



# SEGÉDLET az FRA diagnosztika hatékonyabb alkalmazásához, különös tekintettel a CIGRE TB 812 útmutatásaira

**Csépes Gusztáv, *Diagnostics Kft***



## Tartalomjegyzék

- 1. Az előadás célja és a téma aktualitása - 2023**
- 2. Alapvető fizikai jelenségek rövid áttekintése**
- 3. Újdonságok a CIGRE TB 812 megjelenése kapcsán**
- 4. Transformers Magazine Volume 10, Issue 2, 2023: A review of transformer FRA measurement and diagnosis techniques**
- 5. FRA algoritmusok, indexes kínai FRA kiértékelés**
- 6. Konklúziók**

## A téma aktualitása

- **Ismert tények:** üzemben fellépő erőhatások és rezgések lazítják a tekercset és a vasmagot.
- Lazulás miatt csökken a trafó **külső/belső zárlatokkal szembeni ellenálló képessége.**

### **Mechanikai állapotellenőrzésre a két legfontosabb diagnosztika:**

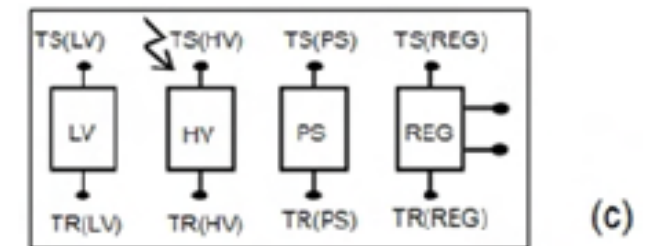
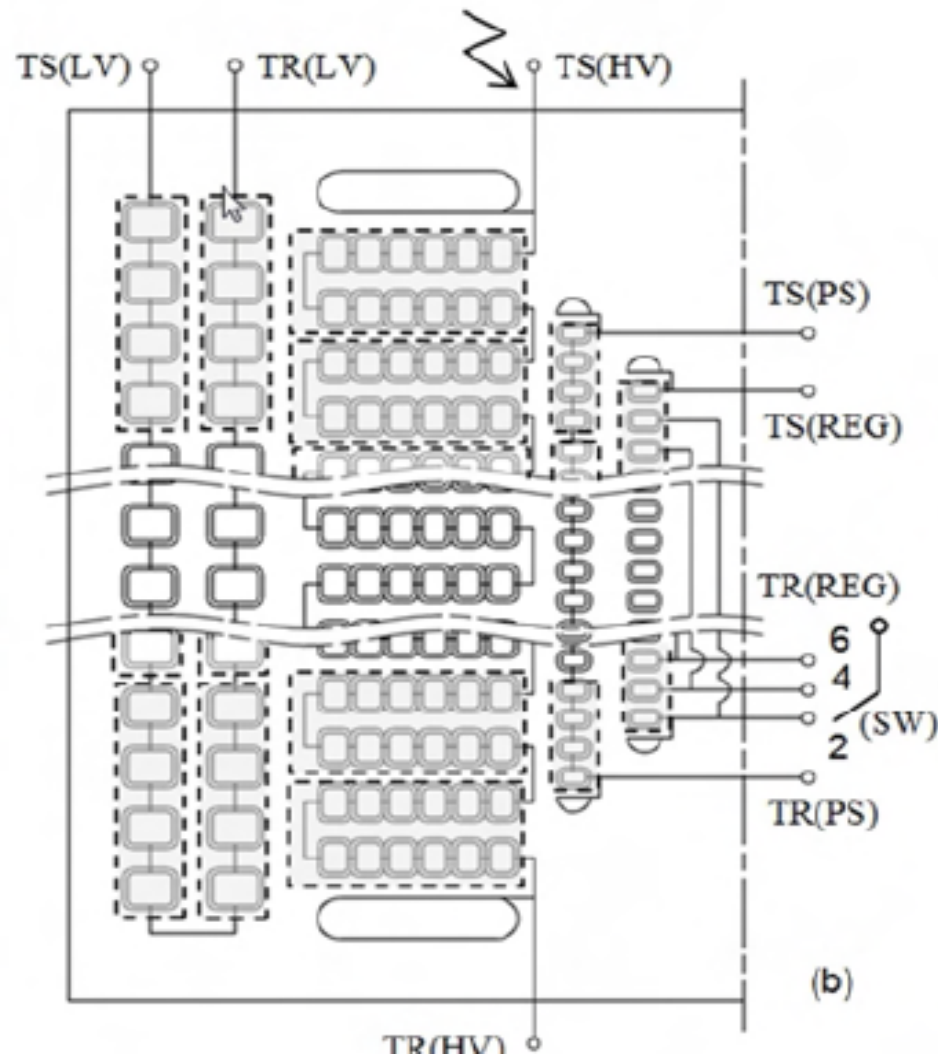
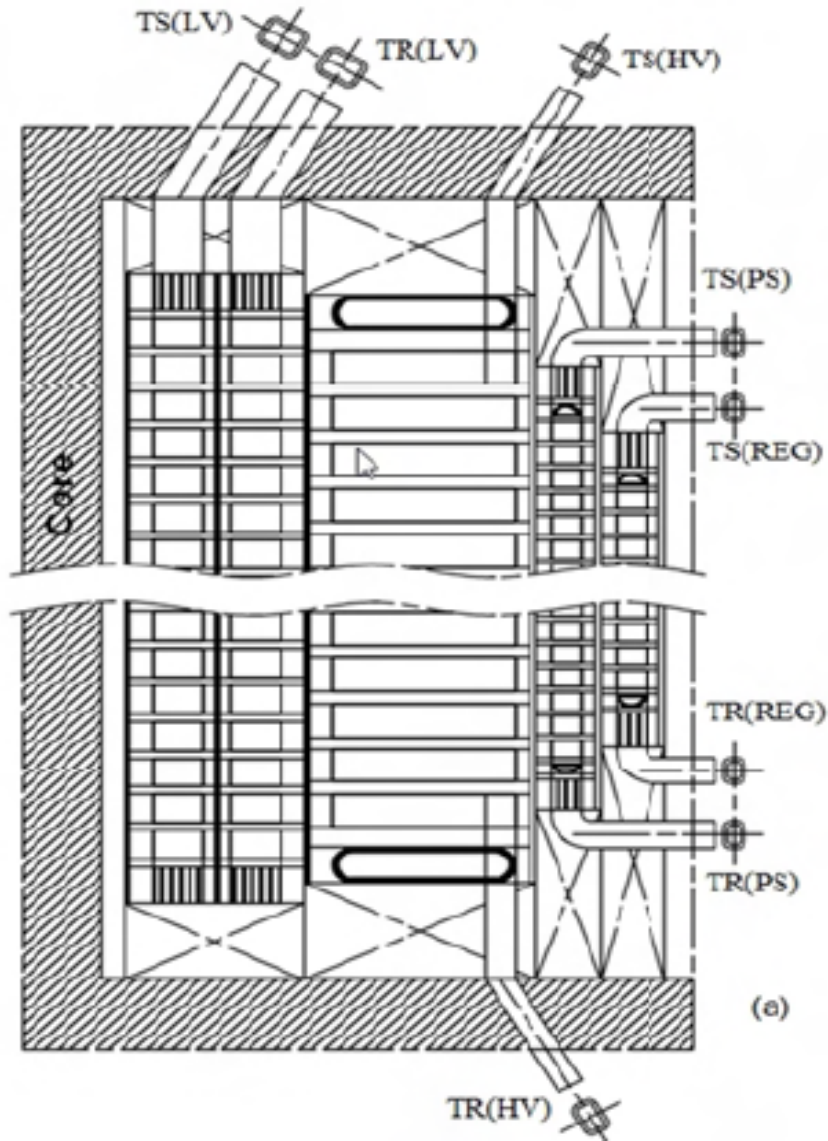
- **Rezgésmérés**
- **(S)FRA: (Sweep) Frequency Response Analysis: (S)FRA „magyarul” tekercsimpedancia frekvencia függése, alkalmazásának célja a trafó mechanikai állapotellenőrzése.**
- **A CIGRE igen** intenzíven foglalkozott az FRA technikával, lényegében az IEC és az IEEE szabványok is a CIGRE által kidolgozott eljárásokon alapulnak, a legtöbb helyen IEC és IEEE FRA szabvány alapján végzik a diagnosztikát.
- **Mi az aktualitás?** Újdonság a CIGRE újabb összefoglaló kiadványában van: TB 812 (2020)
- **Korábbi CIGRE kiadvány:** WG A2.26 (Kispál István): Zárójelentés: TB 342 (2008)
- **Technical Brochure (TB 342):** Mechanical-condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA)



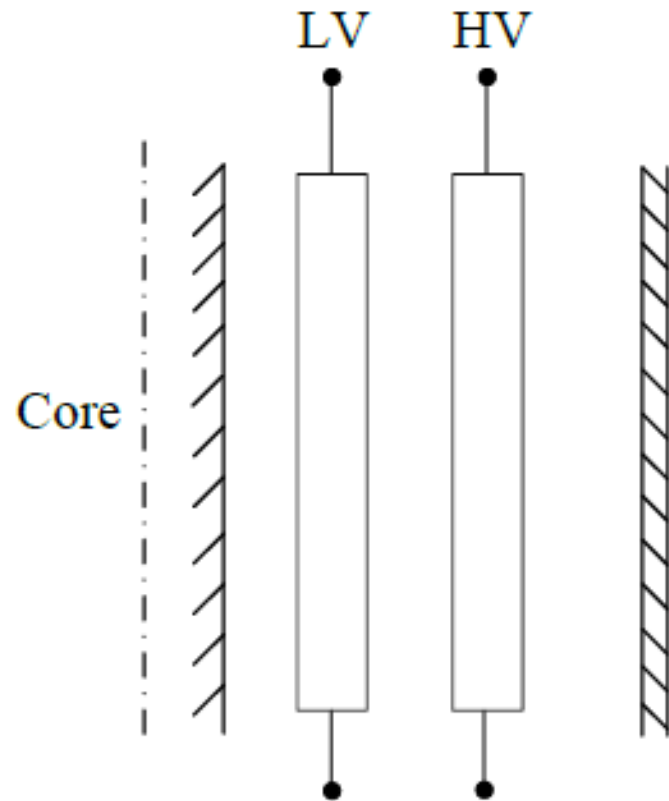
- **CIGRE TB 342 áttekintette** a rendelkezésre álló adatokat, adott egy útmutatót (GUIDE) a mérések elvégzésére, a mért eredmények kiértékelésére, és szabványosításra javasolta az FRA módszert. Amíg nem készültek szabványok, addig a **CIGRE FRA GUIDE alapján végezték az FRA diagnosztikát.**
- **Mi az alapja az FRA technikának:** A geometriai torzulás (tekercselmozdulás, vasmag zárlat, földelő és árnyékolási hiba, stb.) miatt változnak a tekercs „C” és a „L” értékei, ezek változásán keresztül a maradandó geometriai torzulására tudunk visszakövetkeztetni.
- **Az „L” és „C” változása megváltoztatja a frekvencia átviteli görbéket (amplitúdó, rezonancia frekvencia), tehát a tekercs impedancia frekvencia függésén keresztül a tekercs geometriai torzulására tudunk visszakövetkeztetni.**
- **A tekercsdeformáció ismerete különösen fontos közeli zárlatok után, de növekvő érdeklődés a „rázást és ütést” okozó szállítás után, és újabban a trafó és a hálózat kölcsönhatásából létrejövő romboló hatású belső rezonanciás túlfeszültség vizsgálata miatt is.**

# A vizsgálandó trafó egy fázisának áttekintő vázlata:

## Geometriai vázlat - Villamos ábrázolás - Szimbolikus ábrázolás



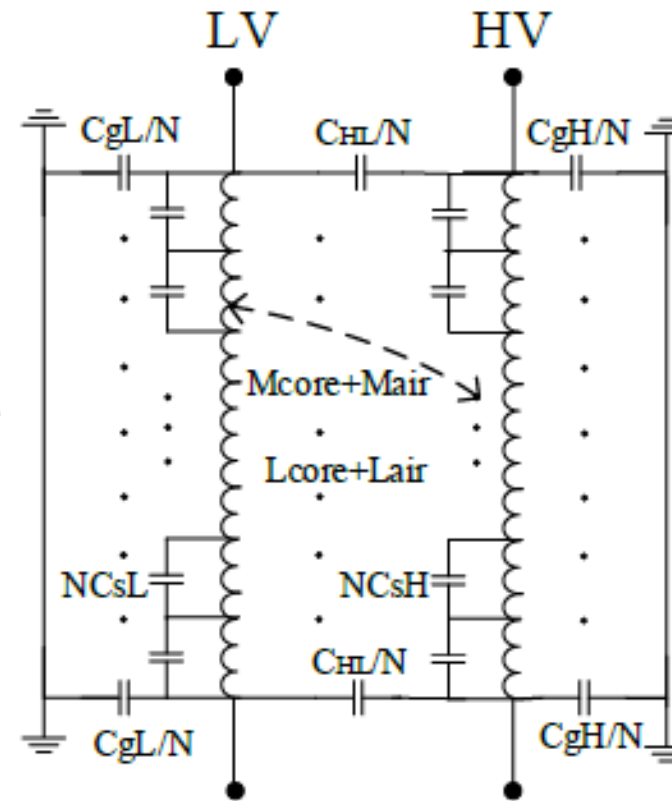
# Egy két tekercses, egyfázisú trafó sematikus ábrája és helyettesítő áramköre



(a) Winding arrangement

Tekercselrendezés

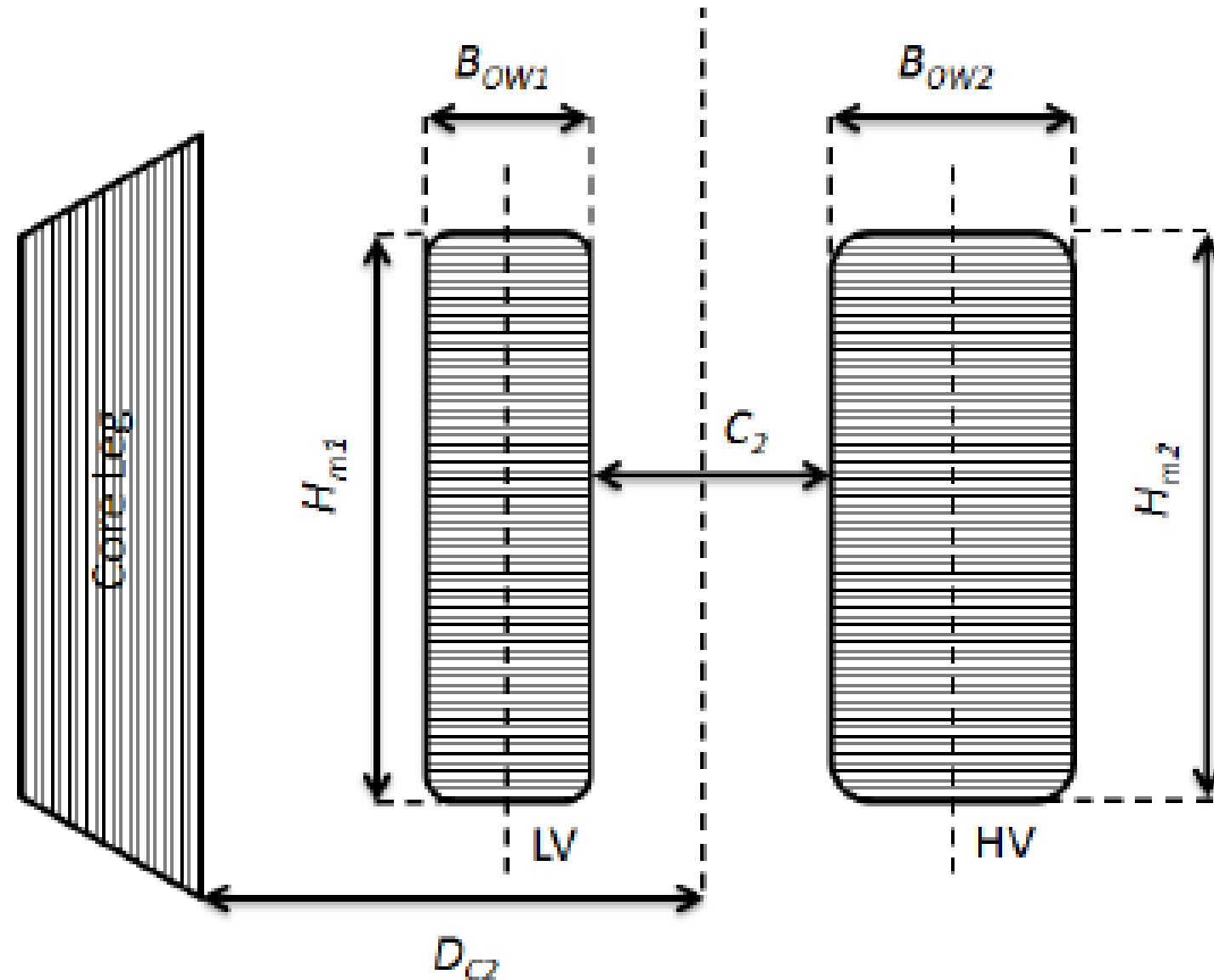
Tank



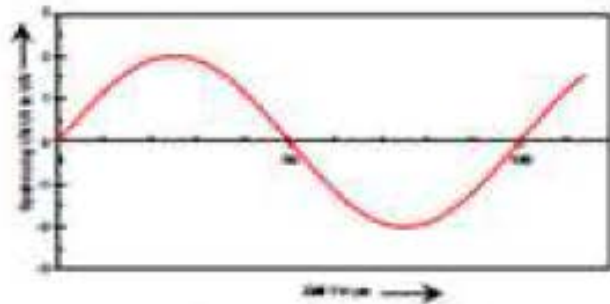
(b) N-element equivalent circuit

N-elemes egyenértékű áramkör

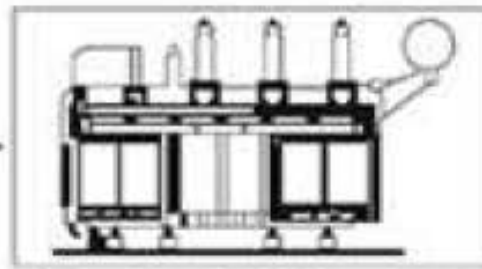
# Egy két tekercses, egyfázisú trafó sematikus ábrája a tekercsek méreteivel



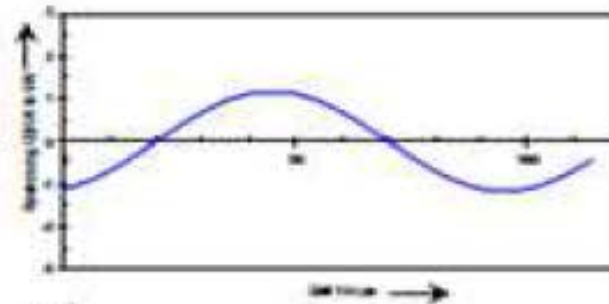
# Transformer



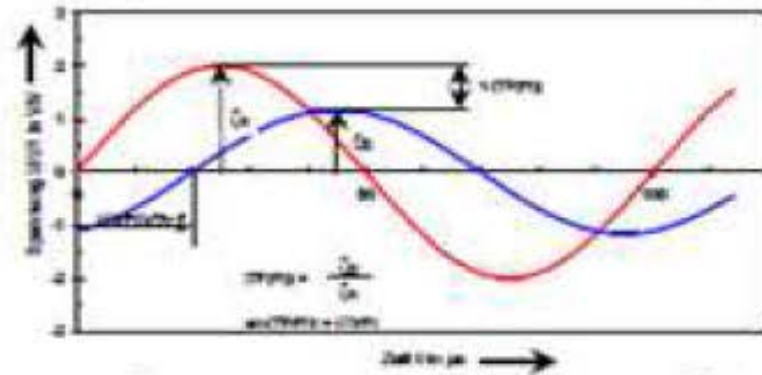
Input signal  
(sine wave of  
variable frequency)



