

Analýza a vyhodnocení měření nízkofrekvenčních oscilací (LFO) prostřednictvím WAMS

Pracoviště: KEE
Číslo dokumentu: 22190-032-2024
Typ zprávy: Výzkumná zpráva
Řešitelé: Ing. et Ing. Martin Vinš
Vedoucí projektu: doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
Počet stran: 35
Datum vydání: 27. 1. 2024
Oborové zařazení: 2.2 Electrical engineering, Electronic engineering,
Information engineering - Electrical and electronic
engineering

Zadavatel / zákazník:
ČEPS, a.s.
Elektrárenská 774/2
101 52 Praha 10
Česká republika

Zpracovatel / dodavatel:
Západočeská univerzita v Plzni
Research and Innovation Centre
for Electrical Engineering
Univerzitní 8
306 14 Plzeň
Kontaktní osoba:
Ing. et Ing. Martin Vinš
tel. +420 377 634 195
mvins@fel.zcu.cz

Tato zpráva vznikla s podporou projektu TAČR NCK TN02000025 NCE II.

Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá analýzou nízkofrekvenčních výkonových oscilací změřených pomocí WAMS a následně diskutuje daná měření a jejich vztah k alarmům ohlášených řídicím systémem WAMS v ČR na území ČEPS v rámci projektu TAČR NCK TN02000025 NCE II.

Klíčová slova

Analýza, Elektrizční soustava, Nízkofrekvenční oscilace, PMU, WAMS

Report title

Analysis and Evaluation of Low-Frequency Oscillation (LFO) Measurements via WAMS

Abstract

This research report deals with the analysis of low-frequency power oscillations measured by WAMS and subsequently discusses the given measurements and their relationship to alarms reported by the WAMS control system in the Czech Republic on the territory of ČEPS within the framework of the TAČR NCK TN02000025 NCE II project.

Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords

Analysis, Low-Frequency Oscillations, PMU, Power Grid, WAMS

Seznam symbolů a zkratk

FFT	Fast Fourier Transform
GE	General Electric
LFO	Low-Frequency Oscillations
PMU	Phasor Measurement Unit
PSS	Power System Stabilizer
UCTE	Union for Co-ordination of Transmission of Electricity
WAMS	Wide Area Measurement System

Obsah

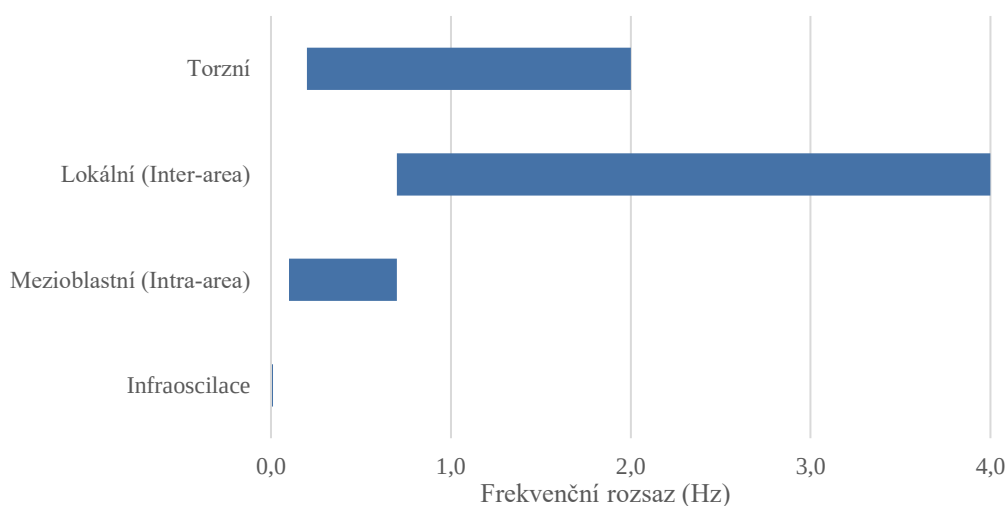
1	ÚVOD	5
2	ANALÝZY FREKVENČNÍCH SPEKTER.....	8
2.1	PRVNÍ ZKUŠEBNÍ DATOVÁ SADA	8
2.2	ZBYTEK ANALYZOVANÝCH DATOVÝCH SAD.....	9
2.2.1	<i>Datová sada 1 (03072024-067-09Hz-50sam_per_sec)</i>	<i>11</i>
2.2.2	<i>Datová sada 2 (08062024-01-02Hz-50sam_per_sec)</i>	<i>17</i>
2.2.3	<i>Datová sada 3 (12062024-01-02Hz-50sam_per_sec)</i>	<i>20</i>
2.2.4	<i>Datová sada 4 (25012024-01-02Hz-50sam_per_sec)</i>	<i>23</i>
2.2.5	<i>Datová sada 5 (27062024-053-067Hz-50sam_per_sec)</i>	<i>26</i>
2.2.6	<i>Datová sada 6 (30052024-053-067Hz-50sam_per_sec)</i>	<i>29</i>
ZÁVĚR		32

1 Úvod

Nízkofrekvenční oscilace (Low-Frequency Oscillations – LFO) nabývají většího významu s rozšiřováním a propojováním energetických soustav. Obecně se objevují při narušení výkonové rovnováhy daného energetického systému, kdy dojde následně k relativnímu rozkmitání rotorů synchronních generátorů. To vede k **rozkmitání činného výkonu, a následně napětí** a dalších elektrických veličin s ekvivalentní frekvencí k frekvenci kmitání rotorů. Pokud energetický systém postrádá adekvátní tlumení (tj. **tlumící moment elektrizační soustavy**), výkonové oscilace by mohly trvat relativně dlouho (Pozn.: do ustálení kmitání rotorů, což bude **elektro-mechanický přechodný děj**), přičemž během toho mohou narušovat provozní stabilitu, omezovat kapacitu přenosu vedení a vyvolávat sekundární energetické ztráty [1].

Jedná se o oscilace činného trojfázového výkonu s obvyklou frekvencí <4 Hz. Dle článku [2] je lze podrobněji typologicky rozdělit do následujících kategorií (viz také Obr. 1.1):

- **Torzní oscilace**; 0,2 – 2 Hz způsobené mechanickým kmitáním rotorů generátorů
- **Lokální (inter-area) oscilace**; 0,7 – 4 Hz způsobené změnou lokální výkonové rovnováhy
- **Mezioblastní (intra-area) oscilace**; 0,1 – 0,7 Hz způsobené změnou synchronních provozních podmínek elektrizační soustavy (způsobené nerovnovážnou výkonovou bilancí)
- **Oscilace způsobené špatným nastavením PSS**; obtížně odhadnutelný frekvenční rozsah
- **Infraoscilace**; $\sim 0,003$ Hz spojené se stejnou příčinou jako lokální oscilace (na Obr. 1.1 nepatrně zvětšen rozsah pro lepší pozorovatelnost)



Obr. 1.1 Grafické znázornění různých typů LFO v Ganttovo diagramu

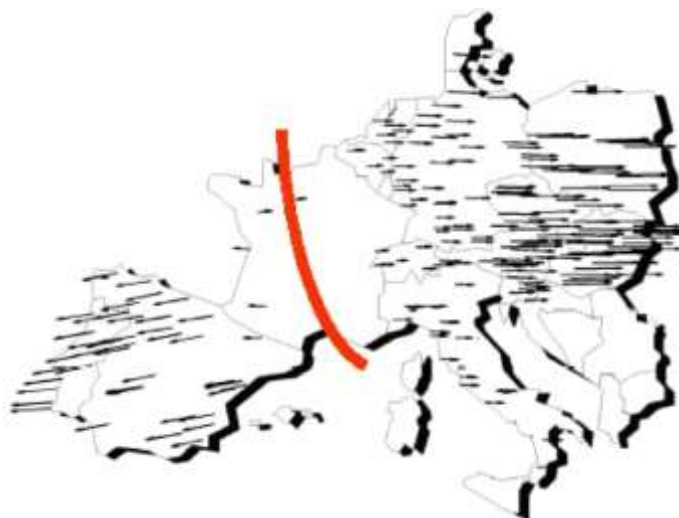
Pozornost je tak s ohledem na předchozí kategorizaci věnována zejména mezioblastním oscilacím, kde lze vhodně využít měření z WAMS. Mezioblastní oscilace totiž mají systémový charakter, relativně velkou amplitudu a mohou se vzájemně šířit mezi subsystémy, zejména po slabých přenosových (typicky mezistátních) vedeních.

Zároveň je třeba poznamenat, že v soustavě dochází k neustálým změnám zátěží a k adekvátní regulaci výroby elektrické energie. Obecně tak lze říci, že se budou objevovat vždy nějaké typy LFO (v naprosté většině případů lokální, nebo torzní), avšak při mezioblastních LFO oscilují celé

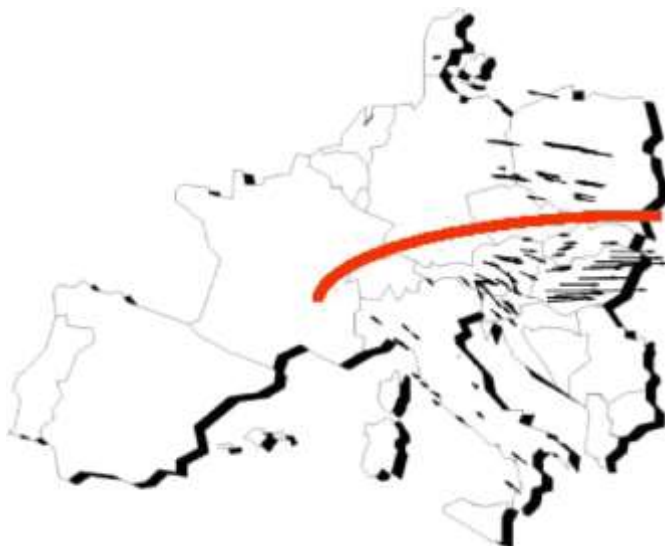
skupiny generátorů proti jiným skupinám generátorů, což by mělo zajistit jejich tvrdost a relativně dobrou identifikovatelnost ve vytipovaných frekvenčních spektrech.

Jelikož se jedná o relativně známý jev, některé charakteristické frekvence LFO už byly zdokumentovány v souvislosti s rozšiřováním dřívějšího UCTE [3]. Na Obr. 1.2–1.5 jsou znázorněny 4 dříve identifikované oscilační módy (před připojením Turecka a Ukrajiny). Typicky se jedná o oscilace mezi východem a západem, případně severem a jihem Evropy s frekvencí od 0,2 do 0,5 Hz. Za povšimnutí stojí, že u těchto oscilačních módů je Česká republika obvykle blízko středu spojnice mezi oscilujícími oblastmi, a tudíž by amplitudy těchto oscilací měly být relativně nízké, alespoň oproti okrajům Evropské kontinentální soustavy [3].

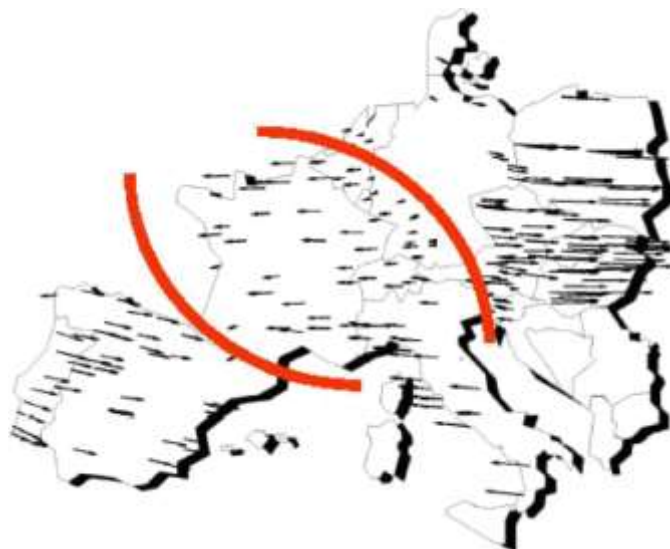
Také je evidentní, že ne všechny oscilační módy mezioblastních LFO jsou zdokumentované, další se mohou objevovat s rozšiřováním sítě Kontinentální Evropy, případně se již identifikované frekvence mohly v poslední dekádě změnit [3].



Obr. 1.2 Oscilační mód 1 ($\sim 0,2$ Hz) [3]



Obr. 1.3 Oscilační mód 1 ($\sim 0,3$ Hz) [3]



Obr. 1.4 Oscilační mód 3 ($\sim 0,5$ Hz) [3]



Obr. 1.5 Oscilační mód 3 ($\sim 0,5$ Hz) [3]

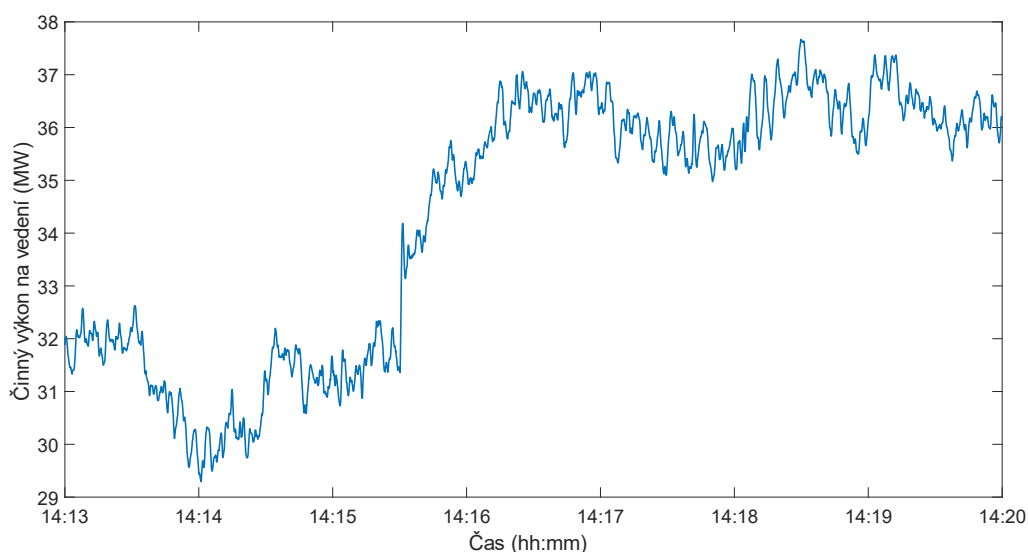
Kritické je během diagnostiky a obecného nouzového „řízení“ nízkofrekvenčních oscilací rychle a s adekvátní přesností nalézt jejich zdroj. Aktuálně se využívají dvě metody (případně jejich kombinace), tedy využití **online modelu pro analýzu oscilací** (závisí na přesnosti vlastního modelu a jeho parametrů a je v podstatě nepoužitelný při stavech, nebo dějích, které model nezahrnuje) a využití **naměřených dat prostřednictvím WAMS** (je třeba zpracovat velké množství dat v reálném čase, přičemž operátoři nemusejí mít k dispozici data z klíčových vedení) [1]. V případě mezioblastních LFO lze do jisté míry postupovat **empiricky**, což bude blíže diskutováno v dalších sekcích a závěru.

