



Polarizációs spektrummérések (RVM, FDS, PDC) alkalmazhatósága kábelek általános szigetelés állapotának becslésére

Csépes Gusztáv, Diagnostics Kft

XVII. Szigetelésdiagnosztikai Konferencia

Felsőtárkány, 2017. október 18-20.

Tartalomjegyzék

- 1. A téma aktualitása, az előadás célja**
- 2. Röviden a kábelek általános szigetelési állapot ellenőrzéséről**
- 3. Polarizációs spektrummérések: RVM, FDS, PDC**
- 4. RVM diagnosztika alkalmazása kábeleknél**
- 5. Konklúziók**

- **Téma aktualitása:** viszonylag új eljárások; klasszikus módszerekre **vannak szabványok**, utasítások, de a polarizációs spektrum mérésre igazán **nincs, csak tanulmányok; összetett szigetelési rendszer, romlás összetett változást okoz**, a polarizációs spektrum mérések ezt a „**bonyolult választ tükrözik**” (nem az eljárás bonyolult).
- **Az előadás célja:** felhívni a figyelmet spektrummérések **”igen nagy”** információtartalmára, **„korrekt kiértékelésre”**, a széleskörű alkalmazhatóságra (diagnosztika, élettartambecslés, stb.)
- **A cél:** rövid áttekintés a kábel szigetelésdiagnosztika speciális jellegéről, a polarizációs spektrummérések bemutatása, különös tekintettel az RVM mérésekre, az RVM diagnosztika kábeles használhatóságra és a **„korrekt kiértékelésre”**.

Általános bevezető jellegű megjegyzések

- **Jelentős számú az idős** korú kábelek száma.
- **Koruk miatt lecserélni** egyértelműen nem lenne gazdaságos.
- **Fontos:** kábelén végzett **diagnosztikai vizsgálatokkal** el lehessen dönteni, hogy a kábel **megfelelő általános állapotú**, vagy szükség van valamilyen tennivalóra, esetleg a teljes cserére.
- **További igény** lenne még a megbízhatóság, a hátralevő "**maradék**" élettartam ismerete is.
- **Még fontos lenne tudni**, hogy a **hiba helyi jellegű szigetelésromlás** vagy **általános romlásáról** van szó (előregedés, elnedvesedés).
- Az első esetben **érdemes javítani**, az utóbbiban nem, mert az **általános leromlás miatt keletkezett helyi hiba** kijavítása után hamarosan a következő **leggyengébb helyen alakul ki lokális hiba**.

- A megfelelő diagnosztika kiválasztásához ismerni kellene **a szakasz egyes kábeleinek szigetelését**: esetünkben a massa- ill. olajpapír (PILC) kábelek, extrudált kábelek: polietilén (PE (ROUNDAL), térhálós (Cross Linked Polyethylene=XLPE) polietilén használatosak.

Főbb középfeszültségű kábel szigetelőanyagok és várható élettartamuk

- Papír (PILC): Paper Insulated Lead Covered (1920-1980) 80 év
- Első generációs XLPE (1960-as és 1970-es évek) 20 év
- Második generációs XLPE (1980-as évek) 30 év
- Harmadik generációs XLPE (1990/2000-es évek) 40 év +?
- Magyarország: PE (ROUNDAL) kábel ? év

Kábelszigetelések és romlásuk

- A szigetelések (papír, extrudált) jellemzőinek kedvezőtlen irányú változásait **kémiai** (pl. **termikus öregedés**) vagy **fizikai** (pl. **nedvesedés**) jellegű romlási folyamatok idézik elő.
- A **cellulóz polimer** szerves vegyület, monomerekből, igen hosszú láncmolekulákból áll.
- Az üzemi igénybevételek hatására a láncmolekulák töredeznek, csökken a **papír polimerizációs foka**, másrészt a cellulóz molekulák bomlása következtében **víz molekulák**, majd oxidációs folyamatok közbejöttével **szerves savak** (karbonsavak) keletkeznek.
- A cellulóz **bomlása során keletkező víz ill. szerves sav** befolyásolják a papír villamos jellemzőit, a vezetési folyamat erősödik, szigetelési ellenállást csökken, **nagyidőállandójú** polarizációs folyamatok erőssége növekszik, **időállandójuk csökken**, stb.

- **Extrudált szigetelésű kábelek** alapanyaga polietilén (PE), vagy térhálósított PE (XLPE) esetleg polivinilklorid (PVC) lehet.
- **Mindhárom szénlánc alapú** szerves vegyület, azonban üzemi jellemzőik és öregedési tulajdonságaik **jelentősen különböznek a cellulóztól és egymástól is.**
- A **PVC szigetelés villamos** szilárdsága és fajlagos szigetelési ellenállása kicsi, veszteségi tényezője nagy.
- A **polietilén (PE) (pl. ROUNDAL)** szintén hosszú szénláncú szerves vegyület, öregedésében **két folyamat játszik jelentős szerepet: a hőigénybevétel okozta oxidáció következtében fellépő degradáció,** azaz molekulaszervezeti átalakulás, és a lassan kifejlődő részleges átütési csatornák megjelenése, azaz a **"treeing" folyamata.**

Általános állapotellenőrzésre használatos módszerek:

- szivárgási áram időbeli változása,
- szigetelési ellenállás mérése,
- abszorpció tényező mérése, polarizációs index,
- kisülési feszültség mérése,
- visszatérő feszültség mérése (RV),
- 50 Hz-es veszteségi tényező és kapacitás,
- kábelek feszültségpróbája,
- IRC (Isothermal Relaxation Current) analízis (KDA-1 IRC Unit)
- OWTS (vizsgálat oszcilláló feszültséggel) PD és tg,
- **Polarizációs spektrummérések: RVM, FDS, PDC**

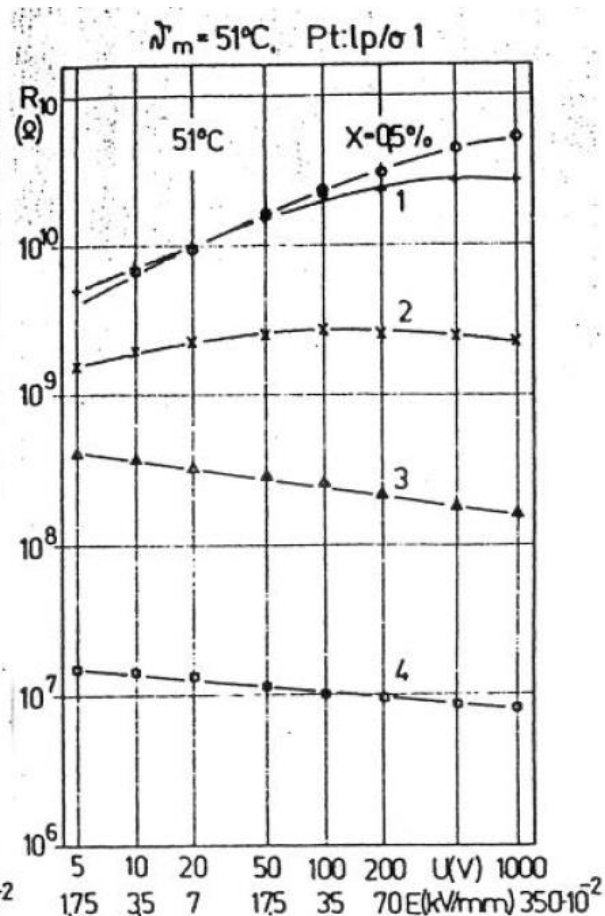
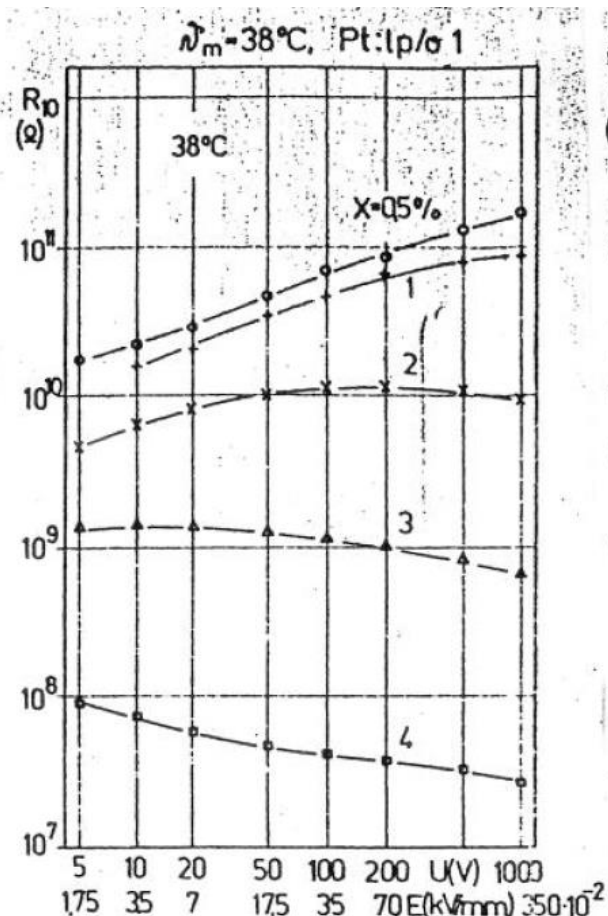
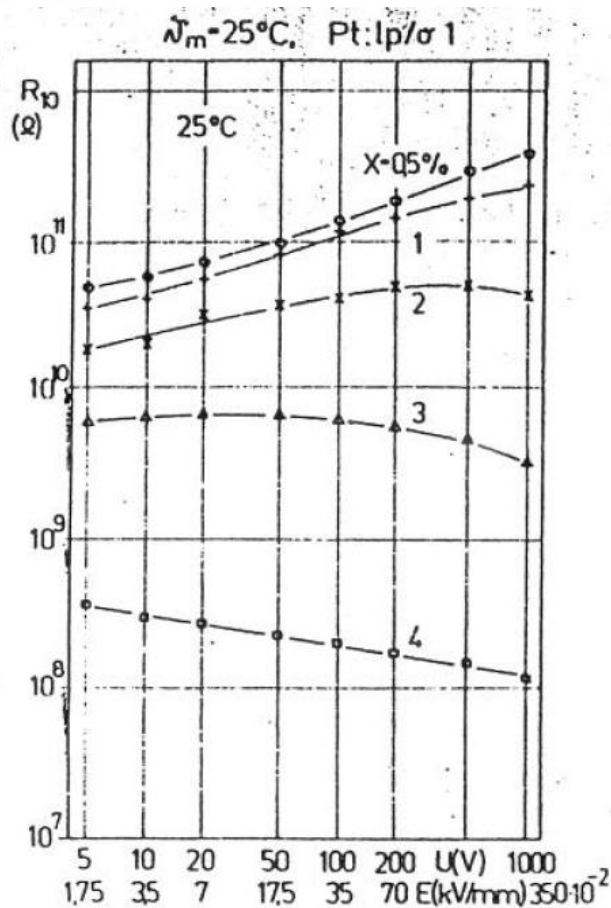
Magyar ismeretanyag a polarizációs spektrummérésekre

