

# Kvalita



## elektrickéj energie

Peter Szathmáry

1

**ABB**



---

---

# OBSAH

|   |           |
|---|-----------|
| <b>PREDSLOV</b> .....   | 7         |
| <b>1 ÚVOD DO KVALITY ELEKTRICKEJ ENERGIE</b> .....  | <b>8</b>  |
| 1.1 Definícia problému kvality elektrickej energie .....  | 9         |
| 1.2 Kvalita elektrickej energie = kvalita napätia .....   | 10        |
| 1.3 Cena za zníženú kvalitu elektrickej energie.....  | 10        |
| <b>2 KATEGÓRIE ELEKTROMAGNETICKÝCH JAVOV<br/>V ELEKTRIZAČNEJ SÚSTAVE</b> .....                    | <b>15</b> |
| 2.1 Prepätia .....  | 16        |
| 2.1.1 Impulzívne prepätia.....  | 16        |
| 2.1.2 Oscilatívne prepätia .....  | 17        |
| 2.2 Krátkodobé zmeny napätia/prúdu .....  | 18        |
| 2.2.1 Krátkodobé poklesy napätia.....   | 18        |
| 2.2.2 Krátkodobé vzrasty napätia .....  | 19        |
| 2.3 Dlhodobé zmeny napätia/prúdu .....  | 20        |
| 2.3.1 Prepätie sieťovej frekvencie.....   | 20        |
| 2.3.2 Podpätie sieťovej frekvencie.....   | 21        |
| 2.4 Prerušenie napájania.....   | 21        |
| 2.5 Kolísanie napätia.....  | 22        |
| 2.6 Nesymetria napätia/prúdu.....   | 23        |
| 2.7 Deformácia napäťovej/prúdovej vlny.....   | 25        |
| 2.7.1 Deformácia jednosmernou zložkou .....   | 25        |
| 2.7.2 Vyššie harmonické prúdov a napätí .....   | 25        |
| 2.7.3 Medziharmonické napätí a prúdov.....  | 26        |
| 2.7.4 Rušivé impulzy .....  | 27        |
| 2.7.5 Šum .....   | 27        |
| 2.8 Kolísanie frekvencie .....  | 28        |
| <b>3 VYŠŠIE HARMONICKÉ V ELEKTRICKÝCH SIEŤACH</b> .....   | <b>31</b> |
| 3.1 Definícia a popis vyšších harmonických .....  | 32        |
| 3.2 Popis vzniku deformovaných prúdov .....   | 35        |
| 3.3 Popis vzniku deformovaných napätí .....   | 38        |
| 3.4 Spôsoby zobrazenia vyšších harmonických.....  | 40        |
| 3.5 Podiel výroby, distribúcie a spotreby elektrickej energie<br>na generovaní harmonických ..... | 42        |
| 3.6 Pozdĺžna a priečna impedancia a ich spojitost' s vyššími harmonickými .....                   | 44        |
| <b>4 ZVLÁŠTNOSTI VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH</b> .....   | <b>47</b> |
| 4.1 Rozdielnosť medzi vyššími harmonickými a prepätiami.....                                      | 47        |
| 4.2 Efektívna a stredná hodnota deformovaného napätia/prúdu.....                                  | 48        |
| 4.3 Výkonová bilancia deformovaných priebehov napätí a prúdov .....                               | 50        |
| 4.4 Účinník a skutočný účinník.....   | 55        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 4.5      | Veličiny charakterizujúce vyššie harmonické .....                   | 56         |
| 4.6      | Triplen harmonics .....   | 60         |
| <b>5</b> | <b>ZDROJE VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH .....</b>                            | <b>67</b>  |
| 5.1      | Elektronicky spínané zdroje jednosmerného napätia .....             | 67         |
| 5.2      | Jednofázový usmerňovač v mostíkovom zapojení .....                  | 69         |
| 5.3      | Trojfázový usmerňovač v mostíkovom zapojení .....                   | 70         |
| 5.4      | Jednosmerné a striedavé pohony .....                                | 73         |
| 5.5      | Oblúková pec .....  | 75         |
| 5.6      | Kompaktné žiarivky s elektronickým predradníkom .....               | 76         |
| 5.7      | Transformátory .....  | 77         |
| 5.8      | Hromadné diaľkové ovládanie 18 .....                                | 78         |
| <b>6</b> | <b>ÚČINKY VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH .....</b>                            | <b>81</b>  |
| 6.1      | Nárast efektívnej hodnoty deformovaného priebehu .....              | 81         |
| 6.2      | Nárast maximálnej hodnoty deformovaného priebehu .....              | 83         |
| 6.3      | Chybné meranie efektívnej hodnoty napätia .....                     | 84         |
| 6.4      | Paralelná rezonancia .....  | 85         |
| 6.5      | Sériová rezonancia .....  | 86         |
| 6.6      | Preťaženie neutrálneho vodiča .....                                 | 88         |
| 6.7      | Vplyv vyšších harmonických na kondenzátorové batérie .....          | 88         |
| 6.8      | Vplyv vyšších harmonických na transformátory .....                  | 89         |
| 6.9      | Skin efekt .....  | 89         |
| 6.10     | Vplyv vyšších harmonických na motory .....                          | 90         |
| 6.11     | Poruchy pri prechode nulou .....                                    | 90         |
| <b>7</b> | <b>ZNÍŽENIE ÚČINKOV VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH .....</b>                  | <b>93</b>  |
| 7.1      | Zníženie prúdov vyšších harmonických generovaných spotrebičmi ..... | 93         |
| 7.2      | Presun frekvenčnej odozvy systému .....                             | 94         |
| 7.3      | Filtre .....  | 94         |
| 7.3.1    | Pasívne filtre .....  | 94         |
| 7.3.2    | Aktívne filtre .....  | 95         |
| <b>8</b> | <b>ŠTANDARDIZÁCIA .....</b>   | <b>99</b>  |
| 8.1      | Limity platné pre nn sieť .....                                     | 99         |
| 8.1.1    | Napätia harmonických frekvencií .....                               | 99         |
| 8.1.2    | Napätia medziharmonických frekvencií .....                          | 100        |
| 8.2      | Limity platné pre vn sieť .....                                     | 101        |
| 8.2.1    | Napätia harmonických frekvencií .....                               | 101        |
| 8.2.2    | Napätia medziharmonických frekvencií .....                          | 102        |
| <b>9</b> | <b>VÝSLEDKY MERANÍ VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH VO SVETE</b>                |            |
|          | <b>A NA SLOVENSKU .....</b>   | <b>105</b> |
| 9.1      | Výskyt vyšších harmonických v európskych krajinách .....            | 105        |
| 9.2      | Výskyt vyšších harmonických v sieťach na Slovensku .....            | 106        |
|          | <b>ZÁVER .....</b>  | <b>115</b> |
|          | <b>INDEX .....</b>  | <b>116</b> |
|          | <b>LITERATÚRA .....</b>   | <b>117</b> |