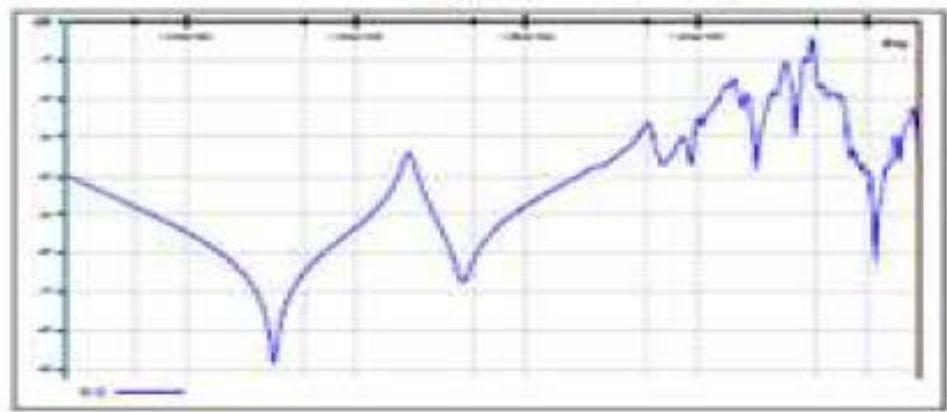
Complex RLCM network



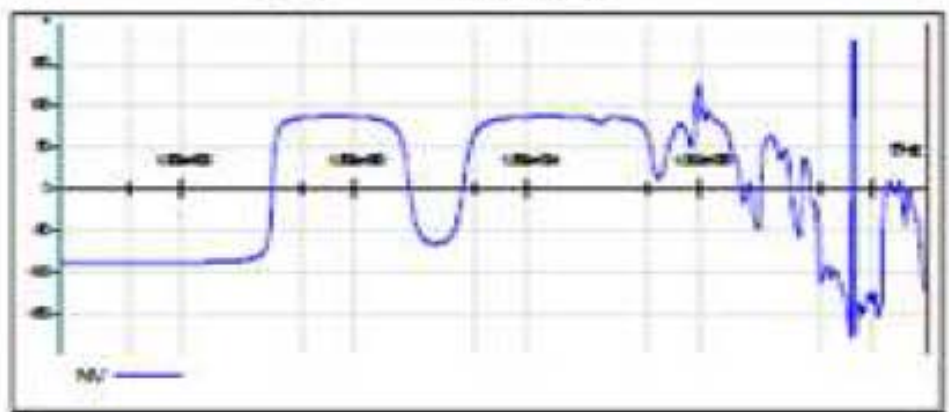
Output signal



Magnitude



Phase



FRA mérés általános  
elvé



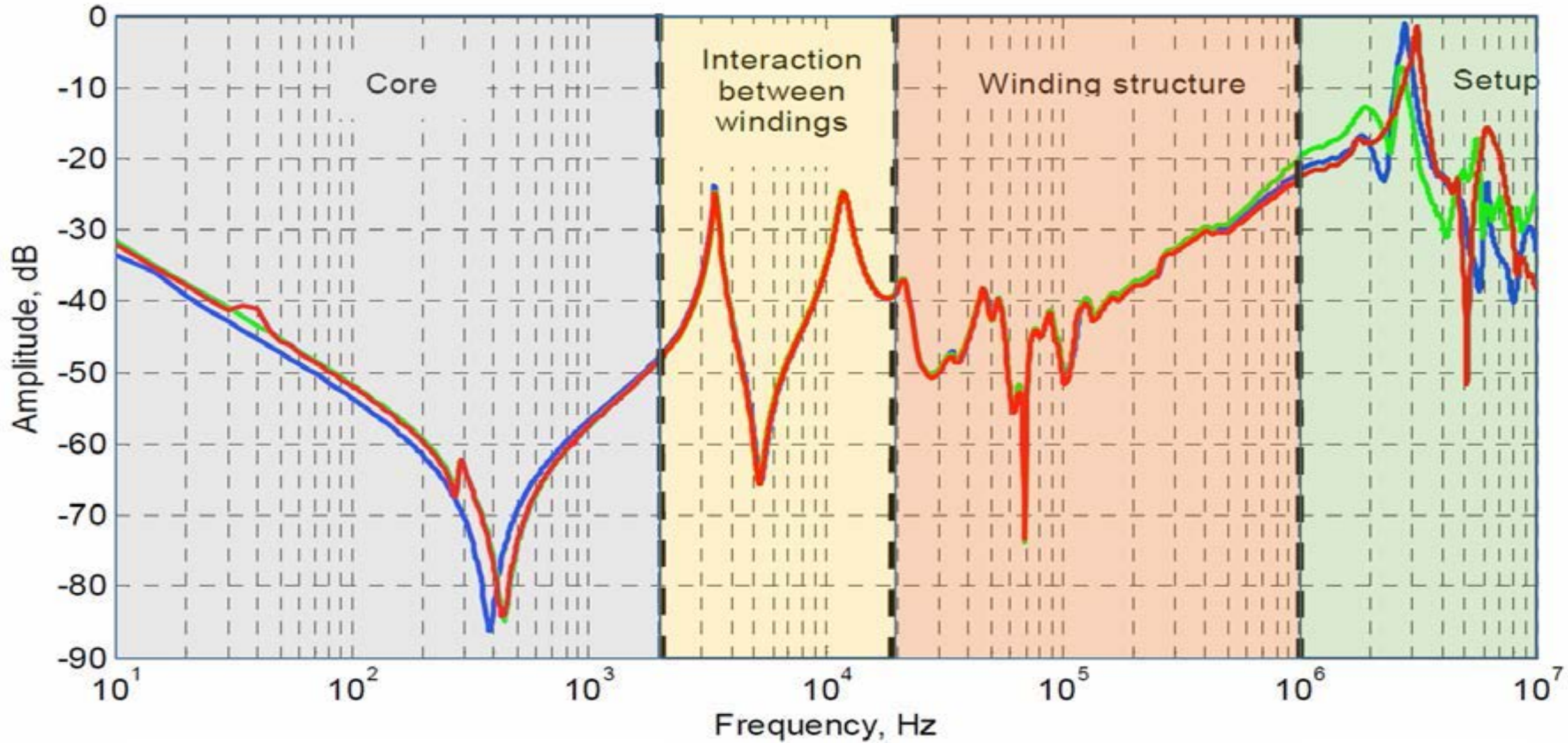
## Átviteli függvény

A **változó frekvenciájú szinusz hullámot** az egyik oldalra kapcsoljuk, miközben a **bemenő és választ jelet egyidejűleg rögzítjük**. A mért frekvencia, **amplitúdó (A)** és **fázisszög  $\phi$  értékek lineáris – logaritmikus koordináta rendszerben** kerülnek rögzítésre, az alábbi definíció szerint:

$$A = 20 \lg_{10} \left| \frac{U_1(j\omega)}{U_2(j\omega)} \right| \quad \phi = \tan^{-1} \left[ \frac{U_1(j\omega)}{U_2(j\omega)} \right]$$

A tapasztalat szerint az így definiált FRA függvénygörbe pontos információt ad a **tekercs geometriai változásáról, deformációjáról**.

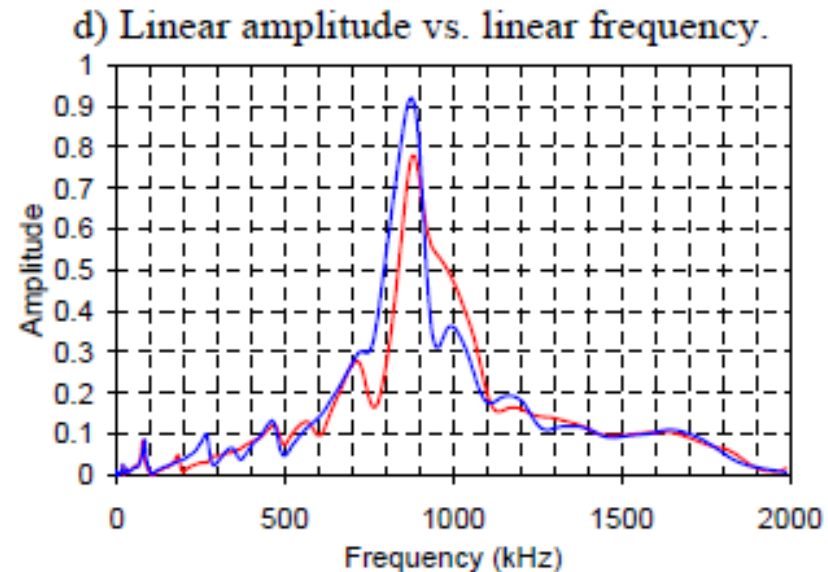
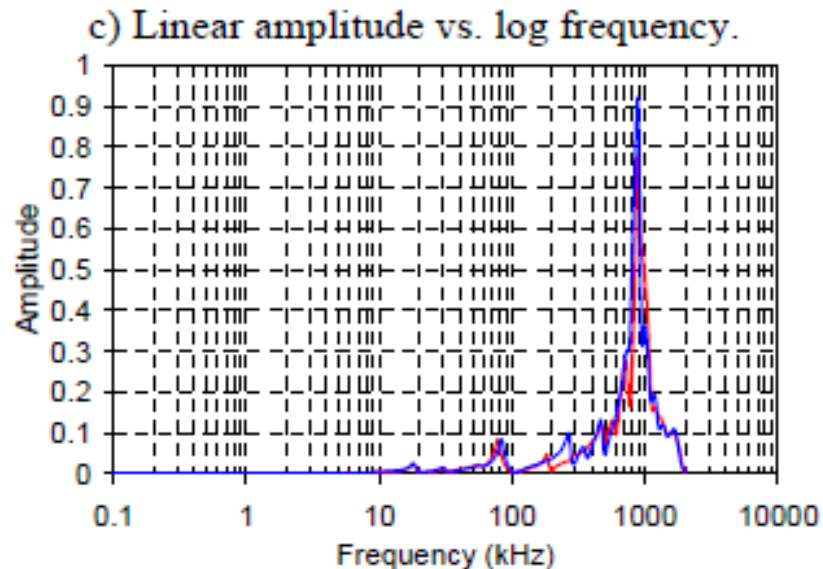
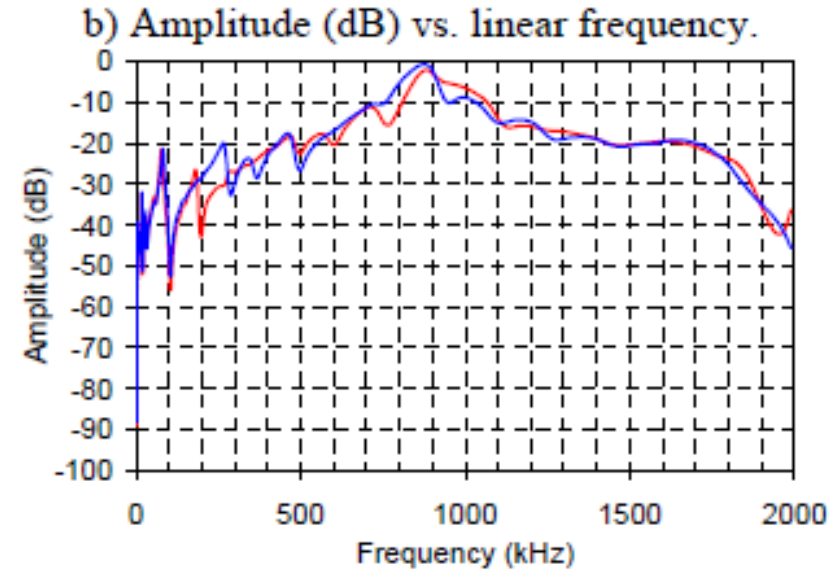
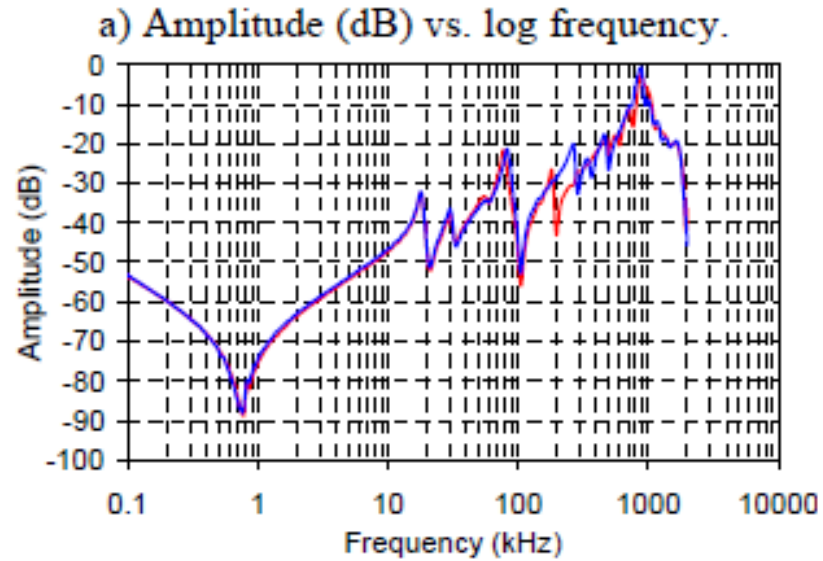
# Spektrumgörbék jellegzetes szakaszai



## FRA spektrumról általában

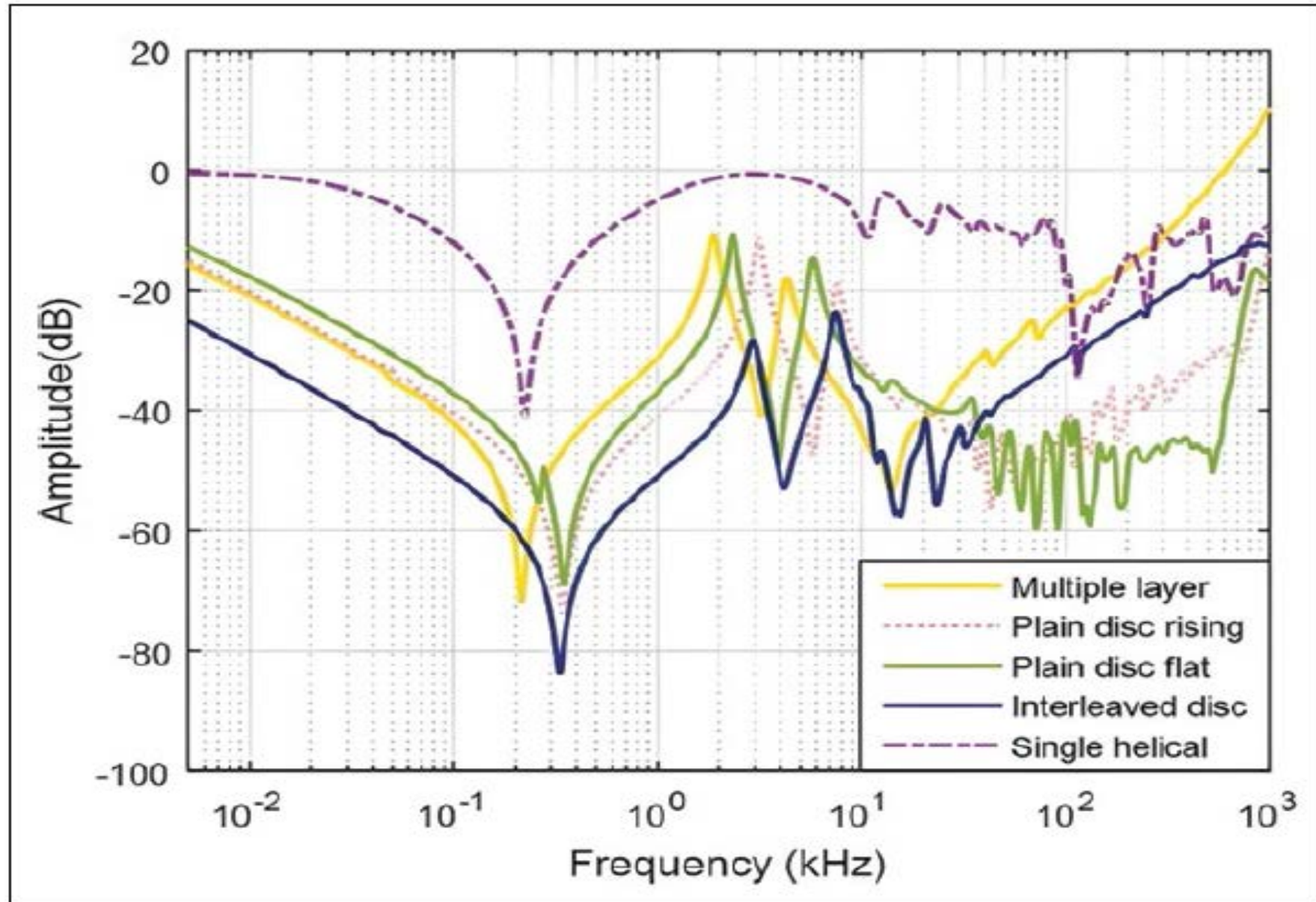
- Az FRA mérés eredménye **két görbe**: csillapítási és fázisszög görbe.
- A **szabványok eddig csak** a csillapítási görbét használták a diagnosztikában, de a jövő valószínűleg számolnak majd a fázisszöggel is.
- Az FRA spektrum általában **három vagy négy fő tartományra** osztható, néha vannak al-tartományok is: alacsony, közép és nagyfrekvenciás tartományok.
- Ezek **határai függenek** a trafó konstrukciójától, főleg a geometriai méretektől, amelyek pedig a teljesítménytől függenek.
- Minél **nagyobb a trafó**, annál nagyobbak az induktivitások és a belső kapacitások, és így az FRA spektrumok a **kisebb frekvenciák felé tolódnak**.
- Trafóhibák több mint negyede tekercs deformációval jár**. A tekercsdeformáció **3 csoportba** sorolható: „csekély (slight), közepes (middling), súlyos (severity).

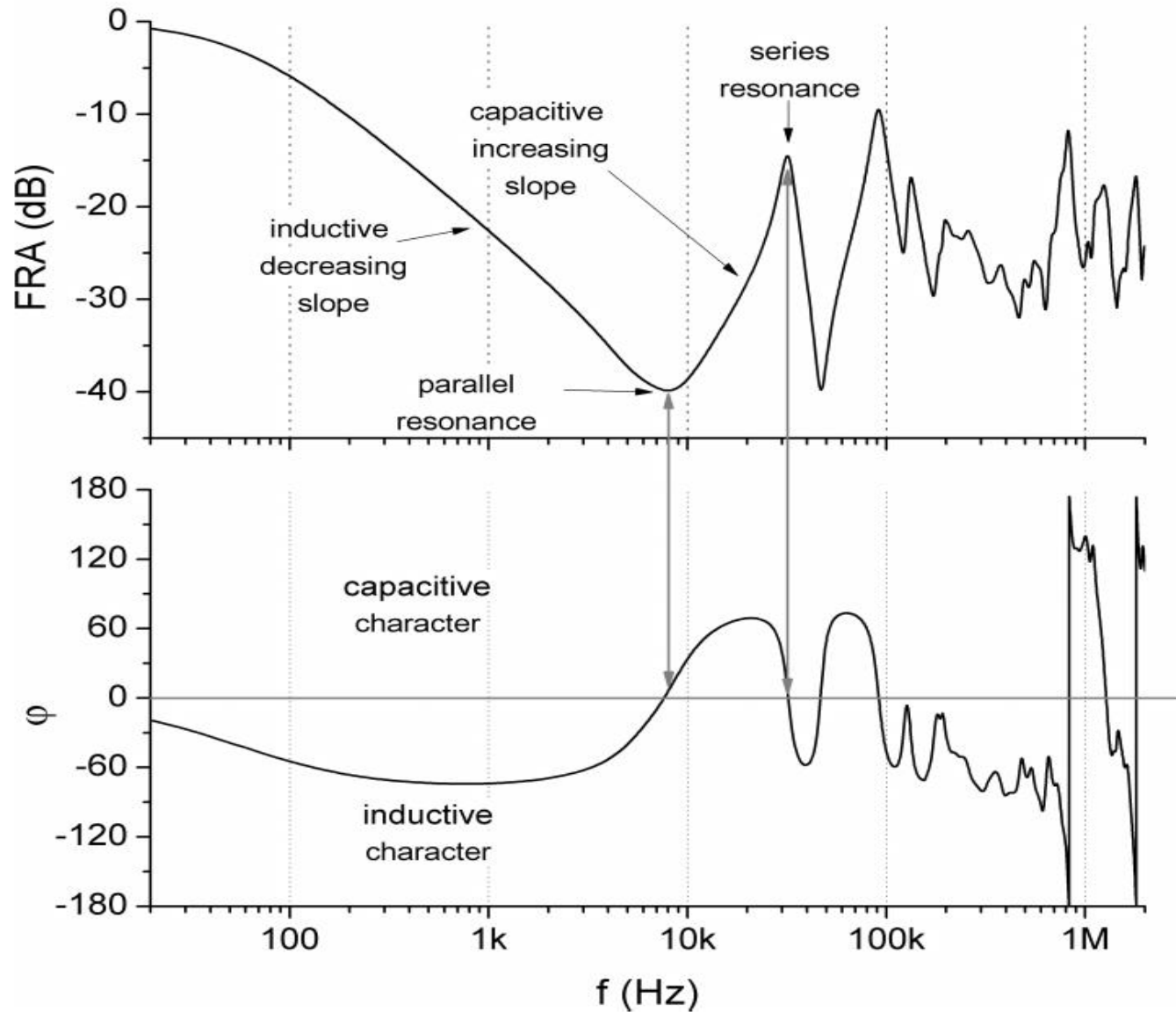
# A spektrumok ábrázolása: log-log, log-lin, lin-log, lin-lin görbék összehasonlíthatósága





## Különböző tekercs típusok tipikus FRA spektrumai





**FRA spektrum csillapítási és fázisszög görbéje: jellegzetes tartományok:**

**Rezonancia (maximumok)**

**Anti-rezonancia (minimumok)**

## FRA kiértékelésnél az alábbi változásokat kell figyelni:

### A spektrumgörbe teljes alakja, rezonancia helyek száma, rezonancia frekvenciák eltolódása

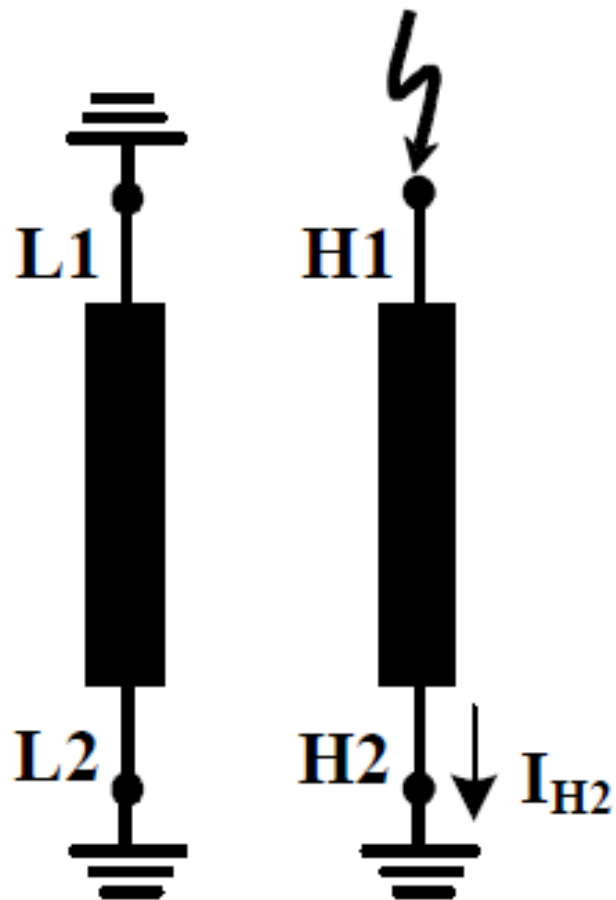
•Az FRA spektrum alapvetően a **trafó tekercs és vasmag szerkezettől** függ, így a változás a tekercs deformáció, ill. elmozdulásból eredhet, de változhat a különböző mérési „elrendezésből” is, törekedni kell az **azonos mérési elrendezések kialakítására**.

