

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



**A szolgáltatott villamos energia minőségének és a felhasználás
hatékonyságának on-line vizsgálata**

PhD értekezés

Készítette:

Bátorfi Richárd

okleveles mérnök-informatikus

HATVANY JÓZSEF INFORMATIKAI TUDOMÁNYOK
DOKTORI ISKOLA

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ

Szigeti Jenő, CSc, dr.habil.

EGYETEMI TANÁR

TUDOMÁNYOS VEZETŐ

Váradiné Szarka Angéla, PhD, dr.habil.

EGYETEMI DOCENS

Miskolc

2013

Tartalomjegyzék

TARTALOMJEGYZÉK	1
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	4
JELÖLÉSEK JEGYZÉKE	5
RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE	7
A TÉMAVEZETŐ AJÁNLÁSA.....	8
1. BEVEZETÉS	9
1.1. IRODALMI ÁTTEKINTÉS	10
1.2. AZ ÉRTEKEZÉS CÉLKITŰZÉSE	12
2. A VILLAMOS ENERGIA.....	14
2.1. A VILLAMOSENERGIA-MINŐSÉG FOGALMA	14
2.2. AZ ELEKTROMÁGNESES ÖSSZEFÉRHETŐSÉG EMC ÉS A VILLAMOSENERGIA-MINŐSÉG KAPCSOLATA	14
2.3. FESZÜLTSGMINŐSÉG	15
2.3.1. Események, változások.....	17
2.3.2. Frekvenciaváltozás	17
2.3.3. Feszültségnövekedés, -letörés, feszültségkimaradás, -tranziens.....	18
2.3.4. Harmonikusok.....	19
2.3.5. Flicker érték.....	21
2.3.6. Hálózati-aszimmetria.....	22
2.4. A VILLAMOS ENERGIA FELHASZNÁLÁSA	22
2.4.1. Csúcskihasználási tényező	23
2.4.2. A meddőenergia okozta többletfogyasztás és energiaköltség	23
2.4.3. A terhelés-aszimmetria által okozott többletköltségek.....	24
2.4.4. Áramtorzítás által okozott felharmonikus teljesítmények mértéke, és ennek többletköltsége.....	25
3. MÉRÉSHEZ ÉS KIÉRTÉKELÉSHEZ HASZNÁLT MÓDSZEREK ÉS ESZKÖZÖK.....	26
3.1. BEVEZETÉS	26
3.2. A VILLAMOS ENERGIA MÉRÉSÉT TÁRGYALÓ SZABVÁNYOK	26
3.2.1. MSZ EN 61000-4-30.....	26
3.2.2. MSZ EN 61000-4-7.....	33
3.3. SZÁMÍTÓGÉPPEL VEZÉRELT MÉRŐRENDSZEREK.....	35
3.3.1. Analóg jel digitalizálásának alapjai.....	35
3.3.2. Számítógépes mérőrendszer felépítése	36
3.4. HÁLÓZATANALIZÁLÓ RENDSZER FELÉPÍTÉSE, FEJLESZTÉSÉNEK MÉRFÖLDKÖVEI	38
3.4.1. Bevezető.....	38
3.4.2. Villamos energetikai rendszerek mérésének és analizálásának folyamata.....	38
3.4.3. Mérőrendszer felépítése, kezdetleges szoftver megvalósítások.....	38
3.4.4. A mérőrendszer hardver- és szoftverrendszerének továbbfejlesztése	40
3.5. ÖSSZEGZÉS	44
4. SZINKRONIZÁLÁS.....	45
4.1. BEVEZETŐ	45
4.2. FREKVENCIA INGADOZÁS OKA.....	48

4.3.	MINTAVÉTELEZÉSI FREKVENCIAVAL TÖRTÉNŐ SZINKRONIZÁLÁS	50
4.4.	MINTASZÁMMAL TÖRTÉNŐ SZINKRONIZÁLÁS.....	51
4.5.	A MINTASZÁMMAL TÖRTÉNŐ SZINKRONIZÁLÁS ELŐNYE	56
4.6.	A MÓDSZER MEGVALÓSÍTÁSA.....	57
4.7.	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	59
5.	A HÁLÓZATI FREKVENCIA MEGHATÁROZÁSA	60
5.1.	BEVEZETŐ	60
5.2.	NULLA-ÁTMENETES FREKVENCIABECSLŐ ELJÁRÁS	60
5.3.	HÁLÓZATI ZAVAROK HATÁSA A FREKVENCIABECSLÉSRE	62
5.4.	ÖSSZEGZÉS	65
5.5.	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	66
6.	VILLAMOS PARAMÉTEREK ON-LINE FELDOLGOZÁSA TÖBBPROCESSZOROS RENDSZEREK ALKALMAZÁSÁVAL	67
6.1.	BEVEZETÉS	67
6.2.	TÖBBPROCESSZOROS FELDOLGOZÁS LEHETŐSÉGEI.....	68
6.2.1.	Single Instruction, Single Data (SISD)	68
6.2.2.	Multiple Instruction, Single Data (MISD)	68
6.2.3.	Single Instruction, Multiple Data (SIMD)	68
6.2.4.	Multiple Instructions, Multiple Data (MIMD).....	70
6.3.	VILLAMOS PARAMÉTEREK MEGHATÁROZÁSA KÖZÖS MEMÓRIÁS TÖBBPROCESSZOROS RENDSZEREKKEL	72
6.4.	SPECIÁLIS MEGOLDÁSOK ALKALMAZÁSA	77
6.5.	TÖBBSZÁLAS MEGVALÓSÍTÁS HATÉKONYSÁGÁNAK TESZTELÉSE	79
6.6.	HFKV JELEDEKTELŐ ÉS TELJESÍTMÉNYUGRÁST KERESŐ SPECIÁLIS SZÁL	80
6.7.	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	80
7.	HARMONIKUSOKKAL TERHELT VILLAMOS HÁLÓZATOK TELJESÍTMÉNYPARAMÉTEREINEK VIZSGÁLATA	81
7.1.	BEVEZETÉS	81
7.2.	SZINUSZOS HÁLÓZATOK.....	81
7.3.	NEM-SZINUSZOS HÁLÓZATOK	83
7.4.	SZIMULÁCIÓ	86
7.5.	TELJESÍTMÉNY-PARAMÉTEREK KISZÁMÍTÁSÁNAK BEÉPÍTÉSE AZ ONLINE HÁLÓZATANALIZÁLÓ RENDSZERBE	87
7.6.	A NEM-AKTÍV ÉS A MEDDŐTELJESÍTMÉNY KÖZÖTT KAPCSOLAT	88
7.7.	ÖSSZEGZÉS	89
7.8.	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	90
8.	ASZINKRON MÉRŐRENDSZER KIFEJLESZTÉSE MULTIPLEXELT MÉRÉSADATGYŰJTŐVEL.....	91
8.1.	BEVEZETÉS	91
8.2.	A FELADAT RÉSZLETEZÉSE	91
8.3.	MULTIPLEXELT MÉRÉSADATGYŰJTŐ KÁRTYÁKKAL MEGVALÓSÍTOTT ASZINKRON MÉRŐRENDSZER	92
8.4.	UNITESZTER TOVÁBBI FUNKCIÓNAK BEMUTATÁSA	97
8.5.	A MÉRT ÉS SZÁMÍTOTT ADATOK MEGJELENÍTÉSE ÉS KIÉRTÉKELÉSE	99
8.6.	ÖSSZEGZÉS	100
8.7.	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	101
9.	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	102

10. EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSA	104
10.1. BEVEZETÉS	104
10.2. A HÁLÓZATANALIZÁLÓ MÉRŐSZOFTVER	104
10.3. A KIÉRTÉKELŐ SZOFTVER	107
10.4. IPARI MÉRÉSEK KIÉRTÉKELÉSE	111
10.4.1. <i>Meddőenergia problémája</i>	111
10.4.2. <i>Megemelt feszültségérték</i>	112
10.4.3. <i>Terhelés-aszimmetria</i>	113
10.4.4. <i>Röntgengépek okozta áramtranziensek</i>	113
11. ÖSSZEGZÉS.....	114
12. SUMMARY	115
13. A TÉZISEKHEZ TARTOZÓ TUDOMÁNYOS PUBLIKÁCIÓK.....	116
IDEGEN NYELVŰ LEKTORÁLT FOLYÓIRATCIKK:	116
MAGYAR NYELVŰ LEKTORÁLT FOLYÓIRATCIKK:	116
IDEGEN NYELVŰ KONFERENCIA KIADVÁNYÁBAN MEGJELENT KONFERENCIA-ELŐADÁSOK:	116
MAGYAR NYELVŰ KONFERENCIA KIADVÁNYÁBAN MEGJELENT KONFERENCIA-ELŐADÁSOK:	117
ÍRÁSBAN MEG NEM JELENT IDEGEN NYELVŰ ELŐADÁSOK:	118
ÍRÁSBAN MEG NEM JELENT MAGYAR NYELVŰ ELŐADÁSOK:	118
OKTATÁSI JEGYZET:	119
EGYÉB:	119
REFERENCIÁK	120
MELLÉKLETEK	125

Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt szeretnék köszönetet mondani **Váradiné Dr. Szarka Angéla** docens asszonynak (ME, EET) azért, hogy elindított a tudományos pályán. Segítségével 2006-tól már kutató-demonstrátorként dolgozhattam a Miskolci Egyetem Elektrotechnikai- Elektronikai Tanszékén, majd bizalmáról biztosítva bátorított a PHD tanulmányom megkezdésére és témavezetőmként, valamint barátként is mindvégig segítségemre volt, intelmeivel vezetett a pályámon.

Köszönetem nyilvánítom **Dr. Szarka Tivadar** professzor emeritus úrnak (ME, EET) a kutatóéveim alatt nyújtott folyamatos támogatásáért és türelméért.

Köszönöm továbbá **Dr. Kovács Ernő** tanszékvezető úrnak (ME, EET) a segítségét, aki munkám során rendíthetetlen tanácsaival támogatott.

Köszönet illeti **Dr. Tóth Tibor** professzor urat (ME, AIT), aki a Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola korábbi vezetőjeként folyamatosan figyelemmel kísérte munkámat és szorgalmazta előrehaladásomat.

Köszönöm **Dr. Unhauzer Attila** (ME, EET) barátomnak és volt kollégámnak, akivel pályakezdésünk óta szorosan együttműködtünk kutatói tevékenységünk keretében és munkánk során egymást támogatva haladtunk előre a kitűzött cél felé.

Köszönöm a Miskolc Egyetem Elektrotechnikai- Elektronikai Tanszék valamennyi dolgozójának szakmailag vagy egyéb módon nyújtott segítségét.

Köszönöm **Bencs Róbert** diplomatervező hallgatónak a közös munka eredményeit.

Hálás vagyok családom tagjainak, menyasszonyomnak, biztatásukért és türelmükért.

Az értekezés a TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0008 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Jelölések jegyzéke

bit	digitalizálás bitmélysége
$\cos(\varphi)$	teljesítménytényező
$\cos(\varphi_1)$	alapharmonikusra vonatkozó teljesítménytényező
D_H	felharmonikusokra vonatkozó torzítási teljesítményt
D_I	áram torzítási teljesítmény
D_U	feszültség torzítási teljesítmény
E_{rot}	forgásból adódó kinetikai energia
f, f_h	hálózati frekvencia
f_c	számolt hálózati frekvencia
$f_{\text{jel(max)}}$	egy összetett periódikus jel legnagyobb frekvenciájú összetevője
f_{mv}	mintavételezési frekvencia
H_{Treg}	mintaszámmal való szinkronizálás során előforduló abszolút hiba
I	áram effektív értéke
i	áram pillanatértéke
I_0	áramjel egyenösszetevője
I_1	alapharmonikus áram effektív értéke
i_1	hálózati frekvenciájú áramjel pillanatértéke
I_H	felharmonikus feszültségek eredő effektív értéke
i_H	harmonikus és egyenösszetevőből kialakuló áramjel pillanatértéke
I_h	h-dik harmonikus áram effektív értéke
I_p	hatásos áram összetevő szinuszos hálózat esetén
I_Q	meddő áram összetevő szinuszos hálózat esetén
I_S	látszólagos áram szinuszos hálózat esetén
J	forgógép tehetetlenségi nyomatéka
K_{CS}	csúcskihasználási tényező
N	nem-aktív teljesítmény
N_{10p}	10 hálózati periódus alatti minták száma
N_{1p}	1 hálózati periódus alatti minták száma
P	hatásos teljesítmény
p	teljesítmény pillanatértéke
P_1	alapharmonikusok okozta hatásos teljesítményt
p_a	a hatásos (aktív) teljesítményrész pillanatértéke
P_c	fogyasztó által igényelt teljesítmény
P_g	generátor által szolgáltatott teljesítmény
P_H	felharmonikusok okozta hatásos teljesítményt
P_q	a meddő (reaktív) teljesítményrész pillanatértéke
$P_{\text{st}}, P_{\text{lt}}$	flicker értékek
P_v	vezetéken keletkező hatásos teljesítményvesztés
$P_{v(\text{id})}$	vezetéken keletkező hatásos teljesítményvesztés ideális esetben
Q	digitalizálás esetén a kvantum szélessége
Q	meddő teljesítmény
R	vezeték ellenállása
R_3	vezeték ellenállása ellenállása a harmadik harmonikusra
S	látszólagos teljesítmény

S_1	alapharmonikusra vonatkozó látszólagos teljesítmény
S_H	felharmonikusokra vonatkozó látszólagos teljesítmény
S_N	nem-alapharmonikusra vonatkozó látszólagos teljesítmény
THD_I	áram teljes harmonikus torzítása
THD_U	feszültség teljes harmonikus torzítása
T_{reg}	vizsgált regisztrátum ideje
u	feszültségjel pillanatértéke
U	feszültség effektív értéke
$\hat{U}$	szinuszos feszültség csúcsértéke
U_0	feszültségjel egyenösszetevője
u_1	hálózati frekvenciájú feszültségjel pillanatértéke
U_1	alapharmonikus feszültség effektív értéke
U_{12}, U_{23}, U_{31}	vonali feszültségek
$U_{12f1}, U_{23f1}, U_{31f1}$	vonali feszültségek alapharmonikusai
U_a, U_b, U_c	fázisfeszültségek
U_{eff}	feszültség effektív értéke
$U_{eff(1/2)}$	feszültség egy periódusnyi értéke fél periódusonként frissítve
U_{FS}	digitalizálendő feszültségtartomány
u_H	harmonikus és egyenösszetevőből kialakuló feszültségjel pillanatértéke
U_H	felharmonikus áramok eredő effektív értéke
U_h	h-dik harmonikus feszültség effektív értéke
U_n	negatív sorrendű összetevő háromfázisú hálózatonál
u_n	negatív és pozitív összetevő aránya háromfázisú hálózatonál
U_n	villamos hálózatra jellemző névleges effektív feszültség érték
U_p	pozitív sorrendű összetevő háromfázisú hálózatonál
U_r, U_s, U_t	fázisfeszültségek háromfázisú hálózatonál
U_z	zérus sorrendű összetevő háromfázisú hálózatonál
u_z	zérus és pozitív összetevő aránya háromfázisú hálózatonál
W_v	veszteségi energia
$W_{v(id)}$	ideális veszteségi energia
X_{u1}, X_{u2}	korrigálandó időintervallumok a lineáris eljáráshoz
Δf_{10s}	frekvenciaingadozás 10 másodperc alatt
φ	feszültség és áramjel közötti fázisszög szinuszos hálózat esetén
φ_1	alapharmonikus feszültség és alapharmonikus áramjel közötti fázisszög
ω	forgógép tengelyének szögsebessége

Rövidítések jegyzéke

DSP – Digital Signal Processor (Digitális Jelfeldolgozó Processzor)

ELMŰ – Budapesti Elektromos Művek

ÉMÁSZ – Észak-magyarországi ÁramSzolgáltató

EMC - Electromagnetic compatibility (Elektromágneses Kompatibilitás)

FIFO – First Input First Output (elsőként bevitt elem elsőnek kerül ki)

FPGA – Field Programmable Gate Array (A felhasználás helyén programozható kaputömb)

FTP – File Transfer Protocol (Fájlátviteli Protokol)

GPRS – General Packet Radio Service (Általános csomag alapú rádiós szolgáltatás)

HFKV – Hangfrekvenciás Központi Vezérlés

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektromos és Elektronikai Mérnökök Intézménye)

LAN – Local Area Network (Helyi Hálózat)

MIMD – Multiple Instructions, Multiple Data (több utasítás, több adatfolyam)

MISD – Multiple Instruction, Single Data (több utasítás, egy adatfolyam)

MPP – Masszívan Párhuzamos Processzorok

MUX – Multiplexer

PLL – Phase-Locked Loop (Fáziszárt hurok)

PQ – Power Quality (Villamosenergia-minőség)

RMS – Root Mean Square (Négyzetes középérték)

SIMD – Single Instruction, Multiple Data (egy utasítás, több adatfolyam)

SISD – Single Instruction, Single Data (egy utasítás, egy adatfolyam)

SMS – Short Message Service (rövid szöveges üzenet szolgáltatás)

THD – Total Harmonic Distortion (Teljes Harmonikus Torzítás)

THDG – Group Total Harmonic Distortion (Teljes harmonikuscsoport-torzítás)

THDS – Subgroup Total Harmonic Distortion (Teljes harmonikusalcsoport-torzítás)

VCO – Voltage-Controlled Oscillator (Feszültségvezérelt Oszcillátor)

A témavezető ajánlása

Bátorfi Richárd doktorjelölt „A szolgáltatott villamos energia minőségének és a felhasználás hatékonyságának on-line vizsgálata” című PhD értekezéséhez

A doktori értekezés témája a villamos hálózatok vizsgálati módszerei, a jelölt több újonnan kidolgozott modellt, módszert és algoritmust mutat be a villamos hálózatok minőségének és a villamos energia felhasználás hatékonyságának számítógépes mérése és analízisa témakörben. A dolgozat kiemelt értéke, hogy a tudományos módszerességgel kidolgozott új elméleti megoldások, újonnan kifejlesztett műszerekben, a gyakorlatban is megvalósultak, laboratóriumi és ipari körülmények között tesztelésre kerültek. A jelölt által kidolgozott módszereket az Elektrotechnikai- Elektronikai Tanszék már több ipari megbízása során sikeresen alkalmazta, a dolgozat 8. fejezetében bemutatott módszert pedig a Robert Bosch Power Tool alkalmazza több éve meglelégedéssel.

A dolgozatban bemutatott szinkronizálási eljárás megvalósításával, a többszálú feldolgozóval és a teljesítményvizsgálatával új, szoftveres módszereket biztosít a hálózatanalízisi problémák megoldására, növelve ezzel a rendszer hatékonyságát, sebességét, megbízhatóságát és kapacitását.

Az értekezés jól felépített egységet alkot, magába foglalja a jelölt elmúlt 6 év alatt elért legfontosabb kutatási eredményeit. A jelölt doktori tevékenységének ideje alatt rendszeresen publikált és tartott előadásokat nemzetközileg elismert fórumokon, angol és magyar nyelven. IF-os közleménye a Measurement (Elsevier) című folyóiratban jelent meg. A doktori értekezésben foglalt új tudományos eredmények szakmai meggyőződése szerint nagymértékben hozzájárulnak a villamos hálózat minőségi és hatékonysági vizsgálatainak fejlődéséhez.

Folyamatos tudományos munkában való részvétele, szorgalma, példamutató magatartása és az itt feltüntetett eredmények együtt igazolják a jelölt magas színvonalú tudományos ismeretét és az önálló kutatómunkára való alkalmasságát. Doktoranduszi majd utána oktatói tevékenysége során kiemelt figyelmet fordított a tehetséges hallgatók bevonására a tudományos kutatásokba, aminek köszönhetően a tanszéki kutatócsoportban jelenleg is kiváló informatikus hallgatók dolgoznak és viszik tovább a jelölt tudományos témáját.

Kijelentem, hogy az értekezés hiteles adatokat tartalmaz, az abban foglalt eredmények a jelölt saját eredményei, valamint a dolgozat minden vonatkozásban megfelel a Hatvan József Informatikai Tudományok Doktori Iskola által megkövetelt tartalmi és formai követelményeknek. Fentiek alapján a PhD cím odaítélését támogatom és javaslom.

Miskolc, 2013. május 21.



Váradiné Szarka Angéla, PhD. dr. habil.
témavezető

1. Bevezetés

A villamos energia napjainkban ipari, kereskedelmi és fogyasztási szempontból is egy kiemelkedően fontos termék. A jelenlegi életformánkhoz szükséges villamos berendezések, motorok, számítógépek, távközlési- és egyéb berendezések nem tudnak villamos energia nélkül üzemelni. A társadalom működtetéséhez, a gazdaság növekedéséhez, az életszínvonal javításához [1] nélkülözhetetlen a folyamatosan rendelkezésre álló villamos energia. Egy esetleges tartósabb áramkimaradás súlyos gazdasági, társadalmi, sőt egészségügyi problémákat is okozhat, ezért a folyamatos rendelkezésre állásának szükségessége megkérdőjelezhetetlen.

A villamos energia jelentősen különbözik más termékektől, mivel megfoghatatlan, láthatatlan, különlegessége továbbá abban is rejlik, hogy nincs lehetőség a tárolására (gazdaságosan nagy mennyiségben nem tárolható). A villamos energiát jellemzően a felhasználás helyétől távol a felhasználás pillanatában állítják elő, sok hasonló generátorral együtt táplálják a hálózatba, és több transzformátoron, hosszú kilométernyi szabadvezetéken, és alkalmanként földkábeleken keresztül továbbítják a felhasználás helyére. A villamos energia könnyen szállítható, tiszta energia, amellett, hogy a balesetmentes használata bizonyos óvintézkedéseket igényel. A felhasználási helyen vételezett energia minőségének biztosítása nem egyszerű, a fogyasztónak nincs lehetősége arra, hogy csak a minőségileg megfelelő villamos energiát vegye igénybe a hálózatból, vagy hogy a rossz minőség miatt, ha berendezéseit működtetni akarja, a vételezést megtagadja [2].

A villamos energiaszolgáltatás egyedi jellemzője, hogy sok millió fogyasztó a villamos hálózaton keresztül össze van kapcsolva, köztük számos olyan fogyasztó is, melyek hibás működésük során károsan befolyásolhatják az így, mások által is vételezett villamos energia minőségét. A hálózati zavarokat, így például a hullámalak torzulás okozta harmonikusokat, feszültségletöréseket, zárlatokat stb. a fogyasztók berendezései keltik. Ezek a káros zavarok a hálózaton keresztül továbbterjedve eljutnak más vétlen fogyasztókhoz is, súlyos károkat, költségnövekedést okozva. Ezért a káros visszahatásokat okozó fogyasztók feltárása és a működési hibák kijavítása az egyik lehetőség, és a legfontosabb feladat a villamos energia minőségének javítására, mivel a rossz minőség többletköltséggel jár mind a vétkes, mind a vétlen fogyasztónak.

A legnyilvánvalóbb energiaszolgáltatási hibának a feszültségkimaradás tekinthető. A hosszabb idejű feszültségkimaradás valamennyi fogyasztó számára gondot okoz, a feszültség kimaradásra „érzékeny” iparágaknál pedig, egy gyártósor leállást eredményező rövid idejű feszültségkimaradás is jelentős többletköltséget jelent.

A villamos energia minőségével kapcsolatos kutatások az elmúlt évtizedekben rohamosan növekedtek. Ezen a területen megjelent publikációk száma az 1980-as évek óta rohamosan növekszik. Annak, hogy napjainkban a villamos energia minősége egyre fontosabb kérdés, több oka van, így különösen a következők [3]:

- Az elektronikával támogatott villamos berendezések egyre kevésbé viselik el a hálózati zavarokat, így azok meghibásodása gyártósorok leállításához, termelési

költségek növekedéséhez vezet. Emellett az olyan villamos berendezések, melyek teljesítményelektronikai átalakítókön keresztül kapják az áramot (simple power electronic converters) elkerülhetetlen hálózati zavarokat is generálhatnak. Irodalmi adatok szerint [61] az elektromos-energia minőségi problémái az EU-tagországaiban évente 10 milliárd Eurónál nagyobb veszteséget okoznak, csak az iparban, a közlekedésben és a kereskedelemben.

- A kereskedelem fogyasztó-centrikussá vált, ahol a fogyasztó megköveteli, hogy egyre több információt kapjon az általa vételezett villamos energia minőségéről. Napjaink informatikai és mérés technikai eszközeivel, illetve a Smart Grid rendszerek elterjedésével magától értetődő, hogy a fogyasztó pontosan tudni szeretné mit is „vásárol”.
- A megújuló energiaforrásokon alapuló erőművek pár évtized óta egyre nagyobb szerepet kapnak. Ezen erőművek mindamellett, hogy érzékenyek lehetnek hálózati zavarokra, olyan minőségi problémákat okozhatnak, mint a feszültségváltozások, a flicker vagy a hullámalak-torzulás [62].
- Napjainkban a környezetvédelem, az energiagazdálkodás egyre fontosabb kérdés. A szabályozott villamos hajtások (adjustable speed drive) és a takarékos izzók egyik oldalról nézve villamos zavarforrások, másik oldalról pedig bizonyos típusú hálózati zavarokra érzékenyek.

A villamos energia minőségének vizsgálata tehát kulcsfontosságú. Ezt az energiát azért merem az egyik legfontosabb energiának nevezni, mert egyrészt bármely energiahordozó helyettesíthető villamos energiával, ami fordítva nem igaz, másrészt bármilyen energiahordozóból villamos energia nyerhető, illetve az összes többi energiatípus villamos energiává alakítható, legyen az atomenergia, szélenergia, vízenergia vagy napenergia. A fosszilis energiahordozók árának növekedésével, idővel a villamos energia lehet az egyeduralkodó, könnyen hozzáférhető energiaforrás. Napjainkban egyre inkább megjelennek a villamos energiával működő autók is, amelyek nagy valószínűséggel a hálózathoz köthetők villamos energia révén fogják feltölteni az akkumulátoraikat.

A villamos energia minősége mellett az energia felhasználásának hatékonysága is nagy jelentőséggel bír. A villamos energiát a szolgáltató egy adott minőségben nyújtja a fogyasztónak, a fogyasztó ugyanakkor valamilyen hatékonysággal azt felhasználja. A mai versenyerorientált világban a legfontosabb kérdés a költséghatékony termelés. Kis- és középvállalatoknál az tapasztalható, hogy miközben folyamatosan próbálnak termelési költséget csökkenteni, a villamos energiára fordított költséggel vagy egyáltalán nem foglalkoznak, vagy legfeljebb a meddődíjat próbálják csökkenteni. A meddődíj mellett azonban számos olyan tényező van még, amivel a fogyasztó csökkentheti a villamos energiaszolgáltatónak kifizetett összeget. Annak érdekében tehát, hogy a vállalatok minimalizálják a költségeiket, oda kell figyelniük a villamos energia-felhasználásukra is.

1.1. Irodalmi áttekintés

Amint azt a bevezetőben már említettem, a villamos energia mérésével, a villamos energia minőségével kapcsolatos publikációk száma az elmúlt évtizedekben jelentősen

megnőttek. Ennek az oka, hogy napjaink villamos berendezései kevésbé viselik el a hálózati zavarokat, a fogyasztók egyre jobban szeretnék tudni, hogy milyen villamos energiát vásárolnak, a megújuló energiaforrások alkalmazása pedig számos minőségi problémát okozhat. Továbbá a környezetvédelem és az energiatudatosság is oda vezetett, hogy egyre többen kezdtek mélyebben foglalkozni a villamos energia mérésével, tanulmányozásával.

Doktori tanulmányaim kezdetén megvizsgáltam, hogy pontosan milyen irányba folynak a kutatások, melyik az a kutatási terület, ami felé érdemes haladnom. A munkámat természetesen megkönnyítette az, hogy a Miskolci Egyetem Elektrotechnikai - Elektronikai Tanszéke már évtizedek óta foglalkozik a villamos energia vizsgálatával, mérésével, így gyakorlati oldalról is számos ötletem született, hogy milyen irányba folytassak kutatásokat.

A szakirodalomban folyamatosan jelennek meg cikkek, amelyek a villamos energia minőségét és annak mérési módszereit általánosan tárgyalják [4, 5], illetve amelyek egyes villamos hálózatok minőségének kiértékelését reprezentálják [6]. Az elmúlt években a villamos energia mérésének területén a gyorsabb, pontosabb és hatékonyabb mérési módszerek fejlesztési irányába haladtak a kutatások. Leginkább olyan publikációk jelentek meg, amelyek a villamos hálózati zavarok felismerésével foglalkoztak, és a legtöbbször a mesterséges intelligencia egyes eszközeit, vagy matematikai algoritmusokat vettek segítségül [7], pl.: neurális hálózatok [8, 9, 10, 22, 36], fuzzy rendszerek [11, 12, 23], szakértő rendszerek [13, 14], genetikus algoritmusok [15]. Olyan megoldások publikálására került sor, amelyek a zavarokat nem csak detektálni, de elég jó sikerrel csoportokba sorolni és azonosítani képesek. A mért értékek különböző matematikai transzformációkkal (Fourier transzformáció [16], Wavelet-transzformáció [17-20, 26, 33], S-transzformáció [21-23]) időtartományból frekvenciatartományba vagy idő-frekvencia tartományba való átalakításával nyertek olyan információkat, amelyekkel hatékonyabban lehetséges felismerni az egyes zavarokat.

A számos különböző villamos minőségi zavar miatt gyakran az egyes cikkek kifejezetten csak egy típusú zavar detektálásával, illetve kimutatásával foglalkoznak. A manapság egyik legjellemzőbb minőségi problémával, a harmonikusok mérésével és felismerésével [24-27] nagyszámú cikk foglalkozik, és a feszültségletörés és -növekedés detektálás [28-30] módszereinek kutatásával kapcsolatban is jelentős számú publikáció jelent meg.

A megújuló energiaforrások elterjedése miatt mérésekkel vizsgálják a publikációk szerzői, hogy milyen zavarok jelennek meg a szélenergiás vagy napenergiás erőművek villamos hálózatra csatlakozása során [31-33].

A villamos energia nagysebességen történő mérése során több száz GByte mennyiségű adat keletkezik, amelyek feldolgozása hosszadalmas, így valamilyen módon a feldolgozási idő lerövidítését kellett megoldani a terület szakembereinek. Gyakran igény van a hatalmas adatmennyiség mérés közben való feldolgozására, azaz real-time kiértékelésre, így a gyors feldolgozás még fontosabbá válik. A kiértékelés gyorsítása érdekében fejlett hardvereszközöket, pl. DSP, FPGA áramköröket használtak fel [34-36] több esetben a számítások on-line módon történő végrehajthatása érdekében [37-39].

A villamos energia mérése során keletkező hatalmas adatmennyiség méretének csökkentési módszereivel is foglalkozik néhány publikáció, ahol szintén matematikai

átalakítások segítségével próbálják redukálni a mentéshez szükséges adatmennyiséget [40, 41].

A kommunikációs rendszerek fejlődésével és az internet elterjedésével egyre inkább előtérbe került az olyan mérőrendszerek építése, amelyek képesek a táv-adatmérésre, azaz a mért információk a méréstől eltérő helyen való megjelenítésére. Ismert néhány olyan publikáció, amely a villamos energia mérése során kapott legfrissebb eredményeket telefonon, PDA-n, illetve web-es felületen képes megjeleníteni [42, 43].

Az előbb felsorolt kutatási területeket illetően vannak olyan cikkek is, amelyek olyan mérőrendszerek tervezésével, megépítésével foglalkoznak, amelyek az előbb felsorolt publikációban bemutatott mérési módszerekből, eszközökből merítenek [44, 42]. A mérőrendszer kiépítése során gyakran előtérbe került a költséghatékony megvalósítás [45]. Néhányan személyi számítógépre épülő mérőrendszer fejlesztésével is foglalkoztak [44], ahol szintén az olcsó megvalósítás került a középpontba.

Kutatásaim során arra a következtetésre jutottam, hogy a villamos energia mérése során kiemelten fontos a mérést szinkronizálni az aktuális hálózat frekvenciához (lásd 4. fejezet), ezért mélyebben tanulmányoztam azon cikkeket, amelyek különböző szinkronizálási algoritmusokat tárgyaltak és valósítottak meg [46-52].

A hálózati frekvencia meghatározása kutatásom során előtérben volt (lásd 5. fejezet), ezért olyan cikkek keresésével és tanulmányozásával is foglalkoztam, amelyek a pontos hálózati frekvencia meghatározására mutattak megoldásokat [53-60].

Amint az az irodalmi áttekintésből is látszik, a villamos energia mérésével számos kutató foglalkozik. Egy látszólag régen kidolgozott és jól ismert méréstechnikai probléma a hálózati feszültség és áram mérése, valamint az ezekből számolt teljesítmény, mégis a digitális mérések számos kérdést vetnek fel ezen a területen is, ha nagy pontosságú mérést kívánunk végezni (lásd 7. fejezet). A mért adatok jelfeldolgozó algoritmusokkal való továbbalakítása is még egy nem teljesen kiforrott terület, ezért is választottam egyik kutatási területemnek.

1.2. Az értekezés célkitűzése

A PhD munkám során olyan új mérési és jelfeldolgozási módszerek kidolgozása volt a célom, amelyek alkalmazásával hatékonyabban, pontosabban és gyorsabban lehet kiértékelni a villamos hálózat minőségét és a villamos energia felhasználásának hatékonyságát, mint az eddig, és jelenleg alkalmazott módszerekkel. A kidolgozott új módszerek alkalmazásához egy új mérőberendezés kifejlesztésére került sor a Miskolci Egyetem Elektrotechnikai-Elektronikai Tanszékén, amely lehetőséget teremtett az új módszerek gyakorlati tesztelésére is. A cél, hogy a berendezéssel végzett hosszúidejű, folyamatos mérések eredményei alapján lehetőség nyíljon arra, hogy a vételezett energia kiértékelése elvégezhető, az esetleges költségcsökkentési lehetőségek feltárhatóak legyenek, valamint lehetőség legyen annak megállapítására is, hogy a felhasználó a szabványnak megfelelő villamos energiát vételezi-e.

Kutatásaim során különös figyelmet szántam az on-line, mérés közben való adatfeldolgozásra, új mérési eljárások kidolgozására, ami gyorsabbá és hatékonyabbá teszi egy mérőrendszer működését. A különböző villamosenergia-minőség és felhasználás

hatékonyságát leíró paraméterek kiszámítása magas mintavételezési frekvencián nagy műveletigényű feladat. A paraméterek mérés után történő kiszámítása hosszadalmas, a mérés időtartamától, a mért csatornák számától és a mintavételezési sebesség nagyságától függően akár napokat is igénybe vehet. Megfelelő módszerek kidolgozásával azonban megteremthető a lehetősége annak, hogy a mérés alatt az előbb említett paraméterek kiszámítása megtörténjen. A nagy műveletigényű feladatokat a nagyszámú kiszámítandó paraméter miatt egy egyprocesszoros számítógép nem képes elvégezni, ezért a szakirodalomban olyan speciális hardvereket alkalmaztak, mint DSP vagy FPGA. A célom az volt, hogy a mai, olcsón rendelkezésre álló személyi számítógépek többmagos processzorait alkalmazzam a számítások on-line végrehajtására (lásd 6. fejezet), mivel nem találtam a szakirodalomban hasonló megoldást és az ilyen fajta megvalósítás kivitelezése kisebb költséggel jár, mint egy DSP vagy FPGA használatával megvalósított rendszer esetén.

Az új mérőrendszerben számos olyan módszer, megoldás használatát tűztem ki célul, ami nem csak tudományos szempontból új, de segítségével egy hatékonyabb és gyorsabb villamos hálózatok analizálására alkalmas mérőrendszer hozható létre azoknál, mint amelyek a kereskedelmi forgalomba kaphatóak. A villamos energia paramétereinek mérését tárgyaló, jelenleg érvényes szabványok [70, 71] szigorú követelményeket támasztanak egy villamos energia minőségét mérő rendszertől, így a szabvány előírásainak betartása új módszerek kifejlesztését és alkalmazását kívánja meg.

A villamos energia vizsgálata széles terület. Kutatásom a villamos energia mérésére összpontosul, ugyanakkor villamos energia minőségromlását okozó problémák és jelenségek vizsgálatával a dolgozat csak annyira foglalkozik, amennyire az szükséges a téma megértése érdekében.

2. A villamos energia

2.1. A villamosenergia-minőség fogalma

A villamos energia minőségére számos definíció létezik, mivel az egyes szervezetek, szabványok, amelyek a villamos energiával foglalkoznak, más oldalról közelítik meg ezt a fogalmat.

A váltakozó áramú villamos hálózat úgy lett tervezve, hogy egy adott frekvenciájú és amplitúdójú szinuszos feszültségen üzemeljen, így ebben az esetben villamosenergia-minőségi problémának tekinthető bármilyen eltérés a hullámalak amplitúdójában vagy frekvenciájában. Az egyik legtöbbet vitatott kérdés azonban, hogy villamosenergia-minőségi problémának tekinthető-e az áramjelben történő bármelyfajta eltérés a normálistól.

Az IEEE [64] szerint "power quality is the concept of powering and grounding sensitive equipment in a manner that is suitable to operate of the equipment". Ezen megfogalmazás szerint például a harmonikus áram csak akkor tekinthető villamosenergia-minőségi problémának, ha az befolyásolja a berendezés működését. Az IEC 61000-4-30 szabvány [70] szerint a definíció a következő: "A villamos energia minőségének azon jellemzői a villamosenergia-rendszer egy adott pontján, amelyeket referenciaparaméterek csoportjára vonatkozva értékelnek." Ez a definíció más megfogalmazásokkal ellentétben nem a berendezések működésére irányul, hanem arra, hogy mérni és osztályozni lehessen a villamos energiát.

Egyes források szerint a villamos energia minősége a feszültség és az áram minőségének együttese [3]. Az ideális feszültség egy szinuszos feszültség-hullám konstans amplitúdóval és frekvenciával, ahol a frekvencia és az amplitúdó a hálózatra jellemző normálérték. Az ideális áram szintén konstans amplitúdójú és frekvenciájú szinuszos hullám, de a frekvenciája és a fázisa megegyezik a feszültségével. Bármely eltérés a feszültségben vagy az áramban, villamosenergia-minőségi zavarnak tekinthető.

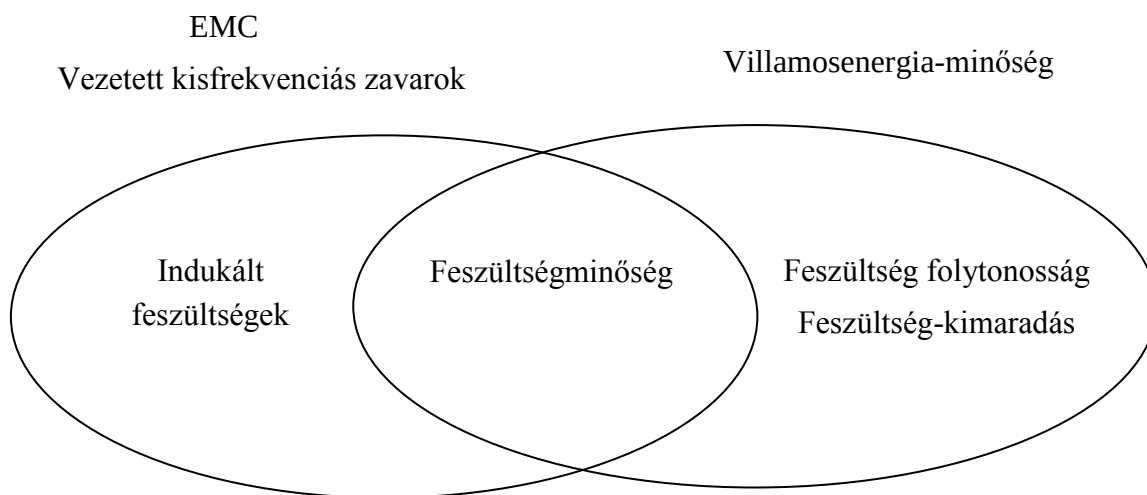
Az Európai Energiaszabályozó Tanács (The Council of European Energy Regulators) szerint az áramszolgáltatás minősége alatt a szolgáltatás folytonossága, a fogyasztó és szolgáltató kapcsolata, és a feszültség minősége értendő. A Villamosipari Egyesület (Union of the Electricity Industry) [65] a szolgáltatás folytonosságát és a feszültség minőségét érti villamosenergia-minőség alatt. Az utóbbiak egyike sem tekinti az áram minőségét energiaminőségi problémának, csak abban az esetben, ha az káros hatással van a feszültség minőségére.

2.2 Az elektromágneses összeférhetőség EMC és a villamosenergia-minőség kapcsolata

A villamosenergia-minőség szoros kapcsolatban van az elektromágneses összeférhetőség (EMC, Electromagnetic Compatibility) területével. Az IEC 61000-5-1 szabvány [66] az elektromágneses zavarjelenségeket frekvenciájuk alapján kis- és

nagyfeszültségű zavarokra, illetve a terjedési módjuk alapján vezetett és sugárzott zavarokra osztja fel. A villamos feszültségminőség a vezetett kisfrekvenciás zavarjelenségek körébe tartozik, azonban nem fedi le azt teljesen, mivel például az indukált feszültségek nem tartoznak bele a feszültségminőségi jellemzőkbe [1]. A vezetett zavarok csoportjába azok tartoznak, amelyek a zavarforrástól a zavart berendezésekhez vezetékes kapcsolat révén jutnak el, és a zavart berendezésbe annak valamilyen vezetékes csatlakozóján át jutnak be. A kisfrekvencia Európában a 9 kHz alatti tartomány, ami indokolja, hogy az egyes szabványok 9 kHz-ig írják elő a feszültség harmónikusok vizsgálatát. Mivel a tranziens túlfeszültségek gyakran 9kHz-et meghaladó frekvenciatartományba esnek, ami szintén feszültségminőségi problémának tekinthető, ezért kisebb mértékben a nagyfrekvenciás vezetett zavarok is beletartoznak villamosenergia-minőség tárgykörébe, ami így megkövetelheti a 9 kHz feletti feszültségjelek vizsgálatát is.

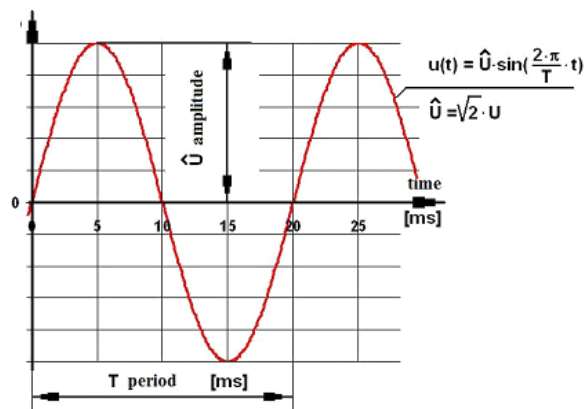
A villamosenergia-minőség másrésztől – a korábban leírtak szerint – a feszültségminőségen kívül beletartozik a szolgáltatásminőség körébe a feszültség folytonosság, mivel a szolgáltatás megszűnése is minőségi problémának tekinthető. A feszültségminőség a leírtak alapján tehát a vezetett kisfrekvenciás zavarok és a villamosenergia-minőség metszete (2.1. ábra).



2.1. ábra: Az EMC és a villamosenergia-minőség közötti kapcsolat

2.3. Feszültségminőség

Mivel a villamos energia minőségét leginkább a feszültség jellemzi, ezért továbbiakban a feszültség minőségének vizsgálatával foglalkozom. A villamos feszültség ideális, ha a feszültségjel egy tökéletes szinusz hullám a hálózatra jellemző feszültség- és frekvenciaértékkel (2.2. ábra). Magyarországon a hálózati frekvencia 50 Hz, a lakossági hálózat fázis feszültségének effektív értéke pedig 230 V.



2.2 ábra: Lakossági hálózat feszültség hullámalakja

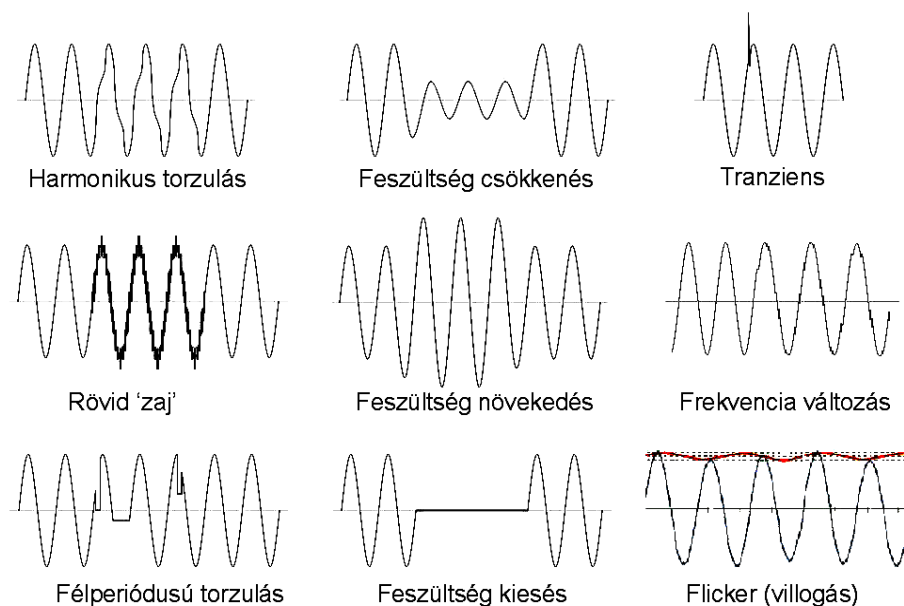
A hálózati feszültség időfüggvénye általában csak elméletileg szinusz, a gyakorlatban nem, ezért az effektív értékét nem szabad a csúcsertékből meghatározni, hanem az időfüggvény integrálásával kell meghatározni azt. Az U_{eff} a feszültség effektív értéke, más néven négyzetes középértéke (RMS - Root Mean Square).

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (2.1)$$

Szabályos szinusz esetén az effektív érték meghatározható a csúcsertékből ($\hat{U}$) is:

$$U_{eff} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} \quad (2.2)$$

Elmondhatjuk, hogy ha bármilyen változás történik a feszültség hullámalakjában, akkor torzul a feszültség hullámalakja. Ilyen jellemző hullámalak-torzulásokat láthatunk a 2.3. ábrán.



2.3. ábra: Jellemző feszültség hullámalak-torzulások [63]

Bár egy előírt frekvenciájú és amplitúdójú szinuszos feszültség szolgáltatja a tökéletes minőségű villamos energiát, a változatlan frekvenciájú és amplitúdójú szinuszos feszültség biztosítása szinte lehetetlen. A hálózati frekvencia kismértékben csökken, ha a terhelés, vagyis a villamos energiafogyasztás nő. A hálózati frekvencia pedig nő, ha a fogyasztás lecsökken. A frekvencia ingadozása tehát a váltakozó áramú villamos hálózati rendszerek velejárója, így egy konstans frekvenciaérték tartása nem megoldható, hiszen a fogyasztók villamos energia iránti igénye különböző napszakokban más és más. A feszültség amplitúdójának egy adott értéken való tartása szintén nem lehetséges. A vezetékek nem ideálisak, ellenállásuk van, így egy transzformátornál előállított feszültség szint annál jobban lecsökken, minél távolabbra továbbítjuk az energiát a villamos vezetéken. A feszültség szintet a fogyasztó „megrángathatja”, ha egy nagyobb teljesítményű fogyasztót csatlakoztat a hálózatra. A villamos hálózat impedanciája miatt a nem-lineáris fogyasztók által keltett harmonikus áramok is torzítják valamilyen mértékben a feszültség hullámalakját, így az nem tekinthető ideális szinuszosnak. Mindezek miatt a feszültség minőségét akkor tekintjük megfelelőnek, ha a feszültség effektív értéke és frekvenciája a szabványban meghatározott tűréshatárokon belül van, és a feszültség egyes felharmonikusainak amplitúdója bizonyos határérték alatt van.

A közcélú kisfeszültségű és középvezetési feszültségű hálózatok feszültség-jellemzőivel az MSZ EN 50160 szabvány [67] foglalkozik. A szabvány definiálja, hogy ezeken a hálózatokon a hálózati feszültség milyen mértékben térhet el a normál feszültséghullámtól. A feszültségminőségi problémák bemutatása mellett kitérek arra, hogy az MSZ EN 50160 szabvány milyen tűréseket enged meg a kis- és középvezetési közcélú elosztóhálózatokon.

2.3.1. Események, változások

A szakirodalomban [3] a villamos hálózati zavarok egy fontos osztályozási módja szerint a feszültségminőségi problémák két fő csoportba sorolhatók. Az egyiket eseményeknek vagy tranzienseknek nevezzük, és ide tartoznak a rövid ideig tartó, hirtelen megjelenő, majd befejeződő zavarok, torzulások. A másik csoportot ingadozásoknak vagy változásoknak nevezzük, ide tartoznak az állandósult, stacionárius vagy kvázi-stacionárius zavarok, amelyek hosszabb ideig tartanak és vizsgálatuk folyamatos, akár órákig, napokig tartó mérést igényel. A tranziens túlfeszültség, illetve feszültségletörés az események közé sorolandó, míg a feszültség emelkedése, csökkenése az ingadozás típusú zavarok közé tartozik.

2.3.2. Frekvenciaváltozás

A hálózati frekvencia ingadozásának vizsgálata az egyik fő eleme a disszertációnak (lásd 5. fejezet). A hálózati frekvencia változása is egy nagyon jó példa az ingadozó típusú zavarokra, mivel nem jellemző rá a hirtelen, relatíve nagy változás, és saját tapasztalatom szerint is, csak több napi méréssel vizsgálható ez a típusú torzulás.

A hálózati frekvencia névleges értékének 50 Hz-nek kell lennie. Normál üzemi körülmények között az alapharmonikus frekvencia átlagértékének 10 másodpercen keresztül mérve a következő tartományban kell esnie [67]:

- Együttműködő hálózathoz *szinkronsatlakozású* hálózat esetében:
 $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ (49,5 – 50,5 Hz) az év 99,5%-ában
 $50 \text{ Hz} + 4\%/-6\%$ (47 – 52 Hz) az idő 100%-ában
- Együttműködő hálózathoz *nem szinkronsatlakozású* hálózat esetében:
 $50 \text{ Hz} \pm 2\%$ (49 – 51 Hz) az év 95%-ában
 $50 \text{ Hz} \pm 15\%$ (42,5 – 57,5 Hz) az idő 100%-ában

2.3.3. Feszültségnövekedés, -letörés, feszültségkimaradás, -tranziens

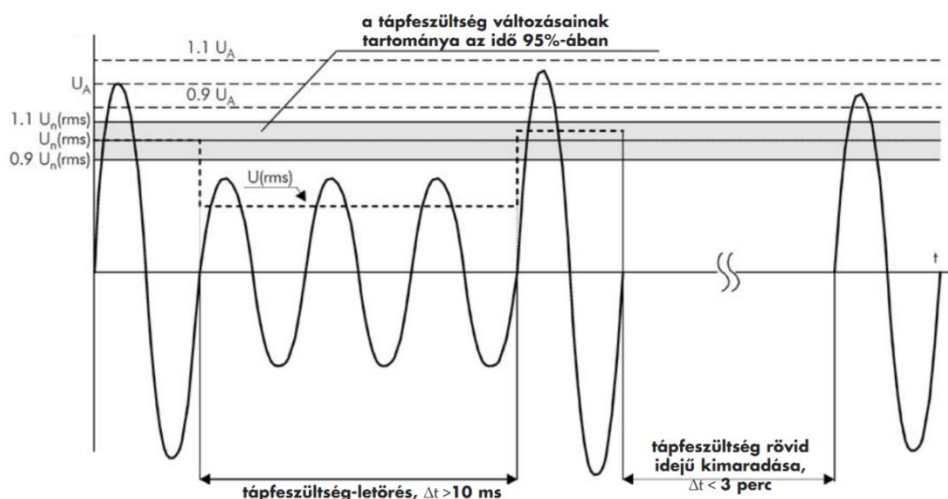
Amint az a 2.3. ábrán látható, számos feszültség értékével kapcsolatos minőségi probléma különböztethető meg, amelyeket többféleképpen osztályozhatunk, csoportosíthatunk. A feszültség effektív értékével kapcsolatos torzulásokat időtartamuk és az effektív normál értéküktől (U_n) százalékos formában való eltérés alapján csoportosíthatjuk a 2.4. ábra alapján.

	Esemény típusú zavarok		Változás (ingadozás) típusú zavarok
110%<	Tranziens túlfeszültség	Feszültségnövekedés (feszültség túllendülés)	Feszültség emelkedés
90- 110%	Normál üzemi feszültség		
10-90%	Tranziens letörés	Feszültségletörés	Feszültség csökkenés
1-10%	Pillanatnyi feszültségkimaradás	Rövid idejű feszültségkimaradás	Hosszú idejű feszültségkimaradás
	0-0,5 periódus	0,5 periódus – 3 másodperc	3 másodperctől hosszabb

2.4. ábra: A feszültség effektív értékével kapcsolatos minőségi problémák

A 2.4. ábrából leolvasható, hogy a feszültség emelkedés, feszültség csökkenés és a hosszú idejű feszültségkimaradás a változás típusú zavarokhoz tartozik, a többi pedig az esemény típusúakhoz.

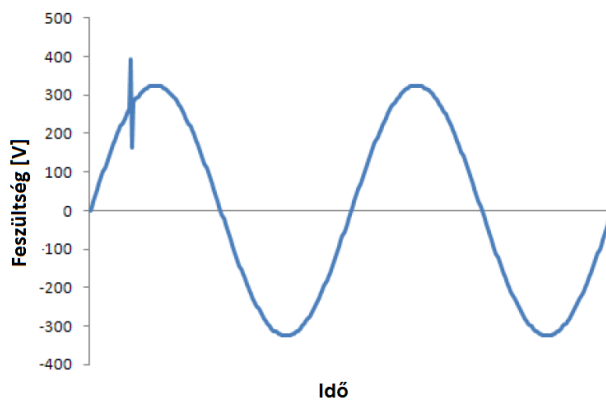
A közcélú kisfeszültség szabványos névleges feszültségének a négyvezetékes háromfázisú hálózatokban a fázis és a nullavezető között mérve 230 V-nak kell lennie. A szabvány szerint [67] normál üzemi körülmények között, a feszültségkimaradásokat figyelmen kívül hagyva, a tápfeszültség 10 perces átlagos effektív értékei 95%-ának bármely egyhetes időszakban az $U_n \pm 10\%$ tartományban, valamint a 100%-ban $U_n + 10\%/-15\%$ tartományban kell lennie.



2.5. ábra: A feszültségletörés és a tápfeszültség rövid idejű kimaradásának szemléltetése [2]

A legalapvetőbb villamosenergia-minőségi problémának természetesen a feszültségkimaradások tekinthetők, amelyek hossza néhány másodperctől akár napokig is tarthat. Előre tervezett, az elosztóhálózaton beütemezett munkák végrehajtása céljából a szolgáltató előzetes bejelentés alapján okozhat tápfeszültség kimaradást, illetve véletlenszerű, külső esemény a villamos hálózaton is okozhat hosszabb vagy rövidebb feszültségkimaradást.

A feszültségletöréseket, amelyek a tápfeszültség effektív értékének rövid idejű csökkenései, okozhatják nagy terhelések bekapcsolásai, zárlatok, illetve rossz csatlakozások, vezetékbecötések.



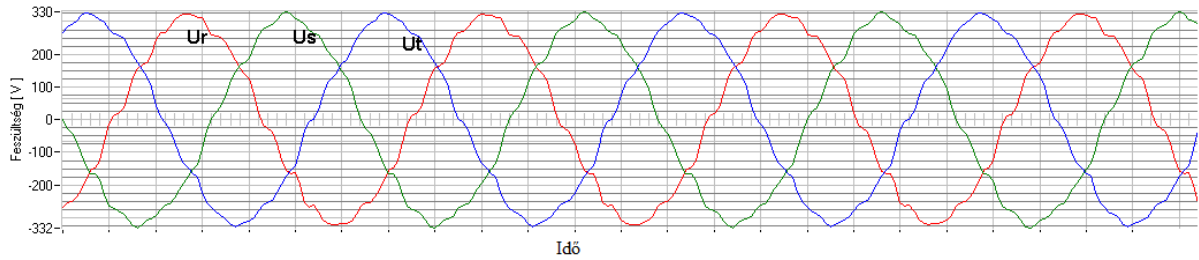
2.6. ábra: Tranziens túlfeszültség

A tranziens túlfeszültségek olyan nagyfrekvenciás események, amelyek során (2.6 ábra) a hálózati feszültség az alapharmonikus periódusidejének tört részéig meghaladja a névleges feszültség csúcsertékét, amit okozhatnak megszakítók, mágneskapcsolók, relék kapcsolása, biztosítók kiolvadása, illetve induktív vagy kapacitív terhelések kapcsolása.

2.3.4. Harmonikusok

„A villamosenergia-rendszerről táplált fogyasztók egy része nemlineáris fogyasztó. Jellemzőjük, hogy szinuszos feszültségről felvett áramuk nem csak hálózati frekvenciájú komponenst tartalmaz, hanem annak egész- vagy nem egészszámú többszörösét is” [1], így gyakorlatilag a nemlineáris fogyasztók felharmonikus áramokkal szennyezik a hálózatot. A harmonikus áramot egy másik fogyasztó közvetlenül nem érzékeli, viszont a harmonikus

áram a hálózat impedanciáján keresztül (a hálózat merevsége miatt) torzítja a feszültséget. A továbbiakban így nem beszélhetünk teljesen szinuszos feszültségről, hanem vizsgálni kell a feszültség hullámalakját is.



2.7. ábra: Hullámalak-torzítás háromfázisú rendszer esetén

A hullámalak-torzítások jelentős többségére a periodicitás jellemző, azaz olyan frekvenciájú szinuszos összetevőket tartalmaznak, amelyek az alapharmonikus egészszámú többszörösei. Az ilyen összetett periodikus jelek (feszültségek) hatását az ún. felharmonikus összetevők egyedi hatásaival, illetve a hatások összességével lehet jellemezni, ezért Fourier-sorba fejtéssel vizsgáljuk.