---

## **PREDSLOV**

Vážení čitatelia,

do rúk sa vám dostáva publikácia, ktorá sa zaoberá kvalitou elektrickej energie. Uvedená oblasť nie je novoutvorená, jej základy boli postavené už začiatkom 20. storočia. Avšak jej relevantnosť narástla až ku koncu minulého storočia.

Samotná oblasť kvality elektrickej energie svojou mohutnosťou zasahuje prakticky do každej sféry elektroenergetiky a preto autor publikácie si kládol za cieľ uviesť jednoznačnú klasifikáciu tejto oblasti, ktorá napomôže rýchlejšej identifikácii a následne riešeniu existujúceho problému.

Ďalším predsavzatím autora bolo zamerať sa na jednu z kategórií kvality elektrickej energie – napätia a prúdy vyšších harmonických. V druhom vydaní publikácie bude rozšírená oblasť kvality elektrickej energie o ostatné kategórie.

V súčasnosti mnoho odborníkov nepozná zákonitosti späté s vyššími harmonickými a navyše, problémy so zhoršeným priebehom napätia/prúdu sa snažia pochopiť na základe klasických metód, platné pre čisté sínusové priebehy. Pri riešení týchto problémov je nevyhnutné uvažovať o atypických postupoch a riešeniach, ktoré sa môžu radikálne odlišovať od klasických metód.