### FRA eredmények kiértékelésében fontos, hogy milyen mérési kapcsolást alkalmazunk.

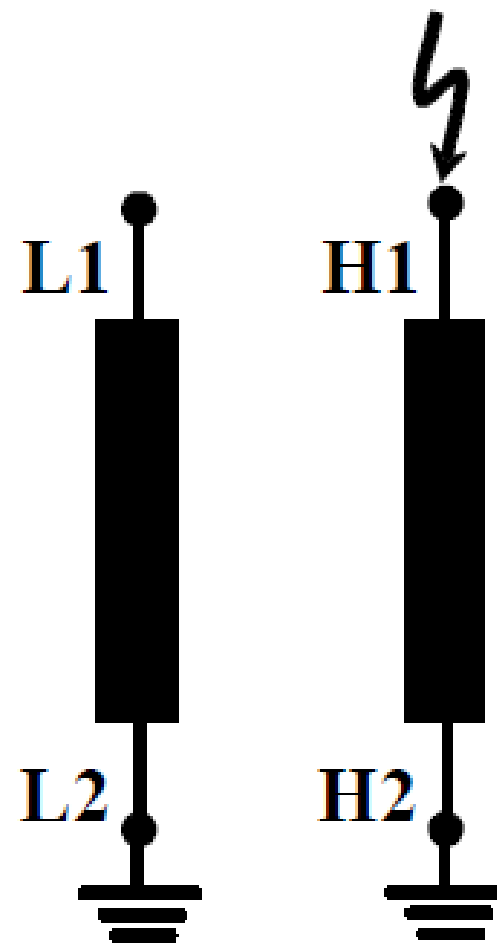
-Legtöbb felhasználó az „**end-to-end**” mérést alkalmazza, amelynél a bemenő jel az **egyik tekercsvégre kerül, a másik tekercsvégen** az „átvitt” jelet mérjük, mint egy egyszerű ellenállásmérésnél.

-Lehetséges úgy is mérni, hogy a bemenő jel megy az **egyik kapocsra (NF) és mérjük a másik tekercsre „átvitt” fesztséget**, vagy az áramot a bemenő oldalon (NF) földelési pontjában, ezáltal „ön” vagy „átviteli” impedanciát (vagy admittanciát) határozhatunk meg.

## Lehetséges FRA kapcsolási módok



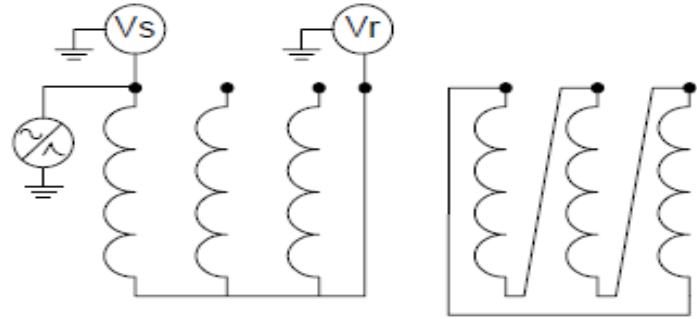
$$TF_1 = \frac{I_{H2}}{V_{H1}}$$



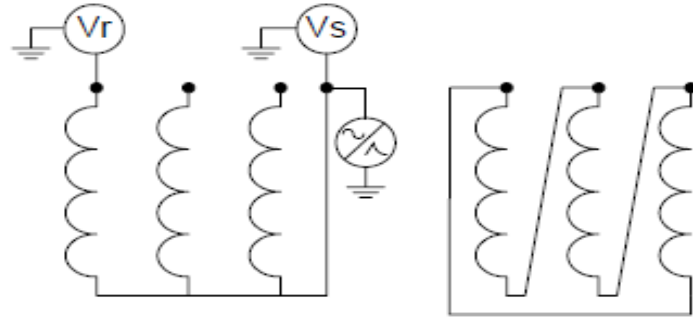
$$TF_2 = \frac{V_{L1}}{V_{H1}}$$



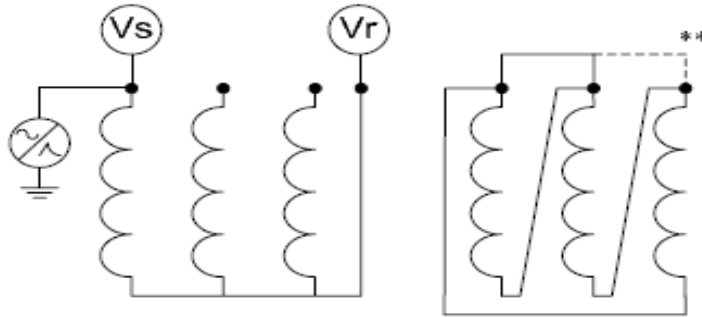
(a) End-to-end (source on phase terminal)\*



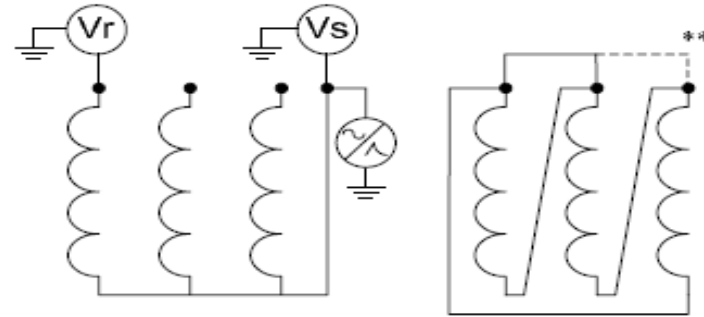
(b) End-to-end (source on neutral terminal)\*



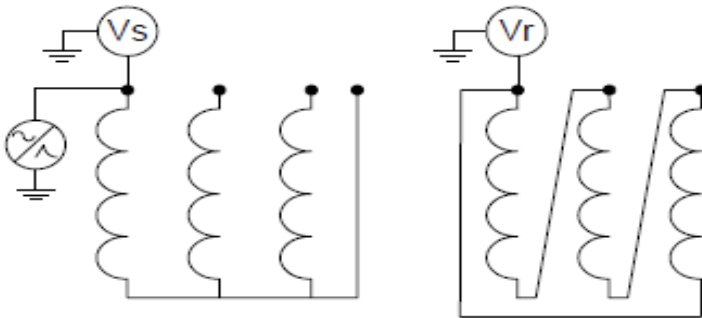
(c) End-to-end short-circuit (source on phase terminal)\*



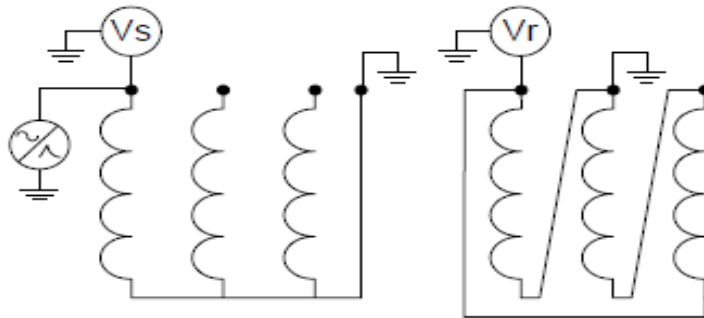
(d) End-to-end short-circuit (source on neutral terminal)\*



(e) Capacitive inter-winding



(f) Inductive inter-winding

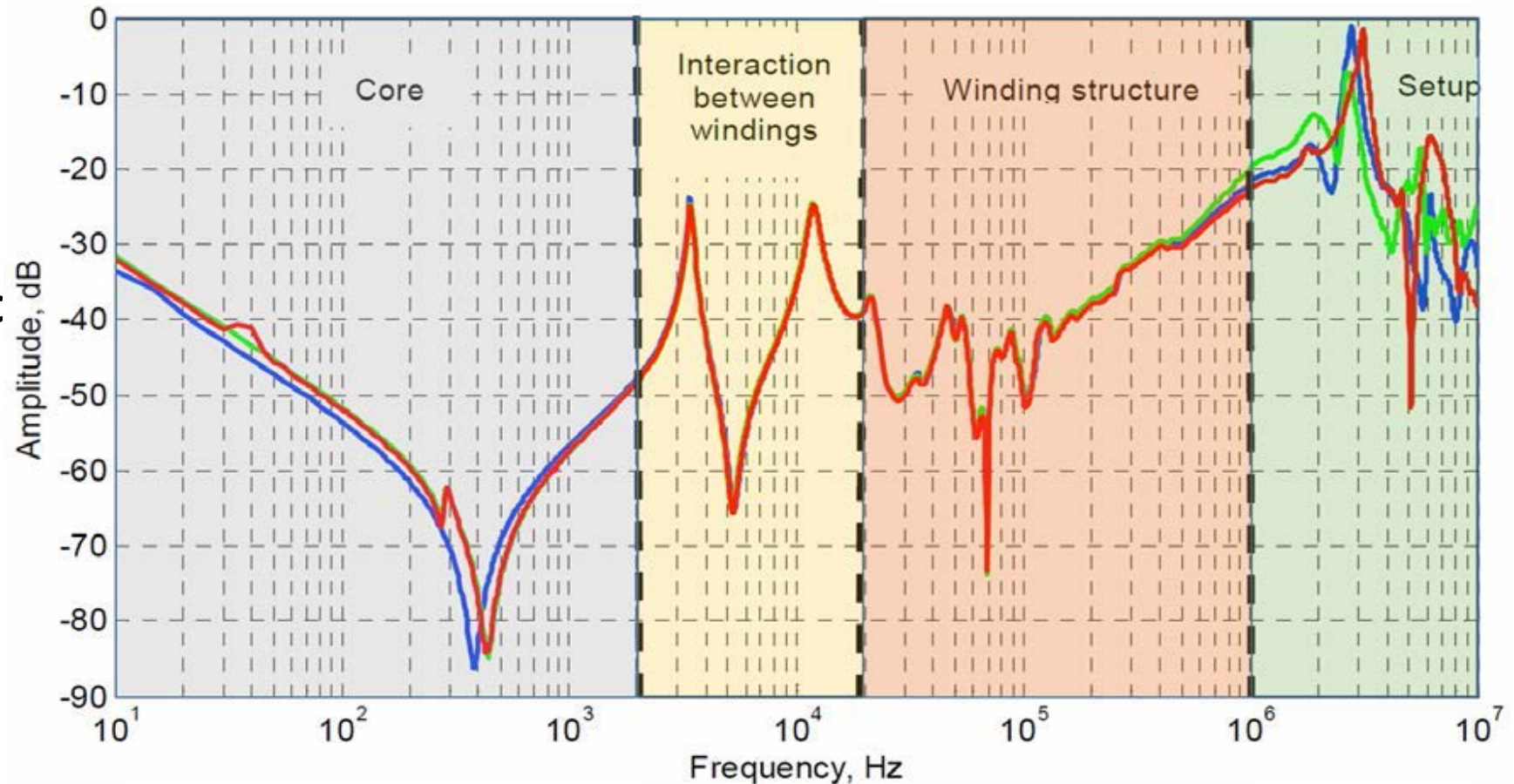


**Néhány lehetséges FRA  
mérési kapcsolás**

## 1. Tartomány: vasmag hatása (2 kHz alatt, IEC 10 Hz-1 kHz) (lin-log)

Alacsony frekvencián (2 kHz alatt) **20dB/dekád meredekségű csökkenés**, ez a vasmag mágnesező inductívitásának a következménye. Ezután egy **minimum jelenik meg: a mágnesező inductívitás és a teljes trafó kapacitás rezonanciája**.

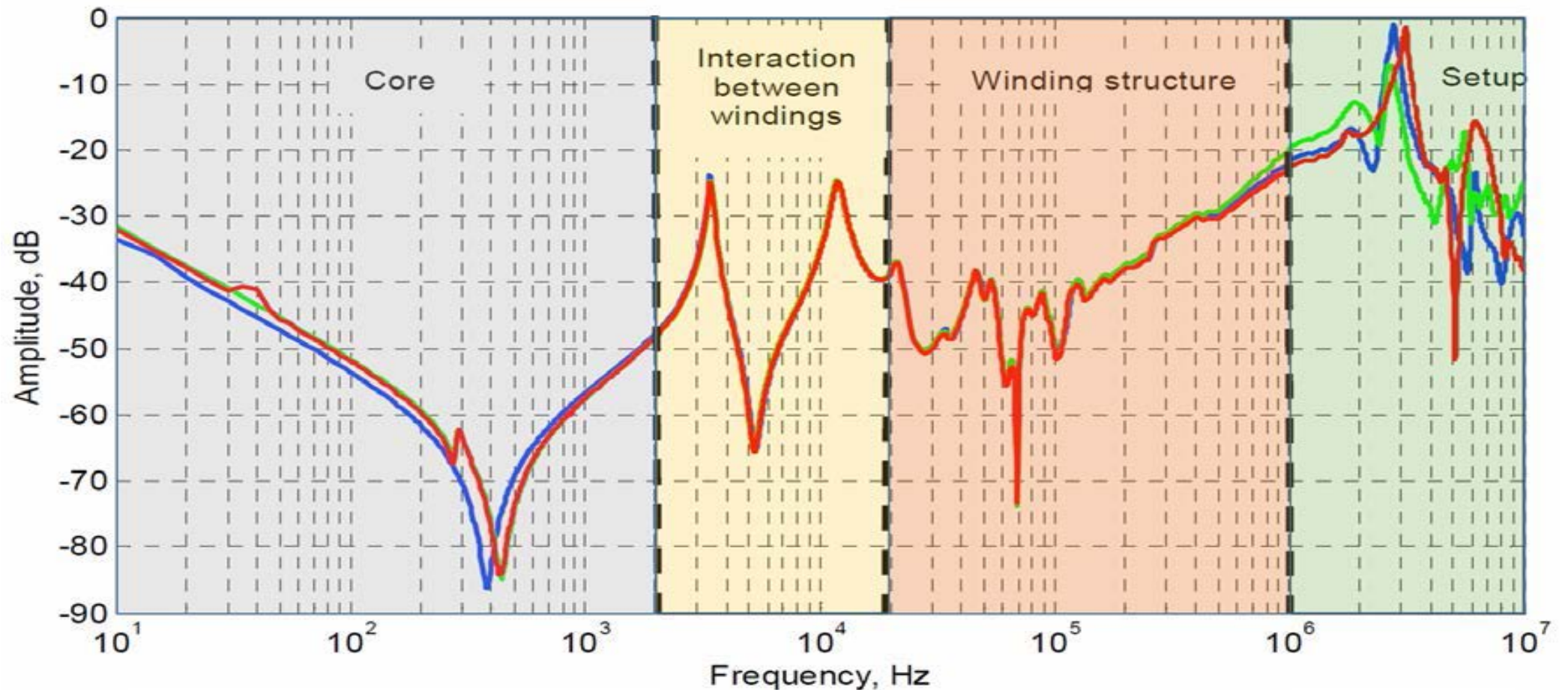
Háromfázisú, három oszlopos trafónál, a **középső fázisnál csak egy anti-rezonancia** (párhuzamos rezgőkör) látható, mert a **két szélső fázisra nézve szimmetrikus a mágneses út**. A két szélső fázisnál két ilyen rezonancia van. Ha van maradék mágnesesség (**remanencia**), akkor ezt a részt befolyásolja.



**Öt oszlopos trafónál ebben a tartományban más az FRA görbe alakja.**

## 2. Tartomány: Tekercsek közötti kölcsönhatás

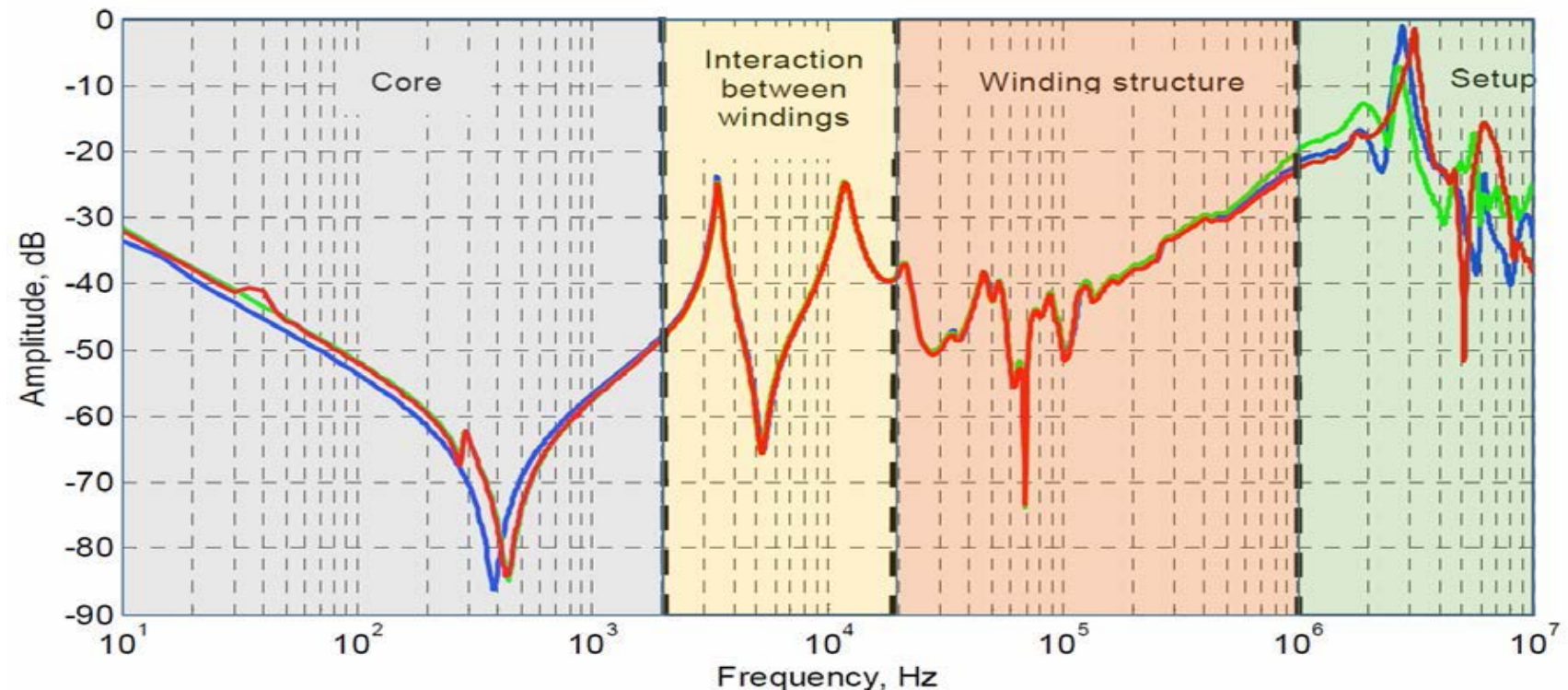
2 kHz – 20 kHz közötti spektrumot a **tekercsek közötti kölcsönhatás befolyásolja**, ami alapvetően a tekercsek elhelyezkedésétől és kapcsolódásától függ: delta kötés, autótrafó, egy vagy három fázis, stb. A 2 kHz-20 kHz-es tartományban egy autótrafó FRA spektrumának **két különálló rezonancia pontja van**.



### 3. Tartomány: Vizsgálendő tekercs szerkezetének hatása

**20 kHz - 1 (2) MHz** közötti szakaszra a tekercs szerkezeti kialakításának van erős befolyása, amelyet a trafó **szórási impedanciája** határoz meg a tekercs **soros és a föld kapacitásával** együtt. A **nagyfesz tekercsnél nagy a soros kapacitás** (átlapolós vagy árnyékolt konstrukciók). Itt **kevesebb a rezonancia és az anti-rezonancia**, főleg a soros kapacitás a meghatározóbb. Itt **kapacitív emelkedő trend látható**, a NF tekercs nagy soros „C” miatt. Ugyanakkor a **kis soros „C”-jű KF tekercs általában sík amplitúdó trendet mutat** amelyre számos rezonancia és anti-rezonancia szuperponálódik.