- **BME kutatás** az 1970-es években, de nemzetközileg is intenzív munka folyt új diagnosztikai módszerek keresésében.
- **Kitűzött cél:** olaj-papír szigetelés elnedvesedés és öregedés vizsgálata.
- A munkát az **MVMT-OTUSZ** ellenőrizte, a NIM-OMFB-MVMT finanszírozta, a kutatást **Dr. Csernátorny-Hoffer András** irányította.
- Főbb résztvevő intézetek: BME NTT, BME Kémiai Technológia Tanszék, VKI, VEIKI, MÁFKI, MTA, OVIT, ELMÜ, Ganz, stb.



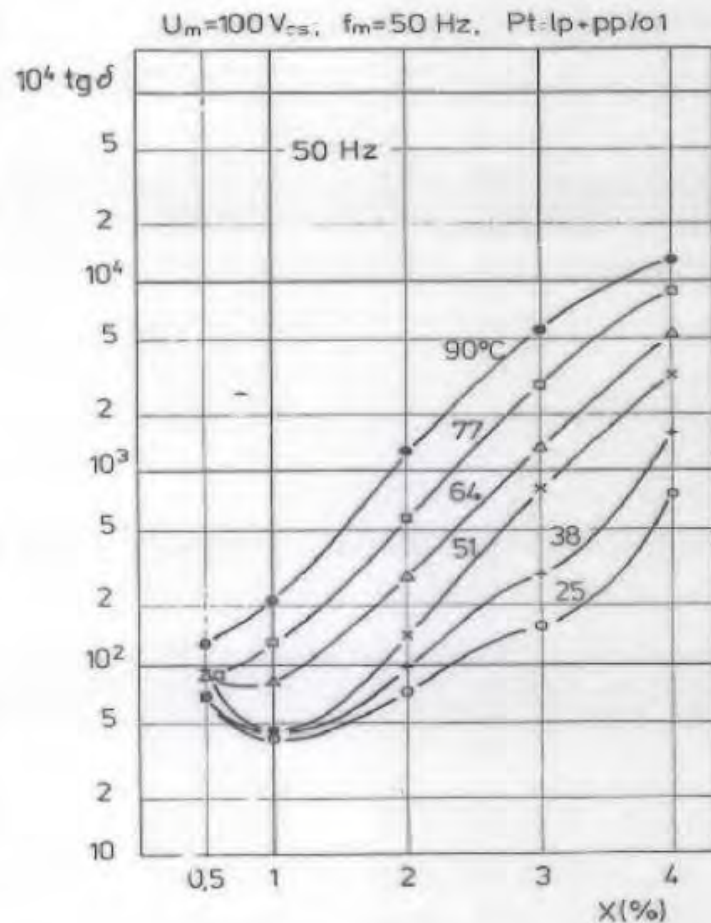
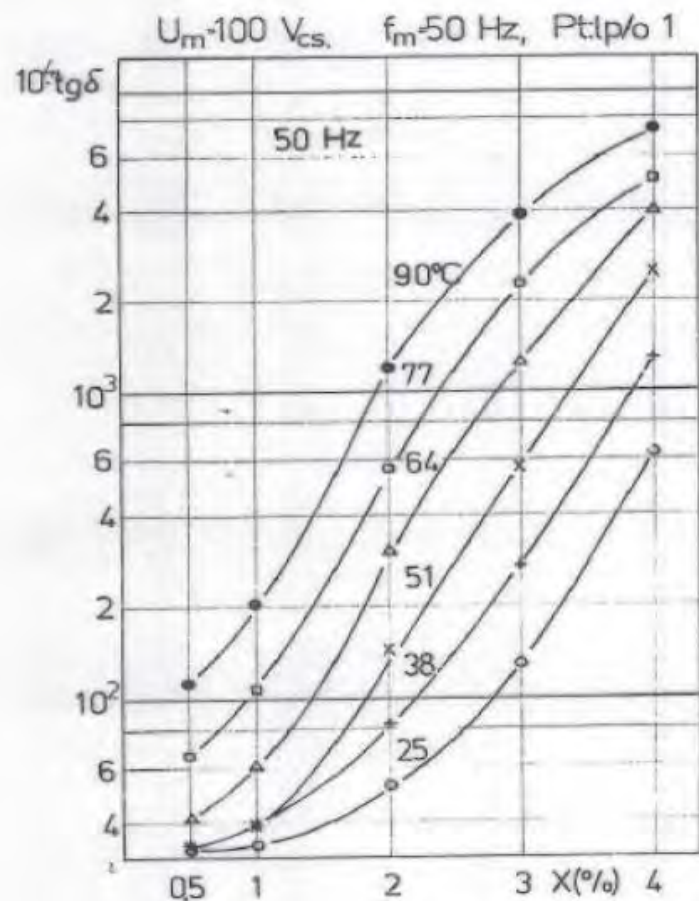
10 perces szigetelési ellenállás mérése:

R10: (U/I hányados), R10(U;T;X) jelentése: 10 perces ellenállás a feszültség (U), hőmérséklet (T) és a papír víztartalma (X) függvényében.