Táto publikácia je venovaná širokej odbornej komunite, predovšetkým odborníkom z energetickej praxe a všetkým tým, ktorí majú záujem neustále rozširovať, prehľbovať a aktualizovať svoje vedomosti a znalosti v oblasti kvality elektrickej energie a s tým súvisiacej oblasti napätí a prúdov vyšších harmonických.

autor

---

# 1 ÚVOD DO KVALITY ELEKTRICKEJ ENERGIE

V súčasnom období sa kladie požiadavka nielen na kvantitu vyrábaných produktov, ale čoraz viac sa vyžaduje ich vysoká kvalita. Elektrickú energiu taktiež zaraďujeme medzi produkty, hoci ako výrobok má veľmi špecifické vlastnosti. Samozrejme, napriek existujúcim špecifikám musí ako výsledný produkt spĺňať prísne kritéria kvality.

Koncom osemdesiatych rokov 20. storočia sa čoraz častejšie začínalo v odborných kruhoch diskutovať o kvalite elektrickej energie. O tomto pojme diskutovali nielen odborníci podieľajúci sa na výrobe elektrickej energie, ale aj odborníci zo spotrebiteľskej sféry. Uvedené príčiny vyvolali zvýšený záujem o problematiku kvality elektrickej energie. Záujem narastal predovšetkým z nasledujúcich príčin:

- V praxi sa začali uplatňovať zariadenia, ktoré boli „citlivejšie“ na úroveň kvality elektrickej energie ako zariadenia inštalované v minulosti. Výrobcovia spotrebiteľov začali využívať výhody mikroprocesorovej techniky a elektronických zariadení, ktoré boli citlivé na rôzne druhy rušenia.
- Narastala požiadavka používania zariadení, ktoré by mali vyššiu účinnosť a predovšetkým lepšiu regulovateľnosť. Uvedené požiadavky spôsobili zvýšenie výskytu vyšších harmonických v elektrických rozvodoch podnikov a taktiež v samotnej elektrizačnej sústave.
- Používanie kondenzátorových batérií na zlepšenie účinníka u odberateľa a vyššie harmonické v sieťach spôsobili nárast problémov spätých s kvalitou elektrickej energie.
- Koncoví užívatelia elektrickej energie začali byť viacej informovaní o javoch, ktoré boli spojené s kvalitou elektrickej energie. Išlo predovšetkým o prerušenia, kolísania a poklesy elektrického napätia, o šírenie vyšších harmonických a pod. Spotrebiteľia elektrickej energie preto začali „tlačiť“ na jej výrobcov, aby sa začali viac zaujímať o kvalitu dodávanej energie.
- V tomto období nastáva výrazný nárast počtu pripojených zariadení na elektrickú sieť. Tento nárast spôsobil, že porucha alebo rušivé pôsobenie chybného zariadenia ovplyvňovali väčšie množstvo okolitých spotrebiteľov, ktoré mohli byť „citlivé“ na rôzne rušivé signály.
- Výrobné podniky sa snažili inštalovať zariadenia, ktoré by boli rýchlejšie, mali väčšiu výrobnú produktivitu a boli účinnejšie. Avšak tieto zariadenia často vytvárali rušivé prostredie pre ostatné zariadenia.
- Kvalita elektrickej energie je úzko spätá s ekonomickým dopadom na dodávateľov a odberateľov elektrickej energie, ako aj na výrobcov rôznych spotrebiteľov.

Spomedzi uvedených dôvodov pravdepodobne najvýznamnejšia je ekonomická príčina. Často diskutovanou témou sa stáva ocenenie množstva nedodanej elektrickej energie a celkového ohodnotenia, napr. výpadku určitého podniku v dôsledku zníženej kvality elektrickej energie. Takýto výpadok môže značne ovplyvniť hospodárnosť chodu sledovaného podniku.

V [2] môžeme nájsť príklad, v ktorom sa uvádza, že vypnutie hlavného výkonového vypínača stredne veľkého podniku v dôsledku zlej kvality elektrickej energie, ktoré spôsobí štvorhodinový stav bez elektrickej energie, môže bežne stať okolo \$10 000. Problematikou určenia ceny za zníženú kvality elektrickej energie sa budeme bližšie zaoberať v kapitole 1.3.

V súčasnosti sa problematika kvality elektrickej energie dostáva do popredia aj z dôvodu liberalizácie trhu s elektrickou energiou. Možnosť vybrať si dodávateľa elektrickej energie zvýši<sup>1</sup> súperenie medzi výrobcami, čo môže do značnej miery prispieť k jej ďalšiemu skvalitneniu.