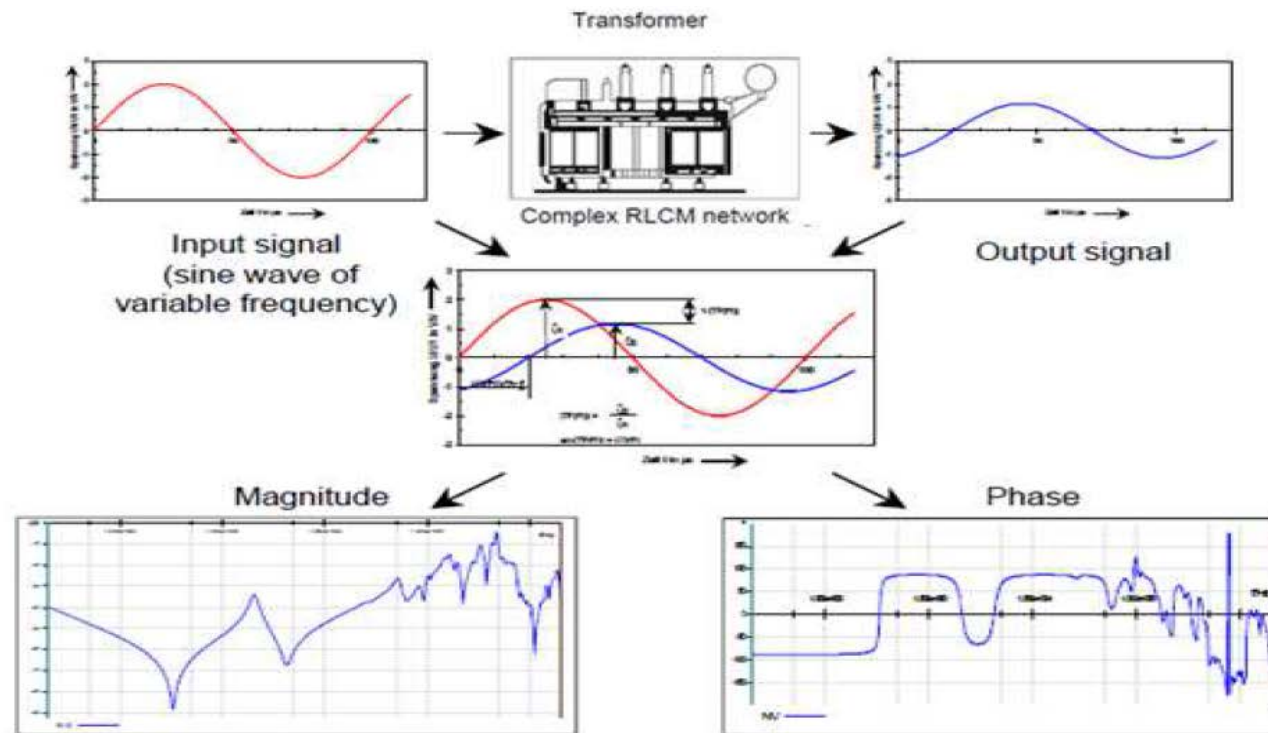
Azt a frekvenciát, amelyen az impedancia végtelen értékű, **antirezonanciának** nevezzük, erre a legfőbb példa a **párhuzamos rezgőkör**. **Soros rezgőkörnél** egyszerűen rezonanciáról beszélünk.



## FRA görbék kiértékelési lehetőségei

- Vannak a transzformátorról korábbi felvételek (**ujjlenyomat**) és az aktuális mérés eredményét a **korábbihoz hasonlítjuk**. Ez a legkorrektebb kiértékelés megfelelő tapasztalat felhalmozódása után a trafó konstrukció ismeretében megállapítható, hogy az elmozdulás veszélyes mértékű-e.
- Ha **nincs megelőző mérési adatunk de rendelkezésre áll hasonló típusú** trafón felvett görbe akkor feltételezhetjük, hogy bizonyos tűrésen belül a két egység azonos fázisának görbéi egyformák lesznek és ez alapján értékelhetjük az eredményeket.
- Ha **sem ujjlenyomat sem hasonló transzformátor nem áll rendelkezésre** akkor a **három fázis összehasonlításával** tudunk csak próbálkozni. Általában a két szélső fázis képe közel azonos, a középsőé kissé eltérő. Sajnos bizonyos konstrukcióknál és a fokozatkapcsoló szélső állásaiban a három fázis eltérő képet ad itt az összehasonlítással óvatosan kell bánni.

- A CIGRE TB 342 2008-ben jelent meg, ezután 4 év múlva lett csak FRA szabvány:
- **IEC 60076-18: 2012:** Measurement of frequency response:
- **IEEE PC57.149-2012:** IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers.
- E két szabvány **eddig csak** a csillapítási görbét használták a diagnosztikában, de a jövő valószínűleg számolnak majd a fázisszöggel is.



## A TF (Transfer Function), ill. FRA görbék felvétele

Az **FRA mérés lényege**, hogy egy **változó frekvenciájú szinusz hullámot** kapcsolunk az egyik oldalra, miközben a **bemenő és választ jelet egyidejűleg rögzítjük**. A mért frekvencia, amplitúdó ( $A$ ) és fázisszög  $\phi$  értékek lineáris – logaritmikus koordináta rendszerben kerülnek rögzítésre, az alábbi definíció szerint:

$$A = 20 \lg_{10} \left| \frac{U_1(j\omega)}{U_2(j\omega)} \right| \quad \phi = \tan^{-1} \left[ \frac{U_1(j\omega)}{U_2(j\omega)} \right]$$

A tapasztalat szerint az így definiált FRA függvénygörbe pontos információt ad a tekercs deformációról, de a **szubjektív kiértékelés** mellett jó lenne „számszerű” eredmény is.

Tehát a tekercs deformációjának **korrekt becslése még problémás az FRA technikában**. Jó lenne tudni számszerűen, hogy milyen nagyságú FRA változás engedhető még meg, amely még elfogadható a trafó tekercs elmozdulásból származik, amely még nem okoz meghibásodást, amely még az üzemben megengedhető.



- A kiértékelések sorában viszonylag nagy változást a Kínai szabvány megjelenése hozott:
- **Kínai Std. DL/T911-2004 (2016), ICS 27.100, F24, Document No. 15182-2005, June 2005.** (correlation factors, co-variance of spectra). The Electric Power Industry Standard of People's Republic of China, "Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers".
- IEC és IEEE-hez képest újdonság az FRA jelek kezelése: **matematikai módszer alkalmazása lehetővé teszi két FRA görbe megegyezőségének meghatározását.**
- Két **változó mennyiség közötti** kapcsolat vizsgálatára **legelterjedtebb a korrelációs együttható, ill. a négyzetes szórás.**
- **A korrelációs együttható lényegében két mérésorozat görbe hasonlóságának matematikai mennyiségekkel történő jellemzése,** a négyzetes szórás pedig a két görbe közötti abszolút különbséget írja le.
- Esetünkben **két különböző időpontban felvett FRA A kapcsolat szorosságát,** a függőség fokát kell mérnünk.





**Újdonságok a CIGRE utolsó összefoglaló kiadványa  
(CIGRE TB 812-2020)**

**és**

**Transformers Magazine Volume 10, Issue 2, 2023**

**A review of transformer FRA measurement and diagnosis  
techniques**

**alapján**



- 1. CIGRE TB 812-2020:** Advances in the interpretation of transformer Frequency Response Analysis (FRA)
- 2. A review of transformer FRA measurement and diagnosis techniques**  
**Transformers Magazine Volume 10, Issue 2, 2023-UTRA**

**University Transformer Research Alliance (UTRA)**

**University of Exeter The University of Manchester**

**The University of Queensland Australia**

**University of Stuttgart Germany**

## A téma aktualitása

Újdonságok a CIGRE utolsó összefoglaló kiadványában: **CIGRE TB 812 (2020)**

-Korábbi kiadvány (TB 342 (2008)), 2020-ban került kiadásra: TB 812 (2020).

-Transformers Magazine Volume 10, Issue 2, 2023-UTRA:

**A review of transformer FRA measurement and diagnosis techniques**

Ezen kívül még három szabvány: IEC és IEEE kínai

**IEC 60076-18: 2012:** Measurement of frequency response:

**IEEE PC57.149-2012:** IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers:

**Kínai: Std. DL/T911-2004 (2016), ICS 27.100, F24, Document No. 15182-2005, June 2005.** (correlation factors, co-variance of spectra). The Electric Power Industry Standard of People's Republic of China, "Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers".

Az IEC és IEE szabványok lényegében „vizuális” kiértékelést adnak, nehezen „gépiesíthetők”.

## Milyen újdonságok találhatóak a 2020-as TB 812-es kiadványban, valamint a Transformers Magazin 2023-as kiadványában?

- Az FRA-t befolyásoló tényezők **jobb megismerése**,
- Érdekes „**esettanulmányok**” összegyűjtése, szimulációk,
- Az FRA „**mennyiségi kiértékelések**” szakirodalom áttekintése,
- Numerikus indexek** az FRA kiértékelésre, ajánlások.

A WG tagjai összesen **60 „esettanulmányt”** gyűjtöttek be, abból **18-at közzé is tettek**. A példákból láthatóak, hogy **különböző hiba típusokál** melyik **frekvenciatartomány** a **domináns**.

A **viszonylag kevés esettanulmány** alapján az mondható, hogy kevés az FRA-ás tapasztalat, ahol **egyértelmű kapcsolat lenne a mechanikai hiba és FRA között**.

Egy **bizonyos mértékű** tekercselmozdulás miatt a trafó **tovább üzemelhet**, így a „**gyenge állapot**” a vizsgálatok hiánya miatt **rejtve marad**.

A kevés hozzáférhető, igazi esettanulmányok hiánya miatt, kutatóintézetek próbálják szimulálni a hibákat, hogy javítsák az FRA kiértékelések jóságát.

Az újabb eredmények egyrészt a modellmérésekből, másrészt számítógépes szimulációkból adódnak.

Számos koncentrált elemes, vagy megosztott paraméteres modellek léteznek a szakirodalomban a probléma megoldására.

De a probléma még marad: milyen a korreláció az igazi trafós esetekkel.

Ez egyrészt annak tudható be, hogy általában többszörös hibák szoktak előfordulni, amikor egy tekercs megsérül.

Ha a tekercs elmozdul, menetzárlat követheti, amelyet hagyományos tesztekkel is követhetünk, amelyet szétbontás követ.

A szétbontás költséges eljárás, ritkán alkalmazzák, így az igazi esettanulmányok számára nem állnak rendelkezésre.

A **TB 812 azzal járul hozzá az FRA kiértékelés jobbításához**, hogy összegyűjtött több ipari és kutatóintézeti tapasztalatot, és ezekre alapozva néhány mérőszám került kidolgozásra, amelyek eléggé biztatóak az FRA kiértékelések fejlődésben.

A TB 812 **természetesen felfrissítette** az alapok és tapasztalatok áttekintését, különös tekintettel az FRA méréseket befolyásoló tényezőkre, a minél pontosabb mérésre.

**A TB 812 végkövetkeztetései az alábbiak voltak:**

- Az FRA kiértékelés alapja, hogy megismerjük a frekvenciaválaszt és a mérést befolyásoló tényezőket.
- A bemutatott esettanulmányok jó referenciaként használhatók az FRA által detektálható tekercs elmozdulásoknál.
- A kutatóintézeti tanulmányok laboratóriumi modellmérésekkel és számítógépes vizsgálatokkal egészítik ki a korlátozott számú esettanulmányokat.
- A kutatóintézeti eredményekre és a kiválasztott esettanulmányokra alapozva, néhány mérőszám került bevezetésre, ami a legbiztatóbb a jövő kutatásaira nézve.

## **A WG ajánlásai az alábbiak voltak még:**

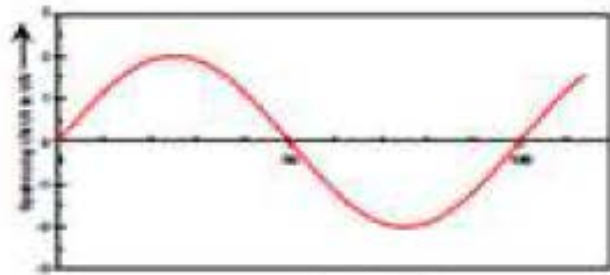
- A CIGRE **legyen fóruma az esettanulmányok** gyűjtésének és az FRA kiértékelései eredmények érdeklődők felé történő megosztására.
- **A trafós társadalom használja a legbiztatóbb mérőszámokat az FRA kiértékelés fejlesztésére.**
- **A kutatóintézetek folytassák a az FRA kiértékelés támogatását.**



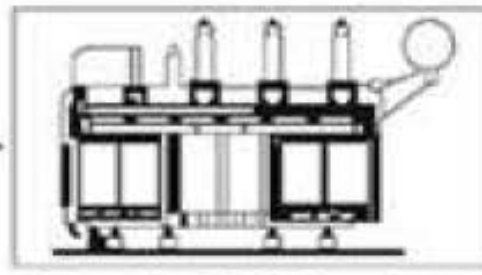
# Röviden az átviteli függvények FRA alkalmazásáról



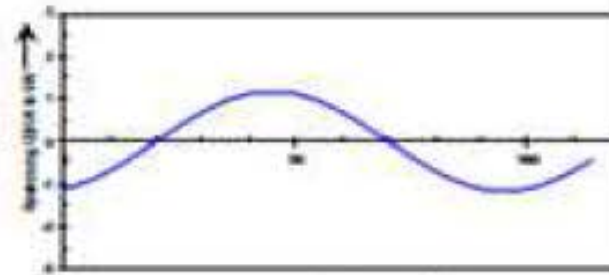
# Transformer



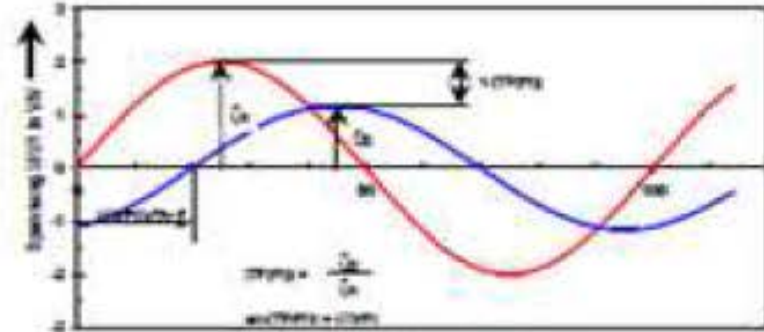
Input signal  
(sine wave of  
variable frequency)



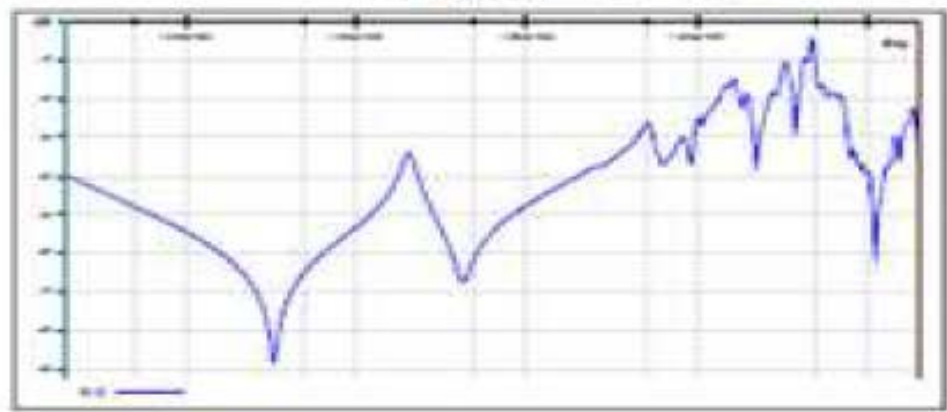
Complex RLCM network



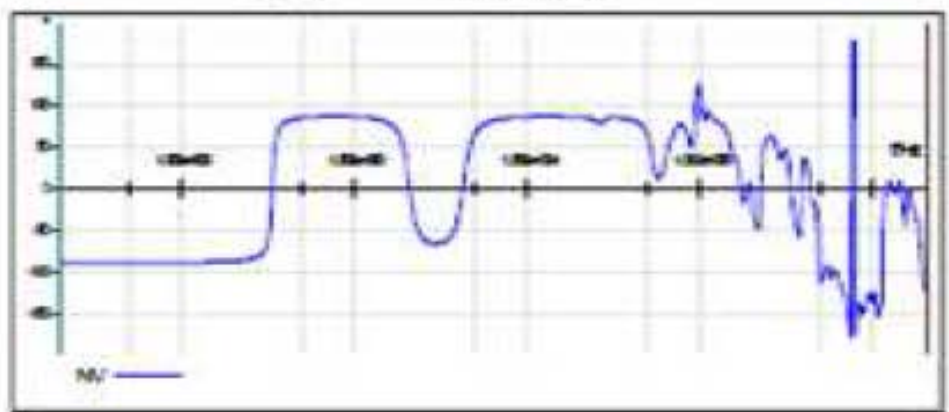
Output signal



Magnitude



Phase



FRA mérés általános  
elvé

## A TF (Transfer Function), ill. FRA görbék felvétele

Az FRA mérés lényege, hogy egy változó frekvenciájú szinusz hullámot kapcsolunk az egyik oldalra, miközben a bemenő és választ jelet egyidejűleg rögzítjük. A mért frekvencia, amplitúdó ( $A$ ) és fázisszög  $\varphi$  értékek lineáris – logaritmikus koordináta rendszerben kerülnek rögzítésre, az alábbi definíció szerint:

$$A = 20 \lg_{10} \left| \frac{U_1(j\omega)}{U_2(j\omega)} \right| \quad \phi = \tan^{-1} \left[ \frac{U_1(j\omega)}{U_2(j\omega)} \right]$$

A tapasztalat szerint az így definiált FRA függvénygörbe pontos információt ad a tekercs deformációról, de a szubjektív kiértékelés mellett jó lenne „számszerű” **eredmény is.**

Tehát a tekercs deformációjának **korrekt beclése még problémás az FRA technikában.** Jó lenne tudni számszerűen, hogy milyen nagyságú FRA változás engedhető még meg, amely még elfogadható a trafó tekercs elmozdulásból származik, amely még nem okoz meghibásodást, amely még az üzemben megengedhető.

## FRA jelek „kezelése”

Ezért szükséges egy olyan matematikai módszer, amely lehetővé teszi két FRA görbe megegyezőségének meghatározását.

Két változó mennyiség közötti kapcsolat vizsgálatára legelterjedtebb a korrelációs együttható, ill. a négyzetes szórás.

A korrelációs együttható lényegében két mérőszám görbe hasonlóságának matematikai mennyiségekkel történő jellemzése, a négyzetes szórás pedig a két görbe közötti abszolút különbséget írja le.

Esetünkben két különböző időpontban felvett FRA A kapcsolat szorosságát, a függőség fokát kell mérnünk.

## Matematika segítsége az FRA kiértékelésekben

- Az állapot a deformáció **előtti és utáni** görbék változásából becsülhető.
- Matematika nyelvén a két FRA görbe **korrelációs együtthatóját, ill. négyzetes szórását kell számolnunk. A korrelációs együttható a két görbe hasonlóságát, a négyzetes szórás pedig a két görbe közötti abszolút különbséget írja le.**
- A korrelációs tényező **+1(-1)** között változik. Ez a faktor két véletlen változó közötti lineáris korrelációt adja meg.

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N x(i)y(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N x(i)^2 \sum_{i=1}^N y(i)^2}}$$

**Korrelációs együttható**

$$E_{xy} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [x(i) - y(i)]^2}{N}}$$

**Négyzetes szórás**

## Algoritmussok, kínai FRA szabvány alkalmazása

Az **FRA** technika viszonylag széles frekvenciatartományban (**pl. 1Hz-1Mhz**) **veszi fel az átviteli függvényeket (ismert még TF=Transfer Function, vagy frekvencia válasz).**

**A kínai FRA szabvány három frekvencia tartományban definiált korrelációs tényezőt alapszik**, amely bevezeti a „ $\rho_{xy}$ ” korrelációs faktorból levezetett „relatív”  $R_{xy}$  tényezőt.

A diagnosztika lényege, hogy **összehasonlítjuk** a különböző időpontokban felvett FRA görbéket és nézzük a **referenciának tekintett állapothoz képesti változást.**

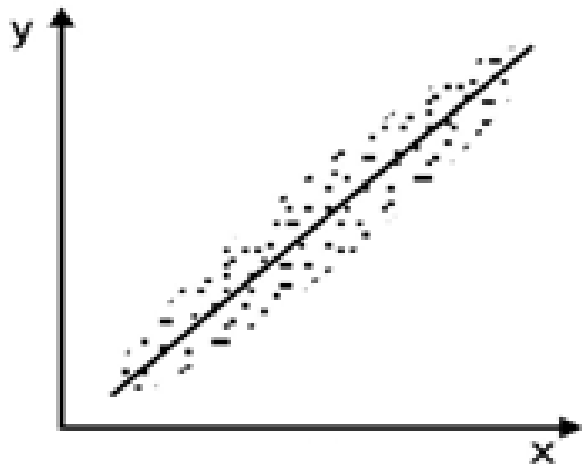
**Ismert, hogy a kínai szabvány a vizuális összehasonlításon kívül már számszerű összehasonlítást használ. is szerepel.**

Komoly **erőfeszítések történnek olyan algoritmusok** kifejlesztésére, amelyek képesek a két görbe azonosságának, ill. különbözőségének mennyiségi meghatározására.

