monitor ve vyšším SW skutečné hodnoty účinníku λ . Naměřené hodnoty jsou analyzovány v souladu s normou ČSN EN 61000-4-30. Měření okamžitých hodnot napětí a proudů probíhá se vzorkovacím kmitočtem 5120 Hz. Efektivní hodnoty napětí a proudů jsou poté uvedeny v intervalech po deseti síťových periodách (200ms při 50 Hz) a jsou vypočteny z 1024 okamžitých hodnot. Proudů byly snímány pomocí snímacích sond AMOS M

- Měřené napětí U1, U2, U3, U4

U_{jm} fáz. napětí U1, U2, U3, U4:	230 V
Rozsah měření fázových napětí:	0 až 440 V _{ef}
Max. dovolené fázové napětí:	450 V _{ef}
Přesnost měřených napětí:	$\pm 0,1$ % z údaje a $\pm 0,1$ % U_{jm} při $0,8 U_{jm}$ až $1,2 U_{jm}$ $\pm 0,2$ % z údaje $\pm 0,2$ % U_{jm} mimo $0,8 U_{jm}$ až $1,2 U_{jm}$
Rozlišovací schopnost:	0,1 % U_{jm} nebo lepší

- Měření proudů I1, I2, I3, I4

Přesnost měření proudů:	$\pm 0,2$ % z údaje a $\pm 0,2$ % I_{jm} při $0,1 I_{jm}$ až $1,2 I_{jm}$ $\pm 0,5$ % z údaje při $1,2 I_{jm}$ až $2 I_{jm}$
Rozlišovací schopnost:	0,1 % I_{jm} nebo lepší
Proudová přetížitelnost:	5 x I_{jm} po dobu 1 s

- Měřicí řetězec AMOS M

I_{jm} při činiteli tvaru $K=1,11$:	30, 100, 300, 1000 A
Měřicí rozsah:	0 až 2 I_{jm}
Přesnost měření proudu:	1,0 % I_{jm}
Linearita měření proudu:	lepší než 0,5 % I_{jm}

5.2 Charakter měřené oblasti

Měření bylo provedeno v oblastech s různým charakterem odběru, tak aby bylo dosaženo obecného náhledu na problematiku. V oblastech se nachází především maloodběratelé

kategorie C a D. Sítě provozovatele PREDistribuce jsou charakteristické kabelovým rozvodem energie. Obecně můžeme popsat jednotlivé oblasti následovně.

- Napájená z TS 1.1 a TS 1.2: Tyto vývody TS napájí především odběratele kategorie C se středně velkým odběrem energie s troufavým připojením s jističi 21 A až 100 A. V této lokalitě se nachází i jeden odběratel s velkou spotřebou energie a jističem 300 A.
- Napájená u z TS 2: Tento vývod TS napájí několik řadových domů, kde se nachází odběratelé kategorie D
- Napájená z TS 3.1 a TS 3.2: Tyto vývody TS napájí rodinné domy s trojfázovou přípojkou a jističi 25 A. Jedná se o odběratele kategorie D.
- Napájená z TS 4.1 a TS 4.2: Vývod TS 4.1 napájí hustě obydlenou městskou čtvrť, kde se nachází odběratelé kategorie D s jednofázovou přípojkou a jističi 25A. Vývod TS 4.2 napájí odběratele kategorie C připojené třífázově s hodnotou jističů 16 A až 63 A.

Naměřená data z elektroměrů nejsou přiřazena k jednotlivým vývodům a jednotlivý odběratelé nejsou přesně specifikováni. Měření vývodu, tak posloužilo jako další možnost analýzy současného účinníku v síti. Vývody TS 4.1 a 4.2 v době prováděné analýzy nemohly být osazeny PQ metry. Z tohoto důvodu, pro tuto oblast byla vyhodnocena pouze data z elektroměrů.

5.3 Analýza dat

Analýza dat byla provedena pomocí softwaru Microsoft Excel a Wolfram Mathematica. Data byla dále tříděna a odběrná místa s velmi malou spotřebou energie byla vyřazena z analýzy z důvodu zamezení zkreslení získaných dat. Pro hodnocení byla stanovena hranice s hodnotou odběru více jak 80 kWh za měsíc, tedy okolo 1000 kWh ročně. Tomuto kritériu z celkových 41 odběrných míst nevyhovovalo 7 odběratelů.

V teoretické části práce jsme vysvětlili význam účinníku a jeho výpočet. Abychom ho mohli hodnotit, musíme si stanovit určité meze, dle kterých jej posuzujeme. K tomuto účelu použijeme meze, které stanovuje literatura [5], viz Tabulka 1 a vztáhneme je pro potřeby této práce i k sítím NN. Tabulka rozděluje hodnoty účinníku do 6 pásem. Současný předpoklad uvažuje, že hodnoty se budou pohybovat v rozmezí 0,95 – 1 induktivního

charakteru, čímž stanovíme neutrální pásmo účinníku. Zvláště vyhodnotíme data nasbíraná z elektroměrů, které jsou vyhodnocována v šestihodinových intervalech za celé sledované období. Další částí je analýza dat z PQ monitorů, která jsou vyhodnocena v desetiminutových intervalech, šestihodinových intervalech a za celé naměřené období.

Výpočet účinníku z dat získaných elektroměry byl proveden dle postupu uvedeného v cenovém rozhodnutí Energetického regulačního úřadu [5]. Z naměřených hodnot odebrané činné a jalové energie ve shodných časových úsecích vypočteme

$$\tan \varphi = \frac{kvar \cdot h}{kWh} \quad 5.1$$

a tomuto poměru odpovídající $\cos \varphi$.

Výpočet účinníku v jednotlivých fázích z PQ monitorů byl proveden automaticky přístrojem průběžně v desetiminutových intervalech. Pro možnost srovnání s daty z elektroměrů byly hodnoty přepočteny také v šestihodinových intervalech a celkový účinník za sledované období.

5.3.1 Analýza odběrných míst

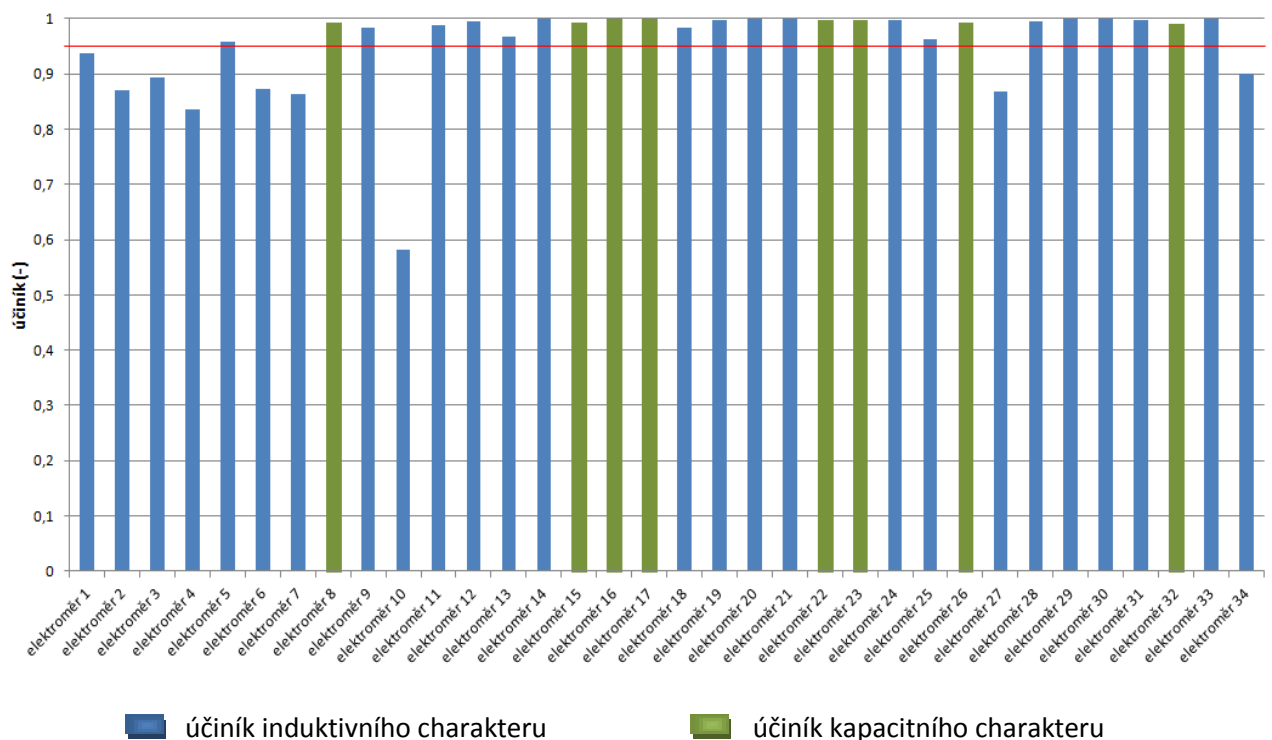
Přehled jednotlivých odběrných míst s celkovou hodnotou odebrané energie a jejich celkový účinník za sledované období je zobrazen v Tabulka 2. Hodnoty bez znaménka

Elektroměr	Wč (kW.h)	W_kap (kvar.h)	W_ind (kvar.h)	cos Fi (-)
elektroměr 1	2040,50	7,25	761,00	0,938
elektroměr 2	162,50	9,75	101,75	0,870
elektroměr 3	231,75	4,25	120,25	0,894
elektroměr 4	430,25	1,50	284,00	0,836
elektroměr 5	253,50	0,00	77,00	0,957
elektroměr 6	7032,25	0,75	3928,75	0,873
elektroměr 7	5992,75	6,75	3505,50	0,864
elektroměr 8	121,25	17,00	3,25	-0,994
elektroměr 9	652,50	30,00	150,50	0,983
elektroměr 10	591,75	0,00	828,50	0,581
elektroměr 11	1345,75	1,25	201,75	0,989
elektroměr 12	524,00	54,50	105,25	0,995
elektroměr 13	193,25	5,75	55,75	0,968
elektroměr 14	3323,50	331,25	410,50	1,000
elektroměr 15	361,50	48,00	7,25	-0,994
elektroměr 16	95,75	12,75	8,75	-0,999
elektroměr 17	176,75	11,25	5,00	-0,999
elektroměr 18	313,00	5,75	65,25	0,982
elektroměr 19	145,25	6,50	15,75	0,998
elektroměr 20	132,75	7,75	15,00	0,999
elektroměr 21	423,50	20,25	36,25	0,999
elektroměr 22	81,75	10,00	5,25	-0,998
elektroměr 23	91,25	9,75	3,25	-0,997
elektroměr 24	265,00	3,50	19,00	0,998
elektroměr 25	129,00	33,75	70,50	0,962
elektroměr 26	82,00	12,25	1,50	-0,992
elektroměr 27	2824,00	0,25	1611,00	0,869
elektroměr 28	148,25	9,25	23,00	0,996
elektroměr 29	1022,50	32,25	45,75	1,000
elektroměr 30	797,75	30,25	48,75	1,000
elektroměr 31	385,75	22,75	54,50	0,997
elektroměr 32	386,75	74,25	18,75	-0,990
elektroměr 33	1128,50	24,00	79,50	0,999
elektroměr 34	1213,50	12,50	603,00	0,899

Tabulka 2: Seznam odběrných míst

symbolizují induktivní charakter a hodnoty se znaménkem “-“ kapacitní charakter. Lépe je tabulka 2 zobrazena v příloze 1.

Celkový přehled o stavu účinníku poskytuje Graf 1, kde jsou pro jednotlivé elektroměry ve sloupcích vyneseny hodnoty účinníku za celé sledované období. Sloupce s modrou barvou znázorňují účinník induktivního charakteru, zelená barva naopak symbolizuje kapacitní charakter. Podrobnější vykreslení účinníku v odběrných místech s uvedením minimálních a maximálních hodnot vyhodnocených v šestihodinových intervalech je zobrazeno v příloze 3.

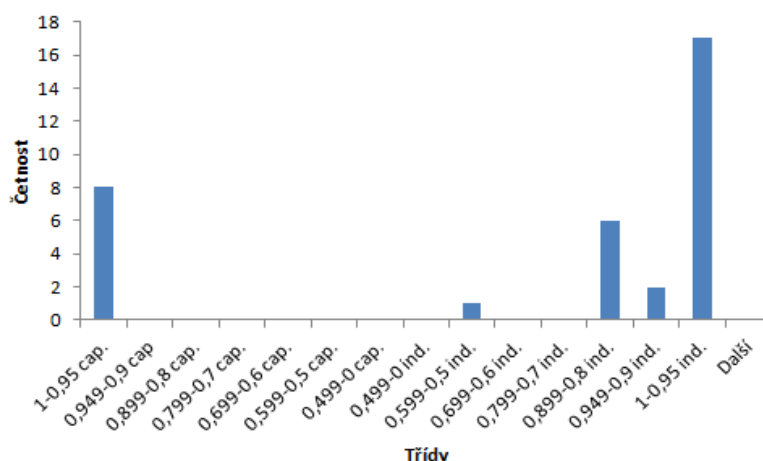


Graf 1: Přehled účinníků všech odběrných míst

Z grafu je patrné, že účinník jednotlivých odběrných míst je variabilní. Použijeme-li pro hodnocení účinníku stanovené meze zjistíme, že 50 % odběratelů je v tzv. neutrálním pásmu 0,95–1 induktivního charakteru, který je předpokládán u odběrů v sítích NN. Dále pak mnoho odběratelů vykazuje kapacitní charakter v pásmu 0,95–1. Třetí nejpočetnější skupinou jsou odběratelé v pásmu 0,899 – 0,8 induktivního charakteru.

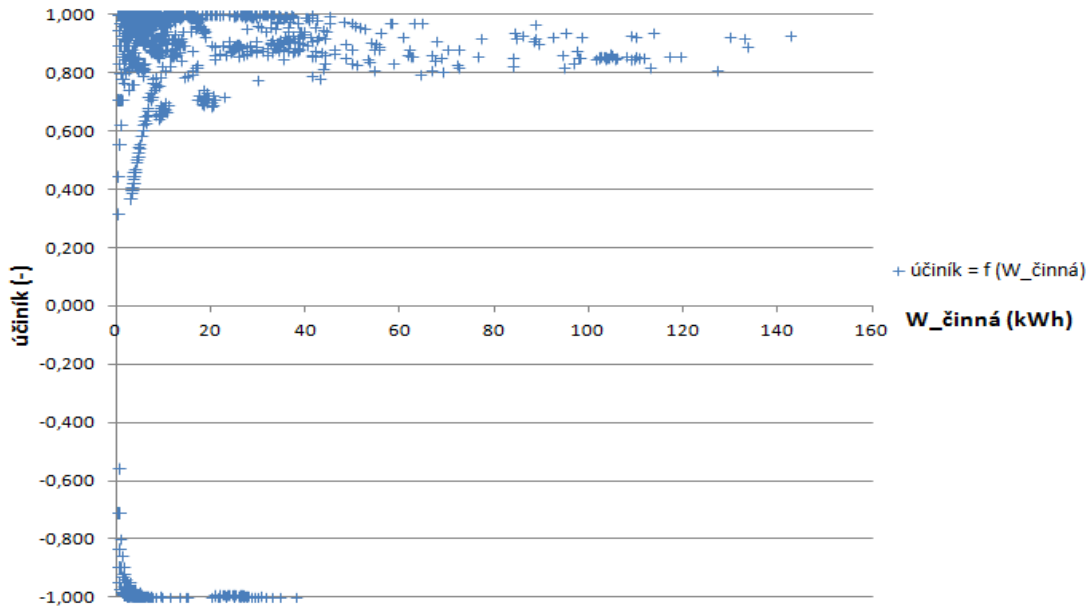
Přehledné zobrazení vidíme na Graf 2, kde sloupce znázorňují počet odběratelů v příslušném rozsahu účinníku.

Třidy	Četnost	Četnost %
1-0,95 cap.	8	24
0,949-0,9 cap	0	0
0,899-0,8 cap.	0	0
0,799-0,7 cap.	0	0
0,699-0,6 cap.	0	0
0,599-0,5 cap.	0	0
0,499-0 cap.	0	0
0,499-0 ind.	0	0
0,599-0,5 ind.	1	3
0,699-0,6 ind.	0	0
0,799-0,7 ind.	0	0
0,899-0,8 ind.	6	18
0,949-0,9 ind.	2	6
1-0,95 ind.	17	50
Další	0	0
	34	100

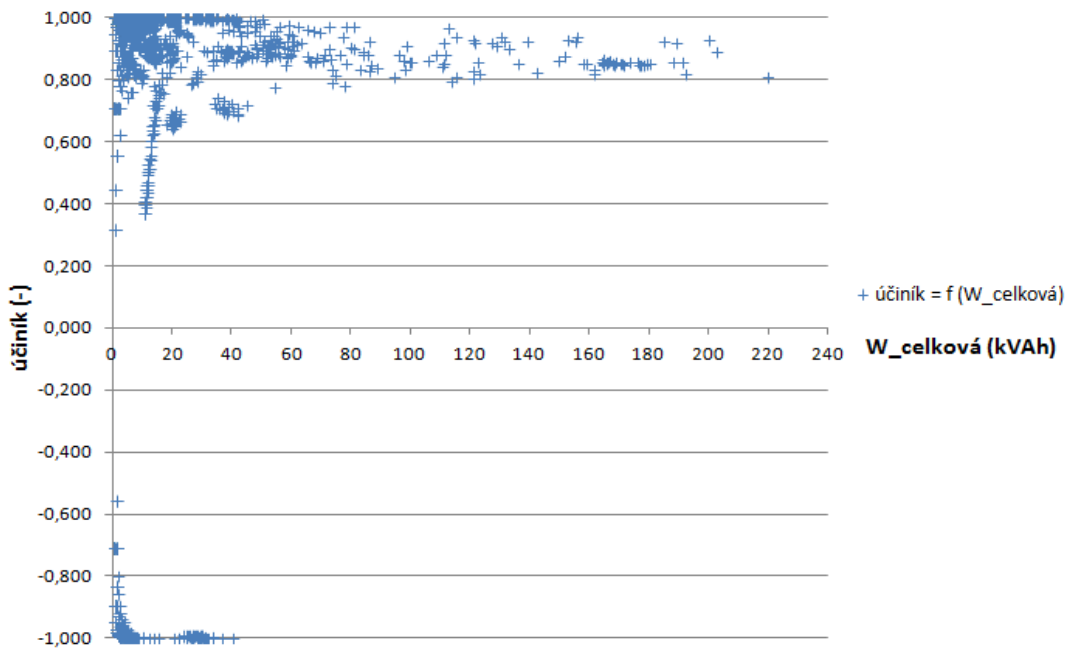


Graf 2: Histogram - přehled účinníků - elektroměry

Z výše uvedených grafů vyplývá, že obecný předpoklad na odběr energie v sítích NN s účinníkem v rozmezí 0,95–1 již není zcela platný. Při detailní analýze elektroměrů, byl vyhodnocován účinník za šestihodinovou dobu odběru elektrické energie. V této analýze se výjimečně vyskytují i velmi malé hodnoty účinníku okolo 0,4. V tomto případě není zcela cílem práce identifikovat příčinu, spíše tyto hodnoty vedou k myšlence, jaké odběry se v síti NN mohou odehrávat a k možnosti dalšího zkoumání. Tyto hodnoty mohou samozřejmě být zatíženy chybou měření. Dále existuje riziko snížení přesnosti měření, je-li v daném časovém okamžiku nízký odběr energie. Tuto teorii potvrzuje Graf 3 a Graf 4. Vyneseme-li závislost účinníku jako funkci činné energie $W_{\text{činná}}$ a celkově přenesené energie $W_{\text{celková}}$ zjistíme, že určitých nízkých hodnot účinníku bylo dosaženo v době intervalu s nižším přenosem energie.



Graf 3: Závislost velikosti činné energie na přesnost výpočtu účinníku

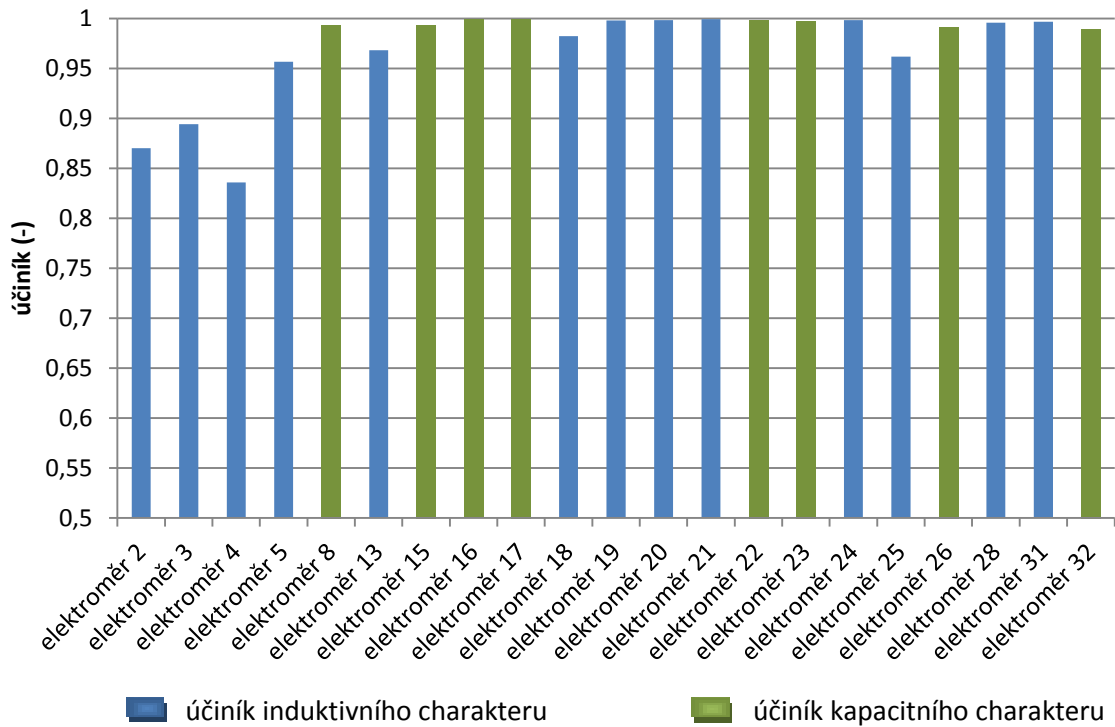


Graf 4: Závislost velikosti celkové energie na přesnost výpočtu účinníku

Graf 3 a Graf 4 dokazuje, že přesnost analýzy je závislá na velikosti přenášené energie. Z tohoto důvodu vyhodnocení rozdělíme na odběrná místa s odběrem činné energie menší než 500 kWh a s odběrem nad 500 kWh. Rozdělení odběrných míst zobrazuje Tabulka 2, kde světle modrou barvou jsou podbarveny odběrná místa s odběrem vyšším než 500 kWh.