2 Analýzy frekvenčních spekter

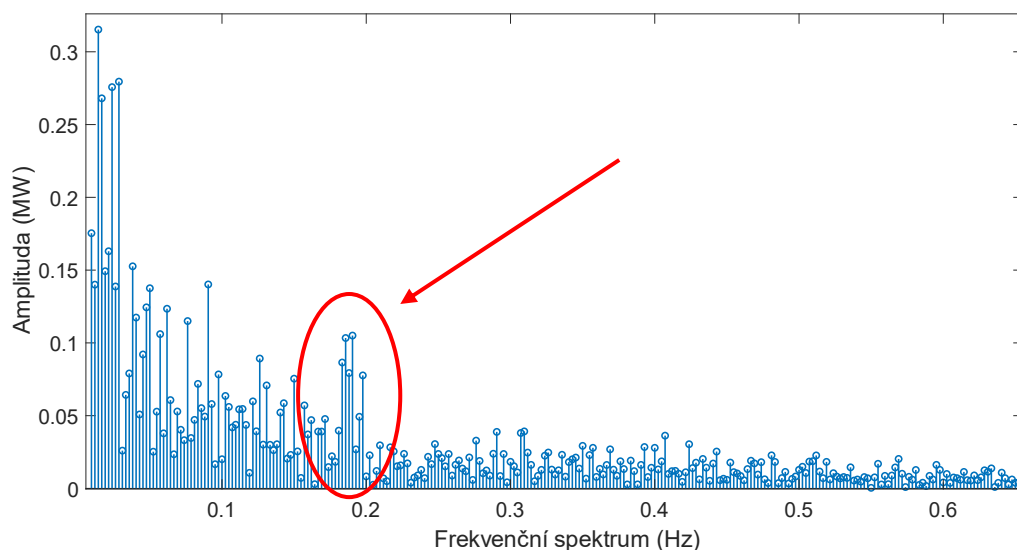
2.1 První zkušební datová sada

V návaznosti na předchozí sekci tak byl analyzován první soubor dat ohlášených LFO řídicím systémem WAMS z 6. 9. 2023, jako reprezentativní příklad jsou v této práci znázorněna data z pmu_101 o domnělé (řídicím systémem identifikované) frekvenci $\sim 0,2$ Hz a vzorkovací frekvencí 10 vzorků/s. Výsledky jsou znázorněny na Obr. 2.1 (dopočtený okamžitý činný výkon) a Obr. 2.2 (frekvenční spektrum). Je patrné, že výsledky odpovídají předchozím empirickým předpokladům. Ve frekvenčním spektru na Obr. 2.2 (zvýrazněno červeným ohraničením) je jasně zřetelné očekávané vystupující frekvenční pásmo odpovídající mezioblastním LFO kolem frekvence 0,2 Hz.

Jedná se pouze o příklad měření z jedné PMU, ze kterého se nedá mapovat jakýkoliv směr šíření, nebo změna amplitudy mezioblastních LFO v soustavě, ačkoli v této sadě k byla k dispozici i měření z jiných PMU, vystupující frekvenční pásmo kolem 0,2 Hz nebylo tak patrné. Navíc nebyly k dispozici výpisy hlášení řídicího systému a zároveň mohla výsledky nepatrně zkreslit nižší vzorkovací frekvence. Po analýze této zkušební datové sady bylo dodáno několik dalších datových sad, které zachycují LFO o různých frekvencích (v různých frekvenčních pásmech), zároveň na několika PMU současně s výpisem hlášení řídicího systému a s vyšší vzorkovací frekvencí. Bylo tedy rozhodnuto detailně analyzovat právě rozsáhlejší sady popsané v následující sekci.



Obr. 2.1 Průběh činného výkonu během zkušební datové sady LFO



Obr. 2.2 Frekvenční spektrum zkušební datové sady LFO

U ostatních datových sad budou frekvenční spektra znázorněna ekvivalentním způsobem, tedy v absolutní hodnotě výkonu (MW) oscilujících složek. Dalším možným přístupem je poměrné vyjádření amplitudy oscilujících složek ku stejnosměrné složce výkonu, což ale může být zavádějící zejména v případech, kdy na vedení dochází k žádané změně přenášeného výkonu (což vnese do systému další lokální a torzní LFO), který tak už nebude čistě stejnosměrný, což by mohlo význam studovaných mezioblastních LFO nadhodnocovat.

2.2 Zbytek analyzovaných datových sad

V této sekci budou diskutovány analýzy širších měření WAMS s vlastní identifikací LFO jejich řídicím systémem, pro správnou orientaci v přenosové soustavě České republiky jsou na Obr. 2.3 znázorněny přiřazené tagy jednotlivým rozvodnám s barevným oddělením vedení 400 kV (žlutě) a 220 kV (červeně) s návazným umístěním jednotlivých PMU.

Pro názornost je uveden následující příklad:

pmu_501_50-CEPS-KOC4-V432

pmu – označení původu měření datové sady

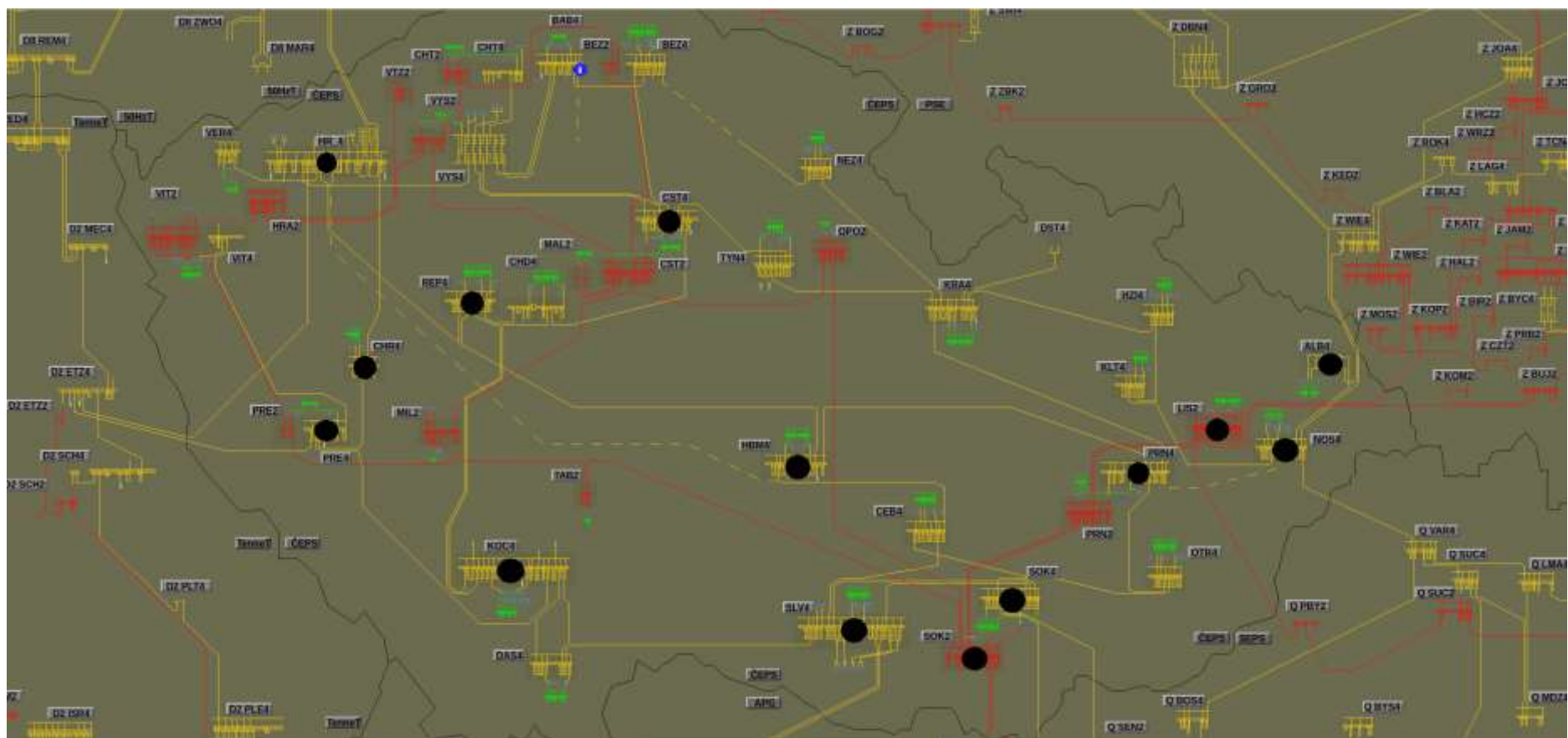
501 – číselné označení konkrétní pmu

50 – datová sada s 50 vzorky/s

CEPS – pmu v přenosové soustavě ČEPS

KOC4 – umístění v rozvodně Kočín na napěťové hladině 400 kV

V432 – číselné označení konkrétního vedení, kde je PMU umístěné



Obr. 2.3 Tagy rozvoden přenosové soustavy pro lokalizaci umístění jednotlivých PMU

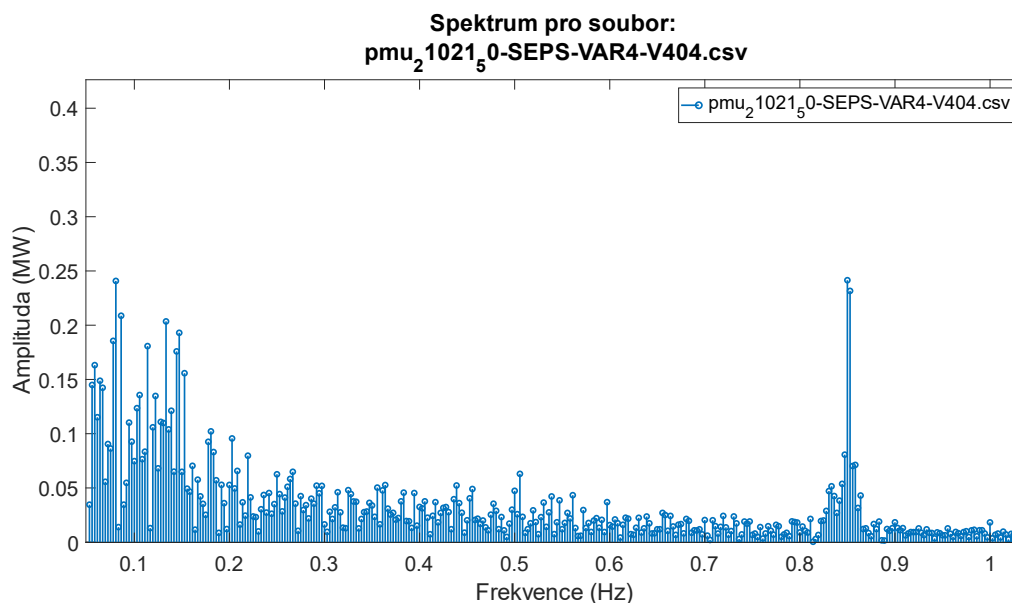
Pro ověření funkce detekce LFO prostřednictvím integrovaného softwaru PMU od společnosti GE a potvrzení charakteru oscilací, bude analyzováno celkem 6 datových sad o vzorkovací frekvenci 50 vzorků/s. Jedná se o dostatečnou vzorkovací frekvenci pro daný typ analýzy (zmíněný frekvenční rozsah detekovaných oscilací). Výhodné je použít FFT (Fast Fourier Transformation) pro analýzu celého frekvenčního spektra s krokem 0,0025 Hz a omezenou stejnosměrnou a jí blízkou složkou výkonu (aby nedošlo k degradaci rozpoznatelnosti detailů zbytku frekvenčního spektra), zobrazovaný rozsah je **tedy 0,05-5 Hz**. Frekvenční spektrum bylo následně po aplikaci FFT normováno pro jasně čitelné grafické zobrazení, viz [4].

Ke každé datové sadě budou doplněny a diskutovány jednotlivé průběhy spojené s danou PMU a alarmem, který software zobrazil. Průběhy kde alarm zobrazen nebyl, avšak jejich frekvenční spektrum bylo nějakým způsobem zajímavé, budou popsány v textu, kde bude také formulováno vyhodnocení analýzy celé jedné sady dat. Každá datová sada také bude doplněna souhrnným grafickým znázorněním maximálních amplitud hlášených řídicím systémem každé PMU. PMU v těchto grafických znázorněních budou geograficky řazeny od západu na východ (zleva doprava), což zlepší přehlednost výsledků a usnadní vyhodnocování oscilačních módů.

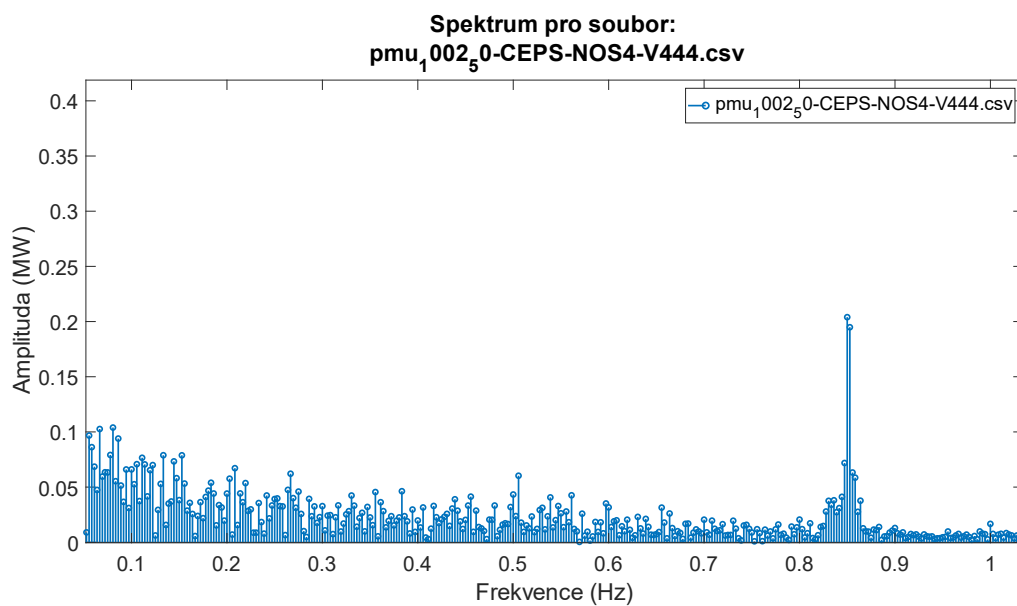
2.2.1 Datová sada 1 (03072024-067-09Hz-50sam_per_sec)