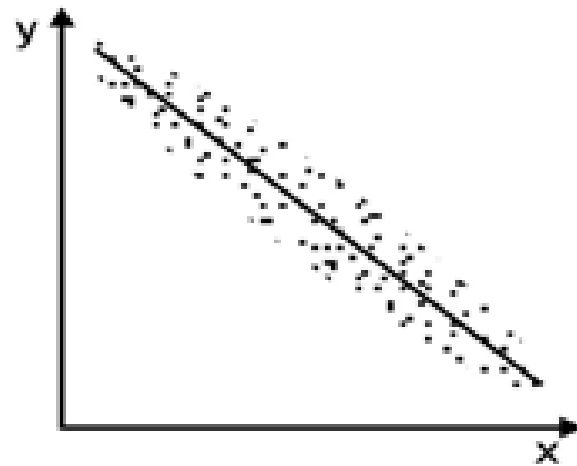
Az új CIGRE TB 812 kiadvány **számos FRA kiértékelő algoritmust mutat be és vezet be különböző indexeket**, hogy az **FRA kiértékelés ne csak szubjektív, hanem inkább mennyiségi jellegű legyen.**

## FRA jelek „kezelése”

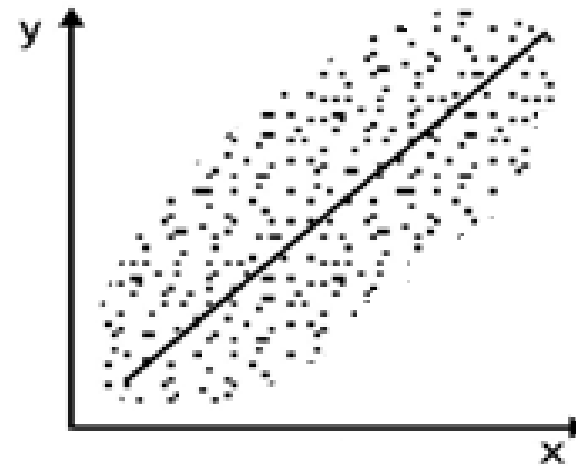
A korrelációs együttható előjele megmutatja, hogy az összefüggést jellemző egyenes emelkedő, vagy süllyedő:



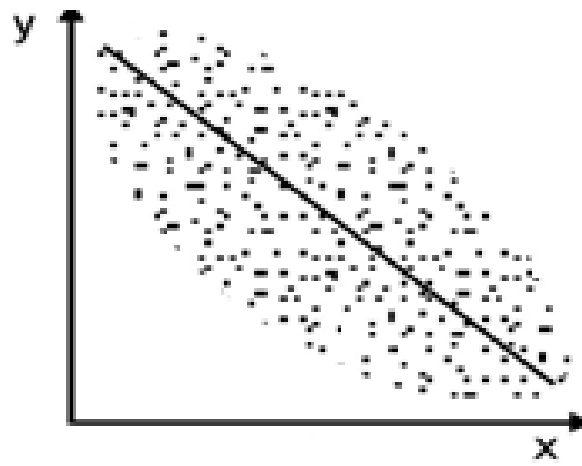
lineáris pozitív korreláció



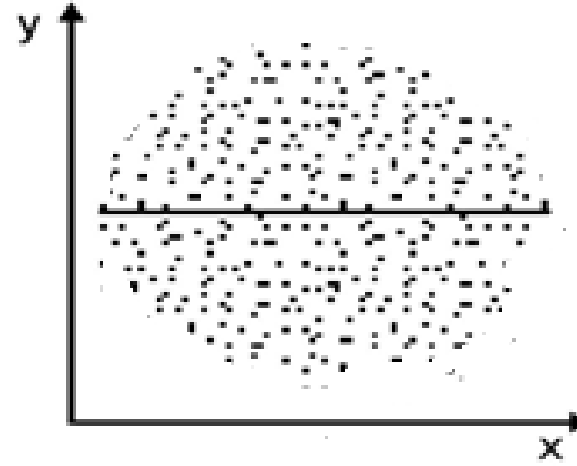
lineáris negatív korreláció



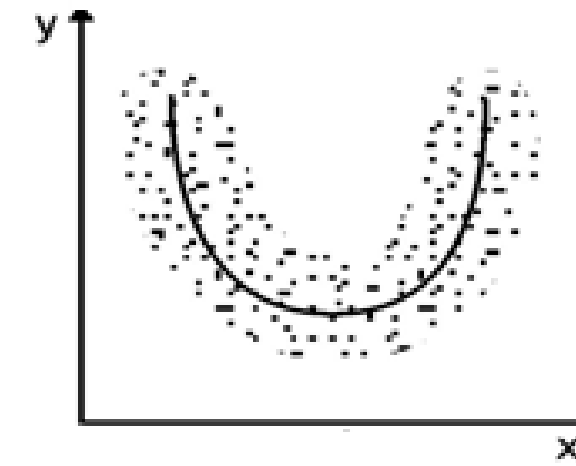
lazább pozitív korreláció



lazább negatív korreláció



korrelálatlanság



nemlineáris korreláció

**Lineáris pozitív  
vagy negatív  
korreláció,  
lazább pozitív  
vagy negatív  
korreláció,  
korrelálatlanság,  
nem lineáris  
korreláció.**



# Röviden az átviteli függvények FRA alkalmazásáról



A trafók mechanikai változásainak vizsgálatára **mintegy 40 éve használják sikeresen az (S)FRA technikát.**

A tekercsek mechanikai deformációja megváltoztatja az induktivitások és kapacitások értékeit, amelyek rezonancia és anti-rezonancia pontok eltolódását, ill. az átviteli függvény amplitúdó változását okozza.

**A diagnosztika lényege az eredeti és az ellenőrzéskor felvett új FRA frekvenciafüggvények összehasonlításra kerülnek.** Tehát ez egy „összehasonlító” (fingerprint, újlenyomat) diagnosztika, amely a mechanikai változást próbálja megbecsülni.

Nagyon fontos, hogy ismerjük az alap FRA-t, ill. legyen egy „adatbázisunk” a jellegzetes tekercsdeformációkról.

Ez egy kisfeszültségű mérési technika, számos tényező befolyásolhatja a mérést, ami miatt fals eredmény kaphatunk: nagyfrekvencia, földelési elrendezések, hosszú átvezető, különböző OLTC pozíciók.





- A hatékony diagnosztikához szabványosítani kellett az eljárásokat, a mérési elrendezéseket. Ez történt meg a CIGRE TB 342 megjelenésével, majd ezt követte az IEC 60076-18 és az IEEE Std C57.149.
- **A szabványosítás óta rengeteg „fingerprint” halmozódott fel, mégis jól képzett szakember szükséges egy megbízható diagnosztikához**, mert ezek a szabványok még nem tartalmazznak olyan kritériumokat, amellyel könnyen lehetne diagnosztizálni.
- **Ilyen kritériumok hiánya, és a lehetséges mérési elrendezések nagyszáma, a sok befolyásoló tényező, stb.**, miatt még mindig nagy kihívás az FRA diagnosztika (eltekintve az egyszerűbb esetektől).
- **A kutatások jelenlegi iránya az alábbi:** megfelelő modellek létrehozása a tekercsekre, a tekercsmozgásokra, amelyeknél már számszerűsíteni lehet az FRA frekvenciagörbék közötti eltérést.
- Az **UTRA egyetemek** is jelentős kutatási eredményt értek el az FRA kiértékelés területén,



## **UTRA eredmények rövid áttekintése**

**University Transformer Research Alliance (UTRA)**

**University of Exeter The University of Manchester**

**The University of Queensland Australia**

**University of Stuttgart Germany**

## **A review of transformer FRA measurement and diagnosis techniques**

**Transformers Magazine Volume 10, Issue 2, 2023**



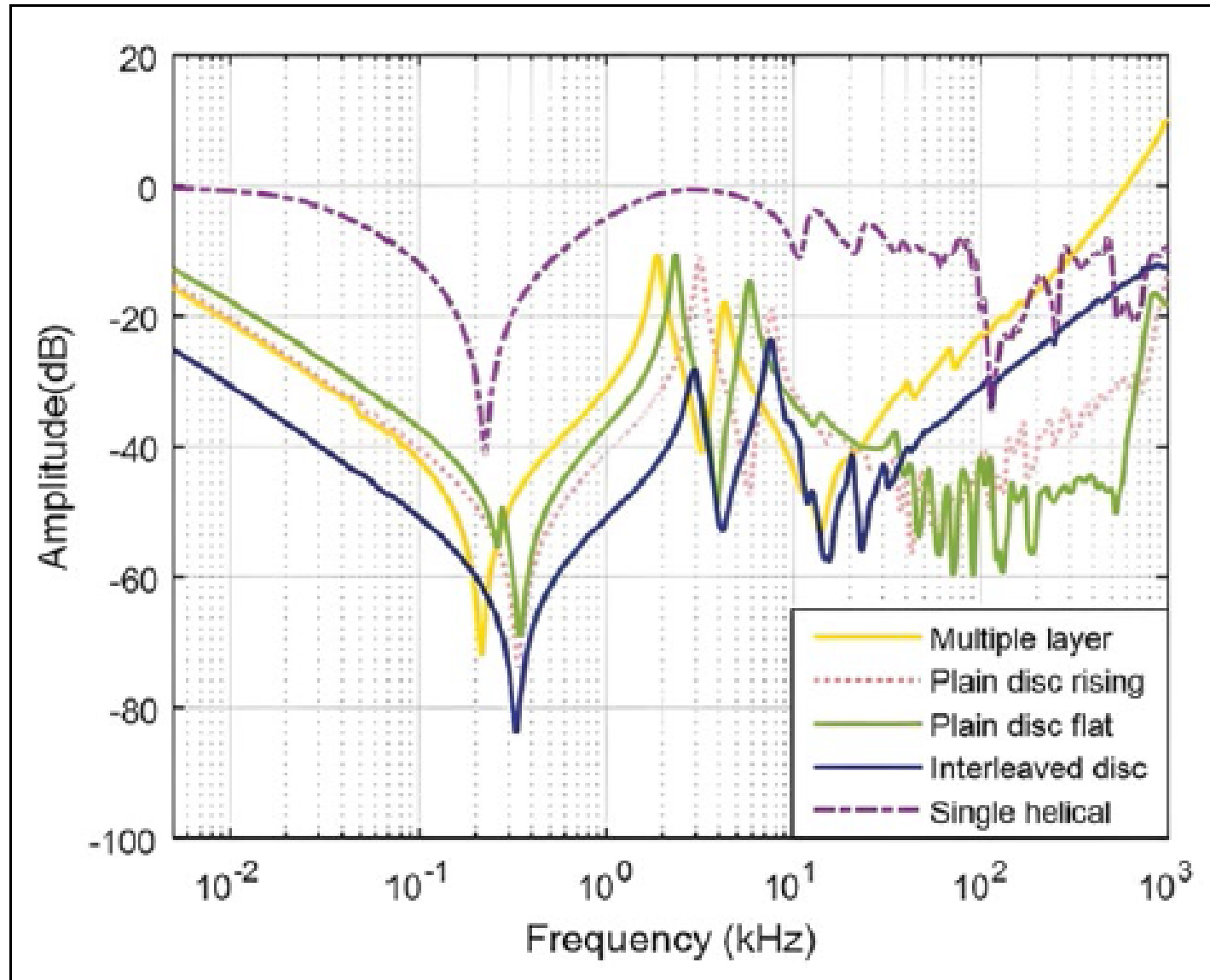
## FRA numerikus indexek

- ***Az FRA diagnózist numerikus indexek alkalmazásával lehet segíteni, amelyek számszerűsítik az FRA görbék közötti különbségeket.***
- **Matematikai egyenleteket használnak**, hogy a referencia és a jelenlegi FRA görbék között különbséget tegyenek (lásd az „FRA diagnosztika numerikus index alkalmazásával” ábrát).
- Egyesek a teljes frekvencia tartomány használják, mások felosszák kisebb tartományokra, hogy pontosabb eredményt kaphassanak. **Jelenleg ezek az eljárások még nincs szabványosítva**

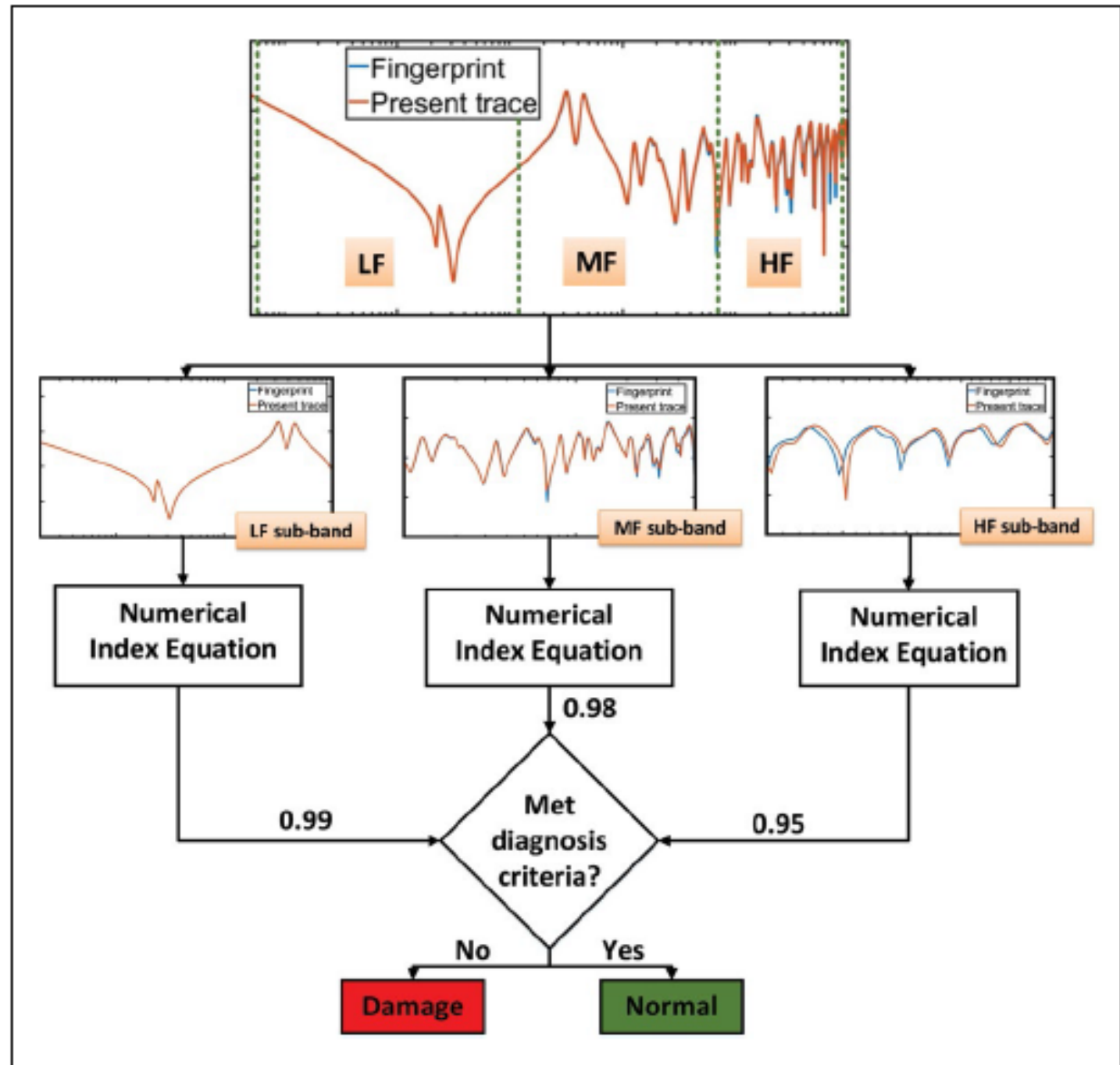


## Tekercs típusok és befolyásuk az FRA görbékre

A magtípusú trafókban két tekercstípus van: spirális és tárcsás tekercs. Az alábbi ábrán tipikus FRA görbék láthatók. A spirális tekercselésnél a nagyfrekvenciás tartományban sok rezonancia ill. anti-rezonancia pont van a 20kHz-200kHz tartományban.



# FRA diagnosztika „numerikus index” alkalmazásával





„Tekercs becselő faktor” egyenletek két FRA görbe között: esetünkben normál szórás került felhasználásra, amellyel számszerűsíthetjük az FRA görbék közötti eltérést.

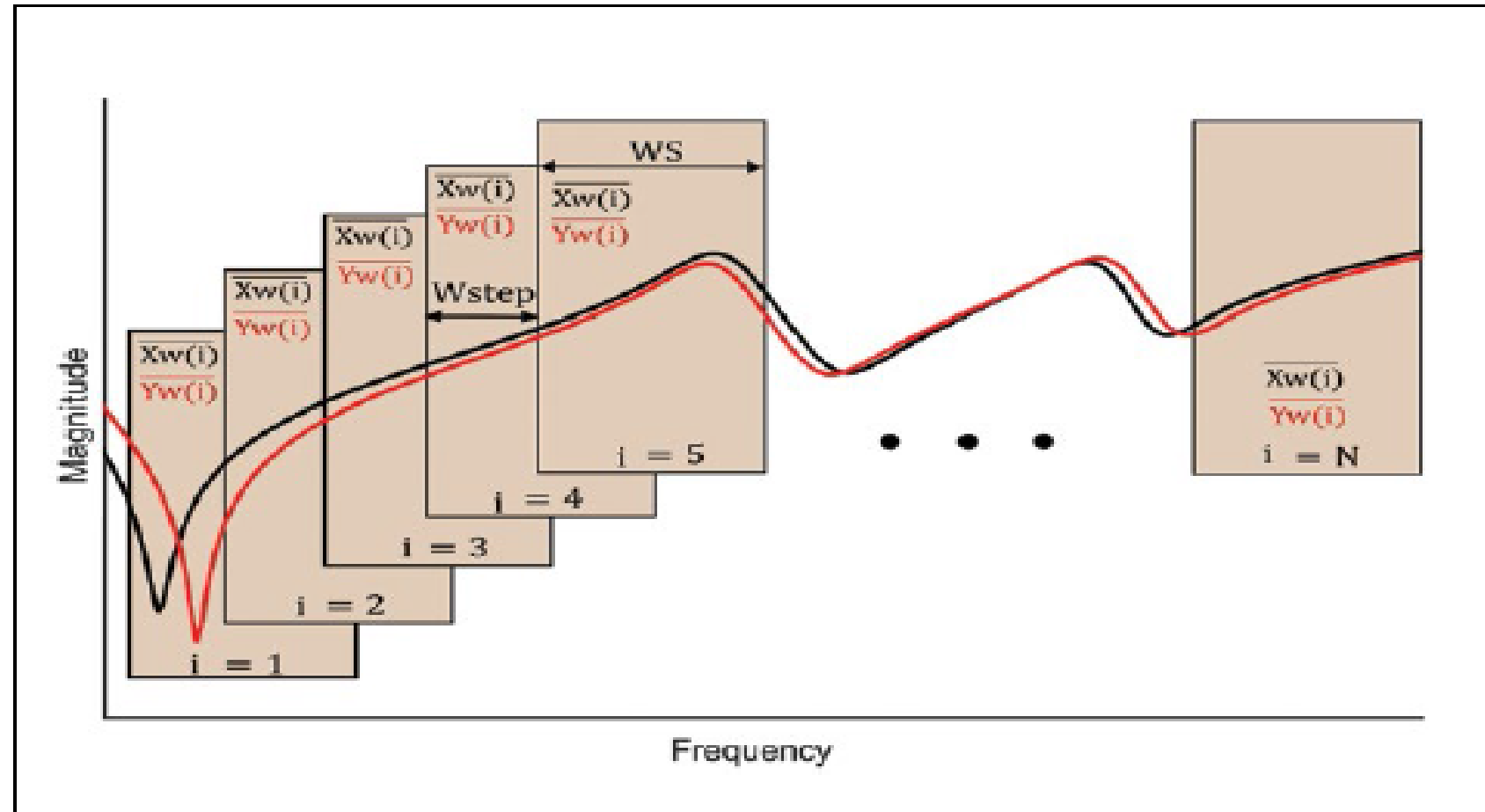
Számos numerikus index került ajánlásra, mint például az látható a következő táblázatban. (**SDD: Standard Deviation of Difference; WS: Window size**).