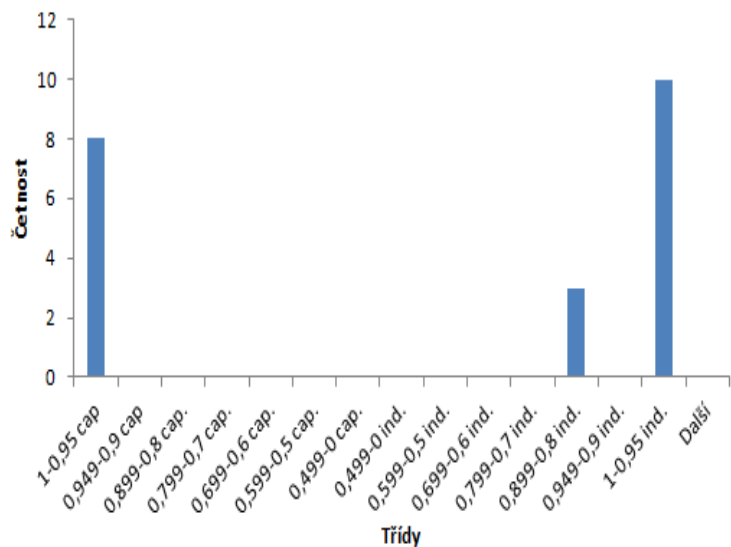
Odběrná místa se spotřebou do 500 kWh

Nyní se podíváme na odběrná místa s odběrem energie do 500 kWh za sledované období. Přehled průměrných hodnot účinníku opět vykreslíme pomocí sloupcového Graf 5.



Graf 5: Přehled účinníku odběrných míst s odběrem < 500 kWh

Třídy	Četnost	Četnost %
1-0,95 cap	8	38
0,949-0,9 cap	0	0
0,899-0,8 cap.	0	0
0,799-0,7 cap.	0	0
0,699-0,6 cap.	0	0
0,599-0,5 cap.	0	0
0,499-0 cap.	0	0
0,499-0 ind.	0	0
0,599-0,5 ind.	0	0
0,699-0,6 ind.	0	0
0,799-0,7 ind.	0	0
0,899-0,8 ind.	3	14
0,949-0,9 ind.	0	0
1-0,95 ind.	10	48
Další	0	0

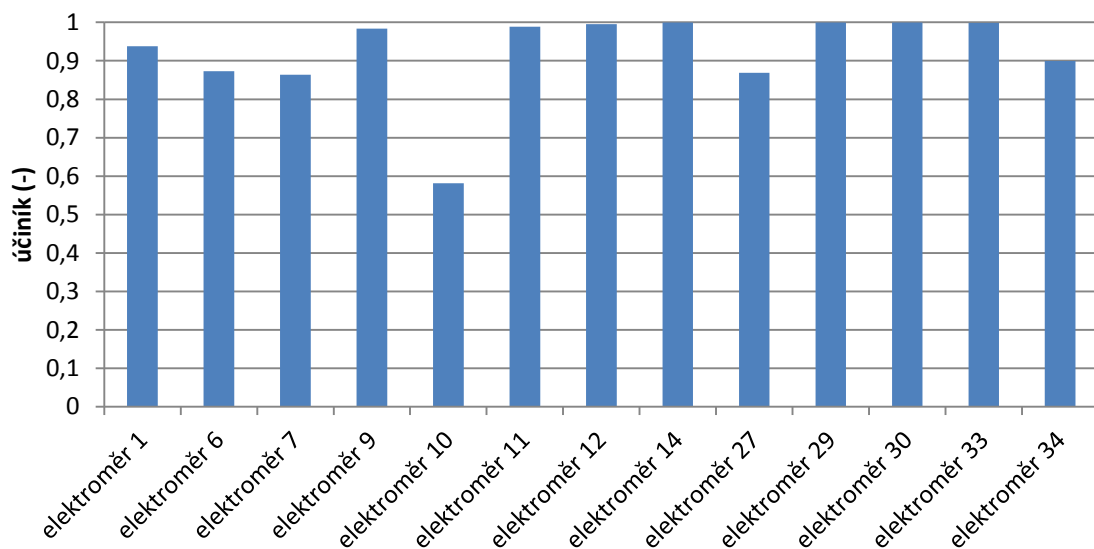


Graf 6: Histogram - přehled účinníku odběrných míst s odběrem < 500 kWh

Pozorujeme, že účinník nabývá jak kapacitního, tak induktivního charakteru s hodnoty téměř ve všech případech na 0,85. Přehledné zobrazení vidíme na Graf 6, kde sloupce představují počet odběratelů v příslušném rozsahu účinníku. Přesně 48 % odběrných míst dodržuje neutrální pásmo účinníku. Druhá nejpočetnější skupina vykazuje také uspokojivé hodnoty účinníku v pásmu 1- 0,95 ovšem kapacitního charakteru, což je požadováno za nežádoucí. Nejmenší skupina s necelými 15 % je v rozmezí 0,899 – 0,8 induktivního charakteru. Skutečnost kapacitního charakteru u druhé nejpočetnější skupinu s 38 % v tomto případě u této velikosti odběrů energie, lze přikládat skutečnosti, že tito odběratelé budou mít převážnou část spotřebičů nelineárního charakteru, čímž je myšlena běžná spotřební elektronika. Příkladem jsou počítače, televize atd. Druhým faktem může být skutečnost, že distribuční síť je tvořena kabely, jejichž nabíjecí výkon v tomto případě může hrát roli v charakteru účinníku. Další skutečnost je, že přístroje při malých odběrech činného výkonu nemusí vždy správně vyhodnotit kvadrant (Q1, Q4) jalové energie a tím změnit charakter účinníku. Hodnoty účinníku blízké jedné při malých odběrech tedy mohou být zatíženy chybou měření, která může ovlivnit charakter účinníku, nikoli jeho velikost.

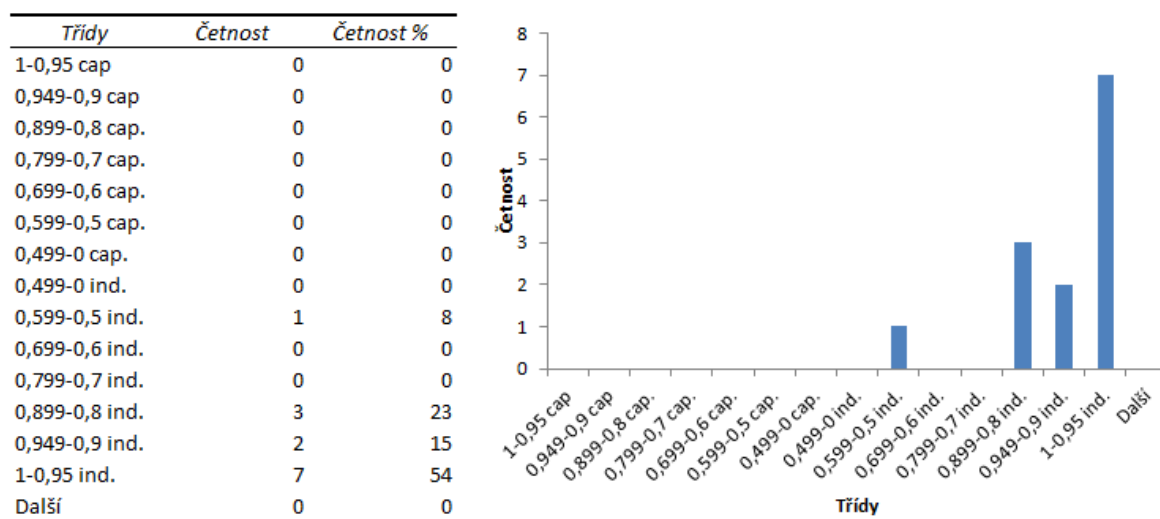
Odběrná místa se spotřebou nad 500 kWh

U odběrných míst se spotřebou energie nad 500 kWh za sledované období dosáhneme snížení pravděpodobnosti, že data jsou zatížena chybou měření, která by mohla vzniknout při malých odběrech energie během vyhodnocované období jednotlivých účinníků.



Graf 7: Přehled účinníku odběrných míst s odběrem > 500 kWh

Přehled průměrných hodnot účinníku opět vykreslíme pomocí sloupcového grafu, viz Graf 7. Hlavním rozdílem v porovnání s odběrnými místy do 500 kWh je především skutečnost, že veškeré celkové hodnoty účinníku jsou induktivního charakteru. Tato skutečnost může být dána i tím, že malé nelineární spotřebiče pravděpodobně netvoří tak velkou část odběru elektrické energie jako u odběrných míst do 500 kWh. Také případný nabíjecí výkon kabelů se neprojeví v tak velké míře. Přehledné zobrazení vidíme na Graf 8, kde sloupce opět znázorňují počet odběratelů v příslušném rozsahu účinníku. V tomto případě více jak polovina odběrných míst vykazuje neutrální pásmo účinníku. Dále 23 % spotřebitelů je v pásmu 0,899 – 0,8 induktivního charakteru a zbylých 15 % v rozmezí 0,949 – 0,9 také induktivního charakteru.



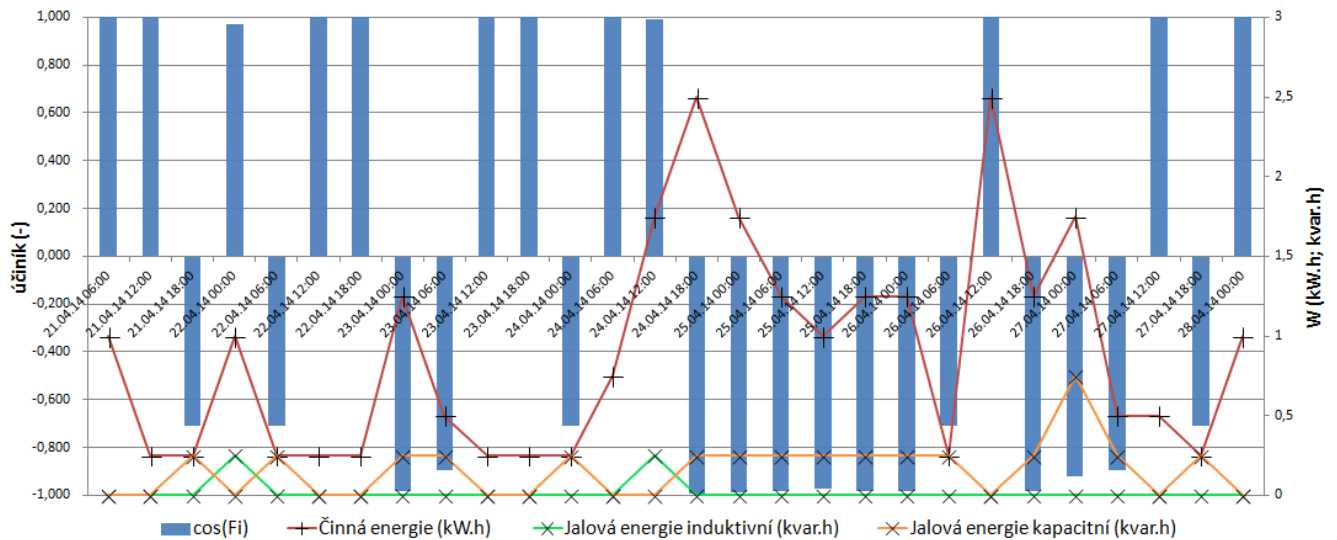
Graf 8: Histogram - přehled účinníku odběrných míst s odběrem > 500 kWh

Nyní je vhodné zaměřit se blíže na některá problematická odběrná místa. Tyto odběrná místa mají svou hodnotu účinníku za sledované období mimo neutrální pásmo. Jelikož podrobná analýza je obsáhlá, ukážeme pro přehled jedno. Detail více odběrných míst je uveden v příloze 2.

Odběrné místo 8

Tento odběratel za sledované období má celkový odběr

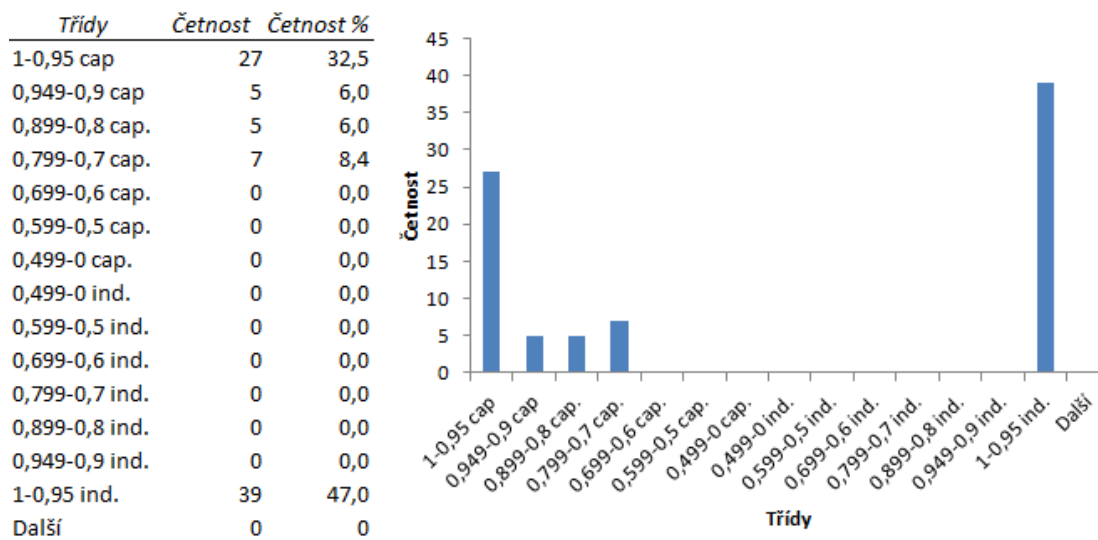
- činné energie 121,25 kWh,
- jalové energie induktivní 3,5 kvarh a kapacitní 17 kvarh,
- s celkovým účíníkem -0,997.



Graf 9: Odběrné místo 8 - účinník během 1 týdne

Tato hodnota odběru by odpovídala přibližně 1500 kWh/rok, případně i více dle typu vytápění a jiných okolností ovlivňující spotřebu elektrické energie během roku. Jedná se tedy o malého odběratele energie, jako jsou např. byty. Pro čitelnost zde uvedeme pouze detailní průběh účinníku za jeden kalendářní týden, detailněji zobrazeno viz Graf 9.

Vidíme, že účinník se v tomto případě většinou pohybuje střídavě mezi kapacitním a induktivním charakterem. Tento jev nastává především během menších odběrů energie a může tak být zapříčiněn výše zmíněnou nepřesností elektroměru určit vhodný kvadrant jalové energie. Přehledné zobrazení četností jednotlivých hodnot účinníku ve stanovených mezích zobrazuje Graf 10.



Graf 10: Histogram - odběrné místo 8

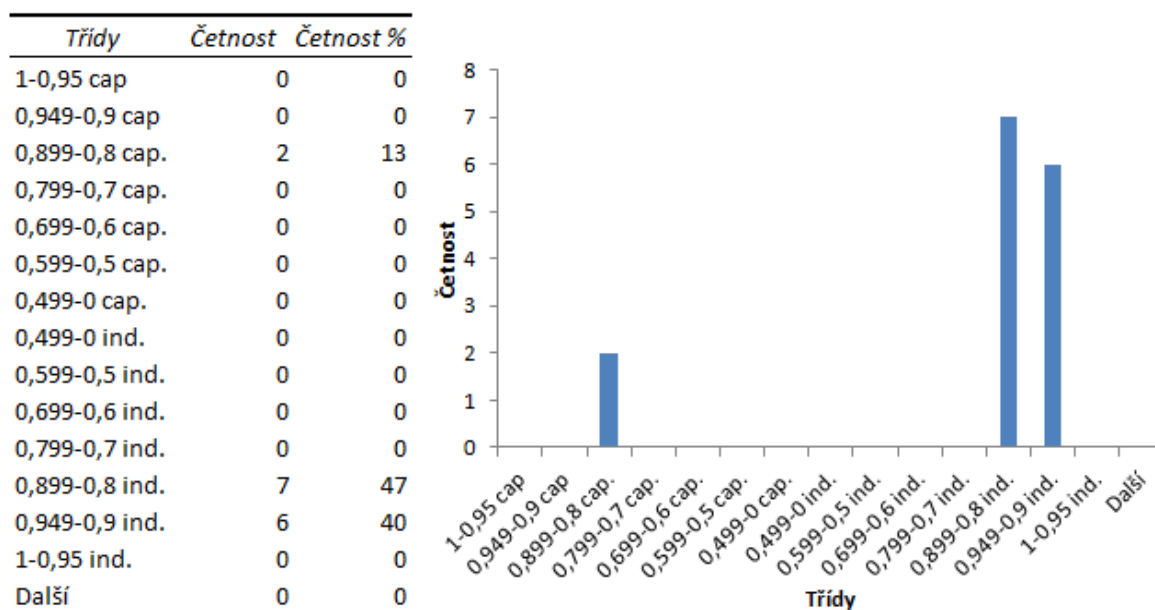
5.3.2 Analýza vývodů TS

Přehled jednotlivých měřených vývodů a hodnot proudových rozsahů, které byly použity jsou zobrazeny v Tabulka 3. Hodnoty bez znaménka opět symbolizují induktivní charakter a hodnoty se znaménkem “-“ kapacitní charakter.

TS	účinník L1	účinník L2	účinník L2	měřící rozsah
	(-)	(-)	(-)	(A)
TS_1.1	0,925	0,890	0,864	300
TS_1.2	0,914	0,878	0,866	300
TS_2	0,897	0,915	0,912	100
TS_3.1	0,940	0,916	0,857	100
TS_3.2	0,886	-0,872	-0,882	100

Tabulka 3: Přehled účinníků všech vývodů TS

Z Graf 11 vidíme, že většina hodnot účinníku je induktivního charakteru, ale žádný se účinek nenachází v neutrálním pásmu. Detailní rozložení hodnot účinníku ve stanovených mezích zobrazuje Graf 11. Uvážíme-li rozložení do jednotlivých kategorií v procentech, tak nejpočetnější skupina tj. 47 % hodnot je v induktivním pásmu 0,899 – 0,8. Dále 40 % hodnot je v rozmezí 0,949 – 0,9 induktivního charakteru a zbylých 13 % je kapacitního charakteru v mezích 0,899 – 0,8.



Graf 11: Histogram - přehled účinníků - vývody TS

Nyní se podrobněji podívejme na jednotlivé vývody TS. Účinník je uveden u každé TS zvlášť pro každou fázi L1, L2, L3.

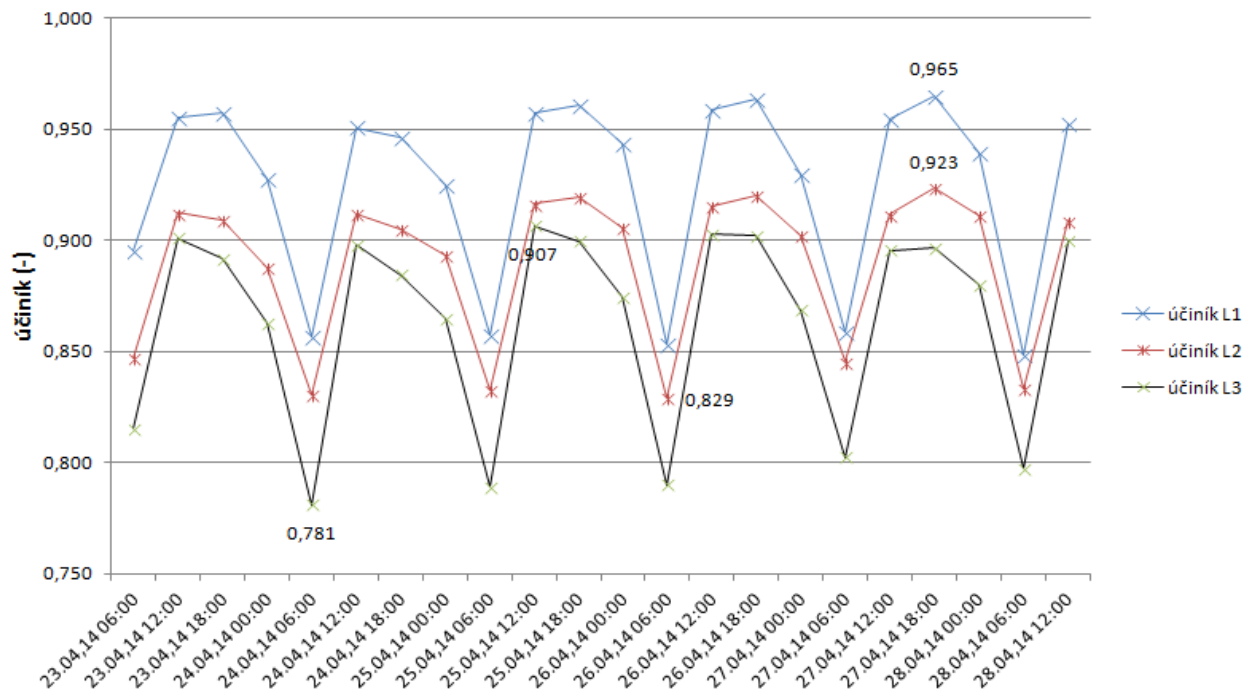
Vývod TS 1.1

Odběry energie z vývodu TS 1.1 uskutečněné za sledované období v jednotlivých fázích jsou uvedeny v Tabulka 4.

fáze	$W_{\text{činná}}$	$W_{\text{jalová ind.}}$	účinník
	(kWh)	(kvarh)	(-)
L1	2292,40	693,89	0,941
L2	1932,46	834,87	0,909
L3	1651,99	807,69	0,884

Tabulka 4: Odběr energie z TS 1.1

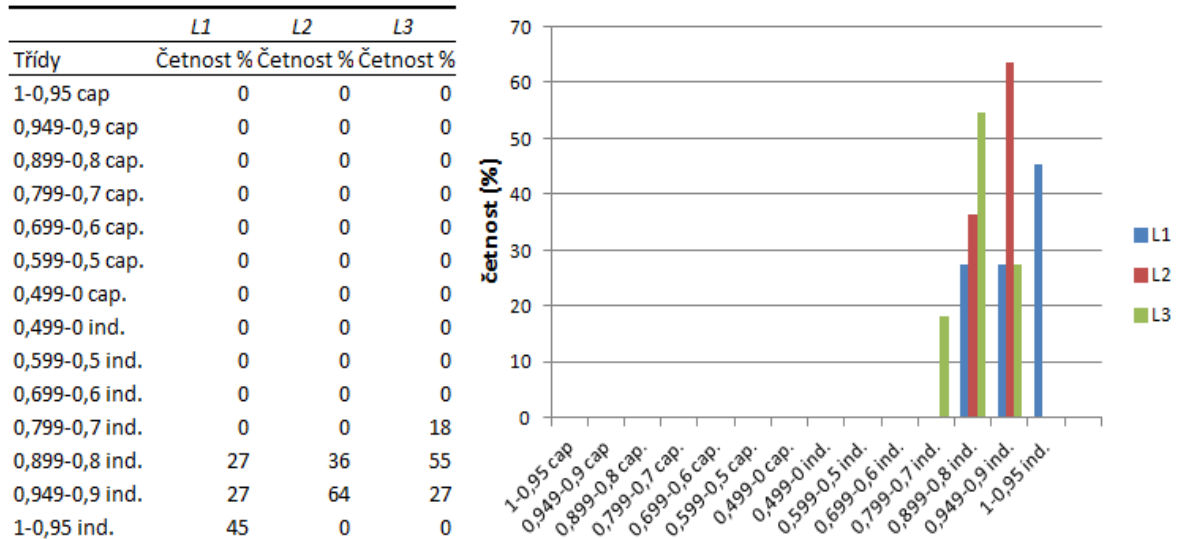
Průběh hodnot účinníku hodnocených za období šesti hodin v jednotlivých fázích během celého sledovaného období je vykreslen v Graf 12. V grafu jsou dále zobrazeny extrémní