Egy T periódusidejű függvény Fourier-sora:

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)] \quad (2.3)$$

ahol

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.4)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) d(\omega t) \quad (2.5)$$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) \cos(k\omega t) d(\omega t) \quad (2.6)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) \sin(k\omega t) d(\omega t) \quad (2.7)$$

$$k = 1 \rightarrow \infty$$

A jelek torzítását az egyedi harmonikus összetevők amplitúdó, fázis és frekvencia jellemzői mellett a teljes harmonikus torzítással (THD - Total Harmonic Distortion) jellemezzük. A feszültség teljes torzítása:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^K U_k^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (2.8.)$$

ahol THD_U a feszültség teljes harmonikus torzítás százalékos értéke

U_k az k -adik felharmonikus összetevő effektív értéke

U_1 a feszültség alapharmonikusának effektív értéke

K az utolsó vizsgált felharmonikus rendszáma, a Nyquist-Shannon törvény szerint K maximális értéke $N/2$ lehet.

A harmonikus feszültségek hatására növekszik a hálózat és a fogyasztó berendezések vesztesége, csökken az élettartalom, a villamos forgógépekben parazita nyomatékok alakulnak ki, továbbá zavarhatják a biztonsági, az elektronikai és informatikai berendezések üzemét.

A MSZ EN 50160 szabvány [67] szerint a tápfeszültség THD-értéke nem lehet 8%-nál nagyobb a felharmonikusok 40-es rendszámáig számolva. Emelett a szabvány harmonikusonként is előír határértéket, amit a 2.8. ábra tartalmaz.

Páratlan felharmonikusok				Páros felharmonikusok	
3-mal nem osztható		3-mal osztható			
rendszám (k)	relatív feszültség [%]	rendszám (k)	relatív feszültség [%]	rendszám (k)	relatív feszültség [%]
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	2
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

2.8 ábra: Harmonikus feszültségek határértékei a MSZ EN 50160 szerint

A leggyakoribb nemlineáris terhelések, amik harmonikus áramot keltenek, a következők [2]:

- kapcsolóüzemű tápegységek,
- elektronikus előtétű fénycsővek,
- szünetmentes tápegységek,
- változtatható fordulatszámú hajtások.

2.3.5. Flicker érték

A feszültségváltozás azon típusait, amelyek változást okoznak a világítóberendezések fényáramában, villogásnak (flicker) nevezik. Leginkább az élő szervezetekre gyakorolt hatásai vannak a figyelem középpontjában. A hatás súlyosságának fokát a rövid, illetve a hosszú távú súlyossági jellemző adja (P_{st} , P_{lt}).

„A Flicker jelenség lényegében a feszültség gyors ingadozása által kiváltott időben ingadozó fényességű vagy színekpi eloszlású fényingerek által létrehozott látásérzet-ingadozás sorozataként jelentkezik, amely az emberre nézve közvetlen megterhelést jelent.” [68]

2.3.6. Hálózati-aszimmetria

„Egy háromfázisú villamosenergia-rendszert szimmetrikusnak nevezünk, ha a három fázisban a feszültségek amplitúdója azonos, az áramok amplitúdója azonos, valamint feszültségek fázisa illetve az áramok fázisa is egymáshoz képest 120 fokos szöggel vannak eltolva. Ha a fenti feltételek bármelyike nem teljesül, a rendszer aszimmetrikus.”[2]

Feszültség-aszimmetria esetén a háromfázisú feszültségek nem csak alapharmonikus, pozitív sorrendű összetevőket tartalmaznak. Értékét általában a negatív és a pozitív sorrendű összetevők aránya alapján fejezik ki.

A feszültség-aszimmetria okozói jellemzően az egyfázisú hálózati fogyasztók, valamint azok a kiserőművek (napelemes inverterek, szélgenerátorok), melyek egy fázison csatlakoznak a villamos hálózatra.

Káros hatásai a következők [69]:

- háromfázisú aszinkron motorokban fékezőnyomaték kialakulása, melegeledést, termikus öregedést előidézve;
- többlet hőtermelés a háromfázisú generátorokban a negatív sorrendű áramok miatt;
- csökken a transzformátor terhelhetősége;
- csökken a vezetékek terhelhetősége.

„Normál üzemi körülmények között a tápfeszültség negatív fázissorrendű összetevője a 10 perces átlag effektív értékének 95%-a, bármely egyhetes időszakban a pozitív fázissorrendű összetevő 0-tól 2%-os tartományában legyen.”[67]. Mivel a negatív fázissorrendű összetevő felelős a csatlakoztatott berendezések esetleges zavarásáért, ezért a szabvány más – pl. zérus sorrendű – összetevő értékével nem foglalkozik.

2.4. A villamos energia felhasználása

Ha a villamosenergia-minőséget a hálózati feszültség minősége határozza meg, akkor mondhatjuk azt, hogy az áram jellemzi a villamos energia felhasználását, ezért a villamos energia felhasználásának kiértékeléséhez a feszültség mellett az áram mérésére is szükség van.

„A villamos energia rendszer hálózati vesztesége akkor lenne minimális, ha a hálózat effektív árama időben állandó, hatásos alapharmonikus pozitív sorrendű lenne. A nem ideális terhelések miatt jelentkező többletveszteségek, áramfüggő veszteségek, ahol a következő veszteségnövelő tényezőket kell figyelembe venni” [1]:

- Csúcskihasználási tényező (az áram időben változó),
- Alapharmonikus meddőteljesítmény (a hatásos és meddő teljesítmény árama),
- Alapharmonikus áram aszimmetria (az áram nem tiszta pozitív sorrendű),
- Harmonikus áramok (az áram felharmonikusainak hatása).

A feszültség és az áramjel együtteséből meghatározhatók a rendszer teljesítményparaméterei is, amelyekből megállapítható a fogyasztó villamos energia felhasználásának hatékonysága. A teljesítmény-paraméterek meghatározása erősen kötődik a 7. fejezethez, ezért azok tárgyalására ott kerül sor.

2.4.1. Csúcskihasználási tényező

„A csúcskihasználási tényező az áram időbeli ingadozását figyelembe vevő veszteség ahhoz képest, mintha az áram értéke állandó lenne, és egyenlő lenne a mért időtartomány átlag áramával.” [1]

Legyen a vizsgált táphálózat ellenállása R . Az áramerősség időfüggvény $i=f(t)$. Akkor a keletkező veszteségi energia:

$$W_v = R \cdot \int_0^T i^2(t) \cdot dt \text{ [Ws]}. \quad (2.9)$$

Ideális esetben az áramerősség az idő függvényében állandó (i_k). Ekkor 0 – T időintervallumban keletkező veszteségi energia:

$$W_{v(id)} = T \cdot R \cdot i_k^2 \text{ [Ws]}. \quad (2.10)$$

Ahol:

$$i_k = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) \cdot dt \text{ [A]}. \quad (2.11)$$

„A csúcskihasználási tényező,

$$K_{cs} = \left(\frac{W_v}{W_{v(id)}} \right) \quad (2.12)$$

azt mutatja meg, hogy hányszorosa a veszteség az ideális, állandó áramú esethez képest annak következtében, hogy az áram időben változik.”[1]

Megállapítható tehát, hogy a fogyasztónak célszerű úgy elosztani a terheléseit, hogy az áram effektív értékét közel konstans értéken tartsa.

2.4.2. A meddőenergia okozta többletfogyasztás és energiaköltség

A meddőenergia kétféle módon okoz többlet energiaköltséget. Az egyik közvetlenül jelenik meg meddődíj formájában a villamos energia számlán, a másik „láthatatlan” módon terheli a számlát, mivel a belső hálózaton terjedő meddőáram a kábeleken „lengve” hálózati veszteség formájában növeli a hatásos energiafogyasztást. Ennek mértéke függ a meddőáram mértékétől, a kábelek hosszától, keresztmetszetétől, anyagától.

„Tekintsük az induktív fogyasztó áramát, amely nem torzított. Az eredő áram (2.10. ábrán I_S) hatására keletkező veszteséget viszonyítva a tiszta wattos teljesítményt létrehozó áram (I_p) által okozott hálózati veszteségre, a 2.9. ábra szerinti eredményt kapjuk.”[1] Az R a vizsgált táphálózat ellenállása.

$$P_{v(id)} = 3 \cdot R \cdot I_p^2 \text{ [W]}. \quad (2.13)$$

Általános esetben $I_Q \neq 0$. Ekkor:

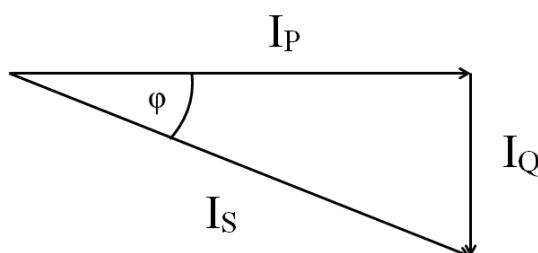
$$P_v = 3 \cdot R \cdot |I_S|^2 \text{ [W]}. \quad (2.14)$$

$$I_p = |I_s| \cdot \cos \varphi \text{ [A]}. \quad (2.15)$$

$$\left(\frac{P_v}{P_{v(id)}} - 1 \right) = \frac{1}{(\cos \varphi)^2} - 1 \quad (2.16)$$

$\cos(\varphi)$	$\left(\frac{P_v}{P_{v(id)}} - 1 \right)$
1,00	0,0000
0,97	0,0628
0,95	0,1080
0,9	0,2346
0,85	0,3841
0,8	0,5625

2.9. ábra: A teljesítménytényező hatása a veszteségre [1]



2.10. ábra: Szemléltető ábra a teljesítménytényező hatására [1]

Megállapítható tehát, hogy a fogyasztó érdeke az, hogy a saját hálózatán is csökkentse a meddőáramot, mivel az jelentős többletköltséget okoz a számára.

2.4.3.A terhelés-aszimmetria által okozott többletköltségek

A tartós terhelés-aszimmetria jelentős áramokkal terheli a hálózat nullavezetőjét, és többlet energiaköltséget okoz. „A fogyasztói aszimmetria azt jelenti, hogy az egyes fázisok alapharmonikus terhelő áramai a hely és az idő függvényében különbözőek. Az aszimmetria az áram esetében is lehet negatív és zérus sorrendű. Az aszimmetria hálózati vesztesége szempontjából a kétféle aszimmetriát külön kell vizsgálni, mivel hatásuk különböző.” [1]

Abban az esetben, ha felveszünk egy egységnyi pozitív sorrendű terhelő háromfázisú áramot, és 20% negatív sorrendet okozunk, akkor 4% plusz veszteséggel kell számolni a hivatkozott szakirodalom szerint [1].

Abban az esetben, ha felveszünk egy egységnyi pozitív sorrendű terhelő háromfázisú áramot, és 20% zérus sorrendet okozunk, akkor 16% plusz veszteséggel kell számolni a könyv szerzői [1] szerint, mivel a nullavezetőn átfolyó áram jelentősen növeli a veszteséget.

Megállapítható tehát, hogy háromfázisú rendszer esetén érdemes a negatív és zérus sorrendű áramokat, amennyire csak lehet eliminálni, azaz csökkenteni az aszimmetrikus terhelését a hálózatnak.

„A különböző európai országok és azok villamosenergia-szolgáltatói gyakran alkalmazzák az aszimmetrikus terhelő áramokra vonatkozó saját emissziós előírásaikat.” [2]

2.4.4.Áramtorzítás által okozott felharmonikus teljesítmények mértéke, és ennek többletköltsége

„Tekintsük egy rendszer R ellenállású vezetékét. Ideális esetben a harmadik harmonikus áramerősség zérus. Ekkor a vezetéken keletkező hatásos teljesítményveszteség”[1]:

$$P_{v(id)} = 3 \cdot R \cdot I_1^2 \text{ [W]} \quad (2.17)$$

Tételezzük fel, hogy a harmadik harmonikus áramerősség amplitúdója $I_3=(1/8)I_1$ és a rendszer ellenállása a harmadik harmonikusra: $R_3 = R$. Ekkor a hatásos villamos teljesítményveszteség:

$$P_v = 3 \cdot R \cdot \left(I_1^2 + \frac{1}{64} \cdot I_1^2 \right) = 3 \cdot R \cdot I_1^2 \cdot 1,016 \quad (2.18)$$

„Képezve a $(P_v/P_{v(id)})-1$ értéket 0,016-ot kapunk. A fenti eredmény természetesen csak a fázisvezetőre igaz. A nullavezetőt, amely eredetileg árammentes volt, a fázisvezető harmadik harmonikus áramának háromszorosa terheli, így a nullavezető vesztesége, ha ellenállása azonos a fázisvezető ellenállásával, a fázisvezetők háromfázisú $P_{v(id)}$ harmadik harmonikus nélküli veszteségének $P_{v,h,3}/P_{v(id)}=R(3/8 I_1)^2/3R(I_1)^2=3/64=4,68\%$ -a. Összesen tehát ebben az esetben 6,28%-os veszteségtöbblet keletkezne a táphálózaton, amennyiben eltekintünk attól, hogy pl. a harmadik harmonikus rendszámon az ellenállás kb. 1,2-szerese az alapharmonikus ellenállásnak. A harmadik harmonikus miatti veszteség növekmény a nullavezetőben háromszorosa a fázisvezetőkben létrejött eredő harmadik harmonikus többletveszteségnek.” [1]

Megállapítható tehát, hogy az áramharmonikusok is veszteségeket okoznak a hálózaton, így azok többletköltséget jelentenek a fogyasztónak.

3. Méréshez és kiértékeléshez használt módszerek és eszközök

3.1. Bevezetés

A villamos energia mérésével kapcsolatban széles körű kutatásokat végeztem, annak tisztázására, hogy hol, milyen mérési módszereket és eszközöket használnak. Tanulmányoztam az alkalmazott számítógépes mérőrendszerek felépítését, és vizsgáltam azt, hogy milyen területeken alkalmaztak a Miskolci Egyetem Elektrotechnikai- Elektronikai Tanszékén tervezett típushoz hasonló rendszereket. A kutatómunkám fontos része volt a témában megjelent publikációk feldolgozása az ilyen számítógépes mérőrendszer felépítésének és programrendszerének tanulmányozása.

3.2. A villamos energia mérését tárgyaló szabványok

Kutatásom során nagy figyelmet fordítottam a villamos energia mérésének témakörében megjelent szabványok tanulmányozására. Tudnom kellett, hogy a szabványok milyen megköteket írnak elő egy mérőrendszer kivitelezésére, valamint azt, hogy a szakirodalomban milyen berendezések fordulnak elő a villamos energia mérésére. Az IEC 61000-4-30 szabvány [70] a villamos energia mérésének módszereit, az IEC 61000-4-7 szabvány [71] pedig a harmonikusok és a közbenső harmonikusok mérési módszereit tárgyalja, valamint IEEE Std 1159-2009 szabvány [72] gyakorlati módszereket ajánl a villamos energia monitorizálásához. Az IEEE 1159-2009 szabvány inkább a műszer megépítése és telepítése tekintetében ad tanácsokat, illetve zavarokat csoportosít, de nem ajánl mérési és mintavételezési módszereket. Az MSZ 50160 szabvány [67], aminek segítségével az előző fejezetben már bemutattam a villamos zavarokat, az egyes villamos paraméterekre ad határértéket, de a mérési módszereket nem, csak a kiértékelési módszereket tárgyalja. A legtöbb folyóiratcikk és szakmai könyv az MSZ EN 61000-4-30 és az MSZ EN 61000-4-7 szabványokat tekinti mérvadónak. A következőkben ezen szabványok ismertetésére is sor kerül.

3.2.1. MSZ EN 61000-4-30

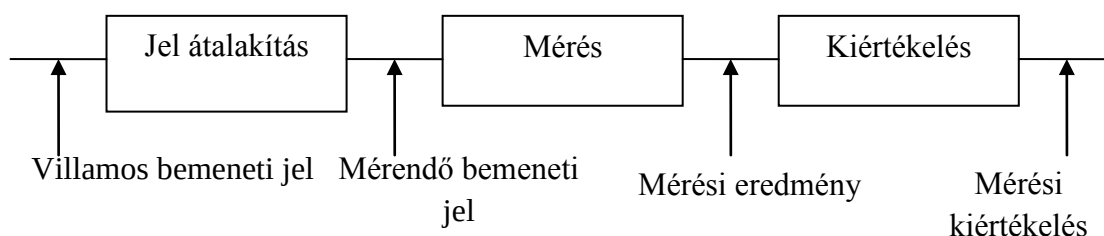
Az egyes villamos paraméterek mérési és kiértékelési módszereit alapvetően az IEC 61000-4-30-as szabvány szerint mutatom be, illetve ahol más szakirodalomból vett mérési leírást idézek, azt külön jelzem.

3.2.1.1. Szabvány összefoglaló

Az IEC 61000-4-30 szerint „az e szabványokhoz tartozó paraméterek mérése a feszültséggel kapcsolatos olyan jelenségekre korlátozódik, amelyeket az erősáramú rendszeren lehet mérni. A villamos energia minőségét jellemző paraméterek: a hálózati frekvencia, a tápfeszültség effektív értéke, a villogás (flicker), a tápfeszültség-letörések és -

túllendülések, a feszültségkimaradások, a tranziens feszültségek, a tápfeszültség-aszimmetriája, a feszültségharmonikusok és közbenső felharmonikusok, valamint gyors feszültségváltozások. A mérés céljától függően a felsorolásban szereplő összes jelenséget, vagy azok egy részét lehet mérni.” A szabvány küszöbértéket nem határoz meg, azzal a korábbiakban bemutatott MSZ EN 50160-as szabvány foglalkozik. „Az erősáramú rendszer és a műszer közé elhelyezett jeladók hatásai ismertek, e szabvány ezekkel részletesen nem foglalkozik.”

A szabvány szerint a villamos méréseket a 3.1. ábra szerint kell szervezni. „A mérendő villamos mennyiségekhez közvetlenül, vagy mérő jeladókon keresztül lehet hozzáférni.” Az ezt követő egységgel kell megvalósítani a mérést, majd a mérési eredményeket egy külön fázisban kell kiértékelni.



3.1. ábra: A villamos mérés egyszerűsített felépítése a szabvány szerint

3.2.1.2. A mérési módszerek osztályozásai

A szabvány a paraméterek meghatározása tekintetében A, B és S típusú mérési osztályt különböztet meg.

- A osztály: „Ez az osztály akkor használatos, amikor pontos mérésekre van szükség, például szerződéses esetekben viták eldöntéséhez, a szabványnak való megfelelés igazolásához. Minden egyes mérést két, az A osztály követelményeinek megfelelő műszerrel kell elvégezni úgy, hogy az azonos jelek mérése során az eredmények az adott paraméterre megengedett bizonytalanságon belül maradjanak.” [70]
- S osztály: „Ez az osztály statisztikai célokra használatos, mint például felmérésekhez vagy villamosenergia-minőségi adatgyűjtéshez, korlátozott számú paraméterek figyelembevételével. Bár a mérések időintervallumai azonosak az A osztályéval, az S osztály kiértékelési követelményei enyhébbek.” [70]
- B osztály: „Ez az osztály azért lett meghatározva, hogy sok, még meglévő műszert is lehessen használni.” [70]

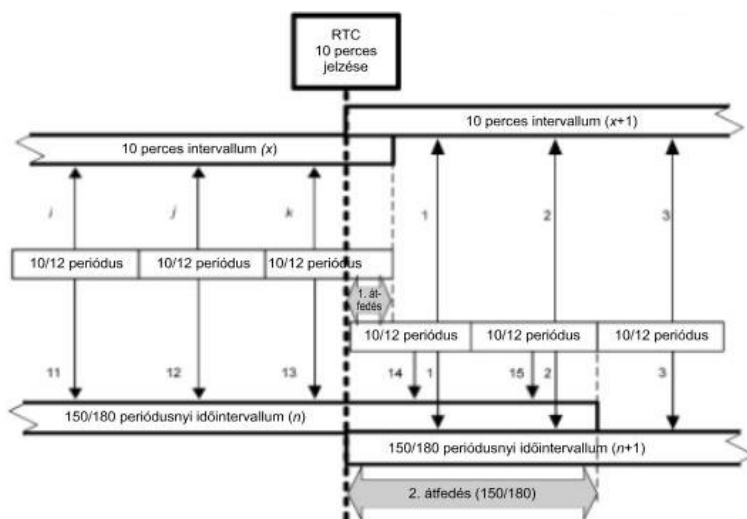
Mivel ezek közül a legszigorúbb az A osztály, ezért – mint az majd a későbbi fejezetekből látszik – arra törekedtem, hogy kielégítsem az A mérési osztály előírásait. A továbbiakban ezért csak az A osztály mérési módszereit ismertetem.

3.2.1.3. A mérésösszegzés intervallumai

„Az alapvető mérési intervallumnak a paraméterek nagyságának mérésekor (tápfeszültség, harmonikusok, aszimmetria) 50 Hz frekvenciájú hálózat esetén 10

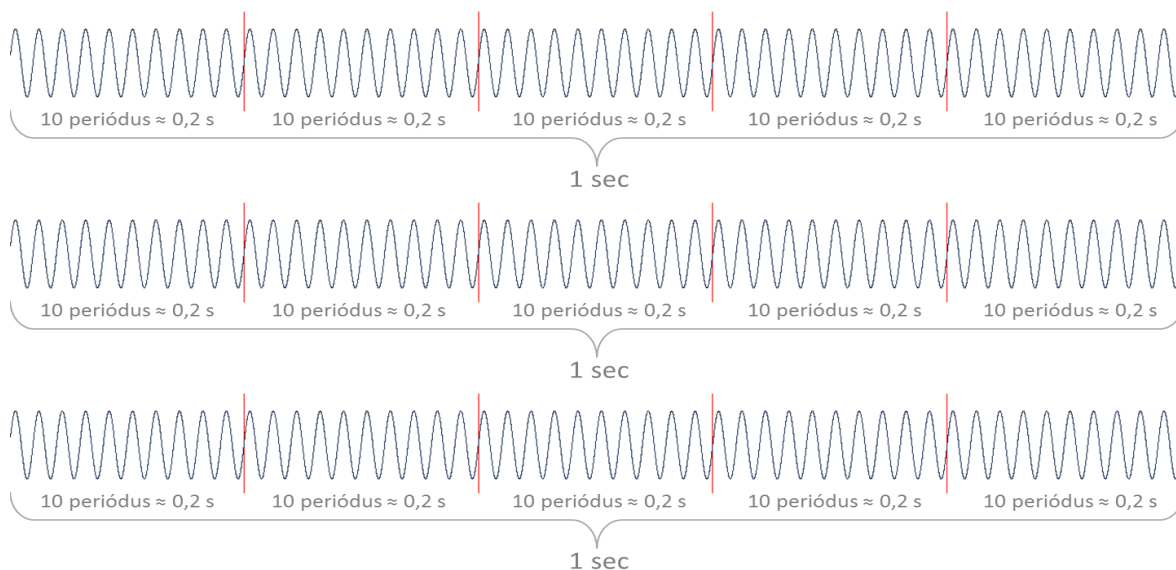
periódusnyinak, 60 Hz frekvenciájú hálózat esetén 12 periódusnyinak kell lennie.” [70] A továbbiakban csak az 50 Hz-es hálózattal foglalkozok, azaz a 10 periódusnyi időintervallumokra való paraméterszámítással. A 10 periódusos mérést a valós idejű óra minden 10 perces jelzésekor újra kell szinkronizálni (3.2. ábra). A 10 periódusokból további 3 intervallumra kell a szabvány szerint a paramétereket meghatározni:

- Az első intervallum a 150 periódusnyi intervallum, amit 15 egymást követő 10 periódusnyi időintervallumból származó adatokkal kell elvégezni. Ezt az intervallumot néha 3 másodperces intervallumnak is nevezem (fontos megemlíteni, hogy mivel a 10 periódusnyi intervallum sem 0,2 másodperc, ezért a 150 periódus sem pontosan 3 másodperc). A 150 periódusnyi időintervallumot a 10 perces időjelre kell újraszinkronizálni, ami azt jelenti, hogy az első 150 periódus mindig az egész 10 perctől kezdődik. Erre azért van szükség, mivel 10 percenként a periódusok száma változó és ritkán egész. Két A típusú módszerrel működő műszernek ugyanazt kell mérni, ezért ezeknek a műszereknek biztosítaniuk kell, hogy egész 10 perctől kezdjék a 150 periódusokat. „A 10 perces időjel bekövetkeztekor egy új 150 periódusnyi időintervallum addig folytatódik, amíg véget nem ér. Ez a két 150 periódusnyi időintervallum között átfedést okoz (3.2. ábra).” [70]
- A következő a 10 perces intervallum, aminél előírja a szabvány, hogy mindazon egymást követő, kihagyás nélküli 10 periódusra vonatkozó értékekből kell kiszámolni, ami pontosan egy egész 10 perctől kezdődik és a rákövetkező 10 perces időtartamba tartozik. Fontos, hogy a következő 10 perces intervallumba átnyúló 10 periódusnyi értéket is hozzá kell venni (3.2. ábra). „Az utolsó 10 periódusnyi intervallum a 10 perces összegzési ciklusban jellemzően átfedésben van a valós idejű óra 10 perces jelzésével. Bármilyen átfedésben lévő 10 periódusnyi intervallum a megelőző 10 perces intervallum szerinti összegzéshez tartozik.” [70]



3.2. ábra: Összegzési intervallumok szinkronizálása A osztály esetén [70]

- Az utolsó a két órás összegzési intervallum, amit egyszerűen 12 db 10 perces intervallumból határozható meg. A 2 órás intervallumban nem szabad kihagyásoknak, illetve átfedéseknek lenni. A 2 órás intervallumok a valós idejű óra páros számú 2 órás intervallumainál kezdődnek.



3.3. ábra: A három másodperces intervallum 15 db 10 periódusos intervallumból áll [74]

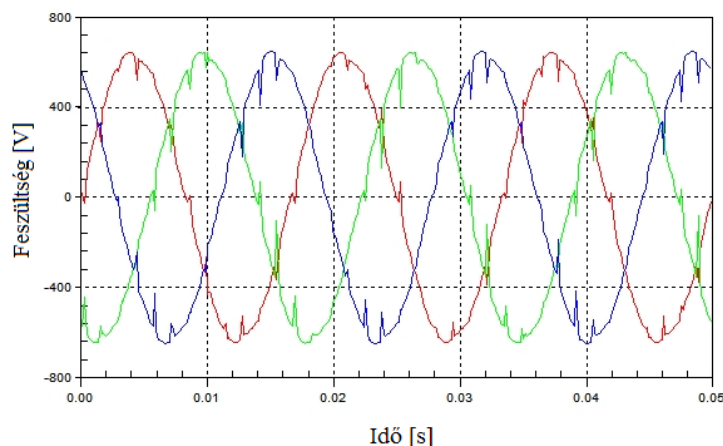
3.2.1.4. Jelölési koncepció

A szabvány definiál, és kötelezővé teszi egy jelölési módszer alkalmazását A és B osztályú mérés esetén. A módszer célja azon 10 periódusok és a belőlük számított intervallumok megjelölése, amelyek olyan feszültségzavarokat tartalmaznak, mint feszültségletörés, -túllendülés vagy -kimaradás, mivel az ezen 10 periódusokból való további számítások megbízhatatlan értékeket eredményezhetnek. „A jelölési koncepció megakadályozza, hogy egyetlen eseményt egynél többször is figyelembe lehessen venni különböző paraméterekben (például egy feszültségletörést feszültségletörésként és frekvenciaváltozásként is), valamint jelzi, hogy az összegzett érték megbízhatatlan lehet. A jelölést csak feszültség-letörések, -túllendülések vagy -kimaradások aktiválhatják. A feszültségletörések és -túllendülések észlelése a felhasználó által kiválasztott küszöbértékektől függ, ezért ezek befolyásolják, hogy mely adatok lesznek megjelölve.”

„Ha egy adott időintervallumban bármely érték meg lesz jelölve, akkor azt az összegzett értéket is meg kell jelölni, amely tartalmazza ezt az értéket. A megjelölt értéket el kell tárolni, és az összegzési eljárásban is szerepeltetni kell.” Tehát a megjelölt értékeket is fel kell arra használni, hogy nagyobb intervallum értékeket határozzunk meg, de ebben az esetben azon intervallumokat is meg kell jelölni.

3.2.1.5. Hálózati frekvencia

A hálózati frekvenciát a szabvány szerint 10 másodpercenként kell megmérni. Mivel a hálózati frekvencia értéke nem pontos 50 Hz a 10 másodperces időintervallum alatt, ezért a ciklusok száma nem feltétlenül lesz egész szám. „A hálózati frekvencia a 10 másodperces időintervallum alatti periódusok száma osztva a teljes periódusok összetett idejével.” [67] A harmonikusokat és a közbenső harmonikusokat és a nagyfrekvenciájú tranzienseket (3.4. ábra) csillapítani kell a többszörös nulla-átmenetek hatásának csökkentése érdekében.



3.4. ábra: A harmonikusok és tranziensek miatt a nulla-átmenetek száma megsokszorozódhat [108]

„A mérési időintervallumok nem lapolhatják át egymást.” „Minden egyes 10 másodperces intervallumnak az abszolút 10 másodperc órajelnél kell kezdődnie.” [70]

„A mérés bizonytalanság nem haladhatja meg a ± 10 mHz-et a 42,5 Hz - 57,5 Hz mérési tartományokban.” [70]

3.2.1.6. Hálózati feszültség

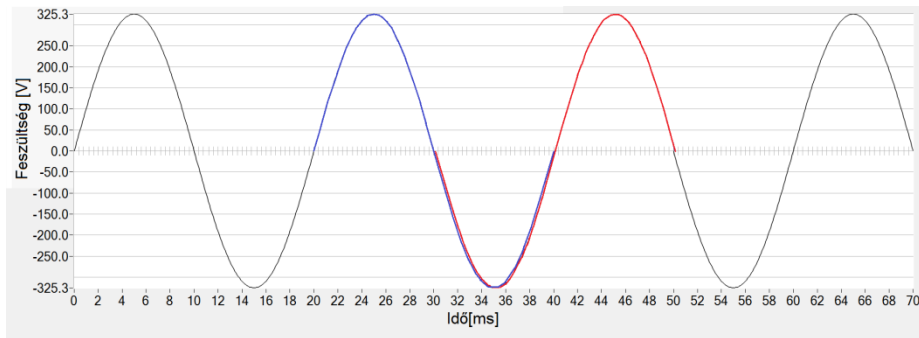
A hálózati feszültség effektív értéke a hétköznapi felhasználó számára a legismertebb paraméter. A magyarországi lakossági táphálózaton 230V a normál értéke (U_n). Mivel 50Hz-es hálózatról beszélünk, ezért az effektív értéket 10 periódusnyi időintervallumból kell meghatározni úgy, hogy a 10 periódusnyi intervallumok ne lapolják át egymást, kivéve természetesen a 3.2. ábrán leírtakat. Fontos megjegyezni, hogy a hálózati feszültség effektív értéke tartalmazza a harmonikusokat, közbenső harmonikusokat és a hálózaton vezérelt fogyasztók jelfeszültségét is. A mérési bizonytalanság nem haladhatja meg az $U_n \pm 0,1\%$ -át az U_n 10%-a és 150%-a közötti tartományban.

3.2.1.7. Villogás (Flicker)

A szabvány szerint a flicker értékek meghatározásához az IEC 61000-4-15-ös szabványt kell alkalmazni. Mivel flicker értékek meghatározása jelentősen bonyolultabb a többi paramétertől, ezért a meghatározásának leírása külön szabványba került. A flicker értékek meghatározása nem része a disszertációnak, ezzel a területtel a Miskolci Egyetem Elektrotechnikai- Elektronikai Tanszékének másik munkatársa foglalkozott kutatómunkája során [68]. Az általa kifejlesztett flicker számító algoritmus azonban beépítésre került az általam kifejlesztett hálózatanalizáló szoftverbe.

3.2.1.8. Feszültségletörések, -túllendülések

A feszültségletörések, -túllendülések detektálására a szabvány a feszültség félperiódusonként frissített effektív értékek ($U_{eff(1/2)}$) alkalmazását írja elő. Az $U_{eff(1/2)}$ értéket minden egyes mérőcsatornára a 3.5. ábra szerint kell meghatározni. Egy periódusra kell kiszámítani a feszültség effektív értéket úgy, hogy félperiódusos eltolásonként azt újra meg kell határozni. Az egy periódusonként mért feszültség effektív értéke a nulla-átmenetétől kezdődően és félperiódusonként frissítve határozandó meg.



3.5.ábra: $U_{eff(1/2)}$ érték meghatározása. A kék vonal az aktuális periódust, a piros vonal a következő periódust mutatja.

Az $U_{eff(1/2)}$ érték kiszámítása esetén fontos, hogy az mindig pontosan egész periódusból legyen meghatározva. Mivel a periódus a hálózati frekvencia függvénye, ezért a periódus hossza a mérés során folyamatosan változik. „Az $U_{eff(1/2)}$ érték csak a feszültségletörés, a feszültségnövekedés és a feszültségkimaradás észlelésére és kiértékelésük során használatos, A osztály esetén.” [70]

„Egyfázisú rendszerekben a *feszültségletörés* akkor kezdődik, amikor a feszültség U_{eff} effektív értéke a feszültségletörési küszöbérték alá csökken, és akkor ér véget, amikor a feszültség U_{eff} effektív értéke eléri vagy meghaladja a feszültségletörési küszöbértéket és a hiszterézisfeszültség összegét.” [70]

„Többfázisú rendszerekben a feszültségletörés akkor kezdődik, amikor egy vagy több csatornán a feszültség U_{eff} effektív értéke a feszültségletörési küszöbérték alá csökken, és akkor ér véget, amikor a feszültség U_{eff} effektív értéke minden mért csatornán eléri vagy meghaladja a feszültségletörési küszöbértéket és a hiszterézisfeszültség összegét.” [70]

A feszültségletörés küszöbértéke, ami a feszültségletörés kezdetének és végének észleléséhez meghatározott feszültségérték, általában a normál feszültség értékének 90%-a. A hiszterézisfeszültség értéke akár nullának is felvehető, így a kezdő és záró küszöbérték azonos lehet.

„A feszültségletörés egy adatpárral, a maradékfeszültséggel, vagy a mélységgel és az időtartammal jellemezhető. A maradékfeszültség a feszültségletörés alatt bármelyik csatornán mért legkisebb U_{eff} érték. A mélység a referenciafeszültség és a maradékfeszültség közötti különbség, amit általában a referenciafeszültség százalékos értékében fejeznek ki. A feszültségletörés kezdeti időpontját az eseményt elindító csatorna U_{eff} értéke végének megfelelő időbélyeggel kell megjelölni; a feszültségletörés végének időpontját az eseményt lezáró csatorna U_{eff} értéke végének megfelelő időbélyeggel kell megjelölni, amit a küszöbérték és a hiszterézis összege határoz meg. A feszültségletörés időtartama a feszültségletörés kezdeti és befejezési időpontja közötti különbség ” [70]

„Egyfázisú rendszerekben a *feszültségtúllendülés* akkor kezdődik, amikor a feszültség U_{eff} effektív értéke a feszültségtúllendülési küszöbérték fölé emelkedik, és akkor ér véget, amikor a feszültség U_{eff} effektív értéke egyenlő vagy kisebb, mint a feszültségtúllendülési küszöbérték és a hiszterézisfeszültség különbsége.” [70]

„Többfázisú rendszerekben a feszültségtúllendülés akkor kezdődik, amikor egy vagy több csatornán a feszültség U_{eff} effektív értéke a feszültségtúllendülési küszöbérték fölé

emelkedik, és akkor ér véget, amikor a feszültség U_{eff} effektív értéke minden mért csatornán egyenlő vagy kisebb, mint a feszültségtúllendülési küszöbértéket és a hiszterézisfeszültség különbsége.” [70]

A feszültségtúllendülés küszöbértéke, ami a feszültségtúllendülés kezdetének és végének észleléséhez meghatározott feszültségérték, általában a normál feszültség (U_n) értékének 110%-a. A hiszterézisfeszültség értéke akár itt is nullának felvehető, így a kezdő és záró küszöbérték azonos lehet.

„A feszültségtúllendülés egy adatpárral, a feszültségtúllendülés legnagyobb értékével és az időpárral jellemezhető. A feszültségtúllendülés legnagyobb értéke a túllendülés alatt bármelyik csatornán mért legnagyobb U_{eff} értékét. A túllendülés kezdeti időpontját időbélyeggel kell megjelölni, mikor az eseményt elindító csatorna U_{eff} értéke véget ér; a túllendülés befejezési időpontját szintén időbélyeggel kell megjelölni, amikor az eseményt lezáró csatorna U_{eff} értéke véget ér, amit a küszöbérték és a hiszterézis különbsége határoz meg. A túllendülés időtartama a túllendülés kezdeti és befejezési időpontja közötti különbség.” [70]

A mérési bizonytalanság a maradékfeszültség és a feszültségtúllendülés esetében nem haladhatja meg az $U_n \pm 0,2\%$ -át.

3.2.1.9. Feszültségkimaradás

„Egyfázisú rendszerekben a feszültségkimaradás akkor kezdődik, amikor a feszültség U_{eff} értéke a feszültségkimaradási küszöbérték alá csökken, és akkor ér véget, amikor a feszültség U_{eff} értéke eléri vagy meghaladja a feszültségkimaradási küszöbérték és a hiszterézisfeszültség összege.” [70]

„Többfázisú rendszerekben a feszültségkimaradás akkor kezdődik, amikor mindegyik csatornán a feszültség U_{eff} értéke a feszültségkimaradási küszöbérték alá csökken, és akkor ér véget, amikor a feszültség U_{eff} értéke bármely csatornán eléri, vagy meghaladja a feszültségkimaradási küszöbérték és a hiszterézisfeszültség összegét.” [70]

„A feszültségkimaradás időtartama a feszültségkimaradás kezdeti és befejezési időpontja közötti különbség (lásd 2.5. ábra).” [70] A feszültségkimaradásnál is, ha szükséges, beállítható hiszterézisérték.

3.2.1.10. Tápfeszültség aszimmetria

„Háromfázisú rendszerben az aszimmetrikus feszültségek és áramok számítása a szimmetrikus összetevők módszerével lehetséges. Az aszimmetrikus háromfázisú rendszer egy pozitív, egy negatív és egy zérus sorrendű szimmetrikus rendszerre bontható.” [2]

„A tápfeszültség aszimmetriáját a szimmetrikus összetevők módszerével kell kiértékelni.” [70] Meghatározásra kerül az U_p pozitív sorrendű, az U_n negatív sorrendű, valamint az U_z zérus sorrendű összetevő a következő képlet segítségével.

$$\begin{bmatrix} U_z \\ U_p \\ U_n \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

ahol $a = e^{j120^\circ}$ forgóvektor, illetve U_a, U_b , és U_c a fázismennyiségeket jelölik.

A bemenő feszültségjel alapharmonikus összetevőjét itt is 10 hálózati periódusnyi időintervallumban kell mérni 50 Hz-es hálózat esetén, azonban a harmonikusok hatását csökkenteni kell a helyes számítás érdekében.

A százalékos értékben kifejezett u_n negatív, illetve u_z zérus sorrendű arányt a következő összefüggések adják:

$$u_n = \frac{U_n}{U_p} = \frac{\text{negatív sorrendű összetevő}}{\text{potitív sorrendű összevevő}} 100 \quad (3.2)$$

$$u_z = \frac{U_z}{U_p} = \frac{\text{zérus sorrendű összetevő}}{\text{potitív sorrendű összevevő}} 100 \quad (3.3)$$

Abban az esetben, ha csak a fázis-fázis közötti vonali feszültségek alapharmonikus feszültségértékei ismertek, akkor a következő képlettel is meghatározható a hálózati aszimmetria érték [70]:

$$u_n = \sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\beta}}{1+\sqrt{3-6\beta}}} 100 \quad (3.4)$$

ahol

$$\beta = \frac{U_{12f1}^4 + U_{23f1}^4 + U_{31f1}^4}{(U_{12f1}^2 + U_{23f1}^2 + U_{31f1}^2)^2} \quad (3.5)$$

U_{12f1} , U_{23f1} és U_{31f1} a vonali feszültségekhez tartozó alapharmonikus (csak 50 Hz) feszültségérték.

3.2.2 MSZ EN 61000-4-7

„A feszültségharmonikusok alapvető mérését A osztály esetén az IEC 61000-4-7 I. osztálya határozza meg.” „Az IEC 61000 szabványsorozat e része olyan mérőműszerekre alkalmazható, amelyek az 50 Hz-es vagy 60 Hz-es villamosenergia-rendszerek alapharmonikusaira szuperponált, a 9 kHz-ig terjedő frekvenciatartományban lévő spektrális összetevők mérésére szolgálnak.” „E szabvány meghatározza azokat a mérőműszereket, amelyek az egyedi berendezések szabványos kibocsátási határértékeinek az ellenőrzésére, valamint egy adott táphálózat áram- és feszültség-harmonikusainak a mérésére valók.” [71]

Az MSZ EN 61000-4-7-es szabvány [71] használatára tehát azért van szükség, mivel az 50 Hz-es hálózat esetén a villamosenergia-rendszerek alapharmonikusaira szuperponált, a 9 kHz-ig terjedő frekvenciatartományban lévő spektrális összetevők, azaz harmonikusok jelen vannak. A szabvány megmondja, hogy harmonikussal terhelt rendszer esetén milyen mérési és számítási módszerekkel lehet kiértékelni a hálózat harmonikus tartalmát.

A szabvány szerint az alapműszernek a következőket kell tartalmazni a harmonikus vizsgálatához:

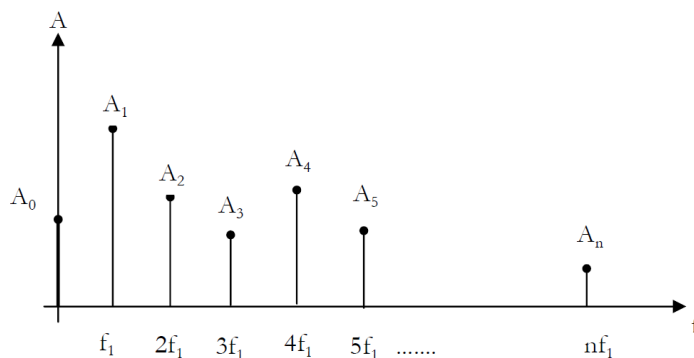
- spektrumátlapolás elleni, anti-aliasing szűrővel ellátott bemeneti áramkör;
- analóg/digitális (A/D) átalakítót tartalmazó mintavevő- és tartó egység;
- szinkronizáló és ablakformáló egység;
- Fourier-együtthatókat előállító processzor;
- áram és feszültség mérésre szolgáló speciális eszközök.

Az analizálandó intervallum, azaz regisztrátum szélessége hasonlóan, mint a 61000-4-30-as szabvány [70] esetén, itt is az alapharmonikus periódusidejének 10-szeresének kell

lenni és emiatt szinkronizálni kell a villamos energia rendszer alaphérfrekvenciájához. A szinkronizálási módszerek kutatása az egyik legfőbb része a disszertációnak, az ezzel kapcsolatos munkámat a 4. fejezet mutatja be.

Az időablakot tehát mindig a táphálózat frekvenciájának megfelelően minden egyes 10 periódusból álló csoportra kell szinkronizálni. A szabvány előírja, hogy az első mintavételi impulzus belépőjele és az (M+1)-edik mintavételi impulzus (ahol M a minták száma) belépőjele közötti idő egyezzen meg 50Hz-es hálózat esetén a 10 periódus időtartamával, ahol a megengedhető hiba legfeljebb $\pm 0,03\%$, ezzel tehát megadja, hogy mennyire pontosan kell szinkronizálni a 10 periódusra. Előírja azt is, hogy fáziszárt-hurkot, vagy más szinkronizálási eljárást tartalmazó műszereknek meg kell felelniük ennek a pontossági és szinkronizálási követelménynek.

A vizsgált regisztrátumra elvégzett Fourier sorfejtés eredményeképpen megkapjuk az amplitúdó-frekvencia spektrumot (3.5. ábra).



3.6. ábra. Amplitúdó-frekvencia spektrum [75]

Az f_1 a spektrum alapharmonikusa, az A_1 pedig az alapharmonikushoz tartozó amplitúdó érték. Felharmonikusnak (f_n) nevezzük az alapharmonikus egész számú többszöröseit. A harmonikusokból meghatározható a jel harmonikustorzításának az értéke.

Harmonikustorzítások meghatározására a következő paramétereket javasolja a szabvány:

1. Teljes harmonikus torzítás (THD)

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} 100[\%] \quad (3.6)$$

, ahol U_1 a feszültség alapharmonikusának (50 Hz) effektív értéke, az U_h az 50 Hz h-dik felharmonikus feszültség effektív értéke.

2. Teljes harmonikuscsoport-torzítás (THDG)

$$THD_{G,U} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_{g,h}^2}}{U_{g,1}} 100[\%] \quad (3.7)$$

$$U_{g,n}^2 = \frac{U_{k-5}^2}{2} + \sum_{i=-4}^4 U_{k+i}^2 + \frac{U_{k+5}^2}{2} \quad (3.8)$$

,ahol $h=n$ felharmonikus rendszámhoz tartozó harmonikus csoport effektív feszültség érték négyzete.

3. Teljes harmonikusalcsoport-torzítás (THDS)

$$\text{THDS}_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_{sg,h}^2}}{U_{sg,1}} 100[\%] \quad (3.9)$$

$$U_{sg,n}^2 = \sum_{i=-1}^1 U_{k+i}^2 \quad (3.10)$$

,ahol $h=n$ harmonikus rendszámhoz tartozó harmonikus alcsoport effektív feszültség érték négyzete.

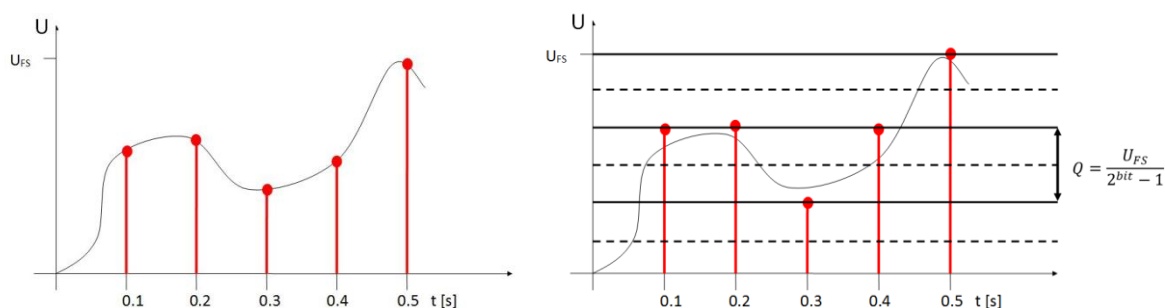
3.3. Számítógéppel vezérelt mérőrendszerek

A számítógéppel vezérelt mérőrendszerek az elmúlt évtizedekben egyre nagyobb szerepet kapnak a különböző jelek érzékelésében, rögzítésében és feldolgozásában. A számítógépek alkalmazása a különböző mérési területeken a mérési eredmények pontosítását, a feldolgozások felgyorsítását, valamint a mérés gyakoriságának növelését eredményezték [80, 81].

A számítógéppel vezérelt mérőrendszer alapfunkciója, hogy egy fizikai/kémiai mennyiséget fogadjon, azt a számítógép által használható digitális (bináris) formára alakítsa, szükség szerint archiválja, esetleg továbbítsa. A következőkben egy ilyen rendszer megértéséhez szükséges alapismereteket röviden ismertetem, majd a mérőrendszer általános felépítését mutatom be.

3.3.1. Analóg jel digitalizálásának alapjai

A mérendő analóg jeleket a számítógép számára digitális jellé kell alakítani, azaz digitalizálni, időben és értékben diszkretizálni kell. Digitalizálás során az analóg jelet először mintavételezni, majd kvantálni kell. Mintavételezésnek nevezzük, ha egy folyamatos analóg jelből meghatározott időközönként mintát veszünk, és megszüntetjük a jel időben való folytonosságát. A mintavételezett jel kvantálása során pedig a minták raszterekbe való sorolását végezzük el, és megszüntetjük a jel „értékben” való folytonosságát (3.7. ábra). Egy raszter szélessége a kvantum (Q).

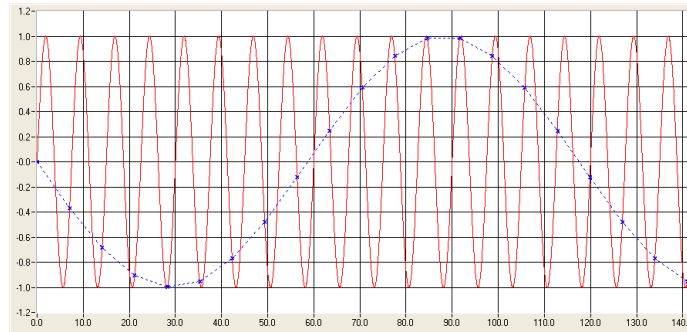


3.7. ábra: Az analóg jel mintavételezése (bal oldali kép), majd a mintavételezett jel kvantálása (jobb oldali kép) előállítja a digitális jelet

A mintavételezési sebességet úgy kell megválasztani, hogy a Shannon-mintavételezési törvény értelmében a mintavételi frekvencia (f_{mv}) nagyobb legyen a mintavételezett jel legnagyobb frekvenciájú összetevőjének ($(f_{jel})_{max}$) a kétszeresénél:

$$f_{mv} > 2(f_{jel})_{max} \quad (3.11)$$

Abban az esetben, ha a Shannon-törvény betartása nem történik meg, akkor a mintavételezett jelben nem létező összetevők, ún. alias jelek jelennek meg. Ezt a jelenséget nevezzük aliasing jelenségnek (3.8. ábra).



3.8. ábra: Aliasing jelenség [75]

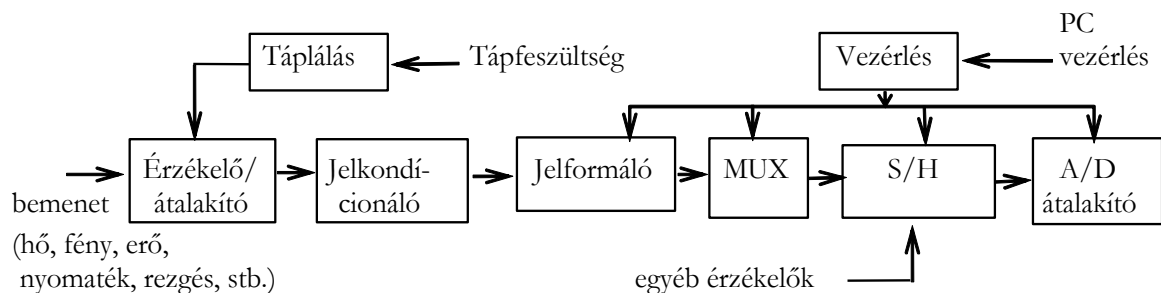
Az aliasing ellen anti-aliasing szűrővel lehet védekezni, ami egy nagy meredekségű aluláteresztő szűrő, aminek vágási határfrekvenciája a mintavételezési frekvencia fele. A szűrő feladata értelemszerűen azon frekvenciájú jelek leszűrése, amelyekből alias jelek keletkezhetnek.

A digitalizáló áramkör bitszáma (*bit*) jellemzi a kvantálás pontosságát, a kvantum szélessége (*Q*). A kvantumok száma a bitszámból határozható meg. Minél nagyobb az átalakító bitszáma, annál pontosabb az átalakítás. U_{FS} a feszültségtartomány, amire a digitalizálást el kell végezni.

$$Q = \frac{U_{FS}}{2^{bit}-1} \quad (3.12)$$

3.3.2. Számítógépes mérőrendszer felépítése

A 3.9. ábra egy mérőrendszer funkcionális felépítését mutatja be. Minden egységnek jól meghatározható feladata van a rendszerben, jóllehet a különböző alkalmazásoknál az egyik vagy másik egység hiányozhat [75].



3.9. ábra: Számítógéppel vezérelt mérőrendszer funkcionális felépítése [75]

Érzékelő/átalakító: Fizikai/kémiai mennyiséget érzékel és azt valamilyen ismert törvényszerűség szerint átalakítja az adatgyűjtés számára alkalmas, általában feszültségjel formára. Egyes érzékelőknek külső energiaforrásra is szükségük lehet a működésükhöz. Bizonyos érzékelők az érzékelésen túl a mérőkör leválasztását is megoldják. Ez különösen a villamos mennyiségek mérésénél lehet lényeges, mert ha például egy esetleges meghibásodás miatt túl nagy mérendő mennyiség jelenne meg az érzékelő bemenetén, akkor védelem nélkül

a számítógép bemenetére olyan szintű feszültség juthat, amely a berendezés meghibásodásához vezetne. Ezért a mérőkört mindig megfelelő módon célszerű leválasztani a mérendő körrel.

Jelkondicionáló: Az átalakító kimeneti jele a számítógép analóg bemenetére kapcsolható olyan feszültség jel, melyet sok esetben a megfelelő pontosságú, minőségű átalakítás elérése érdekében „kezelni”, úgymond kondicionálni kell. A jelkondicionálás legtipikusabb példája a szűrés és erősítés. A mért jelek általában zajosak és mindig tartalmaznak olyan egyéb, nem hasznos összetevőt, amit a feldolgozás előtt szükséges kiszűrni. Gyakran fordul elő, hogy a jel amplitúdója nem elegendő a digitalizáláshoz. Ha például a jel a maximális bemeneti tartományhoz képest túl kicsi, akkor digitalizálásnál az A/D átalakító csak az alsó néhány bitet használja fel, ami az átalakítás pontosságát nagymértékben csökkenti. A leggyakrabban alkalmazott analóg jelkondicionálók: erősítő, feszültségosztó, zajsűrő, antialiasing szűrő.

Jelformáló: Vannak olyan esetek, amikor a mért jelen a szükséges átalakításokat érdemes még a „számítógépen kívül” elvégezni. Ez főleg akkor hasznos, ha processzoridőt kívánunk megtakarítani, amivel a rendszer sebessége jelentősen növelhető. Processzoridőt takaríthatunk meg például egy integráló áramkör beiktatásával, vagy jelformáló lehet egy egy-chipes számítógép, amely segítségével a processzor terhelése jelentősen csökkenthető.

Mintavevő/tartó (Sample and hold-S/H): A rendszernek ez az egysége végzi az adatgyűjtő berendezés analóg bemeneti csatornájára kapcsolt jel mintavételezését. A mintavételezett analóg feszültségértéket gyakran „várákoztatni” kell, amíg az feldolgozásra kerül, ezért szükség van egy olyan áramkörre, amely a jelet a szükséges ideig „tartja”. A mintavevő tartó áramkörök a funkcióiknak megfelelően két kiemelten fontos paraméterrel rendelkeznek: az egyik a mintavételezési idő, a másik a tartási drift. A mintavételezési idő alatt azt az időt értjük, ami egy minta beolvasás-vezérlőjelének kiadásától az áramkör jelkövető állapotának beállásáig eltelik. A tartási drift azt mutatja meg, hogy egységnyi idő alatt mennyit esik a tartó áramkör kimenetén a feszültség.

MUX (Multiplexer): Ha több bemenő jelet akarunk egyidőben a számítógépbe bevinni, akkor vagy több A/D átalakítót kell alkalmazni, vagy a jeleket valamilyen sorrendben, csatornánként kell behívni és átalakítani. Mindkét megoldást alkalmazzák, többségében azonban az A/D átalakítók magas ára miatt olyan sorrend kapcsolókat, ún. multiplexereket alkalmaznak, amelyek több csatornát képesek fogadni, a jeleket sorba rendezni, vezérelni és továbbítani az A/D átalakító bemenetére. A több A/D átalakítóval rendelkező kártyát vagy mintavételezési eljárást szimultánnak, a multiplexert tartalmazót pedig multiplexelt kártyának, illetve mintavételezési eljárásnak nevezzük. A multiplexelt – mint olcsó megoldás – hátránya, hogy a kártya mintavételezési sebessége leoszlik a csatornák számával, valamint, hogy egy időpillanatban nem lehetséges két csatorna jelét mintavételezni.

A/D átalakító: A mintavételezett analóg feszültségértéket digitális (bináris) formára alakítja át. Működési elvük, felbontásuk, sebességük, stb. szerint nagyon sokféle A/D átalakító van forgalomban, ezek között a legelterjedtebbek az ún. kétoldali közelítéses elven működő átalakítók, amelyek mind sebességüket, pontosságukat, mind az árukat figyelembe véve gazdaságos megoldást kínálnak a legtöbb mérési feladathoz.

3.4. Hálózatanalizáló rendszer felépítése, fejlesztésének mérföldkövei

3.4.1. Bevezető

A Miskolci Egyetem Elektrotechnikai- Elektronikai Tanszéke már évtizedek óta végez villamos energetikai vizsgálatokat. Ezekbe a vizsgálatokba csatlakoztam be még egyetemi hallgatóként 2006-ban. Megismerkedtem a Tanszék által akkor használt mérőrendszer felépítésével és működésével. Azt a feladatot kaptam, hogy egy fejlettebb adatrögzítő, feldolgozó és kiértékelő szoftvert fejlesszek ki az akkor használt hardvereszközökre. Ettől kezdve aktívan részt vettem a rendszer folyamatos fejlesztésében, amely során egyre fejlettebb mérőrendszert építettünk ki a tanszéken.

3.4.2. Villamos energetikai rendszerek mérésének és analizálásának folyamata

Egy villamos energetikai rendszer vizsgálata a következő részfeladatokból áll, amelyek közül bármelyik lerövidítése hozzásegít a villamos hálózat kiértékelésének rövidítéséhez és ezáltal a hatékonyabb vizsgálatokhoz.

- A mérés előkészítése (1-2 nap): Az előkészítési fázis lerövidítését a mérési eszközök karbantartásával lehet elérni.
- Utazás és mérés telepítése (1 nap): Rövidítése értelemszerűen nem lehetséges.
- A mérés folyamata (1-30 nap): Rövidítése értelemszerűen nem lehetséges. Hosszát a vizsgálat célja, és a megbízási szerződés dönti el.
- Utazás és leszerelés (1 nap): Rövidítése értelemszerűen szintén nem lehetséges.
- A mérési adatok feldolgozása (12-72 óra): Közel nullára lehetne csökkenteni, ha az adatokat feldolgozása on-line, a mérés közben megtörténne.
- Kiértékelés (3-5 nap): Rövidítése speciális kiértékelő alkalmazás kifejlesztésével lehetséges, amely bizonyos problémákat felismer és kigyűjt.
- Jegyzőkönyv készítése (3-5 nap): Rövidítése jegyzőkönyv készítő alkalmazás kifejlesztésével lehetséges.