PMU ID	PMU Name	PMU Type	PMU Status	PMU Location	PMU Frequency	PMU Amplitude	PMU Phase	PMU Power	PMU Voltage
PMU_1	PMU_1	PMU_1	PMU_1	PMU_1	PMU_1	PMU_1	PMU_1	PMU_1	PMU_1
PMU_2	PMU_2	PMU_2	PMU_2	PMU_2	PMU_2	PMU_2	PMU_2	PMU_2	PMU_2
PMU_3	PMU_3	PMU_3	PMU_3	PMU_3	PMU_3	PMU_3	PMU_3	PMU_3	PMU_3
PMU_4	PMU_4	PMU_4	PMU_4	PMU_4	PMU_4	PMU_4	PMU_4	PMU_4	PMU_4
PMU_5	PMU_5	PMU_5	PMU_5	PMU_5	PMU_5	PMU_5	PMU_5	PMU_5	PMU_5
PMU_6	PMU_6	PMU_6	PMU_6	PMU_6	PMU_6	PMU_6	PMU_6	PMU_6	PMU_6
PMU_7	PMU_7	PMU_7	PMU_7	PMU_7	PMU_7	PMU_7	PMU_7	PMU_7	PMU_7
PMU_8	PMU_8	PMU_8	PMU_8	PMU_8	PMU_8	PMU_8	PMU_8	PMU_8	PMU_8
PMU_9	PMU_9	PMU_9	PMU_9	PMU_9	PMU_9	PMU_9	PMU_9	PMU_9	PMU_9
PMU_10	PMU_10	PMU_10	PMU_10	PMU_10	PMU_10	PMU_10	PMU_10	PMU_10	PMU_10

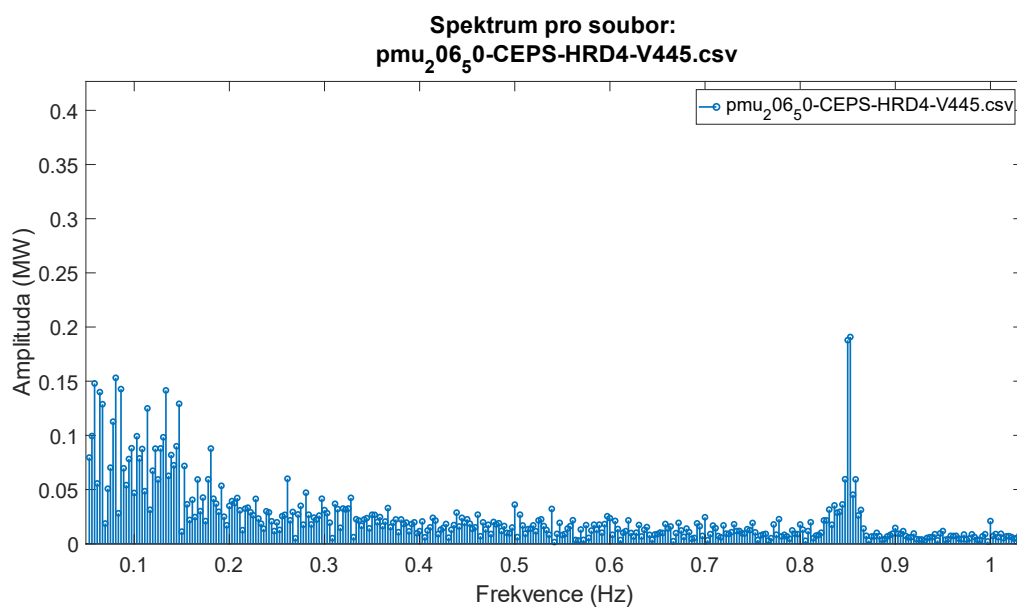
Obr. 2.4 Hlášení alarmů řídicího systému; datová sada 1



Obr. 2.5 Frekvenční spektrum SEPS-VAR4-V404; datová sada 1

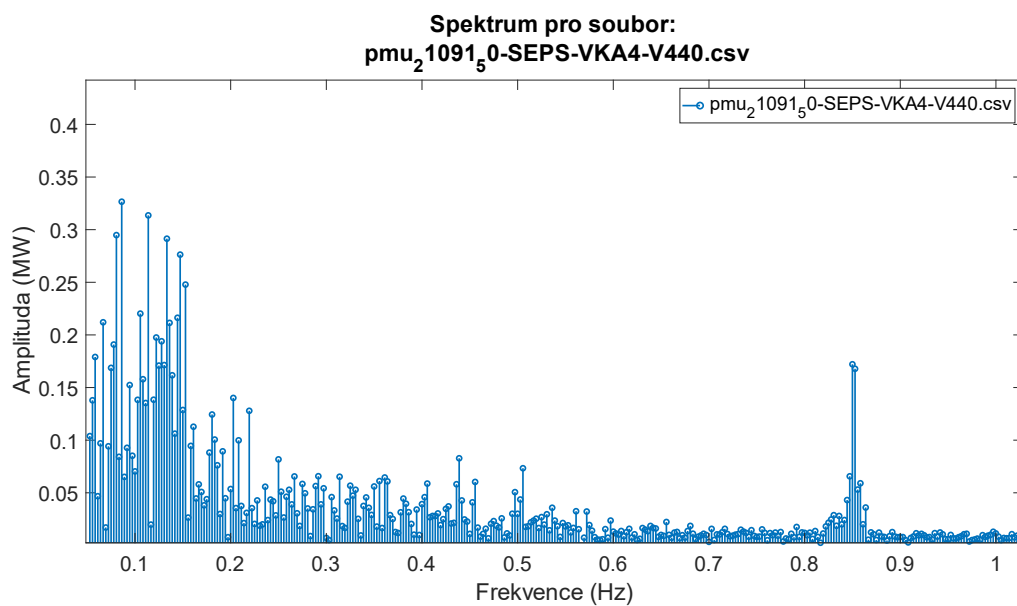


Obr. 2.6 Frekvenční spektrum CEPS-NOS4-V444; datová sada 1

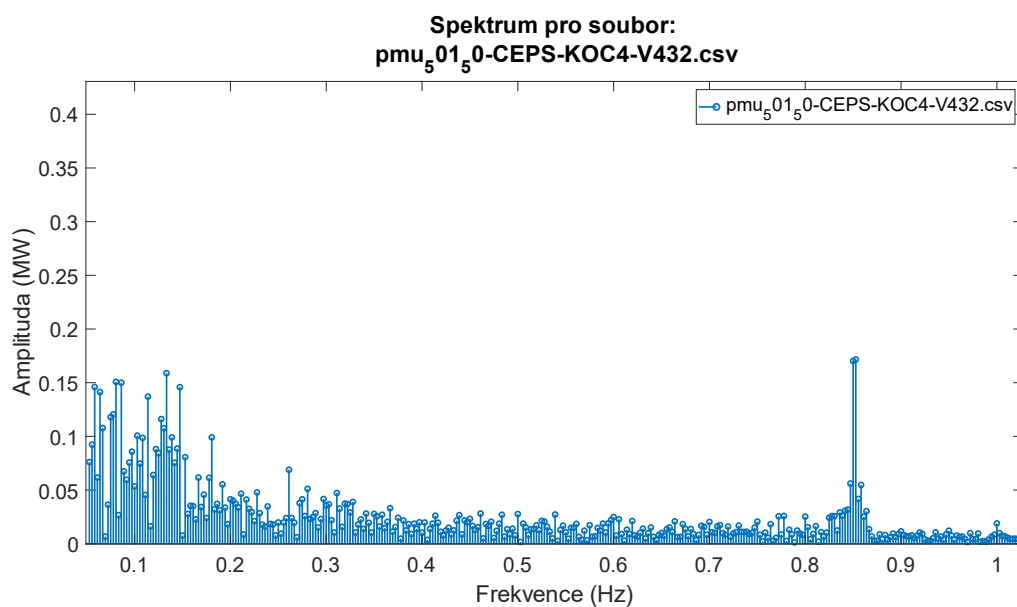


Obr. 2.7 Frekvenční spektrum CEPS-HRD4-V445; datová sada 1

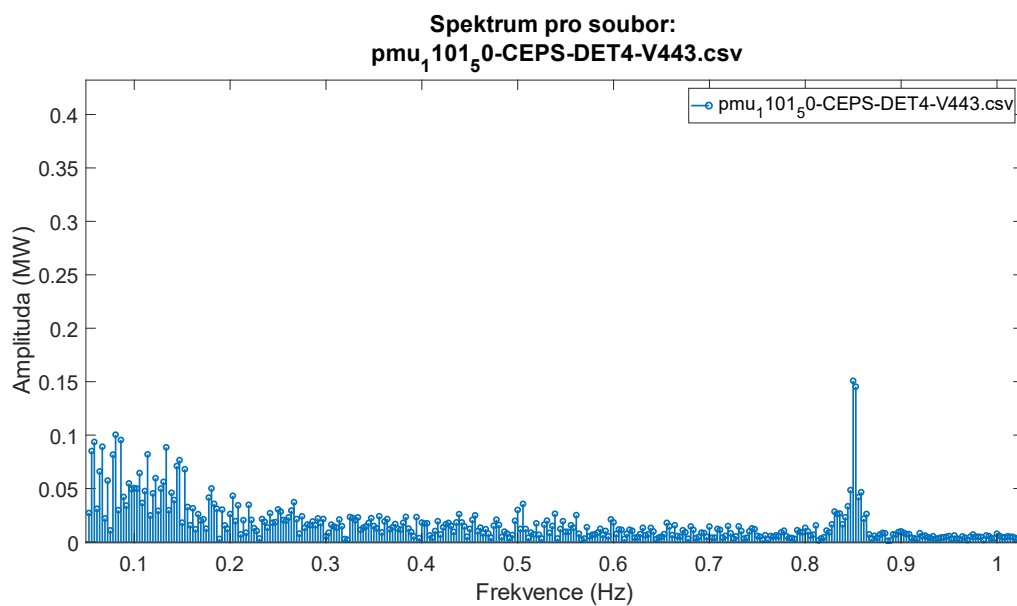
Pro CEPS-HRD4-V446 chybí některá data (neúplné měření) a tak nelze sestavit frekvenční spektrum činného výkonu.



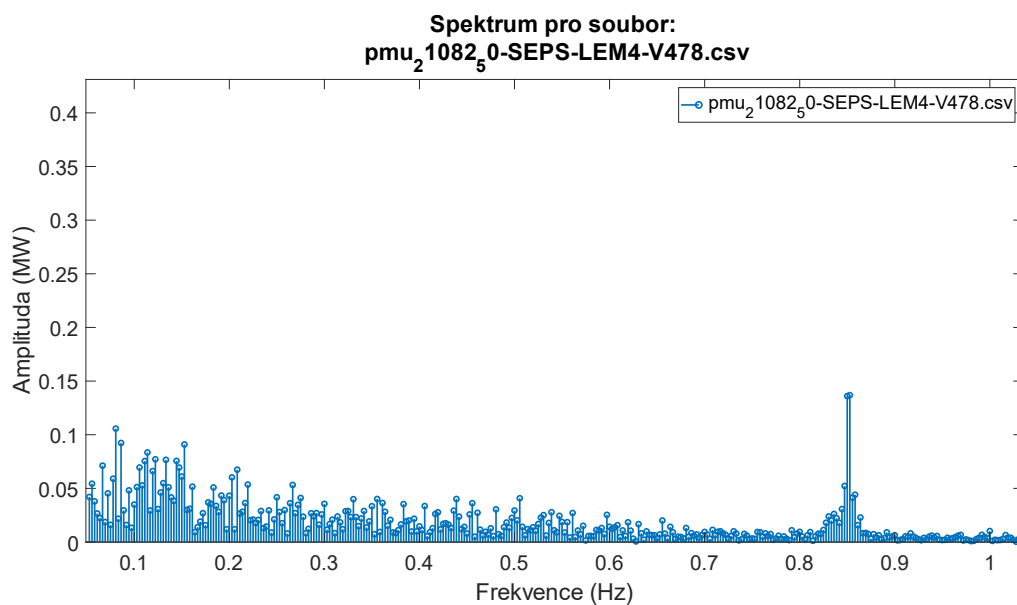
Obr. 2.8 Frekvenční spektrum SEPS-VKA4-V440; datová sada 1



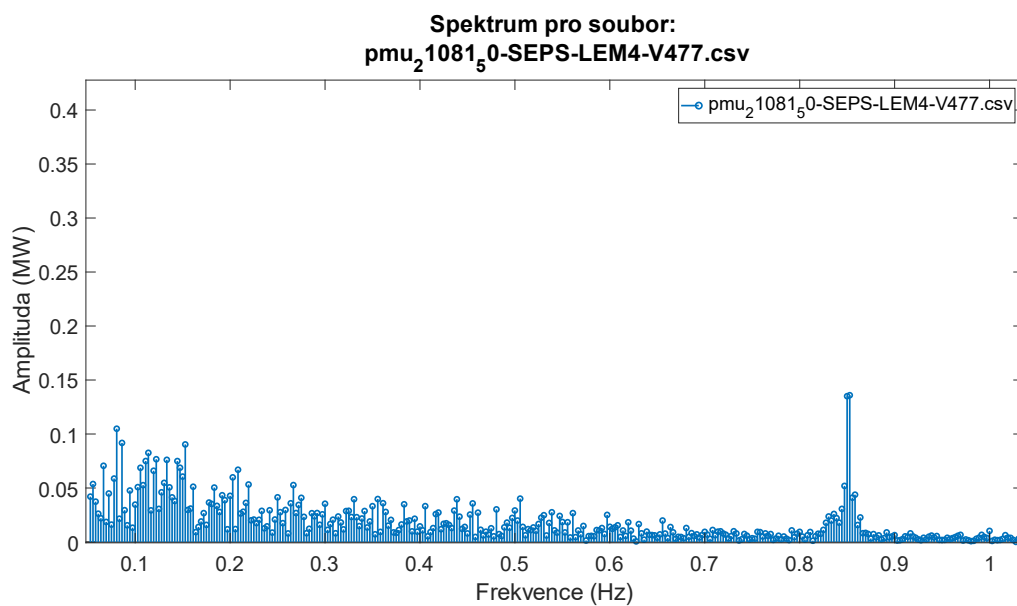
Obr. 2.9 Frekvenční spektrum CEPS-KOC4-V432; datová sada 1