## 1.1 DEFINÍCIA PROBLÉMU KVALITY ELEKTRICKEJ ENERGIE

Pohľad na kvalitu elektrickej energie z rôznych uhlov sa javí rozdielny. Iný je prístup ku kvalite elektrickej energie zo strany výrobcov, iný zo strany spotrebiteľov a samozrejme, odlišný je pohľad výrobcov rôznych zariadení.

V súlade s uvedeným je aj definícia problému, ktorý vznikol z dôvodu zlej kvality elektrickej energie, odlišná.

Napriek tomu sa odborníci v oblasti kvality elektrickej energie dohodli na nasledovnej definícii:

*Každý problém, ktorý je spätý s odchýlkou napätia, prúdu alebo frekvencie od menovitej hodnoty a spôsobuje poruchu alebo chybnú činnosť zariadenia, je problémom kvality elektrickej energie.*

Ako bolo uvedené, existuje zreteľný rozdiel vo vnímaní problému kvality elektrickej energie zo strany výrobcu a spotrebiteľa. Na základe skutočného prieskumu vnímania rôznych porúch spätých so zníženou kvalitou elektrickej energie u spotrebiteľa a výrobcu boli zostavené grafy, ktoré jasne naznačujú odlišný postoj spomínaných subjektov [2]. Na obr. 1-1 je znázornený pohľad výrobcu elektrickej energie Georgia Power Company a vnímanie jeho zodpovednosti za vzniknuté poruchy spôsobené zníženou kvalitou elektrickej energie. Obdobný graf je zobrazený na obr. 1-2, kde je pohľad spotrebiteľov na mieru zodpovednosti jednotlivých subjektov.

Ako je zrejme z grafov, pohľad výrobcu a taktiež pohľad odberateľa je takmer zhodný na poruchy spôsobené „prírodou“ (napr. zasiahnutím vedenia bleskom

---

<sup>1</sup> aj na základe kvality nimi dodávanej energie

a pod.).<sup>2</sup> Avšak úplne odlišný je názor spotrebiteľov na poruchy spôsobené výrobcami a opačne, názor výrobcov na poruchy spôsobené odberateľom. V prípade pohľadu výrobcov, spotrebiteľia spôsobujú 25 % porúch a výrobcovia len 1 %. Naopak, pohľad spotrebiteľov je taký, že za 17 % porúch môžu výrobcovia a len za 12 % spotrebiteľia. Uvedené údaje jasne dokazujú odlišný pohľad uvedených subjektov.

## 1.2 KVALITA ELEKTRICKEJ ENERGIE = KVALITA NAPÄTIA

V prípade elektrickej energie a jej spojitosti s kvalitou sa predovšetkým uvažuje o kvalite napätia. Je to odôvodnené tým, že po technickej stránke je elektrická energia súčinom napätia, prúdu a času a definovať takúto veličinu, ktorá pozostáva z niekoľkých veličín, by bolo značne obtiažne. Z uvedeného dôvodu sa štandardne kvalitou elektrickej energie myslí kvalita napätia. Samozrejme, medzi napätím a prúdom existuje úzky vzťah a nie je možné tieto veličiny oddeliť. Napríklad, hoci generátor vyrába takmer „čistú“ sínusovú vlnu napätia, prúd, ktorý preteká impedanciami, môže toto napätie mimoriadne deformovať. Takáto situácia môže nastať, ak napríklad:

- vznikne skrat v sieti, ktorý spôsobí pokles alebo prerušenie napätia,
- vznikne prepäťová vlna spôsobená zasiahnutím vedenia bleskom,
- v obvode je generovaný deformovaný prúd zo zariadenia, ktoré produkuje vyššie harmonické, čo následne pretekaním cez impedancie prvkov siete spôsobí deformáciu napätia.

Napriek uvedeným dôvodom v prípade kvality elektrickej energie sa myslí predovšetkým na kvalitu napätia.