A mérési adatok on-line feldolgozásának megvalósítását tűztem ki célul, ami által a feldolgozási idő közel nullára redukálható. A feladat megvalósításával jelentősen csökkenthető egy rendszer kiértékelésének ideje.

A speciális kiértékelő alkalmazás kifejlesztését, ami az on-line feldolgozott adatok megjelenítésére, kiértékelésére és jegyzőkönyv készítésére alkalmas, TDK és diplomadolgozat keretében diplomatervező hallgatóm végezte.

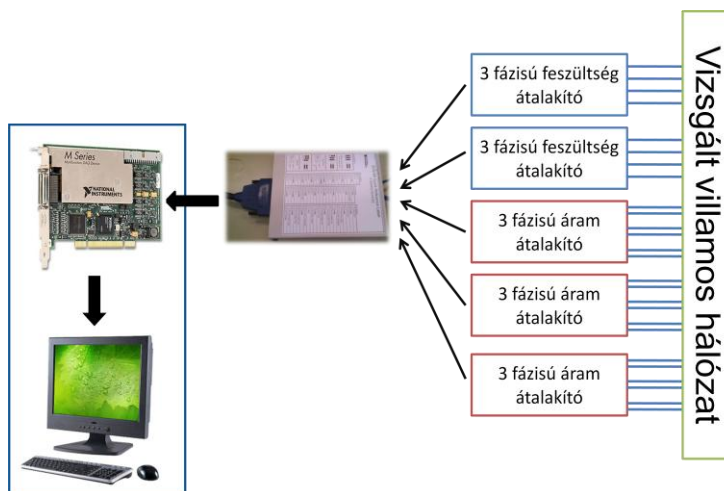
3.4.3. Mérőrendszer felépítése, kezdetleges szoftver megvalósítások

A villamos energia mérésére kialakított mérésadatgyűjtő rendszer hardverfelépítése látható a 3.10. ábrán, ami a következő fő elemekből épül fel:

- vizsgált villamos hálózat;
- feszültség- illetve áramátalakítók, ún. mérőváltók;

- sorkapocs, vezetékbekötő;
- mérésadatgyűjtő kártya;
- számítógép.

A vizsgált háromfázisú villamos hálózatra mérő-átalakítók segítségével csatlakozunk. A mérőátalakítóknek érzékelési és jelkondicionáló feladatuk van, azaz a vizsgált villamos mennyiségeket (feszültség, áram) a mérőkártya számára fogadható jellé alakítja. A mérésadatgyűjtő kártya analóg bemenetei $\pm 10\text{V}$ -os feszültségre képesek fogadni, ezért a váltóknak erre a tartományra szükséges leképezniük a mért jellemzőket.



3.10. ábra: Mérésadatgyűjtő rendszer felépítése

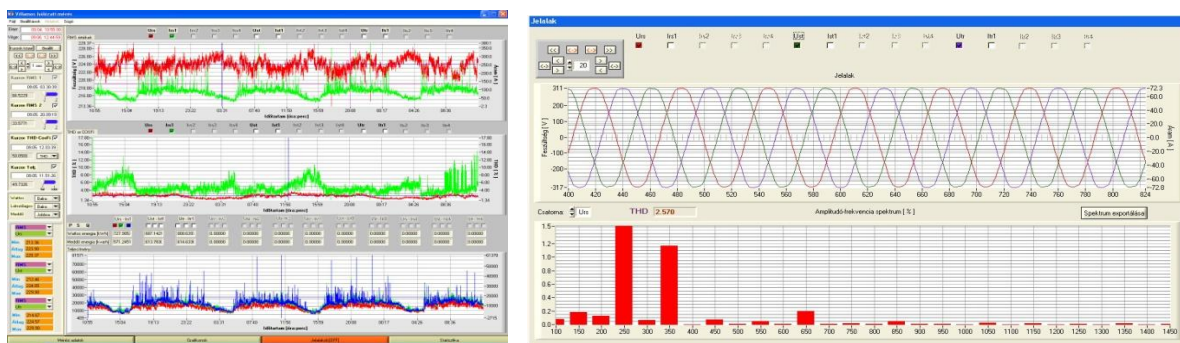
A 3.10. ábrán látható mérési elrendezésben a mérőváltók külön egységekben helyezkednek el, ahol egy „doboz” háromfázisú áram, vagy feszültség átalakítására képes, $\pm 5\text{ V}$ -os tartományra. Az átalakítók egyik legfőbb paramétere a bemeneti feszültség vagy áram tartománya. Feszültség esetében $\pm 500\text{ V}$, illetve $\pm 200\text{ V}$ volt az általunk leggyakrabban alkalmazott méréshatár, mivel $\pm 500\text{ V}$ a lakossági táphálózat mérésére alkalmazható, illetve a $\pm 200\text{ V}$ a transzformátorállomások mérőváltóinak 100 V kimenetéhez jól alkalmazható. Árammérés során a transzformátorállomások az áramváltók kimenetei 5 A vagy 1 A -esek általában, így az árammérés esetén a mi átalakítóink árambemenetei is erre a mérési tartományra készültek. Abban az esetben, ha nincs lehetőség áramváltókhoz csatlakozni, Hall elemes lakatfogókat alkalmazunk, amivel az áramkör megszakítása nélkül vagyunk képesek mérni a vezetéken átfolyó áramot. A lakatfogók már egyben mérőváltónak felelnek meg, mivel a kimenetükön a mért jelet általában a $\pm 5\text{ V}$ tartományra képezik le, így azt közvetlenül a mérőkártyára lehet kötni. A 3.10. ábrán a leggyakrabban előforduló feszültség- és áramváltó felállás látható, mivel általában egy fázisfeszültséget, egy vonali feszültséget és több áramot mérünk.

A Miskolci Egyetem Elektrotechnikai- Elektronikai Tanszéke által elkészített mérőváltók is Hall-generátoros [76] mérő-átalakítokat tartalmaznak, mivel kedvező átalakítási tulajdonságokkal rendelkeznek. Nagyon kicsi a fáziseltolásuk más módszerekkel szemben (pl. árammérő transzformátor), a jel egyen-összetevőinek az átalakítására is képesek, széles frekvenciaspektrumon alkalmazhatók (pl. Rogowsky elvén működő érzékelőkre ez nem igaz), valamint galvanikus leválasztást is biztosítanak. Ezen tulajdonságok alkalmassá teszik a Hall-elemeket a váltakozó áramú villamos hálózatok feszültségének és áramának mérésére. „A

Hall-generátoros mérő-átalakítók elsősorban különböző villamos mennyiségek mérése területén nyertek teret, de más mechanikai mennyiségek mérésére is alkalmazzák őket, pl. szögelfordulás, nyomás mérésére.”[75] A Hall-generátoros mérő-átalakítók a Hall effektuson alapulnak. Az Edwin Hall által 1879-ben felfedezett jelenség, mely szerint, ha egy vezetőben vagy félvezetőben áram folyik, és azt mágneses térbe helyezünk, akkor az áramot hordozó részecskékre fémeknél elektron Lorentz-erő hat, ami azzal jár, hogy a vezető két oldalán feszültségkülönbség lesz. Ezt a feszültséget Hall-feszültségnek nevezik.

A feszültség érzékelésére az LV-25P típusú LEM által gyártott Hall-effektuson alapuló mérő-átalakítót alkalmazzuk általában, ami maximum 1500 V mérésére alkalmas. Áramérzékelésre LA-25-NP típusú átalakítót használtuk, annak is főleg az 5 A illetve 1,5 A mérőhatárral rendelkező darabjait.

Szoftveroldalról nézve - a Miskolci Egyetem Elektrotechnikai- Elektronikai Tanszékére való érkezésem előtt - egy olyan programot használtak a villamos feszültség vizsgálatára, ami csak a feszültségletöréseket, -növekedéseket volt képes detektálni, és csak azon jelalakokat mentették el, ahol ilyen problémák jelentkeztek. 2006-tól a Miskolci Egyetem Elektrotechnikai- Elektronikai Tanszékének kutató demonstrátoraként részvételemmel egy olyan szoftver fejlesztésébe kezdtünk, ami képes a mérési adatok nagy részének a lementésére és később azok megjelenítésére, illetve elemzésére. A minták mentése a régebbi szabvány [73] szerint történt, ami másodpercenként csak 16 periódus vizsgálatát írta elő. Bár később másodpercenként a teljes 50 periódus lementésére sor került, de az új szabvány szigorú szinkronizálási feltételeinek még nem felelt meg a rendszerünk. Mivel mérés során csak az adatok rögzítése történt, a mért adatok feldolgozása a mérés hosszától függően akár több napot is igénybe vett a mérés leszerelése után, ami így jelentősen meghosszabbította a villamos hálózat kiértékelését. Végül diplomamunkám keretében készült el a feldolgozó és kiértékelő program, amely a 3.11. ábrán látható.



3.11. ábra: Korábbi hálózatanalizáló program.

3.4.4.A mérőrendszer hardver- és szoftverrendszerének továbbfejlesztése

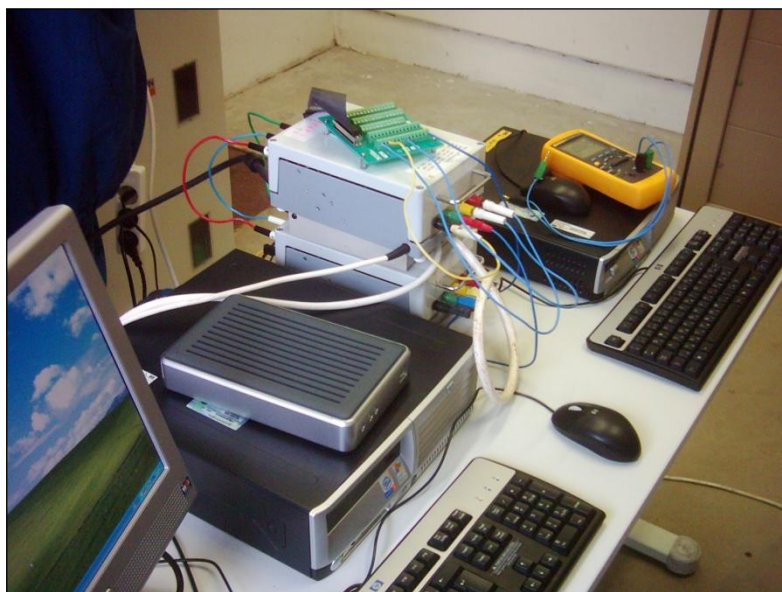
2008-ban a mérőrendszer hardver- és szoftverrészének továbbfejlesztését tűztük célul magunk elé. Az én feladatomban volt a mérőrendszer szoftverének továbbfejlesztése, ami már megfelel a jelenlegi szabványok szigorú előírásainak, illetve megoldja az on-line feldolgozást. A rendszer hardverének továbbfejlesztését és megépítését a Miskolci Egyetem Elektrotechnikai- Elektronikai Tanszékén dolgozó kollégáim végezték, azonban szorosan

együttműködtem velük a fejlesztés során, hogy olyan rendszert építsenek ki, ami képes az általam kifejlesztett új tudományos megoldásokat alkalmazni.

A hardverfejlesztésnél több szempontot kellett figyelembe venni, amelyek közül a legfontosabbak az alábbiak:

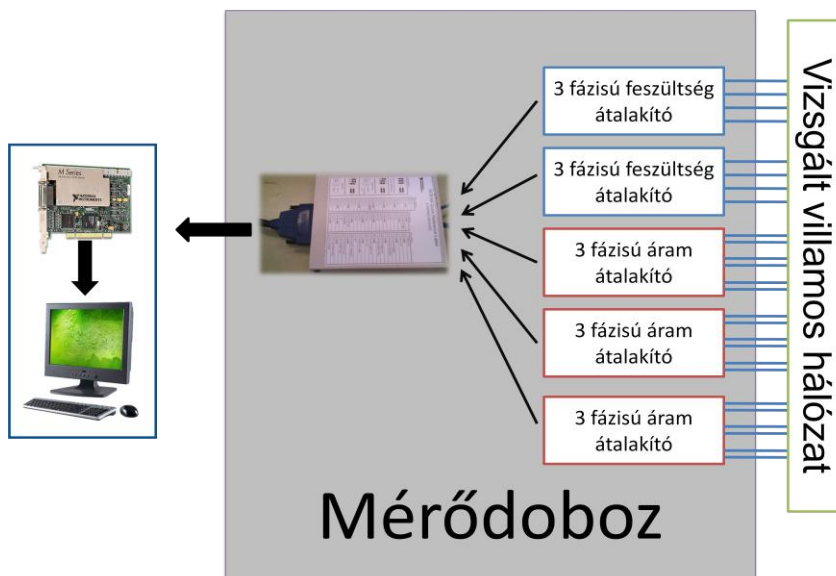
- megfeleljen a műszer a szabványban megfogalmazott mérési követelményeknek,
- biztosítson megfelelő környezetet az általam kifejlesztett új szinkronizáló eljárás és az on-line mérésfeldolgozás használatához,
- legyen alkalmas 4x3 fázisú rendszer mérésére,
- a háromfázisú mérődobozok cserélődjenek le háromfázisú mérőmodulokra,
- könnyedén változtatható legyen a feszültség és áram mérési tartománya, valamint
- megoldható legyen az áramváltós és a lakatfogós árammérés is,
- a mérőrendszer lehető legtöbb része kerüljön egy műszerházba, leegyszerűsítve a mérés telepítését.

A mérések során jelentős problémát okozott a mérőrendszer telepítése, mivel a számos különálló egység összekötése lassította és megnehezítette a rendszer összeállítását (3.12. ábra).



3.12. ábra: Mérődoboz nélkül telepített mérőrendszer

A célunk az volt, hogy sorkapcsot elimináljuk a rendszer kiépítése során úgy, hogy a mérőváltókkal együtt azt egy külön mérődobozba helyezzük (3.13. ábra). A mérődobozt moduláris felépítésűnek terveztük meg, így a mérés megkezdése előtt a mérődobozban lehetőség nyílik a mérő-váltók cseréjére attól függően, hogy hol és milyen mérést szeretnénk elvégezni.



3.13. ábra: Mérődobozba integrált elemek

A 3.14. ábrán látható, a Miskolci Egyetem Elektrotechnikai- Elektronikai Tanszékén kifejlesztett mérődobozok felépítésüket tekintve modulokból állnak, amelyek tetszőlegesen cserélhetőek és egyenként háromfázisú feszültség vagy áram mérésére alkalmasak. Ezek a modulok (3.15. ábra) alakítják át a bennük található Hall-elemes átalakítók segítségével a mérendő jeleket szintén a mérőkártya számára fogadható $\pm 5V$ vagy $\pm 10V$ tartományra. Az alkalmazott lakatfogók tápellátásához külön modult fejlesztettünk ki (ami mindkét mérődobozon jobb oldalra van csatlakoztatva a képen). Kifejlesztettünk 5V-os modulokat, így a lakatfogók alkalmazására is alkalmassá vált a műszer, mivel a lakatfogók általában $\pm 5V$ kimenettel rendelkeznek. A lakatfogók tápellátását a 9V-os tápfiókok biztosítják. A kifejlesztett mérődobozokat egy mérésadatgyűjtő kártyával felszerelt számítógéphez kell csatlakoztatni.



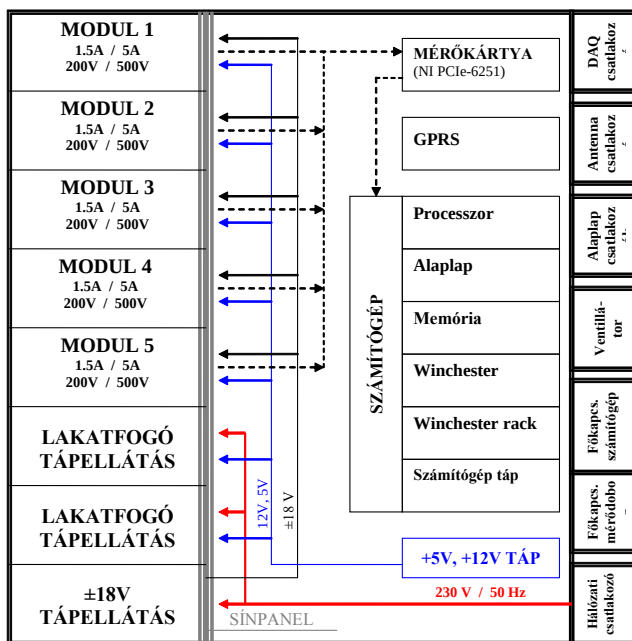
3.14. ábra: Moduláris felépítésű mérődobozok, amelyek külső mérésadatgyűjtő kártyával
rendelkező számítógéphez csatlakoztathatók

Az áram és feszültségmérő modulok (3.15. ábra) egy beépített eprommal rendelkeznek, ami tárolja a modul paramétereit. Ezen paramétereket a mérésadatgyűjtő kártya képes kiolvasni a digitális portjai segítségével.



3.15. ábra: Hall-elemes 200V-os feszültségmérő modul

A további hardverfejlesztések érdekében a számítógépet és a mérésadatgyűjtő kártyát is az átalakítók mellé a mérődobozba akartuk helyezni, minimálisra csökkentve így a telepítés idejét. Ez alapján mondhatom azt, hogy a Miskolci Egyetem Elektrotechnikai- Elektronikai Tanszékén elkészítettünk egy komplex mérőberendezést [77, 78], amelynek blokkvázlatát a 3.16. ábrán láthatjuk.



3.16. ábra Mérőberendezés blokkvázlata [78]

A mérődobozba – annak mérete miatt – egy mikro típusú alaplappal megvalósított számítógépet terveztünk, amihez csatlakoztatva van a mérésadatgyűjtő kártya (3.17. ábra).



3.17.ábra: A mérőberendezésbe épített AIMB-258 típusú mikro alaplapp (bal oldali kép) és NI PCIe 6251 típusú mérésadatgyűjtő kártya (jobb oldali kép)

A számítógép processzorának egy korszerű, kétmagos Intel Core 2 Duo mobile T9300 processzort választottunk, amelynek korábbi mérési tapasztalataink alapján alkalmasnak kellett lennie arra, hogy magas mintavételezési frekvencia mellett valós időben számítsa ki a hálózat minőségét és a felvett energia felhasználásának hatékonyságát leíró paramétereket. Az NI PCIE-6251 multifunkcionális mérésadatgyűjtő kártya 16 analóg bemeneti csatornával rendelkezik, így alkalmas arra, hogy 5 háromfázisú modul által mért feszültség- és áramjelet mintavételezzon. A multiplexelt kártya 1 MHz maximális mintavételezési sebességgel rendelkezik, így a 15 csatornát figyelembe véve csatornánként maximum 66,6 kHz mintavételezésre képes. Ez bőven megfelel a szabvány által előírt 18 kHz mintavételezési sebességnek.



3.18. ábra: A kifejlesztett számítógéppel rendelkező komplex hálózatanalizáló berendezés
külső és belső nézete

A mérőberendezésbe még elhelyezésre került egy GPRS adatkommunikációs modul [79], amellyel távolról leellenőrizhető, hogy a mérés a kívánalmaknak megfelelően zajlik-e. A berendezés a mérés állapotáról legtöbbször SMS-üzenet keretében informál minket a mérés állapotáról, de képes mérési adatokat FTP szerverre is feltölteni.

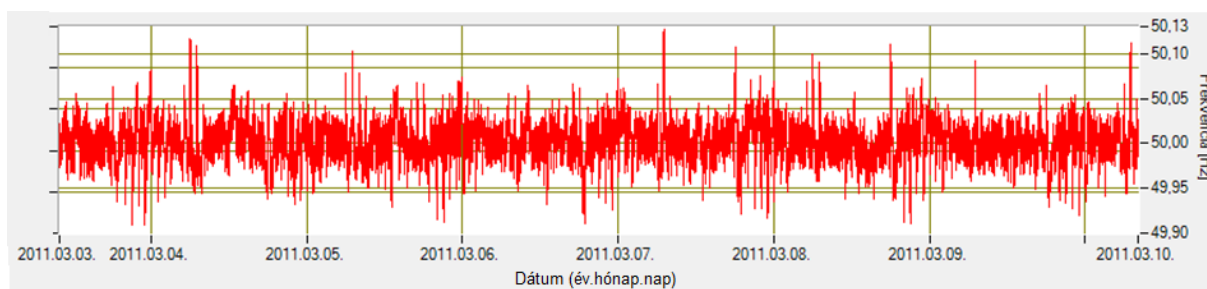
3.5. Összegzés

A jelen fejezetben bemutattam, milyen mérési módszerekkel lehetséges meghatározni a villamos hálózat egyes paramétereit, illetve egy számítógépes mérőrendszer segítségével hogyan állítható össze, és milyen részekből áll egy a villamos hálózat mérésére, analízására alkalmas berendezés. A Miskolci Egyetem Elektrotechnikai- Elektronikai Tanszékén is kifejlesztésre került egy komplex hálózatanalizáló berendezés, aminek hardverfelépítése szintén bemutatásra került. A rendszerhez tartozó szoftverkörnyezet megvalósítása volt a feladatom, amit úgy kellett megvalósítanom, hogy az itt bemutatott fejlett hardveregységgel együtt olyan komplex hálózatanalizátort alkosson, amivel messzemenőleg ki lehet elégíteni a szabványok előírásait. További cél volt, hogy a teljes berendezés lényegesen szélesebb körben legyen alkalmazható, mint a kereskedelemben kapható komplex hálózatanalizáló berendezések.

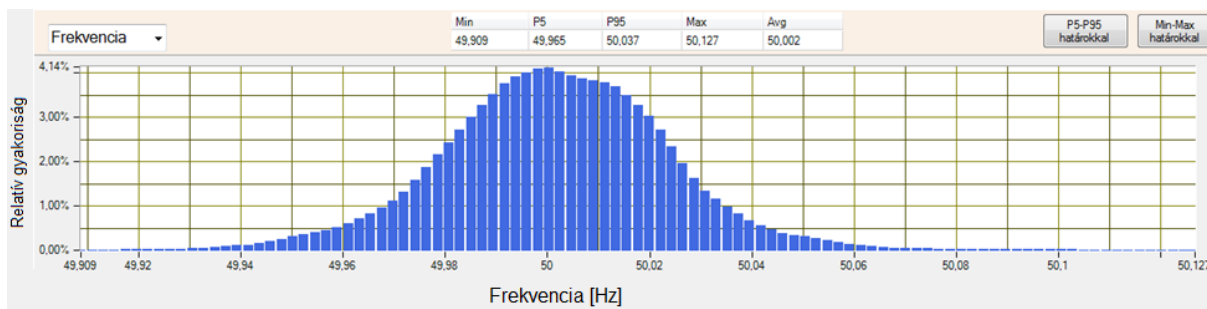
4. Szinkronizálás

4.1. Bevezető

Mind a pontos, mind a szabvány szerinti villamos hálózati vizsgálat megköveteli, hogy az egyes, a villamos hálózat minőségét leíró paraméterek, így elsősorban az effektív érték (RMS), vagy a teljes harmonikus torzítás (THD), minden egész 10 hálózati periódusra legyenek meghatározva. A hálózati frekvencia ingadozása (4.1. és 4.2. ábra) miatt azonban a 10 periódusok időtartama változik.



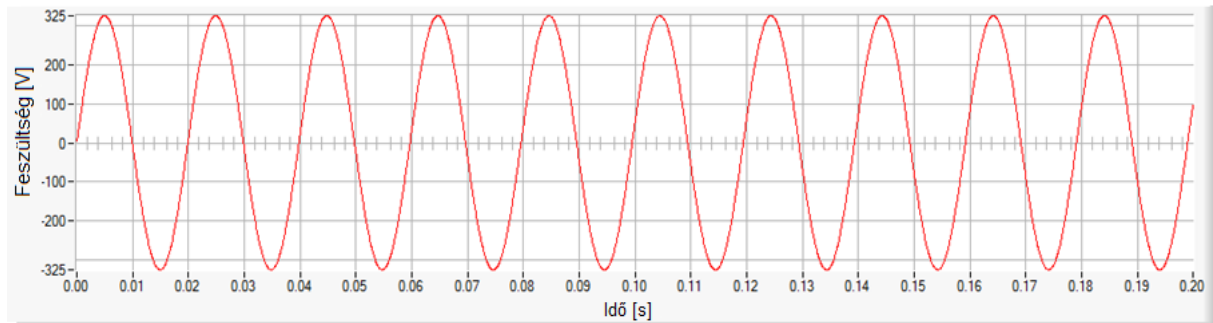
4.1. Ábra: Hálózati frekvencia ingadozása



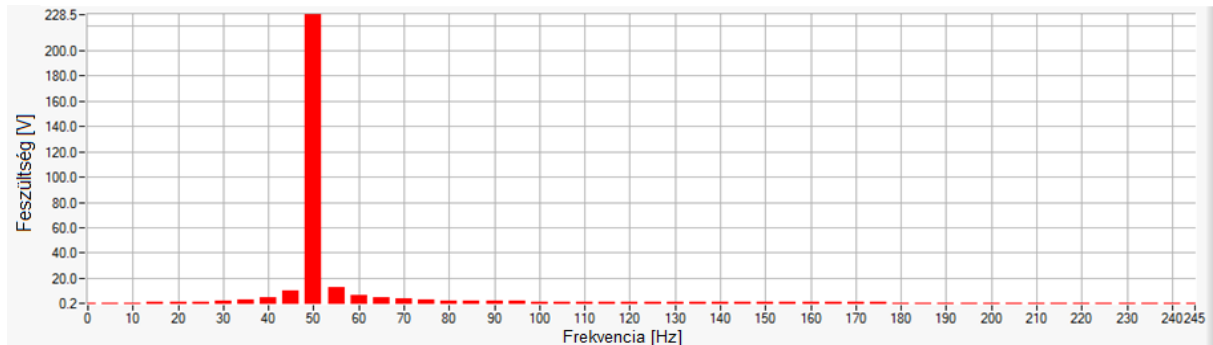
4.2. Ábra: Hálózati frekvencia ingadozásának statisztikája

Amint azt már a 2. számú, a villamos energia címet viselő fejezetnél kifejtettem, a frekvenciaingadozás kiváltója az, hogy a villamos energiafogyasztás folyamatosan változik, így a villamos energia szolgáltatása során ez egy normális jelenség. Mondhatjuk azt, hogy ez természetes „lélegzése” a villamos rendszernek.

Annak érdekében, hogy az amplitúdó-frekvencia spektrumon sátras spektrumkép ne alakuljon ki, különböző módszerek alkalmazásával kell biztosítani azt, hogy a mintavételezés során mindig 10 periódust analizáljon a műszer. Amennyiben a vizsgált regisztrátum nem egész számú hálózati periódust tartalmaz (4.3. ábra), azaz a vizsgált szinuszos hullám kezdő és vég fázisa nem egyezik meg, akkor az amplitúdó-frekvencia spektrumon az 50 Hz-es összetevő mellett nem kívánt összetevők is megjelennek, amelyek a keresett harmonikus mellett jelennek meg, ún. sátras spektrumkép formájában. (4.4. ábra).



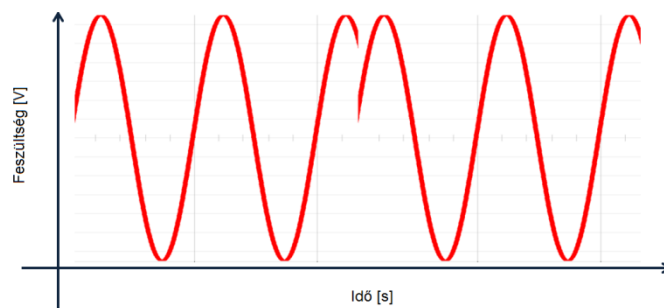
4.3. ábra: A vizsgált regisztrátum nem egész számú periódust tartalmaz



4.4. ábra: A 4.3. ábrán látható regisztrátumhoz tartozó amplitúdó - frekvencia spektrum

Az amplitúdó-frekvencia spektrumra a Fourier transzformáció segítségével térünk át a jel amplitúdó-idő formájáról.

A Fourier transzformáció az analizálandó jelet periodikusnak tekinti, amelynek periódus ideje maga a regisztrátum. Ha a jel periodikus, de a jel nem ugyanabban a fázisban kezdődik, mint amelyikben végződik, akkor ez a Fourier transzformáció számára nem periodikusnak látszik. Ha a vizsgált regisztrátumot többször egymás mögé helyezzük, az azt eredményezi, hogy a jel folytonossága megszakad (4.5. ábra), ami egyben a sátras spektrum magyarázata is.



4.5. ábra: Analizált regisztrátumot egymás után helyezve megszűnik a jel folytonossága

A villamos energia mérése során a vizsgált regisztrátum ideje (T_{reg}) kiszámítható, ha a 10 periódusra vett minták számát (N_{10p}) elosztjuk a mintavételezési frekvenciával (f_{mv}):

$$T_{reg} = \frac{N_{10p}}{f_{mv}} \quad (4.1.)$$

A regisztrátum idejének meg kell egyeznie 10 hálózati periódus idejével, ahol f_h a hálózati frekvencia:

$$T_{reg} = \frac{10}{f_h} \quad (4.2.)$$

A két egyenletből kifejezhető a hálózati frekvencia:

$$f_h = \frac{10 f_{mv}}{N_{10p}} \quad (4.3.)$$

Az új egyenletből az állapítható meg, hogy ha a hálózati frekvencia változik, akkor vagy a mintavételezési frekvenciának vagy a minták számának is változnia kell, annak érdekében, hogy a regisztrátum pontosan 10 periódust tartalmazzon. A sátras spektrum elkerülésének tehát két fő módja van:

- mintavételezési frekvencia változtatása,
- mintaszám változtatása.

Az itt felsorolt két paraméter bármelyikének változtatását annak érdekében, hogy biztosítsuk az egész számú periódust tartalmazó regisztrátumot, a továbbiakban *szinkronizálásnak* nevezzük. A sátras spektrumkép elkerülése miatt tehát a mérést szinkronizálni kell a hálózati frekvenciához, különben az egyes villamos hálózati paraméterek meghatározása pontatlan lesz.

A sátras spektrum csökkentése érdekében gyakran úgynevezett ablakozást használnak. Az ablakozás során a mintavételezett jel összeszorzása történik egy ablakozó függvénnyel (4.6. ábra) még a jel amplitúdó-frekvencia spektrumra való átalakítása előtt. A legelterjedtebb ablakozó függvények a következők:

- Hanning

$$w(i) = 0,5 - 0,5 \cos\left(2\pi \cdot \frac{i}{n}\right) \quad (4.4.)$$

- Hamming

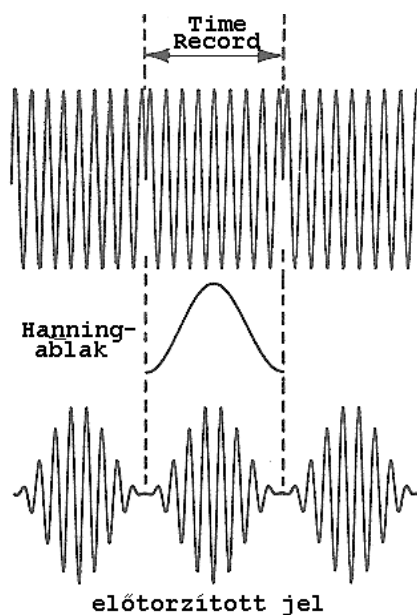
$$w(i) = 0,42 - 0,5 \cos\left(2\pi \cdot \frac{i}{n}\right) + 0,08 \cos\left(4\pi \cdot \frac{i}{n}\right) \quad (4.5.)$$

- Blackmann

$$w(i) = 0,54 - 0,46 \cos\left(2\pi \cdot \frac{i}{n}\right) \quad (4.6.)$$

- Háromszög

$$w(i) = 1 - (2 \cdot i) / n \quad (4.7.)$$



4.6. ábra: Hanning ablakozással súlyozott jel [75]

Az ablakozó függvény egy súlyfüggvénynek tekinthető, ami a vizsgált regisztrátum szélei felé jobban gyengíti a jelet, eltorzítja a széleket, így eléri, hogy a jel nem szenved „törést”, folytonos marad, mivel mindig nulla amplitúdóval kezdődik és fejeződik be a regisztrátum. Az ablakozás segít a sátras spektrum esetén abban, hogy a jel frekvenciája könnyebben meghatározható legyen a spektrumból, de egyben lecsökkenti a jel amplitúdóját is. Jól látszik, hogy az ablakozás nem egy alternatíva arra az esetre, ha a szinkronizálást elmulasztanánk. Bár a szabvány [71] azt mondja, hogy „Hanning-súlyozás csak akkor engedhető meg, ha a szinkronizálás megszűnik”, de kiköti, hogy „az így gyűjtött adatokat meg kell jelölni, amelyeket a megfelelőség megállapításához nem, de más célra fel lehet használni”. Következtetésként az ablakozást, ha lehetséges, érdemes elkerülni.

4.2. Frekvencia ingadozás oka

Ma még a villamos energiát nagy mennyiségben lehetetlen tárolni, és valószínű, hogy ez a probléma a közeljövőben sem fog megoldódni. Az egyetlen megoldás az, hogy egyensúlyt teremtünk a termelés és a fogyasztás között. A szivattyús energiatárolás vízi erőművek valamiféle lehetőséget nyújtanak arra, hogy a villamos energiát nagyobb mennyiségben tároljuk [85], de ez is csak arra elég, hogy az egyensúly fenntartását segítse.

A villamos energiát nagyrészt szinkrongenerátorok állítják elő, amelyek a forgásból adódó kinetikai energiát (E_{rot}) vezetik rá a villamos hálózatra [82].

$$E_{rot} = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (4.8)$$

, ahol J a forgógép tehetetlenségi nyomatéka és ω a forgógép tengelyének szögsebessége.

Ha a fogyasztó által igényelt teljesítmény (P_c) több, mint a generátor által szolgáltatott teljesítmény (P_g), akkor a fogyasztó számára szükséges maradék teljesítményt a generátor

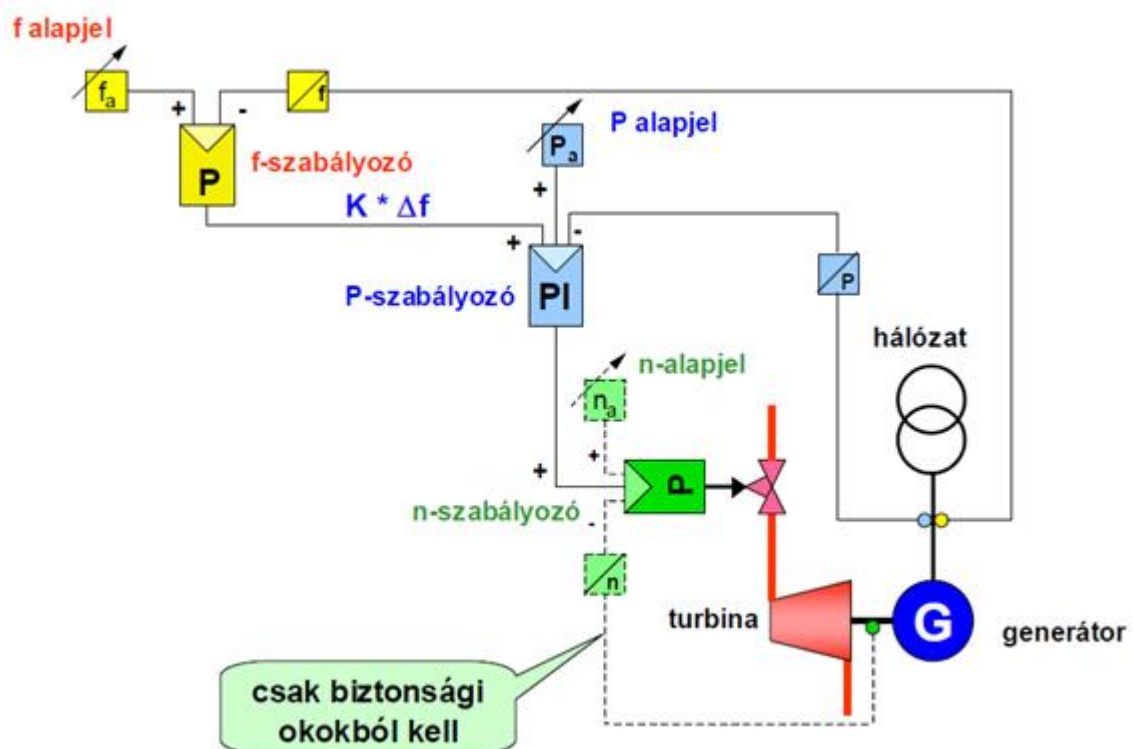
forgási energiája fogja szolgáltatni, azaz a forgási sebességnek csökkenni kell, ami a hálózati frekvencia csökkenését fogja eredményezni.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{P_g - P_c}{J\omega} \quad (4.9)$$

Abban az esetben, ha a fogyasztó által igényelt teljesítmény (P_c) megváltozik, és eltér a generátor által szolgáltatott teljesítménytől (P_g), akkor ennek hatására a generátor forgási szögsebessége és vele a hálózati frekvencia is növekedni vagy csökkenni fog.

Annak érdekében, hogy fenntartható legyen az előállított és a fogyasztott energia közötti egyensúly, szabályzási mechanizmust szükséges alkalmazni, ahol legfőbb cél a hálózati frekvencia normál értéken történő tartása. Ha a terhelés nő, a frekvencia csökkenését az előállított energia növelésével lehet megakadályozni. Az aktuális frekvenciaérték mindig összehasonlításra kerül a normál frekvenciával. Ha a hálózati frekvencia növekszik, akkor azt jelenti, hogy többlet energiatermelés van, és a hajtógép (vagy turbina) mechanikai terhelését csökkenteni kell annak érdekében, hogy az kevesebb energiát állítson elő.

A 4.7. ábra egy teljesítményalapú frekvenciaszabályzást mutat, ahol az f_a jelenti a hálózat normál frekvenciaértékét, az f az aktuális frekvenciát, a P a generátor által szolgáltatott teljesítményt. A K a frekvenciatényező, ami megmutatja, hogy az adott generátornál egységnyi frekvenciaváltozás mekkora teljesítményváltozást követel meg. A teljesítményváltozás alapján kiszámítható, hogy a turbínák teljesítményén milyen mértékben kell változtatni a kívánt teljesítménymódosítás érdekében.



4.7. ábra: Frekvenciairányítású teljesítményszabályzás [82]

Természetesen a villamos energiahálózatra több generátor csatlakozik, amelyeket szinkronzónákba szerveznek. Egy szinkronzónába tartozó generátoroknál a frekvencia

azonos. A frekvencia normál értéken tartását, azaz a villamos energia előállítása és fogyasztása közötti egyensúlyt, egy bonyolultabb, hierarchikus szabályozási módszerrel biztosítják, mint ami a 4.7. ábrán be lett mutatva.

4.3. Mintavételezési frekvenciával történő szinkronizálás

A szinkronizálást gyakran egy PLL (Phase Lock Loop) áramkör beépítésével oldják meg [46, 47], ami a kimenetén egy olyan órajelet állít elő, aminek frekvenciája egész számú többszöröse a hálózati frekvenciának. A mintavételezés sebességét a PLL kimeneti órajele határozza meg, ami így biztosítja azt, hogy a 10 periódusokból mindig egy meghatározott számú mintavétel legyen annak a rovására, hogy a minták között eltelt idő nem azonos, azaz a mintavételezési frekvencia változik.

A PLL áramkörök feladata általában egy feszültségvezérelt oszcillátor frekvenciájának szinkronizálása egy megfelelően stabil referencia-frekvencia segítségével, valamint a frekvencia többszörözése. A PLL áramkörök általános felépítését az alábbi ábra szemlélteti (4.8. ábra)[83].



4.8 ábra: PLL áramkör felépítése [83]

Az áramkör fő eleme a fázisdetektor, amelynek egyik bemenete a referencia-oszcillátor jelét fogadja, másik bemenetére pedig a kimeneti feszültségvezérelt oszcillátor (VCO) kimeneti jele csatlakozik. A fázisdetektor kimeneti jele egy úgynevezett hibajel, mely a két bemenő jel fáziskülönbségével lesz arányos. Ezt a jelet egy aluláteresztő szűrő, a hurokszűrő fogadja, amely a VCO vezérlésére szolgáló feszültségelet állítja elő. A fentiekből is látszik, hogy a rendszer egy erős negatív visszacsatolást valósít meg, és úgy vezérli a VCO-t, hogy annak kimeneti jele mindig fázisban legyen a referencia-oszcillátor jelével, ebből kifolyólag a két jel frekvenciája is meg fog egyezni. Amennyiben a visszacsatoló körbe egy frekvenciaosztót iktatunk be, abban az esetben a kimeneti jel frekvenciája egész számú többszöröse lesz a referencia-frekvenciának, aminek segítségével sikerül megoldani a szinkronizálást. Ennek szorzótényezőjét a frekvenciaosztó osztásaránya fogja meghatározni.

A PLL alkalmazása a villamos hálózati mérések során megkívánja, hogy egy másik eszköz, módszer használatával mérjük az időt, mivel a minták között idő nem azonos (ugyanis a mintavételezési sebesség a hálózati frekvencia függvénye). A PLL hátrányai közé sorolható, hogy csak olyan mintavételezési frekvencia alkalmazható, ami egész számú többszöröse a hálózati frekvenciának. Ha például a PLL szorzója 100, akkor a mintavételezési frekvencia 5 kHz körül lesz.

A hálózati feszültség (melyre a PLL áramkör szinkronizál) felharmonikusokat tartalmaz, amelyek effektív értéke folyton változik. A harmonikus-ingadozás torzítja a

feszültség időfüggvényét, ezáltal eltolja a nulla-átmeneteket, ami a PLL által szolgáltatott mintavételi frekvencia ingadozását okozza. Ez a jelenség nagy meredekségű aluláteresztő szűrő beiktatásával kiküszöbölhető (ilyenkor csak az alapharmonikust engedjük a PLL áramkör bemenetére). Szűrő használata esetén a szűrő integráló jellege miatt, a feszültségingadozások (letörések, növekedések) módosíthatják a nulla-átmeneteket, ezáltal szintén mintavételi frekvenciaingadozást okozva.

Valójában a PLL a mintavételezési frekvencia folyamatos változtatásával oldja meg a szinkronizálást. Ha a 4.3. egyenletből kifejezzük a mintavételezési frekvenciát, akkor meghatározható, hogy adott hálózati frekvencia mellett konstans mintaszám esetén, milyen mértékű mintavételezési frekvenciával kell mintavételezni.

$$f_{mv} = \frac{f_h N_{10p}}{10} \quad (4.10.)$$

A szakirodalom az előbbi képletet használja egy PC alapú harmonikus és közbenső harmonikus mérésre alkalmas berendezésben, amiben a hálózat frekvencia meghatározására Chirp-z transzformációt használnak. Ebben a cikkben [46] az előbbi képletet csak azért alkalmazták, hogy eldöntsék vele, hogy szinkronizált vagy nem szinkronizált mintavételezés történt. Nem szinkronizált mintavétel esetén a cikk írói Hanning ablakozást használnak annak érdekében, hogy a sátras hatást csökkentsék. Azonban az ablakozás használata a szabványok szerint csak akkor megengedett, ha az így kiszámított paraméterekből következtetéseket nem vonnak le, valamint ezen paraméterek megjelölésre kerülnek.

Abban az esetben, ha a 4.10-es képletet arra akarnánk használni, hogy a mintavételezési frekvenciát a mérés közben változtassuk a szinkronizálás érdekében, nem lenne könnyű dolgunk. A mintavételezési frekvencia mérés közben való állítására esetlegesen csak a nagyon drága mérésadatgyűjtő kártyák képesek. Nincs lehetőség arra, hogy olcsóbb mintavételező kártyák segítségével a mintavételezési frekvenciát a mérés megszakítása nélkül változtatni lehessen. A mérés megszakítása adatvesztéssel jár, ezért ez a módszer a szinkronizálás megtartására nem alkalmas, csak abban az esetben, ha speciális, drága mintavételező eszközt alkalmaznánk.

4.4. Mintaszámmal történő szinkronizálás

A szinkronizálás megoldásának egy új módszere, ha nem a minták közötti idő változtatásával áll rá a mérőberendezés a 10 periódusra, hanem a minták számának a módosításával. Ha a 4.3. egyenletből most a mintaszámot fejezzük ki, akkor a következő egyenlőséget kapjuk:

$$N_{10p} = \frac{10 f_{mv}}{f_h} \quad (4.11.)$$

Ezen megoldás használatához nem szükséges speciális hardvereszköz (pl. PLL), hanem megvalósítható szoftveroldalról. Mivel a minták száma egész szám lehet, ezért alacsony mintavételezési frekvencia esetén ez a módszer kevésbé pontos, viszont kellően magas mintavételezési frekvencia használatával a számítási hibák csökkenthetők. Az előző egyenlet - mivel a minta csak egész szám lehet - a következőre változik:

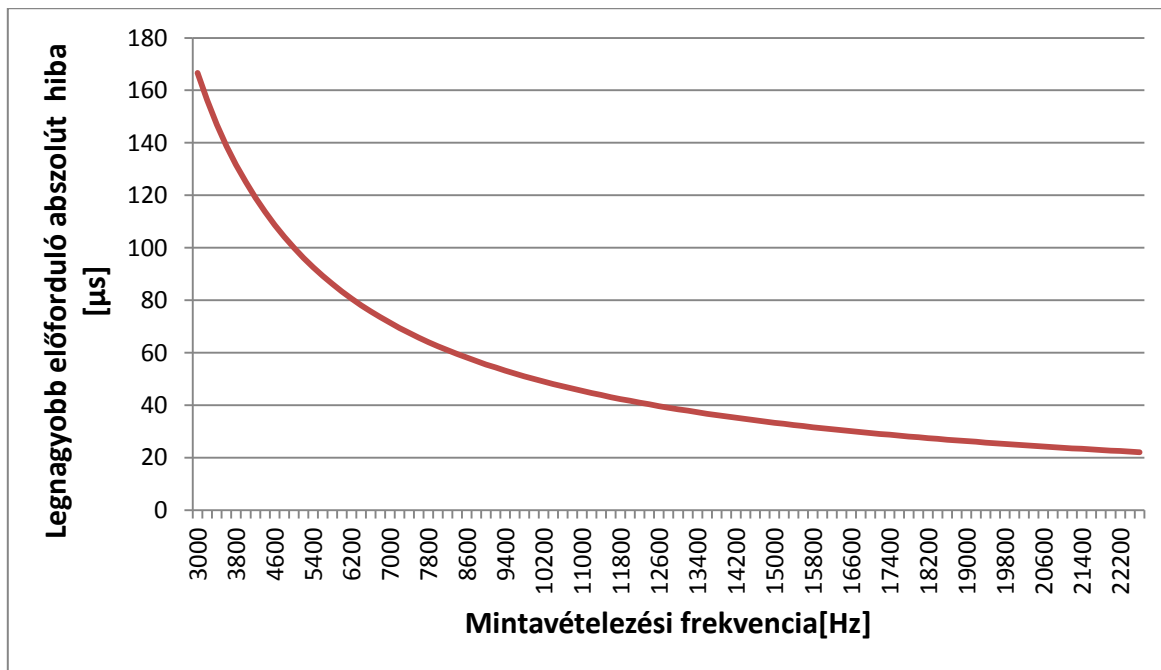
$$N_{10p} = \left\lfloor \frac{10 f_{mv}}{f_h} + 0.5 \right\rfloor \quad (4.12.)$$

Amennyiben tehát ismerjük a hálózati frekvencia (f_h) pontos értékét és a mintavételezési frekvenciát (f_{mv}), akkor pontosan meghatározható az egész, 10 periódus analíziséhez szükséges mintaszám (N_{10p}). Tanulmányoztam a szakirodalomban előforduló szinkronizálási módszereket [46-52], de sehol nem találtam olyat, ami a 4.12-es képlet alapján oldotta volna meg a hálózati frekvencia ingadozása okozta problémát.

A mintavételezési frekvencia növelésével a képletben használt kerekítés egyre kisebb mértékben van hatással a szinkronizálás pontosságára, így azt is mondhatjuk, hogy minél gyakrabban veszünk mintát, annál pontosabban tudunk ráállni az adott 10 periódusra. Ha az IEC 61000-4-30 szabvány által előírt pontosságot biztosítani szeretnénk, akkor a 10 periódustól való eltérés nem lehet több mint a valós 10 periódus idejének $\pm 0,03\%$ -a [71]. Az 50 Hz-es villamos hálózat esetén, a mérési frekvenciatartományba (42,5 – 57,5 Hz) tartozó legrövidebb periódus esetén (17,4 ms) a megengedett eltérés $52,2 \mu s$ (lásd 4.13 képlet). A 4.14 képlettel kiszámolhatjuk, hogy mekkora hibát követhetünk el a kerekítéssel, majd a hozzá tartozó grafikonon (4.9. ábra) leolvasható, hogy legalább 10 kHz mintavételezést kell alkalmazunk a mérések során, hogy a mintaszámmal történő szinkronizálás az előírt pontosságot biztosítsa.

$$H_{T_{reg}} < \pm 0.0003 \frac{10}{42,5 Hz} = 52,2 \mu s \quad (4.13.)$$

$$H_{T_{reg}} = \frac{1}{2 f_{mv}} \quad (4.14.)$$



4.9. ábra: Legnagyobb előforduló eltérés [μs] a 10 periódus idejétől a mintavételezési frekvencia függvényében mintaszámmal történő szinkronizálás esetén

A szabvány [71] 9 kHz-ig írja elő a felharmonikusok vizsgálatát, ami a Shannon-törvény betartása miatt legalább 18 kHz-es mintavételezési frekvenciát követel meg. A fenti okok miatt, már a szabvány által előírt mintavételezési frekvencia is elegendő ahhoz, hogy a mintaszámmal történő szinkronizálást alkalmazni lehessen.

Mintaszámmal történő szinkronizálás esetén a hálózati frekvencia pontos meghatározása fontos tényező. A szabvány szerint a hálózati frekvenciát 10 másodperces időszakaszokból kell meghatározni. Amennyiben a hálózati frekvencia pontatlanul van meghatározva, valamint ha a 10 másodperc alatt a hálózati frekvencia ingadozása jelentős, akkor rossz szinkronizálás történhet, és sátras spektrumkép jelenhet meg. A kérdés az, hogy mekkora hiba fogadható el a frekvencia meghatározásánál, azaz mekkora abszolút vagy relatív hiba engedhető meg a hálózati frekvencia kiszámítása során. A szabvány szerint a legnagyobb megengedett eltérés (H_{Treg}) a valós 10 periódustól $\pm 0.03\%$, amit felhasználva megkapjuk a 4.15-ös és 4.16-os képletet, ahol f_c a számolt hálózati frekvencia. Bár a PLL valós-idejű szinkronizálást végez, a szoftver úton megvalósított mintaszámmal történő szinkronizálás akkor határozza meg a mintaszámot, ha új hálózati frekvencia kerül kiszámítása. Az IEC 61000-4-30-as szabvány [70] szerint 10 másodperces időtartamokból kell meghatározni a hálózati frekvenciát. A kérdés akkor az, hogy változik-e annyit a hálózati frekvencia a 10 másodperc alatt, hogy a korábban meghatározott frekvenciából az adott 10 periódusra hibás N_{10p} értéket számít ki a rendszer, ami pontatlan szinkronizálást eredményez.

$$10 \frac{1}{f_h} 0.0003 \geq 10 \left| \frac{1}{f_h} - \frac{1}{f_c} \right| \quad (4.15.)$$

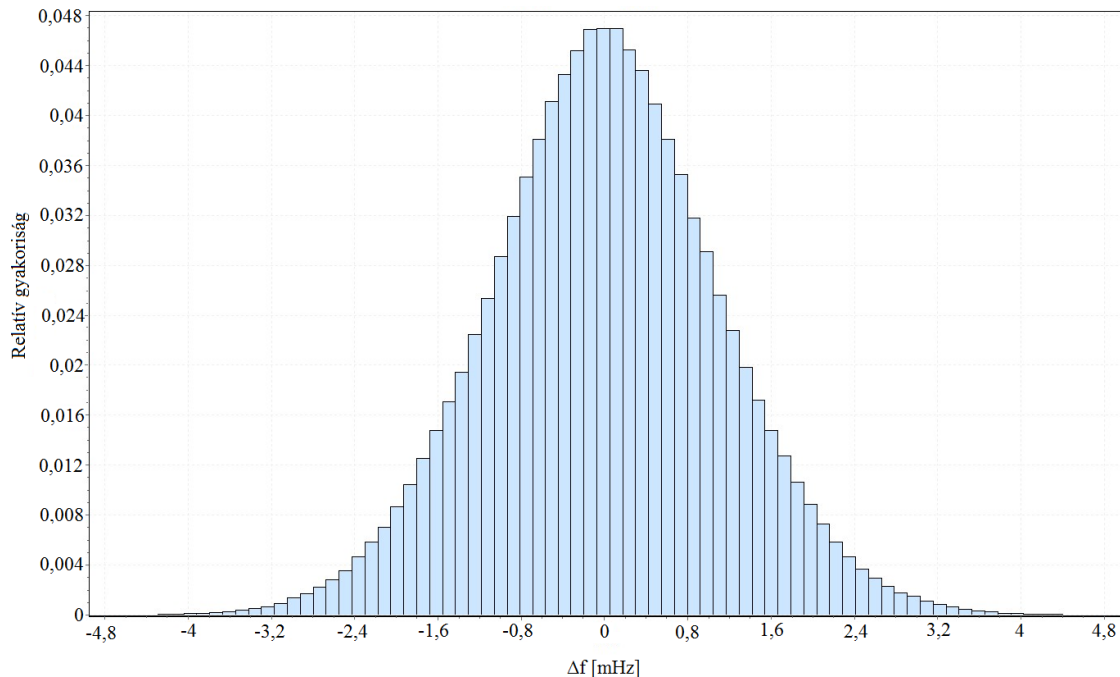
$$1.0003 \geq \frac{f_h}{f_c} \geq 0.9997 \quad (4.16.)$$

$$|f_c - f_h| \leq 12,75 \text{ mHz} \quad \text{ha } f_h = 42,5 \text{ Hz} \quad (4.17.)$$

Ha $f_h = 50 \text{ Hz}$, akkor a legnagyobb megengedett eltérés a 4.16-os képlet szerint 15 mHz lehet. Ha az aktuális hálózati frekvencia alacsonyabb (42,5 Hz), akkor ez az eltérés nem lehet több, mint 12,75 mHz. A vonatkozó cikk [84] szerzője szimulációkkal igazolta, hogy a THD megfelelő pontosságú számításához, mintaszám szinkronizálással történő mérés esetén, a hálózati frekvencia ingadozása egy adott időtartományra nem lehet több, mint 10 mHz. A cikk szerzője és a szabvány szerint is a hálózati frekvenciát olyan időszakokból kell meghatározni, ahol annak ingadozása biztosan kisebb, mint 10 mHz.

Egy új frekvenciaszámoló algoritmussal – amelyet az 5. fejezetben mutatok be – méréseket végeztem és vizsgáltam a hálózati frekvencia ingadozását. Több héten keresztül mértem a hálózati frekvencia ingadozását, ahol 0,5 másodpercenként határoztam meg frekvenciaértékeket. A mérés célja az volt, hogy megvizsgáljam, milyen időtartományokon belül ingadozik a hálózati frekvencia 10 mHz-nél kevesebbet. Vizsgáltam a két egymást követi 0,5 másodperces frekvenciaérték közötti eltérést, ami a 4.10. ábrán látható. Jól megfigyelhető, hogy normál eloszlást követ az ingadozás. Fél másodperc alatt a hálózati frekvencia 5 mHz-nél többet egyáltalán nem ingadozik. Ez teljes mértékben megfelelne a mintaszám-szinkronizálás alkalmazásához, de érdemes megvizsgálni, hogy mekkora az a tartomány, ahol még éppen 10 mHz alatt van az ingadozás, mivel ebben az esetben pontosabb

lesz a frekvencia-meghatározás, és kevésbé fognak bezavarni a hálózaton előforduló amplitúdó-ugrások (lásd 5. fejezet).