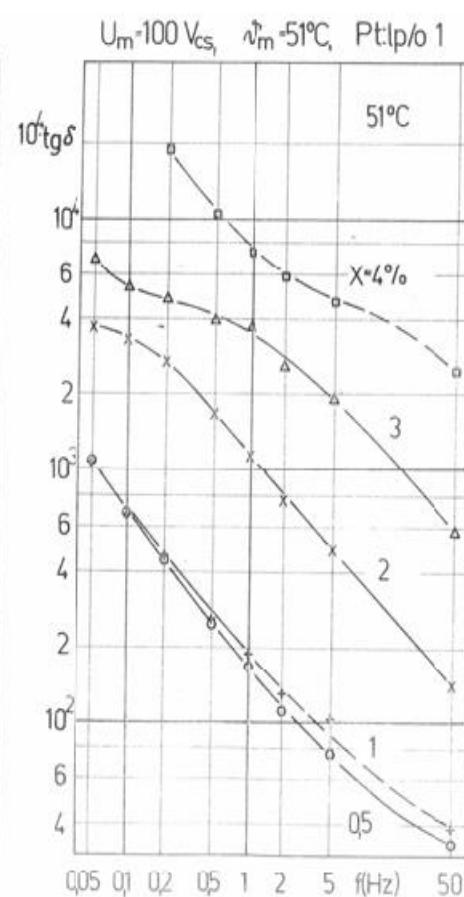
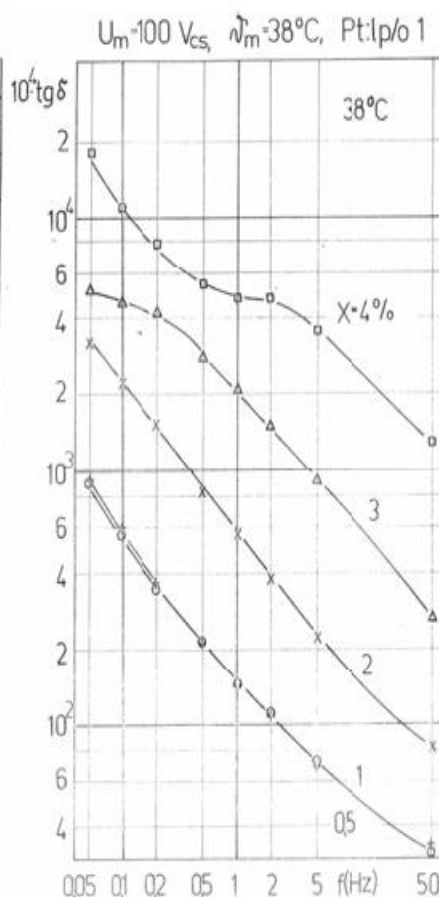
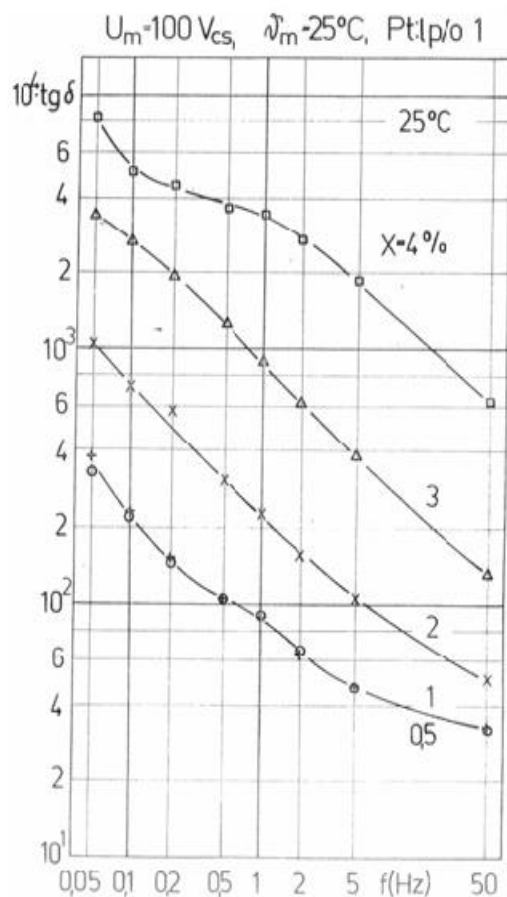


$\text{tg}\delta_{50\text{Hz}}$: dielektromos veszteségi tényező 50Hz-en:

$10^4 \text{tg}\delta(U;T;X)$ jelentése $\text{tg}\delta_{50\text{Hz}}$ mérése a feszültség (U), hőmérséklet (T) és a papír víztartalma (X) függvényében.

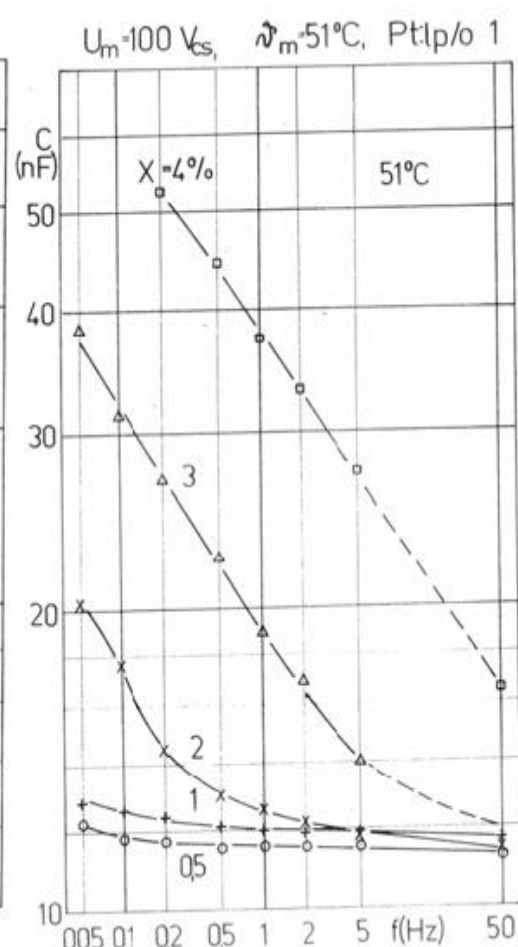
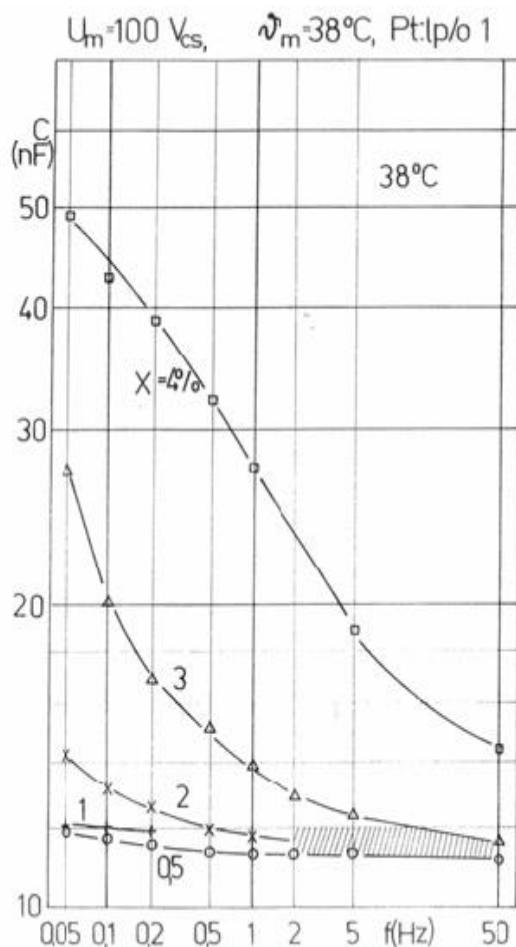
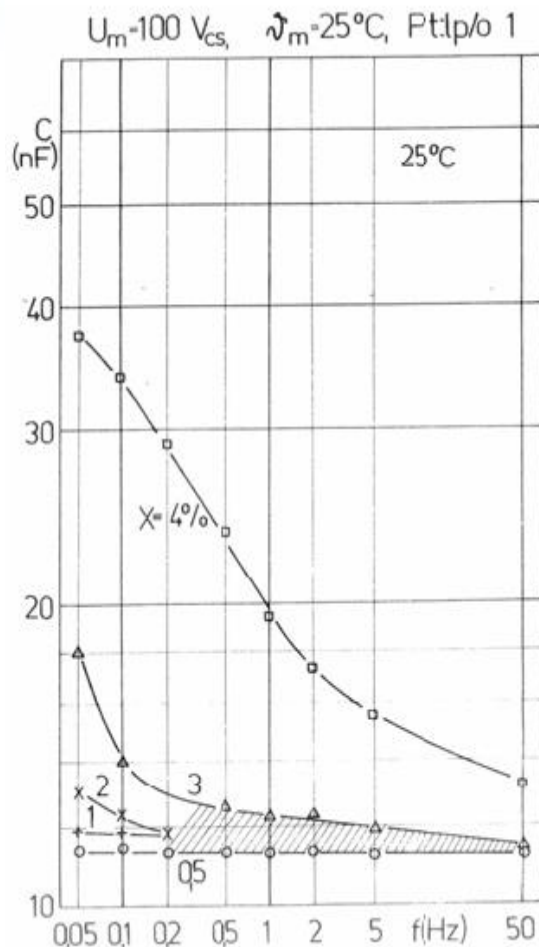


tgδ: dielektromos veszteségi tényező állandó feszültségen mérve:
tgδ(f;T;X) jelentése: mérés a frekvencia (f), hőmérséklet (T) és a papír víztartalmának (X) függvényében.



C: kapacitás állandó feszültségen mérve:

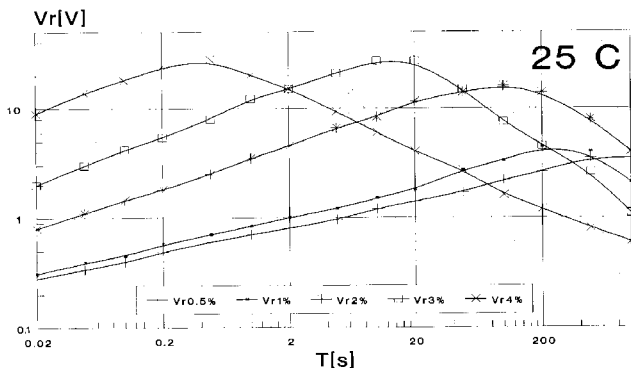
$C(f;T;X)$ jelentése: mérés a frekvencia (f), hőmérséklet (T) és a papír víztartalmának (X) függvényében.