Obr. 2.10 Frekvenční spektrum CEPS-DET4-V443; datová sada 1

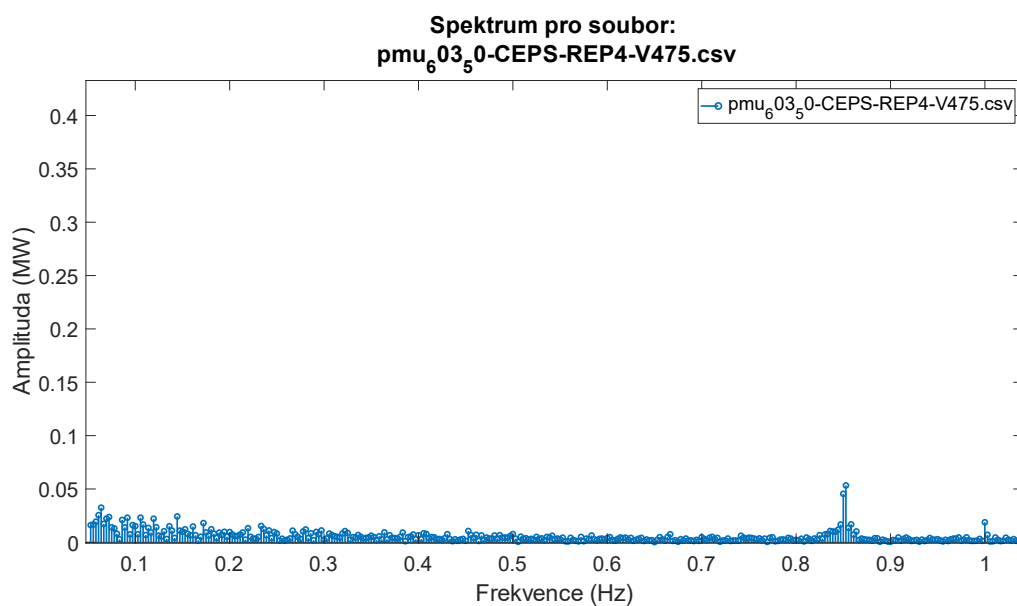


Obr. 2.11 Frekvenční spektrum SEPS-LEM4-V478; datová sada 1

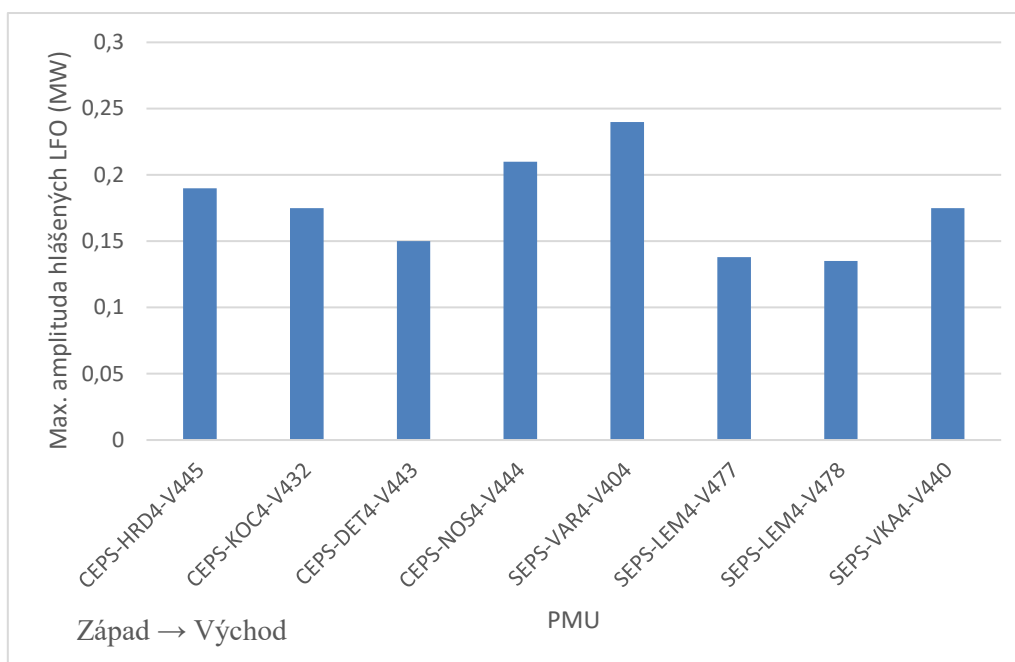


Obr. 2.12 Frekvenční spektrum SEPS-LEM4-V477; datová sada 1

Patrná je ale stejná frekvenční složka i na jiných PMU, např.:



Obr. 2.13 Frekvenční spektrum CEPS-REP4-V475; datová sada 1



Obr. 2.14 Grafické znázornění maximálních amplitud hlášených LFO; datová sada 1

V posledním případě (REP4-V475) se jedná o amplitudově menší oscilaci než ostatní. Z pozorování ostatních průběhů lze **odhadnout**, že jedním spouštěčem pro daný alarm je pravděpodobně amplituda dané oscilace přesahující **0,1MW** (i když další datové sady to ne vždy potvrzují).

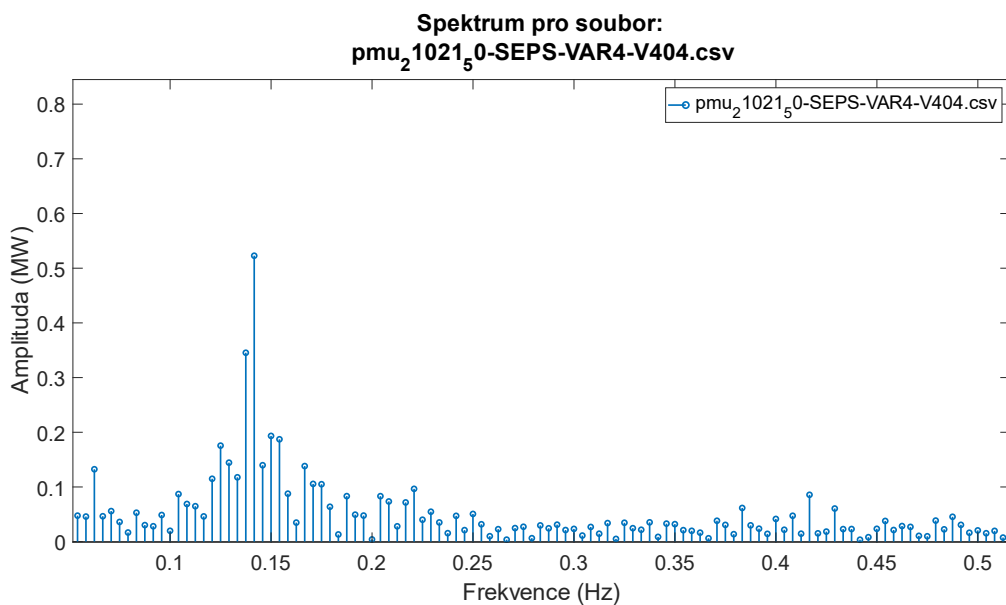
Alarmy s analyzovanými průběhy odpovídají empirickým předpokladům popsaným v teoretickém úvodu. Oscilace s největší amplitudou se jako první objeví na krajích přenosové soustavy (NOS4 a HRD4) s jejich postupným tlumením směrem dovnitř (KOC4, DET4), až pod pravděpodobnou hranici spouštěče alarmu (REP4, SVL4 a další). Anomáliemi jsou pak v tomto ohledu PMU pro PRE4-V432, SOK4-V417 a PRN4-V418, kde jsou podobně velké amplitudy ekvivalentních oscilací jako v předchozích případech, avšak nespustily daný alarm, což je pravděpodobně důsledkem neaktivaci dalšího podmiňujícího spouštěče (případně bylo hlášení přehlušeno jiným alarmem). Tato PMU jsou ale na krajích přenosové soustavy, kde vyšší amplitudy ekvivalentních oscilací odpovídají teoretickým předpokladům pro oscilační mód mezi východem a západem Evropy.

Avšak zvláštností jsou v tomto ohledu měření na PMU SEPS. Z nich je patrný podobný trend jako u PMU ČEPS, což by se ovšem vylučovalo s oscilačním módem východ-západ. Naopak špičky (NOS4-V444 a VAR4-V404) by ukazovaly na oscilační mód mezi severem a jihem. Autor této analýzy tak nedokáže posoudit, o jaký z módů (případně jejich kombinaci) se jedná.

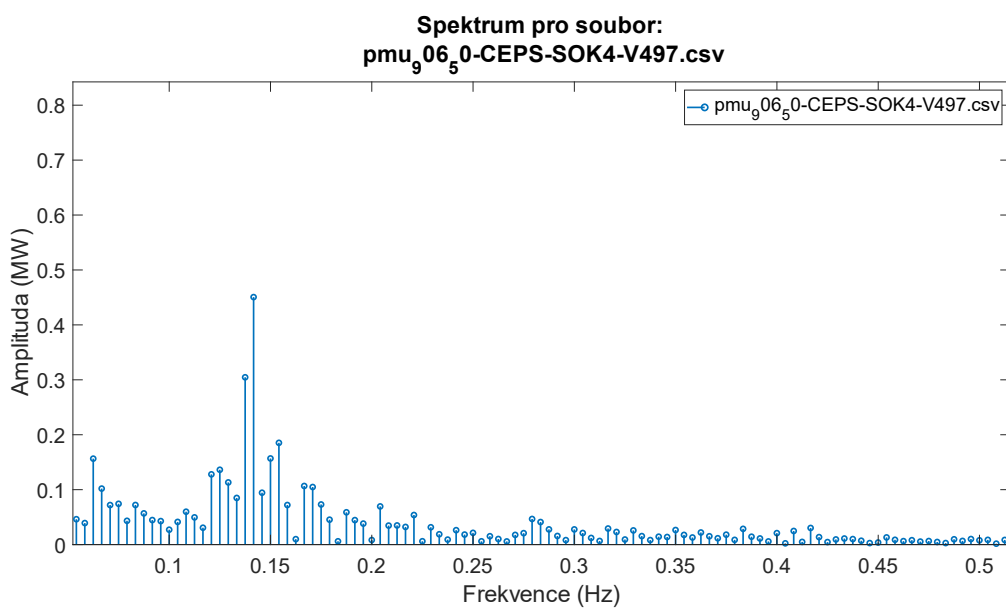
2.2.2 Datová sada 2 (08062024-01-02Hz-50sam_per_sec)

0.000	15.00000000	0.000	15.00000000	Seznam alarmů	0.000	15.00000000	0.000	15.00000000	0.000	15.00000000
0.000	15.00000000	0.000	15.00000000	Seznam alarmů	0.000	15.00000000	0.000	15.00000000	0.000	15.00000000
0.000	15.00000000	0.000	15.00000000	Seznam alarmů	0.000	15.00000000	0.000	15.00000000	0.000	15.00000000
0.000	15.00000000	0.000	15.00000000	Seznam alarmů	0.000	15.00000000	0.000	15.00000000	0.000	15.00000000
0.000	15.00000000	0.000	15.00000000	Seznam alarmů	0.000	15.00000000	0.000	15.00000000	0.000	15.00000000
0.000	15.00000000	0.000	15.00000000	Seznam alarmů	0.000	15.00000000	0.000	15.00000000	0.000	15.00000000
0.000	15.00000000	0.000	15.00000000	Seznam alarmů	0.000	15.00000000	0.000	15.00000000	0.000	15.00000000
0.000	15.00000000	0.000	15.00000000	Seznam alarmů	0.000	15.00000000	0.000	15.00000000	0.000	15.00000000
0.000	15.00000000	0.000	15.00000000	Seznam alarmů	0.000	15.00000000	0.000	15.00000000	0.000	15.00000000
0.000	15.00000000	0.000	15.00000000	Seznam alarmů	0.000	15.00000000	0.000	15.00000000	0.000	15.00000000

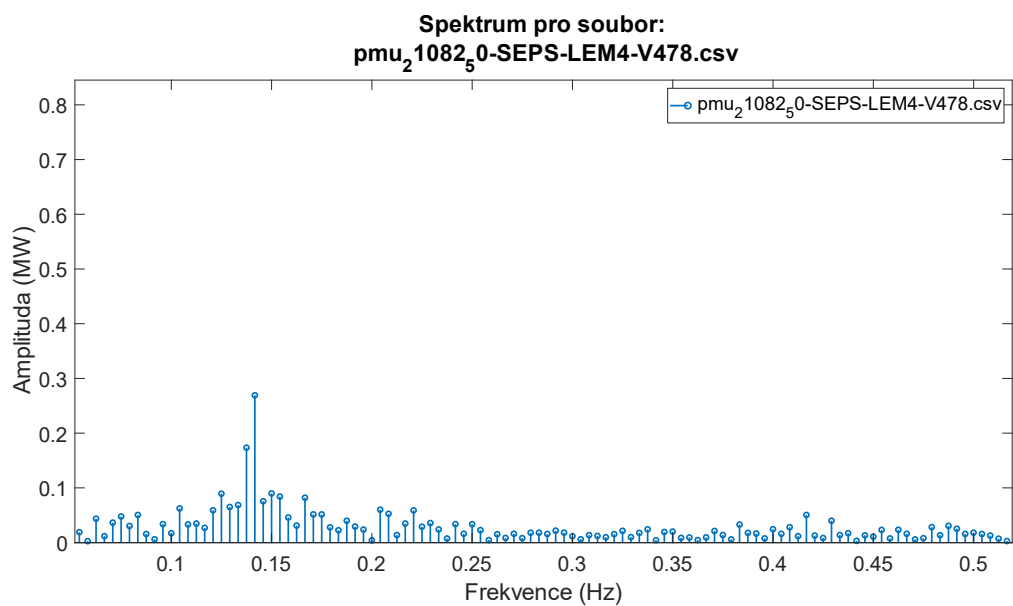
Obr. 2.15 Hlášení alarmů řídicího systému; datová sada 2



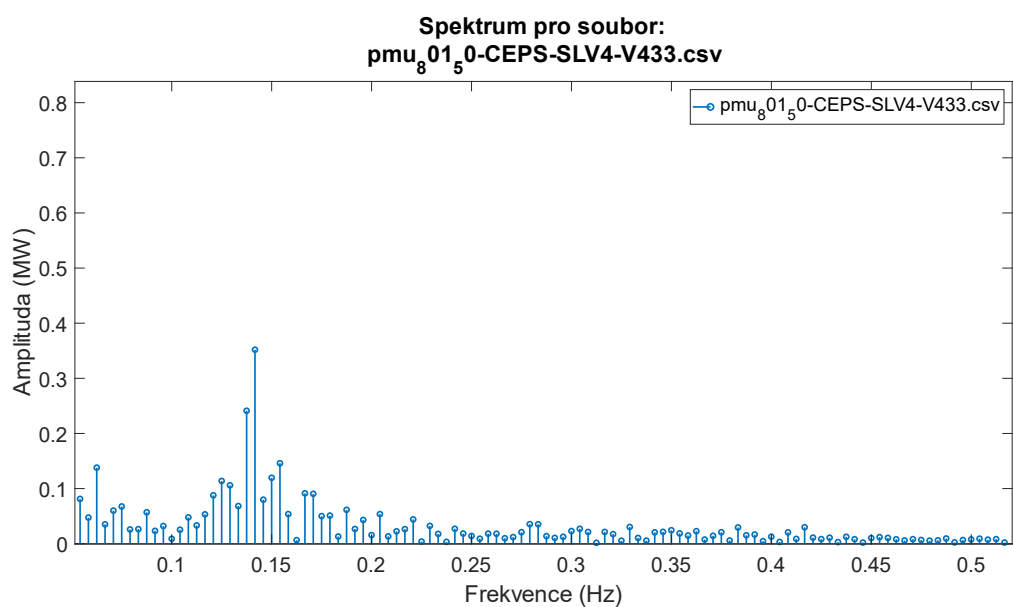
Obr. 2.16 Frekvenční spektrum SEPS-VAR4-V404; datová sada 2