$\overline{SDD(i)} = -2 \left( \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{WS} (Z(j) - \overline{Zw(i)})^2}{WS - 1}} \right), i = 1, 2, 3 \dots N$		
Where $\overline{Z(i)} = X(i) - Y(i)$	$\overline{Zw(i)} = \overline{Xw(i)} - \overline{Yw(i)}$	$\overline{Xw(i)} = \frac{1}{WS} \sum_{j=1}^{WS} X(j)$
$\overline{Yw(i)} = \frac{1}{WS} \sum_{j=1}^{WS} Y(j)$	$WS = 10 + 6 \left( \frac{f_{res} - 200}{200} \right)$	

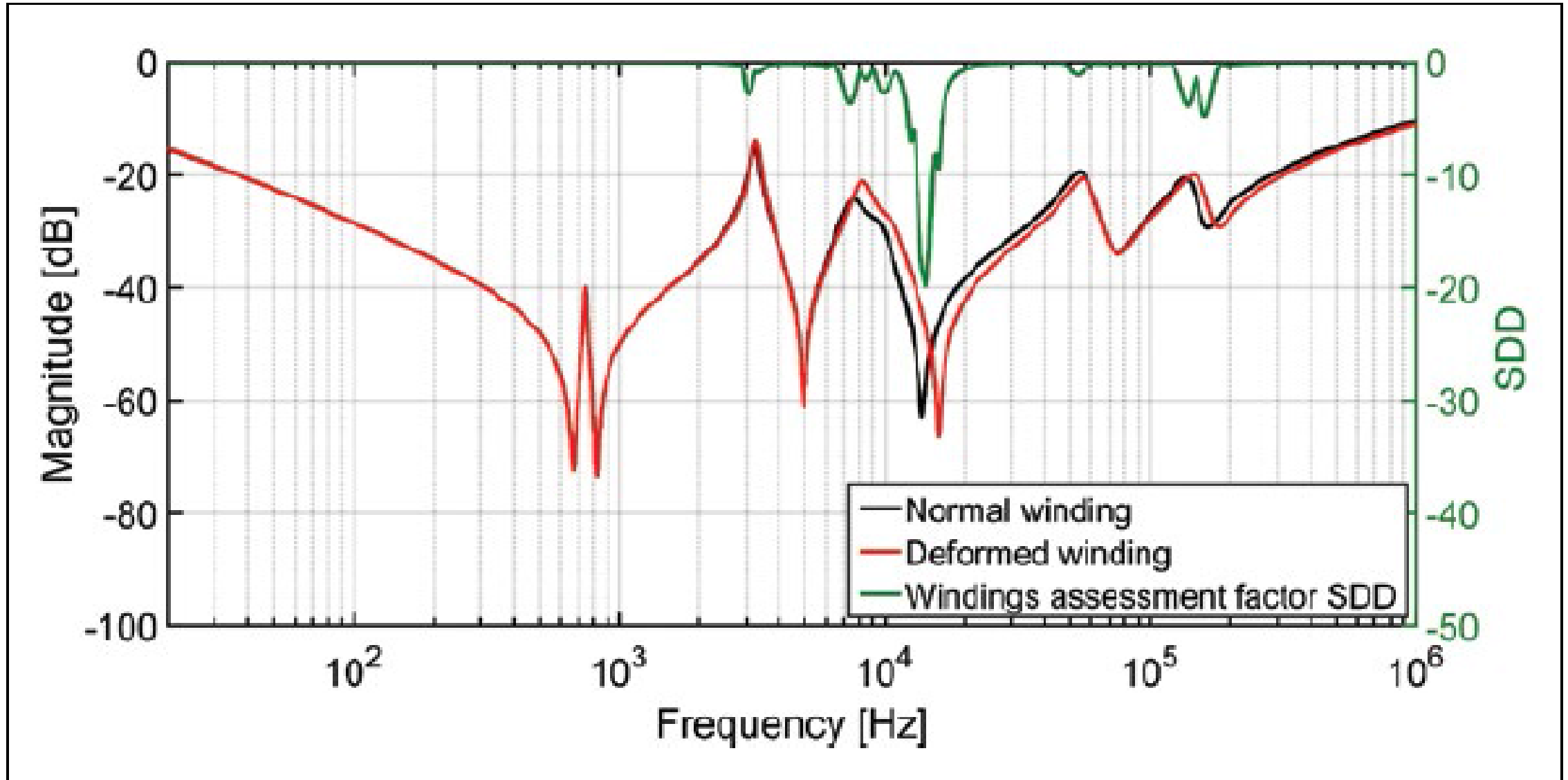


A „window slides” a kezdeti frekvenciától az FRA végfrekvenciájáig tart speciális „windows step-ke” ( $W_{step}=1$ ), mint az alábbi ábrán látható. Ezáltal leszkennek az egész frekvenciatartományt és minden egyes ablakban az SDD becslésre kerül.

## Tekercs becslő algoritmus alapelve



Az eltérés fokának azonosítására ajánlott módszer alkalmazása két FRA spektrum között egy 3 fázisú trafóban. Ez az elképzelés még minden esetben hatékonynak bizonyult.







- **Mint összehasonlító technika**, a referencia és mért FRA közötti különbség jelzi a két FRA közötti különbséget, azaz a tekercs mechanikai hibáját.
- **Értelmezve az egyes frekvencia sávoknál történő eltérés fizika jelentését**, becsülhetjük a tekercsben történt változás eredetét.
- Számos tanulmány tartalmaz ilyen kiértékeléseket, de még várat magára a részletesebb FRA kiértékelés, ill. várat magára a szabványosítás is.

**CIGRE TB 812 új indexes FRA  
kiértékelése, különös tekintettel a  
KÍNAI FRA szabvány indexes  
kiértékelésére**

# Algoritmusok hasznossága, kínai kiértékelés-Esettanulmány

Tehát eseteinkben volt **vizuális FRA kiértékelés (lásd előző ábrákat): A vizuális kiértékeléshez** az FRA görbék két elrendezés mérésén kerültek rögzítésre, láthatóak, hogy hol a legerősebb a változás különböző mértékű eltolódási folyamatok során.

**Az alábbiakban az algoritmusok vizsgálata történik, azaz a mennyiségi kiértékelés.**

A mennyiségi kiértékelés, azaz az algoritmusok viselkedése **korrelációs tényezővel és normál szórással történt.**

A három FRA (TF) görbének megfelelően három számítás lett elvégezve, **indexekkel lett jelölve mérési adatok megkülönböztetése céljából:**

**Index 1:** az axiális elmozdulás adathalmaza,

**Index 2:** radiális deformáció, átviteli feszültséggel, mint válaszfüggvénnyel,

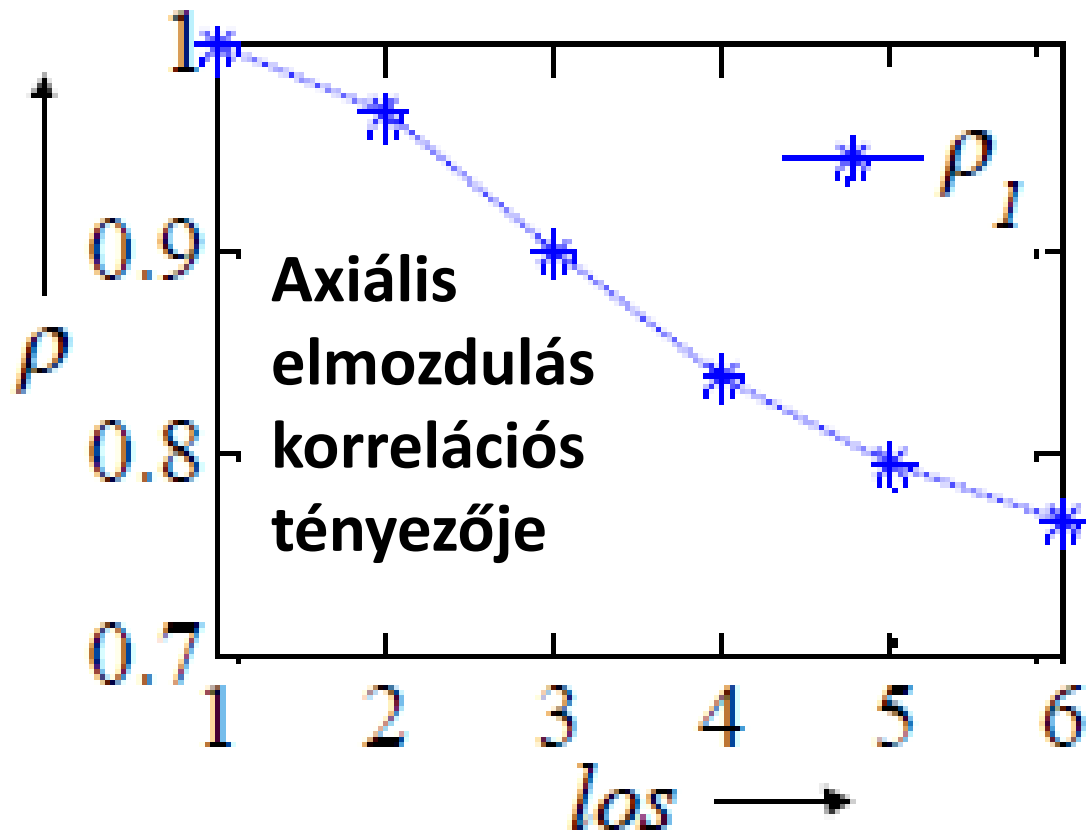
**Index 3:** radiális deformáció elmozdulás, válasz függvény az input áram.

# Algoritmusok hasznossága, kínai kiértékelés-Esettanulmány

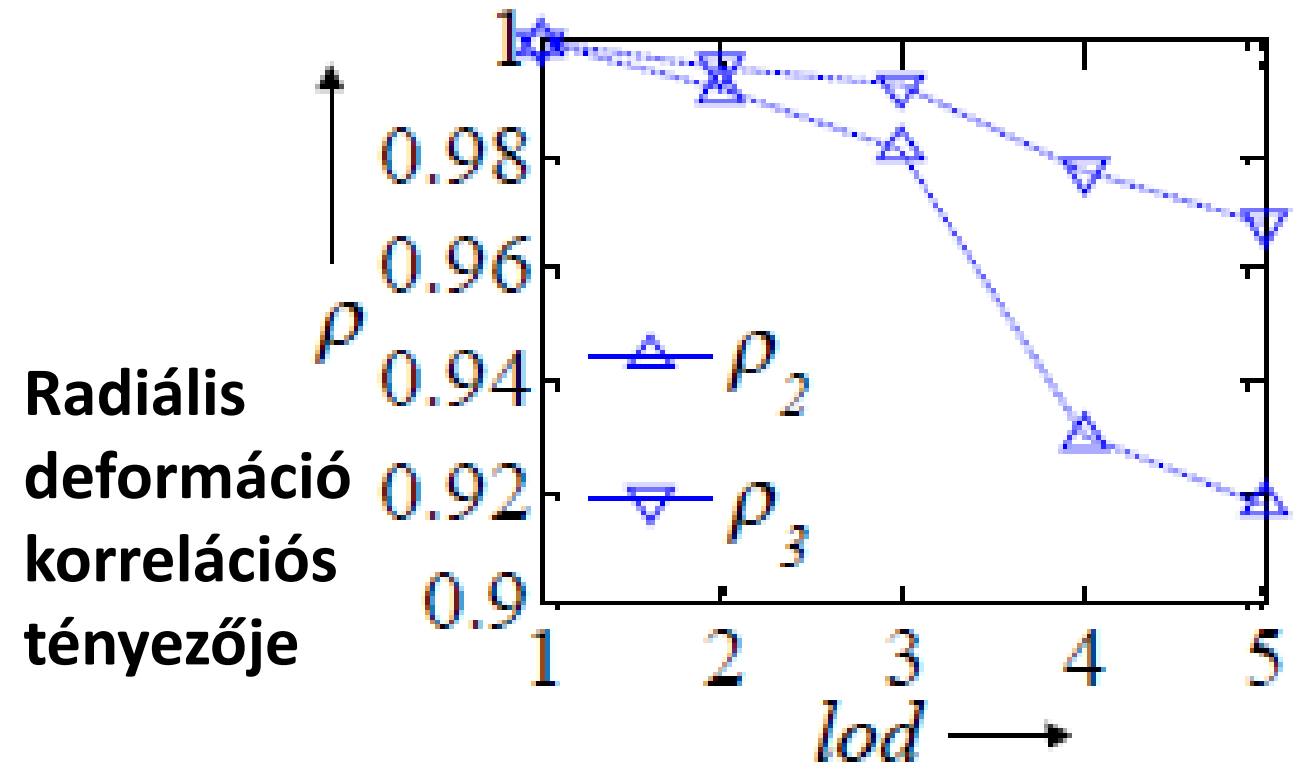
## Az algoritmusok vizsgálata

Először a teljes frekvenciatartományban végezték az algoritmus vizsgálatát, majd különböző rész-frekvencia tartományokban. Számos matematikai függvény felrajzolásra került, mint pl. az alábbiak:

**los: level of shift**

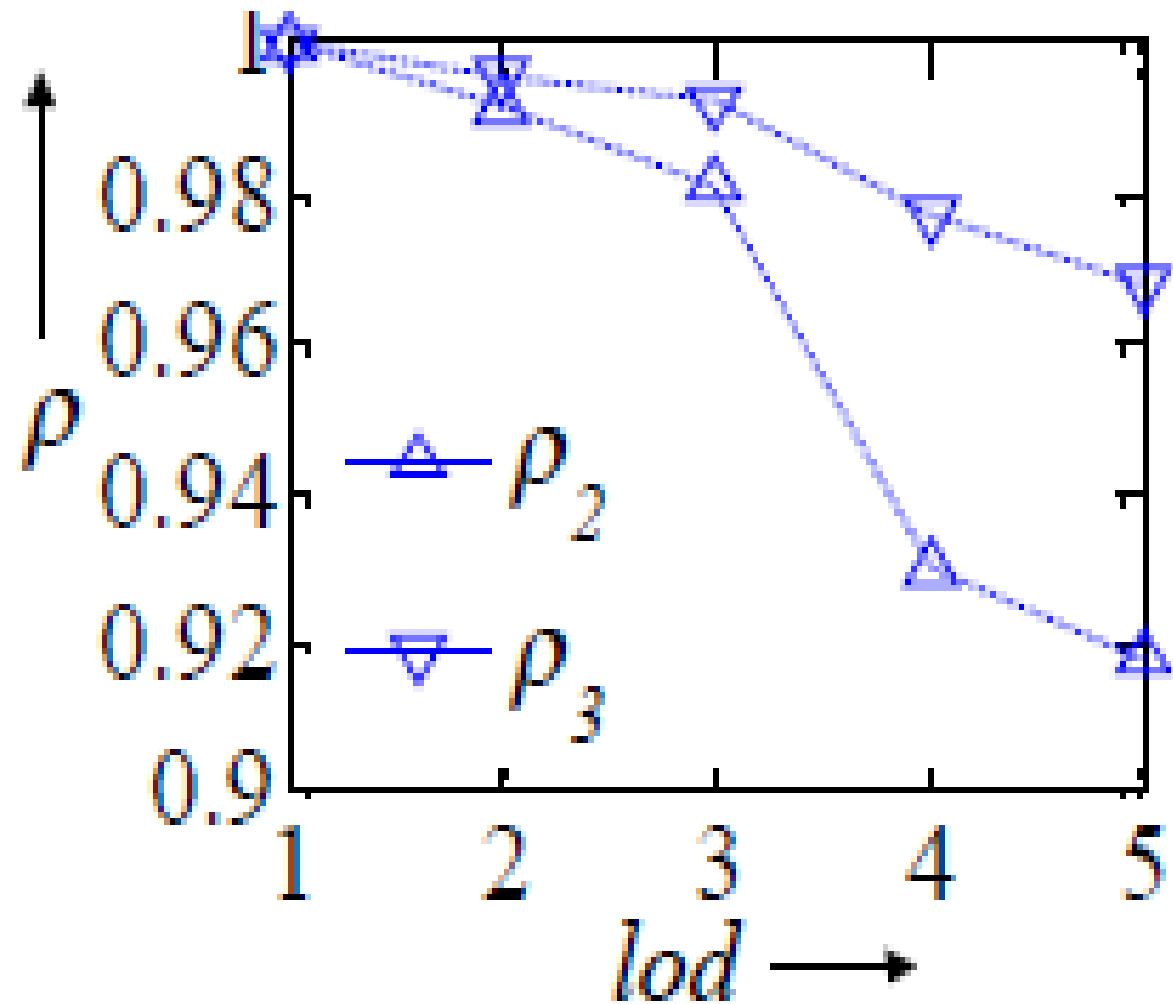
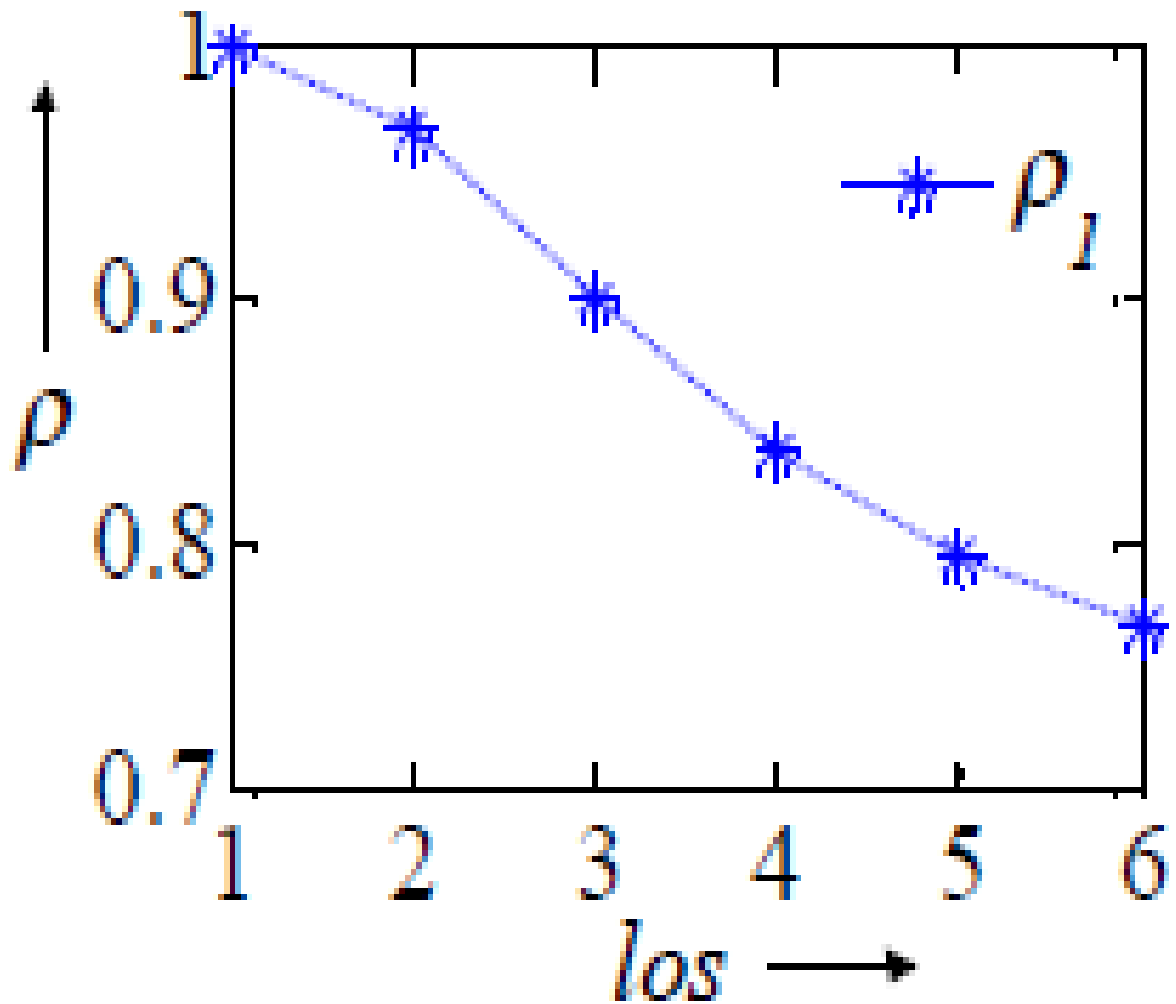


**lod: level of deformation.**



# Algoritmusok hasznossága, kínai kiértékelés-Esettanulmány

Axiális elmozdulás korrelációs tényezője, és radiális deformáció korrelációs tényezője  
los: level of shift  
lod: level of deformation.



# Algoritmusok hasznossága, kínai kiértékelés-Esettanulmány

Számos algoritmus kipróbálásra került az FRA görbék hasonlóságának, ill. eltérésének vizsgálatára, és mindegyik algoritmus többé-kevésbé jelezte az FRA görbék változásait.

Tehát a vizuális kiértékelés mellett lehetőség van a mennyiségi kiértékelésre is.

Az a tapasztalat, hogy a teljes mérési spektrum frekvencia tartományokra osztása és azon belüli kiértékelés növeli az FRA diagnosztika érzékenységét.

Az FRA görbékől vizuálisan látható, hogy különböző frekvencia tartományokban más és más a görbék változása. Ott, ahol nagyobb a görbe változása, várhatóan nagyobb érzékenységgel rendelkezik az alkalmazott algoritmus.

Tehát az egyes algoritmusok is más-más érzékenységgel rendelkeznek, az egyes frekvencia tartományban is más-más a változás, ezért érdemes felosztani a frekvencia tartományt.

Itt említhető meg, hogy a kínai FRA szabvány már ilyen jellegű mennyiségi FRA kiértékelést tartalmaz, és definiál al-frekvencia tartományokat is.