Visszatérő feszültség maximum értéke:

$U_{R\max}(t_c/t_D; T; X;)$ jelentése: U_v mérése töltési/kisütési idő (t_c/t_D), hőmérséklet (T) és a víztartalom (X) függvényében

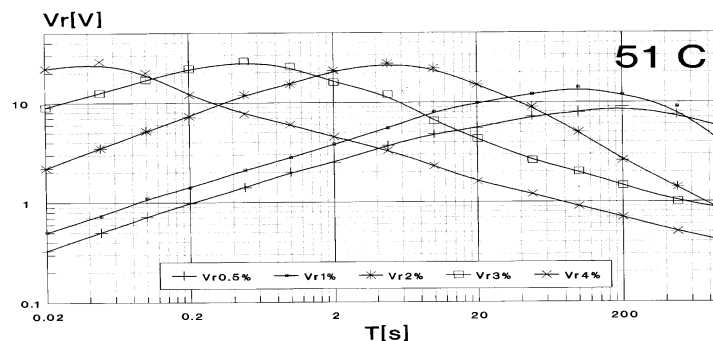
RETURN VOLTAGE - PAPER/OIL INSULATION
Pt:lp/01 NEW STATE PAPER/OIL INSULATION
Um=250 V TEMPERATURE: 25 C



HUMIDITY CONTENT: X= 0.5 - 4 %

Figure 10.

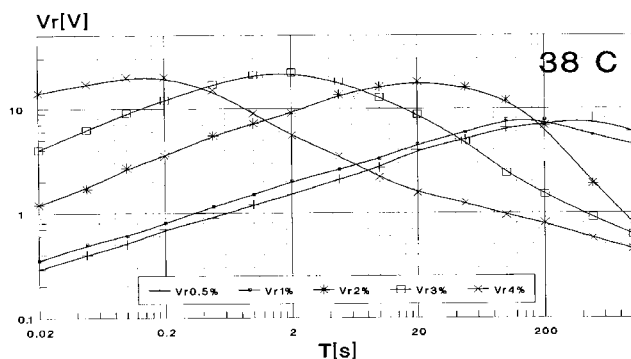
RETURN VOLTAGE - PAPER/OIL INSULATION
Pt:lp/01 NEW STATE PAPER/OIL INSULATION
Um=250 V TEMPERATURE: 51 C



HUMIDITY CONTENT: X=0.5 - 4 %

Figure 12.

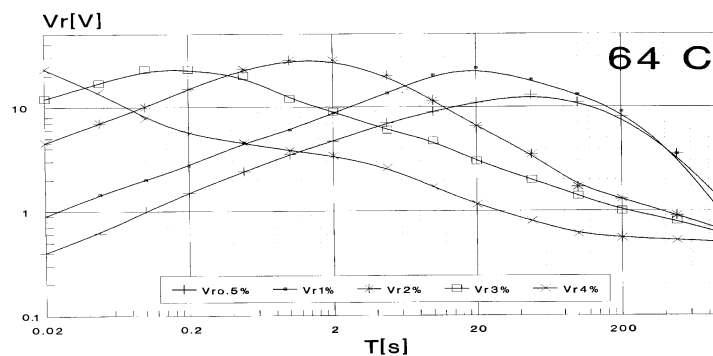
RETURN VOLTAGE - PAPER/OIL INSULATION
Pt:lp/01 NEW STATE PAPER/OIL INSULATION
Um=250 V TEMPERATURE: 38 C



HUMIDITY CONTENT: X= 0.5 - 4 %

Figure 11.

RETURN VOLTAGE - PAPER/OIL INSULATION
Pt:lp/01 NEW STATE PAPER/OIL INSULATION
Um=250 V TEMPERATURE: 64 C

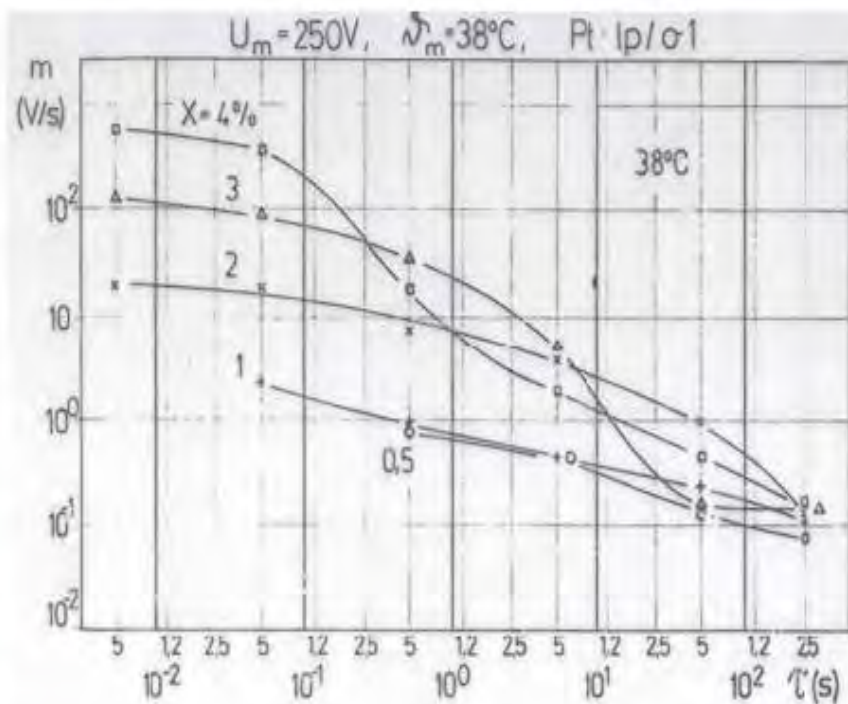
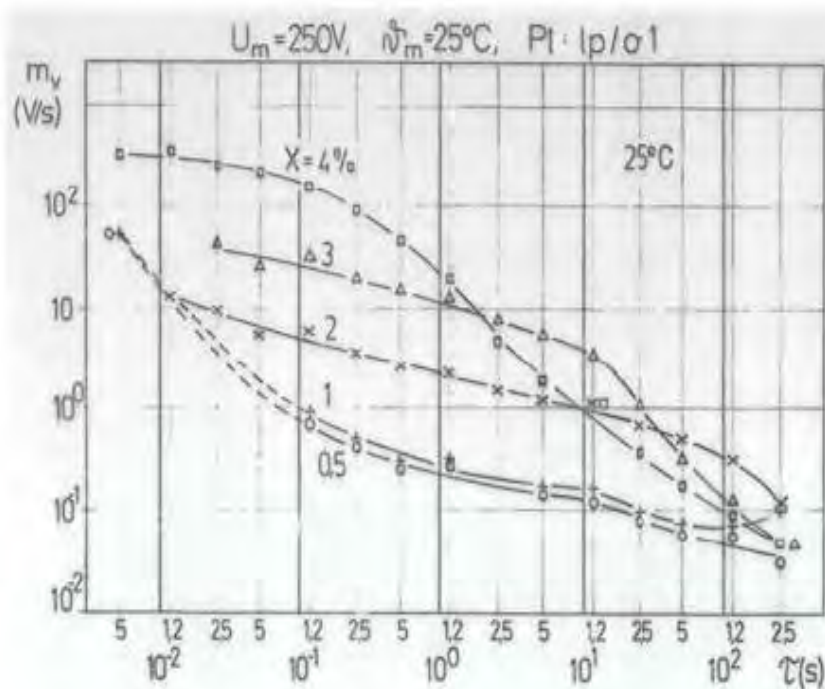


HUMIDITY CONTENT: X= 0.5 - 4 %

Figure 13.

Visszatérő feszültség kezdeti meredekségének mérése:

$S_R(t_C/t_D; T; X)$ jelentése: S_r mérése a töltési/kisütési idő (t_C/t_D), hőmérséklet (T) és a nedvességtartalom (X) függvényében.