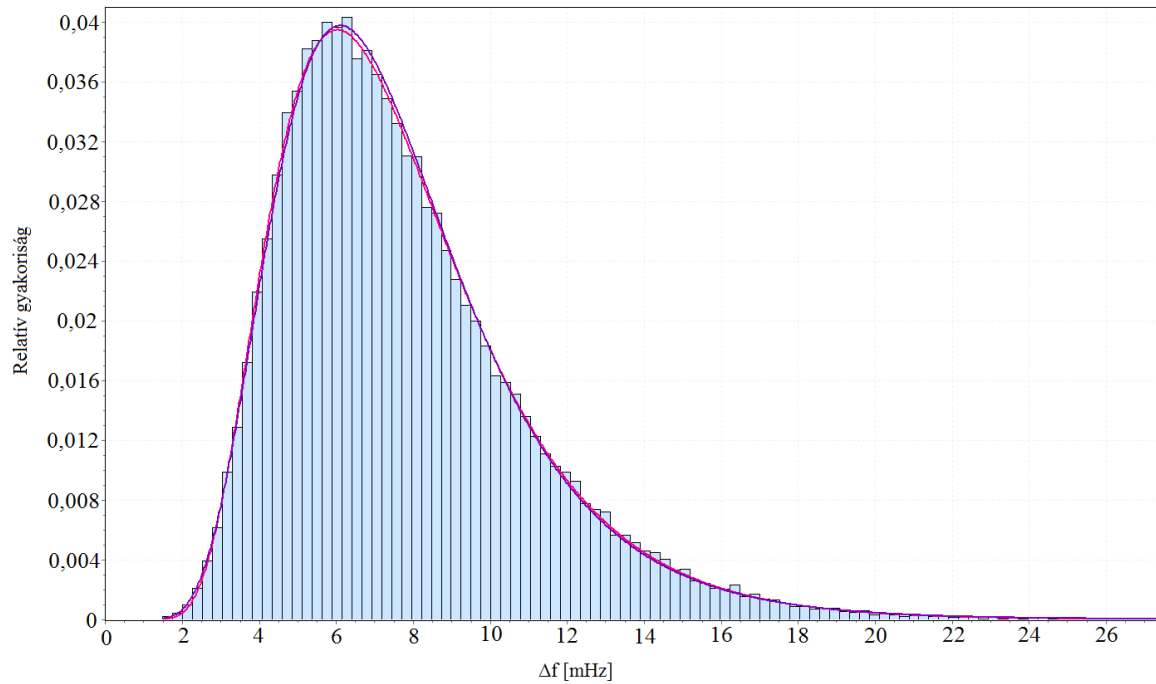


4.10. ábra: Hálózati frekvencia ingadozása 0,5 másodpercenként [mHz]

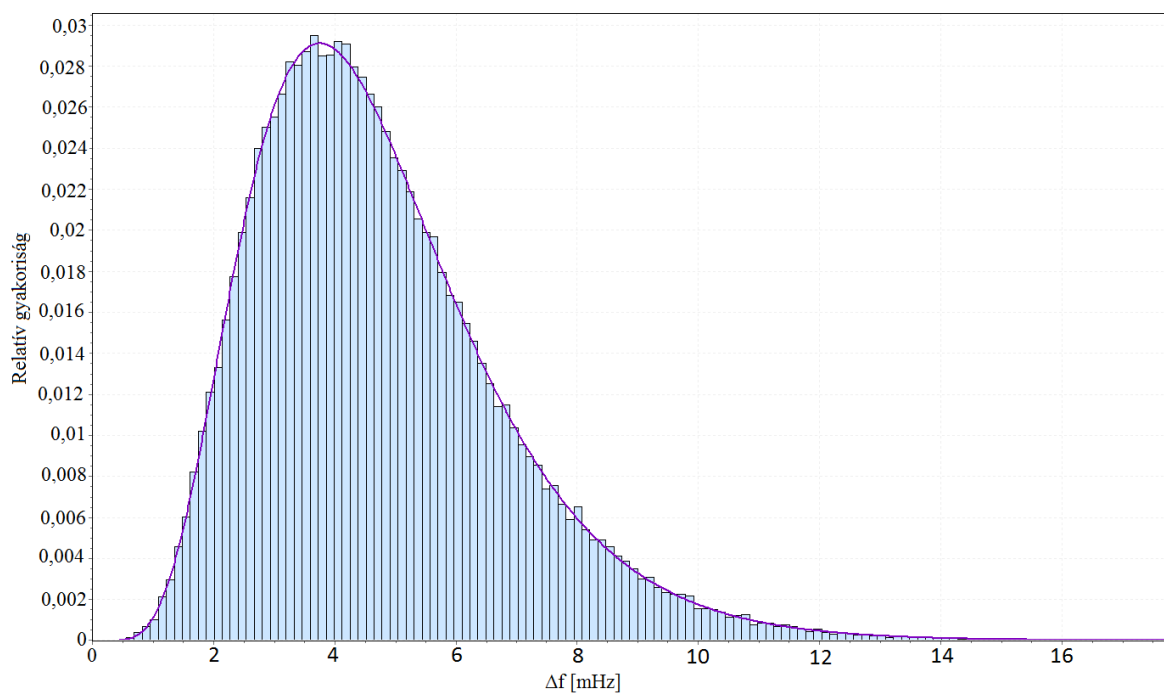
A fél másodperces frekvenciaértékeket felhasználtam arra, hogy vizsgáljam nagyobb időintervallumokra is az ingadozást. Először az egymást követő 4, majd a 10, illetve a 20 frekvenciaértékek közötti legnagyobb eltéréseket elemeztem ki, azaz azt, hogy mekkora a frekvenciaváltozás 2, 5 valamint 10 másodperc alatt.

$$\Delta f_{10s} = f_{\max} - f_{\min} \quad (4.18.)$$

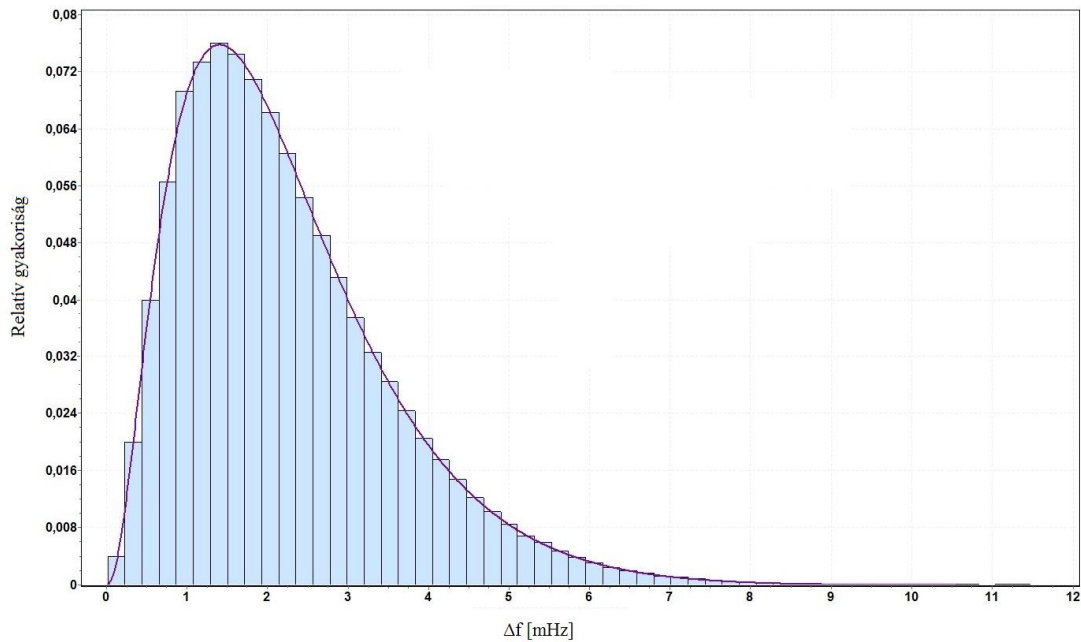
10 másodperc alatt a frekvenciaingadozás több esetben nagyobb volt, mint 10 mHz, amiből kiderül, hogy a szabvány által előírt 10 másodpercre való frekvencia-meghatározás nem megfelelő mintaszám-szinkronizálás alkalmazásához (4.11. ábra). 5 másodperc esetén már sokkal jobb a helyzet, az esetek kb. 2%-ában nagyobb az ingadozás 10 mHz-től, de ez sem elegendő a módszer alkalmazásához (4.12. ábra). 2 másodperc esetén a változások mértéke csak 0,007%-ban nagyobb 10 mHz-nél (4.13. ábra), ami azt jelenti, hogy elvértve lesz olyan eset, amikor a nem megfelelő szinkronizálás miatt az egyes paraméterek számítási pontossága nem fog megfelelni a szabvány előírásainak. A 2 másodpercről azonban érdemes 1 másodpercre lecsökkenteni a tartományt, ha nagyobb frekvenciaingadozás tapasztalható, vagy ha 99,993%-nál jobb szinkronizálást szeretnénk elérni. Mivel ebben az esetben sem megyünk a 0,4 másodperces határ alá, ami alatt a frekvenciabecslő eljárásom már pontatlannak bizonyul, ezért az 1 másodpercre való frekvencia-meghatározás optimális a mintaszám-szinkronizálás alkalmazásához.



4.11. ábra: Tíz másodperc alatti a hálózati frekvencia ingadozásának az eloszlása [mHz]



4.12. ábra: Öt másodperc alatti a hálózati frekvencia ingadozásának az eloszlása [mHz]



4.13. ábra: Két másodperc alatt a hálózati frekvencia ingadozásának az eloszlása [mHz]

Vizsgáltam a 4.11., 4.12., és 4.13. ábrán látható eloszlásokra illeszthető eloszlásfüggvényeket. A háromparaméteres lognormal eloszlás több esetben jó illeszkedést mutat, azonban ettől jobban illeszkedik a log-pearson 3-as típusú eloszlás. A továbbiakban érdekes kutatási irányvonalnak tekinthető az időtartomány és az eloszlás paramétereinek közötti összefüggések tanulmányozása.

A frekvenciát tehát a szabványtól gyakrabban, legalább 1-2 másodpercenként kell kiszámítani, hogy az abból kiszámított mintaszámmal pontosan rá tudjunk állni 10 egész periódusra. Mérésekkel igazoltam, hogy 1-2 másodperc alatt a frekvenciaingadozás 99,993% valószínűséggel nem haladja meg a 10 mHz-et (4.12. ábra). 5 másodperc alatt 98%-ban nem haladja meg a frekvenciaingadozás a 10 mHz-et, 10 másodperc esetén pedig ez az érték 80%-ra csökken le, amiből valóban megállapítható, hogy a szabvány által előírt 10 másodperces frekvencia-meghatározás esetén a mintaszám szinkronizálás nem alkalmazható.

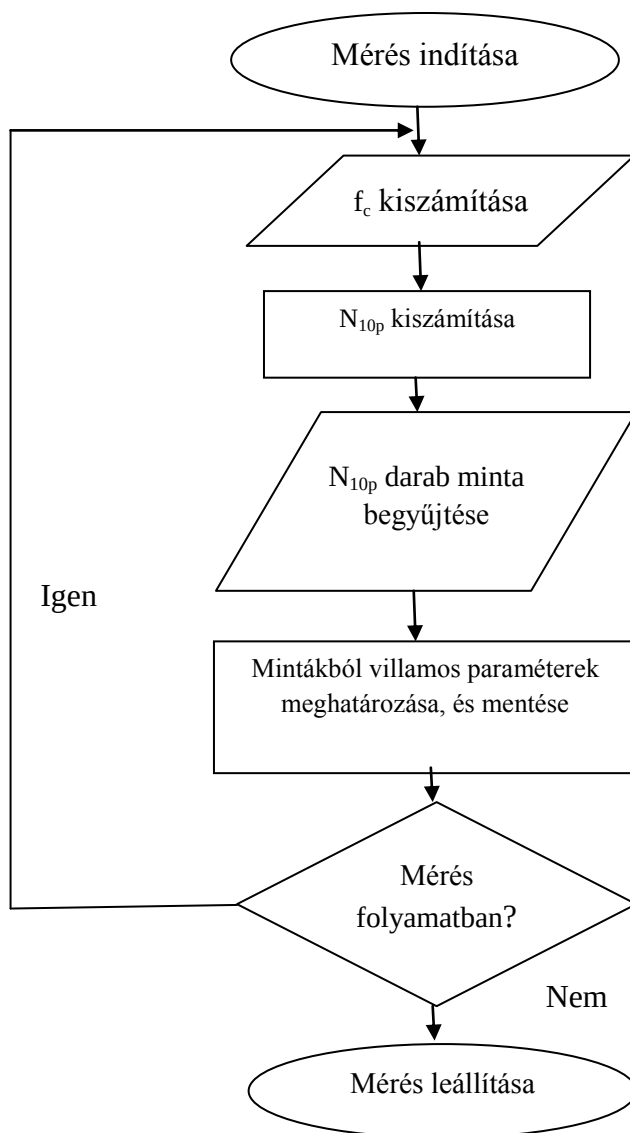
4.5. A mintaszámmal történő szinkronizálás előnye

A mintaszámmal történő szinkronizálás előnye, hogy 10 kHz felett bármilyen értékű mintavételezési frekvenciával történhet a mérés, szemben a PLL-lel, ahol csak a hardveresen beállított mintavételezési frekvenciák alkalmazhatóak. Mivel a PLL a hálózati frekvenciának valamilyen egész számú többszörösét állítja elő, ezért a mintavételezési frekvencia minden esetben csak előre meghatározott egész számú többszöröse lehet a hálózati frekvenciának, amely viszont jelentős mértékben korlátozza a mérőrendszer flexibilitását. Ezzel szemben a mintaszámmal történő szinkronizálás szoftver úton megvalósítható, egyéb speciális hardvereszköz nélkül. A szoftvermegvalósítás során speciális megoldásokat kellett alkalmazni, hogy a szabvány szerinti kiértékelés megvalósítható legyen (lásd 6.4. fejezet). A szoftveres megvalósítás talán legnagyobb előnyét adja, hogy a minták között eltelt idő állandósága miatt nem szükséges külön órajelet alkalmazni az időméréshez. PLL esetén a változó mintavételezési frekvencia mellett erre nincs lehetőség, ezért az idő mérését egy

másik órajellel kell megvalósítani. Lényeges különbség a PLL alkalmazásához képest, hogy az itt bemutatott módszernél a 10 periódusokra vonatkozó mintaszám nem állandó, hanem a hálózati frekvencia ingadozásával ez is változik, ezért minden egyes 10 periódushoz külön-külön ki kell számolni az N_{10p} értékét.

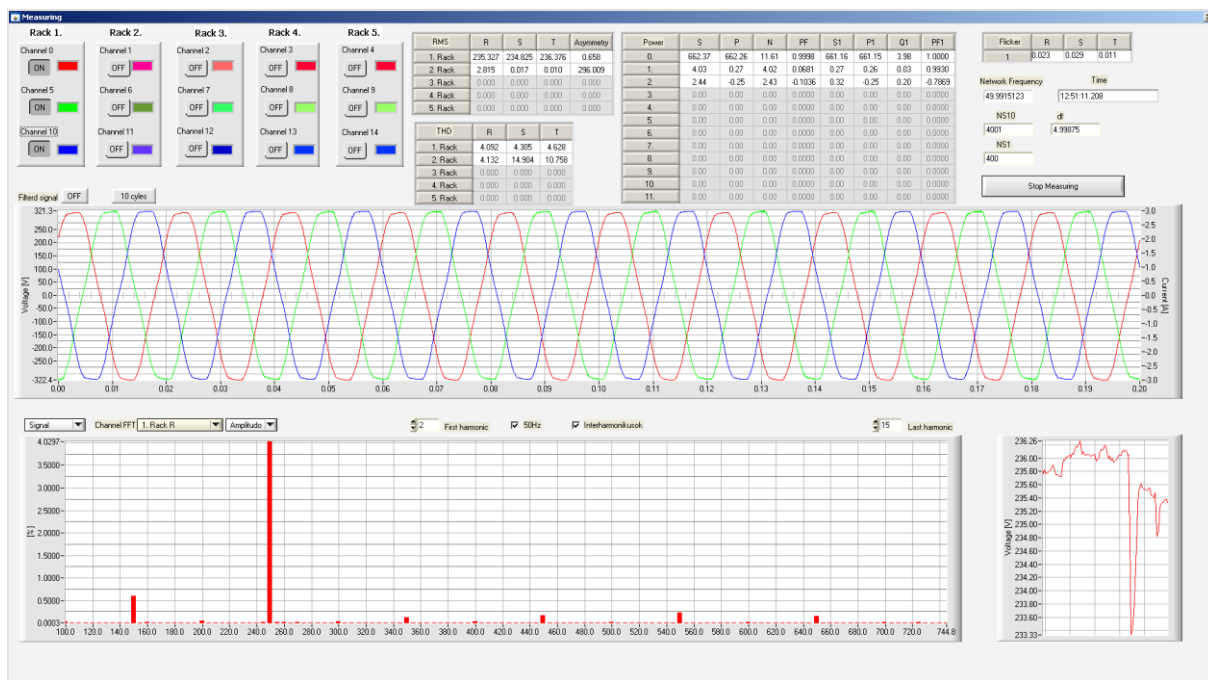
4.6. A módszer megvalósítása

A 4.14. ábrán a mintaszámmal történő szinkronizálás egyszerűsített folyamatábrája látszik. Azért nevezem ezt egyszerűsítettnek, mert a megvalósító rendszerben mind a többszálú működés miatt, mind a szabvány által előírt időszinkronizálási követelmények miatt, és amiatt, hogy a hálózati frekvencia becslése nem 10 periódusonként történik, sokkal bonyolultabb folyamatábrát kell elképzelni. Ezen egyszerűsített ábrából azonban jól látszik, hogy a hálózati frekvencia kiszámítása után, meghatározásra kerül az a mintaszám, ami megmondja, hány mintát kell fogadni és felhasználni annak érdekében, hogy a paraméterek meghatározása mindig egész periódusos időszakaszokra legyen elvégezve.

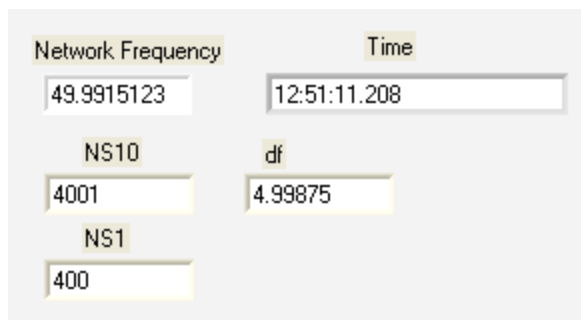


4.14. ábra: Mintaszám szerinti szinkronizálás egyszerűsített folyamatábrája

A 4.15. ábrán a mintaszámmal szinkronizáló rendszer működésének, mérésének a folyamatát láthatjuk. A képen a szabvány által előírt 10 periódusos paraméter-meghatározás figyelhető meg, mivel 10 periódus látható a villamos hálózat három fázisának feszültség-jelalakjából. Az alsó grafikokon az egyik fázisfeszültség amplitúdó-frekvencia spektruma látható, ami nem tartalmaz sátrakat. A szinkronizálás tehát tökéletesen működik, amihez tartozó aktuális értékek a 4.16. ábrán láthatóak. Megfigyelhető, hogy az aktuális hálózati frekvencia 49,9915 Hz, ami miatt a rendszer 4001 mintát vesz annak érdekében, hogy „ráálljon” a 10 periódusra. A df itt az alapharmonikust jelenti, ami a hálózati frekvencia csökkenési miatt nem 5 Hz, hanem 4,99875 Hz.



4.15. ábra Mintaszámmal szinkronizáló rendszer működés közben



4.16. ábra: A mintaszámmal történő szinkronizáláshoz köthető paraméterek a mérés aktuális pillanatában

A megvalósított rendszer jól reprezentálja, hogy az elméletben bemutatott új módszer a gyakorlatban is megállja a helyét.

A mintaszámmal történő szinkronizálás megvalósítására régebben azért nem volt lehetőség, mivel nem álltak rendelkezésre olyan hardvereszközök, amelyekkel biztosítani lehetett a csatornánként 10 kHz feletti mintavételezési sebességet. Mondhatjuk azt, hogy a mai gyors mintavételezésre alkalmas eszközök nyújtanak lehetőséget arra, hogy mintaszámmal történő szinkronizálás alkalmazható legyen.

4.7. Új tudományos eredmények

1. Tézis: Kidolgoztam egy új, a villamos hálózatok diagnosztikájánál alkalmazható digitális méréstechnikai eljárást a hálózati frekvencia mintaszámmal történő szinkronizálásának alkalmazására, amely kiegészítő hardver alkalmazása nélkül, kizárólag szoftver úton történő megvalósítással képes biztosítani a vizsgált időintervallum villamos hálózati frekvenciához történő szinkronizálását.

Mérésekkel igazoltam, hogy a mintaszámmal történő szinkronizálás használatához legalább másodpercenként kell új hálózati frekvenciaértéket meghatározni annak érdekében, hogy a villamos hálózatokra jellemző frekvenciaingadozás ne befolyásolja az eljárás pontosságát. Igazoltam, hogy a mintaszámmal történő szinkronizálás alkalmazásához legalább 10 kHz-es mintavételezési frekvenciával kell mintavételezni a vizsgálandó villamos hálózat feszültségjeleit és áramjeleit, illetve azt, hogy a mintavételezési frekvencia növelése, csökkenti a szinkronizálás hibáját. Az új eljárás biztosítja, hogy 10 kHz felett szabadon, megkötés nélkül megválasztható legyen a mintavételi frekvencia értéke, ellentétben az eddig használt módszerekkel, amelyek bizonyos korlátozásokkal alkalmazhatóak.

5. A hálózati frekvencia meghatározása

5.1. Bevezető

A villamos energia minőségének vizsgálata során a hálózati frekvencia meghatározására is szükség van, mivel ez szintén a villamos energia minőségét jellemző paraméter. A hálózati frekvencia a vizsgálatok során kulcsfontosságú, mivel értékétől függ a 10 periódus hossza, ami a többi villamos paraméter kiszámításához az alapintervallum. A kiépített mérőrendszerrel a mintaszámmal történő szinkronizálás biztosítja, hogy mindig 10 periódus legyen analizálva, azonban ehhez szükség van a pontos hálózati frekvenciára az 5.1. egyenlet szerint. Abban az esetben, ha nem a pontos hálózati frekvencia kerül kiszámításra, akkor előfordulhat, hogy a szinkronizálás sem lesz megfelelő és így a többi villamos hálózati paraméterre is hibás becslést kaphatunk, így a pontos hálózati frekvencia meghatározása nagy jelentőséggel bír.

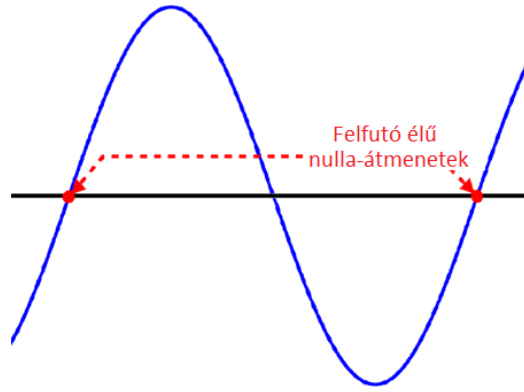
$$N_{10p} = \left\lfloor \frac{10 f_{mv}}{f_h} + 0.5 \right\rfloor \quad (5.1.)$$

A szakirodalom szerint számos módszer létezik a hálózati frekvencia mérésére. Nulla-átmenetek keresésével, fáziszárt-hurok vagy fejlett jelfeldolgozó eljárások használatával határozzák meg sok esetben a hálózati frekvencia értékét [53-60]. Szakirodalomban többen használnak Kalman-szűrőt [56], vagy neurális hálózatokat [59] azért, hogy nagyobb pontossággal legyen meghatározva a frekvencia, mint amire az egyszerűbb, hagyományos módszerek képesek. Ennek ellenére mégis, alapvetően az egyszerűsége miatt, az egyik legelterjedtebb módszer a nulla-átmenetes frekvenciabecslés [58], aminek pontossága természetesen megkérdőjelezhető, mivel a harmonikusok, tranziensek, illetve az amplitúdó-változások jelentősen ronthatják a becslés pontosságát. Bizonyos eljárásokkal, szűrésekkel azonban a nulla-átmenetes módszer pontossága is jelentősen javítható. A szabvány szerint a hálózati alaphfrekvencia-kimenet a 10 másodperces intervallum alatt a teljes periódusok száma osztva a teljes periódusok összes idejével [70].

Olyan eljárást kellett találnom a villamos hálózat frekvenciájának meghatározására, ahol a pontosság 0,2%-os relatív hiba alatt van, mivel ebben az esetben a mintaszámmal történő szinkronizálás a szabvány által előírt pontosságot biztosítani fogja. A célom a nulla-átmenetes frekvenciabecslő eljárás továbbfejlesztése volt annak érdekében, hogy az eljárás képes legyen biztosítani a megfelelő pontosságú frekvenciaértéket harmonikusok és zavarokkal terhelt hálózatok esetén.

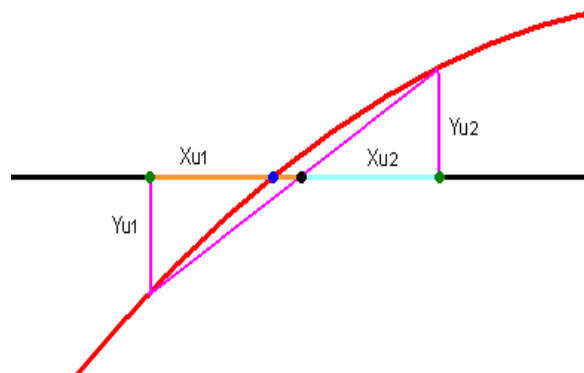
5.2. Nulla-átmenetes frekvenciabecslő eljárás

Egy hálózati periódus mindig két azonos típusú (felfutó élű vagy lefutó élű) nulla-átmenet közötti szakasz. Az 5.1. ábra két felfutó élű nulla-átmenetet jelöl a szinuszejelen.



5.1. ábra: Egy periódus ideje két felfutó élű nulla-átmenet közötti szakaszra

A szabványban definiáltak nulla-átmenetes számítási módszerrel egyszerűen megvalósíthatóak. Meghatározandó az adott intervallumban található azonos típusú (felfutó élű vagy lefutó élű) nulla-átmenetek száma, és az ehhez tartozó idő, amit korrigálni kell a két szélső átmenet pontos nulla-átmenetének meghatározásával (5.2. ábra). Az Y_{u1} és Y_{u2} a nulla-átmenetek melletti mintavételezett feszültségértékek. A két minta közötti távolság pontosan a mintavételezési frekvencia (f_{mv}) reciprokja. Az X_{u1} és X_{u2} azok az időintervallumok, amelyekkel korrigálni lehet a periódusok idejét.



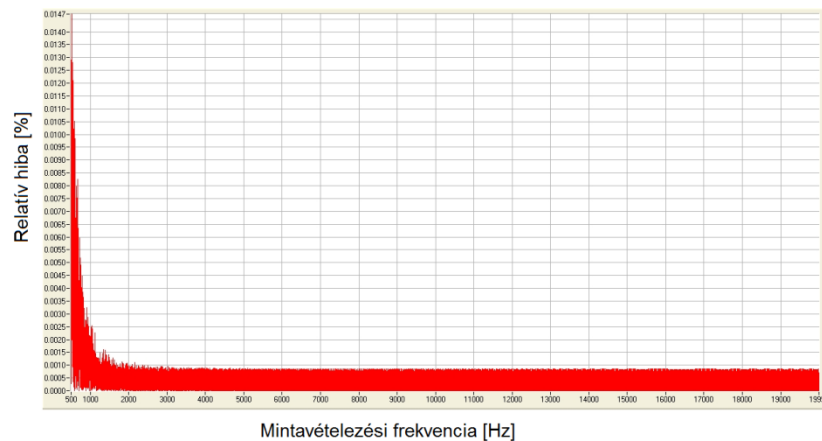
5.2. ábra: Linearizáló eljárás

$$X_{u1} = \frac{\frac{1}{f_{mv}} |Y_{u1}|}{|Y_{u1}| + |Y_{u2}|} \quad (5.2.)$$

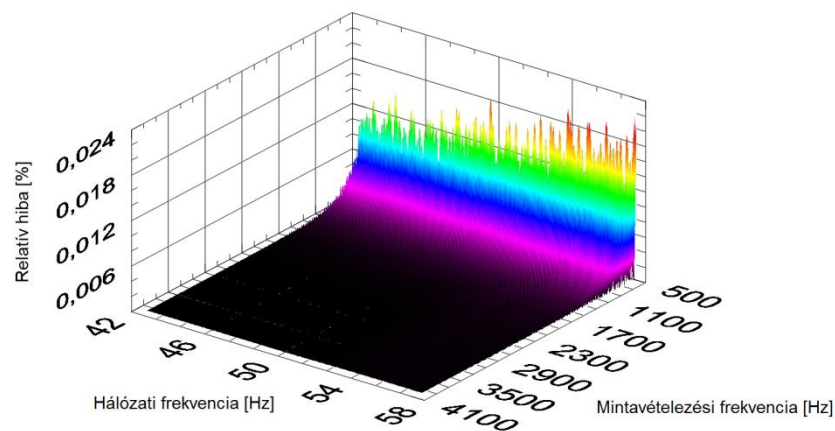
$$X_{u1} + X_{u2} = \frac{1}{f_{mv}} \quad (5.3.)$$

$$f_c = \frac{\text{periódusok száma}}{(\text{első_átmenet_mintája} - \text{utolsó_átmenet_mintája}) \frac{1}{f_{mv}} - X_{u1} + X_{u2}} \quad (5.4.)$$

A mintavételezési frekvencia növelésével természetesen a becslés pontosságának javulnia kell, de az látható az 5.3. és az 5.4. ábrán, hogy egy tökéletes szinusz jel esetén 6000 Hz felett a pontosság már nem sokat javul, és a frekvenciabecslés pontossága 0,001% relatív hiba alatt marad. A szabvány által előírt 18 kHz-es mintavételezési frekvencia így megfelelő pontosságot szolgáltat a nulla-átmenetes frekvenciabecsléshez abban az esetben, ha zavarmentes szinusz jelet vizsgálunk.



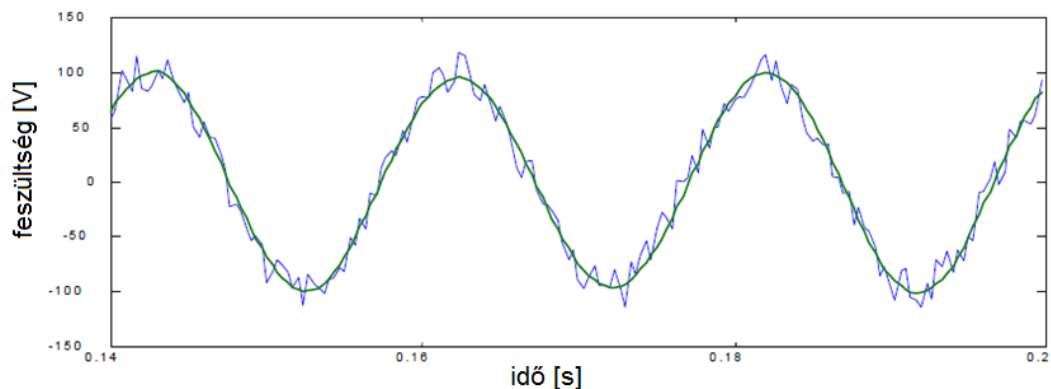
5.3. ábra: Nulla-átmentes frekvenciabecslő eljárás pontossága a mintavételezési frekvencia függvényében zavarmentes szinusz jel estén



5.4. ábra: Nulla-átmentes frekvenciabecslő eljárás pontossága a mintavételezési frekvencia és a hálózati frekvencia függvényében zavarmentes szinusz jel estén

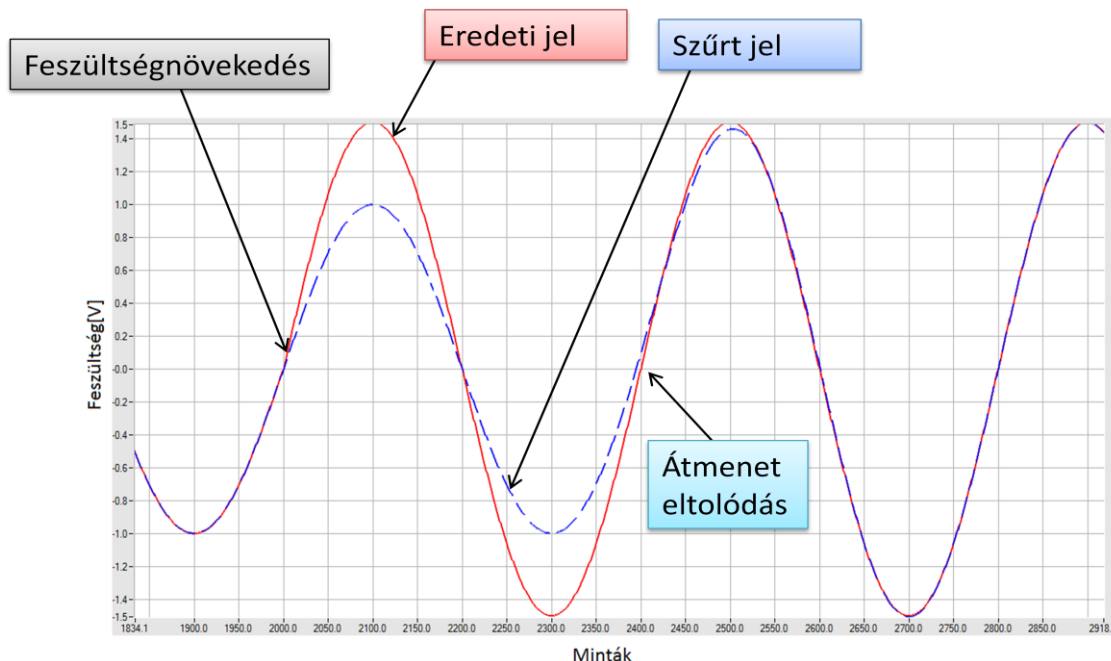
5.3. Hálózati zavarok hatása a frekvenciabecslésre

A feszültség jelalakját a nulla-átmenetek keresése előtt szűrni kell, hogy így minimalizálva legyenek a harmonikusok, közbenső harmonikusok, valamint tranziensek okozta nem-valós nulla-átmenetek hatása (5.5. ábra).



5.5. ábra: Zavarok miatt a nulla-átmenetek helye eltolódhat [58]

A zavarok és a harmonikusok szűrését a feszültségjel mérés után egy digitális szűrővel valósítottam meg, amire a szabvány is javaslatot tesz. A szűrőknek azonban van egy beállási idejük, amelyek a fókuszam növelésével egyre nagyobbak. A beállási időhöz tartozó szűrt minták használhatatlanok a frekvencia-meghatározása során. Bár a mérés megkezdésekor ezt a problémát ki lehet úgy küszöbölni, hogy elvetjük azokat a mintákat, amelyek a beállási szakaszra estek, azonban a feszültségjel esetében a hálózat amplitúdó-változása során előforduló szűrő beállások is okoznak jelentős hibákat a nulla-átmenetek számításánál (5.6. ábra). A szabvány csak azt mondja, hogy eliminálni kell a harmonikusokat, de azt nem mondja, hogy ez milyen problémákat okoz a feszültségugrásoknál és tranzienseknel.

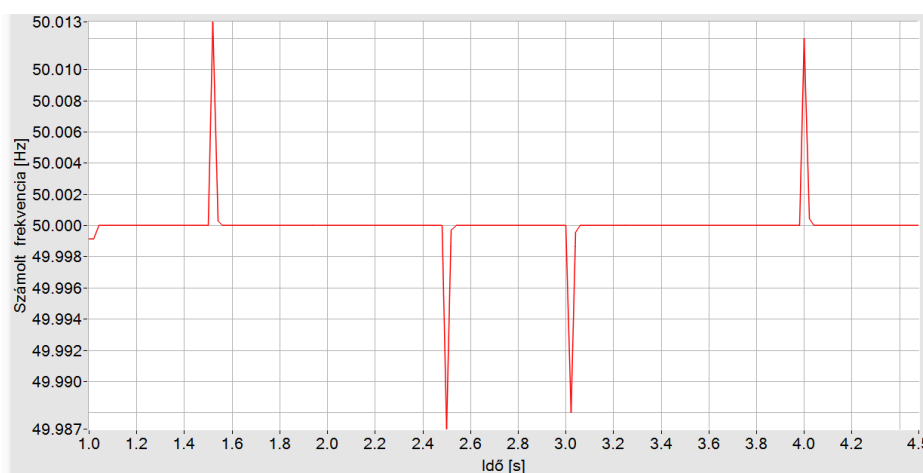


5.6. ábra: Szűrő beállási szakasza okozta nulla-átmenet eltolódás (szaggatott jel a szűrt jel)

Ez a nulla-átmenet eltolódási probléma általában egy-két nulla-átmenetnél okoz számítási hibát a nem túl magas fókuszamú szűrők esetén. Ha tehát a vizsgált tartomány első és utolsó nulla-átmeneténél nem fordul elő az amplitúdó változása miatti szűrőbeállási jelenség, akkor nem okoz számítási hibát a digitális szűrő alkalmazása. Az első és utolsó átmenetnél a pontos időtartam meghatározás miatt szükséges, hogy a szűrés ne tolja el ezeket az átmeneteket. A köztes nulla-átmenetek szűrő miatti elcsúszása a számítás eredményét egyáltalán nem befolyásolja, mivel a tartományon belüli átmeneteknél csak azok száma érdekes, pontos helyük nem.

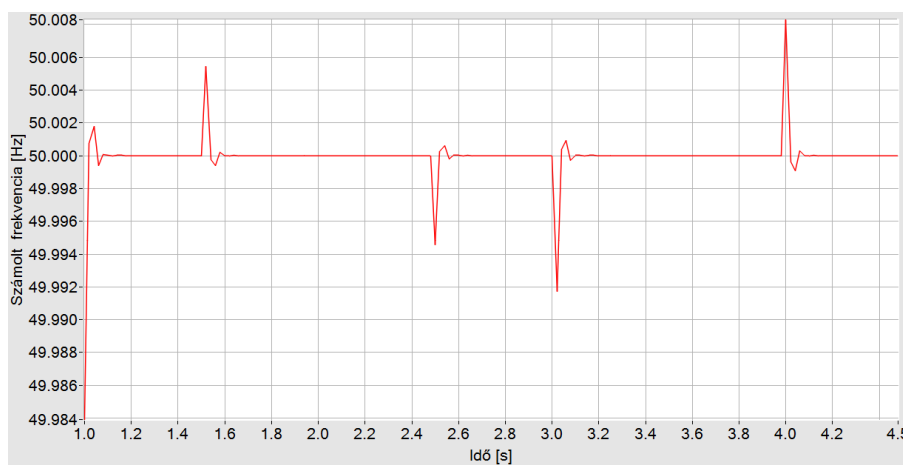
Olyan méréseket végeztem, ahol egy feszültséggenerátor segítségével egy állandó ismert frekvenciájú jelben feszültségugrásokat generáltam. Ennek során azt tapasztaltam, hogy amikor kisebb tartományokra határoztam meg a frekvenciaértéket, gyakrabban fordult elő hibás frekvenciaérték, ami annak a következménye, hogy kisebb tartománynál több nulla-átmenetet kell arra használni, hogy pontosítva legyen a tartomány ideje, így nagyobb valószínűséggel lettek felhasználva azok a nulla-átmenetek, amelyek a szűrő beállási része miatt elcsúsztak a valós átmenettől. Ezeknél a hibás értékeknél kiugróan eltérő, akár 1% relatív hibás frekvenciaértékeket mértem.

Az amplitúdó-ugrások miatti szűrőbeállítások helyének meghatározása túl bonyolult, ezért más módszerrel próbáltam kiküszöbölni a problémát. Abban az esetben, ha több egymás melletti nulla-átmenet van felhasználva a frekvencia meghatározására és van köztük kiugróan eltérő frekvenciaérték, akkor valószínű, hogy azt a szűrő beállási szakaszára eső nulla-átmenet okozza. Abban az esetben, ha minden nulla-átmenet fel van arra használva, hogy a nulla-átmenet pontos helye meg legyen határozva, és az ezekből számolt frekvenciaértékek között van kiugró, akkor azt el kell vetni. Szimulációs programot készítettem, ami segítségével egy 50 Hz-es jelben 50 %-os amplitúdó-növekedéseket, valamint ugyanekkora nagyságú amplitúdó-csökkenéseket generáltam. Különböző típusú digitális szűrés után a jel egy másodperces tartományaira egy periódusos eltolásokkal újra és újra kiszámítottam a frekvenciaértéket. Az egymást követő frekvenciaszámítások során mindig más nulla-átmenet lesz felhasználva a kezdeti és az utolsó nulla-átmenet pontos helyének meghatározására. A szimuláció eredményei az 5.7. ábra és az 5.8. ábra mutatja.



5.7. ábra: Változó amplitúdójú 50 Hz-es jel frekvenciájának meghatározása ötöd fokú Butterworth aluláteresztő szűrés után, ahol a 90 Hz a vágás frekvencia

Jól megfigyelhető az 5.7 és 5.8. ábrákon, hogy abban az esetben, amikor a nulla-átmenet pontos meghatározása a szűrő beállási szakaszára esik, akkor jelentősen eltér a számított frekvencia a valóstól. Az ábrákon megjelenített frekvenciaértékeket a 10. és a 11. számú melléklet tartalmazza.



5.8. ábra: Változó amplitúdójú 50 Hz-es jel frekvenciájának meghatározása harmad fokú Butterworth sáváteresztő szűrés után (20 Hz és 90 Hz közé szűrve)

A szűrők által okozott nulla-átmenet eltolás problémáját a valós mérések során a következőképpen oldottam meg. A szimulációban bemutatottakhoz hasonlóan egy periódusos eltolásokkal újra és újra kiszámítottam a frekvenciaértéket. A periódusokkal való eltolást a kijelölt számítási tartomány nagyságáig végeztem, amikor is például 10 másodperces számítási tartomány esetén 50Hz-es hálózathoz 500 frekvenciaértéket (f_i) kapok. A frekvenciaértékek legnagyobb egyharmad és legkisebb egyharmad részének elhagyásával, nagy valószínűséggel kiesnek azok a frekvenciaértékek, amelyek hibásak a szűrő beállási része miatt. A maradék értékeknek veszem az átlagát, és azt fogadom el a tartományra vonatkozó hálózati frekvenciának (f_c) az 5.5 egyenlet szerint.

$$f_c = \frac{\sum_{i=n/3}^{i=2n/3} f_i}{n/3} \quad (5.5.)$$

Mivel nem jellemző folyamatos periódusonkénti jelentős amplitúdó-változás a villamos hálózaton, ezért ezen számítási módszernek közel valós hálózati frekvenciát kell adnia. Az algoritmus hátránya, hogy az eltolások miatt két egymás melletti frekvenciaérték számításánál ugyanazon szakaszok is fel vannak használva, de cserébe pontosabb frekvenciaértéket kapunk. Az új frekvenciaszámítási algoritmusra is szimuláltam az amplitúdó ugrásokat és azt tapasztaltam, hogy 0,4 másodperc feletti tartományokra meghatározott frekvenciaértékeknel 3-ad fokú Butterworth-szűrőt használva nem fordult elő semmiféle frekvenciaugrás, folyamatosan a beállított értéket tartotta a mérőprogram. Ugyanakkor 0,4 másodperc alatt már megjelentek hibás frekvenciaértékek, mivel ebben az esetben a vizsgálható nulla-átmenetek száma 20 alatti lesz, és ha ezekből 4-5 beleesik a szűrő beállási részébe, akkor a legkisebb és legnagyobb frekvenciaértékek elvétele már nem elég a hibás frekvenciaértékek kiszűréséhez.

5.4. Összegzés

A frekvenciabecslés pontosságát már nem befolyásolják a hálózati feszültség amplitúdó-ugrásai az itt bemutatott nulla-átmenetes frekvencia-meghatározó algoritmust alkalmazva, ha az időtartomány 0,4 másodpercnél nagyobb. Ezzel a számítási módszerrel már pontosan meghatározható a hálózati frekvencia értéke 0,4 másodpercesnél nagyobb tartományokra. A számítás pontosságát természetesen nagymértékben növeli az, ha az időtartományt nagyobbra választjuk. Összegezve tehát, a nulla-átmenetes frekvenciabecslő módszert alkalmassá tettem pontos hálózati frekvencia meghatározására

A kidolgozott új frekvenciaszámító algoritmust egyfelől természetesen a hálózati frekvencia pontos, online módon történő kiszámítására alkalmaztam, valamint annak meghatározására, hogy hálózati frekvencia milyen időszak alatt ingadozik 10 mHz-nél kevesebbet (lásd 4. fejezet)

5.5. Új tudományos eredmények

2. Tézis: Kidolgoztam egy új digitális mérés technikai eljárást, amely nagy pontossággal és megbízhatósággal alkalmas a hálózati frekvencia meghatározására felharmonikus összetevőkkel, tranziensekkel és amplitúdó ugrásokkal terhelt hullámformák esetén.

A kidolgozott eljárás a nulla-átmenetes frekvenciabecslő módszer továbbfejlesztése, ami így a mintaszámmal történő szinkronizálás alkalmazásához pontos hálózati frekvenciaértéket biztosít. A szűrés és az amplitúdó ugrások okozta nulla-átmenet elcsúszások hatásait az eljárás kiküszöböli.

6. Villamos paraméterek on-line feldolgozása többprocesszoros rendszerek alkalmazásával

6.1. Bevezetés

A Miskolci Egyetem Elektrotechnikai- Elektronikai Tanszékén dolgozva számos villamos energetikai mérésben, vizsgálatban vettem részt. Ezek során azt tapasztaltam, hogy jelentős időkölséggel jár az, hogy a mérési adatok feldolgozását a mérés után kell elvégezni, ami több hétig tartó mérés esetén több napot is igénybe vesz. Ennek hatására, olyan új adatfeldolgozási módszert dolgoztam ki, amely segítségével már a mérés közben lehetőség nyílik arra, hogy a kívánt paraméterek kiszámításra kerüljenek, és a mérés után a feldolgozási idő a töredékére csökkenjen.

A villamos energia minőségének és a felhasználásának hatékonyságát leíró paraméterek real-time meghatározása magas mintavételezési frekvencián jelentős műveletigényű feladat. A cél egy olyan rendszer kidolgozása volt, ahol mindenezek ellenére a rendszer valós időben, a mérés közben képes kiszámítani magas mintavételezési frekvencia mellett akár 15 mérési csatorna adatait (ez másodpercenként kb. 600 kByte adat feldolgozását jelenti). Egyértelművé vált a számomra, hogy valamilyen új módszert kell alkalmaznom, amelyet a villamos energia mérésének a területén még nem alkalmaztak. DSP és FPGA áramköröket már felhasználtak a gyors, on-line feldolgozás érdekében [34-36], de ezen hardveregységeket a magas ár jellemzi. A real-time kiértékelést én többszörös adatfeldolgozással oldottam meg, ami kihasználja az asztali többmagos processzorok teljesítményét. Manapság az asztali számítógépekbe szánt többmagos processzorok ára alacsony, így a rendszer kifejlesztése kis költséggel jár.

A többprocesszoros adatfeldolgozás nem egy mai ötlet. A 70-es évek óta léteznek olyan többmagos munkaállomások, szerverek, illetve superszámítógépek, amelyek több processzorral rendelkeznek és így gyorsabb adatfeldolgozásra képesek. Ezen rendszereket természetes képtelenség elhelyezni egy villamos energia mérésére alkalmas berendezésbe, annak mérete, illetve magas ára miatt.

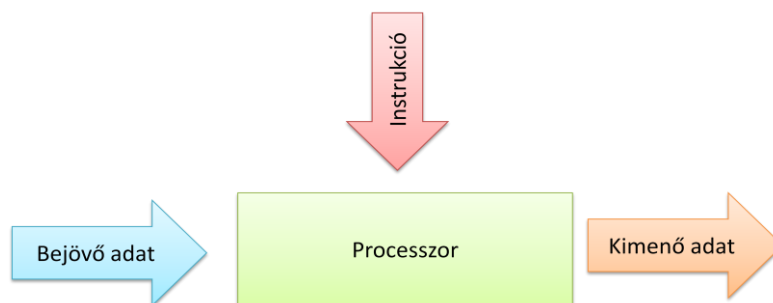
A többprocesszoros személyi számítógépek megjelenésével a többprocesszoros feldolgozás a reneszánszát éli, mivel olyan területeken is lehet alkalmazni ezt a módszert, ahol korábban az lehetetlen volt. Mondhatjuk azt is, hogy kötelezővé is válik a programokat úgy megírni, hogy azok több processzoron futhassanak, mivel csak ezzel a módszerrel képesek a számítógépgyártók tartani a számítógépek teljesítményének növekedését.

6.2. Többprocesszoros feldolgozás lehetőségei

A többprocesszoros rendszerek a processzorok száma és a processzoron elvégzett műveletek alapján - a superszámítógépeknél alkalmazott osztályozás szerint – a következőképpen csoportosíthatóak.

6.2.1. Single Instruction, Single Data (SISD)

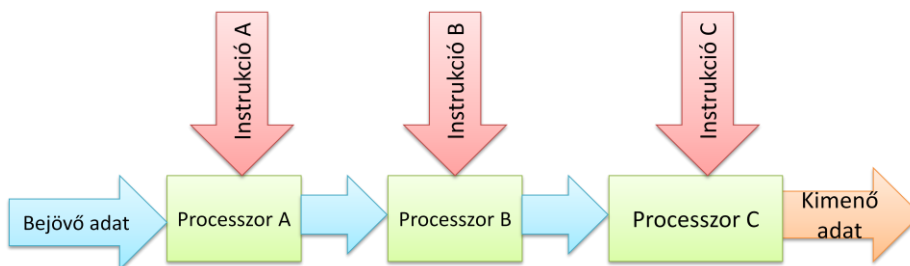
Az első és legegyszerűbb eset, mikor egy processzorunk van. Ilyenkor minden egyes utasítás ugyanazon a processzoron kerül végrehajtásra. Ilyennek tekinthetők a már eltűnőben lévő egymagos, azaz egy processzoros számítógépes architektúrák. Bár egy mag számítási teljesítménye is folyamatosan növekszik és növekedett az évek során, ez az architektúra az asztali olcsó processzorok szintjén nem képes arra a számítási teljesítményre, amit a real-time feldolgozó rendszer igényel.



6.1. ábra: SISD típusú rendszer

6.2.2. Multiple Instruction, Single Data (MISD)

A MISD típusú működésnél több processzor van, ahol mindegyik processzor egy típusú műveletet hajt végre. A rendszer működése nagyon hasonlít egy termék gyártósoron való előállítására, ahol az egyes megmunkálási fázisoknál ugyanazok a műveletek kerülnek végrehajtásra a munkadarabon. A gyakorlatban nem elterjedt megvalósítás a MISD, viszont a processzoron belüli pipeline adatfeldolgozás lényegében ugyanezt az elvet követi.



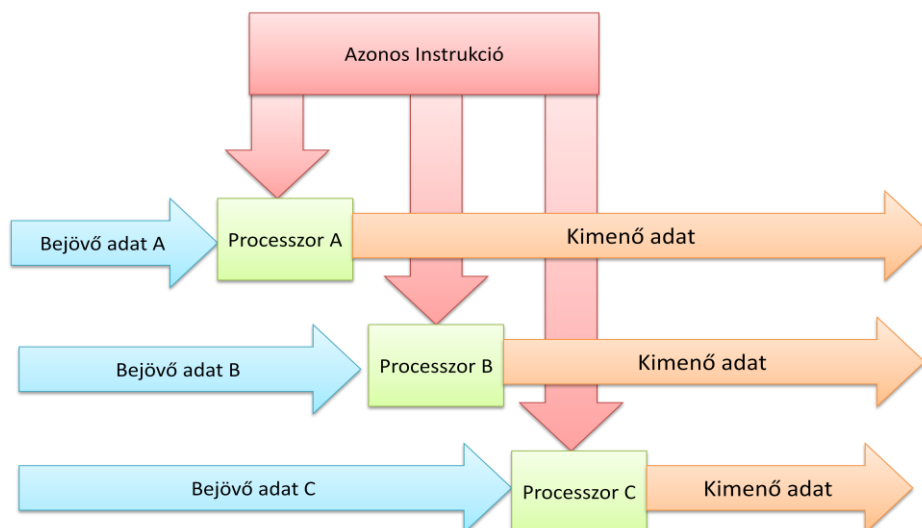
6.2. ábra: MISD típusú rendszer

6.2.3. Single Instruction, Multiple Data (SIMD)

A SIMD rendszereknél minden egyes processzor ugyanazon műveletet hajtja végre a bejövő adatokon. A SIMD célja egyértelműen a feldolgozási idő lerövidítése, mivel ha k darab processzorunk van, akkor egy processzornak csak a bejövő adatok k-ad részével kell foglalkoznia. A vektorprocesszoros superszámítógépek tartoznak a SIMD architektúrába. „A

szuperszámítógépek a vektorprocesszorok megjelenésével kezdték meg térhódításukat a 70-es években. Jelentőségük a 90-es évekre annyira megnőtt, hogy a világ mindenkori 500 leggyorsabb számítógépét az ún. top 500-as listán folyamatosan nyilvántartják.” [86, 87]

„A vektorprocesszorok a tudományos számításokban leggyakrabban használt adatszerkezetek, a tömbök gyors feldolgozására lettek optimalizálva. Mivel az 1-dimenziós tömb neve vektor, ezért ezeket a szuperszámítógépeket vektorprocesszoroknak nevezik. Előnyük, hogy a tömbműveleteket valóban rendkívül gyorsan képesek végrehajtani és ugyanakkor programozásuk nem tér el a szokásos számítógépek programozásától. Úgynevezett vektorizáló fordítóprogramokat alkalmaznak, amelyek a programozó segítségével képesek felismerni az optimalizálható és gyorsítható műveleteket. Hátrányuk, hogy speciális processzorokat alkalmaznak, melyek tervezési és fejlesztési költsége rendkívül magas, ugyanakkor csak ezekben a gépekben alkalmazhatók.” „A vektorprocesszorok rendkívül drágák a többi típushoz hasonlítva és ennek következtében népszerűségük rohamosan csökkent az elmúlt évtizedben, sőt gyakorlatilag eltűntek a top500-as listáról.” [86, 87]



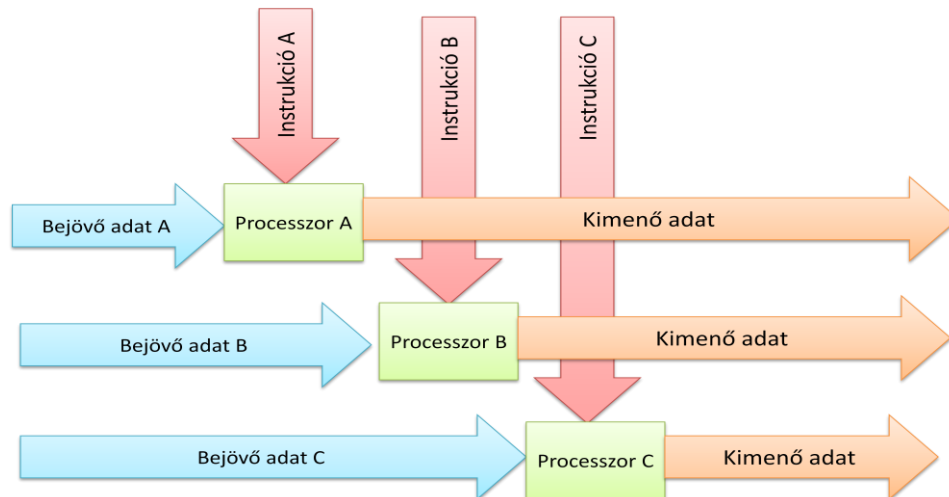
6.3. ábra: SIMD típusú rendszer

Az adatok SIMD típusú feldolgozására a relatíve olcsón beszerezhető videokártyák nyújtanak egy alternatívát. A mai videokártyák stream processzorokból épülnek, amelyek feladata bizonyos művelet nagyszámú adaton való végrehajtása, és így a feldolgozási idő lerövidítése, valamint gyakran a számítások valós időben való elvégzése. A videokártyák gyakori alkalmazása a tervező programoknál a 3 dimenziós alakzatok forgatása, mozgatása, szerkesztése, amelyekhez a számításokat valós időben kell elvégezni. A videokártyák stream processzorai azonban más műveletekre is felhasználhatók, egyre több publikáció szól arról, hogy a videokártyák nyújtotta teljesítményt használják fel az időigényes számítások elvégzésére [88, 89]. Mivel a villamos energia mérése során is hasonló jellegű számítási műveleteket kell elvégezni egy hatalmas adatmennyiségen, ezért jó megoldásnak tűnt, hogy olcsón megvalósítható real-time feldolgozórendszert építsenek ki a mai videokártyák felhasználásával. A Miskolci Egyetem Elektrotechnikai- Elektronikai Tanszékén rendelkezésre álló hardver eszközök miatt nem a videokártyás rendszer megvalósítását tűzték ki célul, azonban a jövőben egy videokártya segítségével feldolgozó rendszer szintén olcsón

megvalósítható alternatíva lehet az általam megvalósított real-time feldolgozórendszer mellett.

6.2.4. Multiple Instructions, Multiple Data (MIMD)

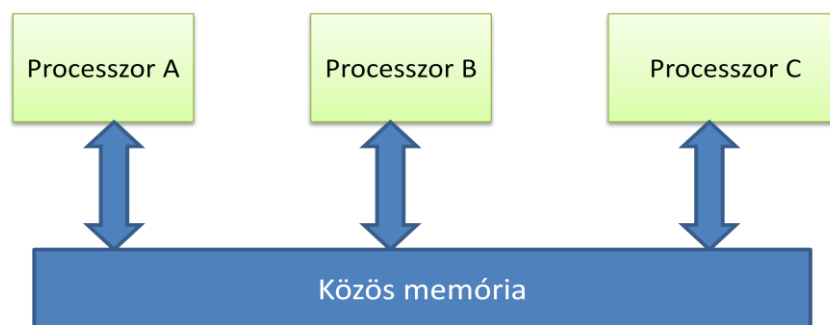
A MIMD típusú rendszereknél az egyes processzorok különböző műveletek hajtanak végre különböző adatokon (6.4. ábra). Az adat és a végrehajtandó művelet is változhat időről-időre az egyes processzorokon. A processzorok aszinkron módon működnek egymástól függetlenül, azaz valamilyen módon szinkronizálni szükséges őket.



6.4. ábra: MIMD típusú rendszer

A MIMD típusú rendszerekből kétfélét különböztetünk meg:

- Közös memóriás multiprocesszorok (6.5. ábra),
- Masszívan párhuzamos multiprocesszorok (6.6. ábra).

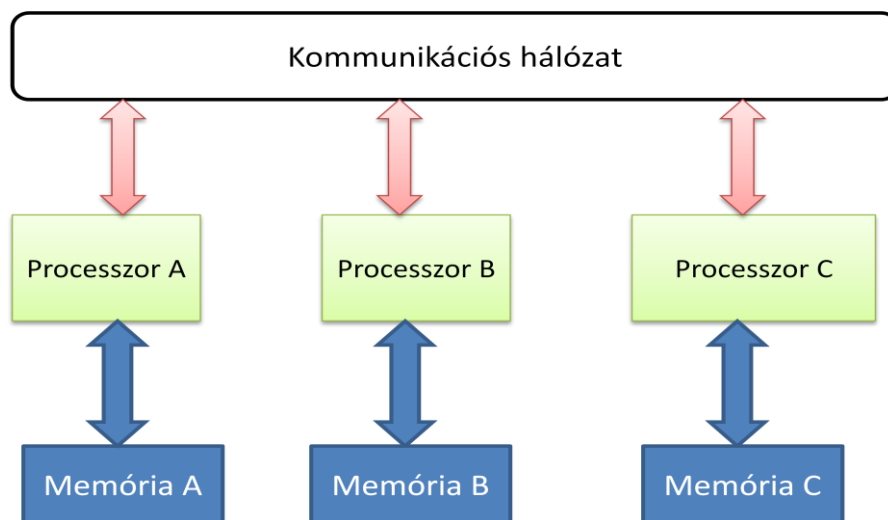


6.5. ábra: Közös memóriás multiprocesszorok

A közös memóriás multiprocesszorokat szimmetrikus multiprocesszoroknak is nevezik. A memóriát minden processzor közösen használja, ami bizonyos szempontból előnyt, más szempontból hátrányt jelent. Előnyös, hogy a programozónak nem kell törődnie a szálak (vagy processzek) és processzorok összerendelésével, hiszen a közös memóriából bármely processzor bármely szálát elérheti és futtathatja. Hasonlóan az adatok elhelyezése sem okoz külön fáradtságot a programozónak. A folyamatok kommunikációja az adatok tényleges mozgatása nélkül történhet a közös memóriában, ami jelentős előny az üzenetküldés alapú multiprocesszorokkal, ellenben jelentős hátránnyal is jár. A közös memórián keresztül történő

kommunikáció szinkronizációt igényel a szálak között, amelynek a kezelése a programozó feladata. A szuperszámítógépek szimmetrikus multiprocesszorainak további hátránya, hogy a közös memória, mint erőforrás szűk keresztmetszetté válik egy bizonyos processzorszám felett (tipikusan 32-64) és ezért bővíthetőségük erősen korlátozott. Ez az oka annak, hogy a szimmetrikus multiprocesszorok lassan kiszorulóban vannak a szuperszámítógépek top500-as listájáról, illetve csak úgy tudnak ott megmaradni, hogy a klaszter technológia segítségével szimmetrikus multiprocesszorokból egyszerre több van klaszterbe kapcsolva [86, 87].