## Algoritmusok hasznossága, kínai kiértékelés-Esettanulmány

Tehát az FRA görbék vizuális megtekintése során láthatjuk, hogy a TF (Transfer Function) görbék nem egyenletesen osztódnak el a teljes frekvencia tartományban, **jobban kötődnek egyes (nem teljes) tartományokhoz.**

Ezért nyilvánvaló volt, hogy a teljes frekvencia tartományt **kisebb szekciókra kell osztani**, amellyel **növelhetjük az FRA algoritmusok érzékenységét.**

*Tehát kisebb tartományok kiértékelésével, ahol erősebb a változás a mérési adatokban, növekszik érzékenység és a biztonság is.*

A fenti megfontolások figyelembevételével a **kínai szabvány három al-frekvencia tartományt jelölt ki:**

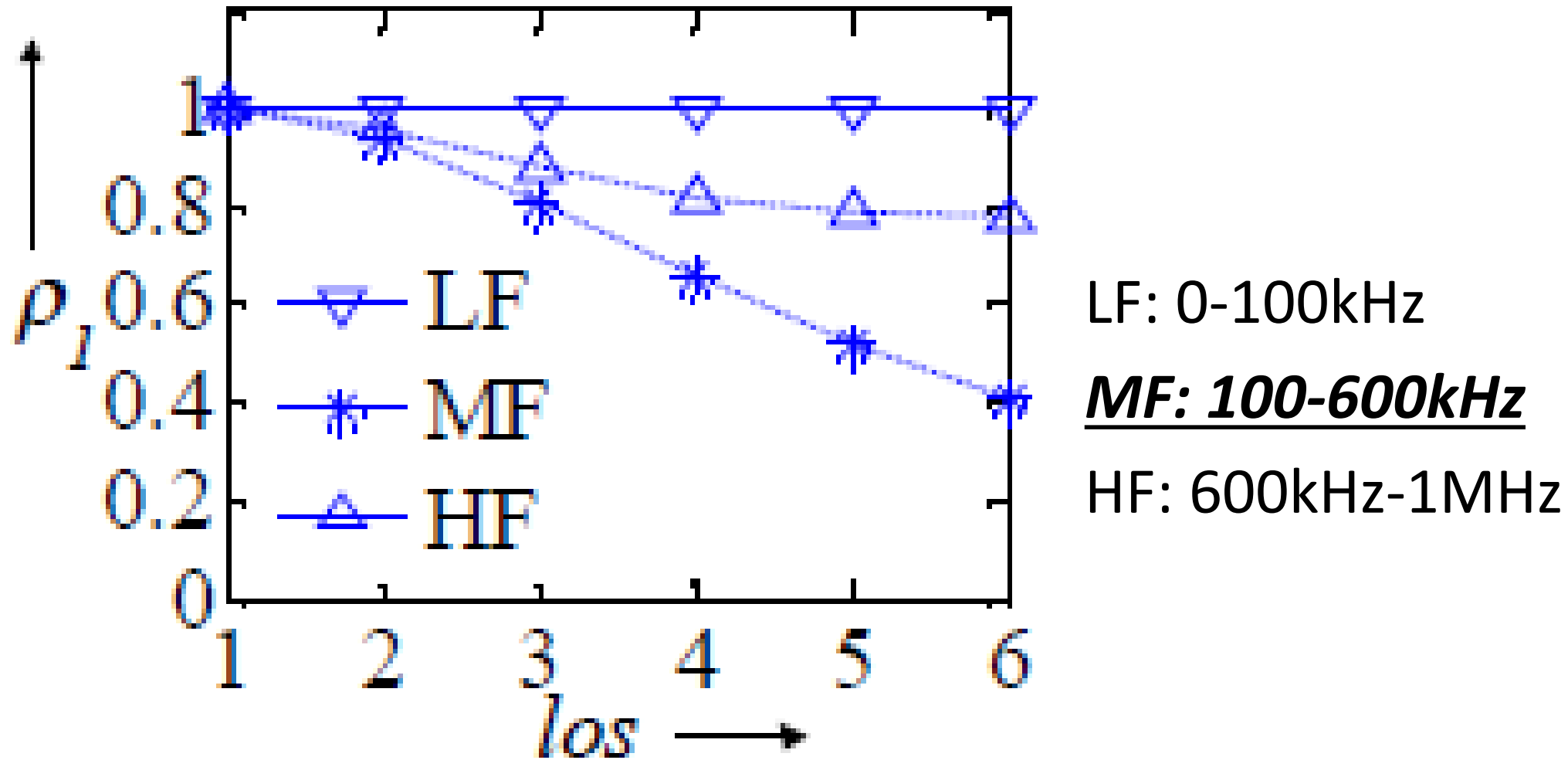
***LF: 0-100kHz***

***MF: 100-600kHz***

***HF: 600kHz-1MHz***

## Algoritmusok hasznossága, kínai kiértékelés-Esettanulmány

Az alábbi ábrán látható, hogy az **MF tartományban** erősebb az axiális eltolás a korrelációs faktor szerint, és ez igaz FRA görbét szemlélve is.





# Algoritmusok hasznossága, kínai kiértékelés-Esettanulmány

Az  $R_{LF}$  faktor jelenti a relatív  $R_{xy}$  faktort az **LF tartományban**:

Az  $R_{MF}$  faktor jelenti a relatív  $R_{xy}$  faktort az **MF tartományban, stb.**

Degree of deformation of the winding	Limits for the relative factor $R_{xy}$
severe deformation	$R_{LF} < 0.6$
obvious deformation	$1.0 > R_{LF} \geq 0.6$ or $R_{MF} < 0.6$
slight deformation	$2.0 > R_{LF} \geq 1.0$ or $0.6 \leq R_{MF} < 1.0$
normal winding	$R_{LF} \geq 2.0, R_{MF} \geq 1.0$ and $R_{HF} \geq 0.6$

A **relatív faktorok kombinációban** a **definiált küszöbértékekkel**, kipróbálásra kerültek az axiális elmozdulásos TF-el, ill. a radiális deformációs TF-el (átvitt feszültség) esetek.

**Három deformációs fok: súlyos, szembetűnő, csekély.**

## Kínai FRA szabvány alkalmazása CIGRE TB 812-ben

### Kínai szabvány alapján számolt deformáció

Degree of deformation of the winding	Limits for the relative factor, $R_{xy}$
Severe deformation	$R_{LF} < 0.6$
Obvious deformation	$0.6 \leq R_{LF} < 1$ or $R_{MF} < 0.6$
Slight deformation	$1.0 \leq R_{LF} < 2.0$ or $0.6 \leq R_{MF} < 1.0$
Normal winding	$2.0 \leq R_{LF}$ , $1.0 \leq R_{MF}$ and $0.6 \leq R_{HF}$

# Algoritmusok hasznossága, kínai kiértékelés-Esettanulmány

## Algoritmusokról röviden:

Ezek az algoritmusok **képesek megbecsülni** az FRA görbék változásait, **de különböző érzékenységgel rendelkeznek a tekercshibák, ill. az FRA változásaitól függően.**

A bemutatott FRA görbéknél a **korrelációs faktor a legnagyobb érzékenységgű.**

A frekvencia tartomány felosztása **több altartományokra növelheti az ilyen algoritmusok érzékenységét.**

Az algoritmusok ellenőrizték a maximum, minimum értékek azonosítását, a rezonancia emelkedési területek számolását. **Az összes lényeges rezonancia és anti-rezonancia frekvencia azonosításra került. Azonban a vizsgálandó és a referencia FRA görbék megfelelő minimumok és maximumok kijelölése még problémás.**

Mindenesetre a számítási szabályok **nagy lehetőséggel bírnak az FRA görbék változásainak a detektálásában, mert a becslési eljárás az FRA görbék sajátosságaira alapul.**

# Algoritmusok hasznossága, kínai kiértékelés-Esettanulmány

## Algoritmusokról röviden:

A küszöb érték pontos leírása nehéz, mert tekercs sérülés esetén néhány trafó esetén az FRA görbék egyértelműen megváltoznak, másoknál azonban nem.

**Az FRA görbék viselkedése függ a trafó és a tekercs típusától.**

A Kínai FRA szabvány jó kísérlet az FRA kiértékelésre, de **jelenleg nem helyettesítheti az emberi beavatkozást.**

A bemutatott algoritmus megmutatta, hogy **teljes mértékben nem lehet mindegyik FRA görbe változást elemezni.**

Másik lehetőség lenne egy olyan számítási szabályrendszer, **amely számos algoritmust be tudna integrálni.**

# Három FRA szabvány kiértékelésének összehasonlítása

- IEC 60076-18: 2012:** Measurement of frequency response
- IEEE PC57.149-2012:** IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers
- Kínai: Std. DL/T911-2004 (2016), ICS 27.100, F24, Document No. 15182-2005, June 1st 2005.** (correlation factors, co-variance of spectra). The Electric Power Industry Standard of People's Republic of China, "Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers"..

## **Irányelvek, szabványok, stb. az SFRA mérések végrehajtására**

-IEC, IEEE szabványok lényegében „vizuális” FRA kiértékelést ajánlanak.

### **Lehetséges a vizuális és a mennyiségi FRA kiértékelést együttes használata?**

-Eddig az alábbi helyekről merítettük a diagnosztikai lehetőségeket:

-**CIGRE TB 342 (2008),TB 812 (2020)**: Mechanical-condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA),

-**IEC 60076-18: 2012**: Measurement of frequency response

-**IEEE PC57.149-2012**: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers.

**Kínai FRA szabványban a vizuális kiértékelés mellett van ”mennyiségi” is.**

- **Kínai: Std. DL/T911-2004 (2016), ICS 27.100, F24, Document No. 15182-2005, June 2005.**  
(correlation factors, co-variance of spectra). The Electric Power Industry Standard of People’s Republic of China, “Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers”.

## Kínai szabvány szerinti FRA kiértékelés

A görbéket a teljes frekvencia tartomány mellett a kínai szabvány 3 „al-frekvencia tartományban” vizsgálják: kis, közepes, nagyfrekvenciás tartomány. Számolják az egyes tartományokra vonatkozó **korrelációs együttható és szórás értékeket**, valamint az „R” és „E” különböző frekvencia tartományi értékeit: azaz, az **MF/LF, HF/LF** arányokat is.

A teljes FRA kiértékelés a teljes FRA spektrum összehasonlításán, valamint az egyes frekvencia tartományokra felvett a korrelációs együttható és szórás alapján történik.

A kínai szabvány **3 fő frekvencia tartományt definiál**: Region 1, 2 és 3. (IEEE 1MHz felett is).

Region 1: **1kHz–100kHz**: Region 2: **100kHz–600kHz**: Region 3: **600kHz – 1MHz**.

- $R_{LF}$ =korrelációs együttható alacsony frekvencia tartományban
- $R_{MF}$ =korrelációs együttható közepes frekvencia tartományban
- $R_{HF}$ =korrelációs együttható magas frekvencia tartományban
- $E_{LF}$ =négyzetes szórás alacsony frekvencia tartományban
- $E_{MF}$ =négyzetes szórás közepes frekvencia tartományban
- $E_{HF}$ =négyzetes szórás magas frekvencia tartományban

**A diagnosztika hatékonyságának bemutatása, ill. javítása céljából 3 FRA szabvány kiértékelésének összehasonlítása (Kínai, CIGRE, IEEE) jó tanulási lehetőség lehet.**

### **Kísérleti munka**

**-Két 30 MVA-es, 33/11 kV-os elosztó hálózati trafót vizsgáltak.**

**-Mindkét trafó több mint 20 éve üzemelt. FRA mérést az OMIKRON FRAnalyzer műszerrel végezték.**

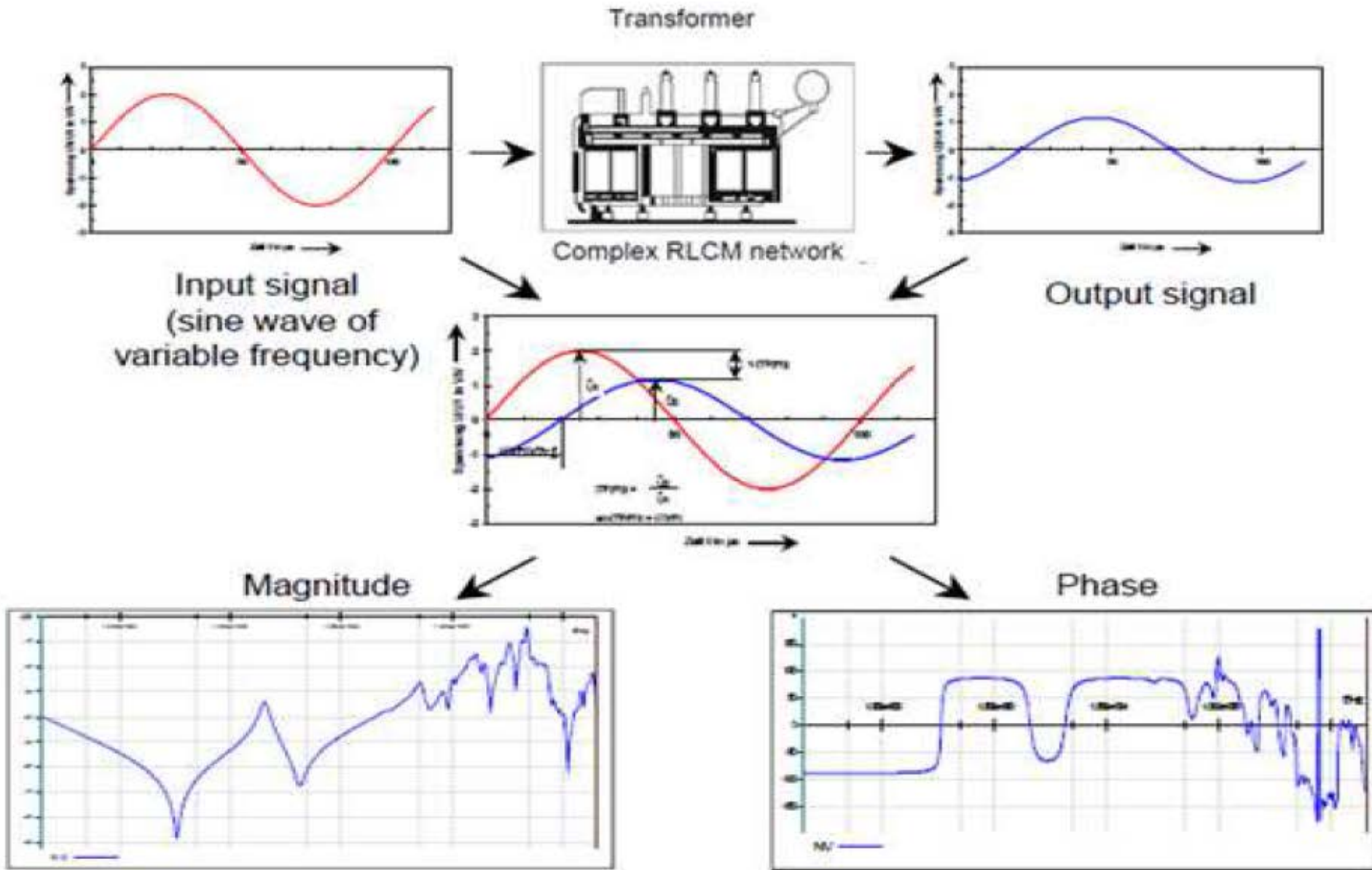
**-Ez a készülék rendelkezik a „Chinese Standard DL/T 911-2004 (2016)” FRA kiértékelő rendszerrel. (Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers)**

**-A méréseket a 20 Hz – 2 MHz-es tartományban végezték el.**

**-A mérések rendszere az alábbi ábrán látható: elemzésre kerül az input és az output jel amplitúdója és a fázisszöge.**



# Az elvégzett FRA mérések koncepciója

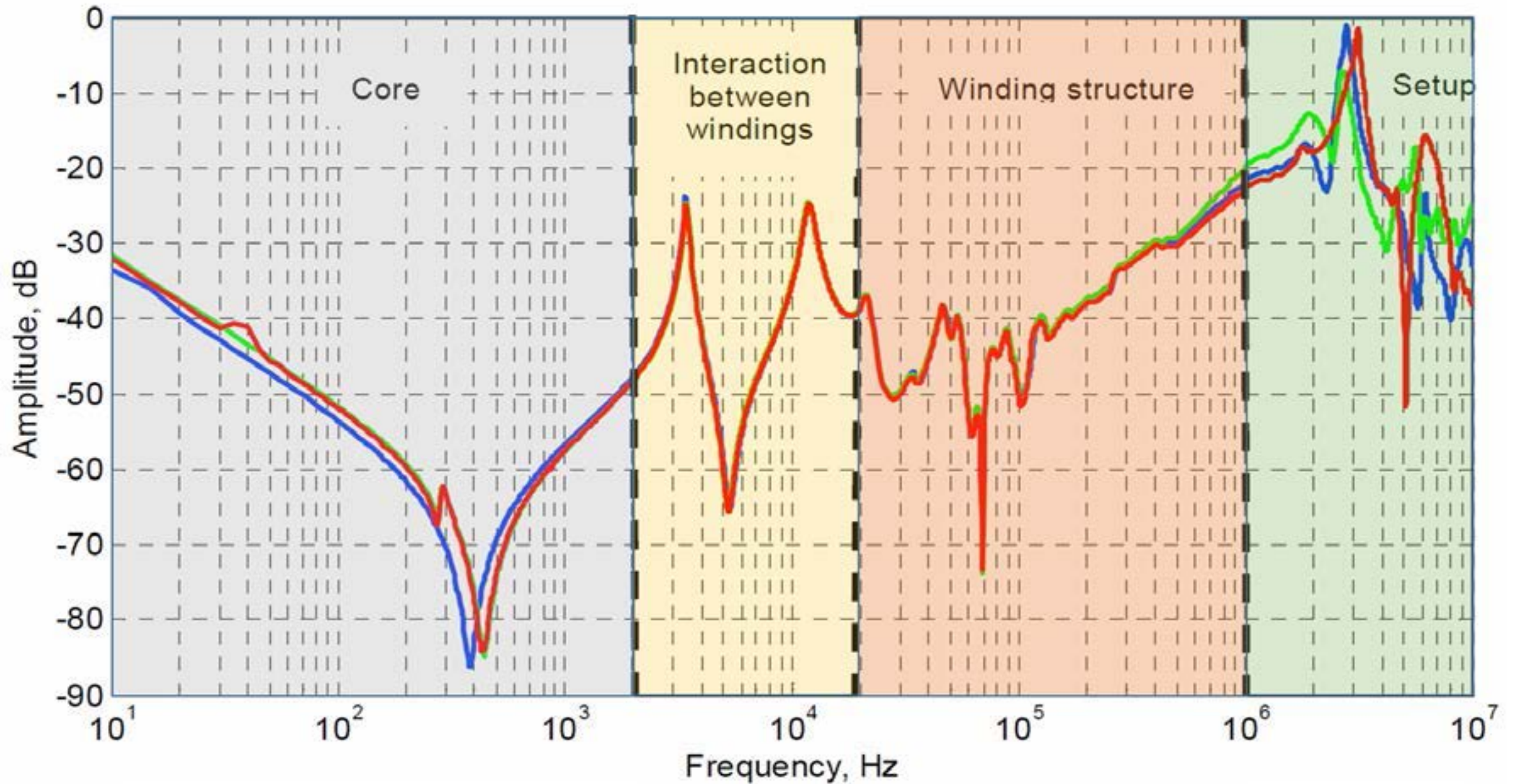


- Az alábbi táblázat** a három **szabvány** által frekvencia sávok szerint meghatározott frekvencia spektrumot tartalmazza.
- Mindegyik tartomány **kapcsolódik** a trafó valamely eleméhez.
- A kínai szabvány három **fő tartományt definiál**: Region 1, 2 és 3.
- A szabványok a **tekercsekre fókuszálnak**.
- A CIGRE WG A2.26 (IEC) „szabvány” a **kínaihoz hasonlóan 3 tartományt definiál**. Az IEC szabványnál, az összes gyűjtött adatba beleértendő az 1 kHz-nél kisebb adatok is.
- Ennek a tartománynak az értékelése lehetővé teszi a **vasmag elemzését is**.
- A **Region 1 érzékenysége** fontos *a vasmag hibánál*.
- A **Region 2** tartományban a *radiális elmozdulást lehet detektálni*.
- Végül a **Region 3** a tekercs *axiális deformációjára jellemző*.

## A három szabvány FRA frekvencia tartományai

FRA Standards	Frequency Sub-Bands			
	Region 1	Region 2	Region 3	Region 4
Chinese Standards DL/T911-2004	1 kHz to 100 kHz	100 kHz to 600 kHz	600 kHz to 1 MHz	-
Cigre Standards WG A2/26	< 10 kHz	10 kHz to 500 kHz	200 kHz to 1 MHz	-
IEEE Std C57.149 2012	20 Hz to 10 kHz	5 kHz to 100 kHz	50 kHz to 1 MHz	> 1 MHz

# Az FRA spektrum 4 fő tartományra osztható



## Az FRA spektrum 4 fő tartományra osztható:

- „1” alacsonyfrekvenciás tartományban a vasmag hatása dominál: függ a mag mágnesező indukciójától és a trafó kapacitásától (2kHz-ig). Egy háromoszlopos trafónál a középső fázis ebben a tartományban általában **egy rezonancia ponttal** rendelkezik, mert a vasmag szimmetrikusan zárul a másik két fázis felé, **de a szélső két fázisnak általában két rezonancia pontja van**. A vasmag maradék mágnesezése ugyancsak befolyásolja ezt a tartományt.
- „2” középső tartományban a **tekercsek közötti kapcsolat dominál**. Ez a tartomány **2-20kHz közötti**. Ez a rész függ a tekercsek közötti kapcsolattól, (delta, Y), autótrafó, stb., **egyfázisú, vagy 3 fázisú**.
- **Autótrafó** esetén ebben a tartományban általában **két rezonancia**.
- „3” **nagyobb frekvenciás tartomány (20kHz-1MHz)**: a tekercsek **egyedi tulajdonságai**, belső kötések dominálnak: meghatározók a szórési induktivitások, a **tekercsek soros és föld kapacitásai**. Ebben a tartományban a **soros kapacitás a legdominánsabb** tényező, ez határozza meg a **burkoló görbét**. A **nagykapacitással** (átlapolás) készülő trafóknál **több rezonanciás pont van emelkedő** amplitúdóval. A **KF tekercsnél, ahol kicsi a soros kapacitás** általában **lapos görbével rendelkezik** ebben a tartományban.
- „4” **nagyfrekvenciás tartomány (1MHz felett)**, ahol a **mérési elrendezés**, bekötővezetékek, stb. nagyfrekvenciás tulajdonságai dominálnak, **nehezen ismételhető mérések**.
- A kritikus frekvenciák főleg a trafó méretétől függenek

- Az **IEEE Std C57.149 2012** szabvány **4 fő frekvencia tartományt** használ.
- Különbség** van a kínai és a CIGRE, ill. az IEC szabvány között.
- Az **IEEE szabvány** a vasmagra, tekercsre és az érintkezési hibákra koncentrálnak.
- Az **IEEE-nél a Region 1** lefedi a vasmag és a tekercs menet hibát.
- A **Region 2** érzékeny a tekercs axiális és az általános tekercs hibákra.
- Az **IEEE szabvány szerint**, a **Region 3** és **Region 4** tartományokban detektált radiális deformáció az érintkezési ellenállás, a tekercs menet vagy szakadás miatt jelenhet meg.

## Eredmények és kiértékelés

A két trafó mérési adatai külön lettek kiértékelve: jó trafó, rossz trafó.