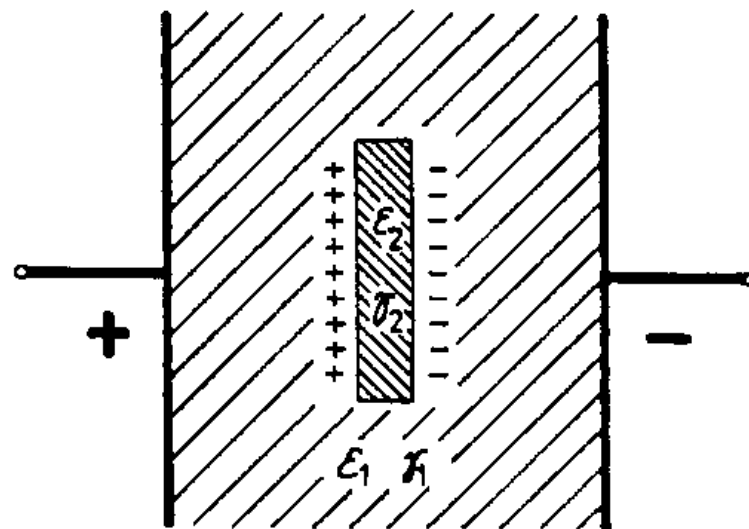
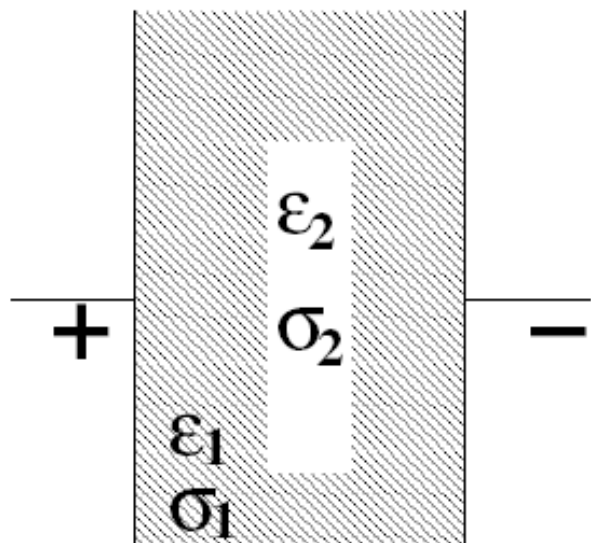


Polarizáció fajták és a hozzá tartozó időállandók

polarizáció fajták	időállandó (s)
elektron eltolódási polarizáció	$10^{-16} - 10^{-14}$
ion eltolódási polarizáció	$10^{-12} - 10^{-13}$
rugalmas orientációjú dipólus polarizáció	$10^{-10} - 10^{-12}$
hőmérsékleti orientációs polarizáció	$10^{-6} - 10^{-10}$
ionvándorlási polarizáció	$10^{-2} - 10^{-5}$
határréteg polarizáció	$10^{-2} - 10^4$

Határréteg polarizáció

- Határréteg polarizáció akkor alakul ki, amikor a rétegezett szigetelőanyag **különböző „arányú” permittivitással és fajlagos vezetőképességgel** rendelkezik, ill. ha nem teljesül az alábbi egyenlőség: $\epsilon_1 \sigma_2 = \epsilon_2 \sigma_1$
- Ez az összefüggés ritkán teljesül, az olaj-papíros szigetelésnél **nem**, ezért a határfelületi vezetési folyamatban odaszállított töltések felhalmozódnak és ez **képez dipólust**, vagyis **polarizációt**. A polarizáció **időállandója** nagy, a $10^{-2} - 10^{+4}$ s.

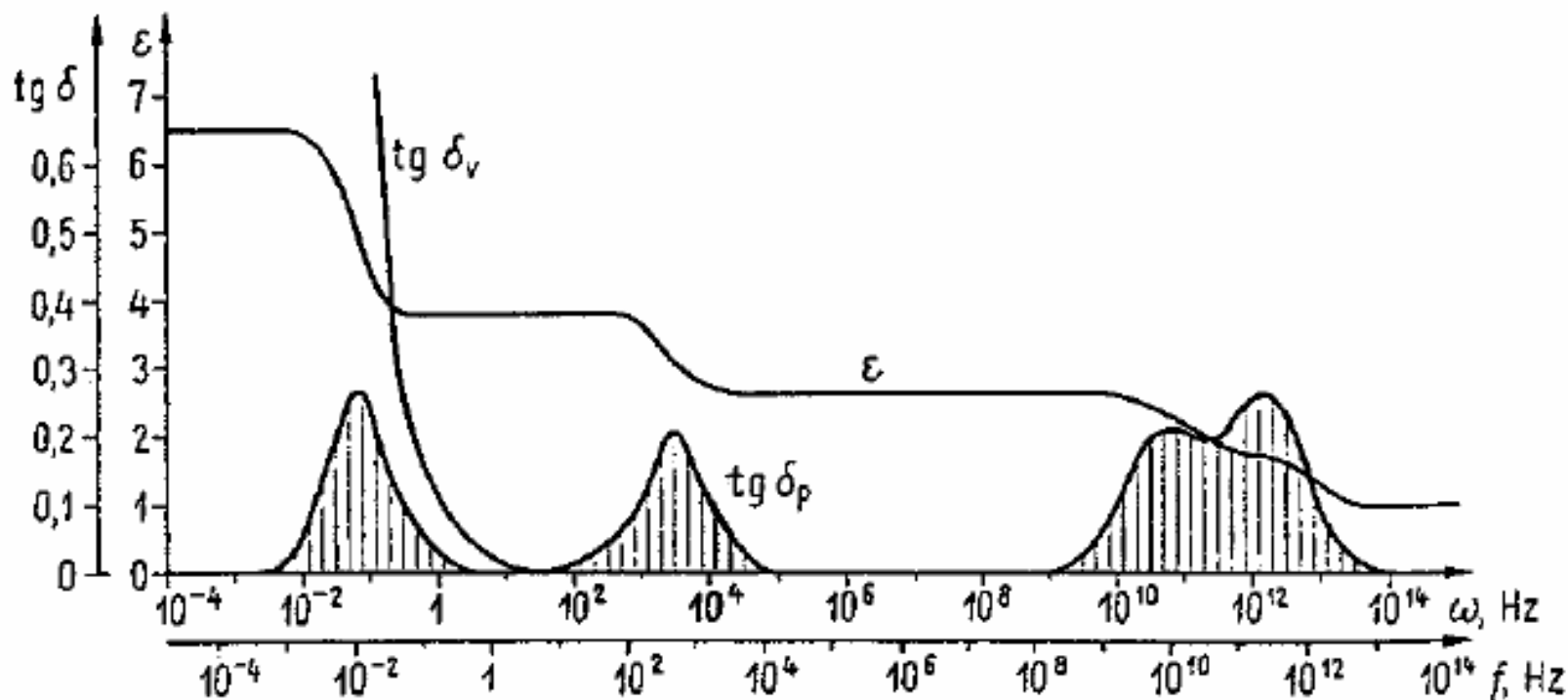


Miért hatékony(abb) a polarizációs spektrummérés?

- Romlás hatására az eredetileg **homogén anyag inhomogén lesz.**
- A romlás megváltoztatja az **anyag szerkezetét**, ezzel a **polarizációt**, így a polarizációval **jól diagnosztizálható a szigetelés.**
- Az inhomogén szigetelőanyag már **nem jellemezhető egyetlen jellemzővel** (hagyományos módszerek), **de spektrummal igen.**
- Jellemzésükre az **időállandójuk és az intenzitásuk** használható.
- Adott időállandójú (**kritikus frekvenciájú**) polarizáció csak **saját időállandójával történő gerjesztés esetén termel veszteséget.**
- A **polarizációs veszteségek hatására helyi túlmelegedés**, majd az elégtelen hővezetés miatt akár közvetlen **hő-villamos átütés.**
- Esetünkben az **50Hz-es értékhez tartozó tgδ érték a fontos**, hogy üzem alatt mekkora hő termelődik a szigetelésben.
- **Ha beindul a buborék képződés, akkor átütés lehet a folyamat vége.**

PI: Három különböző időállandójú polarizációval rendelkező spektrum

- Az egyes polarizáció fajták intenzitásának **eredőjeként** áll elő az eredő tg delta.
- **Csak az 50Hz-es veszteségi tényező mérése** önmagában nem elegendő, ismerni kell a spektrum további részeit, hogy hőmérséklet változás esetén tudjuk, hogy mekkora veszteségi teljesítmény változás várható. **Laboratóriumi alpmérések szükségesek!**
- Kritikus frekinél „jellegzetesen” változik a tg és ε : $\text{tg}\delta = \text{tg}\delta_v + \text{tg}\delta_p (= \varepsilon'')$ és $C = \varepsilon$, ill. ε' .