A mai személyi számítógépek többmagos processzorai a közös memóriás multiprocesszoroknak felelnek meg, mivel a központi memória közös az összes mag számára. Egy lapkára több processzor van beleintegrálva, amelyeket ebben a rendszerben magoknak nevezünk. A számítógép memóriája mindegyik mag számára elérhető és közös. Az előnyei és hátrányai megegyeznek a szuperszámítógépnél alkalmazott szimmetrikus multiprocesszorok előnyeivel és hátrányaival. A hátrányok közül az erőforrások szűk keresztmetszetével nem kell foglalkozni, mivel általában 4 magról beszélünk, viszont a szálak között bizonyos szinkronizációt kell alkalmazni, ami eltérő programozást igényel és problémafüggő a megvalósítása. A mai többmagos processzorok olcsón beszerezhető hardvereszközök, így jó alternatívát kínálnak a mérési adatok real-time feldolgozására. Kutatásom során ezt az irányt választottam annak érdekében, hogy a mérési adatok feldolgozása már a mérés közben megvalósuljon.



6.6 ábra: Masszívan párhuzamos processzorok (MPP)

„A szimmetrikus multiprocesszorokkal ellentétben a masszívan párhuzamos processzor architektúrákban a memória fizikailag szét van osztva a processzorok között és így nagymértékben bővíthetők. A logikai struktúrát tekintve két fő változatukat alkalmazzák: elosztott közös memóriás gépek és az üzenetküldésen alapuló gépek. Az elosztott közös memóriás gépek a programozó szempontjából logikailag úgy viselkednek, mint a szimmetrikus multiprocesszorok, azaz a memória címtér egységesen, szimmetrikusan látszik minden processzor számára. Az üzenetküldésen alapuló gépek esetében azonban a memória címtére is osztott, azaz egy processzor csak a fizikailag hozzákötött memóriát képes elérni. Ha más processzor memóriájának tartalmára van szüksége, akkor ezt processzek közötti üzenetek küldésével lehet elérni. Ez azt eredményezi, hogy a processzek és adatok kiosztása a

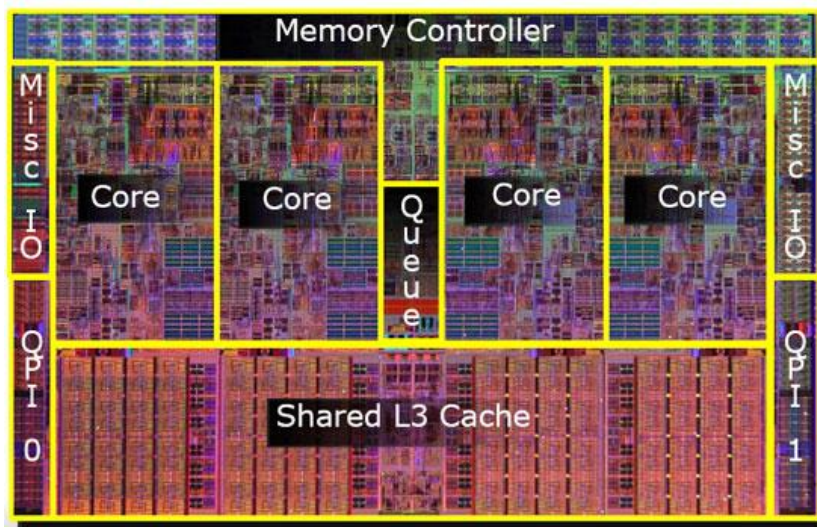
processzorok memóriájában kritikus és ezt a legtöbb esetben a programozónak kell elvégezni. Ezért az ilyen gépek programozása bonyolultabb, mint a szimmetrikus multiprocesszoroké. Ugyanakkor az elosztott közös memóriás MPP gépek programozása is bonyolultabb, mint a szimmetrikus multiprocesszoroké, mivel itt a gyorsítómemória (cache) nem optimális kezelése okozhat teljesítményvesztést.” [86, 87]

A masszívan párhuzamos processzorok megfeleltethetők a hálózatba kötött számítógépeknek. „Logikai szempontból a dedikált klaszterek és az üzenetküldés alapú MPP gépek nem különböznek. Felépítésükben eltérés, hogy míg az MPP képek speciális belső kommunikációs hálózatot és kapcsolókat alkalmaznak, addig a klaszterek külső LAN hálózatokat és standard kapcsolókat használnak.” [86, 87]

Nyilvánvaló, hogy a masszívan párhuzamos processzorok teljesítményét nem lehet felülmúlni, mivel több számítógép összekötve mindig nagyobb teljesítményt jelent, mint egy számítógép, azonban az on-line feldolgozás jelenleg elvégezhető egy darab többmagos (többprocesszoros) számítógéppel, és nem szükséges, hogy a mérőgép hálózatra, vagy internetre csatlakoztatva igénybe vegye más számítógépek számítás-teljesítményét. Ha azonban a feldolgozás a jövőben kiegészülne speciális, óriási számítási teljesítményt igénylő algoritmusokkal, akkor az MPP rendszerek alkalmazása az on-line feldolgozáshoz elkerülhetetlen lenne.

6.3. Villamos paraméterek meghatározása közös memóriás többprocesszoros rendszerekkel

Napjainkban a személyi számítógépek hatalmas számítási teljesítményekkel rendelkeznek, amelyek alkalmasak arra, hogy a villamos hálózat minőségének és energiafelhasználásának paraméterei mérés közben, valós időben meghatározhatóak legyenek. A processzorok 2, 4 illetve több maggal rendelkeznek, amelyek mindegyikét külön-külön processzornak kell elképzelni. Ezek a processzorok egy lapkába vannak integrálva, ezért jobban elterjedt az a kifejezés, hogy az egész lapkát nevezzük processzornak, a beleintegrált processzorokat pedig magoknak (Core) (6.7. ábra).



6.7. ábra: Intel Core i7 950 típusú processzor felépítése

A többmagos processzorok teljesítményét csak abban az esetben lehet kihasználni, ha a mérőszoftvert úgy implementálom, hogy a programban több szálon való futás valósuljon meg. Csak többszálú programozás esetében lehet kihasználni a többmagos processzorok számítási teljesítményét. A többszálú programozás lényege, hogy az elvégzendő feladathalmazt több, egymástól függetlenül végrehajtásra kerülő kisebb részre (szálra) bontsunk fel úgy, hogy ezek a programrészek párhuzamosan (közel egy időben) futhassanak. Az egyes szálak közvetlenül hozzáférhetnek a közös központi memóriához, ezért a programozónak kell biztosítania, hogy a közösen használt adatokat ne tudják egyszerre írni vagy olvasni a párhuzamos futó programrészek. A szálak közötti kommunikációt szintén biztosítani kell, mivel nagy mennyiségű adatáramlás történik az egyes szálak között.

Közvetlenül a programozó nem az egyes magokra programozik, hanem – ahogyan azt már említettem – szálakra. Ezeket a szálakat az operációs rendszer dobálja szét az egyes magoknak, így egy szál végrehajtása folyamatosan ugrálhat, így biztosítva az egyes magok között a CPU magok egyenletes terhelését, melegedését. Az egyes szálaknak prioritási szinteket lehet beállítani, ami jelzés az operációs rendszer felé, hogy melyik szálnak kell egy adott időegység alatt több processzoridőt kapni, így a fontosabb funkciójú szálaknál megoldható, hogy gyakrabban legyenek egy magnak kiosztva, mint a többi. Ahhoz, hogy kihasználjuk egy többmagos CPU teljesítményét, legalább annyi szálát kell futtatni, ahány maggal rendelkezik a CPU. Abban az esetben, ha magok és szálak száma megegyezik, csak akkor terheljük le teljesen a rendszert, ha az egyes szálak közel egyforma olyan terhelést okoznak, ami szálanként teljesen le tud terhelni egy magot. A szálak száma természetesen lehet több mint a magok száma, ebben az esetben az operációs rendszer legjobb tudása szerint váltogatja a szálakat a magok között. Azonban ha szálak száma jóval nagyobb a magok számánál és azok jelentős terhelést okoznak, akkor a rendszer működését ez jelentősen lelassíthatja, mivel az operációs rendszernek gyakran kell cserélgetni az egyes magokon futó szálakat, ami költséges is.

A több szálon való programozás nagy előnye, hogy a rendszer ugyanúgy működtethető egy magos processzoron is, mivel az operációs rendszer tudja ezeket a szálakat egy magnak felváltva adogatni. Viszont ha csak egy magos processzorunk van, akkor figyelni kell arra, hogy kisebb számítási kapacitással rendelkezik és így kevésbé terhelhető. Jelen esetben kevesebb csatornán kell mérni, alacsonyabb mintavételezési frekvenciát kell beállítani, illetve egyes paraméterek mérés közben való kiértékelését le kell tiltani.

Meg kell említenem, hogy a szálkezelést nem csak a többmagos processzorok teljesítményének kihasználása érdekében alkalmazzuk. Egy processzoros rendszerekben is előnyt jelenthet a többszálú programok futtatása. Előfordulhat, hogy egy program több szála fut egy időben, s mialatt az egyik szál adatokra vár, vagy éppen egy lassabb perifériával, eszközzel kommunikál, addig a többi szál használhatja az értékes processzoridőt. Ez is egy fontos érv ahhoz, hogy miért érdemes több szálon futó programokat készíteni, de jelen esetben a többszálú programozás célja a többmagos processzorok felhasználásával a real-time feldolgozás megoldása a villamos energia mérése során.

A teljesítmény kihasználása érdekében kétféleképpen lehet az egyes feladatokat a szálak között szétosztani. Az egyik megoldás, hogy minden egyes szál ugyanazon számításokat végzi el, csak más adatokon. Ebben az esetben annyi szálát érdemes létrehozni, ahány magos a

processzor, mivel ebben az esetben az összes mag egyenlő mértékben lesz terhelve azért, mert ugyanazon számításokat végzi el. A másik megoldás szerint az egyes szálak más-más feladatot látnak el. Ennek a módszernek az előnye, hogy a rendszer könnyen bővíthető, mivel az új funkciókat érdemes külön szálba tenni, miközben a többi kódrészlet érintetlen és független marad. Mérésadatgyűjtés szempontjából ez a típusú feladat szétosztás azért jobb választás, mert érdemes az adatgyűjtést egy külön szálba tenni és magas prioritással ellátni, biztosítva azt, hogy a mérés legfontosabb része, az adatgyűjtés zökkenőmentesen megvalósuljon. A rendszer megtervezése során így a második megoldást választottam, ahol minden egyes szál más feladatot végez.

Az általam fejlesztett szál-menedzselés során, az elvégzendő számításokat funkció alapján bontottam szét a szálak között. A különböző típusú számítások különböző szálakban kerülnek végrehajtásra úgy, hogy azok megfeleljen a mintaszámmal történő szinkronizálás módszerének. A következő fő szálak jelentik a rendszer szoftverének magját:

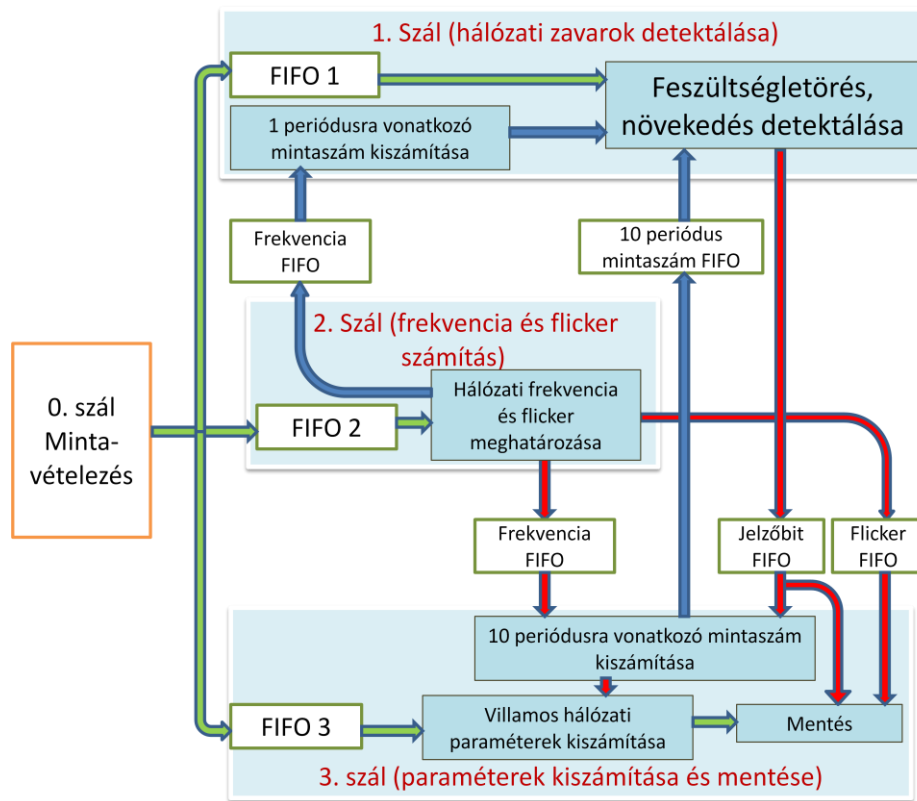
- mintavételező szál (0. szál): feladata a mérésadatgyűjtő kártyáról a minták fogadása és továbbítása azon szálaknak, amelyek műveleteket végeznek el rajtuk;
- frekvencia és flicker értékeket meghatározó szál (2. szál): feladata a hálózati frekvencia pontos és a flicker értékek pontos meghatározása. Ez a szál olyan paramétereket számít ki, amelyekhez nincs szükség a 4. fejezetben ismertetett szinkronizáló algoritmus használatára. A frekvenciaszámítás az 5. fejezetben leírtak szerint történik;
- hálózati zavarokat detektáló szál (1. szál): feladata a rövid ideig (1 hálózati periódus) tartó hálózati zavarokat (feszültség-letörés, -növekedés, feszültség-kimaradás) detektálása. A számítást egy periódusra való szinkronizálással végzi;
- hálózati paramétereket kiszámító szál (3. szál): feladata a hálózati paraméterek kiszámítása a szabvány által előírt pontossággal, és a mért, valamint a számított adatok mentése. Az itt kiszámított paraméterek a mintaszámmal történő szinkronizálást igénylő villamos hálózati, illetve energiafelhasználási paraméterek.

A fő szálak funkciója és köztük levő kommunikáció a 6.8. ábrán látható. A számítások szétosztásának lényege, hogy külön kezelem azokat a számításokat, amelyekhez mintaszámmal történő szinkronizálást nem kell alkalmazni (hálózati frekvencia, flicker), illetve azokat, amelyekhez feltétlenül szükséges szinkronizálni és 10 periódusonként meghatározni az értéküket (RMS, THD, teljesítményparaméterek, aszimmetria). Külön szálát kapott a feszültségletörést, -növekedést detektáló számítás, amely szinkronizált periódusokból félperiódusos eltolásokkal számít RMS értéket és dönti el, hogy az érték a megfelelő feszültségtartományon belül található-e. A mérés folyamata, ahogyan korábban kifejtettem, külön szálát kapott, így biztosítva, hogy az egyes számítások nem hátráltatják magát a mintavételezést.

Megemlítem, hogy az előbb felsorolt fő szálak mellett további szálak futnak, de ezeknek az adatfelfogzáshoz vagy nincsen köze vagy csak rövid ideig fut. Elsődlegesen a 4 főszállal foglalkozom jelen fejezetben azzal, hogy a további szálakról is említést teszek.

- Megjelenítő szál: a mért adatok on-line megjelenítését végzi. Prioritása alacsony, így a méréstől nem vonhat el jelentős processzoridőt;

- SMS küldő és FTP kapcsolódó szál: feladatuk, hogy bizonyos események hatására (feszültség-kimaradás, mérési hiba), illetve beállított időpontként sms-t küldjenek vagy egy FTP tárhelyre adatokat töltsenek fel.



6.8. ábra: Többszálú végrehajtás felépítése

A szálak közötti kommunikáció FIFO (First Input First Output) segítségével történik (6.8. ábra), ami biztosítja a szálak összehangolt működését. A FIFO, más néven sor (queue), feldolgozásra váró elemek tárolása alkalmas, amiből mindig a legkorábban berakott minta vehető ki, így biztosítva, hogy az adott szál mindig sorban dolgozza fel az adatokkal. Az NI Labwindow CVI által szálkezelő könyvtárát használtam fel arra, hogy szálbiztos sorokat hozzak létre, ami a következőket garantálja:

- szálak közötti biztonságos adatátvitelre alkalmazható a sor. Mivel az egyik szál csak hozzáadhat elemeket a sorhoz, a másik pedig csak kivehet belőle, ezért nem fordulhat elő, hogy az egyik olyan adatot akar olvasni, amelyet a másik éppen ír. Tehát megvédi az adatokat a szimultán hozzáféréstől;
- a sor mérete (benne található elemek száma) dinamikusan növekedhet a fizikai memória méretéig. Ha a feldolgozó szál lelassul, vagy egy időre megakad, addig a mérésadatgyűjtő szál tovább pakolhatja bele az elemeket a sorba anélkül, hogy a feldolgozó szál kivett volna belőle. A feldolgozó szál miután újra gond nélkül tudja a feldolgozást végezni, a felgyülemlett adatokon tovább folytatja a számításokat, amíg a sorban levő minták száma vissza nem csökken;
- a feldolgozó szál csak akkor veszi ki a sorból a mintákat, ha megfelelő számú minta áll rendelkezésre a számításhoz. Abban az esetben, ha minták száma kevesebb, mint ami szükséges a feldolgozáshoz, akkor a szál vár, amíg a sorban levő minták száma legalább annyi lesz, amennyi a számításhoz szükséges.

Szálbiztos sorokat használva tehát nem okoz problémát, ha az egyik feldolgozó szál lemarad a feldolgozásban, mivel a FIFO garantálja, hogy a minták megmaradjanak. Természetesen a sorok mérete függ a fizikai memória méretétől, ugyanakkor nem is cél, hogy a FIFO mérete nagy legyen. A mérési paramétereket úgy kell beállítani a fizikai processzor függvényében, hogy az egyes feldolgozó szálak könnyedén fel tudják dolgozni a mérésadatgyűjtő száltól érkező adatokat. A FIFO szerepe csak annyi, hogy biztosítsa az adatok áramlását a szálak között és abban az esetben, ha valami ideiglenesen leterheli a számítógépet, ne okozzon programleállást, ha nem sikerül elég gyorsan feldolgozni az adatokat. A mintavételező szálnak azért nincs más feladata és azért kap magasabb prioritást, hogy semmi se tudja lelassítani, azaz a mintákat probléma nélkül tudja a FIFO-ba továbbítani.

A **mintavételező szál** folyamatosan küldi a 3 szál FIFO-jának a mintákat. Egyéb információra nincs szüksége azon az egy bites információon kívül, ami folyamatosan jelzi számára, hogy a mérést nem kell leállítania.

A **frekvencia és flicker értékeket meghatározó szál** mellett, hogy frekvencia és flicker értékeket határoz meg, folyamatosan küldi a frekvencia értékeket a másik két feldolgozó szálnak. Erre azért van szükség, hogy a két szál ki tudja számolni az aktuális 1 vagy 10 periódusra vett minták számát, ami a mintaszám szerinti szinkronizáláshoz szükséges. A szál a hálózati frekvenciát a mérés előtt beállított ún. „frekvenciaszámítás időegysége” paraméterben meghatározott időtartomány alatti mintákból számolja ki. Rövidebb időegységhez pontatlanabb frekvenciaérték, de jobb szinkronizálás tartozik. Hosszabb időegység esetén a szinkronizálás pontatlanabb, de a frekvenciaérték pontosabb lehet, feltéve, hogy az adott időszak alatt a hálózati frekvenciaingadozás csekély (lásd 4. fejezet).

A **hálózati zavarokat detektáló szál** a frekvenciát meghatározó száltól megkapja az adott időszakra vonatkozó hálózati frekvencia értékét és meghatározza, mennyi mintából kell kiszámolni az egy periódusra vonatkozó RMS értékeket ($U_{rms(1/2)}$). A számítást megbonyolítja, hogy a periódusra vonatkozó RMS értékeket a szabvány szerint félperiódusos eltolással kell megvalósítani. Ezzel a mérési módszerrel azonban a feszültségletörések, és -növekedések könnyedén észrevehetőek. A szabvány szerint (lásd 3. fejezet) jelölési koncepciót kell alkalmazni, ami szerint a feszültségletöréseket, illetve feszültségnövekedéseket tartalmazó $U_{rms(1/2)}$ értékeket meg kell jelölni, és azokat a 10 periódusos értékeket, amelyek tartalmazzak ilyen jelölt periódusokat, szintén meg kell jelölni. A jelölés célja, hogy azon periódusok, amelyek feszültségletörést, feszültségnövekedést, illetve feszültségkimaradást tartalmaznak, ne kerüljenek be az összegzett értékekbe.

A **hálózati paramétereket kiszámító szál** a frekvenciát meghatározó száltól megkapja az adott időszakra vonatkozó hálózati frekvencia értékét és meghatározza, mennyi mintából kell kiszámolni a tíz periódusra vonatkozó, a következőkben felsorolt villamos hálózati, illetve energiafelhasználási paramétereket:

- Hálózati feszültség és a felvett áram RMS értékei;
- Hálózati feszültség és a felvett áram THD értékei;
- Hálózati feszültség aszimmetria és áram aszimmetria;
- Látszólagos, hatásos és meddőteljesítmény feszültség-áram párokra;

- Alapharmonikusra vonatkozó látszólagos, hatásos és meddőteljesítmény feszültség-áram párokra ;
- Hatásos és meddő harmonikus teljesítmények;
- Torzítási teljesítmények (lásd 7. fejezet);
- Teljesítménytényező ($\cos\varphi$) és alapharmonikusra vonatkozó teljesítménytényező;
- Hatásos és meddő energiafogyasztás.

A paramétereket kiszámoló szál felelős a minták és kiszámított paraméterek mentéséért is, ezért a más szál által számított paramétereket (hálózati frekvencia, flicker, megjelölt 10 periódusok) megkapja a szálaktól szintén a FIFO-n keresztül annak érdekében, hogy ezek lementését is el tudja végezni. Ha olyan jelölt 10 periódust kap ez a szál, amely mintái fel lettek használva a hálózati frekvencia meghatározására, akkor a mintaszám szinkronizáláshoz a korábbi legutolsó helyes hálózati frekvenciaértéket használja fel annak érdekében, hogy a feszültségletörések, vagy -növekedések ne okozzanak rossz szinkronizálást.

A minták mentése 10 periódusonként történik, a kiszámított paraméterek pedig 10 percenként kerülnek lementésre. Mivel minden minta lementésre kerül, ezért a megjelölt 10 periódusok, vagy a magas THD-s feszültség- és áramjelek tovább vizsgálhatóak a feldolgozás után. A szál 10 percre vonatkozó fájlokat készít, ami szintén jól alkalmazkodik a szabvány előírásához, mivel 10 percenként a periódusok idejének ingadozása miatt szinkronizálni kell a mérést az abszolút időhöz. Erre azért van szükség, hogy minden egyes műszer, ami megfelel a szabvány „A” típusú előírásainak ugyanazt mérje akkor is, ha máskor kezdte el a mérést.

6.4. Speciális megoldások alkalmazása

Annak érdekében, hogy a mérési és kiértékelési folyamat megfeleljen a szabványok által előírtaknak, speciális megoldásokat kellett alkalmazni a mintaszámmal történő szinkronizálás alkalmazása miatt.

A 4. fejezetben már definiáltam mit értek egy periódusra vonatkozó és tíz periódusra vonatkozó minták száma alatt, de mivel a következőkben ezek fogalmára nagymértékben szükség van, ezért ezeket ismét röviden ismertetem. Tíz periódusra vonatkozó minták számára (N_{10p}) azért van szükség, mivel a legtöbb paramétert mindig egész számú 10 periódusos időtartományra kell meghatározni. Az egy periódusra (N_{1p}) vonatkozó minták száma a feszültségletörések, feszültségnövekedések vizsgálatához szükséges. A minták számát mind a két esetben úgy kapjuk meg, ha a mintavételezési frekvenciát megszorozzuk a periódusok számával és elosztjuk ezt a hálózati frekvenciával. Mivel a minták száma csak egész lehet, ezért az eredményt kerekíteni kell.

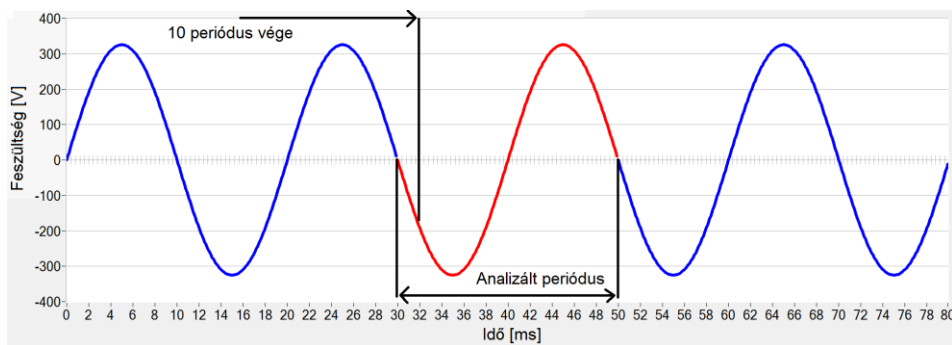
$$N_{10p} = \left\lfloor \frac{10 f_{mv}}{f_h} + 0.5 \right\rfloor \quad (6.1)$$

$$N_{1p} = \left\lfloor \frac{f_{mv}}{f_h} + 0.5 \right\rfloor \quad (6.2)$$

A PLL kiváltása a mintaszámmal történő szinkronizálással a következő problémákat okozta, amely annak a következménye, hogy a minták száma változik, és a kiszámítása során kerekítést kell végrehajtani.

Ha az egy periódusra (N_{1p}) vonatkozó minták száma páratlan, akkor az $U_{rms(1/2)}$ értékek kiszámításához szükséges fél periódus eltolást nem lehet egész mintaszámmal elvégezni. Abban az esetben például, ha 20 kHz-es mintavételezést alkalmazunk és a hálózati frekvencia 50 Hz, akkor egy periódus pontosan 400 minta lesz, és az eltolásokat a hálózati zavarokat detektáló szálnak 200 mintával kell elvégezni, annak érdekében, hogy a szabványban előírtak biztosítva legyenek. Ha a hálózat frekvencia 50,125 Hz, akkor egy periódus 399 mintából fog állni és a fél periódus eltolásnak vagy 200 mintának vagy 199 mintának kell lennie, mivel a minták száma csak egész szám lehet. A pontosabb kalkuláció érdekében az eltolásokat mindig a kisebb mintaszámmal végzem el, ami az előbbi példa esetében 199-et jelent. Az eltolás nem pontosan fél periódus, hanem attól rövidebb, ami a szabványtól pontosabb feszültségletörés, -növekedés detektálására nyújt lehetőséget. Megemlíteném, hogy az egy mintával való eltolás nyújtaná a pontosabb megoldást a feszültségzavarok kezdetének és végének meghatározására, de ez jelentős többletkalkulációt eredményezne, ami teljesen leterhelhetné a processzor egyik magját. Fél periódus eltolások esetén 100 RMS számítást kell végrehajtani egy csatorna esetén. Ha az eltolást egy mintára csökkentjük le, akkor 20000 RMS számítással kell számolni, ami 200-szoros processzorterhelést eredményez. Tehát a mintaszámmal történő szinkronizálás következtében a számítás során történő fél periódus eltolások nem minden esetben fél periódusok, hanem gyakran attól rövidebbek.

A másik probléma a mintaszámmal történő szinkronizálás esetén az, hogy a 10 periódusra vett minták száma nem tízszerese az egy periódusra vonatkozó minták számának. Gyakran előfordul, hogy az egy periódusra vett minták eleje az egy 10 periódusra vett minták végéhez tartozik, a maradék minta pedig a következő 10 periódusra vett minták elejéhez tartozik (6.9. ábra). A problémát pontosan az okozza, hogy a minták száma változik a mintaszámmal történő szinkronizálásnál, és a 10 periódusra vett minták száma nem tízszerese az egy periódusra vett minták számának. Ebből kifolyólag az egy periódus mindig csúszkál a 10 periódusok határánál. A feldolgozás során így pontosan számon kell tartani, hogy a megjelölt egy periódus mintái, melyik 10 periódus mintáihoz tartoznak. Ha csak egy 10 periódus mintáihoz tartozik, akkor azt kell megjelölni hibásnak, ha két 10 periódus mintáihoz tartozik, akkor mindkettőt meg kell jelölni hibásnak.



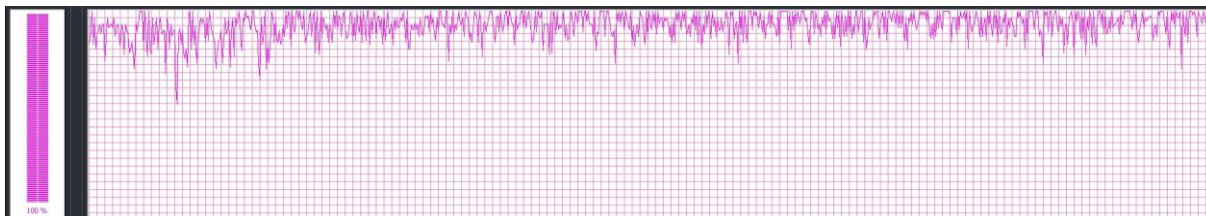
6.9. ábra: Az egy periódusra vonatkozó minták két 10 periódushoz tartoznak

Következtetésként megállapítható, hogy mintaszámmal történő szinkronizálás esetén egy bizonyos szinkronizációra is szükség van az egy periódusra vonatkozó és a tíz periódusra

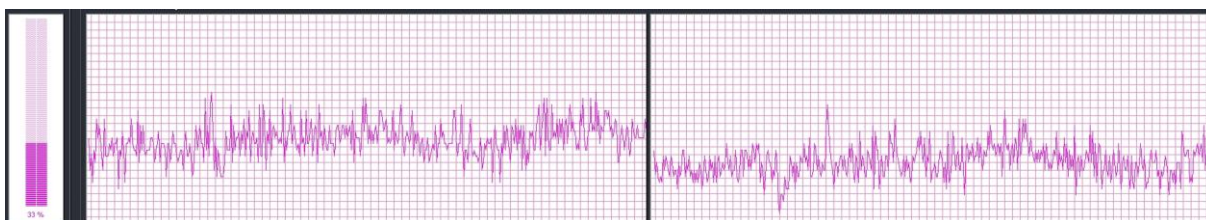
vonatkozó minták között, mivel ezek a periódusok átlapolódnak és mozognak egymáson, ami szintén annak köszönhető, hogy a hálózati frekvencia nem állandó, hanem ingadozik. A mérés során detektálom, hogy a megjelölt egy periódus mintái mely tíz periódusba esnek bele. Azon tíz periódusok kerülnek megjelölésre, amelyek mintái között vannak olyanok, amelyek egy megjelölt periódus mintái közé tartoznak. A megjelölés miatt az adott 10 periódus úgy tekinthető, mint amelyik olyan feszültségnövekedéssel, illetve feszültségletöréssel rendelkezik, ami miatt meg kell különböztetni a többi kiszámított értéktől.

6.5. Többszálás megvalósítás hatékonyságának tesztelése

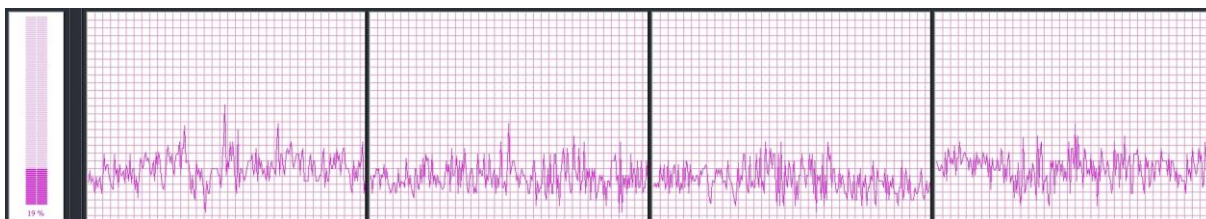
Tesztfuttatásokat végeztem el annak érdekében, hogy megvizsgálható legyen, mekkora teljesítménynybbletet eredményez az, hogy az egyes részfeladatok külön szálon futnak. A vizsgálathoz egy Intel Core 2 Quad Q9100 típusú négymagos processzort használtam fel, amely magjainak egy részét több tesztnél letiltottam. Minden futtatásnál 15 csatornás 20KHz-es mintavételezési sebességű mérésre került sor. A következő ábrákon az egyes tesztfutások alatti processzorterhelés látható. A 6.10., 6.11, 6.12. ábrákon a processzor terhelés látható az idő függvényében. A 6.10. ábrán megfigyelhető, hogy abban az esetben mikor csak egy mag volt aktív, a processzor terhelése 100% körül volt. A valós idejű mérés ebben az esetben nem kivitelezhető, mert a FIFO-kban elkezdene felhalmozódni a minták és a mérés leáll, mivel nem elég gyors az adatok feldolgozása és a FIFO megtelik. A 6.11. ábrán látható kétmagos teszt alatt a program futása egyenletesebbé, stabilabbá válik, a processzor terhelése 33%-ra csökkent, mivel kihasználja a program azt, hogy fizikailag két processzort lát a rendszer. A 4 magos teszt (6.12. ábrán) során a processzor terhelése 19%-ra csökken, ami azért történhet meg, mert 4 fő szálon történik a műveletek végrehajtása.



6.10. ábra: CPU terhelés 1 mag esetén (3 mag letiltása)



6.11. ábra: CPU terhelés 2 mag esetén (2 mag letiltása)



6.12. ábra: CPU terhelés 4 mag esetén (mindegyik mag engedélyezve)

A mérések jól mutatják, hogy a rendszer még jelentős tartalékkal rendelkezik. Számos művelet, illetve kiértékelés végrehajtható még a mérés közben az adott processzort használva.

6.6. HFKV jeldetektáló és teljesítményugrást kereső speciális szál

Az itt bemutatott többszálú rendszer bővíthetőség jól mutatja, hogy Unhauzer Attila PHD értekezésében [68] bemutatott HFKV (Hangfrekvenciás Központi Vezérlés) jeldetektáló és teljesítményugrásokat kereső módszere is belekerült a kifejlesztett rendszerbe. A mérés megkezdése előtt be lehet állítani, hogy a vezérelt fogyasztók (az éjszakai áram) bekapcsolása következtében fellépő teljesítményugrások keresése megtörténjen-e a mérés során. A funkció egy külön szálát kapott, mivel a számítási eljárás teljes mértékben különbözik más villamos paraméterek számításától. A kifejlesztett hálózatanalizáló rendszer egyszerű bővíthetőségét jól mutatja, hogy egy új szál beiktatásával teljesen új funkcióval bővíthető a rendszer a már meglévő funkciók módosítása nélkül.

6.7. Új tudományos eredmények

3. Tézis: Kidolgoztam a villamos hálózati paraméterek meghatározására alkalmas eljárást, ami többprocesszoros rendszerek alkalmazásával, nagy mintavételezési sebesség mellett, on-line módon képes meghatározni az A osztályos műszerekre előírt villamos paramétereket, valamint jelalakokat, 10 periódusos felbontásban.

A kifejlesztett eljárással a fejlett jelfeldolgozó processzorokkal rendelkező eszközökhöz képest lényegesen költséghatékonyabban alakítható ki a villamos hálózati paraméterek on-line kiértékelésére alkalmas rendszer. Az eljárás a logikailag különböző, eltérő időtartományra vonatkozó paraméterszámításokat külön végrehajtási egységben kezeli, így biztosítva a rendszer hatékony működését és a bővíthetőséget.

7. Harmonikusokkal terhelt villamos hálózatok teljesítményparamétereinek vizsgálata

7.1. Bevezetés

„A villamosenergia-rendszerről táplált fogyasztók egy része nem-lineáris fogyasztó. Jellemzőjük, hogy szinuszos feszültségről felvett áramuk nem csak a hálózati frekvenciájú komponenst tartalmaz, hanem annak egész- vagy nem egészszámú többszörösét is” [1], így gyakorlatilag a nem-lineáris fogyasztók felharmonikus áramokkal szennyezik a hálózatot. A harmonikus áramot egy másik fogyasztó közvetlenül nem érzékeli. A hálózat impedanciáján a harmonikus áram által létrehozott torz feszültség okoz problémát, ami nagy értékű harmonikus áramot okozhat az elektronikus berendezések hálózat oldali bemenő fokozatában.

A villamos hálózaton tehát megjelennek mind feszültség felharmonikusok és mind áram felharmonikusok, ezért a továbbiakban nem-szinuszos hálózatoknak kell ezeket a villamos rendszereket tekinteni. A felharmonikusok miatt nem beszélhetünk tisztán csak hatásos, meddő és látszólagos teljesítményről, hanem ezek harmonikustartalmát is figyelembe kell venni. A következőkben ezért összehasonlítom a szinuszos és nem-szinuszos hálózatokat egymással – különös tekintettel – a teljesítményparaméterek szempontjából. A szinuszos és nem-szinuszos hálózatok teljesítmény összetevőinek vizsgálatával az IEEE 1459-2000 szabvány [91] foglalkozik, illetve a szakirodalomban is fellelhetők publikációk, amik a nem-szinuszos hálózatok teljesítményparamétereit, különösképpen a meddőteljesítményt vizsgálják [93-96]. Ezen publikációk közül a legtöbbet a 80-as 90-es években publikálták, amikor még nem voltak a napjainkhoz hasonló magas mintavételezési frekvenciájú mérőrendszerek, így a teljesítményparaméterek vizsgálata, mérése nem-szinuszos hálózatok esetén mérés technikailag korszerűbb oldalról közelíthető meg.

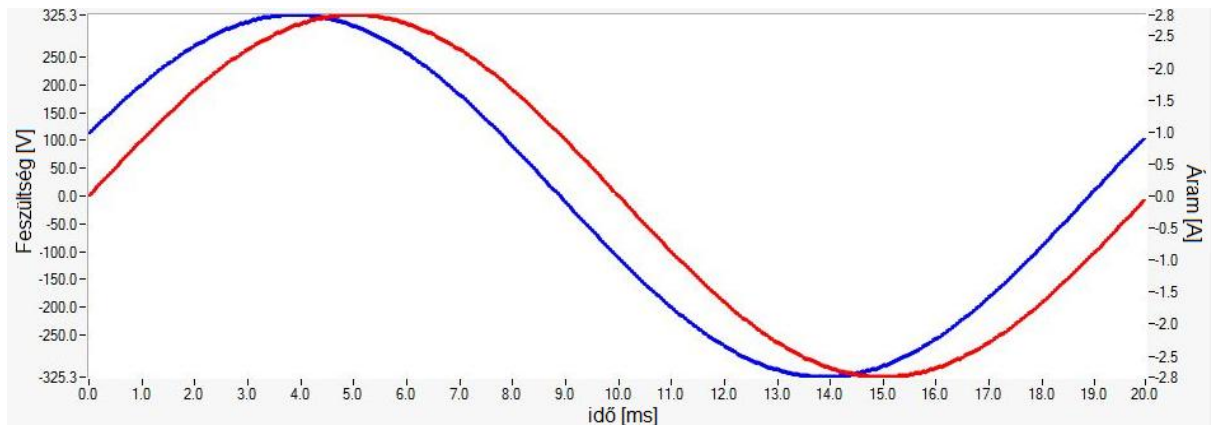
7.2. Szinuszos hálózatok

Szinuszos hálózatok esetén mind a feszültség (u), mind az áram (i) szinusz függvény szerint változik, ahol az U és az I a feszültség, illetve az áram effektív értéke, az f a hálózati frekvencia, a φ pedig a két hullám közötti fázisszög.

$$u = \sqrt{2}U \sin(\omega t) \quad (7.1.)$$

$$i = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi) \quad (7.2.)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (7.3.)$$



7.1. ábra: A feszültség (kék) és az áram (piros) jelalakja szinuszos hálózatok esetén

A teljesítmény pillanat értéke (p) a feszültség és áram pillanat értékének a szorzata, ami felbontható két szinuszosan váltakozó teljesítményre. A p_a a hatásos (aktív) teljesítményrész, mivel lineáris középértéke (P) nem nulla, p_q a meddő rész, aminek lineáris középértéke nulla, azaz nem okoz valós teljesítményáramlást, hanem csak „leng” a hálózaton és terheli a vezetékét. „Mivelhogy a meddő teljesítménynek nincsen átlagértéke, ezért az amplitúdójával jellemezzük (Q)” [90].

$$p = ui \quad (7.4.)$$

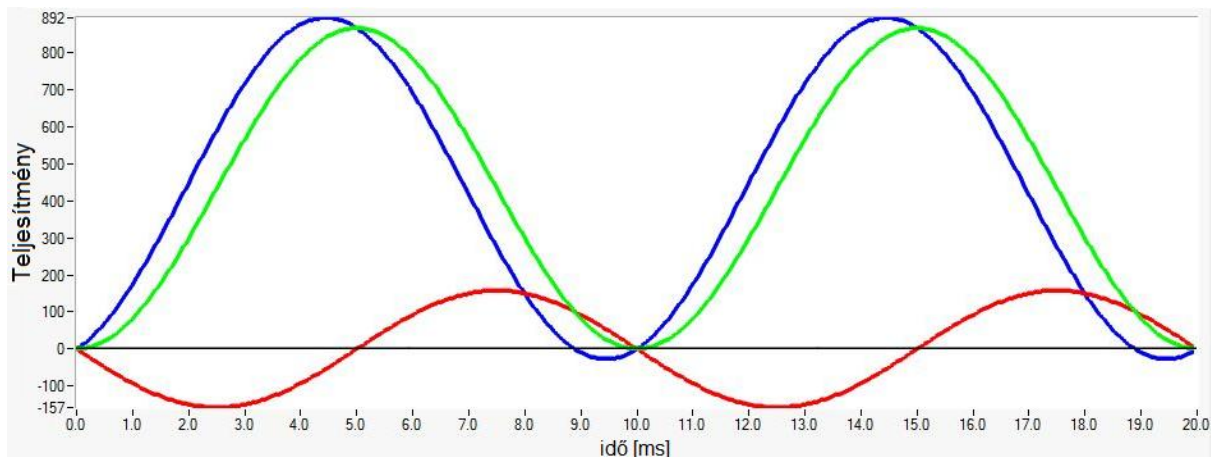
$$p = p_a + p_q \quad (7.5.)$$

$$p_a = UI \cos \varphi [1 - \cos(2\omega t)] \quad (7.6.)$$

$$P = UI \cos \varphi \quad (7.7.)$$

$$p_q = -UI \sin \varphi \sin(2\omega t) \quad (7.8.)$$

$$Q = UI \sin \varphi \quad (7.9.)$$



7.2. ábra: A pillanatnyi (kék színnel jelölve), a hatásos (zöld színnel jelölve) és a meddő (piros színnel jelölve) teljesítmény jelalakjai

A látszólagos teljesítmény (S) a hatásos és meddő teljesítmény négyzetösszegének a négyzetgyöke, ami egyben a feszültség és áram effektív értékének szorzata. A látszólagos teljesítmény a berendezés méretezésére jellemző mennyiséget ad.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI \quad (7.10.)$$

A $\cos\varphi$ paramétertel teljesítménytényezőnek nevezzük, ami mindig a hatásos teljesítmény és a látszólagos teljesítmény hányadosa. Nevéből következik, hogy szinuszos hálózatok esetén megegyezik a feszültség és áram közötti fázisszög koszinuszával.

$$\frac{P}{S} = \cos \varphi \quad (7.11.)$$

7.3. Nem-szinuszos hálózatok

Nem-szinuszos hálózatok esetén a harmonikusok megjelenése miatt, a feszültség és az áram több szinusz jelből tevődik össze. Az u_1 és i_1 a hálózati frekvenciához (továbbiakban alapharmonikushoz) tartozó görbe, az u_H és i_H a harmonikus és egyenösszetevőből kialakuló feszültség és áramjel.

$$u = u_1 + u_H \quad (7.12.)$$

$$i = i_1 + i_H \quad (7.13.)$$

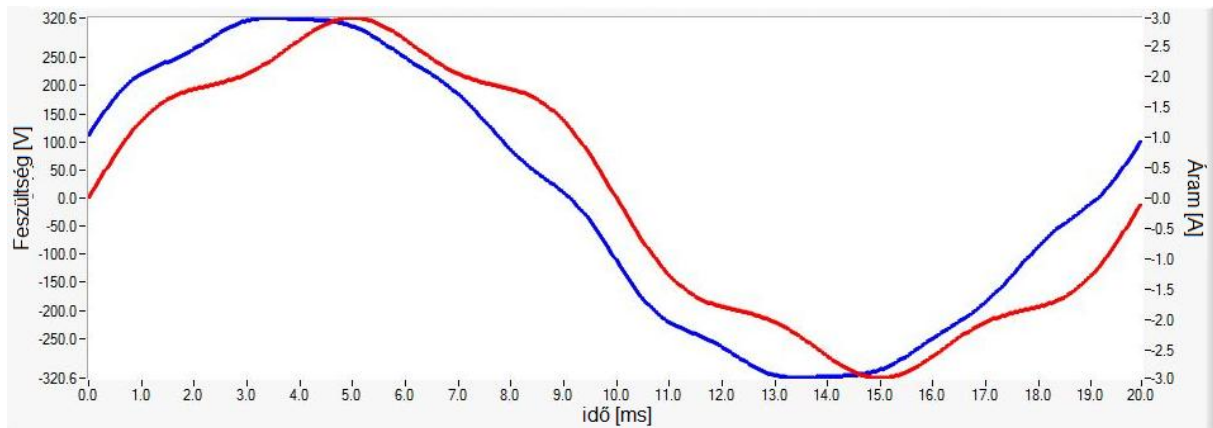
ahol

$$u_1 = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t - \alpha_1) \quad (7.14.)$$

$$i_1 = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - \beta_1) \quad (7.15.)$$

$$u_H = U_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} U_h \sin(h\omega t - \alpha_h) \quad (7.16.)$$

$$i_H = I_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} I_h \sin(h\omega t - \beta_h) \quad (7.17.)$$



7.3. ábra: A feszültség és az áram jelalakja nem-szinuszos hálózatok esetén

A 7.3. ábrához tartozó feszültség (az ábrán kék vonallal jelölve) 230V 50 Hz-es hálózaton 450Hz-es 5V-os harmonikkal, áram (az ábrán piros vonallal jelölve) 2A-es alapharmonikus mellett 250Hz-es 0,2 A-es áramfelharmonikus, fáziseltolás 20 fok.

Effektív értékekkel számolva az eredő feszültség vagy áram négyzete mindig egyenlő lesz az egyes harmonikusok, az alapharmonikusok és az egyenösszetevő négyzetösszegével.

$$U^2 = U_1^2 + U_H^2 = U_1^2 + U_0^2 + \sum_{h \neq 1} U_h^2 \quad (7.18.)$$

$$I^2 = I_1^2 + I_H^2 = I_1^2 + I_0^2 + \sum_{h \neq 1} I_h^2 \quad (7.19.)$$

A teljes harmonikus torzítás megadja, hogy az alapharmonikushoz képest mekkora a harmonikustartalom.

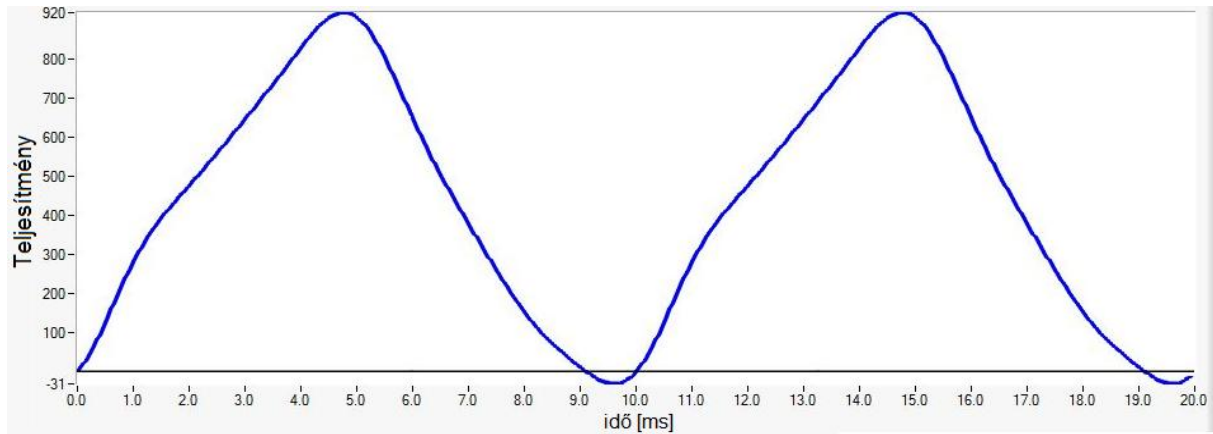
$$THD_U = \frac{U_H}{U_1} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \quad (7.20.)$$

$$THD_I = \frac{I_H}{I_1} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (7.21.)$$

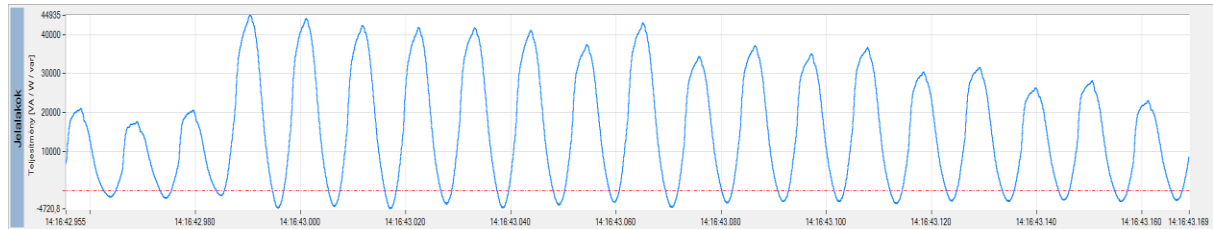
Nem-szinuszos hálózat esetén is a feszültség és áram pillanatértékeinek szorzatából kapjuk meg a pillanatnyi teljesítményt.

$$p = ui \quad (7.22.)$$

A 7.4. ábrán egy szimulált harmonikusokkal terhelt feszültség és áramjelből kialakuló teljesítmény jelalak látható, a 7.5. ábra viszont egy valós ipari körülmények között mért teljesítmény jelalakot mutat.



7.4. ábra: Teljesítmény jelalakja nem-szinuszos hálózatok esetén



7.5. ábra: Valós villamos hálózat teljesítmény jelalakja

Hatásos teljesítményt mindig csak az azonos frekvenciájú feszültség és áram okozhat, így a teljes hatásos teljesítményt megkapjuk, ha összeadjuk az azonos frekvenciájú feszültségek és áramok okozta hatásos teljesítményeket.

$$P = P_1 + P_H \quad (7.23.)$$

$$P_1 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} u_1 i_1 dt = U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (7.24.)$$

$$P_H = \sum_{h \neq 1} U_h I_h \cos \varphi_h \quad (7.25.)$$

Meghatározható az eredő látszólagos teljesítmény (S), és csak az alapharmonikusra (S_1) vonatkoztatott. Az S_N a nem-alapharmonikusra vonatkozó látszólagos teljesítmény, azaz az a látszólagos teljesítmény, amit a harmonikustartalom okoz.

$$S = UI \quad (7.26.)$$

$$S_1 = U_1 I_1 \quad (7.27.)$$

$$S_N = \sqrt{S^2 - S_1^2} \quad (7.28.)$$

A nem-alapharmonikusra vonatkozó látszólagos teljesítmény több tagból tevődik össze. A D_I a harmonikus áram és az alapharmonikus feszültségek által létrehozott ún. áram torzítási teljesítmény, ami szintén nem okoz valós teljesítményáramlást, hanem csak terheli a hálózatot. A D_U a harmonikus feszültség és az alapharmonikus áramok által létrehozott feszültség torzítási teljesítmény.

$$S_N^2 = D_I^2 + D_U^2 + S_H^2 \quad (7.29.)$$

$$D_I = U_1 I_H = S_1 (THD_I) \quad (7.30.)$$

$$D_U = U_H I_1 = S_1 (THD_U) \quad (7.31.)$$

A S_H a harmonikusokra vonatkozó látszólagos teljesítmény, ami tartalmazza a harmonikusok okozta hatásos teljesítményt (P_H), valamint a harmonikusokra vonatkozó torzítási teljesítményt (D_H), amelyet a nem alapharmonikus és a nem azonos frekvenciájú feszültségek és áramok okoznak. Megjegyzendő, hogy ezen megközelítést alkalmazva a D_H tartalmazni fogja a harmonikusra vonatkozó azonos frekvenciájú feszültség és áram között fellépő meddőteljesítményt.

$$S_H = U_H I_H = S_1 (THD_I) (THD_U) \quad (7.32.)$$

$$S_H = \sqrt{P_H^2 + D_H^2} \quad (7.33.)$$

$$D_H = \sqrt{S_H^2 - P_H^2} \quad (7.34.)$$

Definiálható még ún. nem-aktív teljesítmény, ami tartalmazza mindazon teljesítményrészeket, amelyek nem okoznak valós teljesítményáramlást.

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (7.35.)$$

Kiszámítható a teljesítménytényező az alapharmonikusra ($\cos\varphi_1$), vagy a teljes feszültség és áramjelre is ($\cos\varphi$). Nem szinuszos hálózatok esetén azonban φ nem értelmezhető, így a $\cos\varphi$ paraméterből nics értelme kiszámítani φ értékét.

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (7.36.)$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (7.37.)$$

	Kombinált	Alapharmonikus teljesítmény	Harmonikus teljesítmény
Látszólagos	S	S_1	S_N S_H
Hatásos	P	P_1	P_H
Meddő	N	Q_1	D_I D_U D_H
Vezeték kihasználás	$\cos\varphi = P/S$	$\cos\varphi_1 = P_1/S_1$	
Harmonikus szennyezés			S_N/S_1

7.6. ábra: Nem-szinuszos hálózat esetén definiálható teljesítményparaméterek [91]

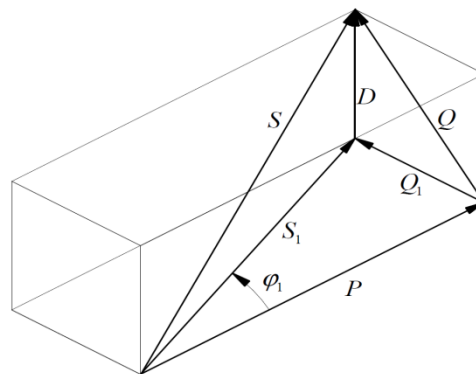
Egyes szakirodalmak [1, 92] a torzítási teljesítmény (D) alatt az összes nem azonos frekvenciájú feszültség és áram által létrehozott teljesítményt értik, aminek a teljesítmény átlagértéke nulla.

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (7.38.)$$

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \sin \varphi_h \quad (7.39.)$$

Sok esetben [1] elhanyagolják a feszültség teljes harmonikus torzítását, mivel kis- és középfeszültségű hálózatok esetében kevesebb mint 8%-os THD van megengedve, így a torzítási teljesítményt teljes mértékben az áram felharmonikusai okozzák csak, és nem is ébredhet felharmonikus teljesítmény.

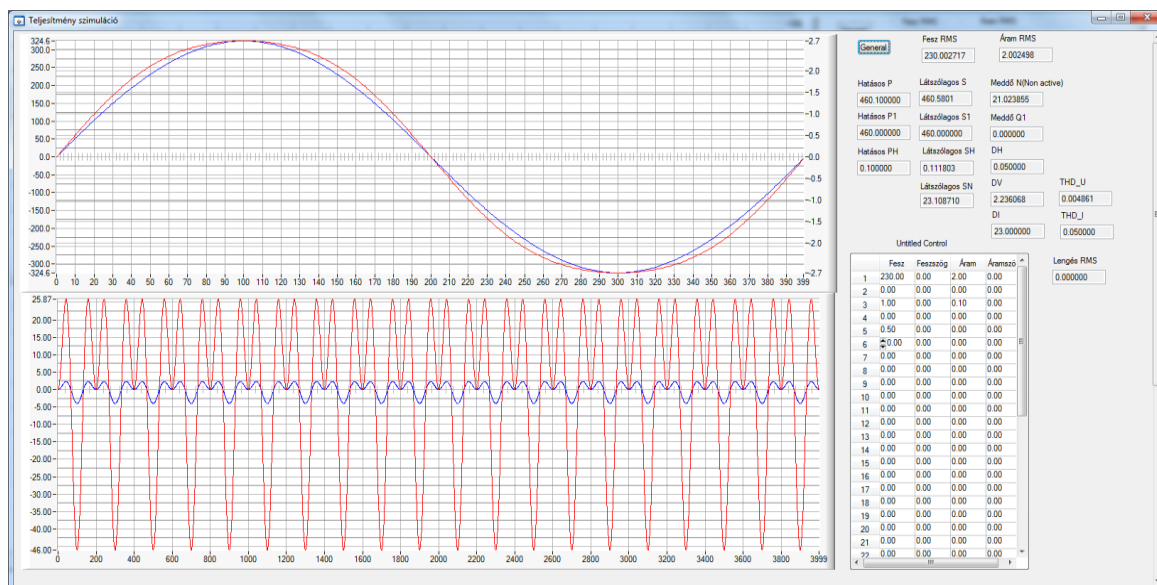
$$D \approx S_1 THD_I \quad \text{ha} \quad THD_U \approx 0$$



7.7. ábra: Szemléltető ábra $THD_U=0$ esetén

7.4. Szimuláció

Elkészítettem egy szimulációs programot, ahol tanulmányozhattam a nem-szinuszos hálózatoknál fellépő különböző teljesítményparaméterek alakulását. A szimulációs programban negyvenedik felharmonikusig állíthatók a feszültség-, illetve az áramjelek harmonikus tartalma. Állítható az egyes harmonikusok amplitúdója és kezdőfázisuk. A program generálja és kirajzolja a feszültség- és áramjelet, valamint az egyes teljesítménygörbéket (hatásos, meddő, torzítási teljesítménygörbék). A program az előző fejezetben bemutatott számítási módszerekkel kiszámolja az egyes teljesítményparamétereket. A szimulációs program készítése során nem fogadtam el azt a megkötést, hogy a feszültség szinusznak tekinthető, mivel később előfordulhat olyan hálózat, ahol a feszültség THD értéke a megengedett fölé esik, és ebben az esetben látni kívánom az egyes paraméterek alakulását.