Graf 12: TS 1.1 průběh účinníku L1, L2, L3 v 6-ti hodinových intervalech

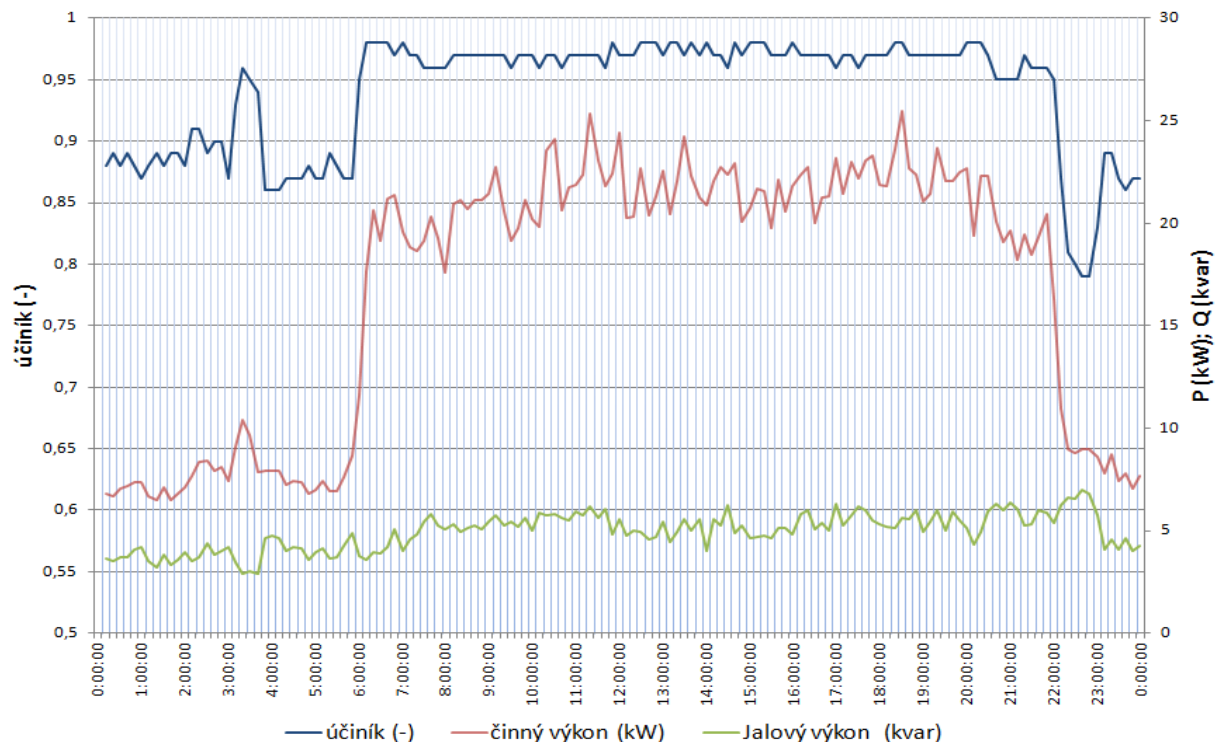
hodnot účinníku. Vidíme, že účinník je pouze induktivního charakteru a průběh v jednotlivých dnech je velmi podobný. Minima jsou vždy v ranních hodinách, kdy je spotřeba energie obecně nižší. Detailní četnost hodnot účinníku v jednotlivých pásmech zobrazuje Graf 14. Vidíme, že nejlepších hodnot bylo dosaženo ve fázi L1, kde se 45 % hodnot nachází v neutrálním pásmu. Zbytek hodnot se ve stejném poměru vyskytuje v pásmech 0,949 – 0,9 ind. a 0,899 – 0,8 ind. Ve fázi L2 bylo nejlepších hodnot účinníku

dosaženo v rozmezí 0,949 – 0,9 ind. a to v 64 %. Zbylé odběry spadají do pásma 0,899 – 0,8 ind. Fáze L3 vykazovala nepatrně horší průběh hodnot. Více než polovina hodnot se nachází v rozmezí 0,899 – 0,8 ind. Dále 27 % odběrů je pásma 0,949 – 0,9 ind. a zbylé hodnoty jsou v rozmezí 0,799 – 0,7.

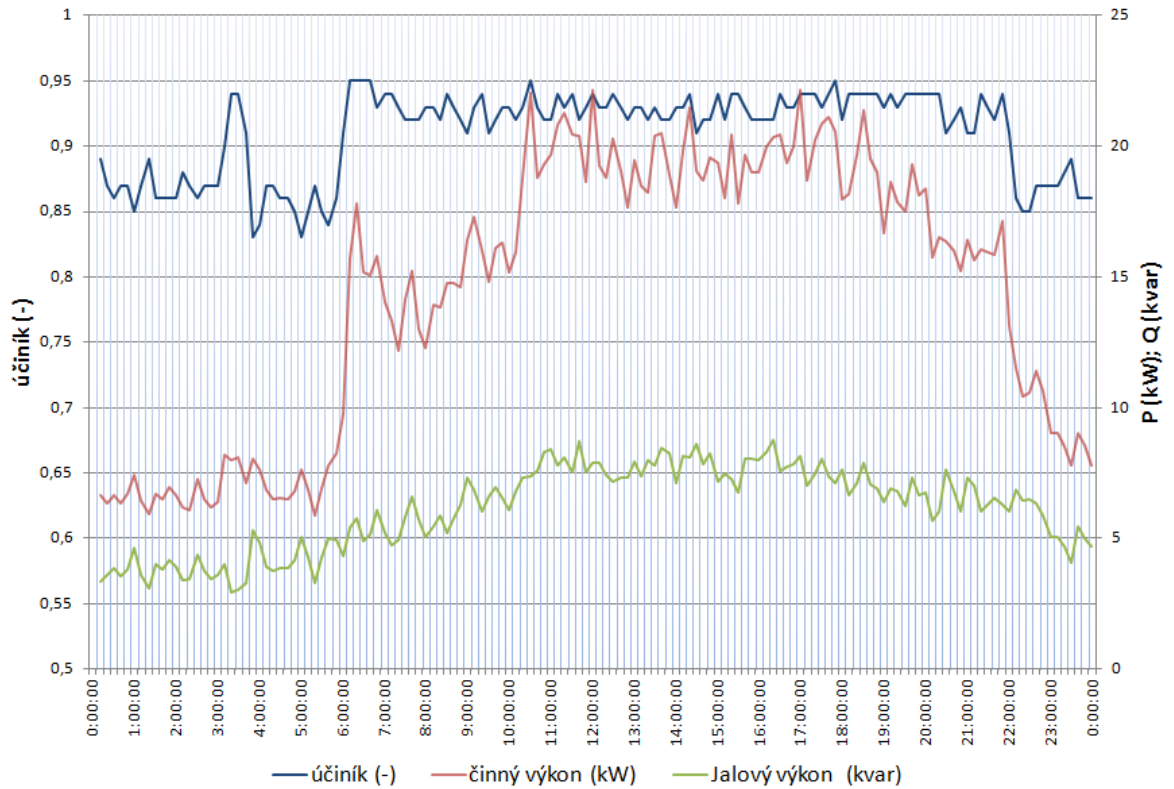


Graf 14: Histogram - TS 1.1 - přehled účinníků L1, L2, L3

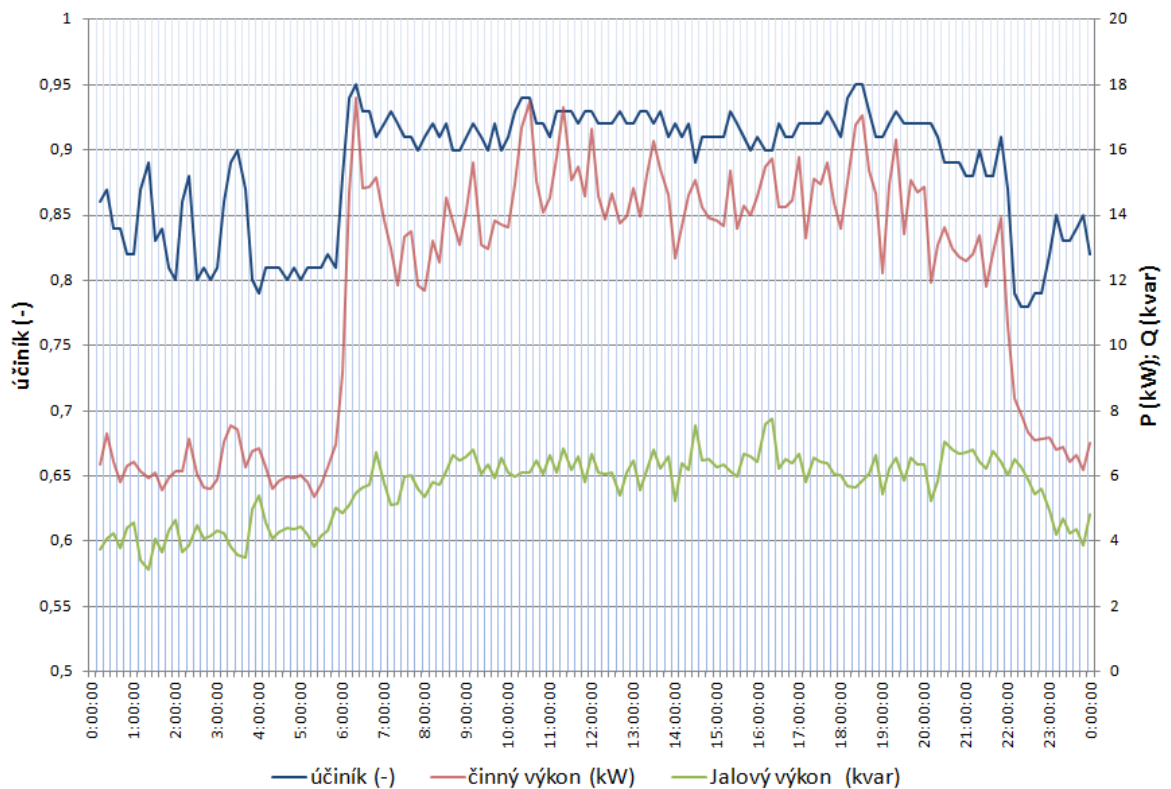
Detailní informaci o stavu účinníku poskytnou průběhy vypočné v deseti minutových intervalech. Pro názornost vykreslíme průběhy pro všechny fáze v průběhu jednoho dne.



Graf 13: TS 1.1 průběh účinníku L1 v 10-ti minutových intervalech - 26. 4.



Graf 15: TS 1.1 průběh účinníku L2 v 10-ti minutových intervalech - 26. 4.



Graf 16: TS 1.1 průběh účinníku L3 v 10-ti minutových intervalech - 26. 4.

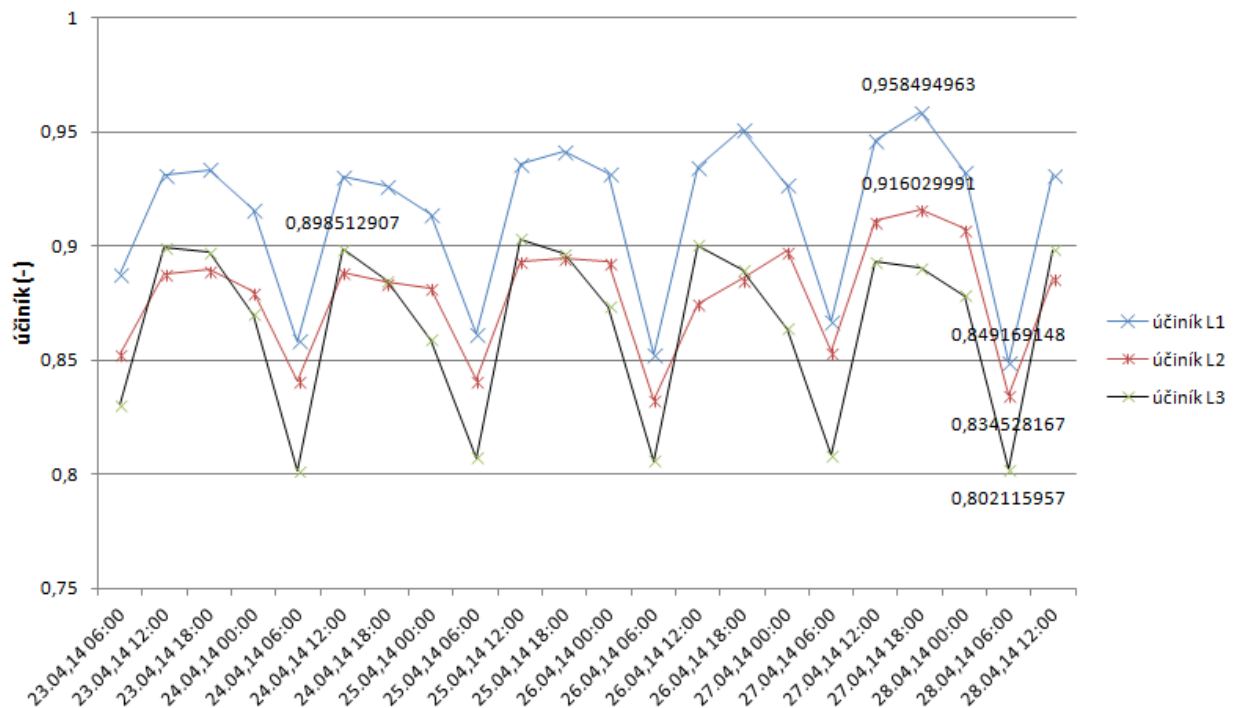
Vývod TS 1.2

Odběry energie z vývodu TS 1.1 uskutečněné za sledované období v jednotlivých fázích jsou uvedeny v Tabulka 5.

fáze	$W_{\text{činná}}$ (kWh)	$W_{\text{jalová ind.}}$ (kvarh)	účinník (-)
L1	1947,29	699,70	0,930
L2	1924,78	940,97	0,895
L3	1591,95	792,67	0,882

Tabulka 5: Odběr energie z TS 1.2

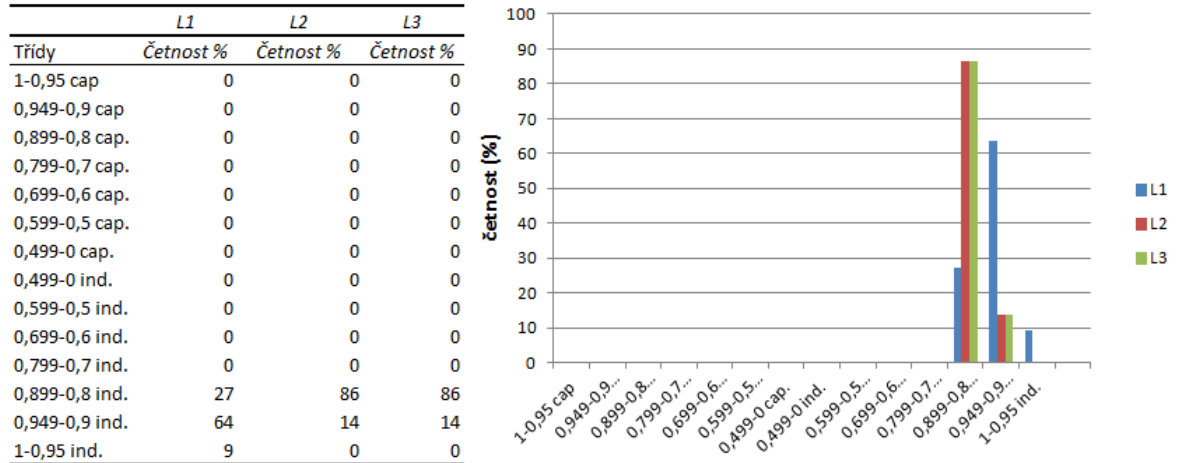
Průběh hodnot účinníku hodnocených za období šesti hodin v jednotlivých fázích během celého sledovaného období je vykreslen v Graf 17. V grafu jsou dále zobrazeny extrémní hodnoty účinníku. Vidíme, že účinník je pouze induktivního charakteru a průběh



Graf 17: TS 1.2 průběh účinníku L1, L2, L3 v 6-ti hodinových intervalech

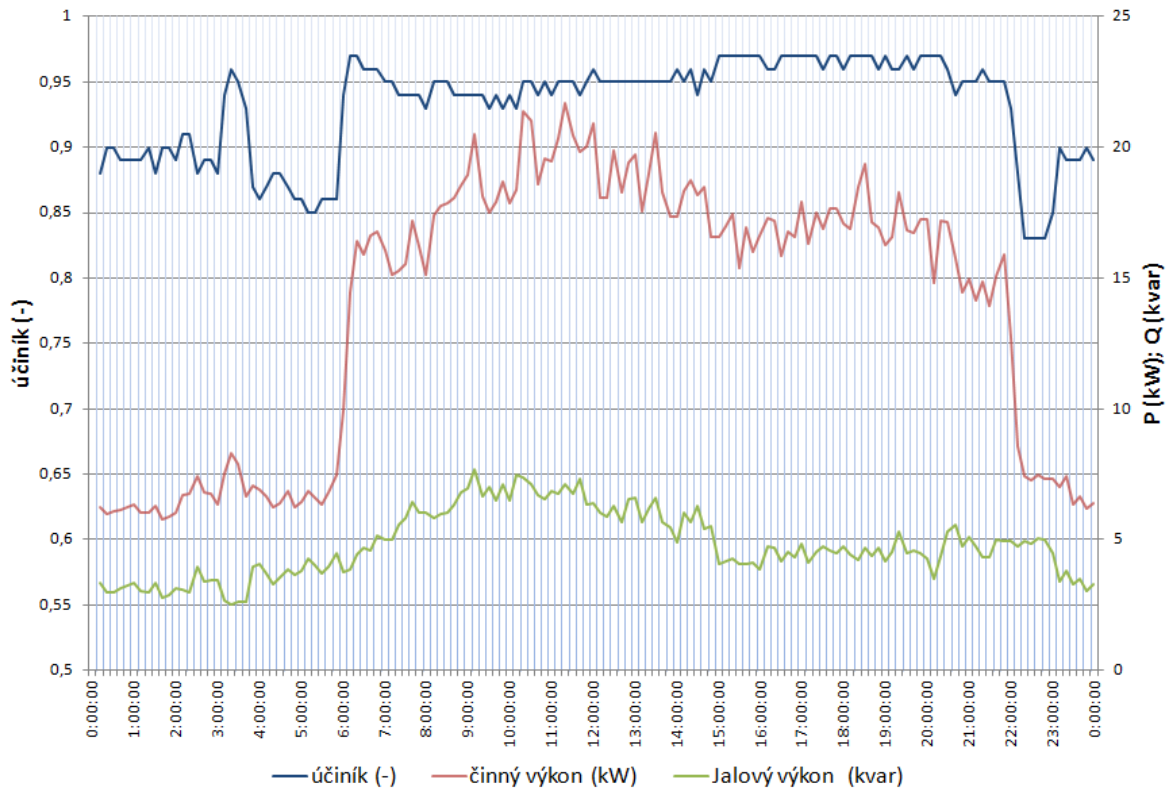
v jednotlivých dnech je velmi podobný. Minima jsou vždy v ranních hodinách, kdy je spotřeba energie obecně nižší. Detailní četnost hodnot účinníku v jednotlivých pásmech zobrazuje Graf 18. Vidíme, že nejlepších hodnot bylo dosaženo ve fázi L1, ovšem pouze 9 % hodnot se nachází v neutrálním pásmu. Většina odběrů ve fázi L1, tedy 64 % byla uskutečněna v rozmezí 0,949 – 0,9 ind. a zbytek pak v pásmu 0,899 – 0,8 ind. Ve fázi L2

bylo nejlepších hodnot účinníku dosaženo v rozmezí 0,949 – 0,9 ind. a to ve 14 %. Zbylé odběry spadají do pásma 0,899 – 0,8 ind. Fáze L3 vykazovala o něco horší průběh hodnot oproti fázi L2, ovšem dle stanovených mezí je četnost výskytu stejná.