CIGRE WG Technical Brochure polarizációs spektrum mérésekre (2004)

254

Dielectric Response Methods for Diagnostics of Power Transformers

Report of the TF D1.01.09

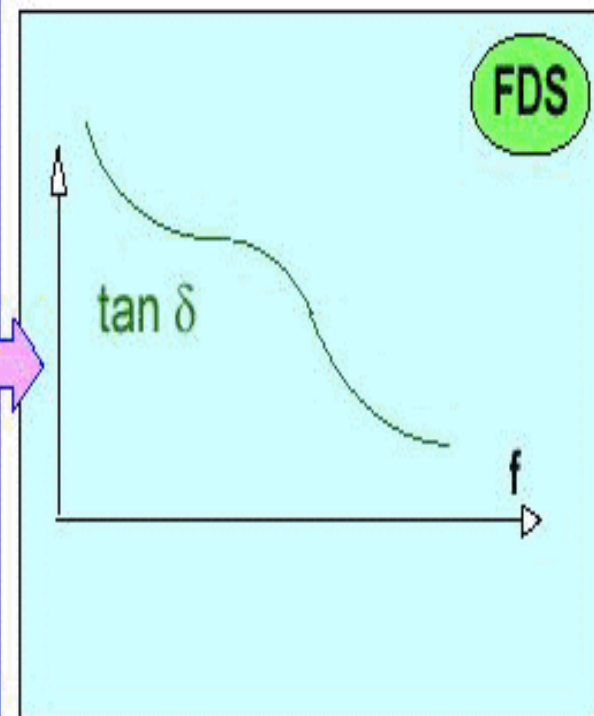
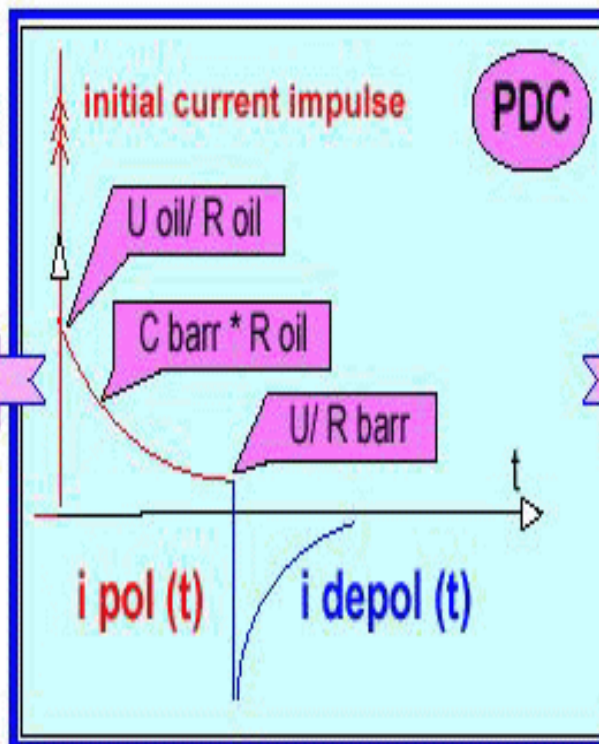
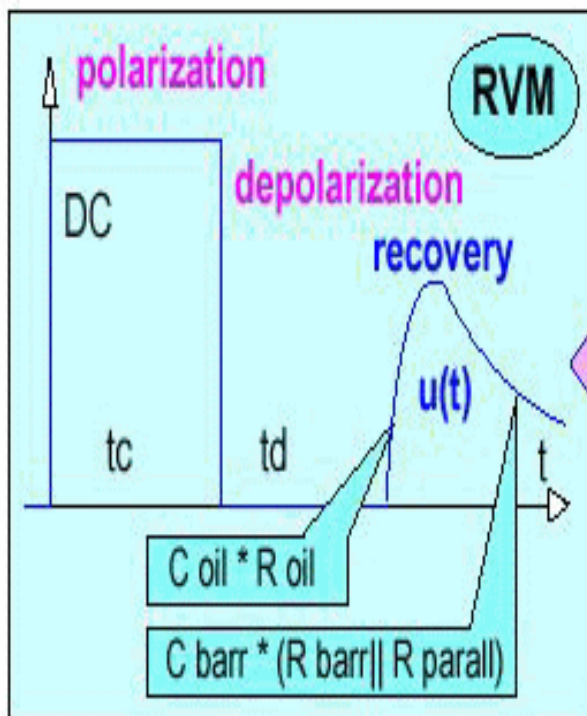
Task Force members:

S.M. Gubanski (chair), P. Boss, G. Csépes, V.
Der Houhanessian, J. Filippini, P. Guuinic,
U. Gäfvert, V. Karius, J. Lapworth, G. Urbani,
P. Werelius, W. Zaengl.

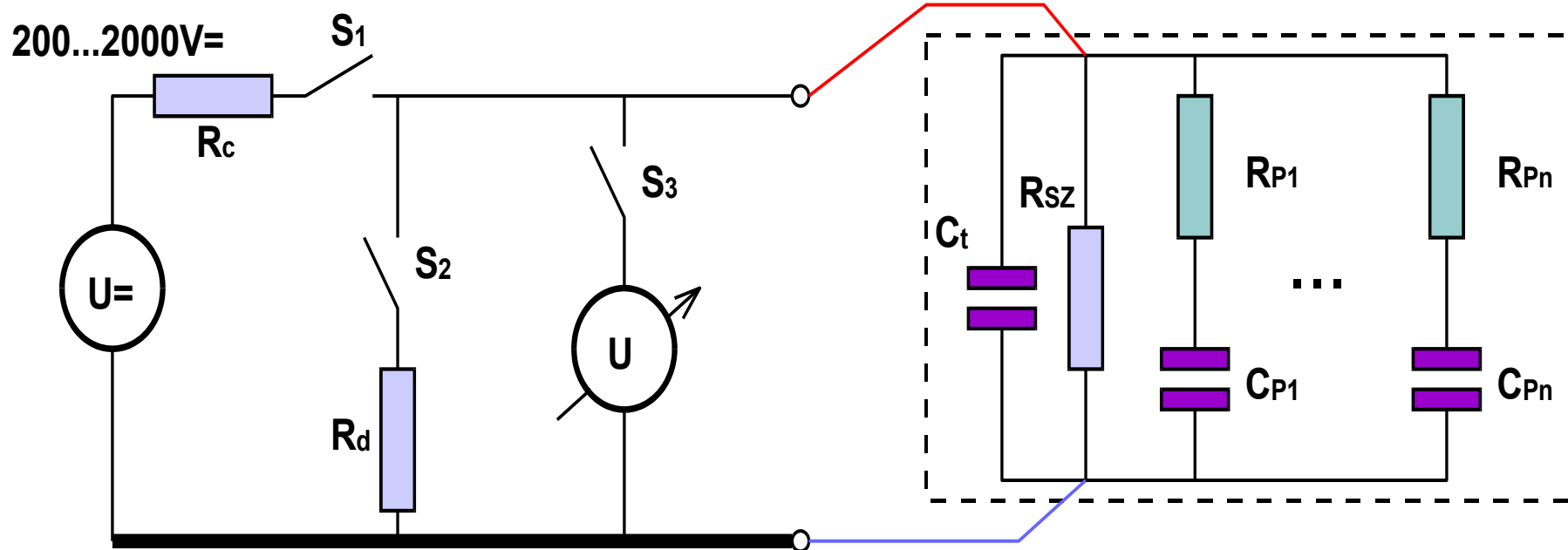
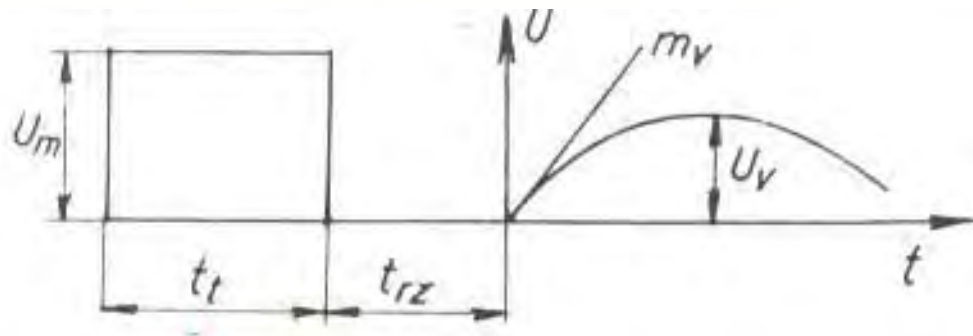
Polarizációs spektrum módszerek: három módszer nagyidőállandós spektrumok vizsgálatára