Obr. 2.17 Frekvenční spektrum CEPS-SOK4-V497; datová sada 2

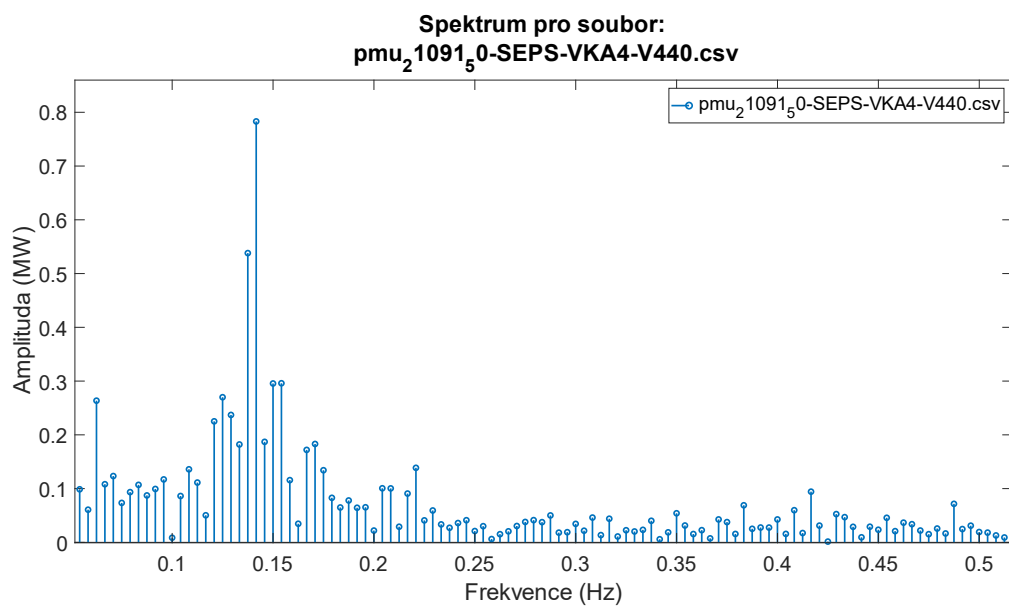


Obr. 2.18 Frekvenční spektrum SEPS-LEM4-V478; datová sada 2

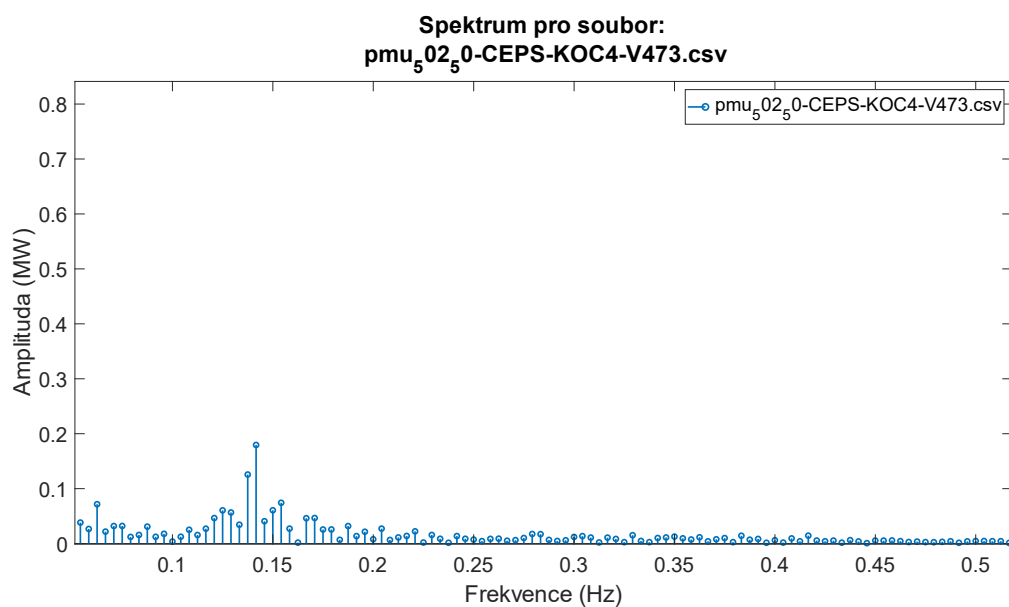


Obr. 2.19 Frekvenční spektrum CEPS-SLV4-V433; datová sada 2

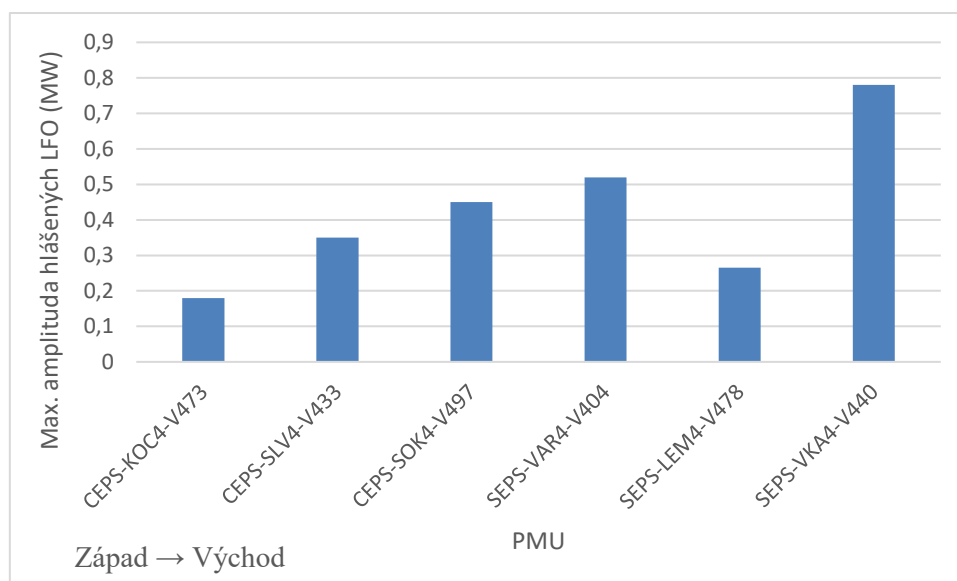
Pro KOC4-V474 chybí některá data (neúplné měření) a tak nelze sestavit frekvenční spektrum činného výkonu.



Obr. 2.20 Frekvenční spektrum SEPS-VKA4-V440; datová sada 2



Obr. 2.21 Frekvenční spektrum CEPS-KOC4-V473; datová sada 2



Obr. 2.22 Grafické znázornění maximálních amplitud hlášených LFO; datová sada 2

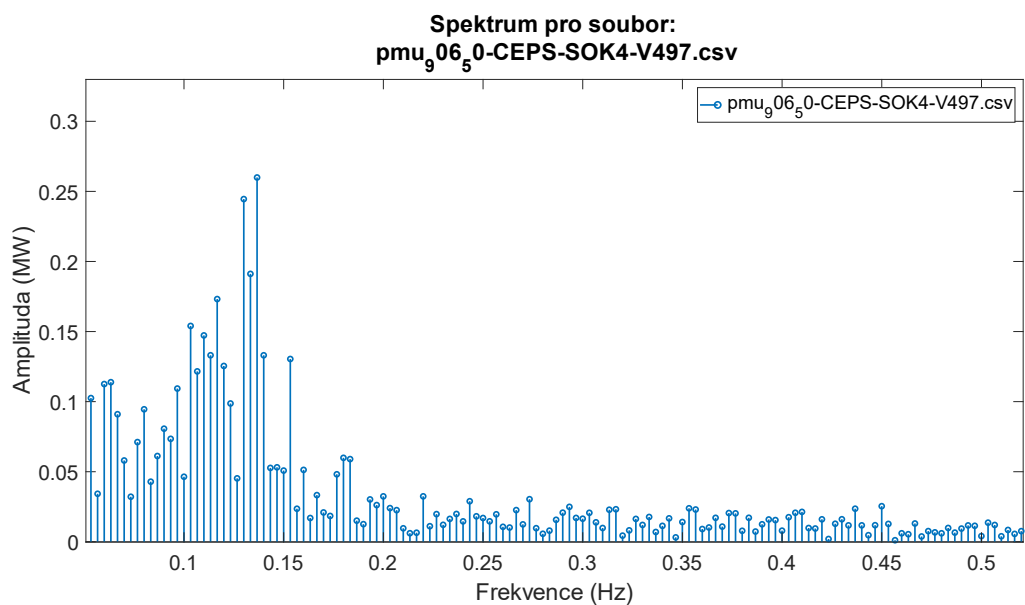
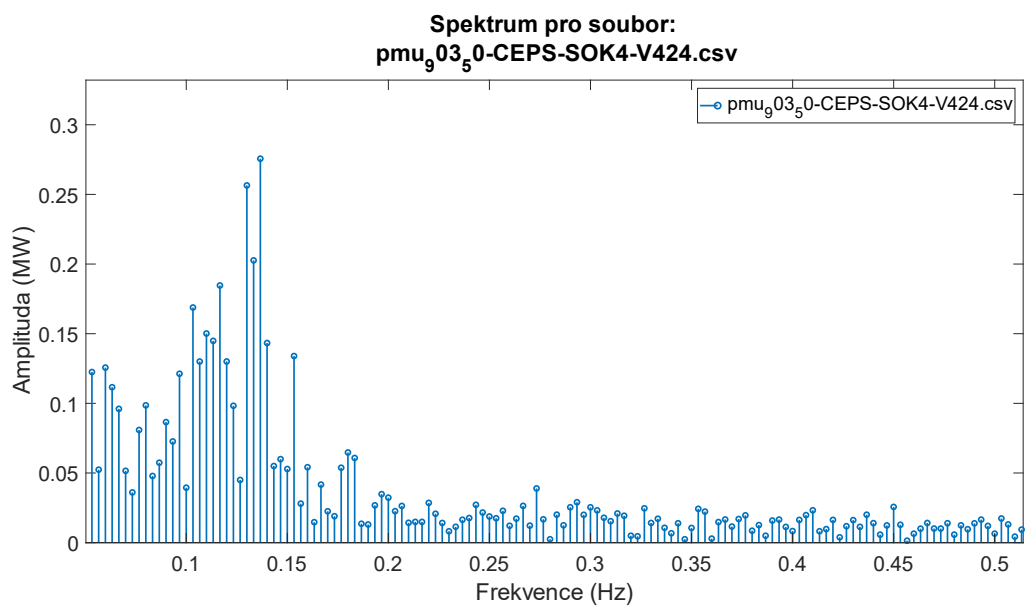
Jak lze vidět z předchozích frekvenčních spekter, odpovídají hlášenému frekvenčnímu rozsahu alarmů z výpisu hlášení řídicího systému. Toto měření je nicméně neobvyklejší než předchozí. Jednak se všechny alarmy logu spustily najednou ve stejný čas a zároveň se spousta alarmů PMU ze stejných rozvodů při ekvivalentních amplitudách nespustila vůbec. Vysoké amplitudy charakteristické frekvence zachycené oscilace tak lze pozorovat dále na např.: HBM4-V413 (0,2 MW), HRD4-V420 i V445 (kolem 0,25 MW), NOS4-V404 (přes **0,5 MW**), SOK4-V424 (přes **0,4 MW**), PRE4-V432 i V442 (kolem **0,4 MW**), HRA4-V411 i V412 i V441 (všechny přes 0,2 MW) a CST4-V400 (téměř 0,3 MW).

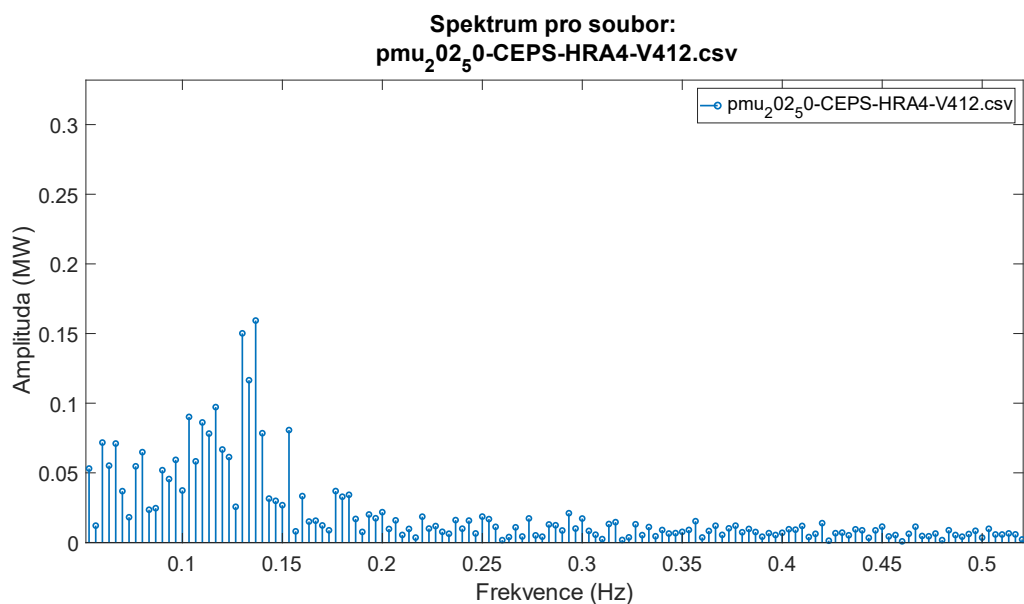
V této datové sadě by se s největší pravděpodobností mělo jednat o oscilační mód mezi východem a západem, odpovídají tomu prakticky všechna hlášení alarmů a další měření PMU popsaná v textu. Poměrně značnou anomálií je však měření na LEM4-V478, což však ve znatelném trendu ostatních měření autor této analýzy považuje za formu lokální anomálie.