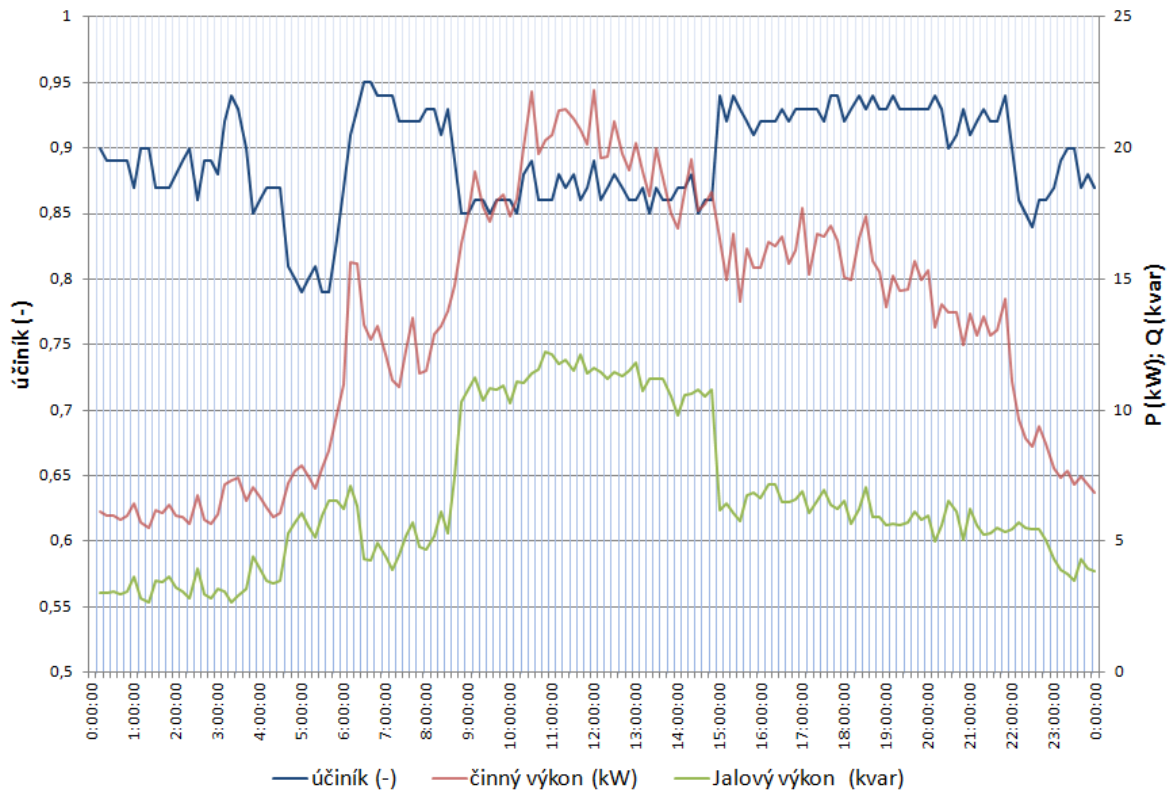


Graf 18: Histogram - TS 1.2 - přehled účinníků L1, L2, L3

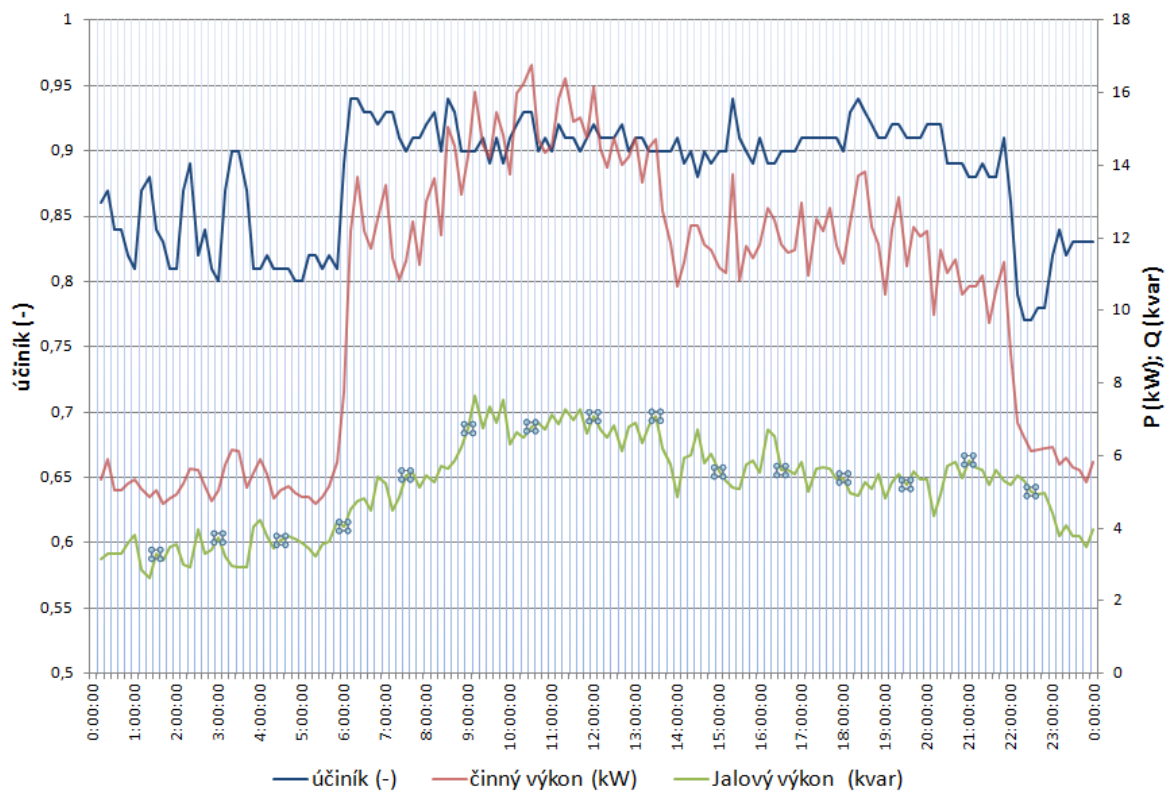
Detailní informaci o stavu účinníku poskytnou průběhy vypočné v deseti minutových intervalech. Pro názornost vykreslíme průběhy pro všechny fáze v průběhu jednoho dne.



Graf 19: TS 1.2 průběh účinníku L1 v 10-ti minutových intervalech - 26. 4.



Graf 20: TS I.2 průběh účinníku L2 v 10-ti minutových intervalech - 26. 4.



Graf 21: TS I.2 průběh účinníku L2 v 10-ti minutových intervalech - 26. 4.

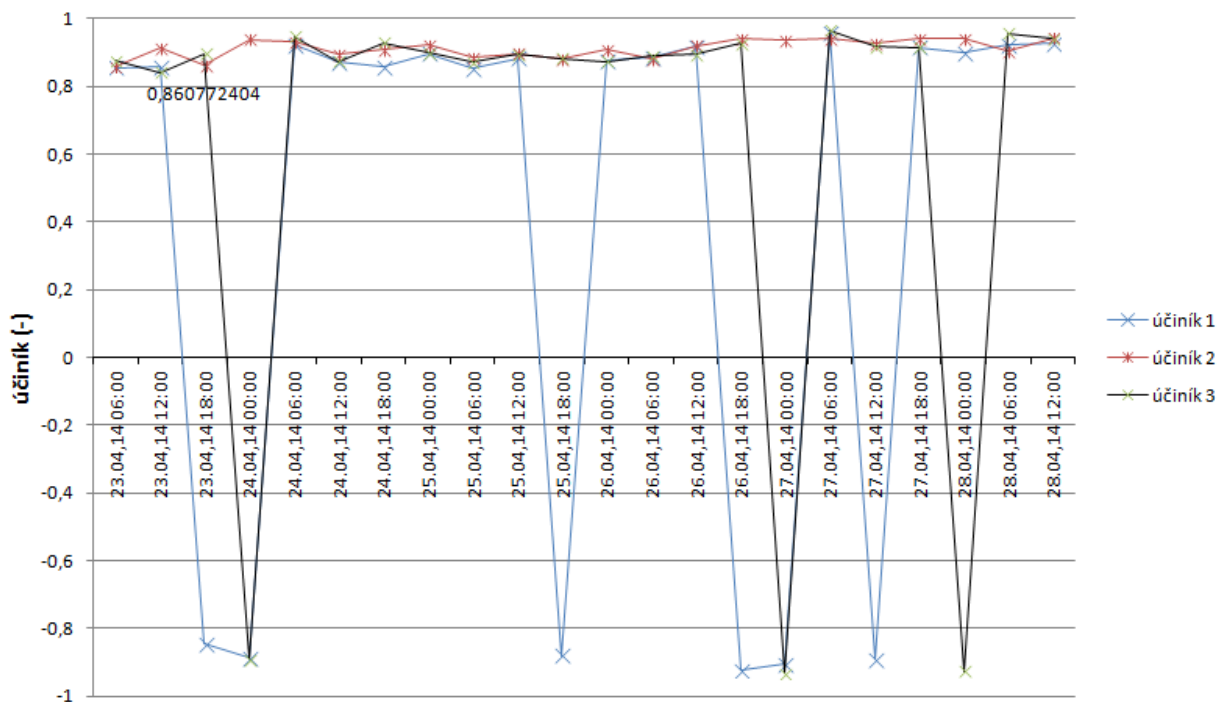
Vývod TS 2

Odběry energie z vývodu TS 1.1 uskutečněné za sledované období v jednotlivých fázích jsou uvedeny v Tabulka 6.

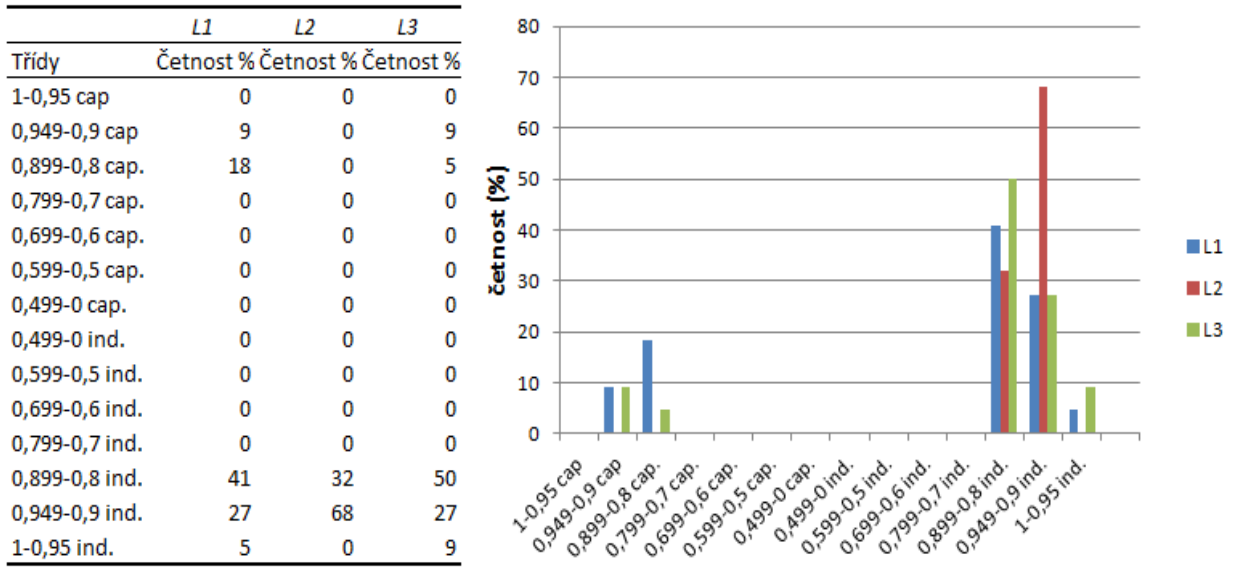
fáze	$W_{\text{činná}}$ (kWh)	$W_{\text{jalová ind.}}$ (kvarh)	$W_{\text{jalová cap.}}$ (kvarh)	účinník (-)
L1	205,07	16,13	9,48	0,897
L2	277,91	49,31	0,25	0,915
L3	214,72	16,57	6,07	0,912

Tabulka 6: Odběr energie z TS 2

Průběh hodnot účinníku hodnocených za období šesti hodin v jednotlivých fázích během celého sledovaného období je vykreslen v Graf 22. Vidíme, že účinník nyní nabývá induktivního i kapacitního charakteru s podobnými hodnotami. Detailní četnost hodnot účinníku v jednotlivých pásmech zobrazuje Graf 23. Vidíme, že fáze L1 a L3 nabývají i kapacitního charakteru, především v pásmu 0,899 – 0,8 ind. Fáze L2 má pouze induktivní charakter s nejvyšší četností v pásmu 0,949 – 0,9 ind. Zbylé hodnoty jsou v pásmu 0,899 – 0,8 ind.

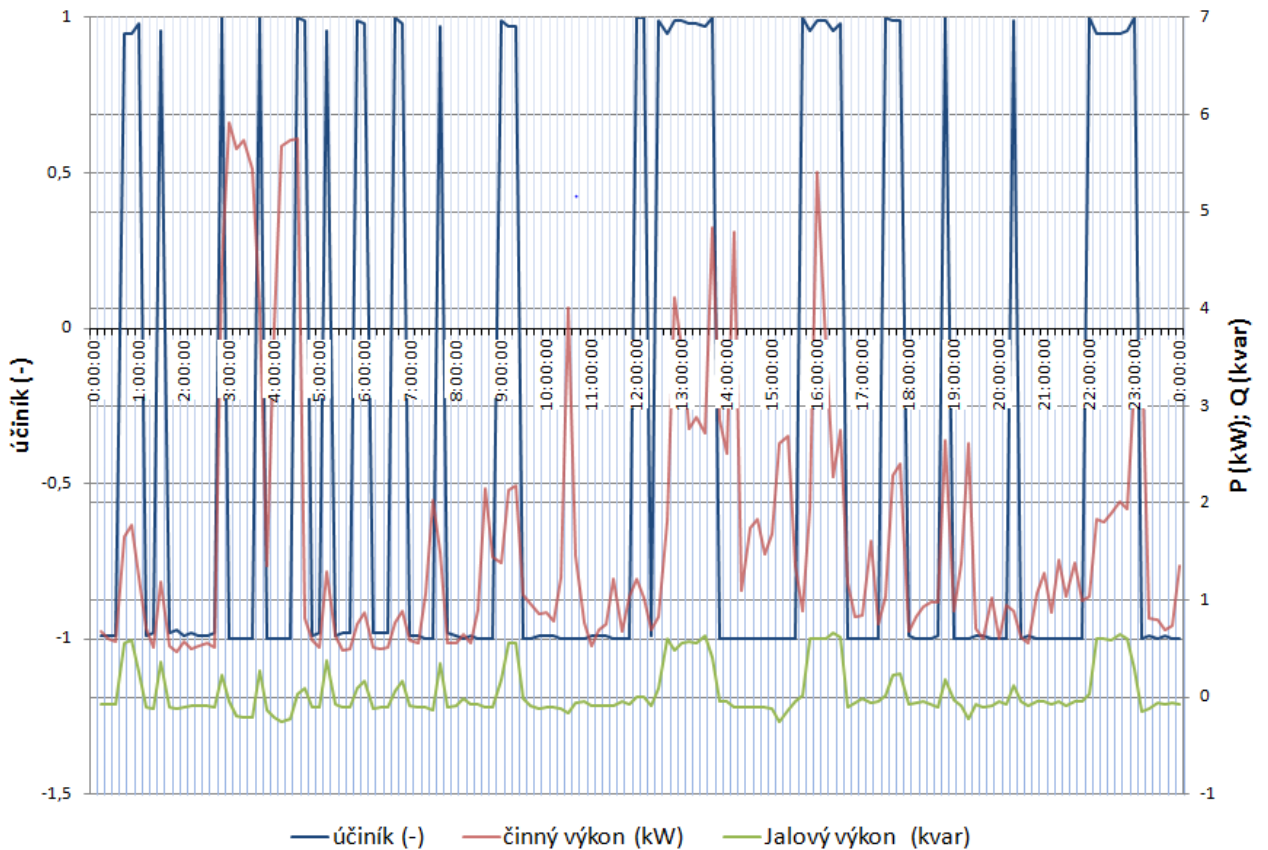


Graf 22: TS 2 průběh účinníku L1, L2, L3 v 6-ti hodinových intervalech

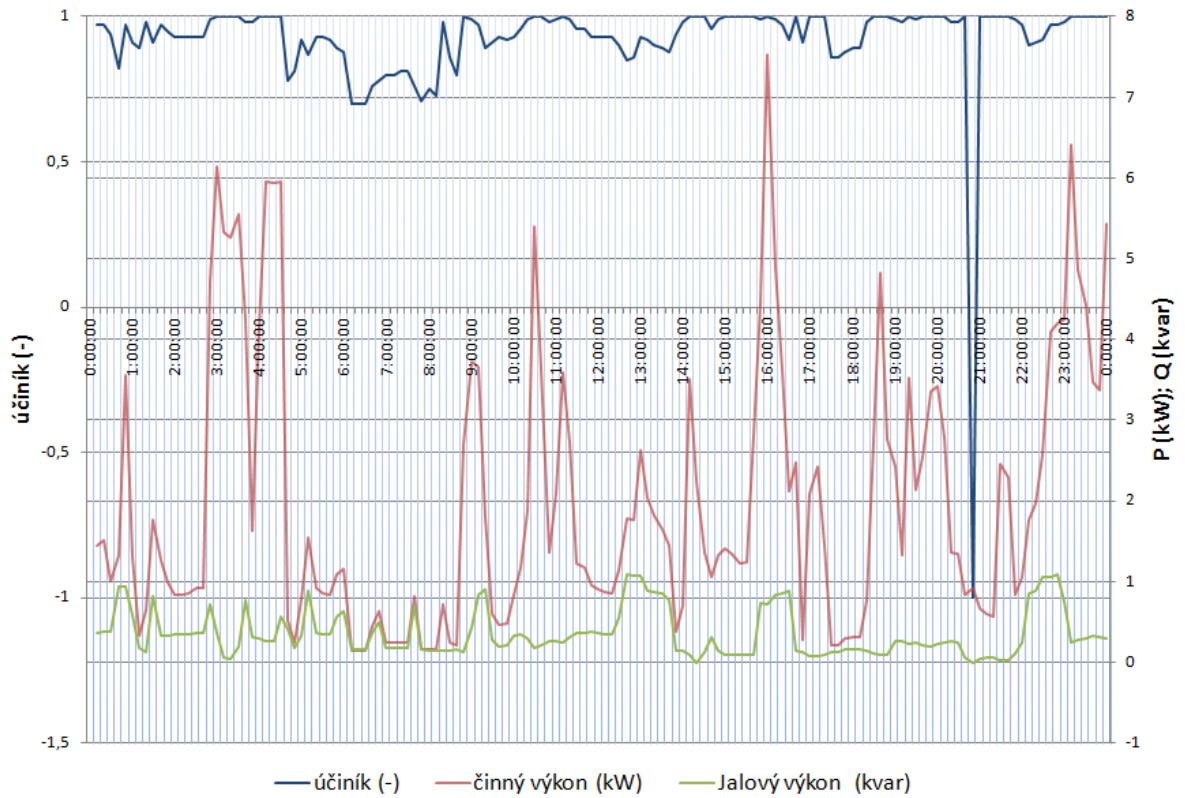


Graf 23: Histogram - TS 1.2 - přehled účinníků L1, L2, L3

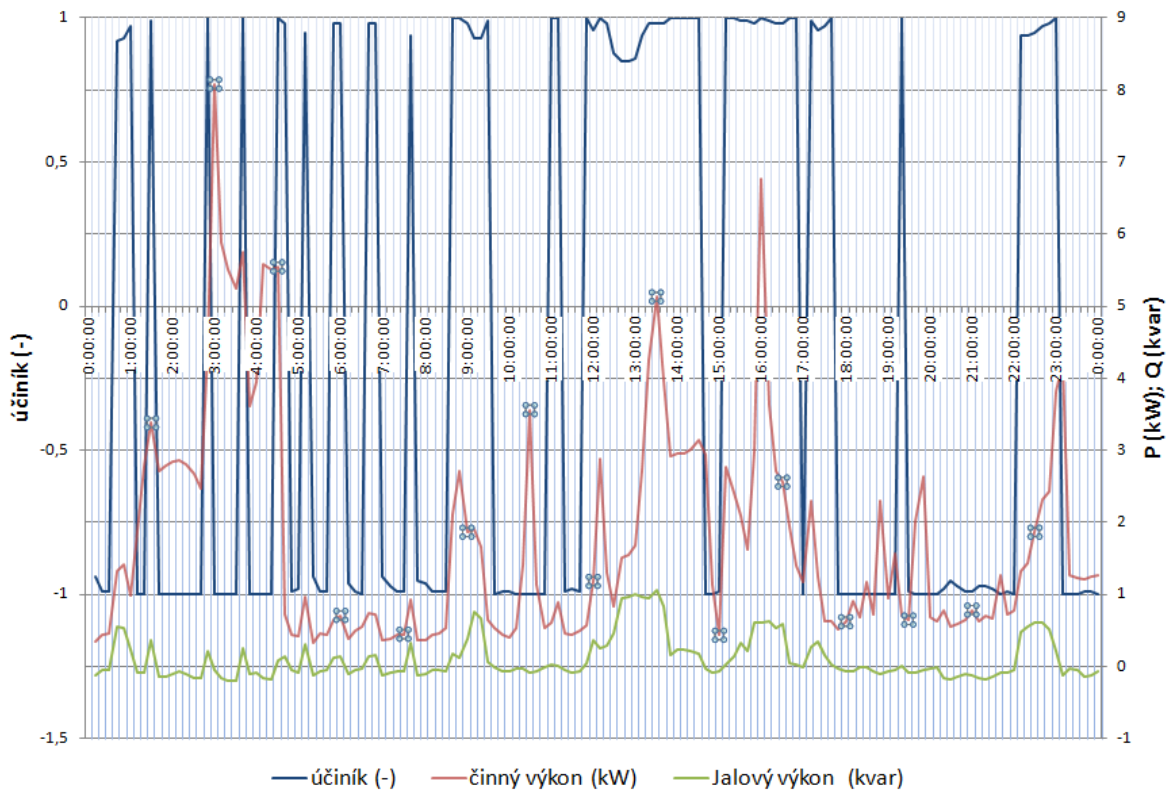
Detailní informaci o stavu účinníku poskytnou průběhy průběhy určené v deseti minutových intervalech. Pro názornost vykreslíme průběhy pro všechny fáze v průběhu jednoho dne.



Graf 24: TS 2 průběh účinníku L1 v 10-ti minutových intervalech - 27. 4.

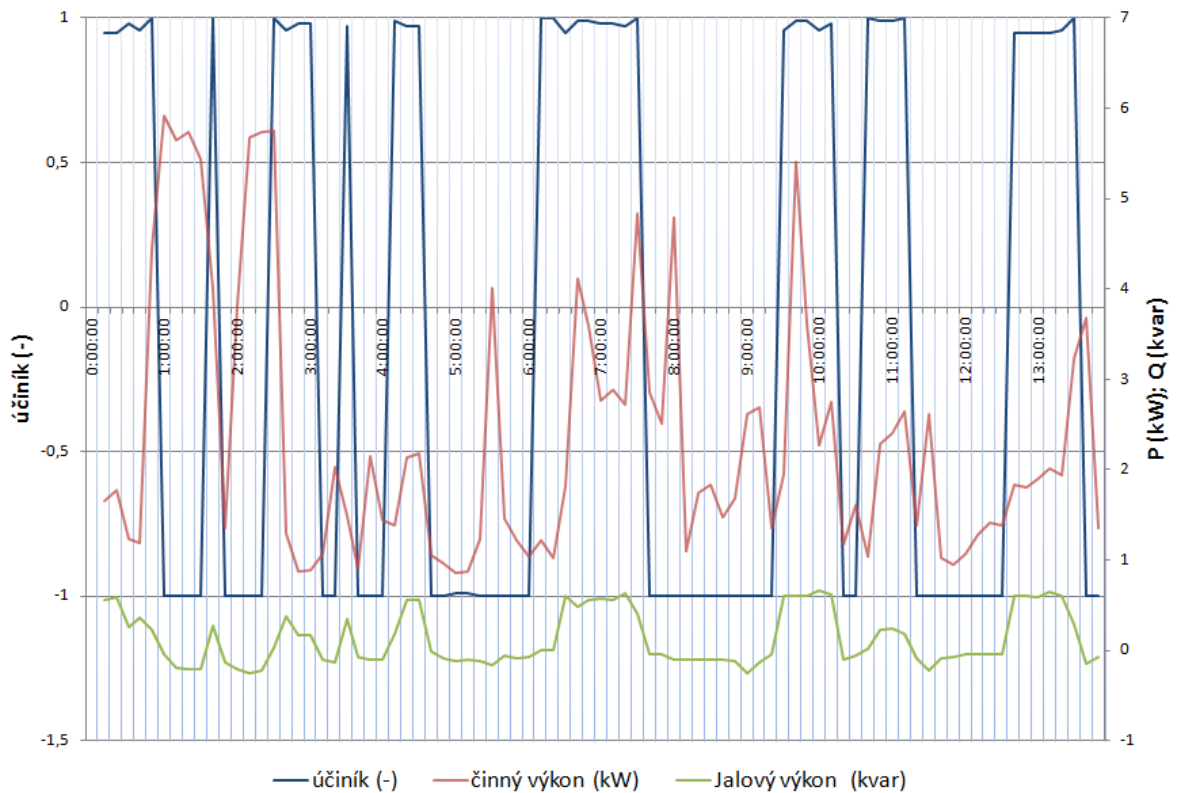


Graf 25: TS 2 průběh účinníku L2 v 10-ti minutových intervalech - 27. 4.