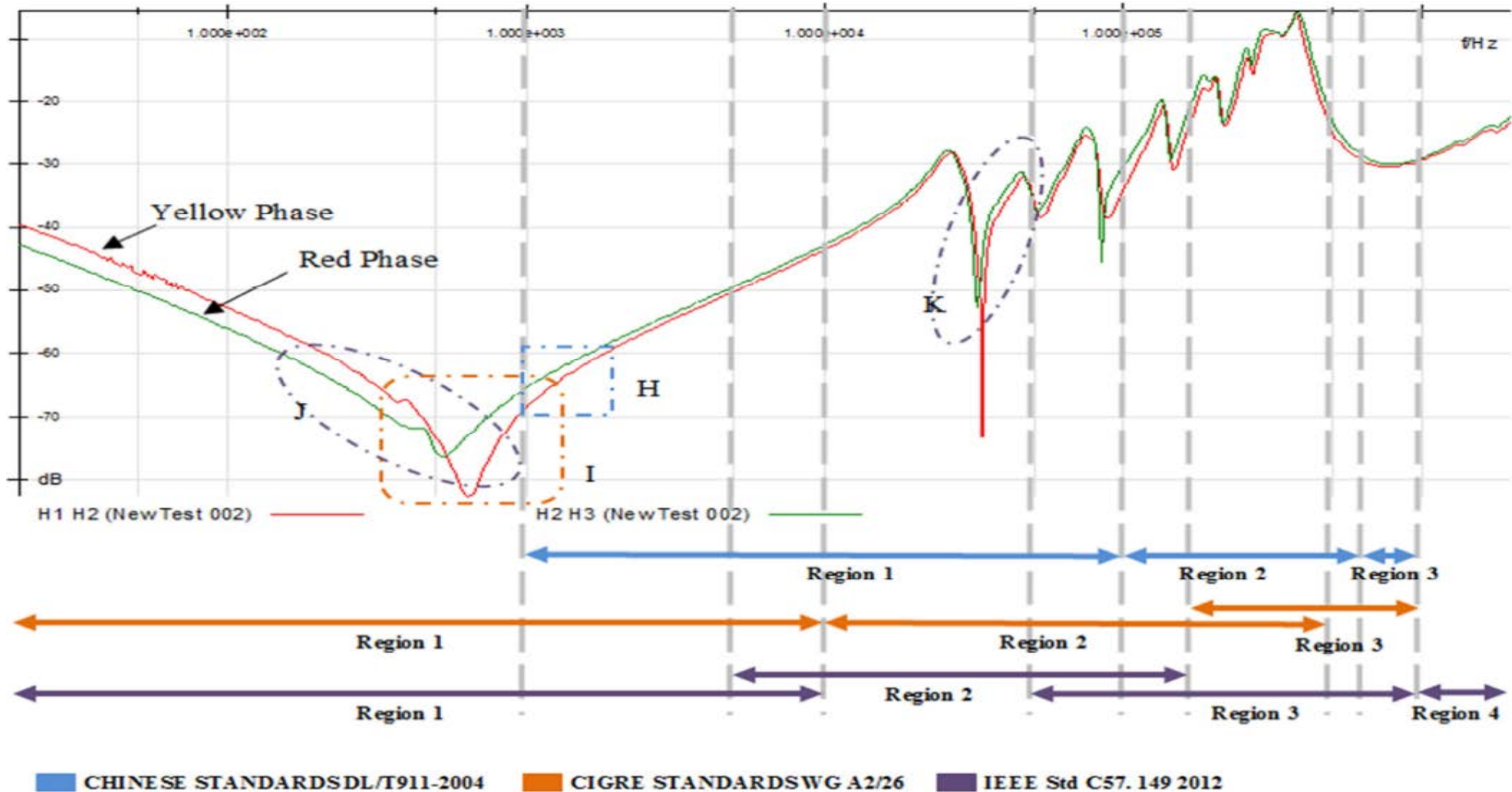
### 1. Eset tanulmány: jó trafó.

Eben az esetben **jó állapotú trafó** fázis-fázis FRA adatai kerültek összehasonlításra három különböző szabvány szerint.

**Region 1** nagyon kis eltérést mutat a két helyen a „H” jelű téglalap kezdeténél. Azt jelenti, hogy a **Piros és Sárga fázis görbéi között jelentős eltérés van.**

A **Region 2 és Region 3** tartományban a görbék azonos nyomvonalon haladnak, ez azt jelenti, hogy **mindkét tekercs jó állapotban van a kínai szabvány szerint.**

# FRA eredmények: fázis-fázis összehasonlítás JÓ ÁLLAPOTÚ TRAFÓNÁL



CHINESE STANDARDS DL/T911-2004

CIGRE STANDARDS WG A2/26

IEEE Std C57.149 2012



## **JÓ TRAFÓ**

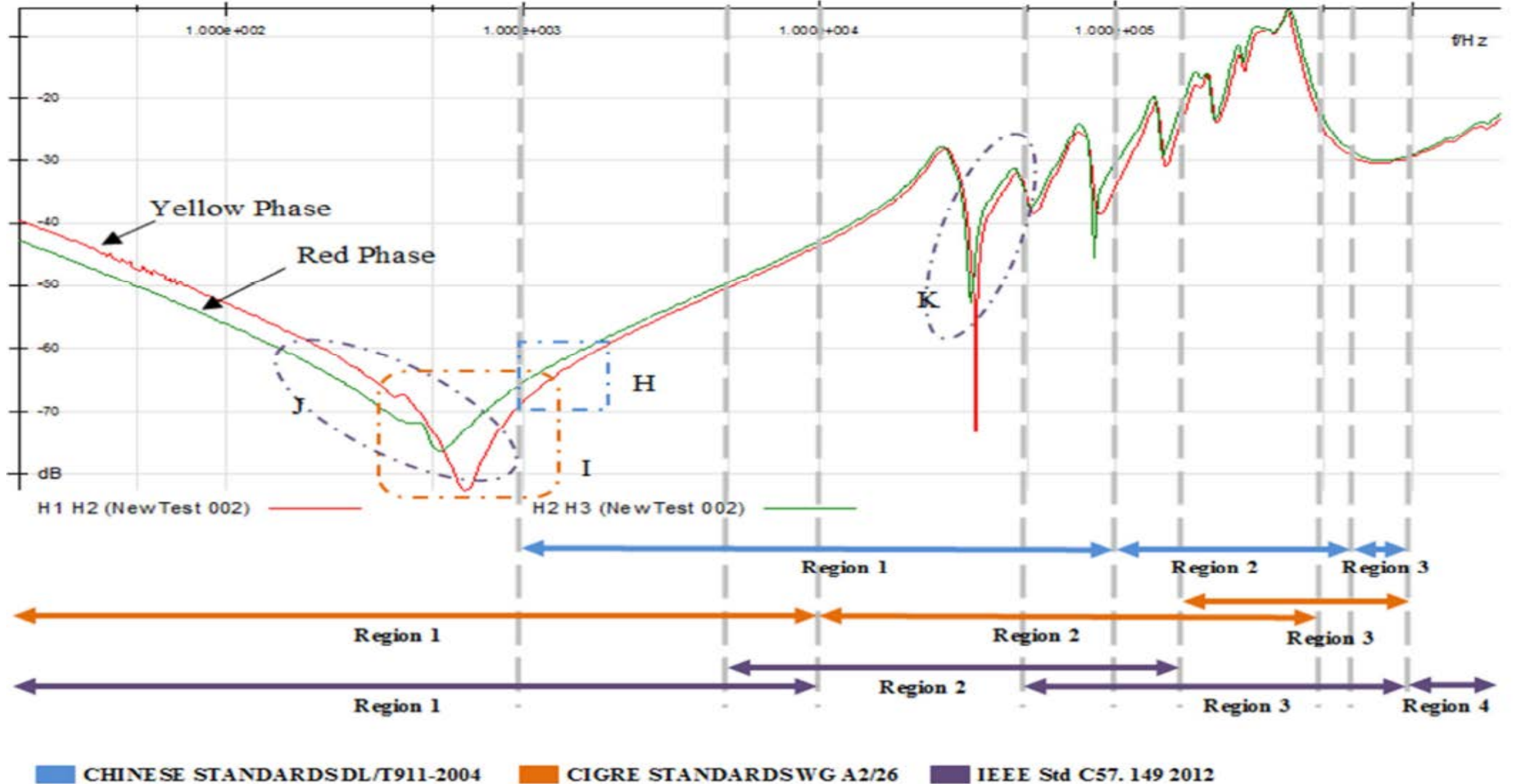
A görbék a **CIGRE szerint** analizálva, **kis eltérés van az Region 1 tartományban az „I” jelű négyszögben**. Ez egy kis vasmag hibát jelez a Sárga fázisban. A kis eltérés még elfogadható egy 20 éve üzemelő trafónál.

Az **IEEE szabvány véleménye szerint**, **kis eltérés van a Region 1 tartomány „J” jelű ellipszis területénél**, ami kis hibát jelent a vasagnál és tekercs menetzárlatot.

Másik kis változás ugyancsak látható **a Region 2 tartományban**, ami kis deformációt jelez a tekercs geometriában: **„K” jelű ellipszis területénél**.

**A Region 3 és Region 4 tartományokban nincs eltérés a görbék között**, vagyis mindkét tekercs jó állapotú.

# FRA eredmények: fázis-fázis összehasonlítás JÓ ÁLLAPOTÚ TRAFÓNÁL



## 2. Eset tanulmány: hibás trafó

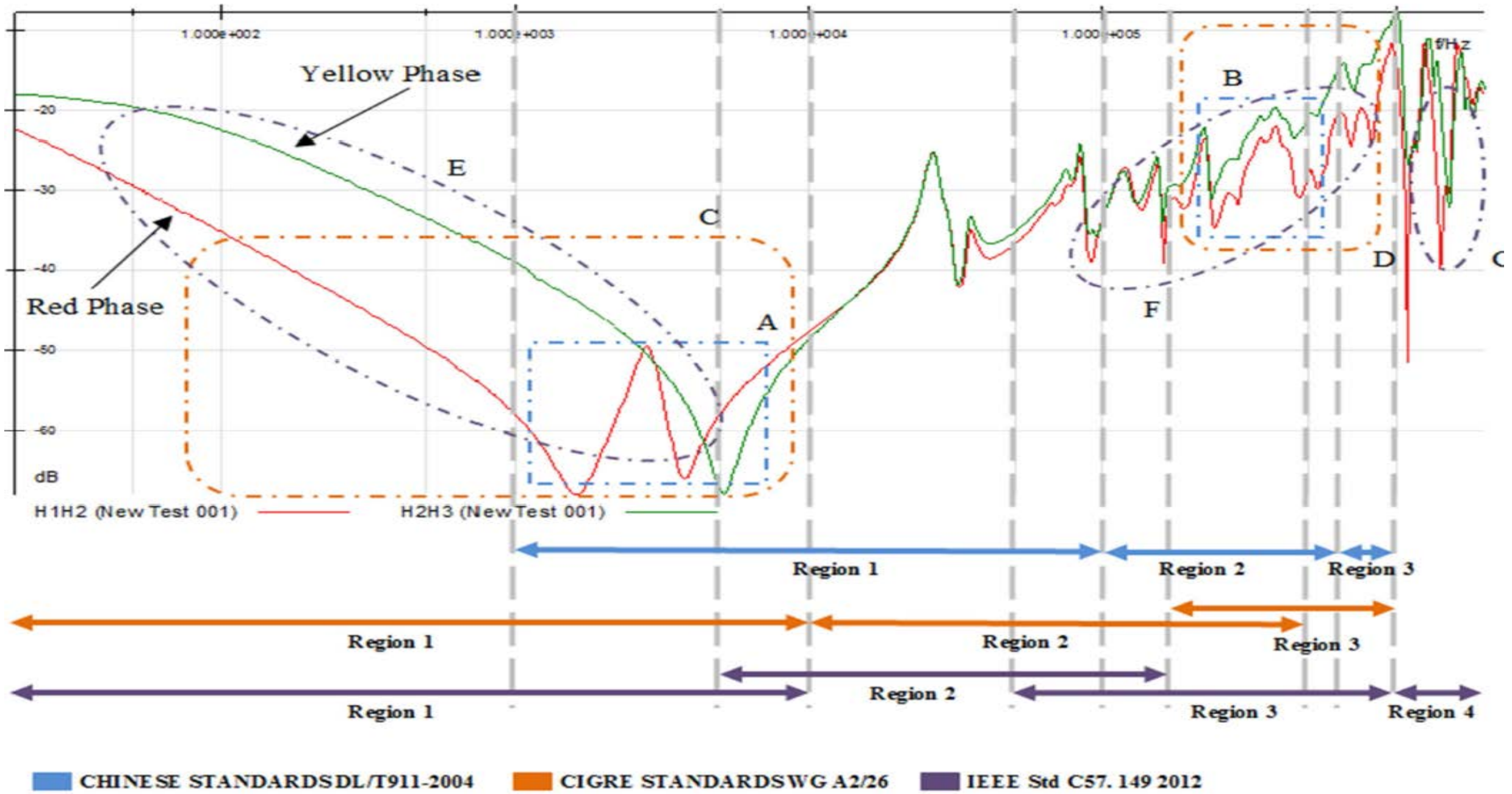
Ebben az esetben rossz állapotú trafó fázis-fázis FRA adatai kerültek összehasonlításra három különböző szabvány szerint.

A kínai szabvány szerint a Region 1 tartományban lévő eltérés azt jelzi, hogy a Sárga fázisban **nagy deformáció van az „A” jelű téglalap területén.**

A „B” téglalap szerint kis eltérés a fázisok között kis tekercs deformációt jelez.

A kínai szabvány értelmezése szerint bizonyított, hogy a Sárga fázisnál a tapasztalat szerint tekercs deformáció van.

# FRA eredmények: fázis-fázis összehasonlítás rossz állapotú trafónál



A **CIGRE** szerint a **Region 1** tartományban a görbe jelentős mágneses kör és vasmag hibát jelez a Sárga fázisnál a „C” téglalap területén.

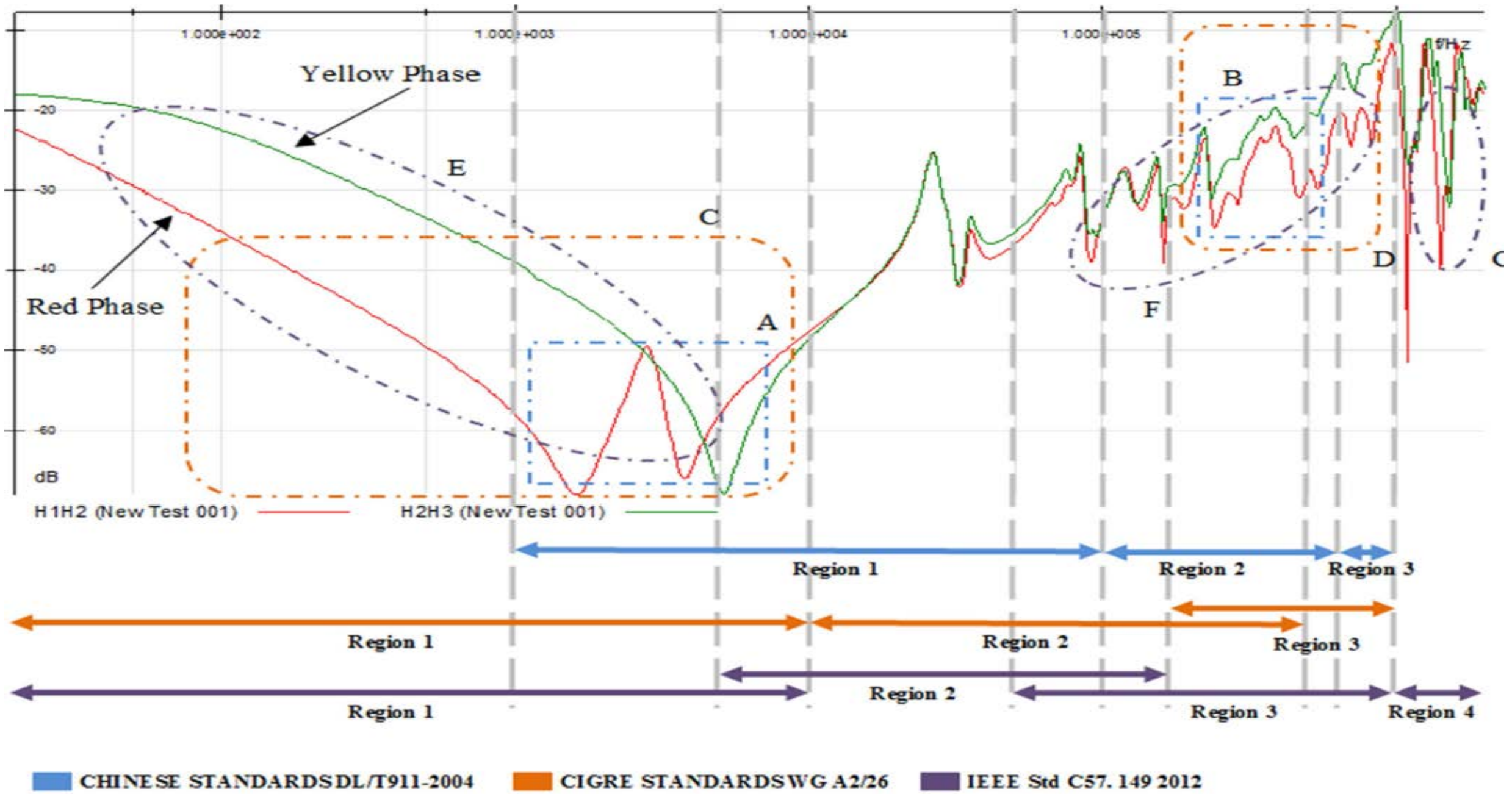
A „D” jelű téglalap területe szerint kis axiális tekercs deformáció vagy elmozdulás lehet. A **CIGRE** azt jelzi, hogy a Sárga fázisnál axiális deformáció és vasmag probléma detektálható.

Az **IEEE** szerint a **Region 1** nagy eltérést jelez a Píros és a Sárga fázisnál az „E” területnél, ami vasmag hibát és menetzárlatot jelez. A **Region 4** tartományban nagy eltérés van a „G” területen.

A **Region 4** hiba az átmeneti ellenállás, tekercs menet vagy nyitott tekercset jelent.

Kisebb eltérés látható a **Region 3** tartományban az „F” jelű területnél és az **IEEE** szerint a **Region 3** hiba axiális tekercs deformációnál jelenik meg, vagy általános tekercs változásnál, vagy érintkezési ellenállás növekedésnél, vagy menetzárlatnál, vagy nyitott tekercsnél.

# FRA eredmények: fázis-fázis összehasonlítás rossz állapotú trafónál



Tab.3: Correlation efficient of winding loose FRA lines

fault location	winding loose	d=1mm	d=2mm
whole frequency band	0.997454	0.994843	0.988204
low frequency band	0.999657	0.997563	0.994014
middle frequency band	0.999934	0.999794	0.999236
high frequency band	0.991148	0.985003	0.968413
$R_{MF} / R_{LF}$	1.00028	1.00224	1.00525
$R_{HF} / R_{LF}$	0.99149	0.98741	0.97424

Tab.4: Mean square deviation of winding loose FRA lines

fault location	winding loose	d=1mm	d=2mm
whole frequency band	1.448415	2.155938	3.429761
low frequency band	0.706844	1.904525	2.960307
middle frequency band	0.478289	1.019811	2.049807
high frequency band	2.374527	3.152178	4.847262
$E_{MF} / E_{LF}$	0.6767	0.5355	0.6924
$E_{HF} / E_{LF}$	3.3593	1.6551	1.6374

## Kínai szabvány szerinti MENNYISÉGI kiértékelés

-A kínai szabvány szerint az állapot a **referencia és a mért görbék alapján** kerül leírásra.

-A mért eredményekből egy **„korrelációs együtthatót”** és **„átlagos négyzetes eltérést”** (szórás négyzet) számolnak.

-A korreláció együttható **két görbe hasonlóságára** jellemző. A négyzetes szórás pedig **két görbe közötti eltérésre jellemző.**



## Konklúziók

- A trafó meghibásodások **jelentős százaléka zárlati esemény** következtében alakul ki.
- A szigetelési klasszikus jellemzőin kívül az **aktív rész mechanikai állapotra jellemző információnak** is jelentős szerepe van az általános diagnosztikában.
- A tekercs geometriában bekövetkező torzulás a szigetelésben elsősorban ionizációs folyamatokat indít be, **így a mechanikai problémából dielektromos probléma lesz.**
- Jelenleg két fontos** diagnosztika: **rezgés és FRA mérés.**
- A rezgésre nincs, az FRA-ra van szabvány. Most az FRA technika a legjobb módszer a trafók tekercs deformációjának a detektálására.**
- Bár **FRA mára már egy elfogadott mérési módszer,** vannak szabványok (IEC, IEEE, kínai), azonban az eredmények kiértékelése **még most is fontos kutatási téma.**





## Konklúziók (folytatás)

- Az **FRA még eléggé „sebezhető”** eljárás. Szükség lenne egy kiértékelési algoritmusra, az „üzemzavar veszélyes” határértékre, stb.
- Jelenleg a főbb erőfeszítések az **FRA görbék korrekt kiértékelést** célozzák meg, hogy megfelelő hatékonysággal becsülhessük a trafótekercsek mechanikai állapotát.
- A **pontosabb diagnózishoz kombinálhatjuk** a spektrumgörbét, a korrelációs tényezőt, és az átlagos négyzetes eltérését különböző spektrum tartományokban (**kínai szabvány**).
- Jelenleg, a főbb erőfeszítések az **FRA görbék korrekt kiértékelést** célozzák meg, hogy **megfelelő hatékonysággal becsülhessük** a trafótekercsek mechanikai állapotát.

**Köszönöm a  
figyelmet!**