2.2.3 Datová sada 3 (12062024-01-02Hz-50sam_per_sec)

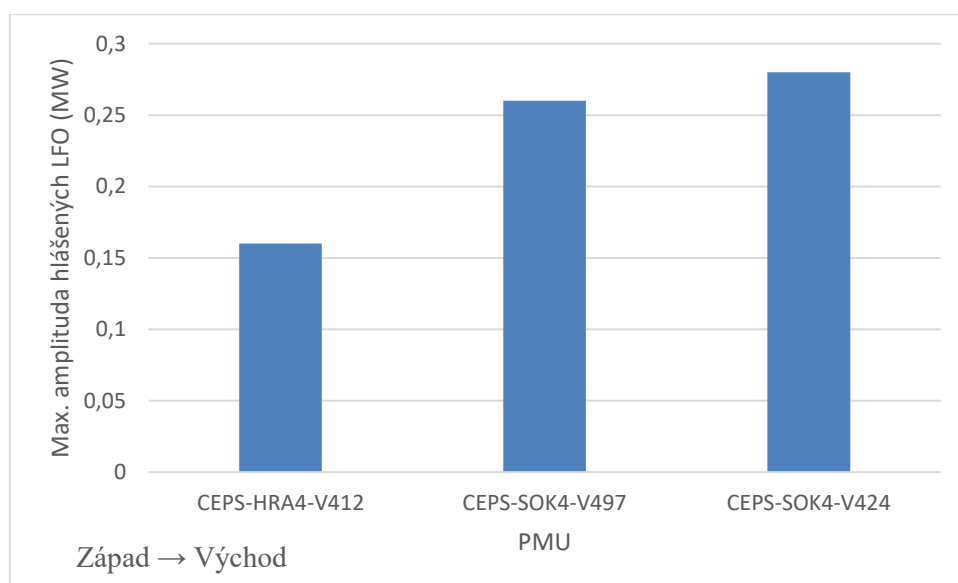
CEP5	CEP5	CEP5	CEP5	CEP5	CEP5	CEP5	CEP5	CEP5	CEP5
CEP5-KOC4-V473	CEP5-SLV4-V433	CEP5-SOK4-V497	SEPS-VAR4-V404	SEPS-LEM4-V478	SEPS-VKA4-V440	CEP5-KOC4-V473	CEP5-SLV4-V433	CEP5-SOK4-V497	SEPS-VAR4-V404
CEP5-KOC4-V473	CEP5-SLV4-V433	CEP5-SOK4-V497	SEPS-VAR4-V404	SEPS-LEM4-V478	SEPS-VKA4-V440	CEP5-KOC4-V473	CEP5-SLV4-V433	CEP5-SOK4-V497	SEPS-VAR4-V404

Obr. 2.23 Hlášení alarmů řídicího systému; datová sada 3





Obr. 2.26 Frekvenční spektrum CEPS-HRA4-V412; datová sada 3



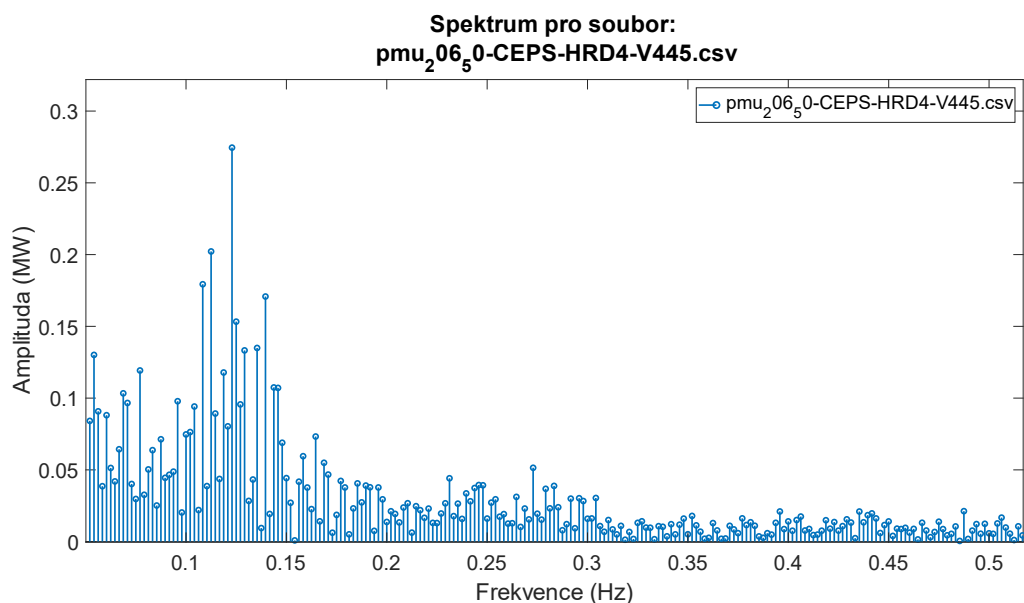
Obr. 2.27 Grafické znázornění maximálních amplitud hlášených LFO; datová sada 3

Jak lze vidět z předchozích frekvenčních spekter, odpovídají opět hlášenému frekvenčnímu rozsahu alarmů z výpisu hlášení. Je patrné, že výkonová oscilace během šíření přenosovou soustavou ČR snižuje svoji amplitudu. Alarmy se hlásí v posloupnosti východ-západ, kdy na dalších PMU jako NOS4-V404 (amplituda přes 0,25 MW) k HRD4-V220, V445 (pod 0,2 MW) a PRE4-V432 a V442 (kousek nad 0,2 MW) poněkud neočekávaně k překročení spouštěčů alarmů nedochází. Nicméně z frekvenční analýzy je jasné patrné tlumení amplitudy oscilace směrem na západ, což podobně jako u např. **sady dat 2** pravděpodobně indikuje totožný oscilační mód typu východ-západ.

2.2.4 Datová sada 4 (25012024-01-02Hz-50sam_per_sec)

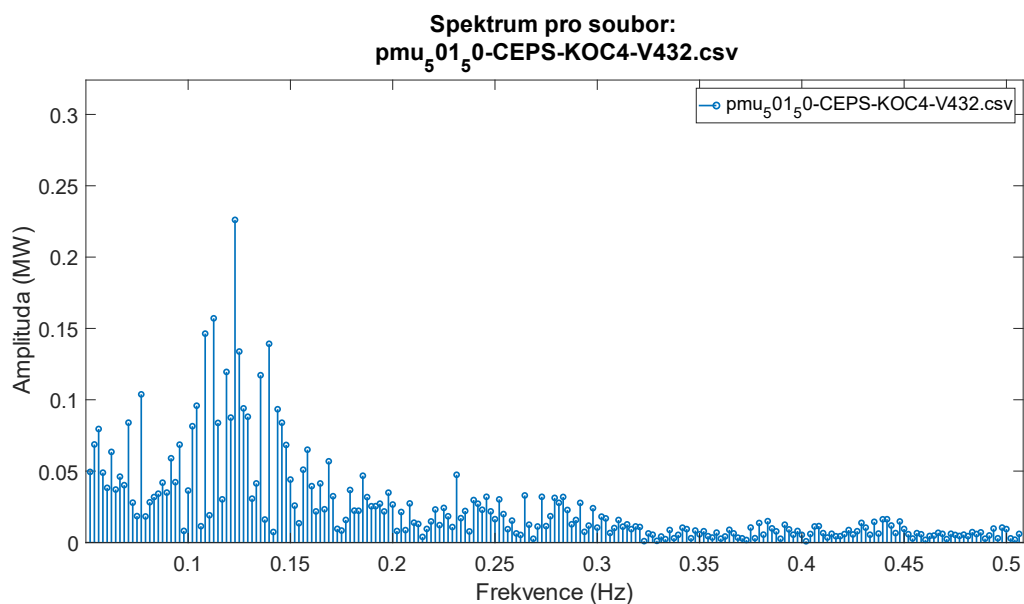
25.01.24	01.02.2024	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24
25.01.24	01.02.2024	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24
25.01.24	01.02.2024	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24
25.01.24	01.02.2024	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24
25.01.24	01.02.2024	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24
25.01.24	01.02.2024	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24
25.01.24	01.02.2024	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24
25.01.24	01.02.2024	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24
25.01.24	01.02.2024	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24
25.01.24	01.02.2024	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24	01.02.24

Obr. 2.28 Hlášení alarmů řídicího systému; datová sada 4

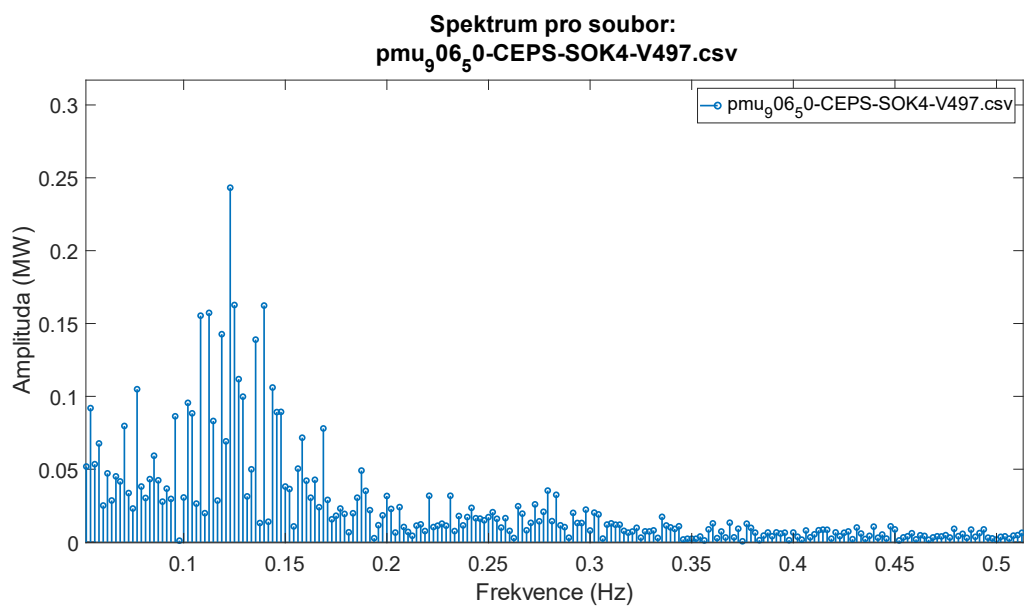


Obr. 2.29 Frekvenční spektrum CEPS-HRD4-V445; datová sada 4

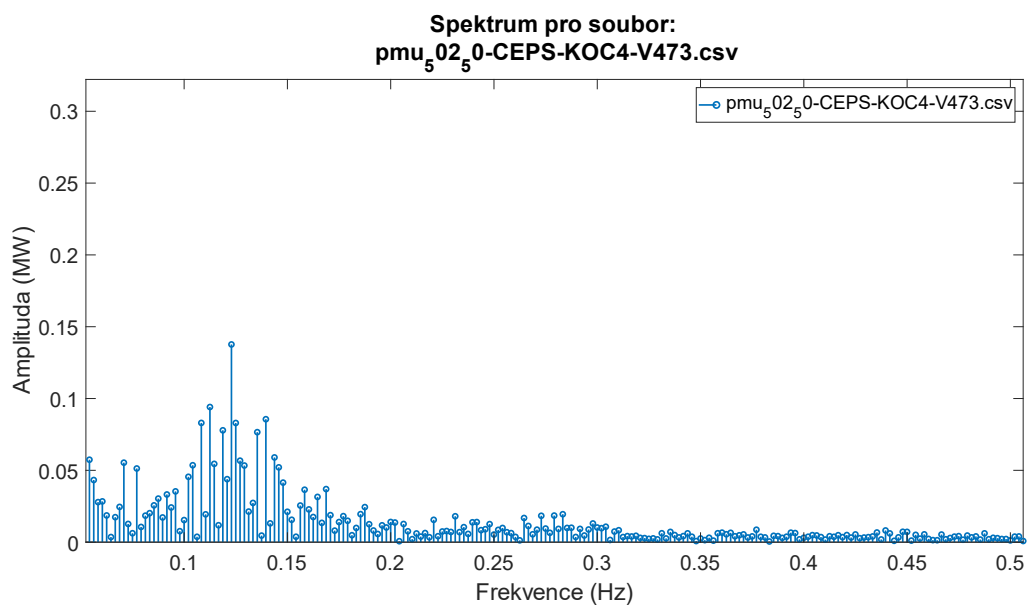
Pro HRD4-V446 chybí některá data (neúplné měření) a tak nelze sestavit frekvenční spektrum činného výkonu.



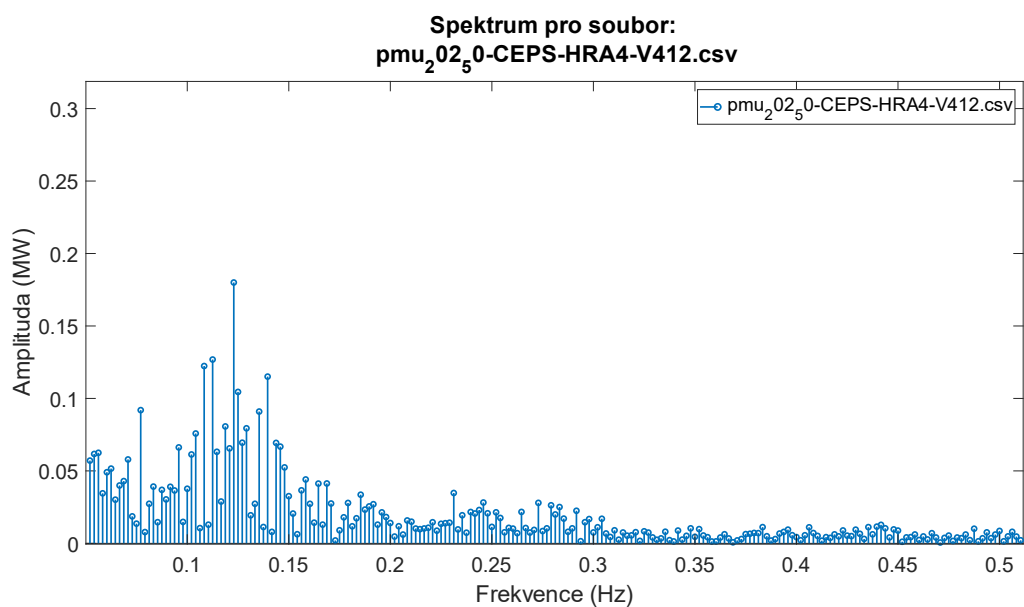
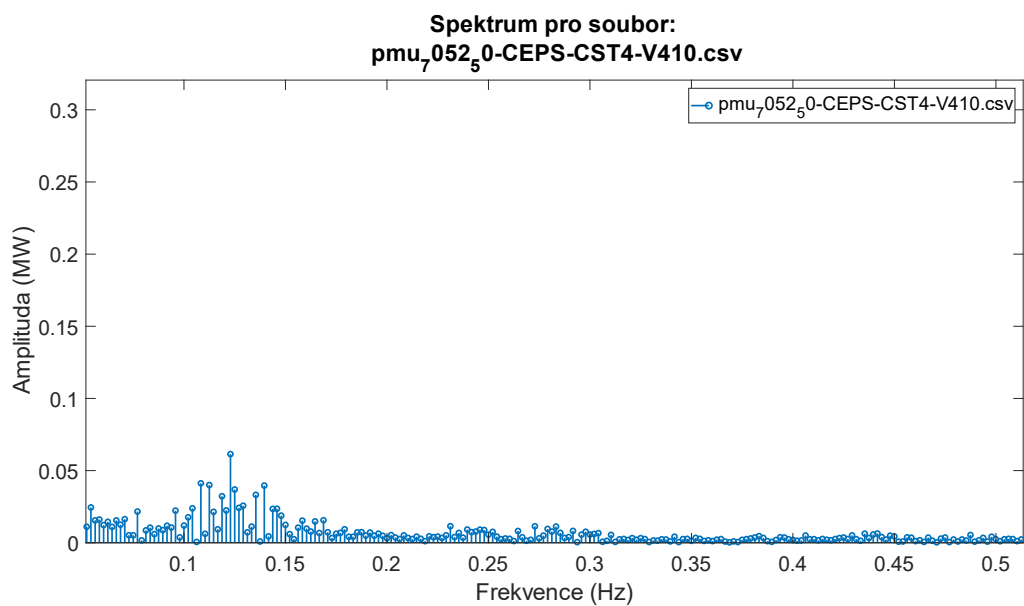
Obr. 2.30 Frekvenční spektrum CEPS-KOC4-V432; datová sada 4