Graf 26: TS 2 průběh účinníku L3 v 10-ti minutových intervalech - 27. 4.

Graf 24 a Graf 26 vykreslující průběh účinníku fází L1 a L2 v desetiminutových intervalech znázorňují neobvyklý charakter účinníku. Při bližším pohledu zjistíme, že vývod TS 2 nepřenáší příliš vysoké výkony. Tyto výkony mají velmi pulzní charakter s vysokými špičkami. V tomto případě jsme zjistily, že v daných fázích je velké harmonické zkreslení proudů THD_I , které může podstatně zvýšit chybu měření. Vykreslíme-li opět průběh účinníku ve fázi L1 s omezením několika hodnot s tím nejvyšším zkreslením proudů, průběh účinníku zlepší, viz Graf 27.



Graf 27: TS 2 průběh účinníku L1 v 10-ti, minutových intervalech - 27. 4. omezené THDi

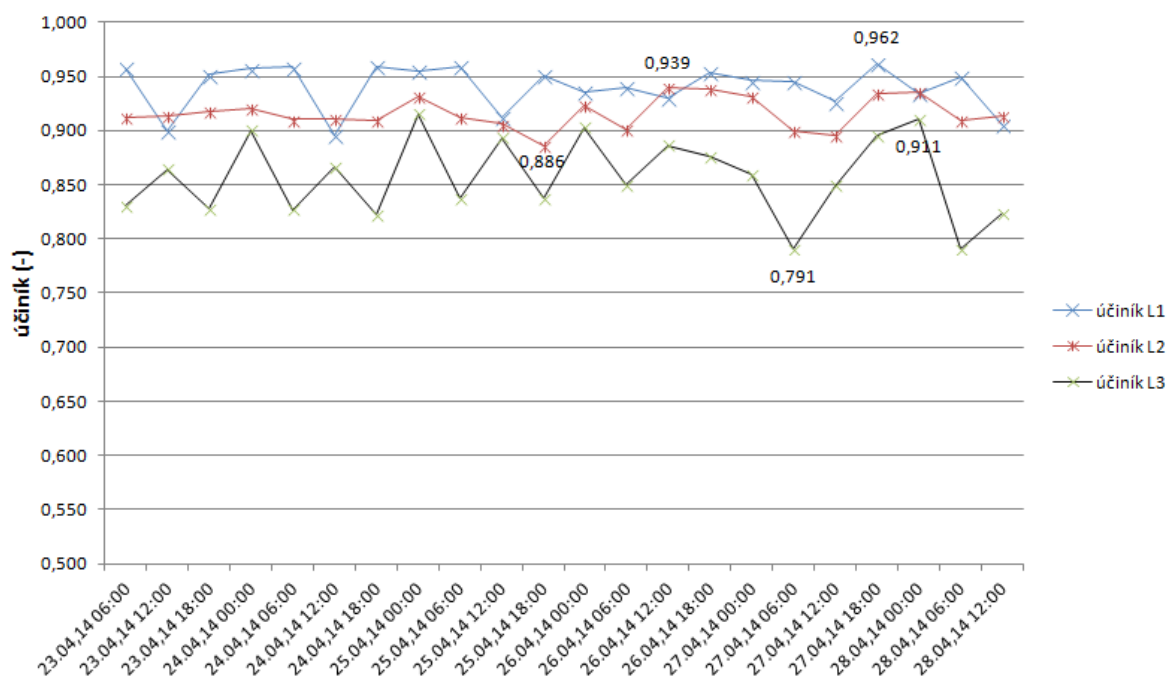
Vývod TS 3.1

Odběry energie z vývodu TS 1.1 uskutečněné za sledované období v jednotlivých fázích jsou uvedeny v Tabulka 7.

fáze	$W_{\text{činná}}$	$W_{\text{jalová ind.}}$	$W_{\text{jalová cap.}}$	účinník (-)
	(kWh)	(kvarh)	(kvarh)	
L1	493,33	67,37	4,61	0,940
L2	527,88	155,37		0,916
L3	442,33	215,51		0,857

Tabulka 7: Odběr energie z TS 3.1

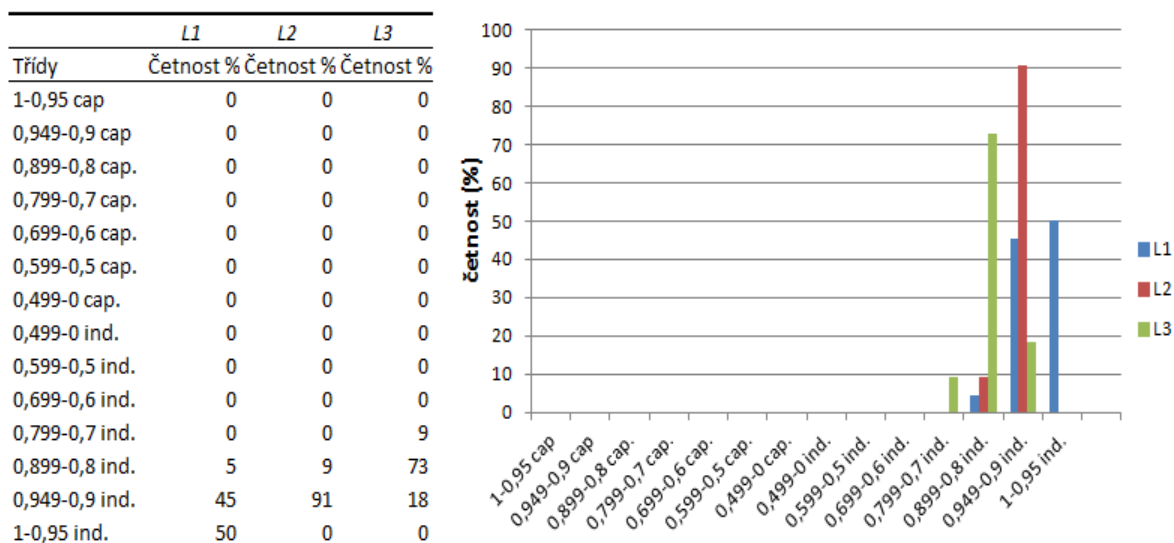
Průběh hodnot účinníku hodnocených za období šesti hodin v jednotlivých fázích během celého sledovaného období je vykreslen v Grafu 27. V grafu jsou dále zobrazeny extrémní hodnoty. Detailní četnost hodnot účinníku v jednotlivých pásmech zobrazuje Graf 28.



Graf 27: TS 3.1 průběh účinníku L1, L2, L3 v 6-ti hodinových intervalech

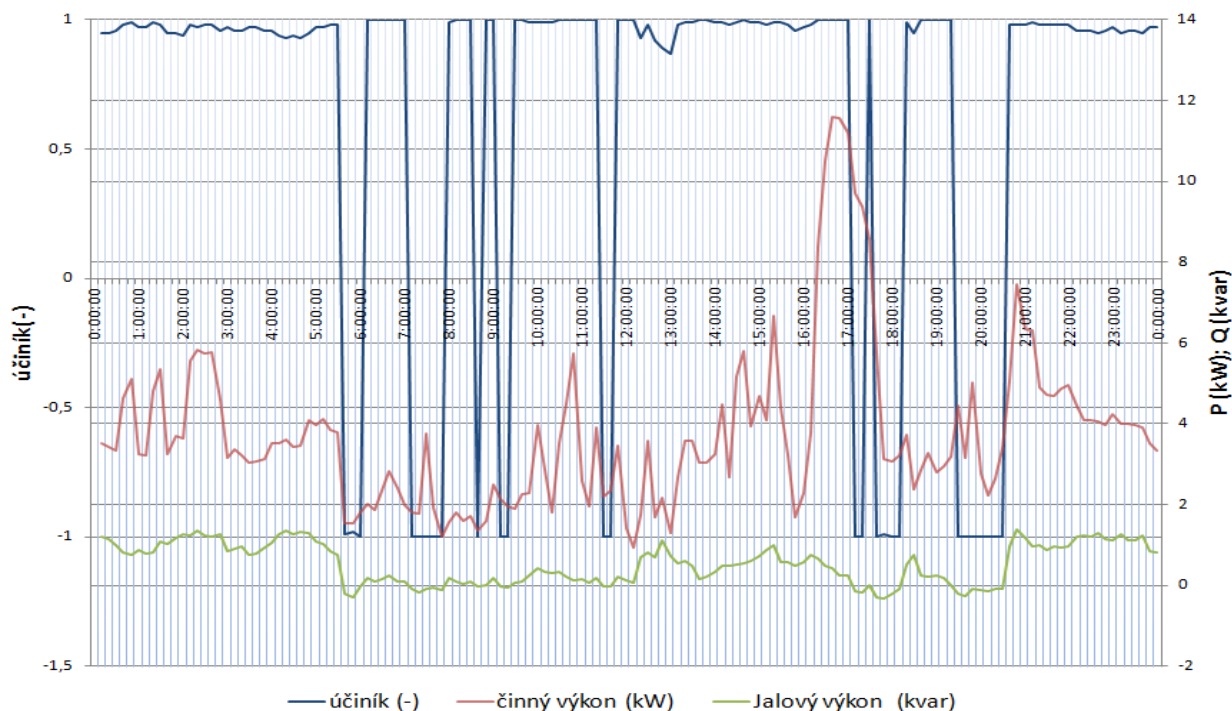
Účinník ve fázi L1 má četnost hodnot účinníku rovnoměrně rozdělenou v rozmezí neutrálního pásma až 0,949 – 0,9 ind. a jen 5 % se nachází v rozmezí 0,899 – 0,8. Fáze L2 má také vyrovnaný průběh přičemž 91 % odběrů se nachází v mezi 0,949 – 0,9 ind. a zbylé hodnoty v pásmu 0,899 – 0,8. Fáze L3 se vyznačuje s 73 % hodnot především odběrem

s účinníkem v pásmu 0,899 – 0,8. Zbylé hodnoty se s četností 18 % nachází v rozmezí 0,949 – 0,9 a s 9 % v 0,799 – 0,7.

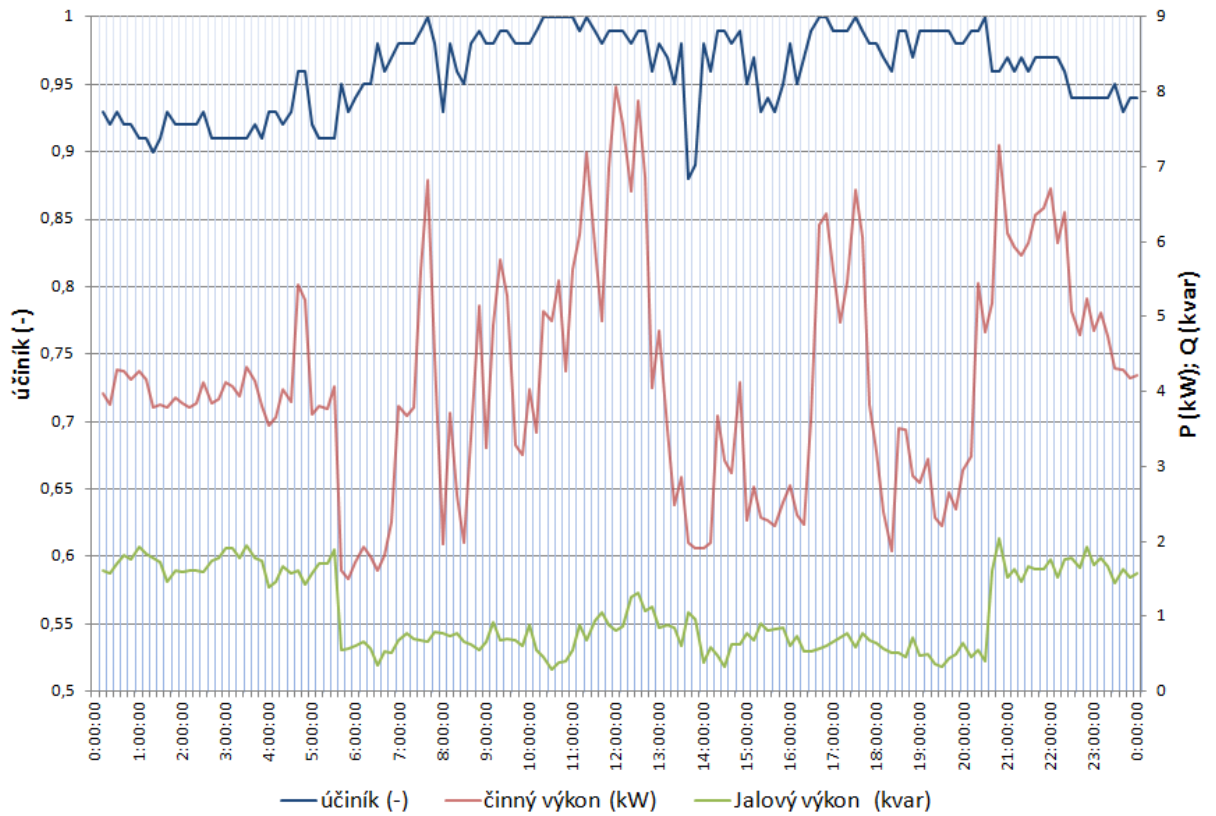


Graf 28: Histogram - TS 3.1 - přehled účinníků L1, L2, L3

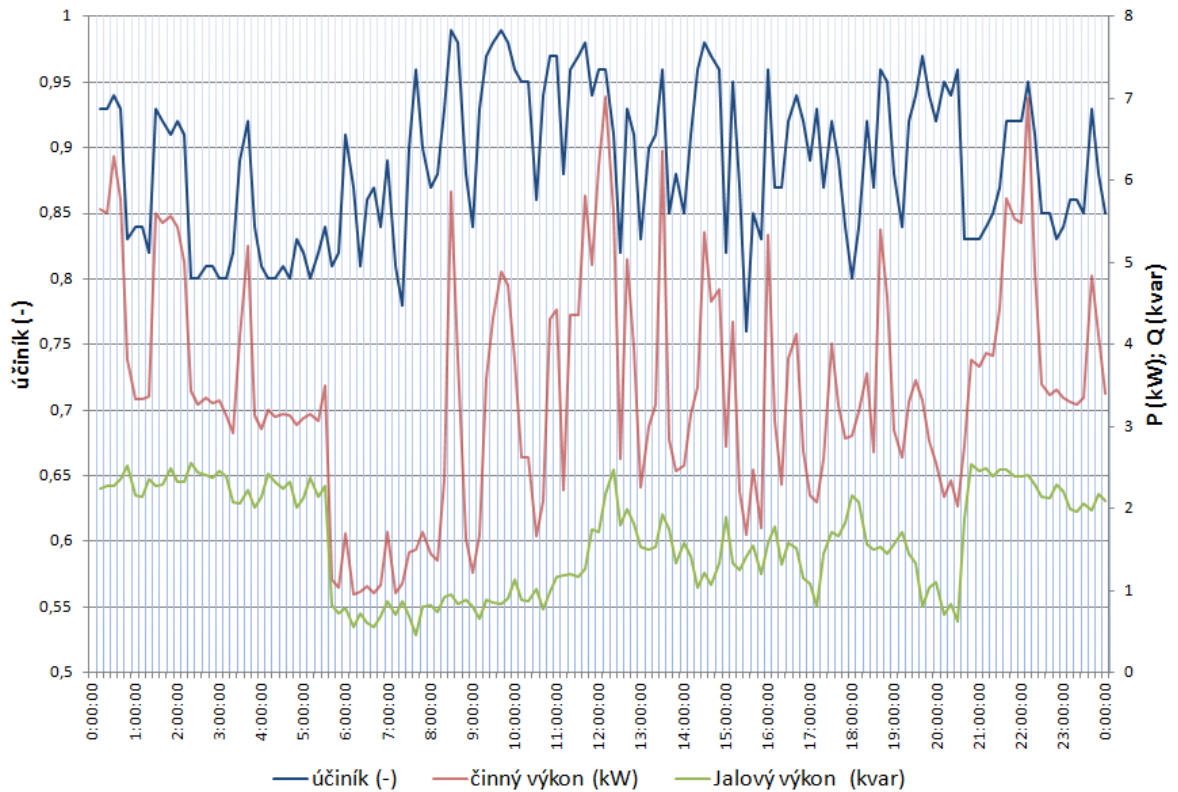
Detailní informaci o stavu účinníku opět poskytnou průběhy určené v deseti minutových intervalech. Pro názornost vykreslíme průběhy pro všechny fáze v průběhu jednoho dne. Vidíme, že kolísání v Graf 29 je způsobeno při nižších odběrech energie.



Graf 29: TS 3.1 průběh účinníku L1 v 10-ti, minutových intervalech - 26. 4.



Graf 30: TS 3.1 průběh účinníku L2 v 10-ti, minutových intervalech - 26. 4.



Graf 31: TS 3.1 průběh účinníku L3 v 10-ti, minutových intervalech - 26. 4.

Vývod TS 3.2

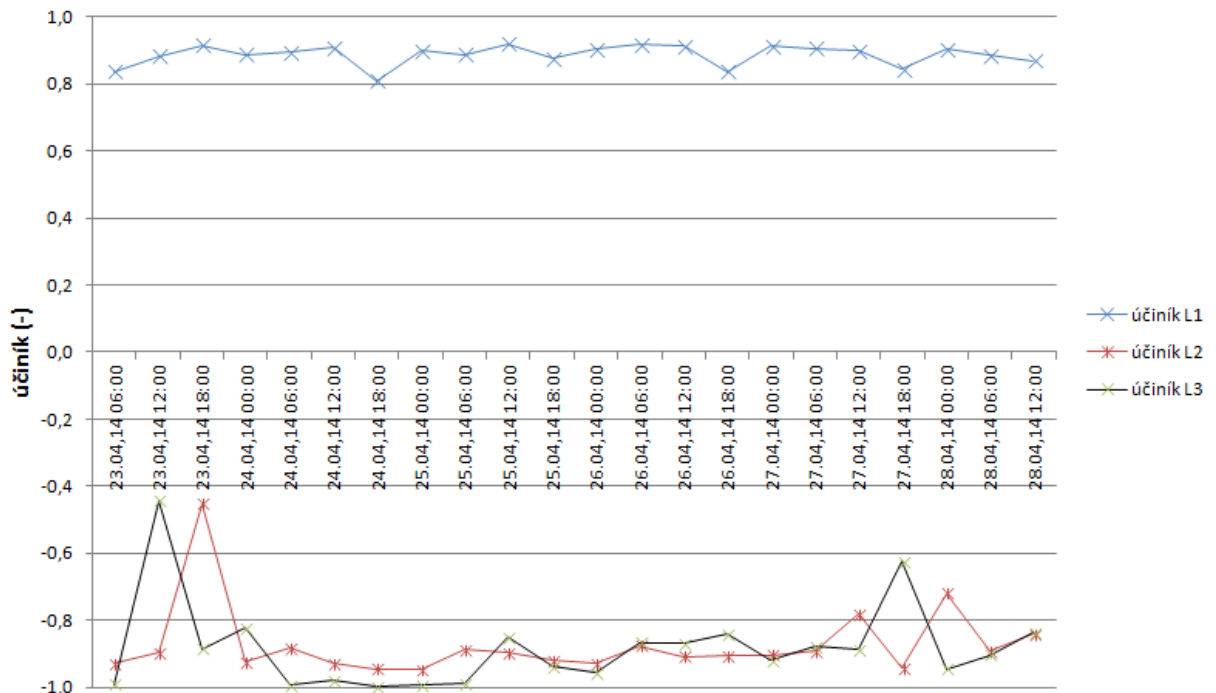
Odběry energie z vývodu TS 1.1 uskutečněné za sledované období v jednotlivých fázích jsou uvedeny v Tabulka 8

fáze	$W_{\text{činná}}$	$W_{\text{jalová ind.}}$	$W_{\text{jalová cap.}}$	účinník
	(kWh)	(kvarh)	(kvarh)	(-)
L1	100,16	0,06	38,57	0,887
L2	66,16	22,40	0,30	-0,873
L3	91,10	9,36	0,21	-0,881

Tabulka 8: Odběr energie z TS 3.2

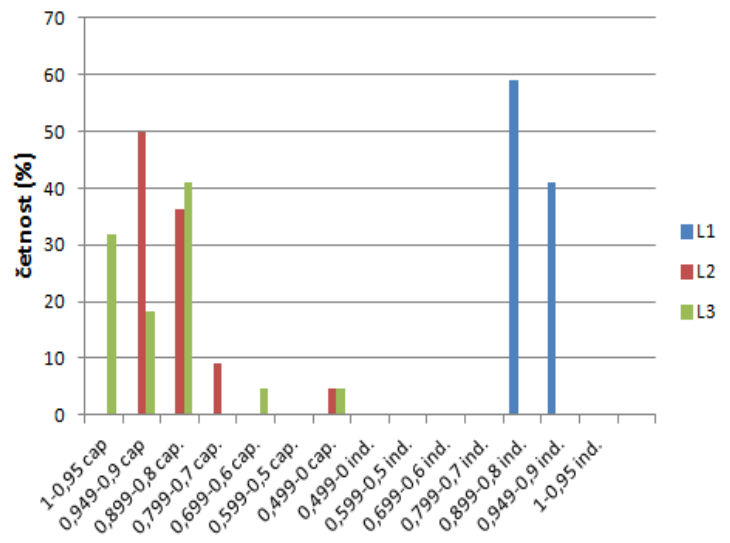
Průběh hodnot účinníku hodnocených za období šesti hodin v jednotlivých fázích během celého sledovaného období je vykreslen v Graf 32. V grafu jsou dále zobrazeny extrémní hodnoty. Detailní četnost hodnot účinníku v jednotlivých pásmech zobrazuje Graf 33

Vidíme, že fáze L1 má pouze induktivní charakter a fáze L2 a L3 naopak kapacitní. Tato skutečnost je dána tím, že se jedná o oblast s rodinnými domky, kde se trojfázové spotřebiče nachází pouze výjimečně. Hodnoty účinníku ve fázi L1 se nachází v pásmech 0,949 – 0,9 a 0,899 – 0,8 ind. Fáze L2 a L3 se hodnotami svých účinníků nachází téměř ve všech stanovených pásmech kapacitního charakteru.