7.8. ábra: Szimulációs program

A szimulációs program teljes mértékben úgy adta vissza az egyes teljesítmény-paramétereket, ahogyan az a beállított feszültség- és áramjelek esetén várható volt. Tanulmányoztam, hogy milyen változások történnek a teljesítmény-paramétereken, ha az egyes harmónikusok amplitúdója vagy fázisszöge változik.

7.5. Teljesítmény-paraméterek kiszámításának beépítése az online hálózatanalizáló rendszerbe

A számítási eljárások beépítettem a Miskolci Egyetem Elektrotechnikai- Elektronikai Tanszéken kifejlesztett hálózatanalizáló berendezésbe. A számítási módszereket úgy kellett beépíteni, hogy a számítások kompatibilisek legyenek a mintaszámmal történő szinkronizáló eljárással. A paraméterek 10 periódusként számolódnak ki, így az új teljesítmény-paraméterek is minden 10 periódusonként kerülnek meghatározásra, így másodpercenként körülbelül 5 értéket kapunk az egyes paraméterekből. A számítások valós időben a mérés során történnek, a mérőprogram kijelzőjén néhány teljesítmény-paraméter megjelenítésre kerül (7.9. ábra), a többi a mérés után a kiértékelő alkalmazás segítségével analizálható.

RMS	R	S	T	Asymmetry
1. Rack	235.327	234.825	236.376	0.658
2. Rack	2.815	0.017	0.010	296.009
3. Rack	0.000	0.000	0.000	0.000
4. Rack	0.000	0.000	0.000	0.000
5. Rack	0.000	0.000	0.000	0.000

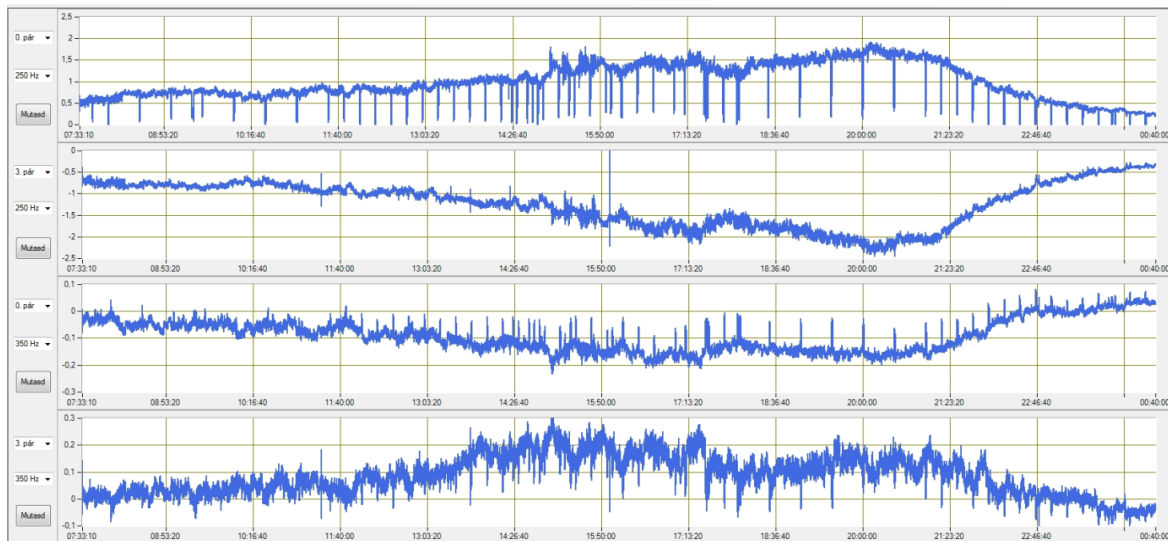
THD	R	S	T
1. Rack	4.092	4.305	4.628
2. Rack	4.132	14.904	10.758
3. Rack	0.000	0.000	0.000
4. Rack	0.000	0.000	0.000
5. Rack	0.000	0.000	0.000

Power	S	P	N	PF	S1	P1	Q1	PF1
0.	662.37	662.26	11.61	0.9998	661.16	661.15	3.98	1.0000
1.	4.03	0.27	4.02	0.0681	0.27	0.26	0.03	0.9930
2.	2.44	-0.25	2.43	-0.1036	0.32	-0.25	0.20	-0.7869
3.	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.0000
4.	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.0000
5.	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.0000
6.	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.0000
7.	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.0000
8.	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.0000
9.	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.0000
10.	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.0000
11.	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.0000

7.9. ábra: Online kiértékelés során megjelenő paraméterek

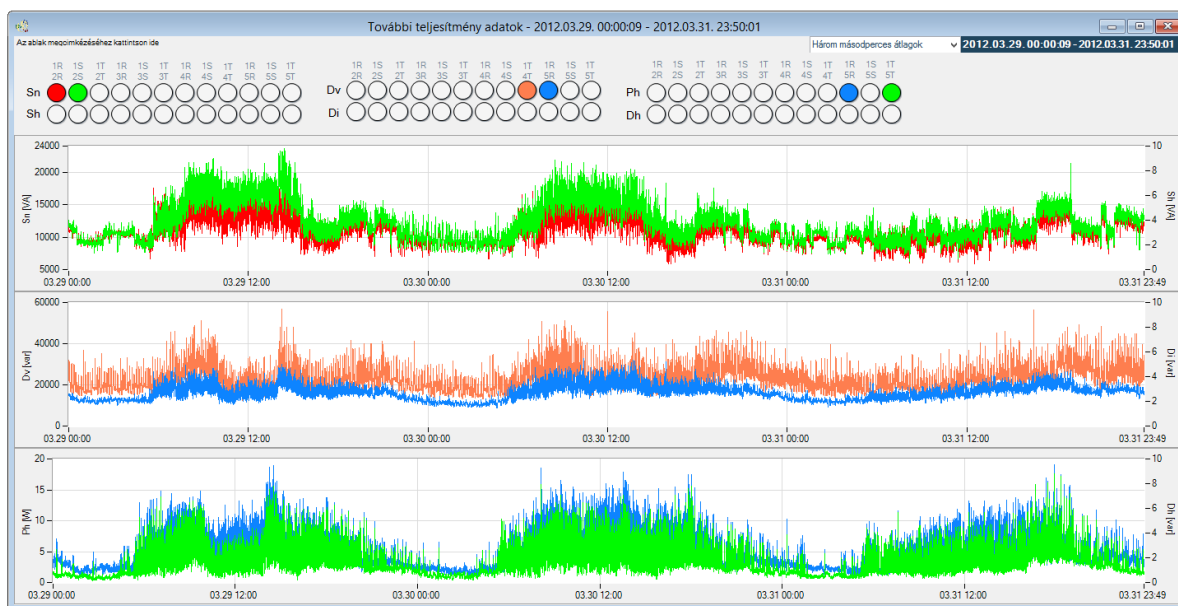
A kiértékelő program egy külön ablakban megjeleníti a harmonikus teljesítmény-áramlásokat. A 7.10. ábrán megfigyelhető fentről lefelé a 150Hz-es, 250Hz-es, 350Hz-es és

450Hz-es hatásos teljesítmények időbeli változása. Bizonyos berendezések működésénél előfordulnak a harmonikus teljesítmény-áramlások.



7.10. ábra: Harmonikus teljesítmények időbeli változásai [kW]

A 7.11. ábrán a kiválasztott teljesítmény-paraméterek változásai vizsgálhatók. Megjeleníthető a különböző torzítási teljesítmények, nem-alharmonikusra illetve harmonikusra vonatkozó látszólagos teljesítmények. Ilyen paraméterek vizsgálatára még nem volt lehetőség, a kereskedelemben kapható berendezések ilyen aprólékosan nem képesek vizsgálni a villamos energia felhasználását.



7.11. ábra: S_N , D_U , P_h teljesítmény-paraméterek időbeli változása

7.6. A nem-aktív és a meddőteljesítmény között kapcsolat

A nem-aktív teljesítmény és az alapharmonikus meddőteljesítmény nagyon hasonló mennyiségek, mivel nem okoznak valós teljesítményáramlást a villamos hálózaton, hanem csak veszteséget a vezetőkön. A lineáris középtértük nulla, de a pillanatértékük nem. A nem-aktív teljesítmény tartalmazza a torzítási teljesítményértékeket. A nem-aktív teljesítmény

és az alapharmonikus meddőteljesítmény közötti kapcsolat azonban nem teljesen egyértelmű, ezért ezek vizsgálatával foglalkoztam.

A szimulációban olyan harmonikusokat kreáltam a feszültség és áram esetén, amik között nem ébredhet meddőteljesítmény, viszont torzítási teljesítmény igen. Azt tapasztaltam, hogy bizonyos harmonikustartalom esetén a nem-aktív teljesítmény nulla volt, miközben a rendszerben áram és feszültség torzítási teljesítmények léptek fel. Mivel a nem-aktív teljesítmény tartalmazza a torzítási teljesítményt, az volt a kérdés, hogy fordulhat elő ez az állapot, amikor a nem-aktív teljesítmény nulla, viszont a torzítási teljesítmények nem. Egyenletek segítségével sikerült levezetnem, hogy abban az esetben, ha D_U és D_I egyenlő, valamint D_H és Q_1 nulla, akkor a nem-aktív teljesítmény nulla lesz a $-2P_1P_H$ tag miatt.

$$S^2 = S_N^2 + S_1^2 \quad (7.40)$$

$$P^2 + N^2 = D_I^2 + D_U^2 + S_H^2 + S_1^2 \quad (7.41)$$

$$(P_1 + P_H)^2 + N^2 = D_I^2 + D_U^2 + P_H^2 + D_H^2 + P_1^2 + Q_1^2 \quad (7.42)$$

$$2P_1P_H + N^2 = D_I^2 + D_U^2 + D_H^2 + Q_1^2 \quad (7.43)$$

$$N^2 = D_I^2 + D_U^2 + D_H^2 + Q_1^2 - 2P_1P_H \quad (7.44)$$

Példa:

$$U_{50\text{Hz}}=200\text{V}, I_{50\text{Hz}}=10\text{A}; U_{250\text{Hz}}=2\text{V}; I_{250\text{Hz}}=0,1\text{A}; \varphi_{50\text{Hz}}=0; \varphi_{250\text{Hz}}=0;$$

$$P_{50\text{Hz}}=2000\text{W}; P_{250\text{Hz}}=0,2\text{W}$$

$$D_I=D_U=20\text{var}$$

$$Q_1=0\text{var}$$

$$-2P_{50\text{Hz}}P_{250\text{Hz}}=-800\text{W}^2$$

$$D_I^2+D_U^2=800\text{var}^2$$

$$N=0\text{var}$$

7.7. Összegzés

Az egyes teljesítmények több kisebb teljesítmény-paraméterre való szétbontásával a villamos energia felhasználásának hatékonysága a korábbtól sokkal aprólékosabban vizsgálható. Nem találtam a kereskedelemben kapható berendezések (LEM Memobox 808, TRANSANAL-16, Fluke 434/435, UMG 511) között olyat, ami ilyen szinten képes lenne felbontani a teljesítményt, és ilyen gyakorisággal és pontossággal meghatározni azokat. Az elkövetkezőkben mérésekkel történő tapasztalatok szerzésére, az egyes teljesítmény-paraméterek időbeli változásának vizsgálatára, analizálására kerül majd sor.

A teljesítmény-összetevők vizsgálatának gyakorlati használhatóságát is jól mutatja, hogy diplomadolgozat keretében egy hallgató különböző fogyasztók hatására létrejövő harmonikus teljesítményáramlásokat vizsgálta a kifejlesztett rendszer segítségével. [97]

7.8. Új tudományos eredmények

4. Tézis: Kidolgoztam egy olyan számítógépes méréstechnikai- és adatfeldolgozási eljárást, amellyel vizsgálhatóak a harmonikus feszültségek és áramok hatására kialakuló különböző teljesítmény-paraméterek 10 periódusonkénti változásai. Az eljárást beépítve egy villamos paramétereket meghatározó mérőrendszerbe, egy olyan fejlett villamos hálózatanalizáló rendszert fejlesztettem ki, ami nagy felbontással képes kiértékelni egy nem-szinuszos hálózaton fellépő harmonikus feszültség és/vagy áram által keltett harmonikus, illetve torzítási teljesítményeket.

Bebizonyítottam, hogy a harmonikusokkal terhelt villamos hálózatok esetén a teljesítmény összetevőinek pontos számításával meghatározható a felharmonikus teljesítmények értéke és áramlásának iránya, valamint a feszültség és áram által keltett torzítási teljesítmények. Igazoltam, hogy harmonikusokkal terhelt rendszerek esetén a nem-aktív teljesítmény értéke lehet nulla bizonyos körülmények között, aminek az oka, hogy a nem-aktív teljesítménybe beépül egy $-2P_1P_H$ összetevő, ami az alapharmonikus hatásos teljesítmény és a harmonikusok hatásos teljesítmény szorzatának kétszerese.

8. Aszinkron mérőrendszer kifejlesztése multiplexelt mérésadatgyűjtővel

8.1. Bevezetés

A villamos energetikai kutatásaim tudományos szempontból általános érvényű módszertani eredmények elérését biztosították, ezért ezek az eredmények a *méréstechnikai alkalmazások szélesebb körében* is lehetőséget nyújtottak a továbbfejlesztésre és az alkalmazásra.

A disszertációm mellékágának tekinthetőek az ebben a fejezetben bemutatott tudományos eredmények, valamint az elektromos kéziszerszámok tesztelésére kidolgozott vezérlési és jelfeldolgozó mérőrendszer. Ipari megrendelés hatására célszerű volt kutatásokat végezni a rendszer kifejlesztése érdekében, mivel speciális megoldásokat kellett kidolgozni annak érdekében, hogy az ipari megrendelés igényeit sikerüljön kielégíteni. A fejlesztés témája nem állt távol a kutatási területemtől, mivel itt is főleg villamos-paraméterek folyamatos mérését kellett biztosítani, de emellett egyéb, nem villamos paraméterek mérését is meg kellett oldanom, úgymint fordulatszám és hőmérséklet.

A szakirodalomban fellelhető számos publikáció, ami kéziszerszámok számítógépes mérőrendszerrel történő tesztelését tárgyalja [98-101], ami mutatja, hogy ez a terület a tudományt is foglalkoztatja.

8.2. A feladat részletezése

Egy, a forgó mozgást végző kéziszerszámok paramétereinek regisztrálása működés közben hasznos információkat szolgáltathat a fejlesztő mérnöknek a fejlesztés fázisában, ezért kellett a Miskolci Egyetem Elektrotechnikai- Elektronikai Tanszékének a Bosch miskolci telephelyének felkérésére kifejleszteni egy olyan univerzális tesztberendezést, amely párhuzamosan 3 villamos gép egyenként 7 paraméterének mérésére és analizálására alkalmas. Elvárás volt, hogy a 3 gépet egymástól független tápellátással lehessen működtetni akár úgy, hogy az egyik az amerikai hálózati feszültség szerint, a másik az európai, a harmadik a japán szabványok szerint kap tápfeszültséget. Továbbá szükséges volt a gépek ki- és bekapcsolása szabadon megválasztható ütemezésben, túláram és túlmelegedés figyelés, valamint hűlési ciklusok beiktatásának lehetősége.

Összefoglalva a mérő-, vezérlő-, tesztelő-rendszer kiépítésénél a legfontosabb szempontok a következők voltak:

- forgó mozgást végző villamos berendezések tesztelésére legyen alkalmas;
- legyen alkalmas három berendezés párhuzamos tesztelésére egymástól teljesen függetlenül, aszinkron módon;
- a tesztelési folyamatok a felhasználó által előre definiált ütemezés alapján történjenek;

- feszültség, áram, teljesítmény, fordulatszám és négy hőmérséklet mérésére legyen alkalmas minden egyes tesztelendő berendezés esetében (összesen 21 csatornán történő mérés);
- biztosítsa a folyamatos, megszakítás nélküli adatgyűjtést, adatfeldolgozást és adatmentést;
- túláram és túlmelegedés védelmet biztosítson;
- valamint az egyik legfontosabb szempont volt a megvalósítás költségeinek minimalizálása.

A minimalizált költségen történő megvalósítás érdekében olyan hardver- és szoftver-megoldásokat kellett kifejleszteni, amely a Bosch miskolci telephelyén folytatott tesztelés speciális igényeit maximális mértékben kielégíti.

On-line feldolgozás megvalósítása itt is fontos szempontként szerepelt, mivel azonban a mintavételezést általában 3200 kHz-es sebességen kellett elvégezni (nem volt igény a szabványok által előírt magasabb mintavételezési sebességre), ami a villamos energiaminőség vizsgálatnál használt 20 kHz-től alacsonyabb, ezért az nem okozott jelentős problémát a fejlesztés során.

8.3. Multiplexelt mérésadatgyűjtő kártyákkal megvalósított aszinkron mérőrendszer

A költségek minimalizálása érdekében itt is személyi számítógép alapú mérőrendszerben kellett a tanszéki kollegáimmal közösen gondolkodnunk. A költségek további csökkentése érdekében multiplexelt adatgyűjtő kártyát kellett alkalmaznunk, mivel a szimultán mérésadatgyűjtő kártya jelentős többletköltséget jelentett volna.

A National Instruments [102] cégnél kapható NI PCI-6143 típusú szimultán kártya ára akkoriban hozzávetőlegesen 350.000 forint volt, ami mindemellett csak 8 analóg bemenettel és 8 digitális be/kimenettel rendelkezik, amikor jelen esetben 21 analóg bemeneti csatornán való mérést kellett biztosítani.

Az NI PCI-6220 típusú multiplexelt kártya 145.900 forintba került és 16 analóg bemenettel, valamint 24 digitális be/kimenettel rendelkezik. Mivel a hőmérséklet méréséhez egy speciális hőmérséklet-mérő kártyát volt célszerű használni, ezért a feszültség, áram és fordulatszám méréséhez szükséges 9 csatornát egy ilyen multiplexelt kártya biztosítani képes. A kártya nagyszámú digitális be/kimenete pedig lehetőséget biztosít az egyes tesztelendő berendezések feszültségeinek be- és kikapcsolására. A feszültség és áram méréséhez itt is a LEM [103] által gyártott Hall-generátoros mérő-átalakítókat használtuk. A fordulatszám-mérés GLV12-8-200 típusú fordulatszám jeladóval történik, ami egy négyszögjelet szolgáltat a kimenetén. A négyszögjelet analóg bemeneten mérve meghatározható annak frekvenciája, és így a forgómozgást végző test forgásának sebessége.



8.1. ábra: NI PCI-6143 (bal oldali kép) és NI PCI-6220 (jobb oldali kép) mérésadatgyűjtő kártya

A hőmérséklet-méréseket a megrendelés alapján hőelemes hőmérséklet-érzékelőkkel kellett megvalósítani. Az NI PCI 4351 típusú hőmérsékletmérő kártya 100.000 forint alatt beszerezhető, szintén multiplexelt adatgyűjtő kártya, amely alkalmas hőelemmel történő nagy pontosságú hőmérséklet-mérésekhez. A hőelemmel történő mérésnél a kártyát egy TC-2190 hőelem modulhoz kell csatlakoztatni, amibe a hőelemek szabványosan csatlakoztathatóak. A modulhoz 14 hőelemet lehet csatlakoztatni, így az az elvárt maximum 12 hőmérséklet-méréshez megfelelő.



8.2. ábra: NI PCI 4351 típusú hőmérsékletmérő kártya és a TC-2190 hőelem modul

Az alacsony megvalósítási költségek érdekében multiplexelt mérésadatgyűjtő kártyákat választottunk, ami miatt a fejlesztés során a legnehezebb feladatot az jelentette, hogy a hagyományos adatgyűjtő kártyákkal olyan szinkronizálási és időzítési feladatokat oldjunk meg, amire ezek a kártyák alapvetően nem alkalmasak, például párhuzamos, mégis egymástól független tesztelési folyamatok futtatásának biztosítása [104, 105]. Az én feladatom volt, hogy olyan új szoftvermegoldásokat fejlesszek ki, amelyeknek a segítségével a három különálló tesztelési folyamatot egymástól teljesen függetlenül lehet vezérelni és végrehajtani ezekkel a multiplexelt kártyákkal. A feladatot megbonyolította, hogy a két mérésadatgyűjtő kártya szinkron működését is biztosítani kellett valahogy, mivel azok nem képesek azonos sebességgel mintavételezni. A feszültség, áram és frekvencia méréséhez magasabb, MHz-ben mérhető mintavételezési frekvenciára van szükség, a hőmérséklet-mérő kártya pedig csak néhány Hz-es, vagy akár kevesebb, mint 1 Hz-es mintavételezésre képes. A kéziszerszámok hőmérsékletének mérése nem követel meg gyakori mintavételezést, mivel a hőmérséklet változása egy lassú, több másodpercet igénybevevő folyamat. A mérés során arra is figyelni

kellett, hogy az összetartozó feszültség, áram, fordulatszám és hőmérséklet adatok nem keveredjenek össze más tesztelendő berendezés mérési értékeivel.

A választott kártyák tehát nem alkalmasak három teljesen független mérési folyamat indítására és leállítására, mivel kártyánként csak egy mérési feladat indítható analóg bemeneteken történő mintavételezésre. A probléma úgy kerülhető meg, ha a mérés leállítására akkor sem kerül sor, ha az egyik berendezés tesztelése befejeződik. Az adott tesztelés befejezése után csak az adatok mentését, kiértékelését és megjelenítését kell leállítani, magát a mintavételezést nem, így nem zavarható meg a másik tesztelési folyamat.

Mivel azonban új tesztelési feladat indítására nincs lehetőség, ha ahhoz tartozó csatornákon nem folyik a mintavételezés, ezért előre meg kell mondani, milyen csatornákon várható, hogy mérés fog történni. Annak érdekében viszont, hogy a felhasználó minél nagyobb szabadságot kapjon a mintavételezési frekvencia beállításában, indításkor kell előre definiálni a teszterek számát, és a mérendő mennyiségeket. Ezt azért célszerű ilyenkor megtenni, mivel multiplexelt mérésadatgyűjtő esetén a mintavételezési frekvencia megoszlik a mérendő csatornák között. Azaz minél kevesebb csatornán mér a felhasználó, annál nagyobb mintavételezési frekvenciát lehet alkalmazni. Abban az esetben, ha a felhasználó tudja előre, hogy két tesztberendezést fog csak egyszerre üzemeltetni, vagy ha olyan berendezést tesztl, aminél kevesebb hőmérsékletet akar mérni, vagy nincs szükség a fordulatszám mérésére, csökkentheti a mérendő csatornák számát és így növelheti a csatornánkénti mintavételezési frekvenciát.

Természetesen a mintavételezés után szűkíteni lehet a mérendő paramétereket, de multiplexelt mérőkártya esetén a mintavételezés leállítása nélkül nincs lehetőség a mintavételezési beállítások módosítására.

Mindezek miatt döntöttem úgy, hogy a tesztfolyamatok megkezdése előtt egy inicializáló fázisban (8.3. ábra) be kell állítani azokat a csatornákat, amelyekre szükségünk van az elvégezendő tesztelési feladatok végrehajtása érdekében. Az inicializáló fázis után fizikailag elindul a kártyákon a mintavételezés, de az adatok mentése és feldolgozása csak akkor indul el, ha az egyes tesztelési folyamatok elindítása megtörténik. Az egyes teszterek leállítása, cseréje esetén tehát csak az adatok lementése és kijelzése szakad meg. A módszer hátránya természetesen, hogy előre kell definiálni azokat a csatornákat, amelyeken mérni szeretnénk, valamint az, hogy a mérendő csatornák száma nem növelhető meg a teljes mérési folyamat leállítása nélkül.

	Feszültség	Áram	Fordulatszám	Hőmérséklet I	Hőmérséklet II	Hőmérséklet III	Hőmérséklet IV
Teszter 3	ON	☒	☒	☒ J	☒ J	☒ K	☒ K
Teszter 2	ON	☒	☒	☒ K	☒ K	☒ J	☒ K
Teszter 1	ON	☒	☒	☒ K	☒ K	☐ K	☒ K

Maximális mintavételezési frekvencia [Hz] 5555
Mintavételezési frekvencia [Hz] 5000

Hőmérséklet mintavételezési sebessége: Gyors
Teszt feszültség frekvenciája: 50 Hz

Vissza Mérés indítása

8.3. ábra: Mérés inicializálási fázisa

A 8.3. ábrán látható inicializálási ablakban az egyes csatornák be- és kikapcsolásakor változik a maximálisan beállítható mintavételezési frekvencia, így a felhasználó mindig láthatja mekkora mintavételezési sebességet állíthat be maximálisan. Az ábrán látható maximális mintavételezési sebesség csak az NI PCI-6220 típusú kártyára vonatkozik, a hőelem kártya mérési csatornáinak változtatása esetén (az ábrán zöld háttérrel jelölve) a mintavételezési frekvenciát maga a kártya állítja be. A kártya nem támogatja a mintavételezési frekvencia változtatását, ezért sincs szükség a paraméter állítására.

Az inicializálási fázis után, mikor már elindult a mintavételezés, lehetőség van a tesztelési feladatokat elindítani (8.4. ábra). A három teszt egymástól függetlenül indítható, leállítható, azonban azon paraméterek mérésének beállítására már nincs mód, amelyek az inicializálási ablakban nem lettek bekapcsolva. Mivel a háttérben már a mintavételezés elindult, ezért olyan csatorna mintáinak feldolgozása nem is történhet meg, amin fizikailag nem indult el a mérés.

8.4. ábra: Adott tesztelési feladat elindítása

Ennek a rendszernek a szoftvermegvalósítása során is többszálalást alkalmaztam. Ebben az esetben nem a real-time feldolgozás megvalósítása volt a fő szempont, mivel a mintavételezési frekvencia alacsonyabb a szabvány által előírt villamosenergia-vizsgálattól. A többszálalás rendszer kiépítésének a célja a három tesztelési feladat teljes mértékű függetlenítése, és a logikailag „szebb” megvalósítás volt. A többszálalás rendszer felépítése az 8.6. ábrán látható. A két mérésadatgyűjtő kártya külön szálon fut és küldi a mintákat az adott teszter szálának. Abban az esetben, ha az inicializálási ablakban az egyik tesztert nem állítottuk be, akkor nem indul külön szál az adott teszterhez. Abban az esetben, ha az adott

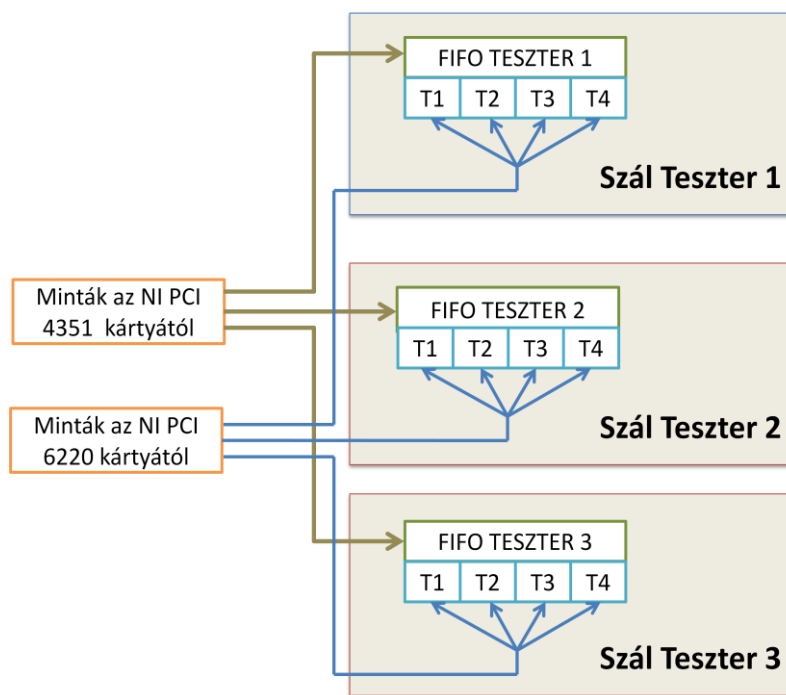
tesztet beállítottuk az inicializálási ablakban, de még magát a tesztelési folyamatot nem indítottuk el, akkor a szál létrejön, fogadja az adatokat, de nem foglalkozik velük, „eldobja” azokat.

A többszörös megvalósítás előnye ennél a kétkártyás rendszernél, hogy könnyedén meg lehet oldani a két kártya eltérő mintavételezési sebessége okozta szinkronizálási problémát. Az NI PCI 6220 kártya mintavételezési sebessége 250 kHz az összes csatornára vonatkozóan, viszont a biztonságosabb mintavételezés érdekében ezt lekorlátoztuk 50 kHz-re. Abban az esetben, ha a maximális 9 csatornán történik a mintavételezés legfeljebb 5555 Hz-et állíthat be a felhasználó. Az NI PCI 4351 kártya mintavételezési sebességének beállításait a 8.5. ábra mutatja. A 8.5. ábrából jól látszik, hogy a hálózati feszültség frekvenciája függvényében különböző zavarssűrűségeket lehet beállítani. Ha 50, 60 és 400 Hz-re szűrünk, jóval lassabb mintavételezést lehet beállítani, mint a többi esetben. Többcsatornás mérés is jelentős mintavételezési sebességcsökkentést jelent, ami még a csatornák között megoszlik. Többcsatornás gyors mintavételezés esetén, ha a hőmérsékletmérésre használt csatornák száma nagyobb, mint 10, akkor a mintavételezési frekvencia 1 Hz alá csökken. Észrevehető, hogy a két más célra gyártott kártya mintavételezési frekvenciája nagymértékben eltér.

Mérési mód		Mintavételezési frekvencia [Hz]	Villamos hálózati zavarssűrűsés
Egycsatornás mérés	lassú	10	50, 60, 400 Hz
	gyors	50	50, 400 Hz
	gyors	60	60 Hz
Többcsatornás mérés	lassú	2,8	50, 60, 400 Hz
	gyors	8,8	50, 400 Hz
	gyors	9,7	60 Hz

8.5. ábra: Az NI PCI 4351 kártya mintavételezési sebességének beállításai [106]

A rendszer kifejlesztésekor a megbízás alapján a villamosenergia-minőség vizsgálatánál megkövetelt 10 periódus helyett egy másodpercekre kellett az egyes paramétereket meghatározni. A teszterek számai a saját FIFO-ba megkapják az NI PCI 6220 típusú kártyától a hozzájuk tartozó mintákat, amiből a teszter szál folyamatosan határozza meg minden egy másodperces időtartományra a különböző villamos paramétereket (RMS, THD, teljesítmény-paraméterek) és a fordulatszámot. A hőmérséklet-paramétereket az NI PCI 4351 típusú kártya küldi a teszter szálainak, ami folyamatosan frissíti azokat a saját memóriaterületükön (T1, T2, T3, T4). Ha kevesebb csatornán történik hőmérsékletmérés, illetve az adott tesztelés alatt nincs hőmérsékletmérés, akkor a megfelelő számú hőmérséklet-értékeket kapja meg a szál. Minden másodperces adatmentés során mindig a friss hőmérséklet-érték kerül hozzárendelésre az egy másodpercre vonatkozó paraméterekhez. Mivel a hőmérséklet-változás egy lassú folyamat, és mivel a hőmérsékletmérő kártya csatornára vonatkozó mintavételezési sebessége 1 Hz körüli vagy attól alacsonyabb, ezért ez a módszer megoldja a két kártya közötti szinkronizálási problémát.



8.6. ábra: A tesztelő rendszer többszálú felépítése

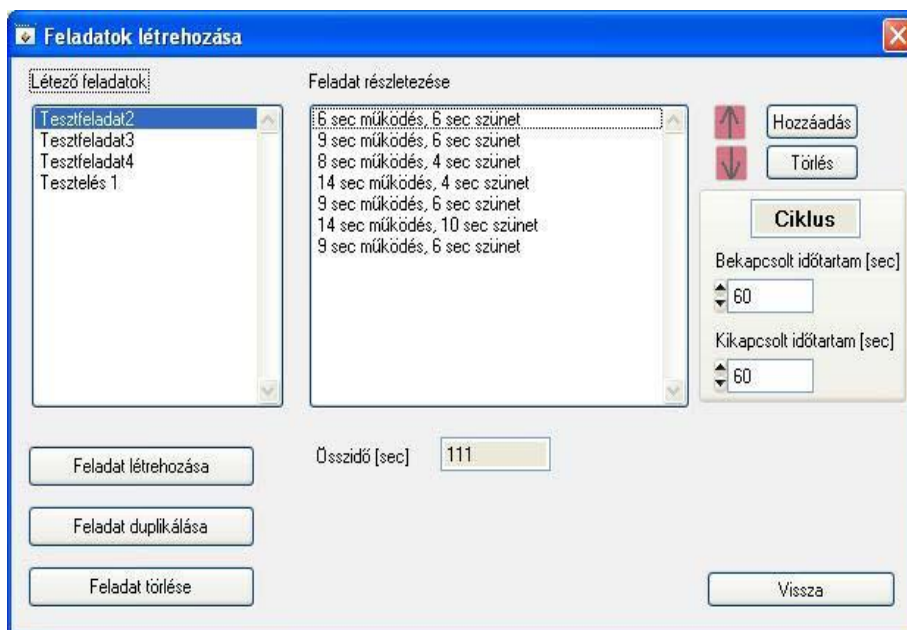
8.4. UniTeszter további funkcióinak bemutatása

A kifejlesztett mérő-, vezérlő- és tesztelésre alkalmas berendezést UniTeszter-nek neveztük el. Az UniTeszter két kábelen csatlakozik a vezérlő PC-re, az egyik kábellel az NI PCI 6220 típusú mérésadatgyűjtő kártyához, a másik kábellel az NI PCI 4351 hőmérsékletmérő kártyához.



8.7. ábra: Az elkészült berendezés

A tesztgépek működése szoftverből programozható, a tesztgépek mágneskapcsoló vezérlésével elindíthatóak és leállíthatóak. A vezérlést az NI PCI 6220 típusú kártya digitális be/kimeneteivel történik. Ennek megfelelően a tesztfolyamat működési és leállási ütemekből áll, amely ütemezést a felhasználó tetszőlegesen állíthat be. Egy működési és leállási ütemet a program egy ciklusnak tekint. A működési szakaszban a tesztberendezés megkapja a működéséhez szükséges feszültséget, a leállási szakaszban a tesztelendő eszköz pihen, hűlési szakaszban van. A tesztelési feladatok elindítása előtt a felhasználó ciklusokból felépülő feladatokat definiálhat (8.8. ábra).



8.8. ábra: Tesztfeladatok definiálása

A tesztfolyamathoz a felhasználó áramfelvétel-limitet és hőmérséklet-limiteket állíthat be. A tesztfolyamat közben az áramot és hőmérsékleteket a rendszer folyamatosan ellenőrzi, és ha bármelyik érték eléri a felhasználó által beállított limit értéket, akkor a tesztelés megszakad. Áramtúllépés esetén a tesztfolyamat véglegesen leáll, hőmérséklet túllépés esetén a felhasználó visszakapcsolási hőmérsékletet definiálhat, vagy manuálisan a tesztfolyamat folytatásáról, vagy végleges leállításáról dönthet.

Az univerzális teszter a mérések vezérlésével összhangban vezérli a kéziszerszámok működését. A berendezés 3 egymástól teljesen függetlenül működtethető kéziszerszám tesztelésére alkalmas.



8.9. ábra: On-line mérés, adatfeldolgozás, tesztelés

A teszter révén bármely ország villamos hálózatának megfelelő tápfeszültség alkalmazható, akár párhuzamosan 3 különböző táp is kapcsolható a 3 tesztelendő

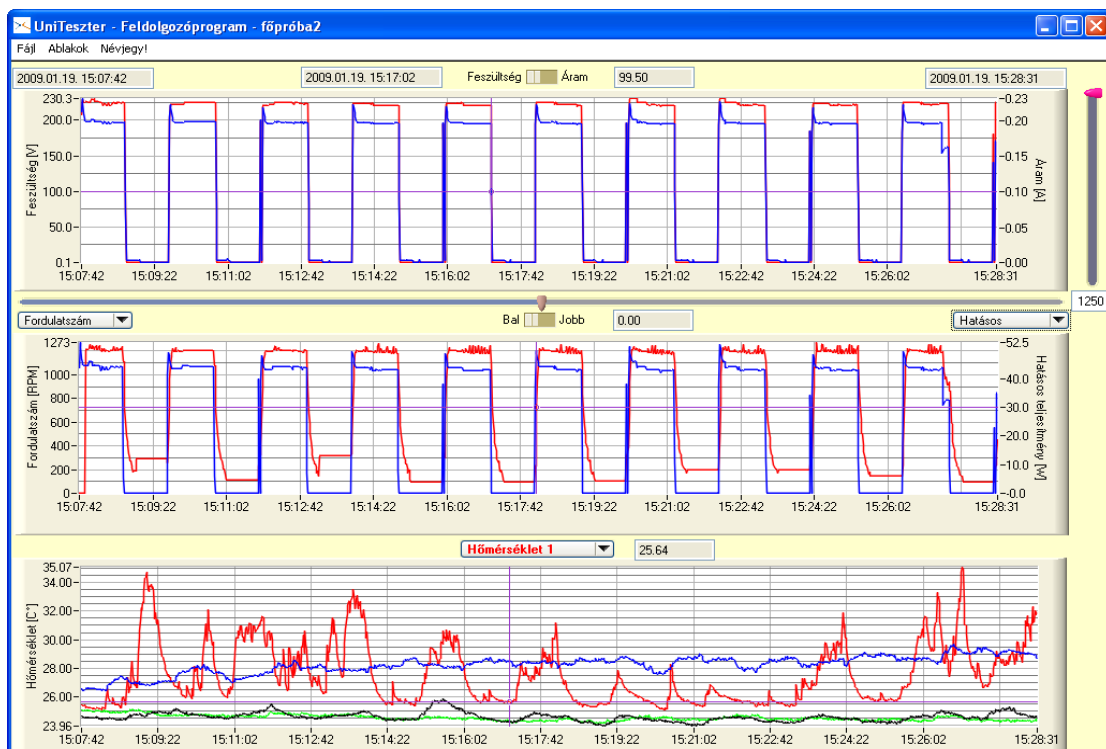
berendezésre. Ennek köszönhetően 10 – 330 VAC (450VDC) közötti feszültség szinten DC-10 kHz frekvencia között bármilyen tápellátással működtethetőek a teszgépek.

Az alaplísimber berendezésenként regisztrálja a felvett áramot, feszültséget, teljesítmény-jellemzőket, és maximum 4 ponton a hőmérsékletet. A berendezés kiegészíthető egyedi igények szerint további érzékelő bemenetekkel. Az elkészült műszer például fordulatszámérőzt tartalmaz.

Tesztelés közben on-line diagramok (8.9. ábra) jelennek meg, a tesztelés után részletes kiértékelésre és statisztikakészítésre van lehetőség.

8.5. A mért és számított adatok megjelenítése és kiértékelése

A regisztrált adatok (feszültség és áram effektív értéke és pillanatértéke, fordulatszám, hőmérsékletek, valamint a hatásos és meddő teljesítmény) időfüggvénye, valamint a feszültség és áram frekvencia-spektruma a feldolgozó programmal grafikususan megjeleníthető, a megjelenített grafikonok tabulátorral tagolt szöveges formátumban kimenthetőek.



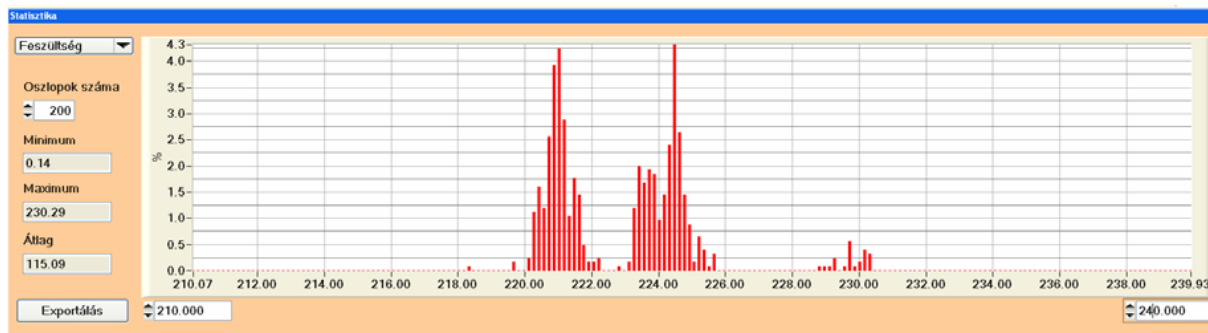
8.10. ábra: Villamos paraméterek és hőmérséklet értékek megjelenítése

Az off-line feldolgozás és kiértékelés szoftvere az alábbi jellemzők grafikus megjelenítésére (8.10 ábra) és/vagy szöveges állományba exportálására alkalmas:

- Feszültség effektív értéke (másodpercenként);
- Feszültség pillanatértékei (1 másodperces intervallumonként jeleníthető meg);
- Áram effektív értéke (másodpercenként);
- Áram pillanatértékei (1 másodperces intervallumonként jeleníthető meg);
- Fordulatszám másodpercenkénti átlagértékei;

- Áram- és feszültségmérés esetén hatásos teljesítmény;
- Áram- és feszültségmérés esetén meddő teljesítmény;
- Áram- és feszültségmérés esetén látszólagos teljesítmény;
- Áram- és feszültségmérés esetén teljesítménytényező;
- Max. 4 hőmérsékletjel másodpercenkénti megjelenítésben;
- Áram- és feszültségjelek frekvencia spektruma.

Bármely mért vagy számolt paraméter bármely időintervallumra számolt statisztikai eloszlását a 8.11. ábra mutatja.



8.11. ábra: Statisztikai analízis

A szoftver a legfontosabb eseményeket a tesztfolyamat ideje alatt naplózza. A letárolt események a következők:

- Tesztfolyamat indítása;
- Tesztfolyamat vége, üzemszerű leállítás;
- Tesztfolyamat manuális megszakítása, szüneteltetése,
- Tesztfolyamat folytatása kézi indítással, kézi megszakítás után, vagy hűlési ciklusban;
- Tesztfolyamat kézi leállítása;
- Tesztfolyamat automatikus leállítása áram-limit túllépése miatt;
- Tesztfolyamat automatikus megszakítása, szüneteltetés hőmérséklet-limit túllépése miatt;
- Tesztfolyamat automatikus folytatása hűlési ciklus után;
- Tesztfolyamat automatikus szüneteltetése tápfeszültség, vagy teszt feszültség hiánya miatt.

További ábrák és grafikonok az UniTeszterre vonatkozóan a 3. számú mellékletben találhatóak.

8.6. Összegzés

A kutatás végeredményeként olyan új szoftvervezérlési módszert dolgoztam ki, amely lehetővé teszi, hogy egy hagyományos, alacsony költségű multiplexelt mérésadatgyűjtő kártya alkalmazásával három egymástól látszólag teljes mértékben függetlenül működtethető mérőállomást alkalmazhasson a felhasználó.

A fejlesztés eredményei alapján a Miskolci Egyetem Elektrotechnikai- Elektronikai Tanszékén megépült egy olyan univerzális tesztelő berendezés, amellyel bármely ország

lakossági hálózatról táplált villamos berendezés tesztelhető, működése kielemezhető. A megépített tesztberendezés képes arra, hogy mérje a hálózati feszültséget, a felvett áramot, a fordulatszámot és több hőelem által szolgáltatott hőmérsékletértéket. A tesztberendezés egyszerre három villamos eszköz tesztelésére alkalmas. A szoftverfejlesztés során számos problémával kellett megbirkóznom, mivel a lehető legkisebb hardver költséggel kellett megoldani a feladatot.

A hőelemek miatt a hagyományos multiplexelt mérőkártya mellett a berendezésbe egy hőelem kártyát is be kellett építeni, ami azt jelentette, hogy egyszerre két mérőkártyával kellett szinkronban mérni. Mivel a két mérésadatgyűjtő kártya nem azonos mintavételezési sebességgel dolgozik, ezért meg kellett oldanom a két mérőkártya közötti szinkronizálást úgy, hogy a két mérőkártya mintavételezése során kapott adatok ne tolódhassanak el időben egymáshoz képest.

A tesztberendezést három villamos eszköz egymástól független tesztelésére kellett alkalmassá tennem. Amíg egy tesztelés folyik, addig nem lehet a mintavételezést megszakítani, mivel az olcsó árkategóriába tartozó mintavételező kártya nem engedi meg, hogy mintavesztés nélkül a mintavételezésen változtatni lehessen. Meg kellett így oldanom egyrészt azt, hogy ezek a berendezések egymástól függetlenül kezelhetőek legyenek, másrészt pedig azt, hogy minimális korlátozások mellett a lehető legnagyobb szabadságot biztosítsam a felhasználónak a mintavételezési frekvencia beállításánál. A berendezés szoftvere lehetővé teszi a paraméterek on-line mérését és feldolgozását.

8.7. Új tudományos eredmények

5. Tézis: Kidolgoztam egy olyan, alacsony költségű multiplexelt mérésadatgyűjtő kártyával megvalósítható mérés technikai- és adatfeldolgozási módszert, amivel aszinkron módon, egymással párhuzamosan és egymástól függetlenül lehet multiszenzoros mérési feladatokat ütemezett módon indítani és leállítani, működtetni, folyamat-monitorozni valamint on-line analizálni és naplózni.

A módszer segítségével költséghatékonyan lehet megvalósítani olyan mérőrendszereket, ahol egymástól független mérési és vezérlési feladatok végrehajtása a cél. A módszert 3 tesztfolyamat vezérlésére alkalmas rendszeren teszteltem, amely egyenként 7-7 mért és 12-12 számolt paraméter online kiértékelésére és állapotfelügyeletére képes. Elkészült a rendszer ipari kivitelű változata is, amelyet a Robert Bosch Power Tool Teszt csoportja több éve megaláddéssal alkalmaz.

9. Új tudományos eredmények

1. Tézis: Kidolgoztam egy új, a villamos hálózatok diagnosztikájánál alkalmazható digitális méréstechnikai eljárást a hálózati frekvencia mintaszámmal történő szinkronizálásának alkalmazására, amely kiegészítő hardver alkalmazása nélkül, kizárólag szoftver úton történő megvalósítással képes biztosítani a vizsgált időintervallum villamos hálózati frekvenciához történő szinkronizálását.

Mérésekkel igazoltam, hogy a mintaszámmal történő szinkronizálás használatához legalább másodpercenként kell új hálózati frekvenciaértéket meghatározni annak érdekében, hogy a villamos hálózatokra jellemző frekvenciaingadozás ne befolyásolja az eljárás pontosságát. Igazoltam, hogy a mintaszámmal történő szinkronizálás alkalmazásához legalább 10 kHz-es mintavételezési frekvenciával kell mintavételezni a vizsgálandó villamos hálózat feszültségjeleit és áramjeleit, illetve azt, hogy a mintavételezési frekvencia növelése, csökkenti a szinkronizálás hibáját. Az új eljárás biztosítja, hogy 10 kHz felett szabadon, megkötés nélkül megválasztható legyen a mintavételi frekvencia értéke, ellentétben az eddig használt módszerekkel, amelyek bizonyos korlátozásokkal alkalmazhatóak.

2. Tézis: Kidolgoztam egy új digitális méréstechnikai eljárást, amely nagy pontossággal és megbízhatósággal alkalmas a hálózati frekvencia meghatározására felharmonikus összetevőkkel, tranziensekkel és amplitúdó ugrásokkal terhelt hullámformák esetén.

A kidolgozott eljárás a nulla-átmenetes frekvenciabecslő módszer továbbfejlesztése, ami így a mintaszámmal történő szinkronizálás alkalmazásához pontos hálózati frekvenciaértéket biztosít. A szűrés és az amplitúdó ugrások okozta nulla-átmenet elcsúszások hatásait az eljárás kiküszöböli.

3. Tézis: Kidolgoztam a villamos hálózati paraméterek meghatározására alkalmas eljárást, ami többprocesszoros rendszerek alkalmazásával, nagy mintavételezési sebesség mellett, on-line módon képes meghatározni az A osztályos műszerekre előírt villamos paramétereket, valamint jelalakokat, 10 periódusos felbontásban.

A kifejlesztett eljárással a fejlett jelfeldolgozó processzorokkal rendelkező eszközökhöz képest lényegesen költséghatékonyabban alakítható ki a villamos hálózati paraméterek on-line kiértékelésére alkalmas rendszer. Az eljárás a logikailag különböző, eltérő időtartományra vonatkozó paraméterszámításokat külön végrehajtási egységben kezeli, így biztosítva a rendszer hatékony működését és a bővíthetőséget.

4. Tézis: Kidolgoztam egy olyan számítógépes méréstechnikai- és adatfeldolgozási eljárást, amellyel vizsgálhatóak a harmonikus feszültségek és áramok hatására kialakuló különböző teljesítmény-paraméterek 10 periódusonkénti változásai. Az eljárást beépítve egy villamos paramétereket meghatározó mérőrendszerbe, egy olyan fejlett villamos hálózatanalizáló rendszert fejlesztettem ki, ami nagy felbontással képes kiértékelni egy nem-szinuszos hálózaton fellépő harmonikus feszültség és/vagy áram által keltett harmonikus, illetve torzítási teljesítményeket.

Bebizonyítottam, hogy a harmonikusokkal terhelt villamos hálózatok esetén a teljesítmény összetevőinek pontos számításával meghatározható a felharmonikus teljesítmények értéke és áramlásának iránya, valamint a feszültség és áram által keltett torzítási teljesítmények. Igazoltam, hogy harmonikusokkal terhelt rendszerek esetén a nem-aktív teljesítmény értéke lehet nulla bizonyos körülmények között, aminek az oka, hogy a nem-aktív teljesítménybe beépül egy $-2P_1P_H$ összetevő, ami az alapharmonikus hatásos teljesítmény és a harmonikusok hatásos teljesítmény szorzatának kétszerese.

5. Tézis: Kidolgoztam egy olyan, alacsony költségű multiplexelt mérésadatgyűjtő kártyával megvalósítható méréstechnikai- és adatfeldolgozási módszert, amivel aszinkron módon, egymással párhuzamosan és egymástól függetlenül lehet multiszenzoros mérési feladatokat ütemezett módon indítani és leállítani, működtetni, folyamat-monitorozni valamint on-line analizálni és naplózni.

A módszer segítségével költséghatékonyan lehet megvalósítani olyan mérőrendszereket, ahol egymástól független mérési és vezérlési feladatok végrehajtása a cél. A módszert 3 tesztfolyamat vezérlésére alkalmas rendszeren teszteltem, amely egyenként 7-7 mért és 12-12 számolt paraméter online kiértékelésére és állapotfelügyeletére képes. Elkészült a rendszer ipari kivitelű változata is, amelyet a Robert Bosch Power Tool Teszt csoportja több éve megelégedéssel alkalmaz.

10. Eredmények hasznosítása

10.1. Bevezetés

A disszertációmban bemutatott új tudományos eredmények gyakorlati szempontból is jelentős értéket képviselnek. A tudományos eredményeim gyakorlati megvalósítása a Miskolci Egyetem Elektrotechnikai- Elektronikai Tanszékén épített mérőrendszerekben történt meg. Kiemelném a villamos hálózat analizálására alkalmas mérőszoftvert, ami alkalmazza a mintaszámmal történő szinkronizálási algoritmust és a nulla-átmenetes frekvenciabecslő eljárás általam továbbfejlesztett változatát. A mérőprogram a mérés közben valós időben kiszámolja a többszörös on-line modulom segítségével az összes villamos hálózati paramétert, köztük a teljesítmény-paramétereket a legrészletesebb formában, ami a harmonikusokkal terhelt villamos hálózatok esetén kulcsfontosságú lehet a kiértékelés során.

Ebben a fejezetben részletesen bemutatásra kerül az általam fejlesztett mérőrendszer, ami elmenti a számított villamos paramétereket, illetve a feszültség és áram jelalakokat is. Az elmentett adatok megjelenítését végző kiértékelő programot is prezentálom, ami Bencs Róbert diplomatervező hallgatóm munkája [107]. Végül különböző ipari mérések eredményeiből mutatom be a rendszer hasznosságát és szükségességét.

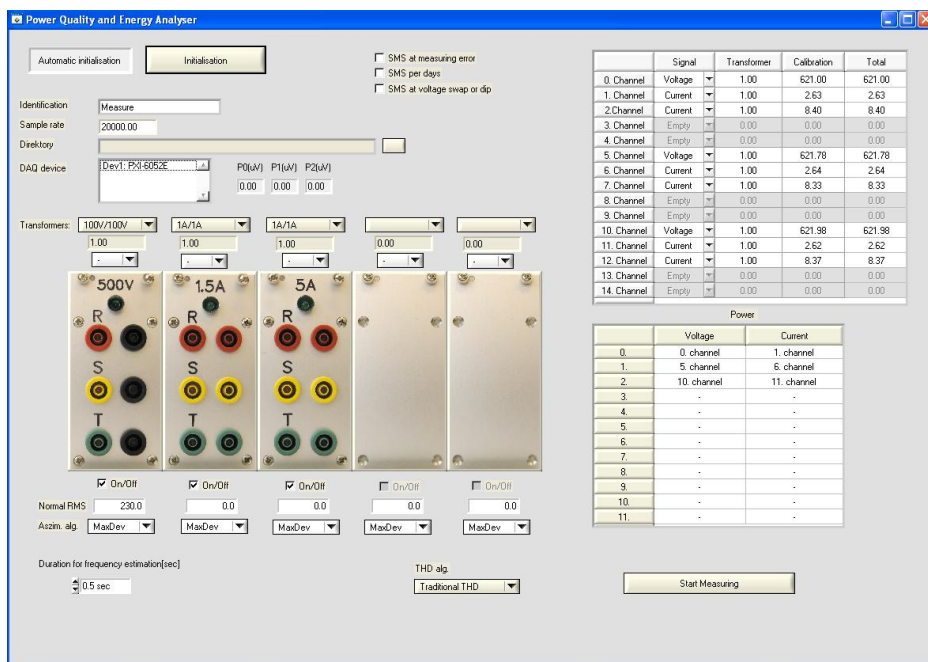
10.2. A hálózatanalizáló mérőszoftver

A mérőszoftvert úgy készítettem el, hogy a szabványok előírásainak megfelelően képes mérni és vizsgálni a villamos hálózat minőségét, és mindemellett kiértékelni a fogyasztó energia-felhasználásának hatékonyságát. Előfordul, hogy a szabványi előírásoktól eltérő, akár szigorúbb feltételekkel kell a villamos hálózatot analizálni, így odafigyeltem arra, hogy a mérési és kiértékelési paramétereket az adott mérési feladattól függően flexibilisen lehessen állítani. A mérőszoftvert Labwindow CVI 2009-es fejlesztőkörnyezetben készítettem.

A mérőrendszer intelligensnek tekinthető, ugyanis képes felismerni az éppen használt mérőkártya által biztosított funkciókat (pl.: maximális mintavételezési frekvencia), illetve felismeri a mérődobozba helyezett fiókok típusát, mérési tartományát, valamint azok kalibrációs adatait is (10.1. ábra). A mérés megkezdése előtt így csak az esetleges külső mérőváltó típusát kell beállítani, illetve különböző számítási algoritmusok típusát kiválasztani, pl. THD számítási algoritmust (lásd 3.2.2. fejezet), aszimmetria számítási algoritmust (szimmetrikus összetevők számítási módja vagy átlag RMS értéktől való relatív eltérés). Speciális esetben a program által ajánlott feszültség-áram párosításokat át lehet definiálni a megfelelő teljesítmény-számítás érdekében. Erre azért van szükség, mivel nem lett rögzítve, hogy melyik fiókba kell feszültség- és melyik fiókba kell árammodult helyezni. Az egyetlen megkötés, hogy az első fiókban feszültségmodulnak kell lennie. Mivel a modulok szinte tetszőlegesen beszerelhetők, ezért megkerülhetetlen annak beállítása, hogy melyik feszültséghez melyik áram tartozik. Mivel előfordultak olyan méréseink, ahol csak az S fázison kellett teljesítményt számolni, ezért szoftveroldalról annyira flexibilisre terveztem a rendszert, hogy beállítható az is, ha egy áramfiókkal azonos fázisokat mérünk. Ebben az

esetben a teljesítmény-számításnál mind a három áramjelhez a háromfázisú feszültség azonos fázisfeszültsége lesz hozzárendelve.

Abban az esetben, ha a hardver egységbe be van építve a GPRS-es kommunikációs egység, kérhető a programtól, hogy bizonyos időközönként, vagy mérési, illetve hálózati hibajelenség esetén soron kívül SMS-t küldjön a mérés felügyeletéért felelős személyzet számára. GPRS kommunikáció segítségével FTP protokollon akár mérési adatokat is küldhetünk, bár a GPRS miatt csak pár kByte adatmennyiségre kell itt gondolni [79].