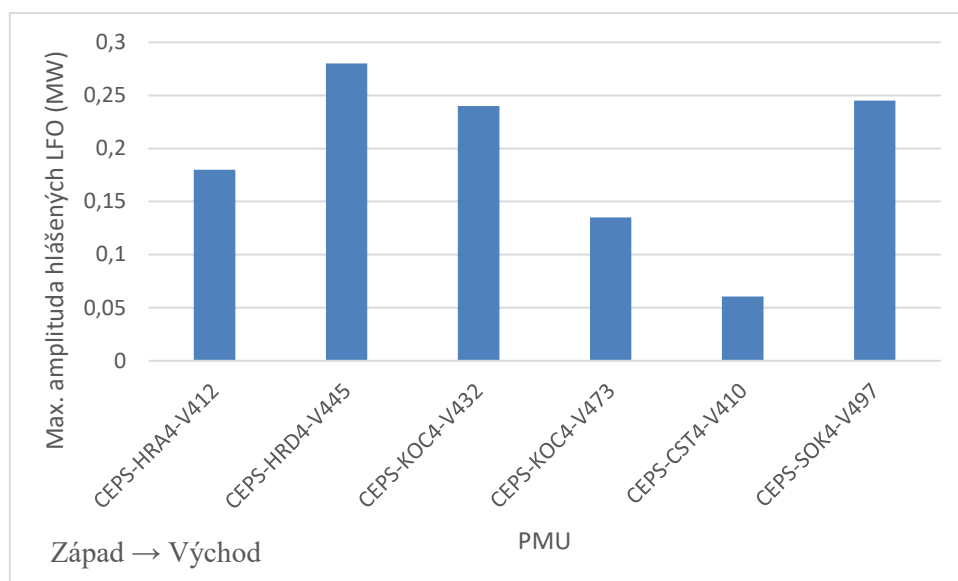


Obr. 2.31 Frekvenční spektrum CEPS-SOK4-V497; datová sada 4



Obr. 2.32 Frekvenční spektrum CEPS-KOC4-V473; datová sada 4





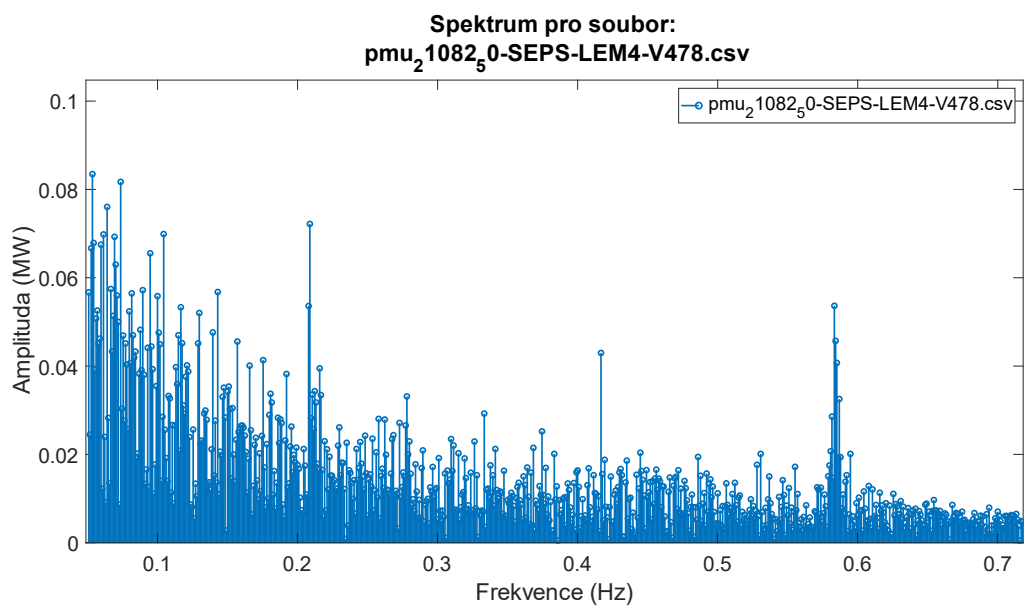
Obr. 2.35 Grafické znázornění maximálních amplitud hlášených LFO; datová sada 4

Jak lze vidět ze znázorněných frekvenčních spekter, frekvenční špičky oscilací odpovídají opět hlášenému frekvenčnímu rozsahu alarmů z výpisu hlášení. Je patrné, že nejprve se spustí alarmy pro rozvodnu HRD4 a po pěti sekundách současně zbytek dalších alarmů z logu. Velmi nestandardní je frekvenční spektrum na CST4-V410, kde amplituda oscilace **nepřesahuje ani 0,1 MW**. Oproti tomu alarmy nebyly hlášeny na jiných PMU, kde oscilace z frekvenčních rozborů byly identifikovány, tedy HMB4-V420 (kolem 0,2 MW), PRE4-V442 (přes 0,2 MW), PRE4-V432 (kolem 0,15 MW), CST4-V400 (kolem 0,15 MW), SVL4-V433 (přes 0,25 MW), HRA4-V411 (téměř 0,3 MW), SOK4-V424 (přes 0,2 MW) i V423 (přes 0,15 MW) a NOS4-V404 (přes 0,3 MW). Přičemž i bez znalosti časových posloupností lze vyvodit hypotézu (na základě rozdílných velikostí amplitud), že se pravděpodobně jedná o mezioblastní LFO typu sever-jih Evropy, kdy velká část PMU alarm nehlásila. Větší velikost amplitudy na SOK4-V497 by pak v tomto ohledu bylo možné přičíst jižnější poloze podobně jako KOC4-V432.

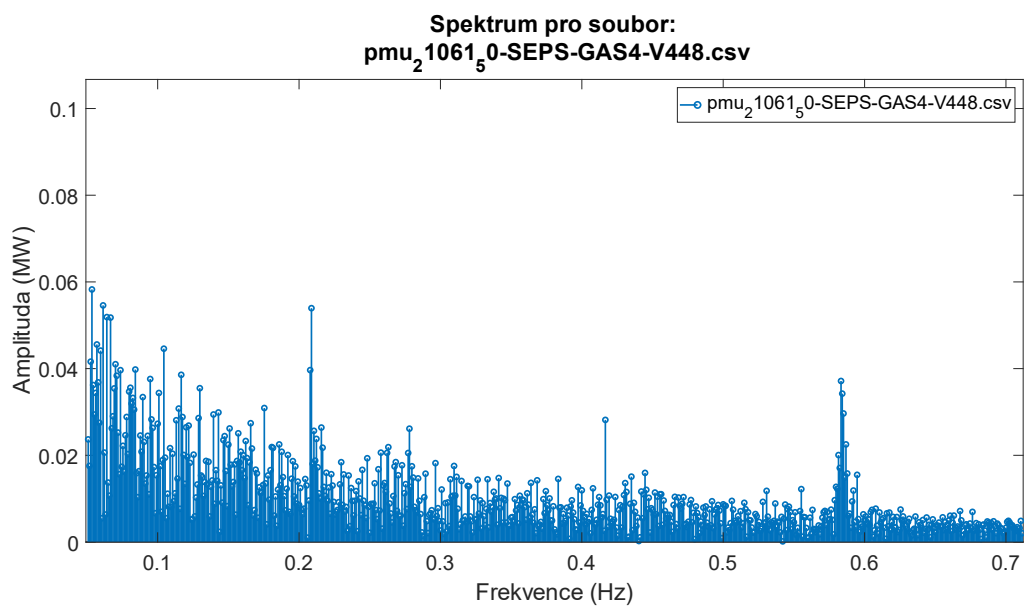
2.2.5 Datová sada 5 (27062024-053-067Hz-50sam_per_sec)

čas	PMU	čas	PMU	čas	PMU	čas	PMU	čas	PMU
27.6.2024 05:30:00	CEPS-HRA4-V412	27.6.2024 05:30:00	CEPS-HRD4-V445	27.6.2024 05:30:00	CEPS-KOC4-V432	27.6.2024 05:30:00	CEPS-KOC4-V473	27.6.2024 05:30:00	CEPS-CST4-V410
27.6.2024 05:30:00	CEPS-HRA4-V412	27.6.2024 05:30:00	CEPS-HRD4-V445	27.6.2024 05:30:00	CEPS-KOC4-V432	27.6.2024 05:30:00	CEPS-KOC4-V473	27.6.2024 05:30:00	CEPS-CST4-V410
27.6.2024 05:30:00	CEPS-HRA4-V412	27.6.2024 05:30:00	CEPS-HRD4-V445	27.6.2024 05:30:00	CEPS-KOC4-V432	27.6.2024 05:30:00	CEPS-KOC4-V473	27.6.2024 05:30:00	CEPS-CST4-V410
27.6.2024 05:30:00	CEPS-HRA4-V412	27.6.2024 05:30:00	CEPS-HRD4-V445	27.6.2024 05:30:00	CEPS-KOC4-V432	27.6.2024 05:30:00	CEPS-KOC4-V473	27.6.2024 05:30:00	CEPS-CST4-V410
27.6.2024 05:30:00	CEPS-HRA4-V412	27.6.2024 05:30:00	CEPS-HRD4-V445	27.6.2024 05:30:00	CEPS-KOC4-V432	27.6.2024 05:30:00	CEPS-KOC4-V473	27.6.2024 05:30:00	CEPS-CST4-V410
27.6.2024 05:30:00	CEPS-HRA4-V412	27.6.2024 05:30:00	CEPS-HRD4-V445	27.6.2024 05:30:00	CEPS-KOC4-V432	27.6.2024 05:30:00	CEPS-KOC4-V473	27.6.2024 05:30:00	CEPS-CST4-V410
27.6.2024 05:30:00	CEPS-HRA4-V412	27.6.2024 05:30:00	CEPS-HRD4-V445	27.6.2024 05:30:00	CEPS-KOC4-V432	27.6.2024 05:30:00	CEPS-KOC4-V473	27.6.2024 05:30:00	CEPS-CST4-V410
27.6.2024 05:30:00	CEPS-HRA4-V412	27.6.2024 05:30:00	CEPS-HRD4-V445	27.6.2024 05:30:00	CEPS-KOC4-V432	27.6.2024 05:30:00	CEPS-KOC4-V473	27.6.2024 05:30:00	CEPS-CST4-V410
27.6.2024 05:30:00	CEPS-HRA4-V412	27.6.2024 05:30:00	CEPS-HRD4-V445	27.6.2024 05:30:00	CEPS-KOC4-V432	27.6.2024 05:30:00	CEPS-KOC4-V473	27.6.2024 05:30:00	CEPS-CST4-V410

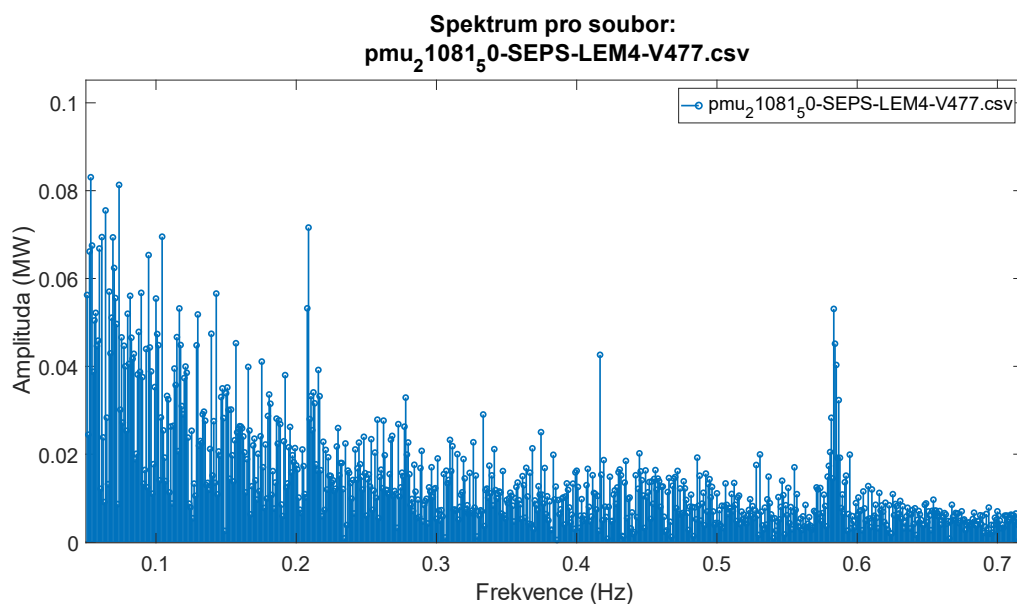
Obr. 2.36 Hlášení alarmů řídicího systému; datová sada 5



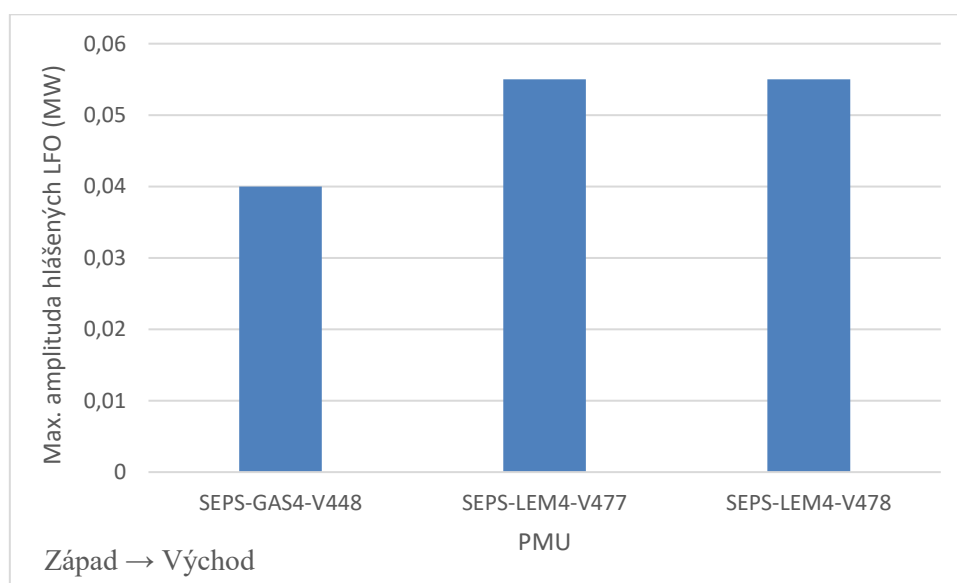
Obr. 2.37 Frekvenční spektrum SEPS-LEM4-V478; datová sada 5