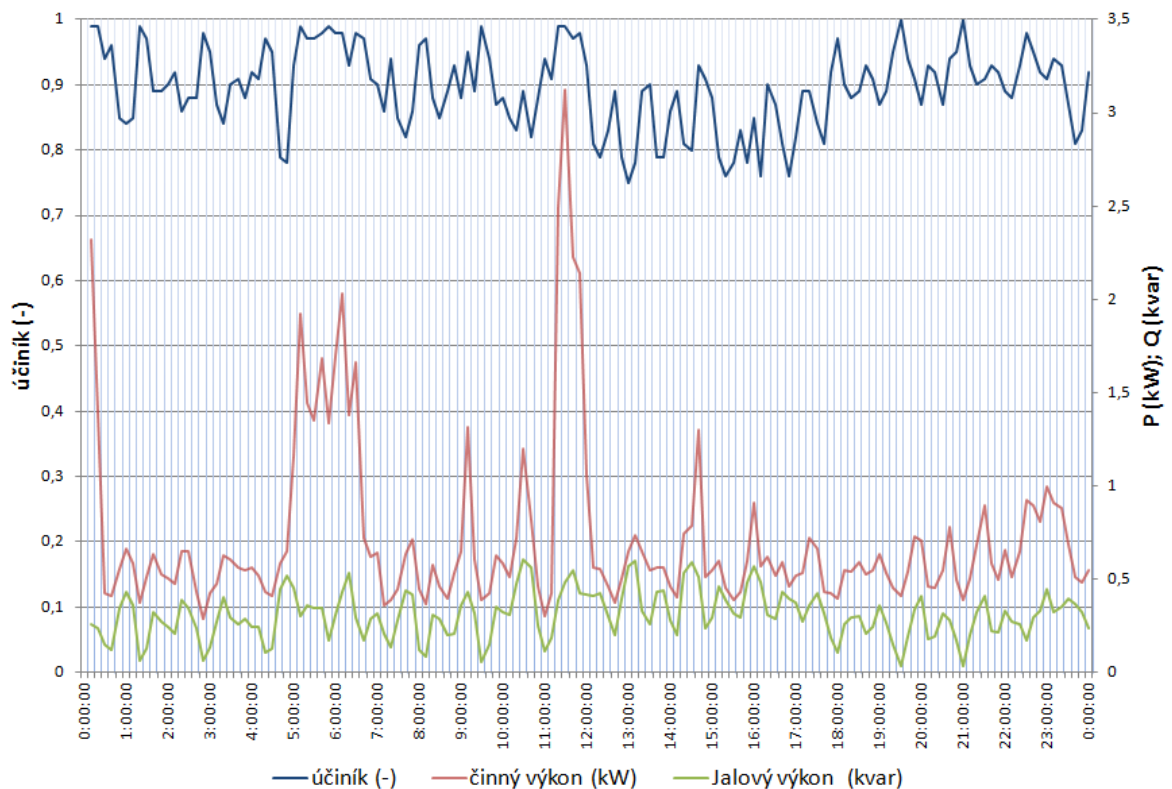
Graf 32: TS 3.2 průběh účinníku L1, L2, L3 v 6-ti hodinových intervalech

	L1	L2	L3
Třída	Četnost %	Četnost %	Četnost %
1-0,95 cap	0	0	32
0,949-0,9 cap	0	50	18
0,899-0,8 cap.	0	36	41
0,799-0,7 cap.	0	9	0
0,699-0,6 cap.	0	0	5
0,599-0,5 cap.	0	0	0
0,499-0 cap.	0	5	5
0,499-0 ind.	0	0	0
0,599-0,5 ind.	0	0	0
0,699-0,6 ind.	0	0	0
0,799-0,7 ind.	0	0	0
0,899-0,8 ind.	59	0	0
0,949-0,9 ind.	41	0	0
1-0,95 ind.	0	0	0

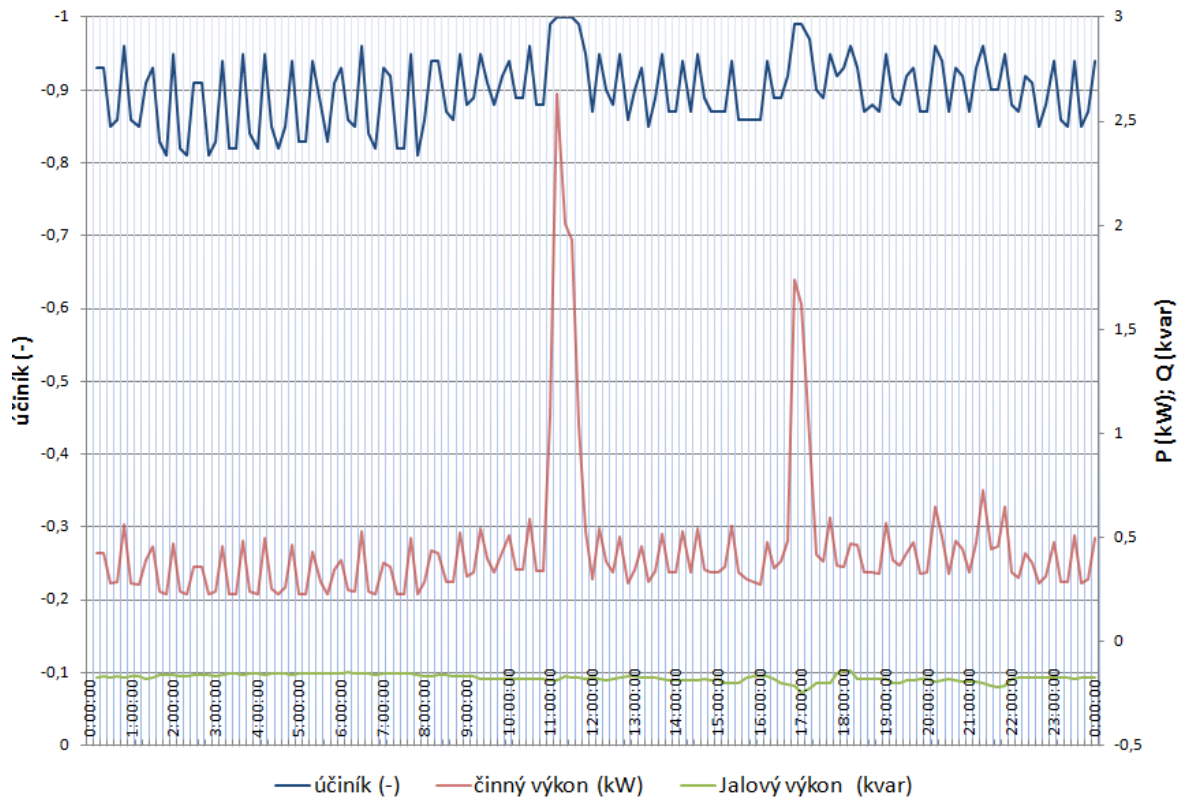


Graf 33: Histogram - TS 3.2 - přehled účinníků L1, L2, L3

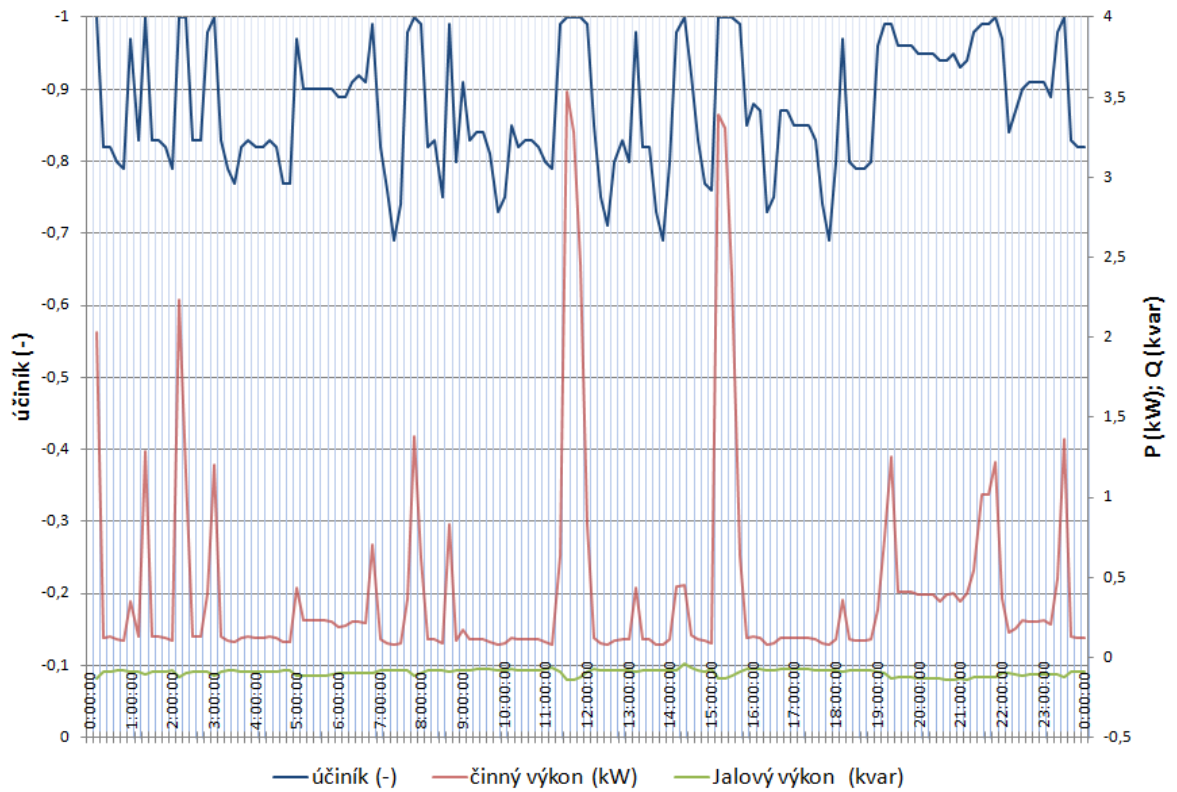
Detailní informaci o stavu účinníku opět poskytnou průběhy určené v deseti minutových intervalech. Pro názornost vykreslíme průběhy pro všechny fáze v průběhu jednoho dne, kde pro přehlednost má Graf 35 a Graf 36 obrácené pořadí svislé osy kde jsou vyneseny hodnoty účinníku.



Graf 34: TS 3.2 průběh účinníku L1 v 10-ti, minutových intervalech - 26. 4.



Graf 35: TS 3.2 průběh účinníku L2 v 10-ti, minutových intervalech - 26. 4.



Graf 36: TS 3.2 průběh účinníku L3 v 10-ti, minutových intervalech - 26. 4.

5.3.3 Shrnutí měření v distribuční síti NN

Z analýzy jednotlivých odběrných míst jsme zjistili, že účinník odběratelů je velmi variabilní parametr. Z měřeného vzorku 41 odběrných míst jsme do analýzy neuvažovali 7 odběratelů, kteří vykazovali příliš malé odběry energie a to zejména z důvodu zamezení zkreslení naměřených dat. U poloviny z 34 analyzovaných odběrných míst se účinník pohyboval v rozmezí 0,95-1 inductivního charakteru za vyhodnocované šestihodinové intervaly. Toto je tedy část odběratelů, kteří splňují standardní předpoklad hodnoty účinníku. V detailní analýze jednotlivých odběrných míst kde je vyhodnocovaný interval šest hodin se výjimečně vyskytují i hodnoty v nejhorsích mezích účinníku. Zjistili jsme, že některé z těchto hodnot jsou naměřeny v období s nižším odběr energie. Z tohoto důvodu jsme dále rozdělily analýzu na odběrná místa, která spotřebovali energii do 500 kWh a kategorii nad 500 kWh za sledované období.

U odběrných míst do 500 kWh je účinník za vyhodnocované období téměř ve většině případů vyšší než 0,85. Ovšem nabývá jak inductivní tak i kapacitního charakteru. V této kategorii dodržuje neutrální pásmo účinníku 48 % odběrných míst. Většina zbylých odběratelů se nachází v rozmezí 1 – 0,95 kapacitního charakteru. Detailní rozdělení je zobrazeno v Graf 6. Tato skutečnost může být způsobená množstvím nelineárních spotřebičů, která jsou pro tyto odběratele typická. Další příčinou je i skutečnost že napájecí síť je tvořena kabely, které se vyznačují kapacitním charakterem

Hlavním rozdílem u odběrných míst, které spotřebovali více jak 500 kWh je, že všechny hodnoty účinníku jsou inductivního charakteru. Příčinou zde je pravděpodobnost, že malá nelineární zařízení, která díky svým elektronickým obvodům disponují kapacitním charakterem, netvoří tak velkou část odběru energie jako tomu bylo v předchozí kategorii. V této skupině neutrální pásmo účinníku dodržuje více jak 50 % odběratelů. Zbylá odběrná místa odebírají energii s hodnotou účinníku v rozmezí od 0,9 do 0,8. Výjimku tvoří pouze jedno odběrné místo s hodnotou účinníku v pásmu 0,599 – 0,5. Toto odběrné místo by bylo vhodné analyzovat v delším časovém úseku. Přesné rozdělení četností hodnot účinníku je uvedeno v Graf 7.

Nyní se zaměříme čistě na naměřená data bez stanovování obecných závěrů. Z měření na vývodech trafostanic jsme zjistili podobnou skutečnost jako tomu je u dat z jednotlivých

odběrných míst. Kapacitní charakter účinníku se vyskytuje především v oblastech s nižšími hodnotami odběru elektrické energie. V našem případě se toto týká zejména lokality s rodinnými domy kde je předpoklad vysokého počtu nelineárních spotřebičů. Na vývodech TS, které napájí odběrná místa s vyšší spotřebou energie, nabýval účinník především induktivního charakteru. Tyto závěry se ovšem týkají pouze konkrétních případů, jelikož v jiných lokalitách by se mohl charakter výrazně lišit a to především u odběratelů s vyšší energetickou náročností. Vztáhneme-li naměřené výsledky k obecně známému předpokladu, že odběr v síti je uskutečňován s hodnotou účinníku v rozmezí 0,95 – 1 ind., dojdeme k závěru, že data z omezeného vzorku odběratelů a lokalit tuto skutečnost nepotvrzují. Nejčastěji se uskutečňují odběry s hodnotou účinníku v rozmezí 0,899 – 0,8 a 0,949 – 0,9 induktivního charakteru, kde první skupina je početnější. Z měření vyplývá otázka, po jaké době by měla data být vyhodnocována, aby se omezil počet dat zatížených chybou měření.

5.3.4 Vliv malých fotovoltaických elektráren na účinník

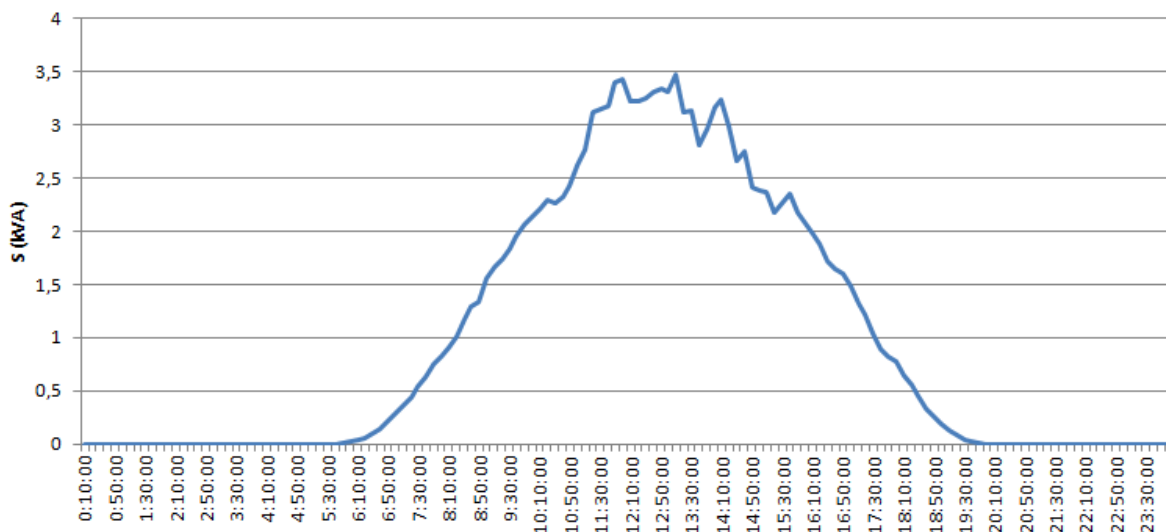
Výroba elektrické energie z obnovitelných zdrojů je v současné době velmi diskutované aktuální téma. Jednou z možností je konverze sluneční energie pomocí fotovoltaického jevu na energii elektrickou. Názory na fotovoltaické elektrárny jsou velmi různorodé, jelikož mají mnoho kladných, ale i záporných stránek. V této části se pokusíme zjistit, jaký následek by s sebou neslo zvýšené pokrytí malých fotovoltaických elektráren. Cílem není vyšetřit rozsáhlé dopady na síť, spíše se omezíme na jednoduchou možnost, jak mohou fotovoltaické elektrárny ovlivnit současné hodnoty účinníku v distribučních sítích NN.

Napětí v síti je lokální parametr, který velmi úzce souvisí s jalovým výkonem (na rozdíl od frekvence, která je v celé soustavě stejná). O účinníku můžeme také říci, že podává informaci o množství přenášené jalové energie a z tohoto důvodu souvisí i s napětím. Zde se objevuje jedna z výhod obnovitelných decentralizovaných zdrojů výroby elektrické energie, kterou je možnost lokálně stabilizovat napětí v síti.

Fotovoltaické panely generují stejnosměrné napětí a proud, které je nutné před vstupem do elektrické sítě upravit na síťové parametry, kterými jsou frekvence a napětí. K tomuto účelu slouží měnič napětí. Měníče napětí v současné době umožňují dodávku energie do sítě s různými hodnotami účinníku. Pokud není výrobce s distributorem dohodnut jinak, je

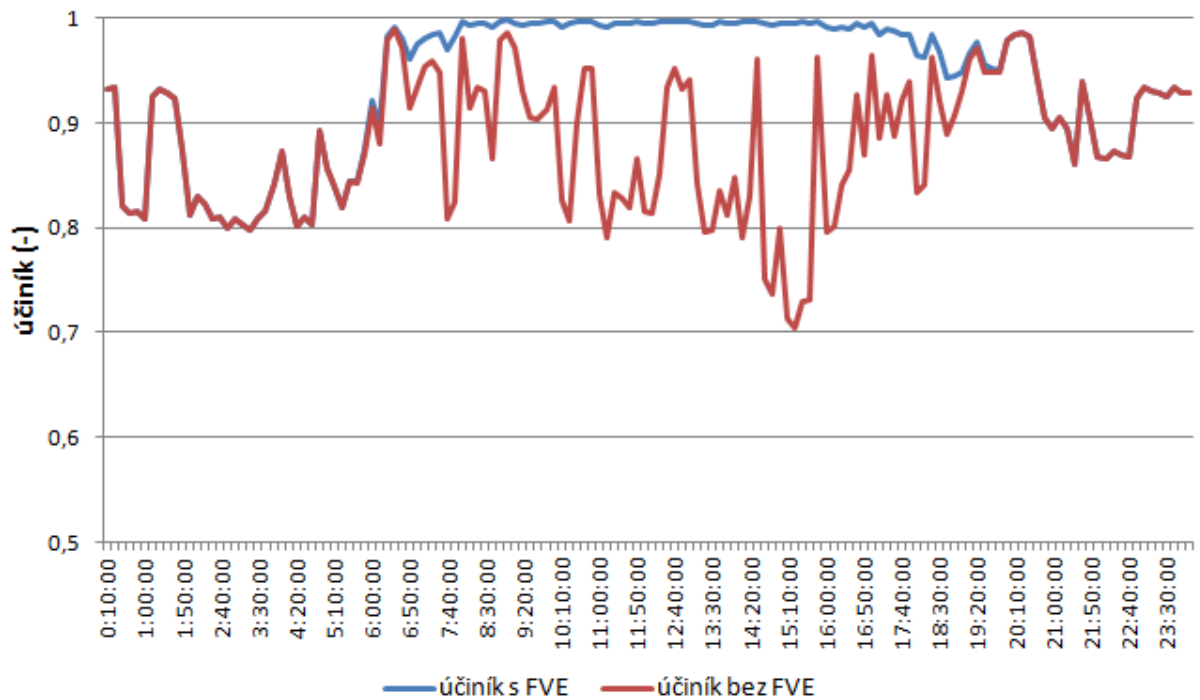
stanovena mez 0,9 – 0,95 ind. Nyní se zaměříme na vliv, který by měla zvýšená koncentrace fotovoltaických elektráren menších výkonů (s různým nastavením měniče napětí) na účinník. Uvedeme situaci s měničem dodávající energii s účinníkem rovným jedné, dále pak s induktivním charakterem. Posledním příkladem bude úvaha, kdy nastavení účinníku bude řízené, dle aktuálních hodnot účinníku v síti. V potaz nebereme problematiku související se zapojením elektráren a další komplikované oblasti týkající se fotovoltaických elektráren, omezíme se pouze na změny účinníku.

Analyzovaný model je postaven na reálných hodnotách naměřených na jednom vývodu trafostanice, který napájí rodinné domy. Na těchto domech předpokládáme instalaci malé fotovoltaické elektrárny. Jako zdroj dat o výkonech generovaných fotovoltaickými elektrárnami nám posloužila data z reálného měření jedné fotovoltaické elektrárny o výkonu 5 kWp. Měření se uskutečnilo v dubnu minulého roku. Z tohoto měření jsme zprůměrovali průměrný zisk energie během jednoho dne a požili ho pro náš model. Průběh výkonu dodávaného do sítě z jedné fotovoltaické elektrárny je zobrazen na Graf 37. Měření účinníku se uskutečnilo 23. 4. 2014.



Graf 37: Průběh výkonu dodávaného do sítě z FVE

Z Graf 37 vidíme průběh dodávaného výkonu do sítě, z tohoto také vyplývá skutečnost časového omezení, kdy fotovoltaické elektrárny mohou ovlivnit průběh účinníku. Tato skutečnost je zachycena i v první modelové situaci, kdy elektrárny dodávají výkon s účinníkem rovným jedné, viz Graf 38. Elektrárny dodávají do sítě pouze činný výkon.