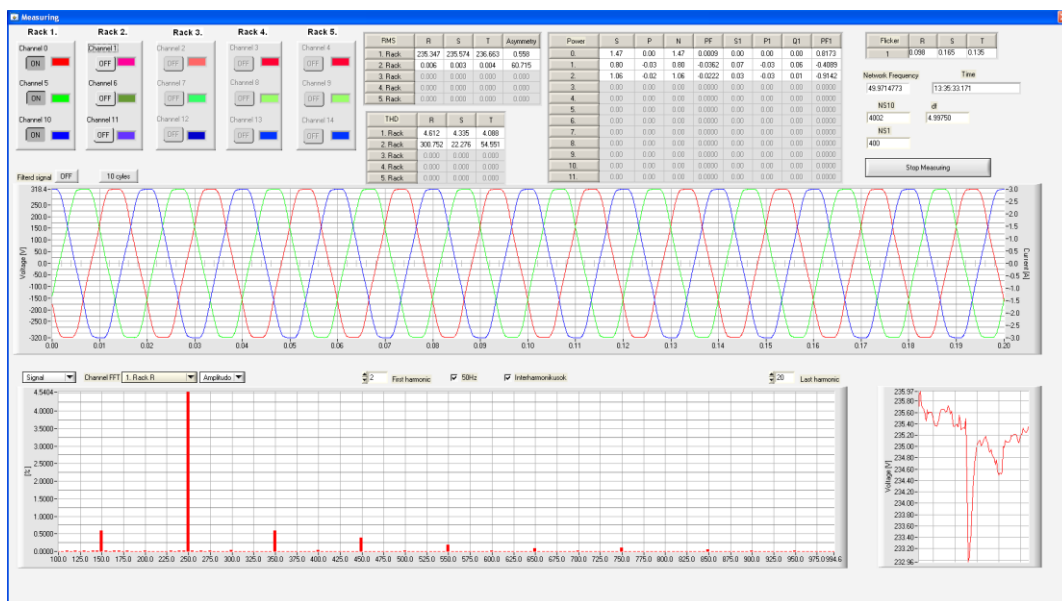


10.1. ábra: Mérés inicializálása

A mérés inicializálása után elindítható a mérés. A mérés folyamata alatt az egyes hálózati paramétereket már valós időben láthatjuk, amelyek a hálózati frekvencia és a flicker kivételével a szabványoknak megfelelően 10 periódusonként kerülnek frissítésre (10.2. ábra). A mérés során megjeleníthető paraméterek a következők:

- Hálózati frekvencia;
- Feszültség és áram RMS értékek;
- Feszültség és áram THD értékek;
- Hálózati feszültség aszimmetria és terhelési aszimmetria;
- Látszólagos, hatásos és meddő teljesítmények;
- Alapharmonikusra (50 Hz) vonatkozó látszólagos, hatásos és meddő teljesítmények;
- Harmonikusonként hatásos és meddőteljesítmény;
- Feszültség, áram és harmonikus torzítási teljesítmény;
- Teljesítménytényező;
- Rövid idejű (P_{st}) és hosszú idejű (P_{lt}) flicker értékek.

A mérés közben megjeleníthetőek továbbá a feszültség és áram jelalakok, illetve egy kiválasztott csatorna amplitúdó-frekvencia spektruma, valamint néhány percre visszakövethetőek az egyes paraméterek változásai (10.2. ábra). Szintén folyamatosan látható a kijelzőn az aktuális 10 és 1 periódusra vonatkozó mintaszám, ami a pontos hálózati frekvenciából kerül meghatározásra.



10.2. ábra: On-line mérés és paraméter megjelenítés. Az ábrán a háromfázisú feszültség jelalakjai láthatók valamint az egyik feszültségjel amplitúdó-frekvencia spektruma.

Annak érdekében, hogy egy későbbi kiértékelés miatt pontosan tudni lehessen milyen beállításokkal történt a mérés, a mérés beállításai egy külön fájlba, ún. paraméterfájlba kerülnek lementésre. A paraméterfájl tartalmazza többek között a mérés azonosítóját, a bekapcsolt fiókokat, a modulok kalibrációs értékeit, a teljesítmény-párosításokat, a mintavételezési beállításokat és a használt számítási algoritmusok azonosítóját. A paraméterfájl pontos mentési struktúráját az 1. számú melléklet tartalmazza.

A mérési és a számított adatok külön 10 perces adatfájlokba kerülnek lementésre. A 10 perces adatfájlok használata több oknál fogva célszerű volt. A szabvány 10 percenként írja elő a mérés szinkronizálását az abszolút 10 perchez, így minden fájl pontosan egész 10 percre vonatkozó adatokat tartalmaz (pl. 2h10p, 2h20p, 2h30p stb.), és mivel 10 percek határán előfordulhatnak átlapozott minták (lásd 3.2. ábra), így ezzel a megoldással biztosított, hogy egy fájlban belül nincs kétszer ugyanaz a minta. A másik oka annak, hogy 10 percenként új fájlba tároljuk az adatokat az az, hogy a teljes mérési adat főleg a minták letárolása miatt több száz Gbyte is lehet, emiatt célszerű a mérési adatokat fájlba tördelni. Egy 9 csatornán keresztül megvalósuló 20 kHz mintavételezési sebességgel történő mérés esetén 224 Mbyte méretű 10 perces tartalmú fájl készül.

A mérőrendszer mindig csak a 10 periódusra vonatkozó paramétereket számolja és menti le az on-line többmagos feldolgozás alatt. A szabvány által előírt 3 másodperces, 10 perces és 2 órás intervallumokra meghatározott értékekre a számításokat a kiértékelő szoftver végzi el, mivel nem célszerű 2 órára visszamenőleg a számított értékeket a mérőszoftvernek a memóriában tartani, vagy azokat a számítások miatt később visszatölteni.

A mintaszámmal történő szinkronizálás miatt a 10 periódusokra vonatkozó minták számát le kell tárolni, hogy később pontosan tudni lehessen, melyik minta melyik periódushoz tartozik. Az adatfájlok a 10 periódusokra vonatkozó minták száma mellett a következőket tartalmazzák:

- a 10 perces intervallum kezdetének pontos idejét;
- a 10 periódusok számát a 10 perc alatt;

- az összes csatornán mért és mintavételezett értékeket bináris formátumban;
- a számított 10 periódusra vonatkozó RMS és THD értékeket minden csatornára;
- a megjelölt 10 periódusokat csatornánként (lásd 3.2.1.4);
- az aszimmetriaértéket modulonként;
- a különböző teljesítmény-paramétereket összepárosított feszültség- és áramcsatornára.

A 10 perces adatfájlok pontos mentési struktúráját a 2. számú melléklet tartalmazza.

10.3. A kiértékelő szoftver

A kiértékelő szoftver elkészítése teljes mértékben Bencs Róbert mérnök-informatikus diplomatervező hallgatóm feladata volt, akit folyamatos konzultációk révén is segítettem, hogy megfelelő tudást szerezzen a villamosenergia-mérésének területén annak érdekében, hogy a szoftverfejlesztési feladatot megfelelően el tudja végezni.

A mérési adatok mindig egy különálló mappába kerülnek lementésre. A kiértékelő szoftver részére meg kell adni ennek a mappának az elérését, amely mappából a paraméterfájl segítségével betölti az alkalmazás a mérési információkat és bizonyos utófeldolgozást végez. Az utófeldolgozás során kerülnek kiszámításra a 3 másodperces, a 10 perces és a 2 órás értékek, valamint a program a mérés közben kiszámított értékeket kiválogatja a mérési adatfájlokból és azokat átmásolja külön fájlba. Az átmásol célja, hogy az összetartozó adatok egymás mellé kerüljenek, ami a későbbiekben jelentősen felgyorsítja a mérési adatok megjelenítését, illetve, hogy a nagyméretű adatfájlok törlése esetén a kiértékelésben fontos, számított paraméterek megmaradjanak. Az utófeldolgozás pár perces folyamat, ami után részletes áttekintést kapunk a mérés beállításairól, valamint időtartamáról. A mérési paraméterek megjelennek a felületen, a kiértékelés paramétereit (kiértékelés módját és felbontását) a felhasználó választhatja ki (10.3. ábra).

The screenshot shows the 'T11TR' software interface. It has a title bar 'Áttekintés'. The main area is divided into several sections:

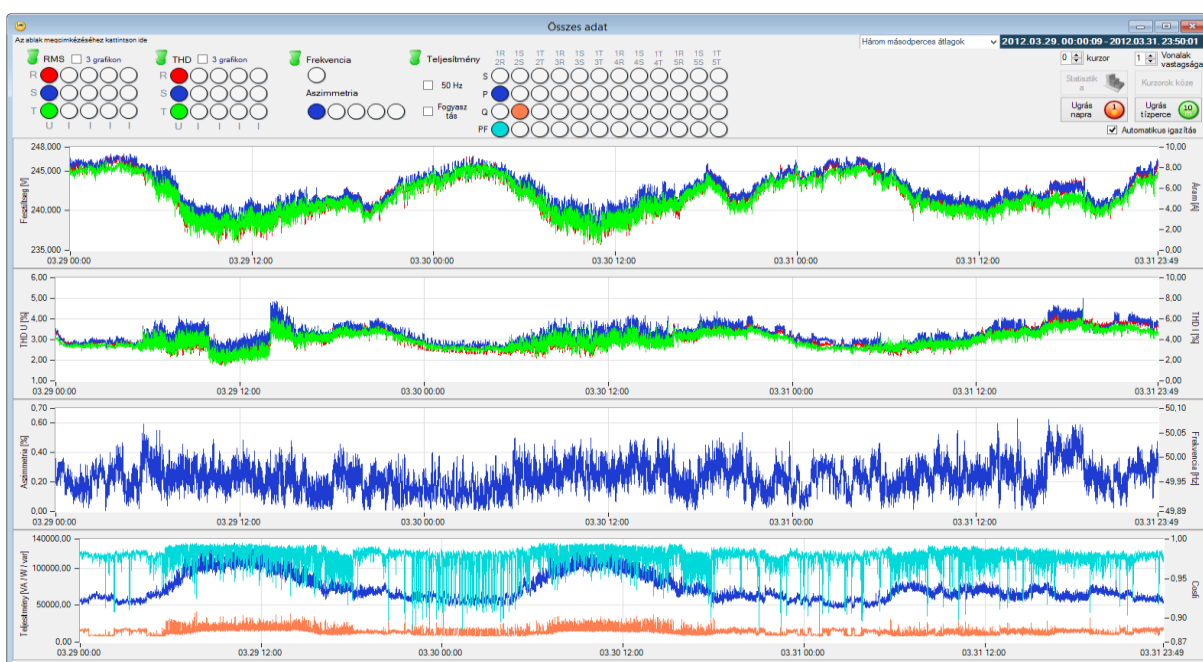
- File Path:** 'Fájl elérési útvonala' with a text box containing 'G:\Egyéb\Mérés jelentések\Szolgáltatás_T11TR'.
- Measurement Dates:** 'Mérés kezdete' (2012.03.24. 0:00:02) and 'Mérés vége' (2012.04.01. 0:00:22).
- Measurement Parameters:** 'Tízpercek száma' (1146), 'Tízperci adatok száma' (3438454), 'Mintavételezési frekvencia' (20000), 'Konverziós frekvencia' (33333.33), 'THD algoritmus' (Traditional), and 'Frekvenciaszámítás időegysége' (0.5 sec).
- Results Summary:** A vertical list of buttons on the right: 'Összes adat' (100), 'Napi adatok' (1), 'Tízperces adatok' (10), 'Statistika', 'Flicker', 'Tranziensek', 'Teljesítmény harmonikusok', 'További teljesítmény', and 'Jelentés'.
- Table 1:** A table with 5 columns (1. fók, 2. fók, 3. fók, 4. fók, 5. fók) and 6 rows (Fók típus, Feszültség[V], Áram[A], Feszültség[V], Feszültség[V], Váltó). The data is as follows:

	1. fók	2. fók	3. fók	4. fók	5. fók
Fók típus					
R	499	5	5	0	0
S	498	5	5	0	0
T	498.5	5	5	0	0
Váltó	1	1000	100	0	0
AA	NP	MaxDev	MaxDev	MaxDev	MaxDev
- Table 2:** A table with 6 columns (Telj. párok, 0. pár, 1. pár, 2. pár, 3. pár, 4. pár, 5. pár) and 2 rows (U, I). The data is as follows:

	Telj. párok	0. pár	1. pár	2. pár	3. pár	4. pár	5. pár
U	1R	1S	1T	1R	1S	1T	
I	2R	2S	2T	3R	3S	3T	

10.3. ábra: Betöltött mérés információs felülete

Lehetőség van a mérési adatok teljes mérési időtartamon (10.4. ábra), kiválasztott napon, 10 perces intervallumon (10.5. ábra), valamint tetszőleges időtartamon belül történő vizsgálatára 2 órás, 10 perces, 3 másodperces és 10 periódusos felbontásban. A 10 perces felbontás vizsgálható úgy, hogy az adott 10 perces érték a 10 periódusos mérések átlaga, vagy azoknak minimuma, illetve maximuma legyen, lehetőséget adva arra, hogy bármilyen szemszögből vizsgálhatóak legyenek a mért jellemzők. A mérőprogram a mérés során félperiódusos pontossággal meghatározza, hogy mikor történt feszültségnövekedés vagy -csökkenés, illetve megjelöli azokat a 10 periódusos kiértékelési csoportokat, ahol ezek előfordultak. A felhasználó eldöntheti, hogy ezeket a megjelölt „hibás” értékeket a kiértékelés, statisztika-készítés (10.6. ábra) során figyelembe akarja-e venni, vagy sem. A kiértékelő szoftver által a mérési paraméterek kiértékelésére nyújtott lehetőségek és módszerek messzemenően túlteljesítik a szabvány által előírtakat és lehetővé teszik a villamos hálózat mélyebb, részletesebb analizisét.

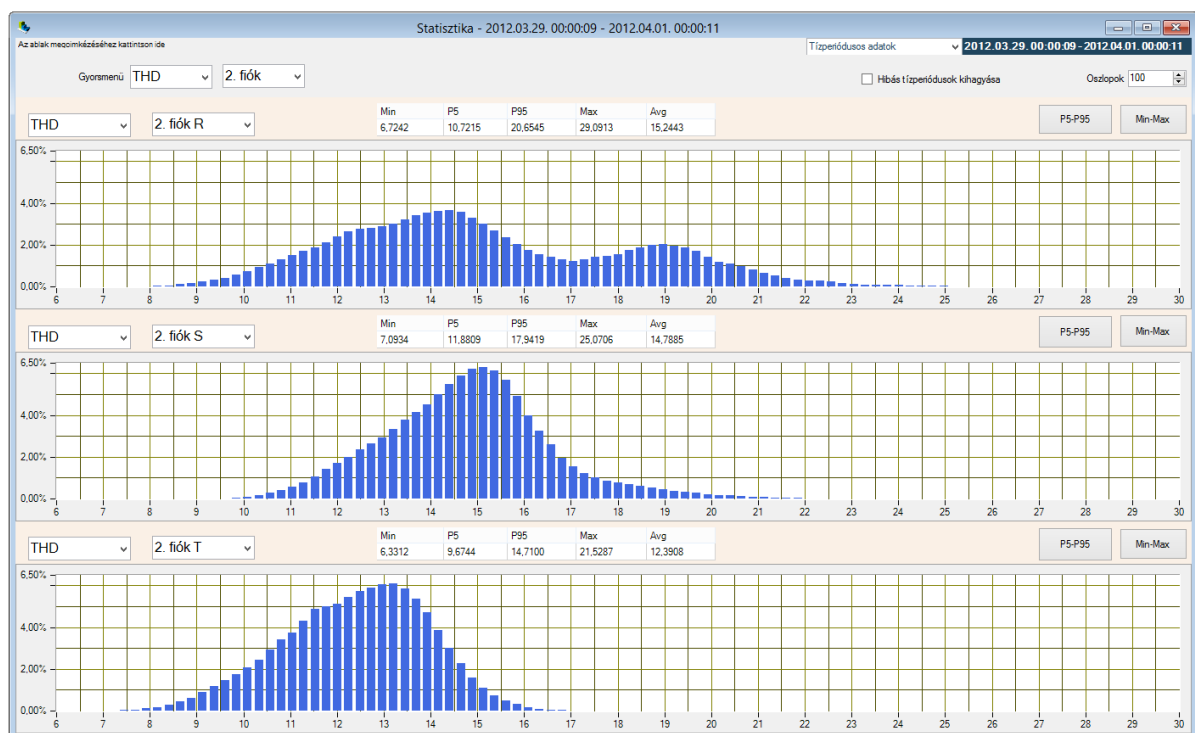


10.4. ábra: Egy mérés teljes időtartama látható 10 periódusos felbontásban

A 10.4. ábra egy teljes mérés eredményeit mutatja, ahol a vízszintes tengely mindenütt az időt ábrázolja. Az első grafikonon feszültség RMS értékek, a második grafikonon a feszültség THD értékeinek változása van ábrázolva. A harmadik grafikon aktuálisan a háromfázisú feszültség aszimmetria van megjelenítve, a legalsó grafikonon pedig a hatásos, látszólagos és meddőteljesítmény változása következő nyomon. A 10.5. ábra egy 10 perces szakaszt mutat a mérésből. A 10.5. ábra első grafikonján a feszültség RMS értékek, a másodikikon a THD értékek láthatók. A harmadik grafikonon egy kijelölt 10 periódus jelalakja, alatta pedig a hozzá tartozó amplitúdó-frekvencia spektrum tanulmányozható.

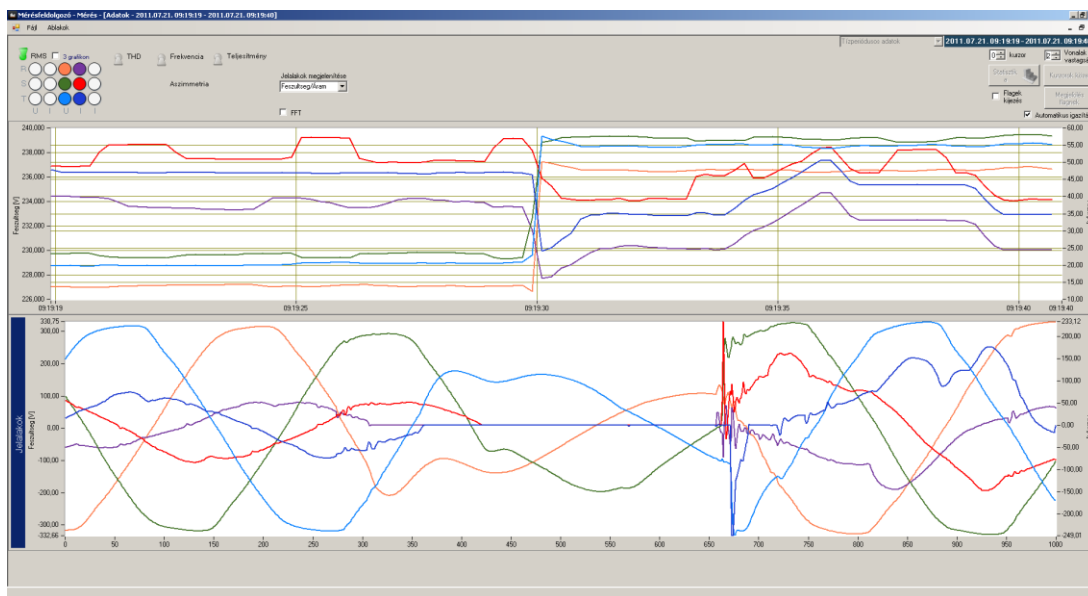


10.5. ábra: Egy mérés 10 perces időtartama látható 10 periódusos felbontásban.



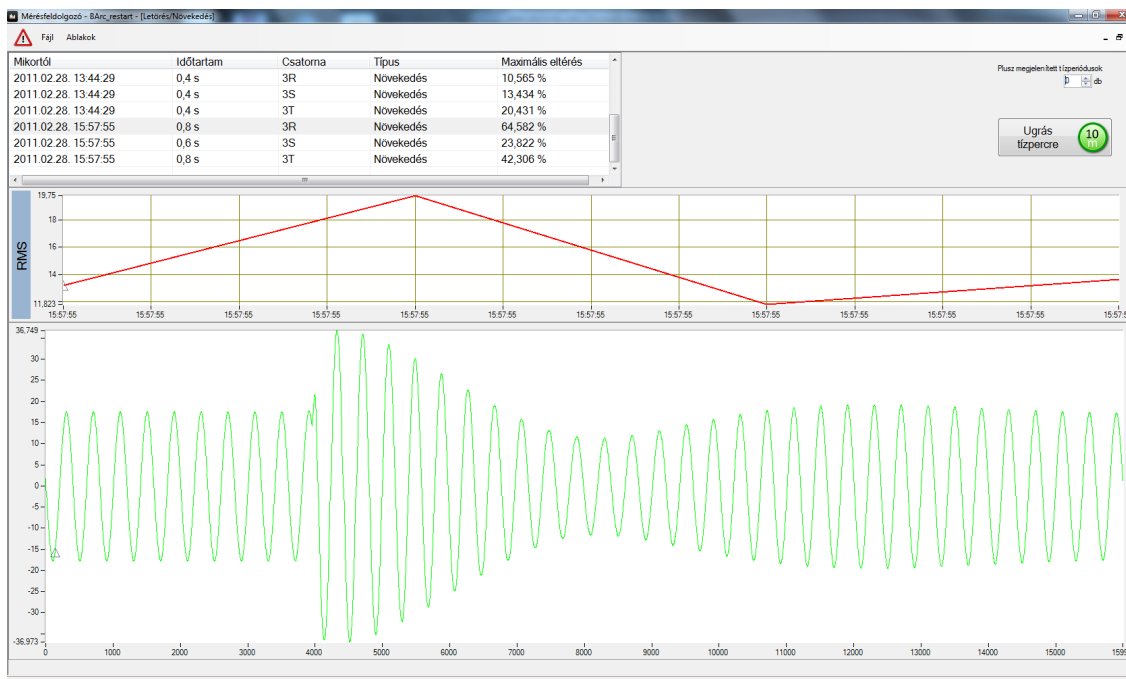
10.6. ábra: Statisztikai vizsgálat. A grafikonokon a három fázisáram THD értékeinek eloszlása látható.

Mivel a mérőprogram az on-line számított hálózati paraméterek mellett a mintavételezett mintákat rögzíti a nagykapacitású merevlemezen, emiatt bármely jelenség a későbbiekben analizálható. A mérő- és analízator-programok rugalmasságát mutatja az, hogy 20 kHz-es mintavételi frekvencia választása esetén jól analizálhatóvá válnak egy kiválasztott tranziens (átkapcsolási jelenség) nagyfrekvenciás összetevői (10.7. ábra) is.



10.7. ábra: Átkapcsolási jelenséget bemutató tranziens vizsgálat. Az ábrán a feszültség effektív értéke [V] és jelalakja van ábrázolva az idő függvényében.

A megjelölt „hibás” 10 periódusok egy külön ablakban vizsgálhatóak, ahol a mérés során előforduló összes feszültségletörés vagy -növekedés táblázatos formában, annak nagyságával és időtartományaival tanulmányozható (10.8. ábra, valamint 4. számú melléklet). A kiválasztott feszültségletörés, -növekedés RMS értékének változása mellett, azok jelalakja is megjelenítésre kerül. A mérés során a tárolási kapacitás – a rendelkezésre álló merevlemezek miatt – általában nem állít fel szigorú korlátot, így a jelalakok lementése nem okoz problémát. Archiválási célból azonban, a kiértékelés után az analízis szempontjából nem fontos jelalakok törölhetők, így például egy 10 napos 500 GByte méretű mérést 10 GByte-ra lehet redukálni; így válik lehetővé az adatok hosszú távú megőrzése.



10.8. ábra: Megjelölt 10 periódusok vizsgálata. Az ábrán a feszültség effektív értéke [kV] és jelalakja van ábrázolva az idő függvényében.

A feldolgozóprogram jelentések létrehozására is alkalmas. Jelentések készítése során a legfontosabb grafikonok és táblázatok automatikusan kimentésre kerülnek egy különálló dokumentumba. Ez a dokumentum az alapja a mérés és a vizsgálat eredményét tartalmazó végleges jegyzőkönyvnek. Egy, a program által készített jegyzőkönyv egyes részletei a következő mellékletekben találhatóak:

- **5. számú melléklet:** Feszültség effektív értékének elemzése;
- **6. számú melléklet:** Feszültség torzítás (THD) elemzése;
- **7. számú melléklet:** Áram effektív értékének elemzése;
- **8. számú melléklet:** Feszültség- és áram-aszimmetria elemzése;
- **9. számú melléklet:** Teljesítményfelvétel elemzése.

10.4. Ipari mérések kiértékelése

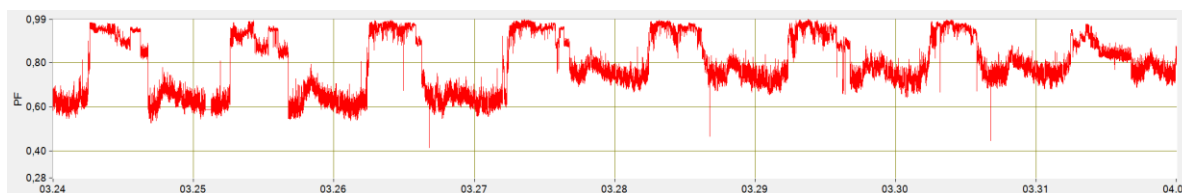
A teljes mérőrendszerrel – a laboratóriumi tesztmérések és a Miskolci Egyetem hálózatán történő mérés után – sikeresen végeztünk transzformátorállomásoknál és nagyobb fogyasztóknál is villamos energetikai vizsgálatot. Az ÉMÁSZ és az ELMŰ több transzformátorállomásán, illetve a következő nagyobb fogyasztóknál valósultak meg a vizsgálatok az új rendszer segítségével:

- Debreceni Egyetem Orvos- és Egészségtudományi Centrum;
- Salgótarján, Szent Lázár Megyei Kórház;
- Creaton Hungary Kft, Lenti.

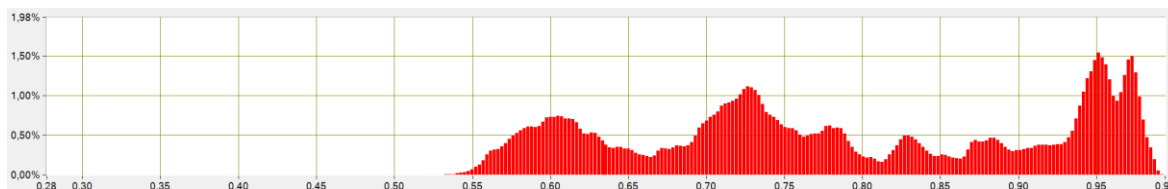
A következőkben a kiértékelések során tapasztalt néhány érdekes jelenséget mutatok be grafikonok illetve jelalakok segítségével. Az ábrák nagy mérete miatt a mellékletbe helyeztem el a további szemléletes grafikonokat.

10.4.1. Meddőenergia problémája

A villamos energia költségeinek csökkentése érdekében a meddőenergia gazdálkodás korszerűsítésének tervbe vételét gyakran javasoljuk, mivel a mérések alapján azt tapasztaljuk, hogy a nagyfogyasztók még most sem foglalkoznak megfelelően a meddőenergia problémájával. Legtöbb esetben az egyik meddőenergia okozta többletköltséggel, ami meddődíj formájában megjelenik a villamos energia számlán, foglalkozik a fogyasztó, azaz odafigyel, hogy ne engedje ki a meddőenergiát a hálózat felé. A másik többletköltséget okozó tényezővel, amit szintén a meddőenergia okoz, viszont nem törődik a fogyasztó. A meddőenergia lengése a fogyasztó belső hálózatán veszteség formájában növeli a hatásos energiafogyasztást. A tapasztalataink szerint 0,93 alatti teljesítménytényező esetén a lengés okozta pluszköltséggel már érdemes foglalkozni. Jól látható a 10.10. ábrán, hogy a teljesítménytényező átlagos értéke 0,85 egy nagyfogyasztónál történő több napos mérés során. Ekkora érték mellett jelentős többletköltséget okoz a fogyasztó számára a belső hálózatán lengő meddőteliesség.



10.9. ábra: Teljesítménytényező több napos grafikonja



10.10. ábra: Teljesítménytényező statisztikája

Az optimális gazdálkodás érdekében célszerű fázisjavító kondenzátorokat telepíteni, nem csak a betáplálási pontra, hanem a belső hálózat azon pontjaira is, ami után jelentős meddőenergia-fogyasztó működik.

10.4.2. Megemelt feszültségérték

A fogyasztó betáplálási oldalán történő mérés során sok esetben tapasztaltunk indokolatlanul magas, 240 V körüli feszültség szintet. Bár ez 230 V-os hálózat esetén csak 4,34%-os növekedés, ami bőven megfelel a szabvány [67] által előírtak szerinti szintnek ($230 \text{ V} \pm 10\%$), mégis ilyen esetben azt javasoljuk a fogyasztónak, hogy csökkentse vagy csökkentessék le a transzformátorok szekunder oldalán a feszültség szintjét, mivel ez a magasabb érték szintén jelentős plusz költséget jelent a villamos energia felhasználóinak. A villamosenergia-fogyasztók nagy része Ohmos fogyasztó, azaz a megnövekedett feszültség-érték hatására arányosan több áramot is vesz fel. Mivel a teljesítmény a feszültség és az áram szorzata, ezért a megnövekedett feszültség-értékkel az elfogyasztott plusz energia négyzetesen arányos. A 10.11. ábrán megfigyelhető, hogy a vizsgált hálózat mindhárom fázisán 240 V feletti átlagos feszültség szinteket mértünk. A P5 értékek és a 10.12. ábra jól mutatják, hogy a 228 V körüli minimum értékek csak valamilyen tranzienseknek a következményei.

	Min	P5	P95	Max	Átlag
U1R [V]	228.84	237.37	244.85	246.88	241.27
U1S [V]	228.90	237.85	244.94	246.70	241.50
U1T [V]	219.86	236.72	243.94	245.74	240.37

10.11. ábra: Normálistól magasabb feszültség RMS értékek



10.12. ábra: Normálistól magasabb feszültség RMS értékek statisztikája

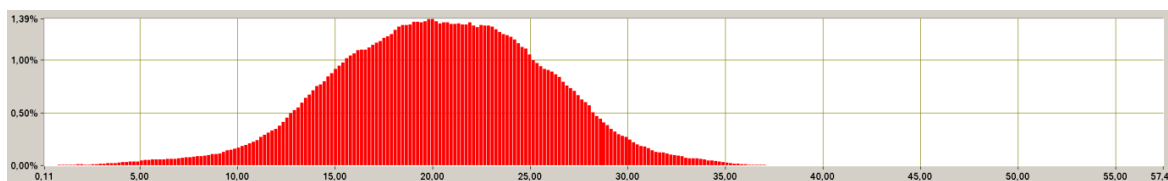
A szükségesnél magasabb feszültség szint csökkentheti a fogyasztók élettartamát is, mivel nem az optimális működésükhöz szükséges feszültség szinten működnek.

10.4.3. Terhelés-aszimmetria

A tartós terhelés-aszimmetria jelentős áramokkal terheli a hálózat nulla-vezetőjét, és többlet energiaköltséget okoz. A terhelés-aszimmetria 10% alatti átlagos értéke megfelelő hálózati működést jelent, 20% felett pedig érdemes átgondolni a terheléelosztást. Ha jelentős terhelés-aszimmetriával üzemelő hálózatot találunk, javasoljuk a terheléelosztás újratervezését. A 10.13. és a 10.14. ábra is egy olyan hálózatot mutat be, ahol 20% feletti volt az átlagos terhelési-, azaz áram-aszimmetria.

	Min	P5	P95	Max	Átlag
Áram aszimmetria [%]	0.11	11.84	28.80	57.44	20.41

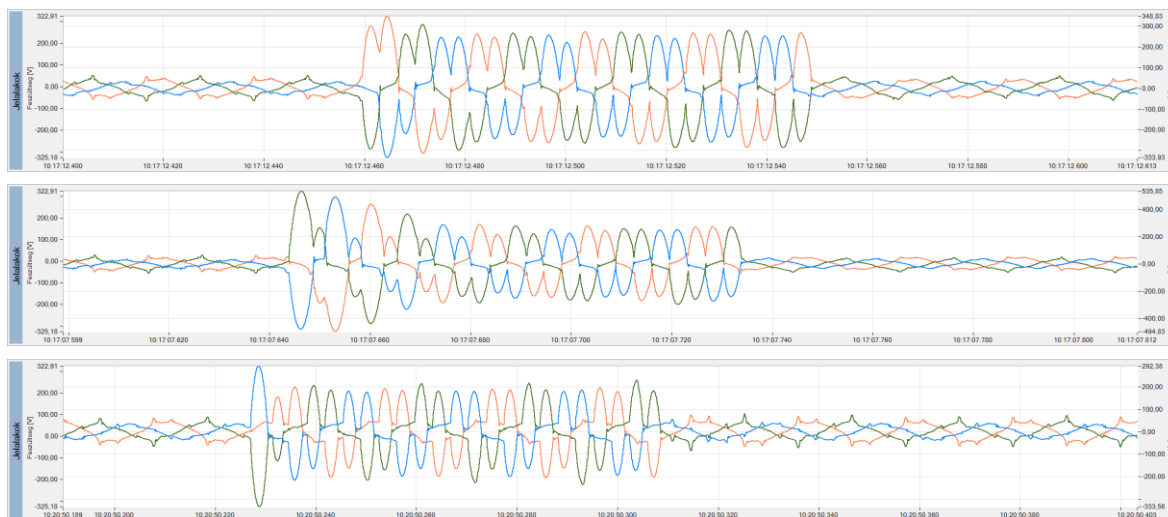
10.13. ábra: Áram-aszimmetria átlagosan 20% körüli



10.14. ábra: Áram-aszimmetria statisztikája

10.4.4. Röntgengépek okozta áramtranziensek

A következőkben egy röntgengép használata során mért áramjeleket mutatok be. A leágazásról, ahol az alábbiakban felüntetett értékeket mértük, főleg csak röntgengépeket üzemeltettek, így nagyon jól megfigyelhető a gép működése az áram jelalakjában (10.15. ábra).



10.15. ábra: Röntgengép használata során mért áram jelalakok

11. Összegzés

Értekezésem a villamos energia mérésének területével kapcsolatos legfontosabb kutatási munkáimat mutatja be. A dolgozatban a szakirodalom áttekintése, majd a kutatási terület részletes bemutatása után az egyes fejezetekben külön-külön részletesen bemutatom a tudományos eredményeimet, végül pedig ezek gyakorlati hasznosíthatóságát ismertetem.

Napjainkban a villamos energiaszolgáltatás szükségessége megkérdőjelezhetetlen, a villamos energia folyamatos rendelkezésre állása nélkül gazdasági, társadalmi, és egészségügyi problémák jelentkezhetnek. A villamos energia mérése minőségi vagy felhasználási oldalról így kiemelkedően fontos, ezért napjainkban ezen a területen jelentős kutatási tevékenység zajlik. 2006 óta foglakozok a villamos energia mérésével, ami alatt számos transzformátorállomáson, illetve ipari fogyasztónál végeztem méréseket, és dolgoztam a Miskolci Egyetem Elektrotechnikai- Elektronikai Tanszék munkatársaival a mért adatok a feldolgozásán és kiértékelésén.

A villamos energia minőségének és a villamos energiafelhasználás hatékonyságának mérése területén végzett tudományos munkám eredményeként olyan új módszerek születtek, amely gyorsabbá, pontosabbá és hatékonyabbá teszi a villamos energiavizsgálatot. Az új tudomány módszerek gyakorlati használhatóságát is jól mutatja, hogy mindegyik beépítésre került mérőrendszerbe, mérőműszerbe, amelyek ipari körülmények közötti mérésekre alkalmazhatók.

A mintaszámmal történő szinkronizálás új tudományos eredményem felhasználásával a villamos energia mérése során szükséges szinkronizálási mechanizmus külön hardveregység nélkül biztosítható, ahol a szinkronizálás pontossága a mintavételezési frekvencia növelésével tovább javítható, valamint az eljárás biztosítja, hogy 10 kHz felett szabadon, megkötés nélkül megválasztható a mintavételi frekvencia értéke, ellentétben az eddig használt módszerekkel, amelyek bizonyos korlátozásokkal alkalmazhatóak. A több processzoros feldolgozási eljárásom segítségével a villamos hálózati paraméterek meghatározása mérés közben real-time módon megtörténhet. A valós idejű feldolgozásra többprocesszoros megoldás egy alacsony költségű alternatívát biztosít a speciális DSP, illetve FPGA áramkörökkel megvalósított módszerekhez képest. A logikailag különböző, eltérő időtartományra vonatkozó paraméterszámításokat külön végrehajtási egységben végzem el, így biztosítom a rendszer hatékony működését és a bővíthetőségét. A nulla-átmenetes számítási eljárást továbbfejlesztve egy olyan számítási algoritmust fejlesztettem ki, ami felharmonikus összetevőkkel, tranziensekkel és amplitúdó ugrásokkal terhelt hullámformák esetén is képes a pontos hálózati frekvenciaérték meghatározására és hozzásegít a mintaszámmal való szinkronizáló algoritmus helyes működéséhez. Lehetőséget teremtettem a teljesítmény kiértékelése során a teljesítmény a korábbiakhoz képest még aprólékosabb felbontására, ami a hatékonyabb módszert nyújt a villamos energia felhasználásának analizálására. Kifejlesztettem egy alacsony költségű multiplexelt mérésadatgyűjtő kártya segítségével megvalósítható méréstechnikai- és adatfeldolgozási módszert, ami gazdaságos kiépíthetőségét biztosítja független rendszerek párhuzamosan mérésére, tesztelésére és kiértékelésére.

12. Summary

The measuring and analysing of the quality and efficiency of electrical power usage is an important topic today and in the future. I have been studying and examining the measurement of electrical power since 2006, while I participated in several power measurements at transformer stations and industrial customer networks. This thesis contains my most important research activities in the area of electrical power measurement.

During my scientific research in the area of power quality measuring and power consumption analysing new methods were developed, which make more accurate and efficient the power analysis. The new scientific methods are also useful in practical means because all were built in measuring equipment, measuring systems which were used in industrial environments.

Applying my new scientific method (**Thesis 1**) the Synchronisation with Number of Samples (SNS), the power quality analysing can be executed without any special hardware device such as a PLL. SNS can be realised from the software side alone and the accuracy of synchronisation can be increased by higher sampling rate. Above 10 kHz any kind of sample rate can be used without any restrictions as opposed to methods used before. I proved power frequency must be determined at least every 1 second to provide right synchronisation by SNS method.

By the enhancement of zero-crossing technique (**Thesis 2**) I developed a new digital method, which can calculate accurate power frequency in distortion condition (harmonics, swap and dip, transient) hereby provides frequency value for the SNS method and affords the right working of synchronization. The method eliminates the wrongly determined zero-crosses after digital filtering which are caused by amplitude changes.

Using multi-threading processing (**Thesis 3**) estimation of power quality and efficiency parameters can be solved in real time according to the standards. The multi-core on-line processing is a low-cost solution in contrast with special methods which use DSP or FPGA circuits. Different kind of parameters which are determined for dissimilar time interval are calculated in different execution flow thereby provides extensibility and better performance.

Using my new digital measurement and data processing method for power parameter calculation (**Thesis 4**) power parameters as active, apparent, reactive powers are determined now with full particular, different harmonic power components and distortion powers show the efficiency of power consumption in different view.

I developed an asynchronous measuring and data processing method (**Thesis 5**) which uses only multiplex data acquisition cards. Using this asynchronous measuring and data processing method a low cost measuring system can be built which is suitable for testing and analysing electrical devices independently for each other.

13.A tézisekhez tartozó tudományos publikációk

Idegen nyelvű lektorált folyóirats cikkek:

1. **Bátorfi Richárd**, Angéla Váradiné Szarka: Parameter identification of electrical power quality by a new synchronisation method and an innovative measuring instrument, Measurement, Volume 46, Issue 1, January 2013, ISSN 0263-2241, pp. 697–709, Impact Factor: 0,836

Magyar nyelvű lektorált folyóirats cikkek:

2. **Bátorfi Richárd**, Váradiné Angéla Szarka: Nagy pontosságú villamos hálózati minőségvizsgálat új szinkronizáló eljárason alapuló mérőberendezéssel, Elektrotechnika: A Magyar Elektrotechnikai Egyesület Hivatalos Lapja, 2012. április, Vol.105(03). pp.5-9.

Idegen nyelvű konferencia kiadványában megjelent konferencia-előadások:

3. Angéla Váradiné Szarka, **Bátorfi Richárd**: Development of Computing Method for Reactive Power Analysis, MicroCAD 2007. március 22-23, University of Miskolc, ISBN:978 963 661 751 6, pp. 73 – 78
4. **Bátorfi Richárd**, Unhauzer Attila: Academia-Industry Cooperation for Energy Saving in North-East Hungary, Joining Forces in Engineering Education Towards Excellence, SEFI and IGIP Joint Annual Conference 2007, Miskolc, 2007. július 1-4, ISBN 978-963-661-772-1, pp. 199-201
5. Unhauzer Attila, **Bátorfi Richárd**: Flicker Determination of Electrical Networks, Forces in Engineering Education Towards Excellence, SEFI and IGIP Joint Annual Conference 2007, Miskolc, 2007. július 1-4, ISBN 978-963-661-772-1, pp. 411-412
6. **Bátorfi Richárd**: Multichannel Online Quality and Efficiency Power Network Diagnostic according to IEC Standards, International Conference On Renewable Energy and Power Quality (ICREPQ), 2008. március 12-14, Santander – Spain, ISBN 978-84-611-611-9289-2, DVD kiadványban megjelent
7. **Bátorfi Richárd**, Angéla Szarka Váradiné: Development of New Measurement and Data Analyzing System Flexible Adaptable to Energy Quality Standard Changes, MicroCAD 2008. március 20-21, University of Miskolc, ISBN 978-963-661-821-6, pp. 13-18
8. **Bátorfi Richárd**, Software solutions for effective and reliable on-line diagnostics, MicoCAD 2009. március 19-20, University of Miskolc, ISBN 978-963-661-875-9, pp. 1-5

9. **Richárd Bátorfi**, Electrical Power Quality and Efficiency Diagnostic System, XIX IMEKO World Congress, September 6-11, 2009, Lisbon, Portugal, ISBN 978-963-88410-0-1, pp. 749-752
10. **Bátorfi Richárd**: Measurement of network frequency for standard diagnostics of electrical power networks, MicroCAD 2010, 2010. március 08-20, University of Miskolc, ISBN 978-963-661-925-2, pp. 1-6
11. **Bátorfi Richárd**, Angéla Váradiné Szarka: Analysing Power Parameters of Single Phase Nonsinusoidal Power Network, MicoCAD 2012., 29-30 March 2012., University of Miskolc (Hungary), ISBN 978-963-661-773-8. CD appendix.
12. **Bátorfi Richárd**: PLL and Number of Sample Synchronisation Techniques for Electrical Power Quality Measurement, XX IMEKO World Congress, September 9-14, 2012, Busan, Republic of Korea, ISBN:978-89-950000-5-2-95400

Magyar nyelvű konferencia kiadványában megjelent konferencia-előadások:

13. Váradiné Szarka Angéla, **Bátorfi Richárd**: Kis- és középvállalatok villamos energia hálózatának vizsgálata, VII. ENELKO, Nemzetközi Energetika - Elektrotechnika Konferencia, Kolozsvár, 2006, ISSN 1842-4546, pp. 149 – 154
14. **Bátorfi Richárd**: Háromfázisú villamos hálózatok paramétereinek kiértékelésére alkalmas szoftver fejlesztése, Tudományos Diákfórum, Innováció és Tudás, MLR-RET kiadványa, Miskolc, 2006. június 8., ISBN 963-661-723-6, pp. 137-144
15. **Bátorfi Richárd**: Villamos hálózatok mérő- és elemző alkalmazásának továbbfejlesztési lehetőségei, Innováció és Tudás Konferencia, MLR-RET kiadványa, Miskolc, 2007. június, pp. 199-204
16. **Bátorfi Richárd**: Az informatika fejlődésének hatása a villamos-energetikai vizsgálatokra, XVII. SzámOkt – VIII. ENELKO, Nagyvárad, 2007, ISSN 1842-4546, pp. 12-15
17. **Bátorfi Richárd**: Villamos hálózatok minőségi követelményeinek és szabványos mérési módszereinek tanulmányozása, Doktoranduszok Fóruma, Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola, Miskolci Egyetem, 2007. november 13., pp. 13-16
18. **Bátorfi Richárd**, Komplex hálózatanalizáló rendszer fejlesztése, Doktoranduszok Fóruma, Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola, Miskolci Egyetem, 2008. november 13., pp. 1-5
19. **Bátorfi Richárd**, Univerzális tesztberendezés vezérlőszoftverének fejlesztése, IX: ENELKO – XVII. SzámOkt konferencia, Csíksomlyó, 2008. október 9-12., ISSN 1842-4546, pp. 10-14
20. Unhauzer Attila, **Bátorfi Richárd**, Kovács Ernő, Borsody Zoltán: Hangfrekvenciás központi vezérléssel kapcsolt berendezéseket ellátó villamos hálózatok vizsgálata (Diagnostic of the Electrical Networks Supplying Equipment Controlled by the Voice - frequency Switching System), X. ENELKO (Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia) és XIX. SzámOkt (Nemzetközi Számítástechnikai Konferencia), Románia, Marosvásárhely, 2009. október 08-11, ISSN 1842-4546. pp. 151-155.

21. **Bátorfi Richárd:** Modulrendszerű hálózatanalizáló műszer vezérlőszoftverének fejlesztése, Doktoranduszok Fóruma, Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola, Miskolci Egyetem, 2009. november 5., pp. 14-19
22. **Bátorfi Richárd,** Hálózati frekvencia ingadozásának vizsgálata mintaszámmal történő szinkronizálás alkalmazásához, XII. ENELKO – XXI. SzámOkt konferencia, Kolozsvár, 2011. október 6-9., ISSN 1842-4546, pp. 8-14
23. Bencs Róbert, **Bátorfi Richárd,** Komplex mérésfeldolgozó alkalmazás fejlesztése Measurement Studio-ban villamos hálózatok elemzéséhez, XII. ENELKO – XXI. SzámOkt konferencia, Kolozsvár, 2011. október 6-9., ISSN 1842-4546, pp. 15-21

Írásban meg nem jelent idegen nyelvű előadások:

24. **Bátorfi Richárd,** Test and Diagnostics of Electrical Power Network Disturbances, NI Week 2009 (Worldwide Graphical System Design Conference and Exhibition), Poster Section, USA, Texas, Austin, 2009. aug. 3-6.
25. **Bátorfi Richárd:** Free-run parallel tests performed by multiplexed DAQ board, Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola Összevont Tudományos Szeminárium, Miskolc, Miskolci Egyetem, 2009. június 3. (szóbeli előadás)
26. **Bátorfi Richárd:** Estimation of Power Frequency and Development of Synchronization Method, Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola, Összevont Tudományos Szeminárium 2010, Miskolci Egyetem, 2010. június 2. (szóbeli előadás)

Írásban meg nem jelent magyar nyelvű előadások:

27. **Bátorfi Richárd:** Villamos hálózatok minőség- és költség elemzése. Tudományos Diákfórum, Miskolc, 2007. június
28. **Bátorfi Richárd:** Villamos hálózatok minőségi vizsgálata – Nemzetközi tudományos eredmények áttekintése, Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola, Összevont Tudományos Szeminárium 2008, Miskolci Egyetem, 2008. június 4. (szóbeli előadás)
29. **Bátorfi Richárd,** Unhauzer Attila: Az észak-kelet magyarországi régió hálózati zavardiagnosztikáinak tapasztalatai, Ifjú Szakemberek Fóruma 2008, Budapesti Műszaki Egyetem, Budapest, 2008. nov. 26 (szóbeli előadás)
30. **Bátorfi Richárd:** Innovációk a villamos energetika és intelligens mérőrendszerek területén, Eszterházy Nap, Eszterházi Károly Főiskola, Eger, 2009. április 22.,
31. **Bátorfi Richárd:** Univerzális on-line regisztráló teszter fejlesztése, Erősáram a Fiatalok Szemével 2010, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2010. április 7. (szóbeli előadás)
32. **Bátorfi Richárd:** Villamos hálózati frekvenciához mintaszámmal történő szinkronizálás gyakorlati megvalósítása, I. Mechward András Ifjúsági Találkozó, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2011. április 13. (szóbeli előadás)

Oktatási jegyzet:

33. Váradiné Sz. Angéla, Hegedűs János, **Bátorfi Richárd**, Unhauzer Attila:
Méréstechnika jegyzet, HEFOP – jegyzet (Nemzeti fejlesztési terv), 2007

Egyéb:

34. **Bátorfi Richárd**: Háromfázisú villamos hálózatok paramétereinek kiértékelésére
alkalmas szoftver fejlesztése, TDK dolgozat, 2006.
35. **Bátorfi Richárd**: Háromfázisú villamos hálózatok paramétereinek kiértékelésére
alkalmas szoftver fejlesztése, OTDK dolgozat, 2007.

Referenciák

- [1] Dán András, Tersztyánszky Tibor, Varjú György: Villamosenergia minőség, ISBN 963 22 9619 2, 2006.
- [2] Driesen J, Creanenbroeck T: Villamosenergia-minőség – Alkalmazási segédlet, Magyar Részpiaci Központ, <http://www.rezinfo.hu/>
- [3] Math H.J. Bollen, Irene Y.H. Gu: Signal Processing of Power Quality Disturbances, ISBN-13 978-0-471-73168-9, 2006.
- [4] A. Ferrero, Measuring electric power quality: Problems and perspectives, Measurement 41 (2008) 121-129
- [5] Dimitris Al. Katsaprakakis, Dimitris G. Christakis, Arthouros Zervos, and Spiros Voutsinas, A Power-Quality Measure, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 2, April 2008, 553-561
- [6] T. Tarasiuk, A few remarks about assessment methods of electric power quality on ships – Present state and further development, Measurement 42 (2009) 1153-1163
- [7] W. R. Anis Ibrahim, M. M. Morcos, Artificial Intelligence and Advanced Mathematical Tools for Power Quality Applications: A survey, IEEE T. Power Deliver., vol. 17, no. 2, April 2002, 668-672
- [8] S. Kaewarsa, K. Attakitmongcol, T. Kulworawanichpong, Recognition of power quality events by using multiwavelet-based neural networks, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 30, Issue 4, May 2008, 254-260
- [9] D. Flieller, D. O. Abdeslam, P. Wire, J. Mercklé, Distortions identification and compensation based on artificial neural networks using symmetrical components of the voltages and the currents, Electr. Power Syst. Res. 79 (2009) 1145-1154
- [10] Cheng-I Chen, Virtual Multifunction Power Quality Analyzer Based on Adaptive Linear Neural Network, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, Issue 8, (2012) 3321 -3329
- [11] Yuan Liao and Jong-Beom Lee, A fuzzy-expert system for classifying power quality disturbances, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 26, Issue 3, March 2004, Pages 199-205
- [12] W. G. Morsi, M. E. El-Hawary, A New Fuzzy-Based Representative Quality Power, Factor for Unbalanced Three-Phase Systems With Nonsinusoidal Situations, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 4, October 2008, 2426- 2438
- [13] M. B. I. Reaz, F. Choong, M. S. Shahiman, F. Mohd-Yasin, M. Kamada, Expert System for Power Quality Disturbance Classifier, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 3, July 2007, 1979-1987
- [14] E. Styvaktakis, M. H. J. Bollen, and I. Y. H. Gu, Expert System for Classification and Analysis of Power System Events, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, April 2002, 423-428
- [15] K. M. EL-Naggar, W. M. AL-Hasawi, A genetic based algorithm for measurement of power system disturbances, Electric Power Systems Research 76 (2006) 808–814
- [16] A. Sanninoa, J. Svenssonb, T. Larssonc, Power-electronic solutions to power quality problems, Electric Power Systems Research, Vol 66, Issue 1, July 2003, 71–82
- [17] F. Vatansever, A. Ozdemir, Power parameters calculations based on wavelet packet transform, Electrical Power and Energy Systems 31 (2009) 596-603
- [18] H. Erişti, Y. Demir, A new algorithm for automatic classification of power quality events based on wavelet transform and SVM, expert Systems with Applications 37 (2010) 4094-4102
- [19] C. Sharmeela, M. R. Mohan, G. Uma and J. Baskaran, A Novel Detection and Classification Algorithm for Power Quality Disturbances using Wavelets, American Journal of Applied Sciences 3 (10), 2006, ISSN 1546-9239, 2049-2053
- [20] J. Chung, E. J. Powers, W. M. Grady, S. C. Bhatt, Power Disturbance Classifier Using a Rule-Based Method and Wavelet Packet-Based Hidden Markov Model, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 1, January 2002, 233-240

- [21] F. Zhao, R. Yang, Power-Quality Disturbance Recognition Using S-Transform, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 2, April 2007, 944-949
- [22] C. N. Bhende, S. Mishra, B. K. Panigrahi, Detection and classification of power quality disturbances using S-transform and modular neural network, Electric Power Systems Research 78 (2008) 122-128
- [23] H. S. Behera, P. K. Dash, B. Biswal, Power quality time series data mining using S-transform and fuzzy expert system, Applied Soft Computing Vol. 10 (2010) 945-955
- [24] Shun-Li Lu, Chin E. Lin, Ching-Lien Huang, Suggested power definition and measurement due to harmonic load, Electric Power Systems Research 53 (2000) 73-81
- [25] J. J. Tomić, M. D. Kušljević, V. V. Vujičić, A New Power System Digital Harmonic Analyzer, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 2, April 2007, 772-780
- [26] Julio Barros, Ramón I. Diego, A new method for measurement of harmonic groups in power systems using wavelet analysis in the IEC standard framework, Electric Power Systems Research 76 (2006) 200-208
- [27] C. Tao, D. Shanxu, R. Ting, L. Fangrui, A robust parametric method for power harmonic estimation based on M-Estimators, Measurement 43 (2010) 67-77
- [28] R. Naidoo, P. Pillay, A New Method of Voltage Sag and Swell Detection, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 2, April 2007, 1056-1063
- [29] V. B. Núñez, J. M. Frigola, and S. H. Jaramillo, A Survey on Voltage Dip Events in Power Systems, International Conference on Renewable Energies and Power Quality – ICREPQ'08, Santander 12-14 March, 2008
- [30] E. Pérez, J. Barros, An extended Kalman filtering approach for detection and analysis of voltage dips in power systems, Electric power Systems Research 78 (2008) 618-625
- [31] J. Urbanetz, P. Braun, R. Rüther, Power quality analysis of grid-connected solar photovoltaic generators in Brazil, Energy Conversion and Management 64 (2012) 8–14. C. Kocatepe, A. Inan, O. Arıkan, R. Yumurtacı, B. Kekezoglu,
- [32] M. Baysal, A. Bozkurt, Y. Akkaya, Power quality assessment of grid-connected wind farms considering regulations in turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 2553–2561
- [33] M. Beccali, M. Luna, M. Pucci, G. Vitale, Experimental Analysis of Power Quality Issues in a Mobile House supplied by Renewable Energy Sources, ICREPQ'07 International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Spain, Sevilla, March 2007, paper 370
- [34] S.-J. Huang, T.-M. Yang, J.-T. Huang, FPGA Realization of Wavelet transform for Detection of Electric power System Disturbances, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, April 2002, 388-393
- [35] L. Ferrigno, C. Landi, M. Laracca, FPGA-based Measurement Instrument for Power Quality Monitoring according to IEC Standards, FMTC 2008 – IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Victoria, Vancouver Island, Canada, May 12-15, 2008
- [36] T. Radil, F. M. Janeiro, P. M. Ramos, Development of a Signal-Phase DSP based Power Quality Analyzer using New Signal Processing Algorithms for Detection and Classification
- [37] I. Monedero, C. León, J. Ropero, A. García, J. M. Elena, J. C. Montaña, Classification of Electrical Disturbances in Real Time Using Neural Networks, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 3, July 2007, 1288-1295
- [38] J. Ruiz J., J. Ortuondo, N. Palacios, J. Izquierdo; L. A. Leturiondo, E. Aramendi, J. Amantegui, Real Time Power Supply Quality Measurement and Monitoring Multichannel System, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, July 1995, 1190-1199
- [39] D. Gallo, C. Landi, N. Rignano, Real-Time Digital Multifunction Instrument for Power Quality Integrated Indexes Measurement, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 57, No. 12, December 2008, 1190-1199
- [40] E. Yanti Hamid and Zen-Ichiro Kawasaki, Wavelet-Based Data Compression of Power System Disturbances Using the Minimum Description Length Criterion, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, April 2002, 460-465
- [41] C.-T. Hsieh, S.-J. Huang, C.-L. Huang, Data reduction of power quality disturbances – a wavelet transform approach, Electric Power Systems Research 47 (1998) 79-86