## 1.3 CENA ZA ZNÍŽENÚ KVALITU ELEKTRICKEJ ENERGIE

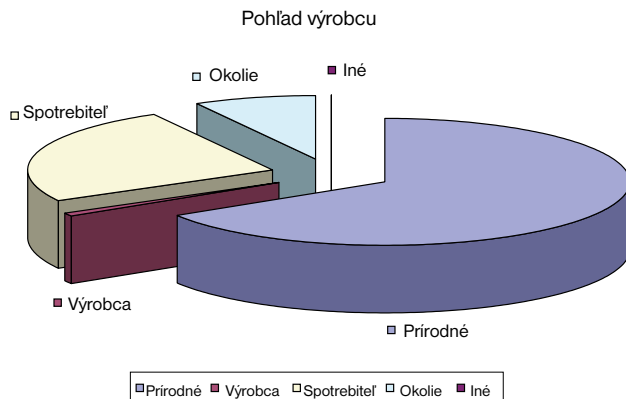
V tejto časti sa budeme venovať finančnému dopadu, ktorý nastane v prípade zníženej kvality elektrickej energie. Uvedieme niekoľko konkrétnych prípadov, kde svetoví odborníci odhadovali náklady spojené so zníženou kvalitou elektrickej energie.

Prvá významná publikácia, ktorá sa venovala uvedenej téme, bola uverejnená v časopise Business Week v roku 1991. Táto publikácia citovala odhady inštitútu EPRI (Electric Power Research Institute), ktorý oceňoval ročné náklady spojené s nižšou kvalitou elektrickej energie v Spojených štátoch amerických na \$ 26 mld. Po uverejnení tohto článku bola uvedená suma často citovaná v rôznych odborných článkoch, napriek tomu, že predstavovala veľmi hrubý odhad.

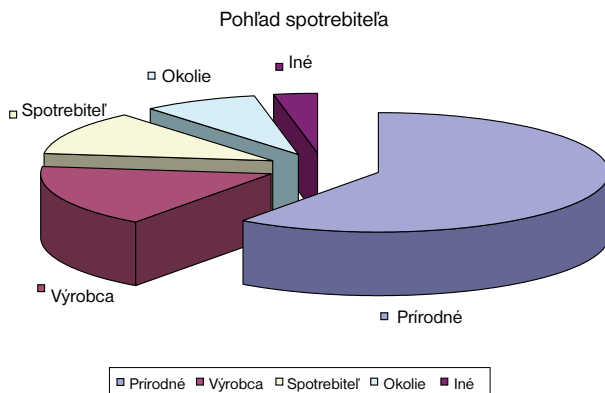
---

<sup>2</sup> 60 % porúch z pohľadu odberateľa a 66 % z pohľadu výrobcu elektrickej energie





*Obr. 1-1 Pohľad výrobcu elektrickej energie*



*Obr. 1-2 Pohľad spotrebiteľa elektrickej energie*

Ďalší výskum, ktorý popíšeme, sa venoval meraniu kvality elektrickej energie (predovšetkým zaznamenávaním poklesov a prerušení napätí) v 12 rôznych podnikoch. Spotreba jednotlivých podnikov sa pohybovala v rozmedzí od 5 MVA až do 30 MVA. Počas desaťmesačného obdobia bolo zaznamenaných 858 prerušení, resp. poklesov napätí. Z uvedeného počtu udalostí 42 bolo sprevádzaných finančným dopadom. Celková strata predstavovala hodnotu € 600 000. V prepočte na jednu udalosť vychádza € 14 300, resp. € 50 000 na jeden podnik [35]. Maximálna finančná strata predstavovala hodnotu € 165 000.

V publikácii [35] sú taktiež uvedené typické finančné straty pre jednotlivé odvetvia národného hospodárstva (pozri tab. 1-1).

Tabuľka 1-1 **Typické finančné straty v jednotlivých odvetviach na jednu udalosť**

| <b>Odvetvie</b>                 | <b>Finančná strata [€]</b> |
|---------------------------------|----------------------------|
| Výroba polovodičových súčiastok | 3 800 000                  |
| Finančníctvo                    | 6 000 000 za hodinu        |
| Výpočtové centrum               | 750 000                    |
| Telekomunikácie                 | 30 000 za minútu           |
| Hutníctvo                       | 350 000                    |
| Sklárstvo                       | 250 000                    |

Na základe popísaných výskumov je potrebné si uvedomiť dôležitosť udržania potrebnej úrovne kvality elektrickej energie, aby sme sa vyhli obrovským finančným stratám.