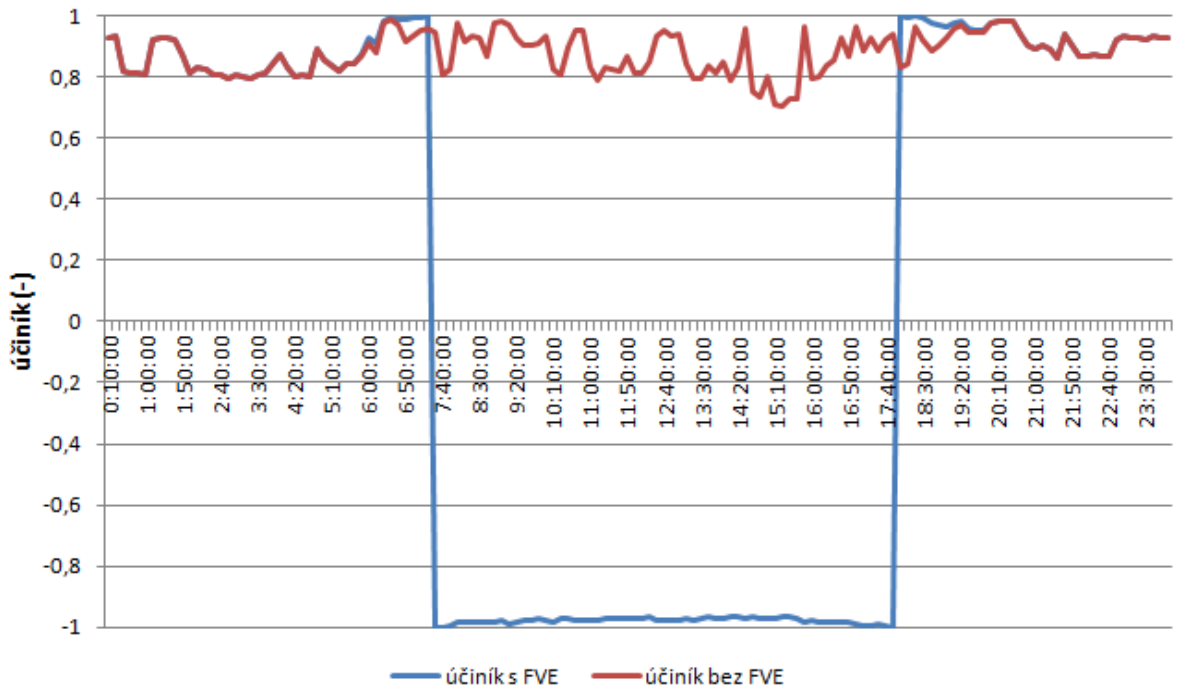


Graf 38: Vliv fotovoltaických elektráren s účinníkem 1

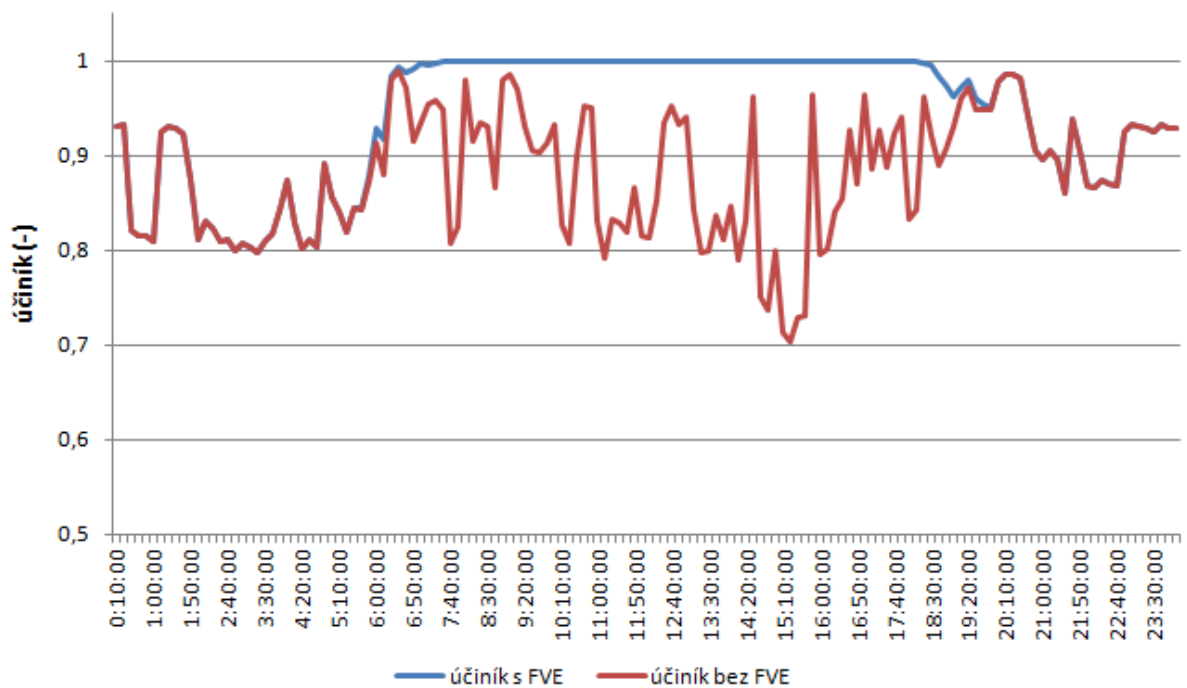
Průběh účinníku za stávající situace, kdy účinník má induktivní charakter je vykreslen červenou barvou. Modrá barva modeluje změnu účinníku za přítomnosti fotovoltaických elektráren. Je zřejmé, že účinník je ovlivněn pouze během dne, kdy elektrárny generují elektrickou energii. Účinník se v době dodávky energie z elektrárny blíží jedné, ale jelikož jsou přítomny i jalové odběry energie hodnoty jedna nedosáhne.

Situace kdy elektrárny dodávají do sítě výkon s účinníkem jiným než jedna, je do sítě dodávám i jalový výkon, který se v závislosti na charakteru odběru kompenzuje, nebo naopak zvyšuje. Příklad překompenzované účinníku v síti zobrazuje Graf 39. Tento jev je zapříčiněn, tím že induktivní dodávka elektrické energie se chová jako kapacitní odběr.

Nejlepší situace nastává, je-li hodnota účinníku fotovoltaických elektráren řízena aktuální spotřebou. Tak docílíme skutečnosti, že elektrárna výsledný účinník v síti nepřekompenzuje. Modelový průběh takto řízeného účinníku zobrazuje Graf 40.



Graf 39: Vliv fotovoltaických elektráren s účinníkem 0,97 ind.



Graf 40: Vliv fotovoltaických elektráren s řízeným účinníkem

Z výše uvedených průběhů vyplývá, že fotovoltaické elektrárny v době výroby energie mohou ovlivnit celkový účinník kladně i záporně v závislosti na velikosti vyrobené energie.

6 Závěr

Práce si klade za cíl analyzovat stav účinníku v distribučních sítích nízkého napětí současné doby, která se vyznačuje dynamickým vývojem. Tento rychlý technologický pokrok je způsoben snahou o maximalizaci účinnosti procesů, které povedou k snížení energetické náročnosti a tím i dopadům na životní prostředí. Výsledkem jsou zařízení, která pracují efektivněji se sníženou spotřebou elektrické energie. Zařízení disponují také nižší materiálovou náročností čímž se stávají ekologičtější. Tyto zařízení obecně vykazují nelineární charakter a se změnou spotřebičů se také mění charakter odběru energie. Otázkou je, do jaké míry tím je ovlivněná současná představa o účinníku, která předpokládá, že odběry elektrické energie se uskutečňují s hodnotou $1 - 0,95$ induktivního charakteru.

Teoretická část práce tvoří přehled technických předpokladů v oblasti problematiky teorie účinník, jejichž znalost je důležitá k analýze naměřených dat a následného vyvození výsledků. Jedná se především o teorii výkonu, dle kterých je účinník definován. Dále je zde uvedena teorie o metodách měření, druzích odběratelů a současných požadavcích na hodnoty účinníku.

Praktická část práce vychází z reálného měření v distribuční síti, které bylo uskutečněno po dobu jednoho měsíce. Měřeno bylo celkem 41 odběrných míst a 5 vývodů trafostanic. Odběrná místa byla zvolena tak, aby byl pokryt co nejrozmanitější charakter odběratelů. Pro hodnocení účinníku, bylo stanoveno šest pásem účinníku uvedených v Tabulka 1. Celkem bylo k analýze vybráno 34 odběrných, které měli dostatečnou velikost odběru elektrické energie. Analýza je dále rozdělena na odběrná místa s odebranou energií do 500 kWh a nad 500 kWh. Dále jsou analyzovány příslušné vývody trafostanic a v poslední části je uvedena teorie, jak by byl ovlivněn účinník při zvýšené koncentraci malých fotovoltaických elektráren.

Z analýzy naměřených dat odběrných míst vyplývá, že účinník v jednotlivých místech se může velmi lišit. To je samozřejmě dáno skutečností, že každý odběratel má jinou skladbu spotřebičů a tím specifický charakter odběru. Odběrná místa v kategorii do 500 kWh téměř ve všech případech vykazují hodnotu účinníku za sledované období nad 0,85. Specifikem této kategorie je velká četnost odběrů kapacitního charakteru. Celkem 48 % odběrných míst dodržuje pásmo účinníku $1 - 0,95$ induktivního charakteru. Zbývá většina odběrů je

v pásmu $1 - 0,95$ kapacitního charakteru a několik málo odběrů v pásmu $0,899 - 0,8$ induktivního charakteru. Detailní četnost hodnot účinníku v jednotlivých pásmech zobrazuje Graf 6.

U odběrných míst s odebranou energií nad 500 kWh je hlavní rozdíl především skutečnost, že odběry jsou induktivního charakteru. Polovina odběratelů z této kategorie dodržuje pásmo účinníku $1 - 0,95$ induktivního charakteru. Zbylá odběrná místa se pohybují především v rozmezí od 0,9 do 0,8. Detailní četnost hodnot účinníku v jednotlivých pásmech zobrazuje Graf 8.

Měření vývodu trafostanic bylo uskutečněno po dobu pěti dní. Z analýzy naměřených dat na vývodech trafostanic jsme zjistili nejpočetnější skupina tj. 47 % hodnot je v induktivním pásmu $0,899 - 0,8$. Dále 40 % hodnot je v rozmezí $0,949 - 0,9$ induktivního charakteru a zbylých 13 % je kapacitního charakteru v mezích $0,899 - 0,8$. V předpokládaném pásmu $1 - 0,95$ se nevyskytoval ani jeden vývod.

Detailněji je měření shrnuto v kapitole 5.3.3. Z uskutečněného měření vyplývá, že doposud uvažovaný předpoklad odběrů elektrické energie s hodnotou $1 - 0,95$ induktivního charakteru již není zcela platný. Dále jsme ukázali, že kapacitní charakter se čteněji vyskytuje u odběrů menších výkonů, viz Tabulka 2. Tato skutečnost je pravděpodobně dána tím, že u malých odběrů je velký podíl odběru energie tvořen spotřební elektronikou, která vykazuje kapacitní charakter způsobený předřadnými elektronickými odvody. Další faktor ovlivňující charakter odběru je kabelová napájecí síť. U vyšších hodnot odběrů je charakter účinníku především induktivní. Ovšem vyvození obecného závěru není vhodné, jelikož vzhledem k mohutnosti elektrizační soustavy bylo měření provedeno na malém vzorku odběrných míst. Avšak pokud by byly výsledky této práce potvrzeny dalším měřením je vhodné se hodnotou účinníku v sítích NN dále zabývat a rozvíjet oblast průzkumu. Příkladem může být vliv změny obecně uvažované hodnoty 0,95 na výpočty chodu sítě.

Poslední částí práce je úvaha jaký následek na účinník by měl vliv zvýšené koncentrace malých fotovoltaických elektráren. Z charakteru výroby elektrické energie vyplývá, že fotovoltaické elektrárny mohou ovlivnit účinník pouze během dne. Hodnoty účinníku mohou ovlivnit jak kladně tak i záporně v závislosti na nastavení střídače a množství generované

energie v poměru k aktuálnímu zatížení sítě. Ideálních výsledků by bylo dosaženo za stavu, kdyby účinník fotovoltaické elektrárny byl řízen v závislosti na okamžité hodnotě účinníku v síti. Tímto by bylo dosaženo optimální kompenzace.

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] ČSN IEC 60050-131:2005. Mezinárodní elektrotechnický slovník: Část 131: Teorie obvodů.
- [2] Energetické rušení v distribučních a průmyslových sítích, Jaroslav Žáček
- [3] DRECHSLER, Richard. Měření, hodnocení a kvalita odběru elektrické energie v provozu tyristorových zařízení. 1. vyd. Praha: SNTL, 1982, 134 s.
- [4] ČERNÝ, Václav. Čistě činné zatížení – a přece jalový výkon?. ELEKTRO: odborný časopis pro elektrotechniku. 2003, č. 12, s. 2.
- [5] Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 5/2013 ze dne 27. listopadu 2013, kterým se stanovují regulované ceny související s dodávkou elektřiny (<http://www.eru.cz/cs/-/cenove-rozhodnuti-c-5-2013>)
- [6] Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 6/2013 ze dne 27. listopadu 2013, kterým se stanovují regulované ceny související s dodávkou elektřiny odběratelům ze sítí nízkého napětí. (<http://www.eru.cz/cs/-/cenove-rozhodnuti-c-6-2013>)
- [7] ČSN EN 61000-3-2 ED.2 (333432) Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 3-2: Meze - Meze pro emise harmonického proudu (zařízení se vstupním fázovým proudem do 16 A včetně)
- [8] Vyhláška č. 82/2011 Sb. ze dne 17. března 2011 o měření elektřiny a o způsobu stanovení náhrady škody při neoprávněném odběru, neoprávněné dodávce, neoprávněném přenosu nebo neoprávněné distribuci elektřiny (Energetický zákon č. 458/2000 Sb.)
- [9] Český metrologický institut, I. Opatření obecné povahy číslo: 0111-OOP-C022-11 č.j. 0313/022/11/Pos.
- [10] TLUSTÝ, Josef, Jan ŠVEC, Petr BANNERT, Zbyněk BRETTSCHEIDER, Zbyněk KOCUR, Petr MAREČEK, Zdeněk MÜLLER a Tomáš SÝKORA. Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí :. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 2011, 253 s. ISBN 978-80-01-04939-6.
- [11] CHRAPČIAK, Igor. Elektroměry pro měření spotřeby i analýzu kvality elektrické energie AUUTOMA: odborný časopis pro automatizační techniku. 2011, č. 11, s. 2.

8 Seznam vyobrazení a příloh

- Seznam obrázku

Obrázek 1: Průběh periody napájecího napětí a odebíraného proudu s harmonickým charakterem a fázovým posunem φ	12
Obrázek 2: Průběh okamžitého výkonu během periody napájecího napětí.....	14
Obrázek 3: Trojúhelník výkonů při harmonických podmínkách.....	14
Obrázek 4: Průběh výkonů pro odporovou zátěž za harmonických podmínek	15
Obrázek 5: Průběh činné a jalové složky okamžitého výkonu při harmonických podmínkách, rovnice 2.12.....	16
Obrázek 6: Průběh výkonů pro induktivní zátěž při harmonických podmínkách	17
Obrázek 7: Průběh základní, třetí a páté harmonické	18
Obrázek 8: Deformovaný průběh proudu	19
Obrázek 9: Průběh napětí a proudu nelineárních spotřebičů	20
Obrázek 10: grafický popis tříložkové koncepce výkonu	22
Obrázek 11: Trojfázová symetrická soustava - průběh fázových napětí	23
Obrázek 12: Výkonový trojúhelník při obecných periodických podmínkách	24
Obrázek 13: Aritmetický zdánlivý výkon v trojfázové soustavě.....	25
Obrázek 14: Dvou a tříložková koncepce výkonu	26
Obrázek 15: Grafické znázornění $\cos\varphi = 0,95$	30
Obrázek 16: Síť bez kompenzace (horní) a s kompenzací (kompenzací) jalové energie	31
Obrázek 17: kompenzace účinníku.....	32
Obrázek 18: 4 kvadranty energií měřené elektroměry.....	35
Obrázek 19: Topologie zapojení měření v distribuční síti - obecně.....	37
Obrázek 20: Vstup napětí a proudů do elektroměru	38

- Seznam grafu

Graf 1: Přehled účinníků všech odběrných míst.....	42
Graf 2: Histogram - přehled účinníků - elektroměry	43
Graf 3: Závislost velikosti činné energie na přesnost výpočtu účinníku	44
Graf 4: Závislost velikosti celkové energie na přesnost výpočtu účinníku	44
Graf 5: Přehled účinníku odběrných míst s odběrem < 500 kWh	45

Graf 6: Histogram - přehled účinníku odběrných míst s odběrem < 500 kWh	45
Graf 7: Přehled účinníku odběrných míst s odběrem > 500 kWh	46
Graf 8: Histogram - přehled účinníku odběrných míst s odběrem > 500 kWh	47
Graf 9: Odběrné místo 8 - účinník během 1 týdne.....	48
Graf 10: Histogram - odběrné místo 8	49
Graf 11: Histogram - přehled účinníků - vývody TS.....	50
Graf 12: TS 1.1 průběh účinníku L1, L2, L3 v 6-ti hodinových intervalech.....	51
Graf 13: TS 1.1 průběh účinníku L1 v 10-ti minutových intervalech - 26. 4.	52
Graf 14: Histogram - TS 1.1 - přehled účinníků L1, L2, L3	52
Graf 15: TS 1.1 průběh účinníku L2 v 10-ti minutových intervalech - 26. 4.	53
Graf 16: TS 1.1 průběh účinníku L3 v 10-ti minutových intervalech - 26. 4.	53
Graf 17: TS 1.2 průběh účinníku L1, L2, L3 v 6-ti hodinových intervalech.....	54
Graf 18: Histogram - TS 1.2 - přehled účinníků L1, L2, L3	55
Graf 19: TS 1.2 průběh účinníku L1 v 10-ti minutových intervalech - 26. 4.	55
Graf 20: TS 1.2 průběh účinníku L2 v 10-ti minutových intervalech - 26. 4.	56
Graf 21: TS 1.2 průběh účinníku L2 v 10-ti minutových intervalech - 26. 4.	56
Graf 22: TS 2 průběh účinníku L1, L2, L3 v 6-ti hodinových intervalech.....	57
Graf 23: Histogram - TS 1.2 - přehled účinníků L1, L2, L3	58
Graf 24: TS 2 průběh účinníku L1 v 10-ti minutových intervalech - 27. 4.	58
Graf 25: TS 2 průběh účinníku L2 v 10-ti minutových intervalech - 27. 4.	59
Graf 26: TS 2 průběh účinníku L3 v 10-ti minutových intervalech - 27. 4.	59
Graf 27: TS 2 průběh účinníku L1 v 10-ti, minutových intervalech - 27. 4. omezené THDi	60
Graf 29: Histogram - TS 3.1 - přehled účinníků L1, L2, L3	62
Graf 30: TS 3.1 průběh účinníku L1 v 10-ti, minutových intervalech - 26. 4.	62
Graf 31: TS 3.1 průběh účinníku L2 v 10-ti, minutových intervalech - 26. 4.	63
Graf 32: TS 3.1 průběh účinníku L3 v 10-ti, minutových intervalech - 26. 4.	63
Graf 33: TS 3.2 průběh účinníku L1, L2, L3 v 6-ti hodinových intervalech.....	64
Graf 34: Histogram - TS 3.2 - přehled účinníků L1, L2, L3	65
Graf 34: TS 3.2 průběh účinníku L1 v 10-ti, minutových intervalech - 26. 4.	65
Graf 36: TS 3.2 průběh účinníku L2 v 10-ti, minutových intervalech - 26. 4.	66
Graf 37: TS 3.2 průběh účinníku L3 v 10-ti, minutových intervalech - 26. 4.	66
Graf 37: Průběh výkonu dodávaného do sítě z FVE	69

Graf 38: Vliv fotovoltaických elektráren s účíníkem 1	70
Graf 39: Vliv fotovoltaických elektráren s účíníkem 0,97 ind.	71
Graf 40: Vliv fotovoltaických elektráren s řízeným účíníkem	71
- Seznam tabulek	
Tabulka 1: Procentní přírážka za nedodržení účíníku	31
Tabulka 2: Seznam odběrných míst.....	41
Tabulka 3: Přehled účíníků všech vývodů TS	49
Tabulka 4: Odběr energie z TS 1.1	51
Tabulka 5: Odběr energie z TS 1.2	54
Tabulka 6: Odběr energie z TS 2	57
Tabulka 7: Odběr energie z TS 3.1	61
Tabulka 8: Odběr energie z TS 3.2	64
- Seznam příloh	
Příloha 1: Přehled odběrných míst.....	I
Příloha 1: Detail vybraných vybraných odběrných míst.....	II
Příloha 3: Celkový přehled hodnot účíníku odběrných míst	VIII

9 Přílohy

Příloha 1: Přehled odběrných míst

Elektroměr	Wč	W_kap	W_ind	cos Fi
	(kW.h)	(kvar.h)	(kvar.h)	(-)
elektroměr 1	2040,50	7,25	761,00	0,938
elektroměr 2	162,50	9,75	101,75	0,870
elektroměr 3	231,75	4,25	120,25	0,894
elektroměr 4	430,25	1,50	284,00	0,836
elektroměr 5	253,50	0,00	77,00	0,957
elektroměr 6	7032,25	0,75	3928,75	0,873
elektroměr 7	5992,75	6,75	3505,50	0,864
elektroměr 8	121,25	17,00	3,25	-0,994
elektroměr 9	652,50	30,00	150,50	0,983
elektroměr 10	591,75	0,00	828,50	0,581
elektroměr 11	1345,75	1,25	201,75	0,989
elektroměr 12	524,00	54,50	105,25	0,995
elektroměr 13	193,25	5,75	55,75	0,968
elektroměr 14	3323,50	331,25	410,50	1,000
elektroměr 15	361,50	48,00	7,25	-0,994
elektroměr 16	95,75	12,75	8,75	-0,999
elektroměr 17	176,75	11,25	5,00	-0,999
elektroměr 18	313,00	5,75	65,25	0,982
elektroměr 19	145,25	6,50	15,75	0,998
elektroměr 20	132,75	7,75	15,00	0,999
elektroměr 21	423,50	20,25	36,25	0,999
elektroměr 22	81,75	10,00	5,25	-0,998
elektroměr 23	91,25	9,75	3,25	-0,997
elektroměr 24	265,00	3,50	19,00	0,998
elektroměr 25	129,00	33,75	70,50	0,962
elektroměr 26	82,00	12,25	1,50	-0,992
elektroměr 27	2824,00	0,25	1611,00	0,869
elektroměr 28	148,25	9,25	23,00	0,996
elektroměr 29	1022,50	32,25	45,75	1,000
elektroměr 30	797,75	30,25	48,75	1,000
elektroměr 31	385,75	22,75	54,50	0,997
elektroměr 32	386,75	74,25	18,75	-0,990
elektroměr 33	1128,50	24,00	79,50	0,999
elektroměr 34	1213,50	12,50	603,00	0,899