time domain analysis

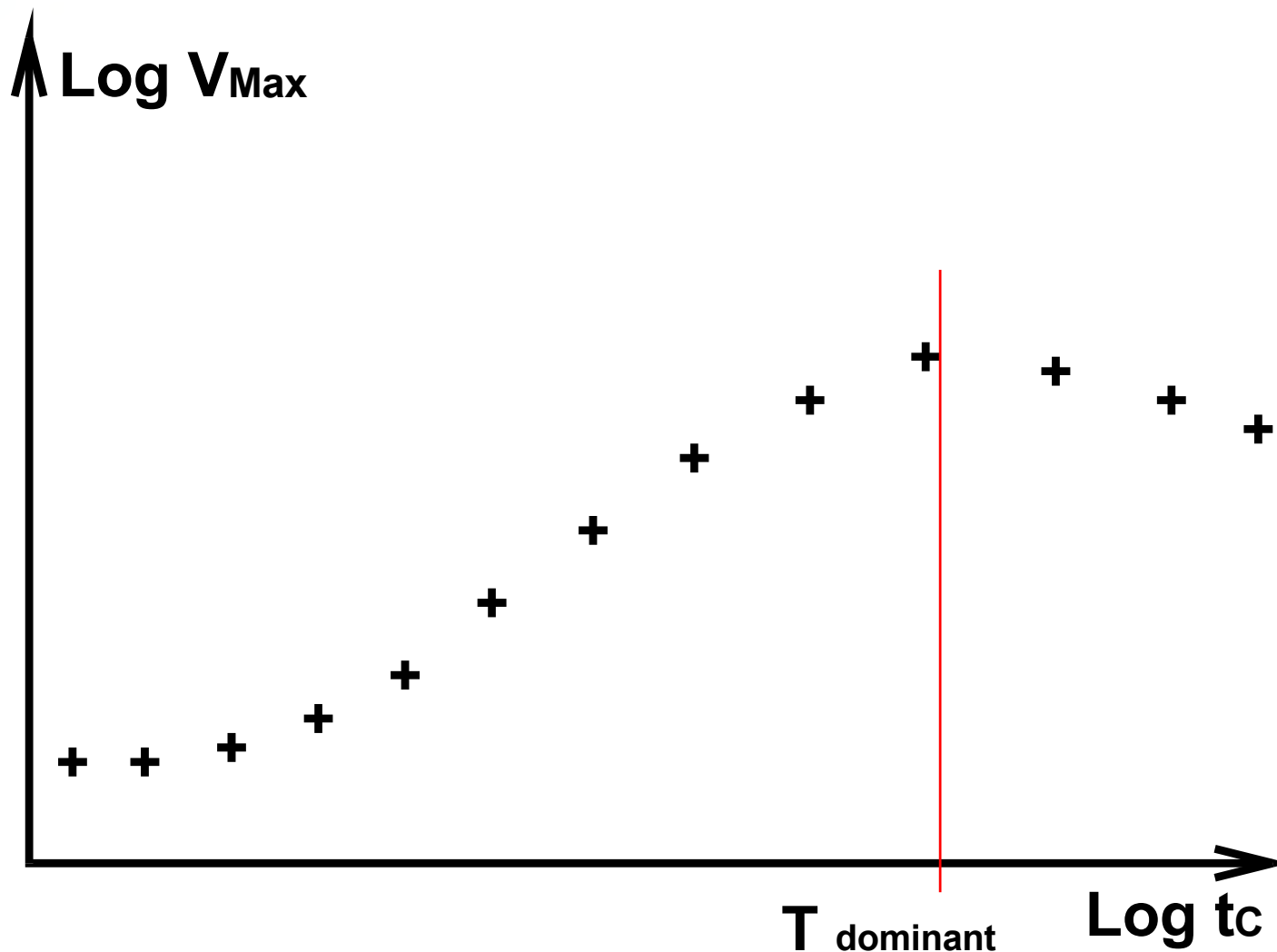
frequency domain analysis



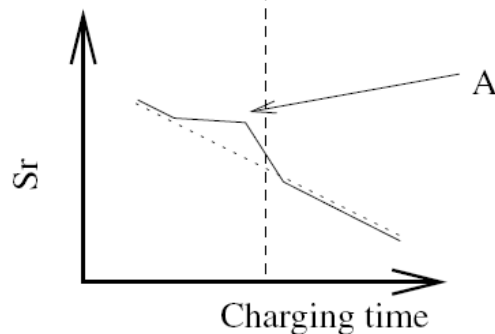
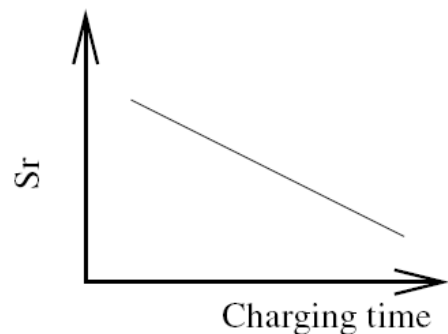
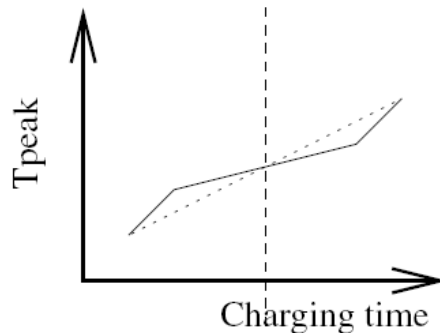
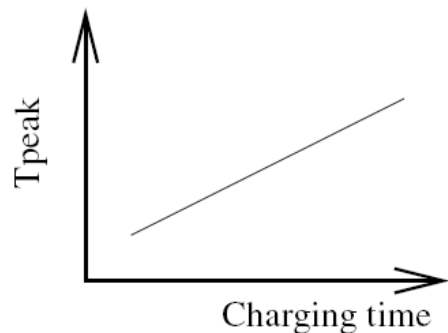
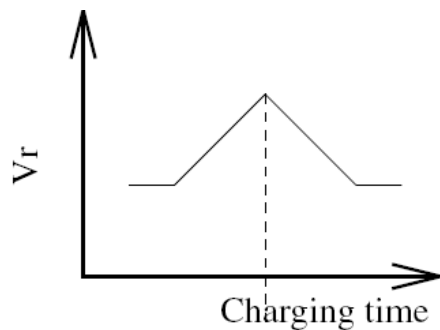
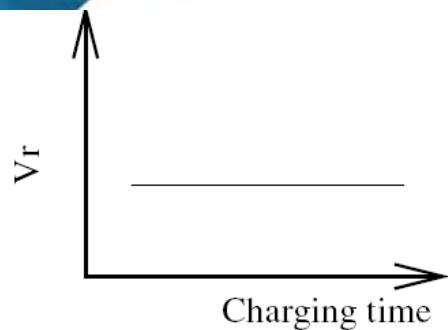
RVM mérés sematikus ábrája és egyszerűsített áramköre



A visszatérő feszültség csúcsértékének a töltési t_c idő, mint időállandó függvényében történő felrajzolása: RVM spektrum



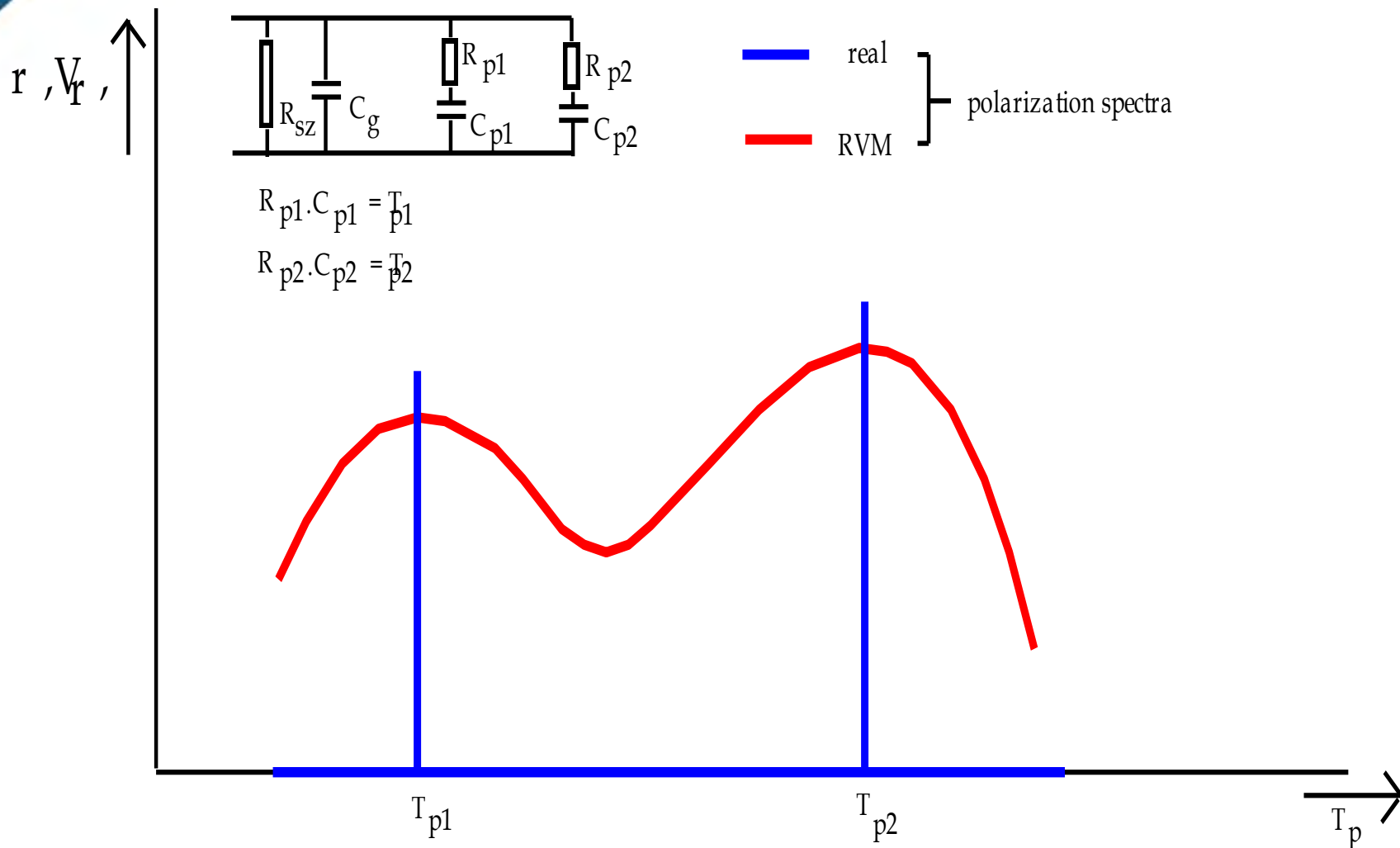
Elméleti RVM spektrum típusok



A vizsgált tartományban állandó, ill. egy időállandós polarizáció RVM technikával mért spektrumgörbéi