- [42] J. J. G. de la Rosa, A. M. Muñoz, A. G. de Castro, A web-based distributed measurement system for electrical power quality assessment, *Measurement* 43 (2010) 771-780
- [43] S.-Y. Chan, J.-H. Teng, C.-Y. Chen, D. Chang, Multi-functional power quality monitoring and report-back system, *Electric Power and Energy Systems* 32 (2010) 728-735
- [44] Massimo Aiello, Antonio Cataliotti, Salvatore nuccio, A PC-based instrument for harmonics and interharmonics measurement in power supply systems, *Measurement* 35 (2004) 371-380
- [45] José Batista, Júlio S. Martins, João L. Afonso, Low-Cost Digital System for Power Quality Monitoring, *ICREPQ'03 – International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Vigo, Spain, 9th April 2003, ISBN: 84 607 6768 x, paper 385
- [46] M. Aiello, A. Cataliotti, S. Nuccio, A Chirp-Z Transform-Based Synchronizer for Power System Measurements, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 54, No. 3, June 2005, 1025-1032
- [47] A. Cataliotti, V. Cosentino, S. Nuccio, A new Phase Locked Loop Strategy for Power Quality Instruments Synchronisation, *Proc. IMTC 2005 – Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Ottawa, Canada, 941-946
- [48] F. D. Freijedo, J. Doval-Gandoy, O. Lopez and J. Cabaleiro: Robust Phase Locked Loops Optimized for DSP Implementation in Power Quality Applications, *Proc. IECON 2008*, 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, FL, Orlando, 3052-3057
- [49] M. Aiello, A. Cataliotti, V. Cosentino, S. Nuccio, Synchronization Techniques for Power Quality Instruments, *IEEE T. Instrum. Meas.*, vol. 56, no. 5, October 2007, 1511-1519
- [50] A. Nagliero, R. A. Mastromauro, M. Liserre, A. Dell'Aquila, Monitoring and Synchronization Techniques for Single-Phase PV Systems, *Proc. SPEEDAM 2010*, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Pisa, 1404-1409
- [51] W. G. K. Ihlenfeld, M. Seckelmann, Simple Algorithm for Sampling Synchronization of ADCs, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 58, No. 4, April 2009, 781-785
- [52] M. Karimi-Ghartemani, M. Reza Iravani, A Signal Processing Module for Power System Applications, *IEEE T. Power Deliver.*, vol. 18, no. 4, October 2003, 1118-1126
- [53] P. M. Ramos, A. C. Serra, Comparison of frequency estimation algorithms for power quality assessment, *Measurement* 42 (2009) 1312-1317
- [54] S. Y. Xue, S. X. Yang, Power system frequency estimation using supervised Gauss-Newton algorithm, *Measurement* 42 (2009) 28-37
- [55] Z. Salcic, R. Mikhael, A new method for instantaneous power system frequency measurement using reference points detection, *Electric Power Systems Research* 55 (2000) 97-102
- [56] E. M. Siavashi, S. Afsharnia, M. Tavakoli Bina, M. Karbalai Zahed, M. R. Baradar, Frequency Estimation of Distorted Signals in Power Systems Using Particle Extended Kalman Filter, 2009 2nd international Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System, 174-178
- [57] M. Karimi-Ghartemani, M. R. Iravani, Wide-range, fast and robust estimation of power system frequency, *Electric power Systems Research* 65 (2003) 109-117
- [58] M. B. Đurić, Ž. R. Đurišić, Combined Fourier and Zero Crossing Technique for Frequency Measurement in Power Networks in the Presence of Harmonics, *ICREPQ'05 – International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Zaragoza, Spain, 2005, paper 330
- [59] I. Sadinezhad, M. Joorabian, A novel frequency tracking method based on complex adaptive linear neural network state vector in power systems, *Electric Power Systems Research* 79 (2009) 1216-1225
- [60] A. López, J.-C. Montaño, M. Castilla, Jaime Gutiérrez, M. Dolores Borrás, Juan Carlos Bravo, Power System Frequency Measurement Under Nonstationary Situations, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 23, No. 2, April 2008, 562-567
- [61] ERGEG (European Regulators' Group for Electricity and Gas): Towards Voltage Quality Regulation In Europe, Ref: E06-EQS-09-03. 2006. december 6.
- [62] K. Macken, Analysis and control of renewable generation units used to improve power quality, PhD thesis, Department Electrical Engineering, November 2003, Leuven, Belgium, Katholieke Universiteit Leuven
- [63] Union of the Electricity Industri (EURELECTRIC): Quality of Electricity Distribution Network Services. Ref.: 2006-233-0012. 7. December 2006

- [64] The IEEE standard dictionary of electrical and electronics terms, 6th ed., IEEE Std. 100-1996
- [65] Working group on quality of electricity supply Council of European Energy Regulators. Quality of electrical supply: Initial benchmarking on actual levels, standards and regulatory strategies, April 2001.
- [66] IEC 61000-5-1: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5: Installation and mitigation guidelines - Section 1: General considerations - Basic EMC publication
- [67] MSZ EN 50160: A közcélú elosztóhálózatokon szolgáltatott villamos energia feszültségjellemzői. 2010.
- [68] Unhauzer Attila, Villamos hálózati fogyasztók zavarhatásainak és teljesítményprofiljainak vizsgálata új mérési és modellezési módszerekkel – PhD értekezés (Miskolci Egyetem, 2012)
- [69] Kvasznicza Zoltán: Szabályozott felvonó hajtások alkalmazásának hálózati és környezeti zavarai – PhD értekezés (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2011)
- [70] IEC 61000-4-30: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques –Section 30 Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. 2008
- [71] IEC 61000-4-7: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques –Section 7: General guide on harmonics and inter-harmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto. 2002.
- [72] IEEE Std 1159™-2009, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power & Energy Society
- [73] IEC 61000-4-7: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques –Section 7: General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto. 1991
- [74] Bencs Róbert: Komplex mérésfeldolgozó alkalmazás fejlesztése Measurement Studio-ban villamos hálózatok elemzéséhez, Szakdolgozat, 2011, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar
- [75] Váradiné Sz. Angéla, Hegedüs János, Bátorfi Richárd, Unhauzer Attila: Méréstechnika jegyzet, HEFOP – jegyzet (Nemzeti fejlesztési terv), 2007
- [76] John G. Webster: The Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, CRC Press, 1999.
- [77] E. Unhauzer, T. Bodolai, Hardware Design of a Network Analyzing Equipment, Proc. X. ENELKO, 10th International Conference on Energetics-Electrical Engineering, Târgu Mureş, Romania, 2009, 151-155
- [78] Unhauzer Edina, Villamos hálózat analizáló műszer mérőrendszerének tervezése, Szakdolgozat, 2011, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar
- [79] K. Sarvajcz, E. Unhauzer, A. V. Szarka, IT and Communication System of Electrical Network Analyser, Proc. XII. ENELKO, 12th International Conference on Energetics-Electrical Engineering, Cluj, Romania, 2011, 85-90
- [80] L. P. Van Biesen, A case study for PC-based expert systems using computer controlled measurement instruments, Measurement 13 (1994) 257-266
- [81] C. L. Bryanta, N. J. Gandhib, Real-time data acquisition and control system for the measurement of motor and neural data, Journal of Neuroscience Methods 142 (2005) 193–200
- [82] A villamosenergia-rendszer szabályozása, MAVIR tanulmány,
<http://www.mavir.hu/web/mavir/tanulmanyok>
- [83] L. Kazup, G. Z. Marcsák, Fáziszárt hurok alkalmazása villamoshálózati mérésadatgyűjtő rendszerekben, XXI. SzámOkt, Kolozsvár, Románia, 2011, 85-90
- [84] A. V. Szarka, Measuring harmonic distortion in electrical power networks – New approach, Measurement 43 (2010) 1628-1635
- [85] S. Jalal Kazempour, M. P. Moghaddam, M.R. Haghifam, G.R. Yousefi: Electric energy storage systems in a market-based economy: Comparison of emerging and traditional technologies, Renewable Energy, Vol. 34, Issue 12, December 2009, 2630–2639
- [86] Mileff Péter, Párhuzamos és Elosztott rendszerek, Tananyag, Miskolci Egyetem, Általános Informatikai Tanszék,
http://users.iit.uni-miskolc.hu/~mileff/parh2/Parhuzamos2_Mileff_Peter.pdf
- [87] Kacsuk Péter, A szuperszámítógép technológiai trendje, MTA SZTAKI,
<http://nws.iif.hu/ncd2001/docs/eloadas/121/index.htm>

- [88] J. Nietoa, G. de Arcasa, M. Ruiza, J. Vegab, J.M. Lópeza, E. Barreraa, R. Castro, D.Sanza, N. Utzelc, P. Makijarvic, L. Zabeoc, A GPU-based real time high performance computing service in a fast plant system controller prototype for ITER, *Fusion Engineering and Design*, 87 (2012) 2152– 2155
- [89] S. Walkowiak, K. Wawruch, M. Nowotka, L. Ligowski, W. Rudnicki, Exploring utilisation of GPU for database applications, *Procedia Computer Science* 1 (2012) 505–513
- [90] Uray Vilmos, Dr. Szabó Szilárd: *Elektrotechnika*, ISBN 963 18 8918 1, Nemzeti Tankönyvkiadó Rt., 1998.
- [91] IEEE Std. 1459-2000: Standard Definitions for Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, NonSinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions
- [92] Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty: *Electrical Power System Quality*, ISBN 0-07-138622-X, 2002.
- [93] M. Erhna Balci, M. Hakan Hocaoglu, Quantitative comparison of power decomposition, *Electrical Power Systems Research* 78 (2008) 318-329
- [94] A.E. Emanoel, Powers in nonsinusoidal situations a review of definitions and physical meaning, *IEEE Transaction on Power Delivery* 5 (1990) 1377-1389
- [95] M.A. Slonim, J. D. Van Wyk, Power components in a system with sinusoidal and nonsinusoidal voltages and/or currents, *IEEE Proc. Electr. Power Appl.* 135 (2) (1988) 76-84
- [96] L.S. Czarnecki, Distortion power in systems with nonsinusoidal voltage, *IEEE Proc. Electr. Power Appl.* 139 (3) (1992) 276-280
- [97] Kazup László, A hálózati feszültség-torzulás hatásainak vizsgálata mechatronikai rendszerekben, Diplomaterv, Miskolci Egyetem, 2013
- [98] Faleh A. Al-Sulaiman, M. Abdul Baseer, Anwar K. Sheikh, Use of electrical power for online monitoring of tool condition, *Journal of Materials Processing Technology* 166 (2005) 364–371
- [99] M. Vergara, J.-L. Sancho, P. Rodríguez, A. Pérez-González, Hand-transmitted vibration in power tools: Accomplishment of standards and users' perception, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol, 38, Issues 9–10, September–October 2008, 652-660
- [100] Unhauzer Attila: Diagnostics of power tools by computerized measurement and data processing of electrical parameter, *MicroCAD 2008*, University of Miskolc, 2008. március 20-21, ISBN 278-263-661-821-6
- [101] Váradiné Szarka Angéla: Leállási idő mérésére alkalmas tesztberendezés vezérlésének fejlesztése. „Innováció és Tudás” konferencia 2005, Miskolc, pp.101-106.
- [102] National Instruments, <http://hungary.ni.com/>
- [103] LEM, <http://www.lem.com/>
- [104] Douglas M. Considine: *Process/Industrial Instruments & Control Handbook*, McGraw-Hill, 1993.
- [105] Tran Tien Lang: *Computerized Instrumentation*, John Wiley & Sons Ltd., England 1991.
- [106] NI 435x User Manual, <http://www.ni.com/pdf/manuals/370841b.pdf>
- [107] Bencs Róbert, Váradiné Szarka Angéla: Mérési adatok automatizált feldolgozó- és dokumentum generáló szoftverrendszere villamos hálózat diagnosztikai alkalmazáshoz, XIII. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia, 2012. október 11-14., Gyulafehérvár
- [108] Electrotek Concepts, <http://www.electrotek.com/harmonic.htm>

Mellékletek

1. számú melléklet: Paraméterfájlba mentett mérést leíró adatok struktúrája

2 Byte (1 unsigned short)	•Verziószám
30 Byte (30 char)	•Mérési azonosító
5 Byte (5 char)	•Fiók típusai (5 fiók)
5 Byte (5 char)	•Fiók be/ki kapcsolt állapotok (5 fiók)
5 Byte (5 char)	•Fiók prefixumok (5 fiók) -1 milli, 0 semmi, +1 kiló, +2 mega
24 Byte (3 double)	•Fiók 1 szorzó (3 fázis)
24 Byte (3 double)	•Fiók 2 szorzó (3 fázis)
24 Byte (3 double)	•Fiók 3 szorzó (3 fázis)
24 Byte (3 double)	•Fiók 4 szorzó (3 fázis)
24 Byte (3 double)	•Fiók 5 szorzó (3 fázis)
40 Byte (5 double)	•Váltó szorzók (5 fiók)
40 Byte (5 double)	•Normál RMS értékek (5 fiók)
1 Byte (1 char)	•Teljesítmények száma (teljes._szama)
24 Byte (24 char)	•Teljesítmények párosítása (2 * MAX_TELJESITMENY(=12))
8 Byte (1 double)	•Valós mintavételezési frekvencia [Hz]
8 Byte (1 double)	•Konverziós frekvencia [Hz]
1 Byte (1 char)	•THD algoritmus
5 Byte (5 char)	•Aszimmetria algoritmus (5 fiók)
8 Byte (1 double)	•Frekvenciaszámítás időegysége [sec]
40 Byte (5 double)	•Kártya polinom (5db)
50 Byte (50 char)	•Mérőkártya típusa

2. számú melléklet: Tíz perces adatfájlok felépítése

9 Byte (struct tm)	•Időpont 10 perces kezdet
2 Byte (1 unsigned short)	•10 periódusok száma a 10 perc alatt (tiz_periodusok_szama)
4 Byte (1 int)	•Összes mintaszám a 10 perc alatt csatornánként (osszmintaszam)
CS * MSZ * 2 Byte (short)	•Minták (csatornaszám * osszmintaszam)
PSZ * 4 Byte (1 unsigned int)	•Minták száma a 10 periódusokban (tiz_periodusok_szama)
PSZ * 8 Byte(double)	•Hálózati Frekvencia értékek(tiz_periodusok_szama)
CS * PSZ * 1 Byte(char)	•Flag hiba jelzés (csatornaszám * tiz_periodusok_szama)
CS * PSZ * 8 Byte(double)	•RMS értékek (csatornaszám * tiz_periodusok_szama)
CS * PSZ * 8 Byte(double)	•THD értékek (csatornaszám * tiz_periodusok_szama)
5 * PSZ * 8 Byte (double)	•Aszimmetria értékek (FIKOKK_SZAMA * tiz_periodusok_szama)
4 * TSZ * PSZ * 8 Byte (double)	•Teljesítményértékek(látszólagos, hatásos, meddo, cosfi) (4 * teljes._szama * tiz_periodusok_szama)
10 * TSZ * PSZ * 8 Byte (double)	•Teljesítményértékek(S1,P1,Q1,PF1,SN,PH,DU,DI,SH,DH) (10 * teljes._szama * tiz_periodusok_szama)
40 * TSZ * PSZ * 8 Byte (double)	•Harmonikus teljesítmények (40 * teljes._szama * tiz_periodusok_szama)
FESZ_CS * 10 * 8 Byte (double)	•Flicker értékek (Pst)

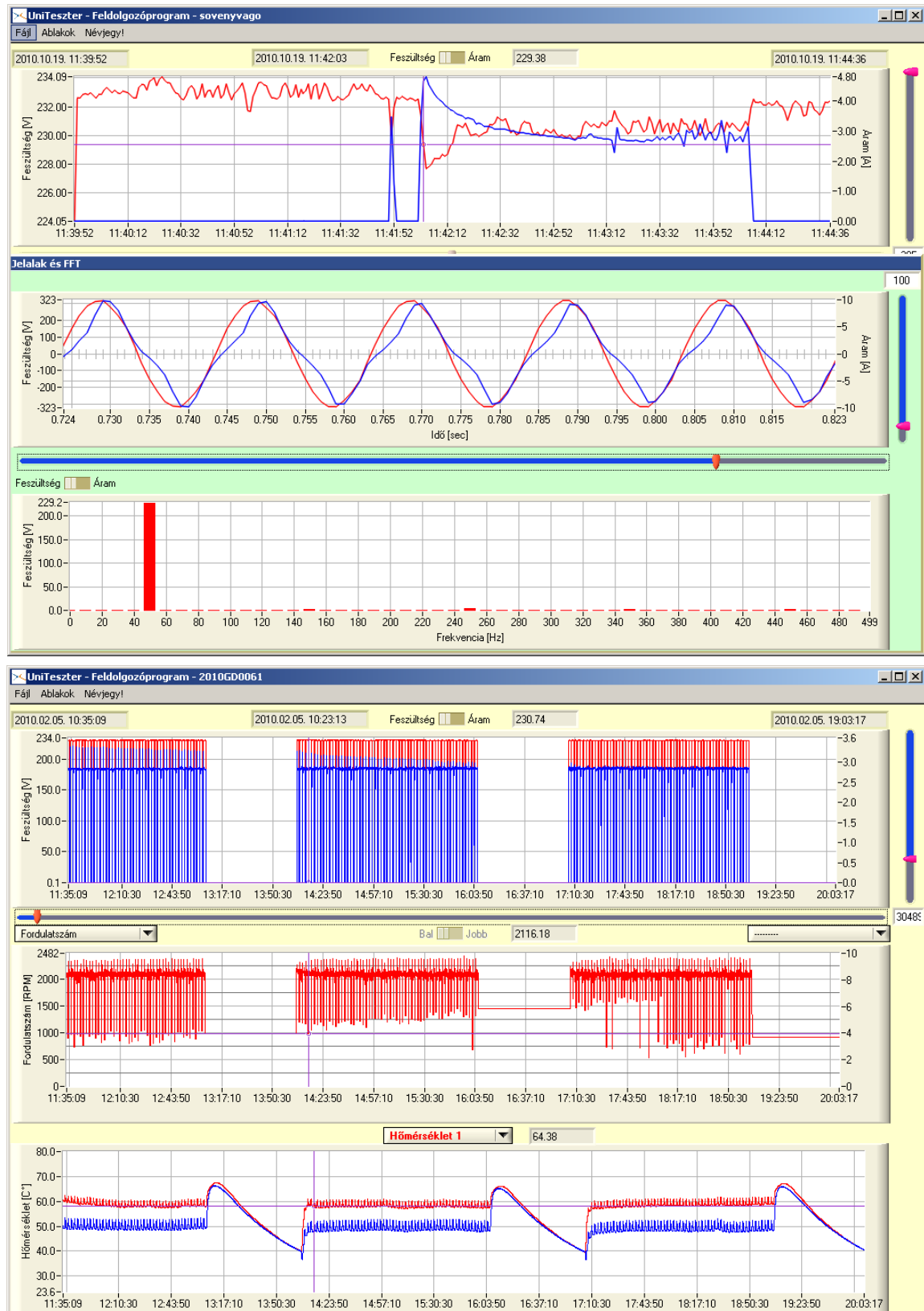
CS: csatornák száma

MSZ: csatornánkénti minták száma a 10 perc alatt

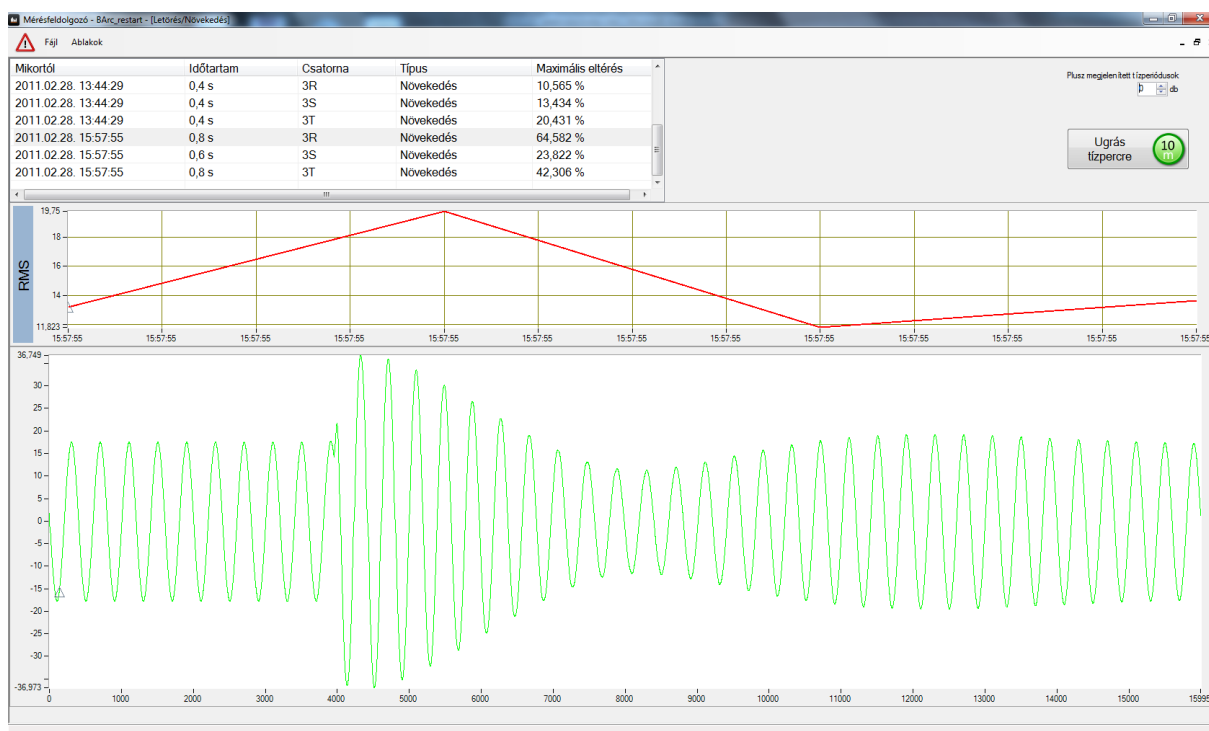
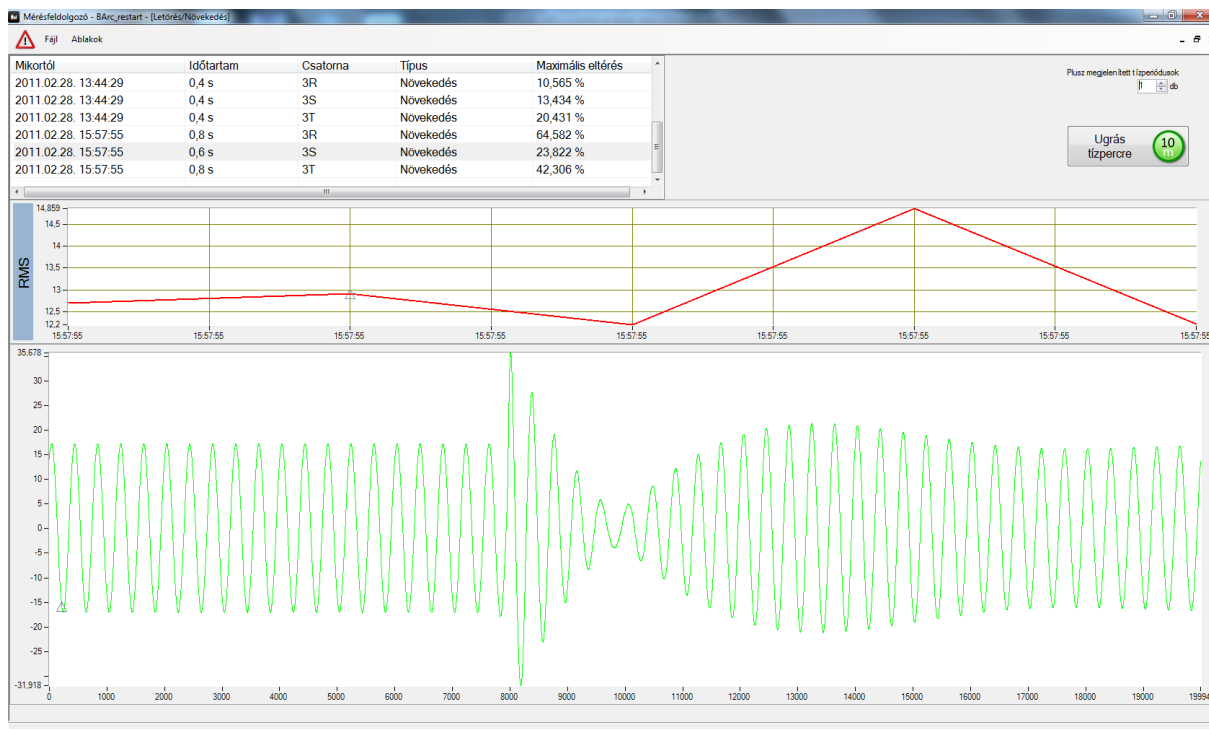
PSZ: 10 periódusok száma

TSZ: teljesítmények száma

3. számú melléklet: UniTeszter mérési adatainak megjelenítése, valós ipari mérések

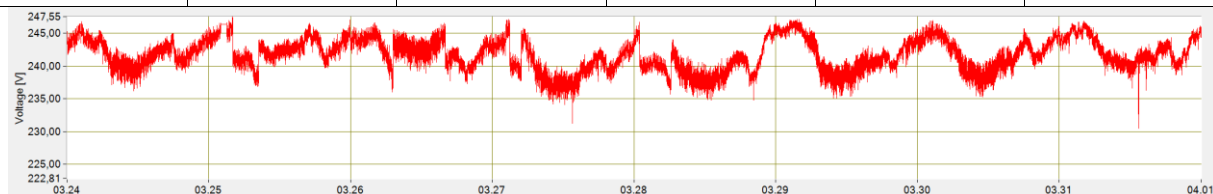


4. számú melléklet: A megjelölt „hibás” 10 periódusok vizsgálata

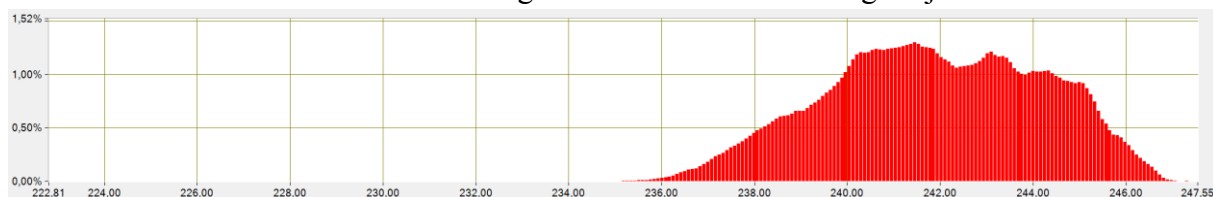


5. számú melléklet: Feszültség effektív értékének elemzése

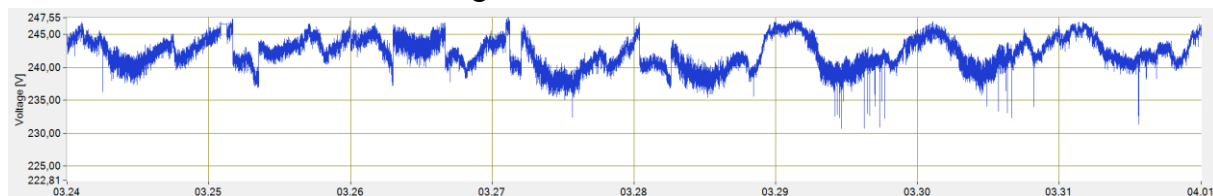
	Min	P5	P95	Max	Átlag
U1R [V]	230,44	237,98	245,45	247,50	241,88
U1S [V]	230,71	238,68	245,76	247,55	242,32
U1T [V]	222,81	237,82	245,05	246,91	241,47



U1R fázisfeszültség effektív értékének idődiagramja



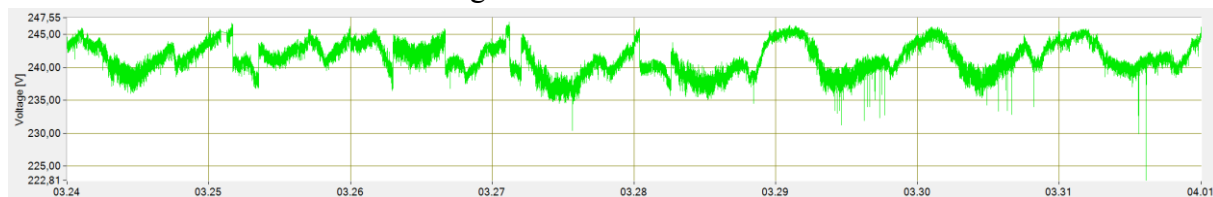
U1R fázisfeszültség effektív értékének statisztikai eloszlása



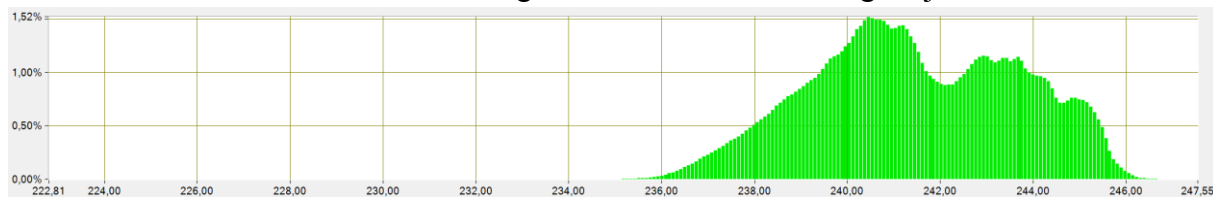
U1S fázisfeszültség effektív értékének idődiagramja



U1S fázisfeszültség effektív értékének statisztikai eloszlása



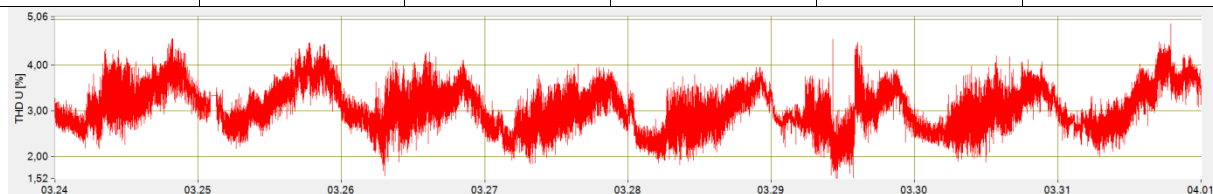
U1T fázisfeszültség effektív értékének idődiagramja



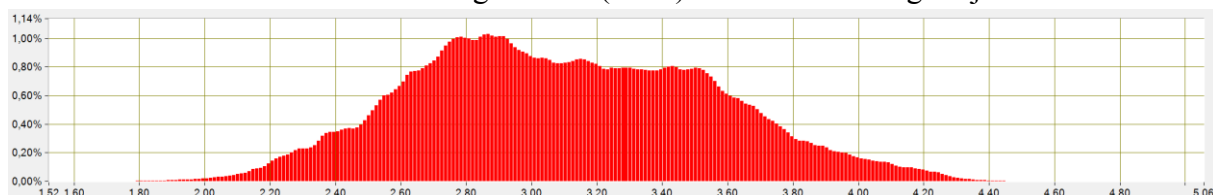
U1T fázisfeszültség effektív értékének statisztikai eloszlása

6. számú melléklet: Feszültség torzítás (THD) elemzése

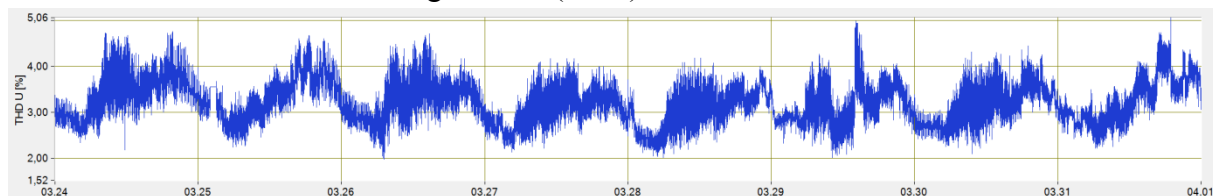
	Min	P5	P95	Max	Átlag
U1R [%]	1,52	2,39	3,87	4,90	3,10
U1S [%]	1,98	2,57	4,01	5,06	3,26
U1T [%]	1,57	2,36	3,69	4,53	3,01



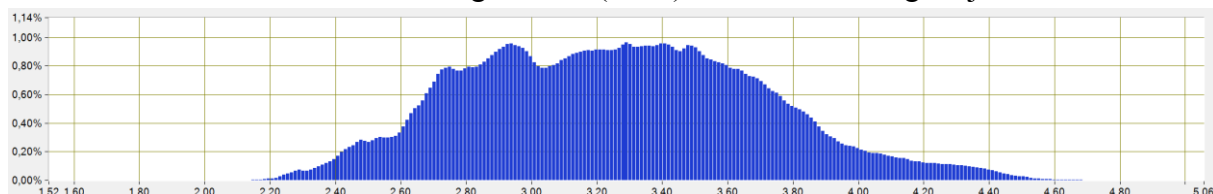
U1R fázisfeszültség torzítás (THD) értékének idődiagramja



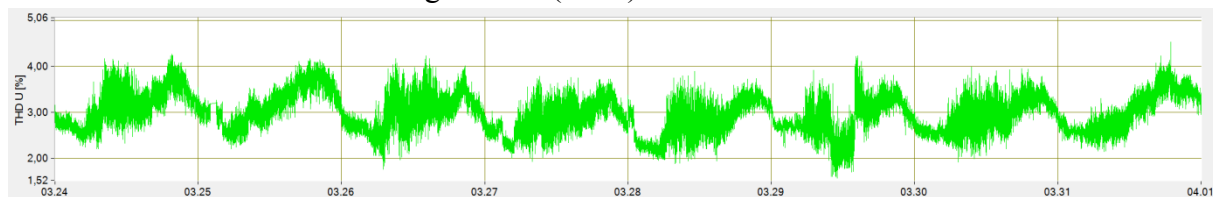
U1R fázisfeszültség torzítás (THD) értékének statisztikai eloszlása



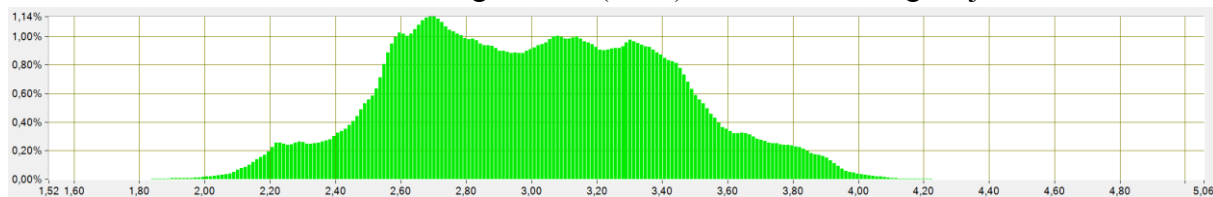
U1S fázisfeszültség torzítás (THD) értékének idődiagramja



U1S fázisfeszültség torzítás (THD) értékének statisztikai eloszlása



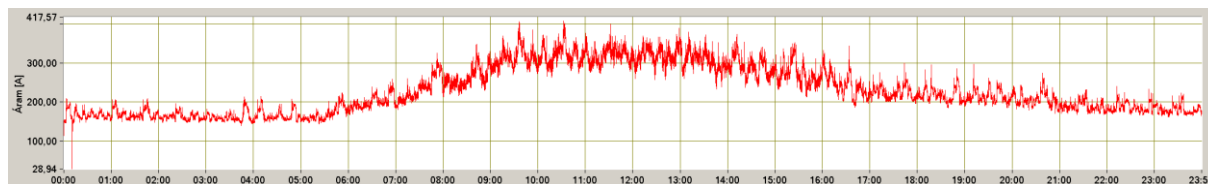
U1T fázisfeszültség torzítás (THD) értékének idődiagramja



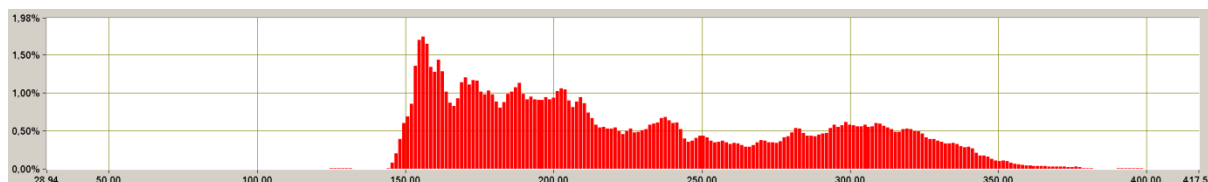
U1T fázisfeszültség torzítás (THD) értékének statisztikai eloszlása

7. számú melléklet: Áram effektív értékének elemzése

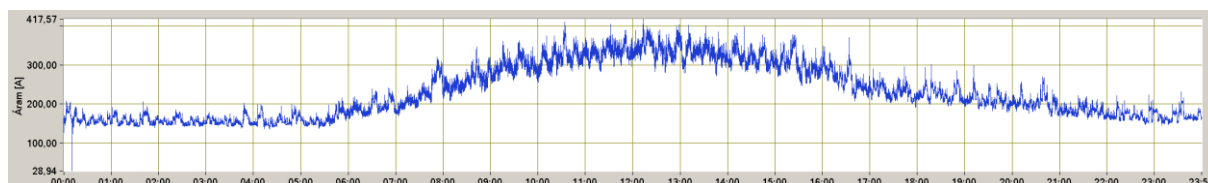
	Min	P5	P95	Max	Átlag
Transzformátor szekunder oldali áram R fázis [A]	29,62	154,53	330,05	407,23	226,74
Transzformátor szekunder oldali áram S fázis [A]	28,94	147,00	342,82	417,57	228,24
Transzformátor szekunder oldali áram T fázis [A]	39,81	158,13	318,82	392,69	223,45



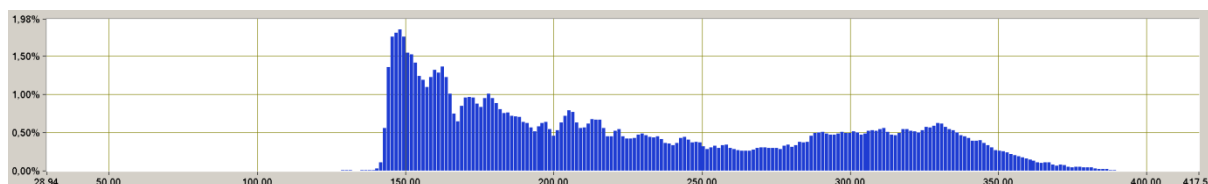
A transzformátor szekunder oldali áram R fázis effektív értékének idődiagramja



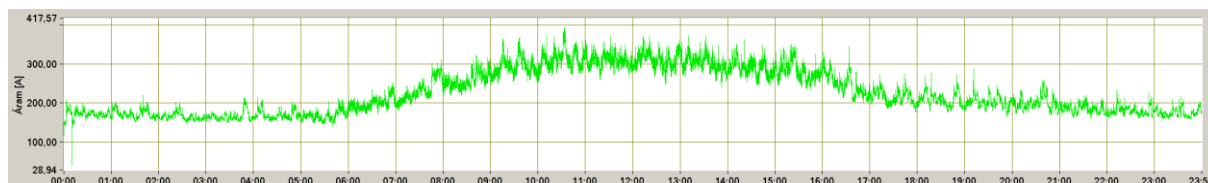
A transzformátor szekunder oldali áram R fázis effektív értékének statisztikai eloszlása



A transzformátor szekunder oldali áram S fázis effektív értékének idődiagramja



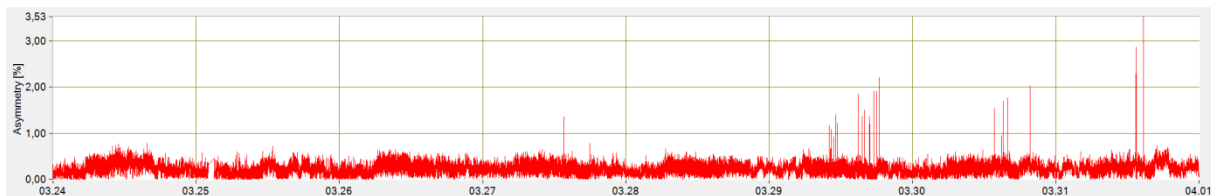
A transzformátor szekunder oldali áram S fázis effektív értékének statisztikai eloszlása



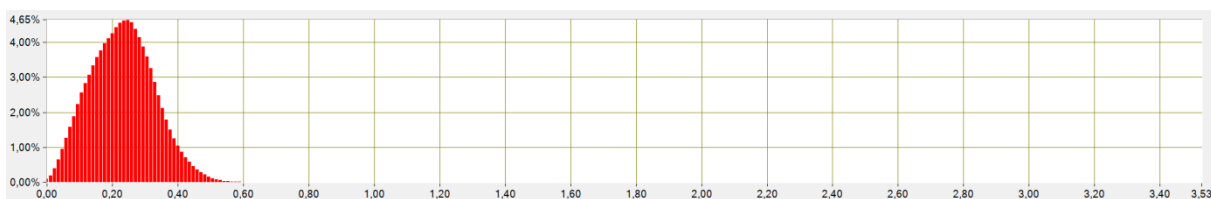
A transzformátor szekunder oldali áram T fázis effektív értékének idődiagramja

8. számú melléklet: Feszültség- és áram-aszimmetria elemzése

	Min	P5	P95	Max	Átlag
U1 [%]	0,00	0,08	0,40	3,53	0,23

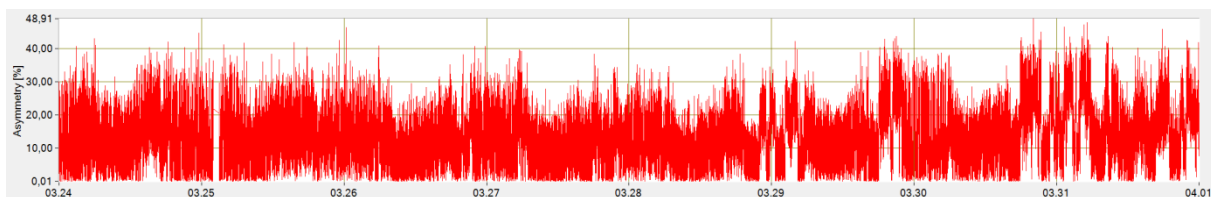


U1 feszültség aszimmetria értékének idődiagramja

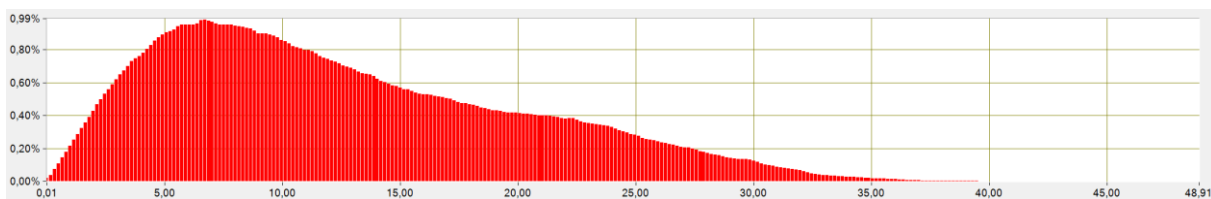


U1 feszültség aszimmetria értékének statisztikai eloszlása

	Min	P5	P95	Max	Átlag
I2 [%]	0,01	2,73	26,98	48,91	12,67



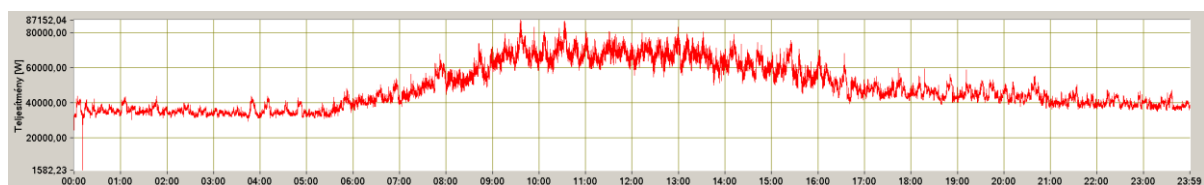
I2 áram aszimmetria értékének idődiagramja



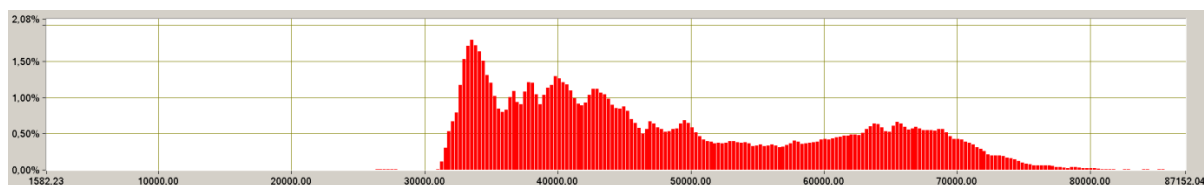
I2 áram aszimmetria értékének statisztikai eloszlása

9. számú melléklet: Teljesítményfelvétel elemzése

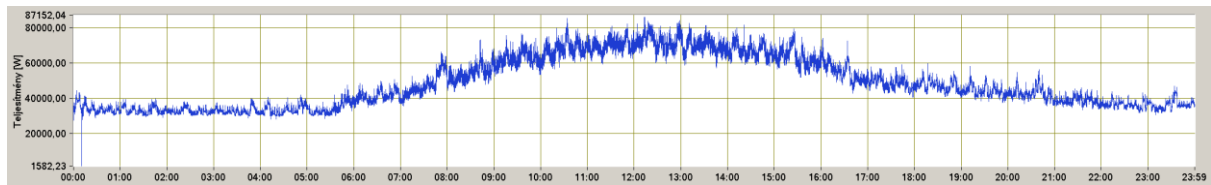
	Min	P5	P95	Max	Átlag
Hatásos teljesítmény a transzformátor szekunder oldali R fázis [W]	1704,63	33058,49	70255,44	87152,04	48234,78
Hatásos teljesítmény a transzformátor szekunder oldali S fázis [W]	1582,23	30964,34	71792,55	86012,84	47877,28
Hatásos teljesítmény a transzformátor szekunder oldali T fázis [W]	2188,63	33072,88	66561,16	81388,40	46603,48
Meddő teljesítmény a transzformátor szekunder oldali R fázis [var]	444,15	17337,98	36352,78	51226,50	25711,60
Meddő teljesítmény a transzformátor szekunder oldali S fázis [var]	533,09	17543,40	40340,39	53549,51	27291,88
Meddő teljesítmény a transzformátor szekunder oldali T fázis [var]	639,56	18599,20	37093,51	49477,97	26484,78
Teljesítménytényező a transzformátor szekunder oldali R fázis	0,7526	0,8577	0,9037	0,9677	0,8811
Teljesítménytényező a transzformátor szekunder oldali S fázis	0,7761	0,8430	0,8905	0,9517	0,8678
Teljesítménytényező a transzformátor szekunder oldali T fázis	0,7353	0,8391	0,8931	0,9599	0,8678



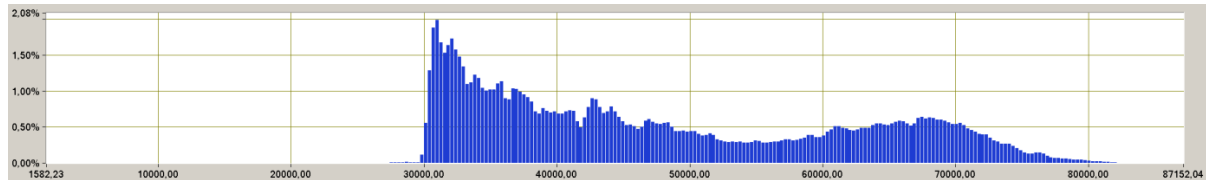
A transzformátor szekunder oldali R fázis hatásos teljesítmény idődiagramja



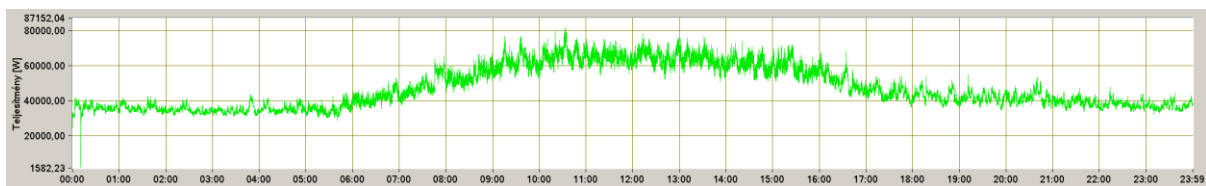
A transzformátor szekunder oldali R fázis hatásos teljesítmény statisztikai eloszlása



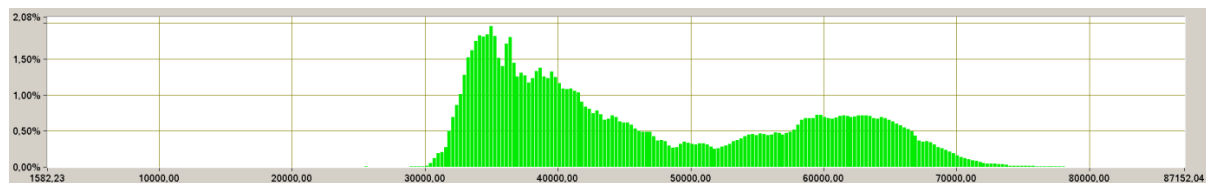
A transzformátor szekunder oldali S fázis hatásos teljesítmény idődiagramja



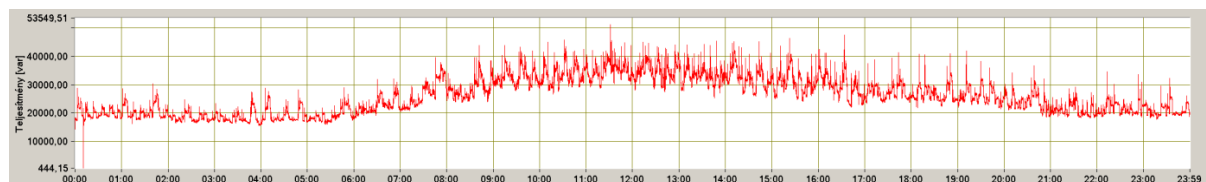
A transzformátor szekunder oldali S fázis hatásos teljesítmény statisztikai eloszlása



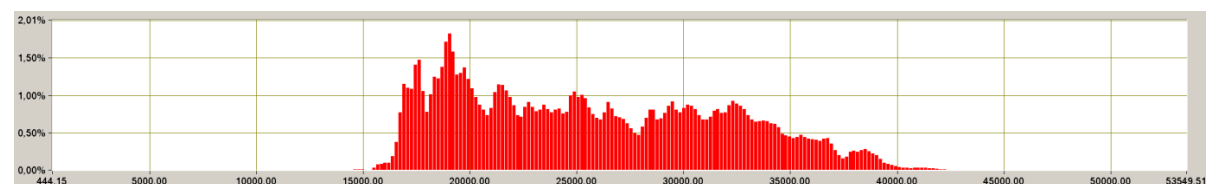
A transzformátor szekunder oldali T fázis hatásos teljesítmény idődiagramja



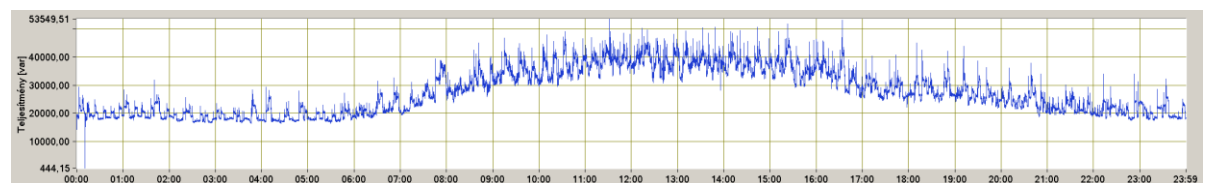
A transzformátor szekunder oldali T fázis hatásos teljesítmény statisztikai eloszlása



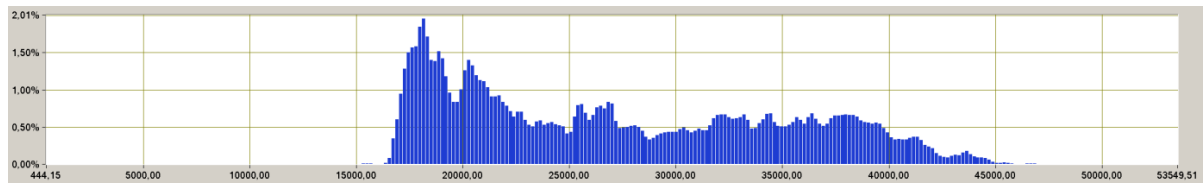
A transzformátor szekunder oldali R fázis meddő teljesítmény idődiagramja



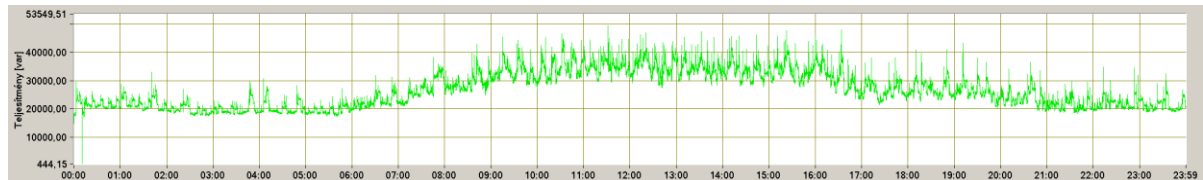
A transzformátor szekunder oldali R fázis meddő teljesítmény statisztikai eloszlása



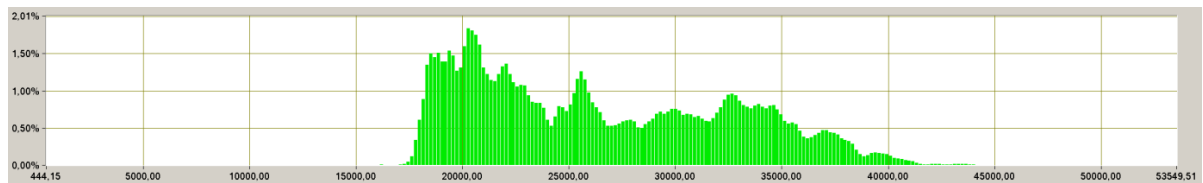
A transzformátor szekunder oldali S fázis meddő teljesítmény idődiagramja



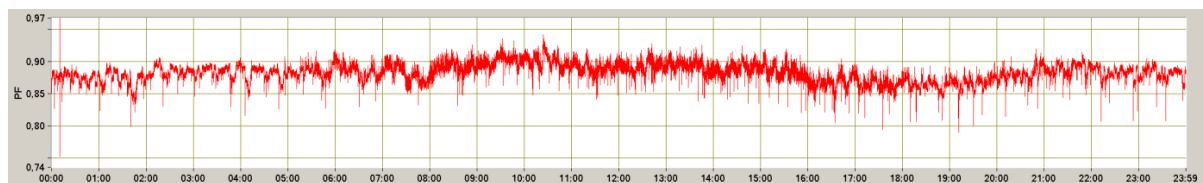
A transzformátor szekunder oldali S fázis meddő teljesítmény statisztikai eloszlása



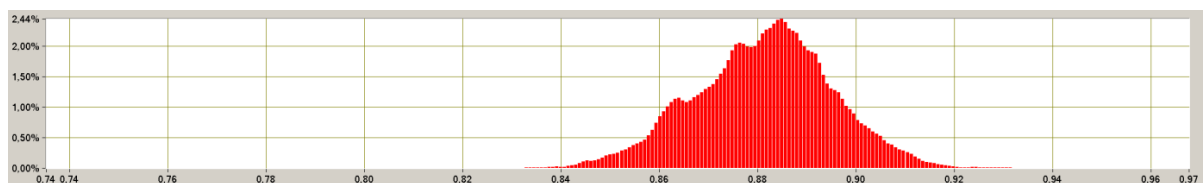
A transzformátor szekunder oldali T fázis meddő teljesítmény idődiagramja



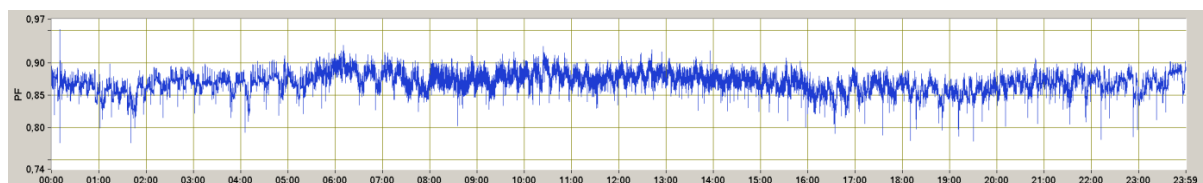
A transzformátor szekunder oldali T fázis meddő teljesítmény statisztikai eloszlása



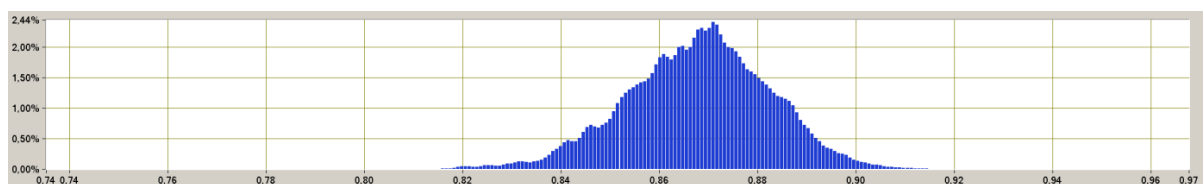
A transzformátor szekunder oldali R fázis teljesítménytényező idődiagramja



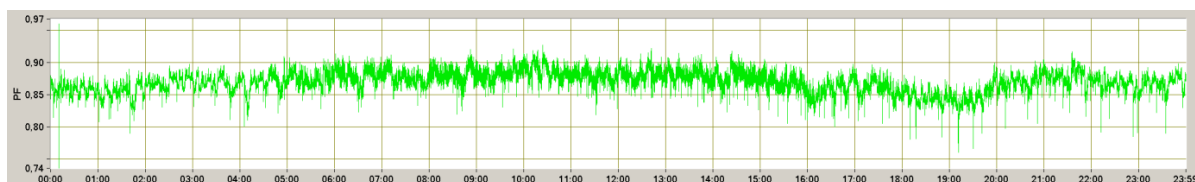
A transzformátor szekunder oldali R fázis teljesítménytényező statisztikai eloszlása



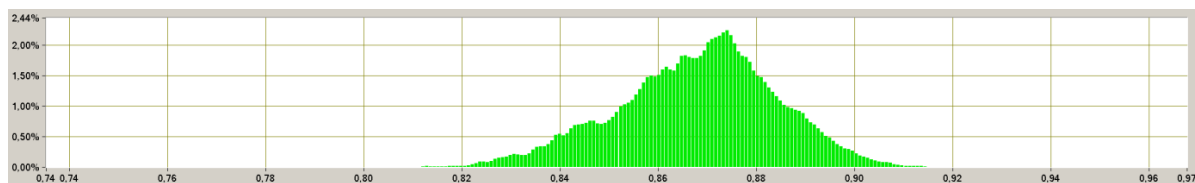
A transzformátor szekunder oldali S fázis teljesítménytényező idődiagramja



A transzformátor szekunder oldali S fázis teljesítménytényező statisztikai eloszlása



A transzformátor szekunder oldali T fázis teljesítménytényező idődiagramja



A transzformátor szekunder oldali T fázis teljesítménytényező statisztikai eloszlása