Tabulka: celkový přehled odběrných míst

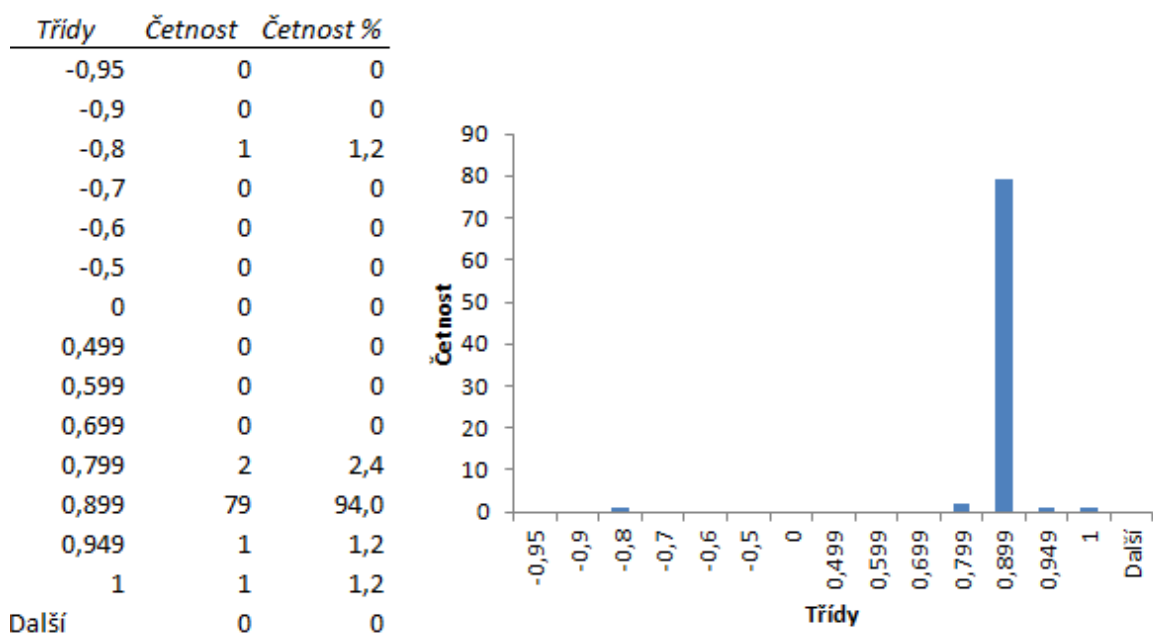
Příloha 2: Detail vybraných odběrných míst

Odběrné místo 4

Tento odběratel za sledované období má celkový odběr

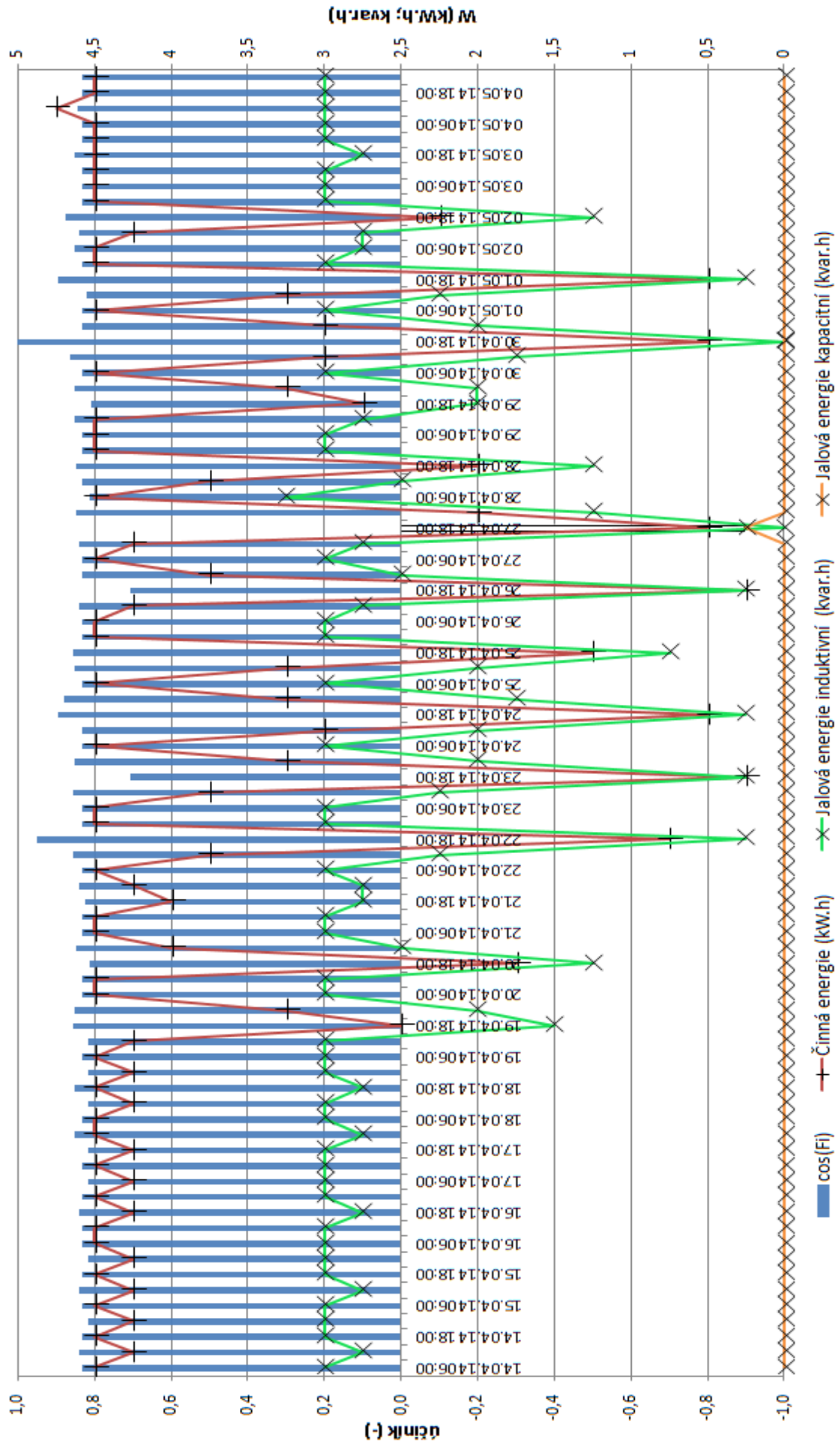
- činné energie 313,5 kWh,
- jalové energie induktivní 205,25 kvarh a 0,25 kvarh kapacitní energie,
- s celkovým účíníkem 0,836

Podrobná četnost hodnot účíníku v 6-ti hodinovém intervalu uspořádána do jednotlivých pásem účíníku je znázorněna pomocí histogramu.

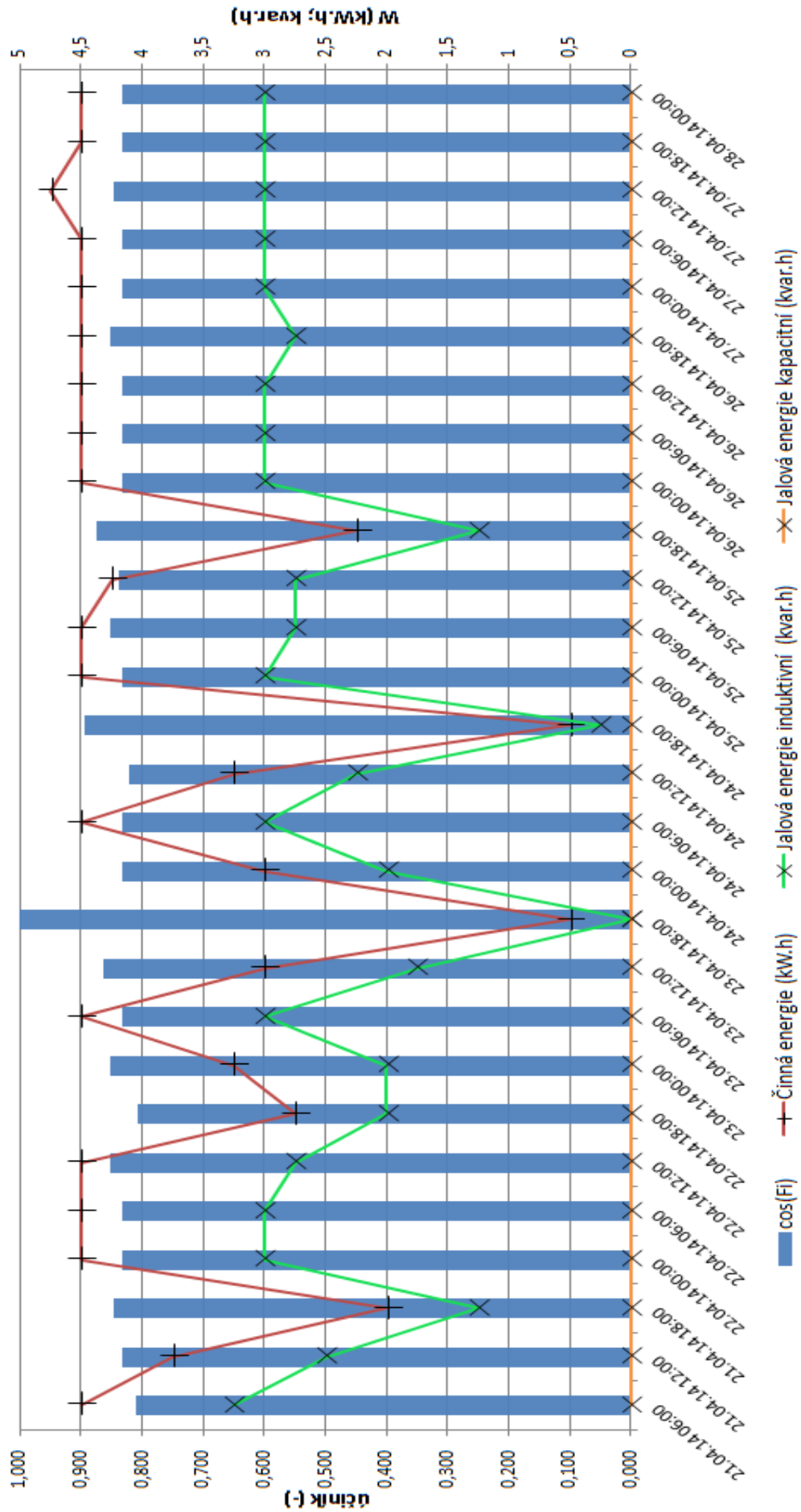


Histogram četnosti výskytu hodnot účíníku – odběrné místo 4

Dále ukážeme průběh účíníku v průběhu tří týdnů a detail jednoho týdne.



Graf: Průběh hodnot účinníku – odběrné místo 4



Graf: Průběh hodnot účinníku – odběrné místo 4

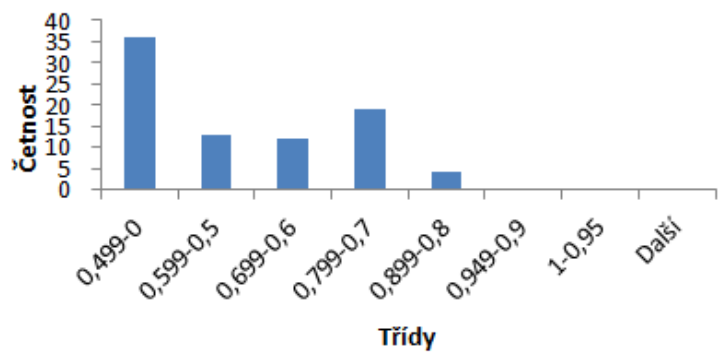
Odběrné místo 10

Tento odběratel za sledované období má celkový odběr

- činné energie 591,75 kWh,
- jalové energie induktivní 828,5 kvarh bez odběru kapacitní energie,
- s celkovým účínkem 0,581.

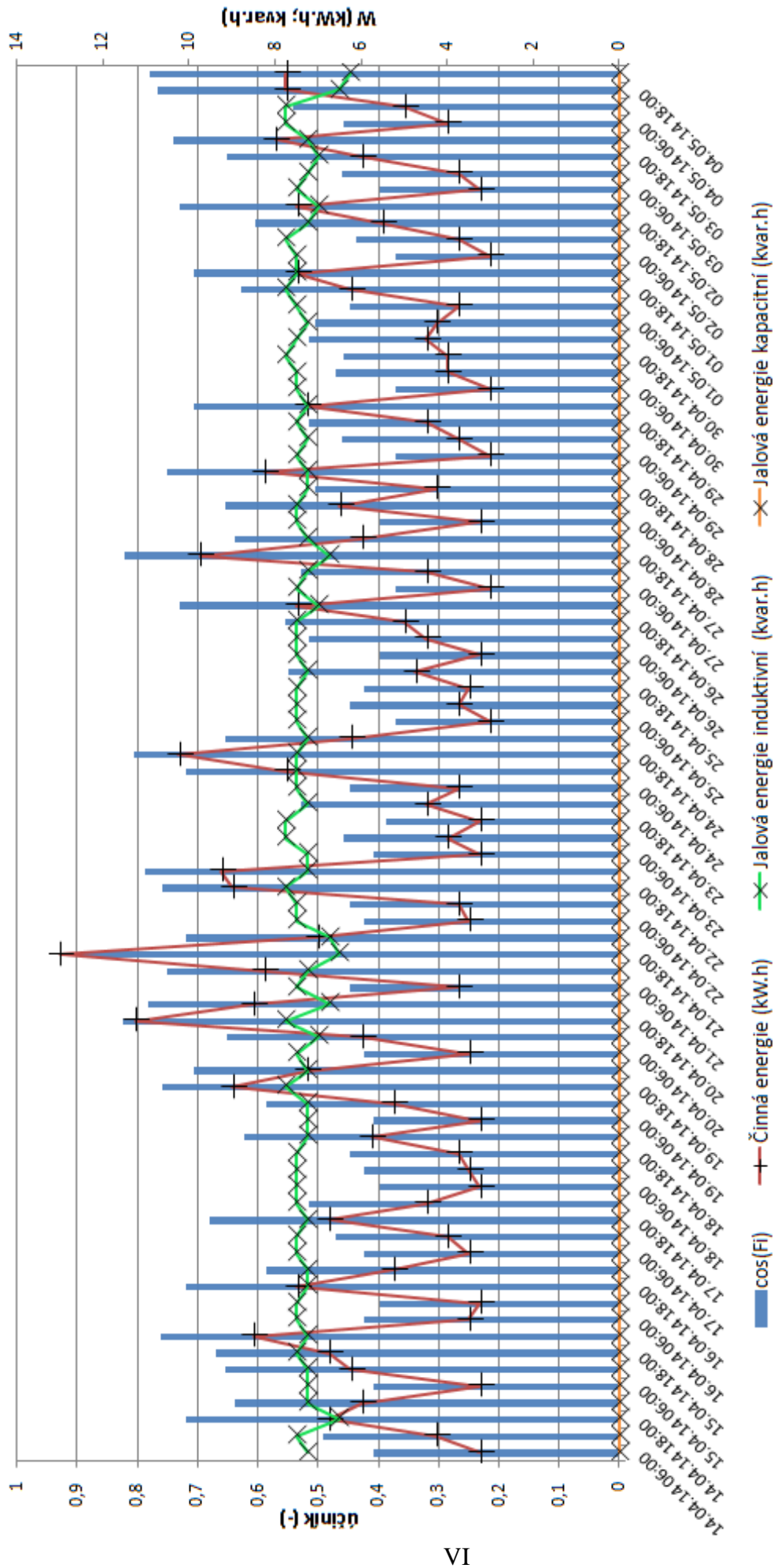
Podrobná četnost hodnot účínku v 6-ti hodinovém intervalu uspořádána do jednotlivých pásem účínku je znázorněna pomocí histogramu.

<i>Třídy</i>	<i>Četnost</i>	<i>Četnost %</i>
0,499-0	36	43
0,599-0,5	13	15
0,699-0,6	12	14
0,799-0,7	19	23
0,899-0,8	4	5
0,949-0,9	0	0
1-0,95	0	0
Další	0	0



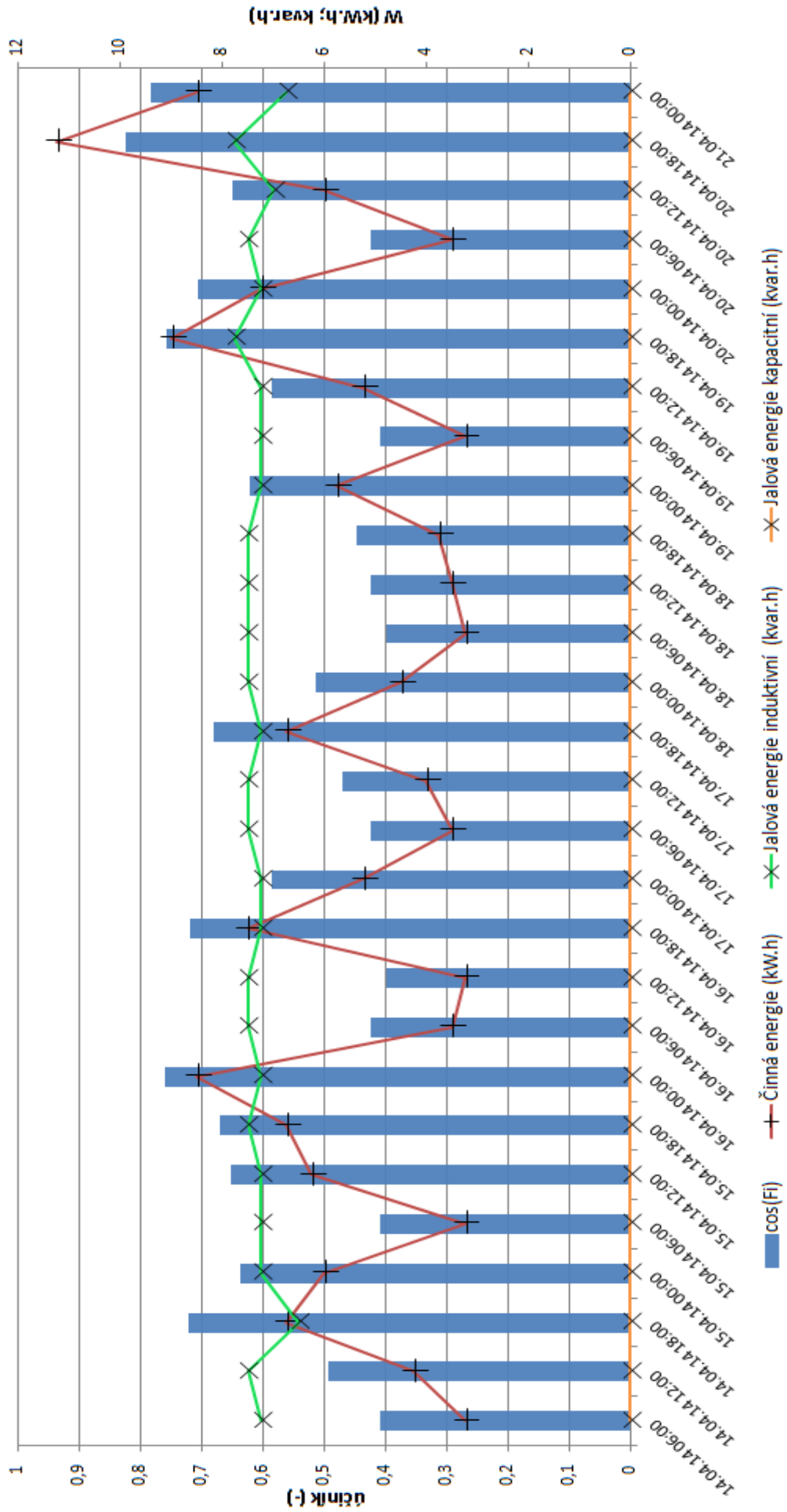
Histogram četnosti výskytu hodnot účínku – odběrné místo 10

Dále ukážeme průběh účínku v průběhu tří týdnů a detail jednoho týdne



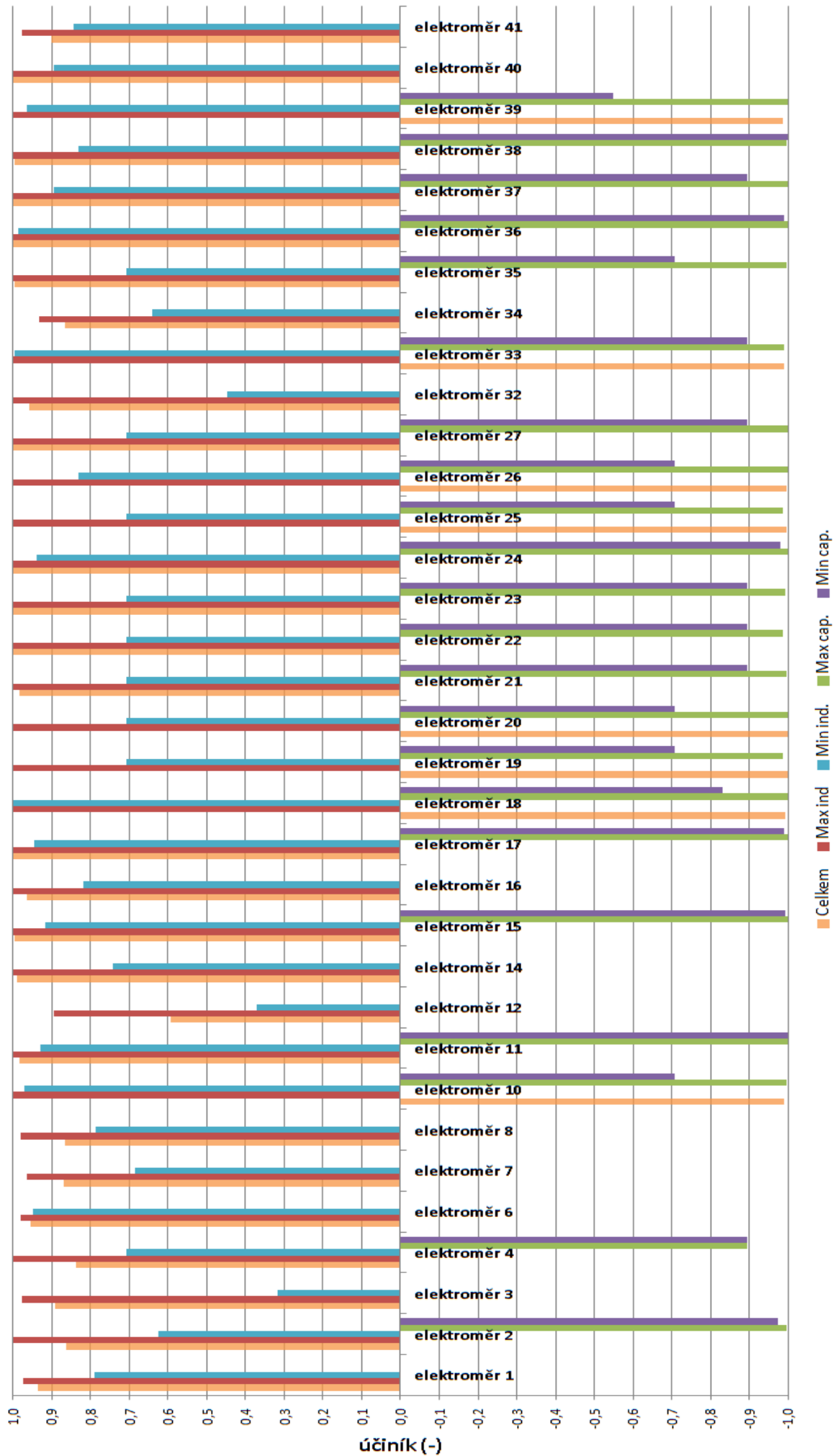
VI

Graf: Průběh hodnot účinníku – odběrné místo 10



Graf: Průběh hodnot účinníku – odběrné místo 10

Příloha 3: Celkový přehled hodnot účinniku odběrných míst



Graf: Celkový přehled hodnot účinniku za sledované období