Obr. 2.38 Frekvenční spektrum SEPS-GAS4-V448; datová sada 5



Obr. 2.39 Frekvenční spektrum SEPS-LEM4-V477; datová sada 5



Obr. 2.40 Grafické znázornění maximálních amplitud hlášených LFO; datová sada 5

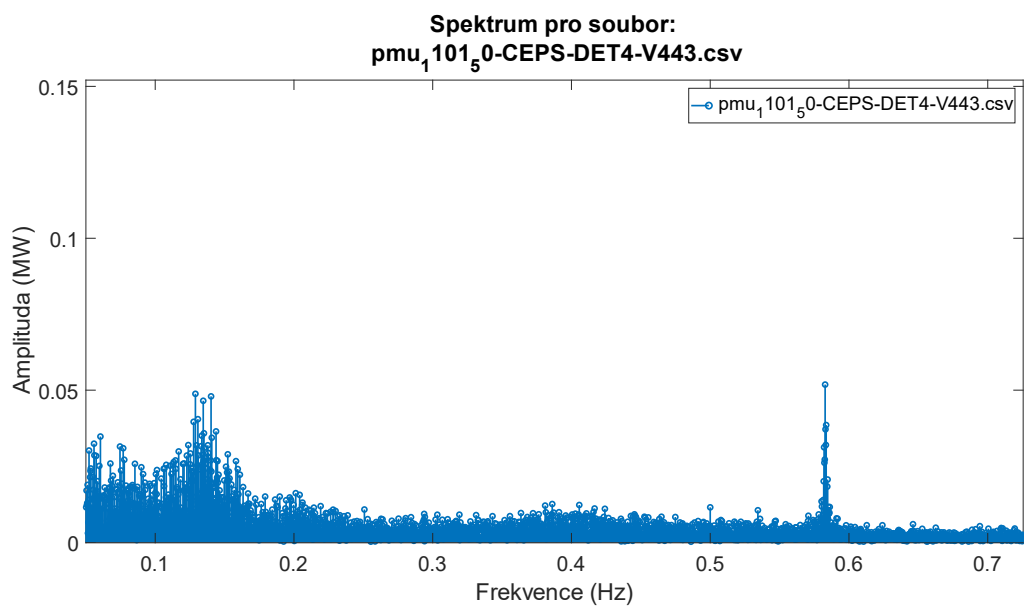
Tento segment měření a analýzy logu jednotlivých alarmů se soustředí na slovenská PMU, tedy na území operátora přenosové soustavy SEPS. Na první pohled je patrné, že spouštěče alarmů jsou pravděpodobně nastaveny na značně nižší hodnoty amplitud oscilací než na území ČEPS (pokud je spouštěčem/jedním ze spouštěčů velikost amplitudy oscilace). V případě detekované frekvence LFO (0,53-0,67 Hz) se tak jedná o amplitudy kolem **0,05 MW**. Avšak vypovídací hodnota takového alarmu je **minimálně diskutabilní**. Jak lze vidět na předešlých frekvenčních spektrech, nezanedbatelnou amplitudu (proti amplitudě detekované LFO) má oscilace s frekvencí kolem 0,41 Hz, oscilace s frekvencí kolem 0,21 Hz má pak amplitudu ještě **nezanedbatelně větší** než detekovaná oscilace. Vzhledem k relativně malým amplitudám LFO a značné nejistotě v zobrazení frekvenčních rozsahů ve výpisu hlášení tak pravděpodobně nedošlo ke spuštění alarmů (překročení spouštěčů) na straně ČEPS. Ačkoli je jistá systematickosti ve frekvenčních spektrech patrná, nízká amplituda a absence rozsáhlého systematického šíření detekovaných LFO vyvolává pochybnosti o mezioblastním charakteru

2.2.6 Datová sada 6 (30052024-053-067Hz-50sam_per_sec)

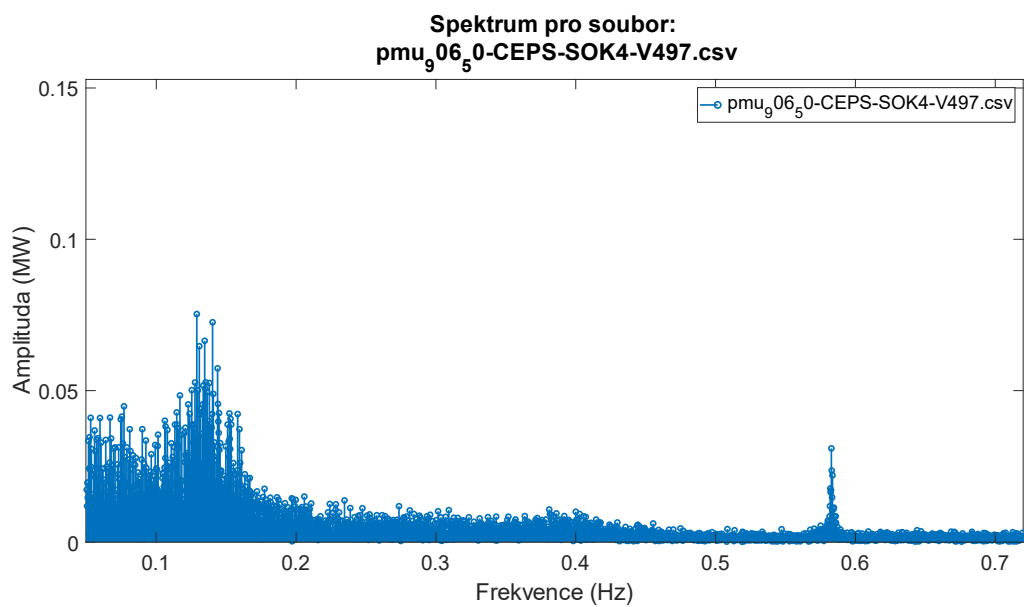
[illegible]

Spektrum pro soubor:
pmu₂1021₅-0-SEPS-VAR4-V404.csv

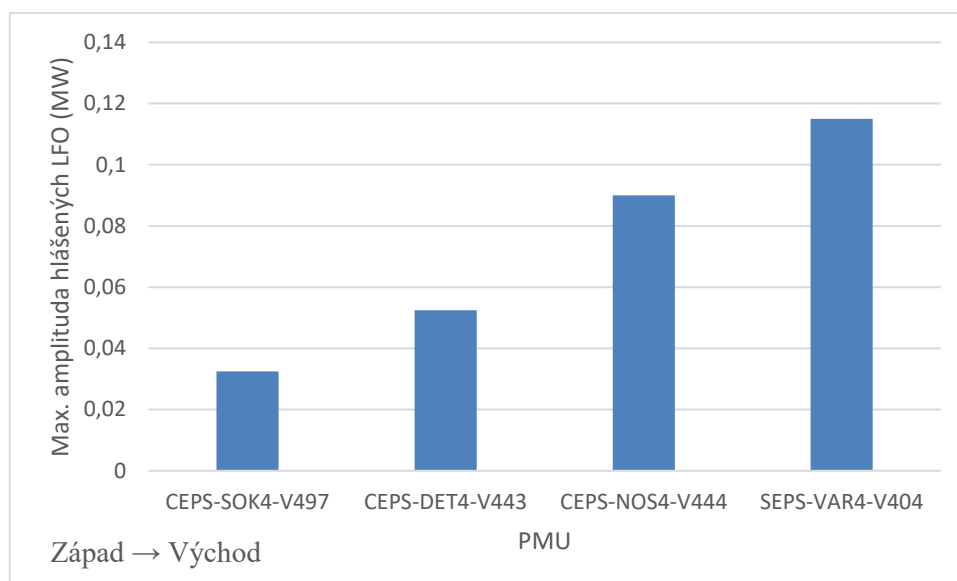




Obr. 2.44 Frekvenční spektrum CEPS-DET4-V443; datová sada 6



Obr. 2.45 Frekvenční spektrum CEPS-SOK4-V497; datová sada 6



Obr. 2.46 Grafické znázornění maximálních amplitud hlášených LFO; datová sada 6

Nejprve je třeba poznamenat, že se jedná o datovou sadu s časovým oknem delším než 1 h. Jelikož analýza dat probíhala v celém časovém okně sledovaného měření, nelze validovat (v rámci provedené analýzy) časové posloupnosti jednotlivých alarmů pro detekované oscilace. Z analyzovaných průběhů tedy lze potvrdit správnost samotné detekce oscilací (špičky kolem 0,58 Hz jsou jasně patrné) v souladu s výpisem hlášení. Za povšimnutí potom stojí relativně nízké amplitudy oscilací oproti předchozím případům (opakují se i u dalších PMU v podobných amplitudách, a to i na straně ČEPS). Ačkoli by se následně dalo předpokládat, že spouštěč alarmu může být poměrná velikost amplitudy oscilace proti amplitudě stejnosměrné složky, z grafických průběhů pro podobný předpoklad není patrná jednoznačná korelace. Právě SOK4-V497, která má amplitudu oscilace z alarmů na PMU ve výpisu hlášení nejnížší (značně pod 0,1 MW) při proti ostatním PMU relativně velkém přenášeném výkonu kolem 50 MW. Proti detekované frekvenční složce oscilací je tak nezvyklé, že další relativně vysoká amplituda oscilace (kolem 0,13 Hz) detekována nebyla. To mohlo být způsobeno např. krátkým trváním této oscilace.

Datová sada měření 6 je tak ve srovnání s ostatními poměrně neobvyklá, avšak frekvenční spektra v návaznosti na alarmy z logu řídicího systému mohla být v tomto případě velmi pravděpodobně ovlivněna dlouhým časovým oknem analýzy. Za předpokladu více spouštěčů alarmů se některé u amplitudově větších (než detekovaných) oscilací nemusely být překročeny, zatímco detekované oscilace mohly nastat v jiných časech, kdy došlo k překročení všech spouštěčů.

S ohledem na rozložení amplitud oscilací na jednotlivých PMU se potom s největší pravděpodobností opět jedná o oscilační mód východ-západ.

Závěr

Z analýzy frekvenčních spekter je patrné, že všechny alarmy, které řídicí systém WAMS na území ČEPS zobrazil ve výpisu hlášení, jsou zobrazeny validně (žádný nebyl falešně pozitivní) a všechny ohlášené frekvenční rozsahy pokrývají identifikované frekvence LFO. Naopak některá PMU by dle frekvenčních spekter měla alarmy hlásit, ale nehlásila (alarmy byly falešně negativní, resp. pozitivní alarmy nebyly hlášeny). Autor této analýzy však **v rámci rozsahu projektu** nedokáže posoudit, zda zmiňovaná frekvenční spektra neobsahují jen LFO velmi krátkého trvání. Takový rozbor by vyžadoval detailní analýzu každého frekvenčního spektra plovoucím oknem a pozorování doby trvání frekvenčních špiček. V návaznosti na to pak autor této analýzy nedokáže v rámci rozsahu projektu rozklíčovat strukturu (hodnoty, počet, hierarchii) spouštěčů těchto alarmů, a tak by ani detailní analýza plovoucím oknem nemusela přinést jednoznačné výsledky ohledně identifikace těchto spouštěčů (případně jejich správného/nesprávného nastavení, funkce, ...).

Dále lze konstatovat, že samotné rozdělení hlášení alarmů ve frekvenčních rozsazích se zdá přiměřeně vhodné vzhledem k analyzovaným měřením. Z frekvenčních spekter je patrné, že oscilace nejsou striktně o jedné frekvenční složce, ale spíše vystupujícím frekvenčním pásmu, a tak by vyhodnocení specifické frekvence oscilace mohlo být problematické a vést k chybám. Avšak je také třeba poznamenat, že analyzovány byly pouze frekvenční spektra, která byla alarmy identifikována (to samo o sobě nevypovídá nic o potenciálních LFO, které alarmy nezachytily).

Z dostupných pozorování také není jasné patrné, že by poměr amplitudy LFO ku stejnosměrné složce přenášeného výkonu na daném vedení byl jeden ze spouštěčů alarmů, což je výrazně pozorovatelné u datové sady 6. Také je třeba poznamenat, že z pozorování datové sady 5 na území SEPS se zdá, že tato PMU mají pro alarmy LFO jiné spouštěče než PMU na území ČEPS. Ačkoli identifikované frekvence LFO se s alarmy shodují, jsou však o relativně nízkých amplitudách (oproti PMU na území ČEPS) a u některých měření jsou dokonce převýšeny amplitudou LFO o jiné frekvenci. Navíc se také zdá, že datová sada z měření 5 není typická systémová mezioblastní oscilace. To lze pozorovat do jisté míry i u datové sady 6 (u PMU na straně ČEPS), avšak zde vyvstává možná nejistota způsobená dlouhým časovým oknem analýzy.

Co se týče samotných identifikovaných frekvencí LFO, lze říci, že **nekorespondují** striktně s teoretickými předpoklady popsány na začátku analýzy v odborné literatuře. To ovšem není zvláště neočekávané, jelikož připojení Turecka a Ukrajiny ke kontinentální Evropské síti pravděpodobně mohlo změnit některé oscilační módy, nebo vytvořit nové, případně celá problematika může být složitější, kdy se oscilace nemusí šířit striktními směry východ-západ, nebo sever-jih, nýbrž jejich jistými kombinacemi, jak naznačuje [3], kde je právě mimo jiné diskutován potenciální vliv připojení Turecka k bývalému UCTE. Autorovi této analýzy se však nepodařilo najít rozsáhlejší vědeckou práci aktuálnějšího data, která by tuto hypotézu a posuny ve frekvencích mezioblastních LFO mohla potvrdit. Oproti tomu je z měření patrné, že teoretický základ popisující skupiny generátorů oscilující limitně mezi severem-jihem a východem-západem Evropy (na základě amplitud LFO) je s vysokou pravděpodobností správný (resp. stále platný), přičemž Česká republika by tak byla ve většině případů tranzitní zemí, kde by amplitudy oscilací byly oproti okrajům soustavy relativně malé. Pro ověření této hypotézy by ale bylo třeba analyzovat měřená data, ze kterých by bylo možné dopočítat činné výkony na okrajích soustavy kontinentální Evropy.

Ohledně obecnějšího hodnocení projevů LFO lze pak s přiměřenou jistotou konstatovat, že nejvyšší amplitudy se objevovaly na vedení 400 kV (všechna měření), ačkoli stále byly nezanedbatelné na některých vedeních 220 kV, kde však byly menší amplitudy pravděpodobně způsobeny relativně nižší přenosovou kapacitou vedení.

Literatura

- [1] <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8315223>
Y. Shu, X. Zhou and W. Li, "Analysis of low frequency oscillation and source location in power systems," in *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 58-66, March 2018, doi: 10.17775/CSEEJPES.2017.00660.
- [2] <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8893487>
Bektimirov, A. T., et al. "Analysis of the Kazakhstan's Grid Oscillation Instability by Using WAMS System and PSCAD Program." *2019 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2019, <https://doi.org/10.1109/upec.2019.8893487>.
- [3] <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5589932>
E. Grebe, J. Kabouris, S. López Barba, W. Sattinger and W. Winter, "Low frequency oscillations in the interconnected system of Continental Europe," *IEEE PES General Meeting*, Minneapolis, MN, USA, 2010, pp. 1-7, doi: 10.1109/PES.2010.5589932.
- [4] https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html?s_tid=srchtitle_site_search_1_fft
Fast Fourier Transformation - Matlab

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno
0	Všechny	Publikování dokumentu	02.02.2025	M. Vinš