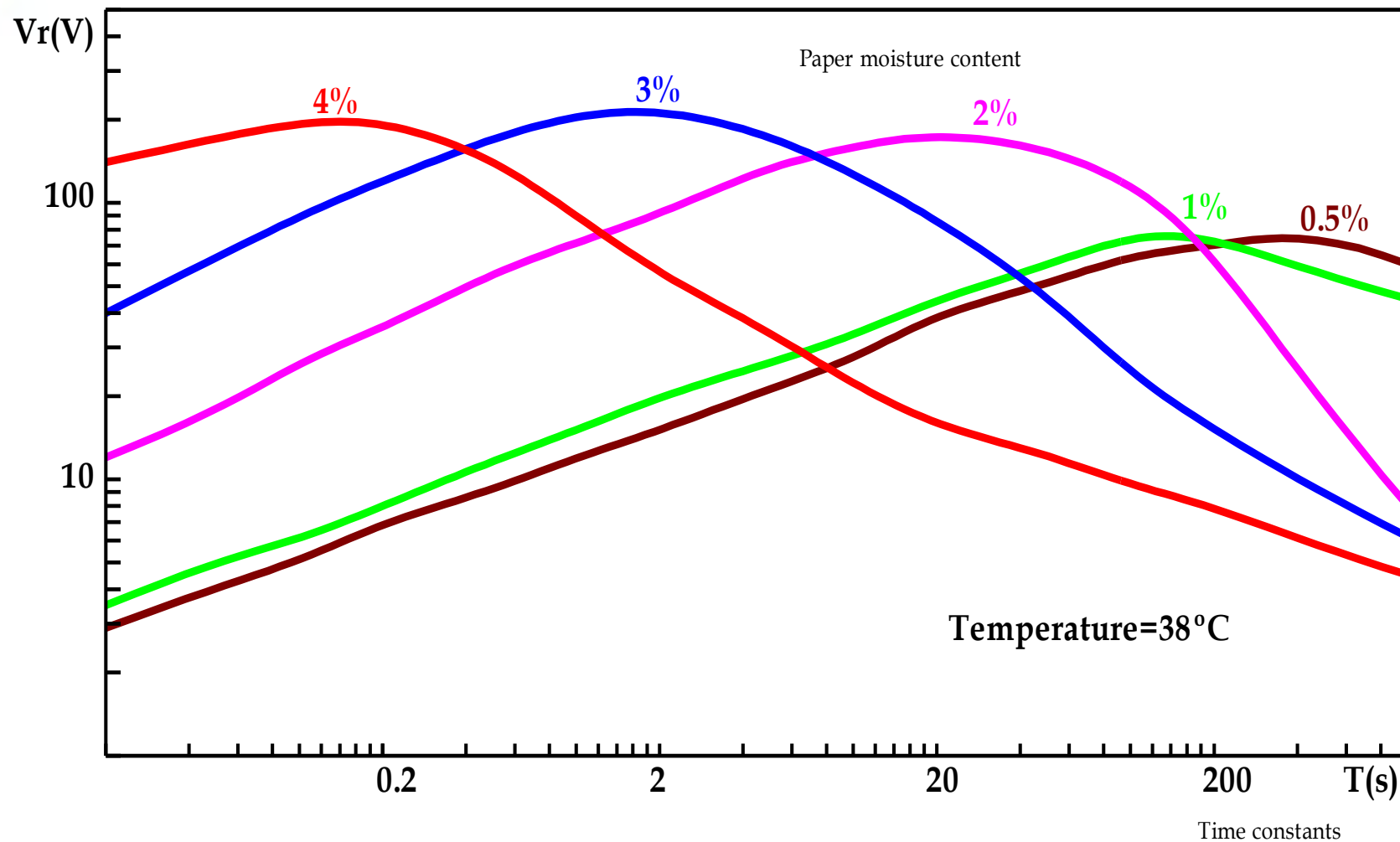
$$\beta = \frac{\alpha}{T}$$

Igazi spektrum és az RVM „kvázi” spektruma két időállandó esetén



38°C mérési hőmérsékleten mért RVM görbék

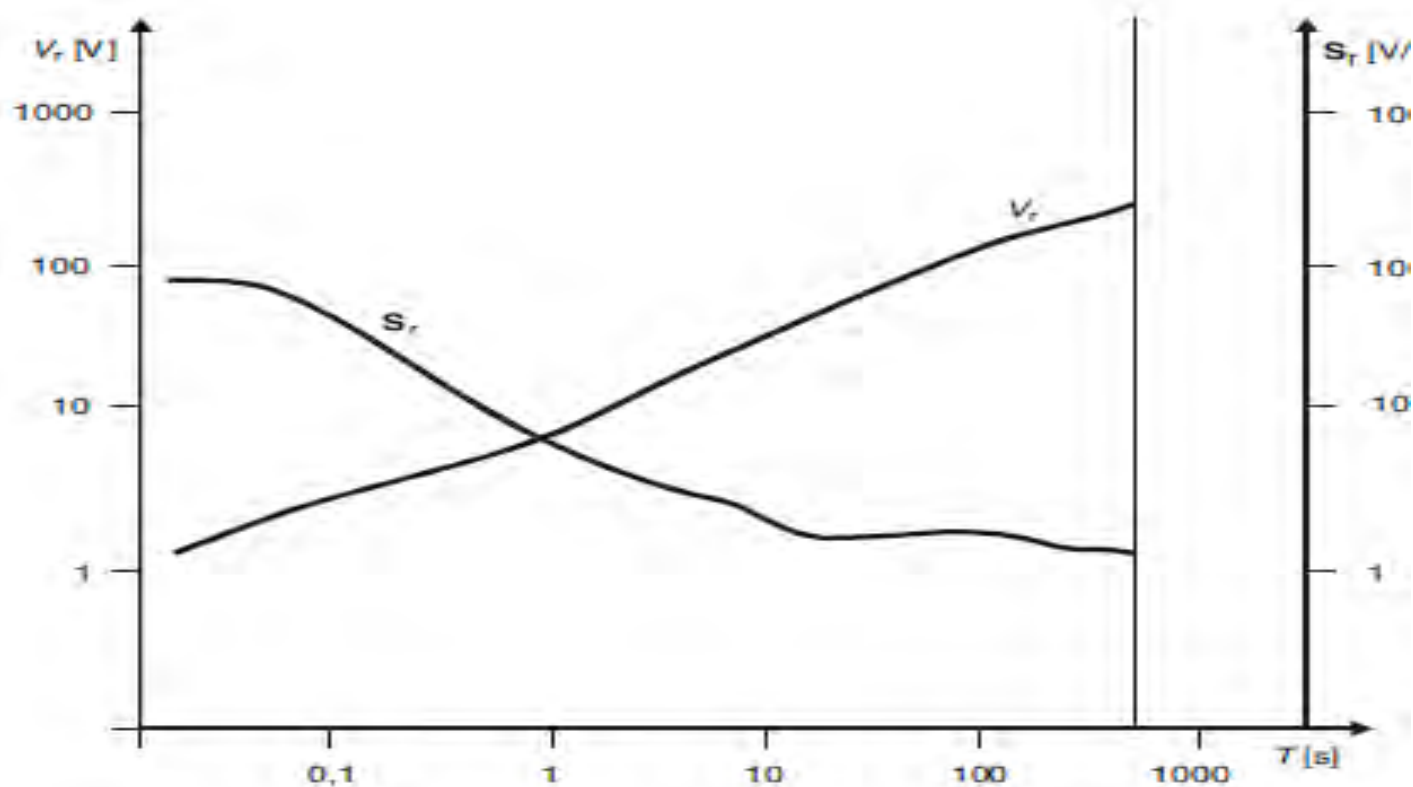
Curves, derived from the maxima of the return voltages



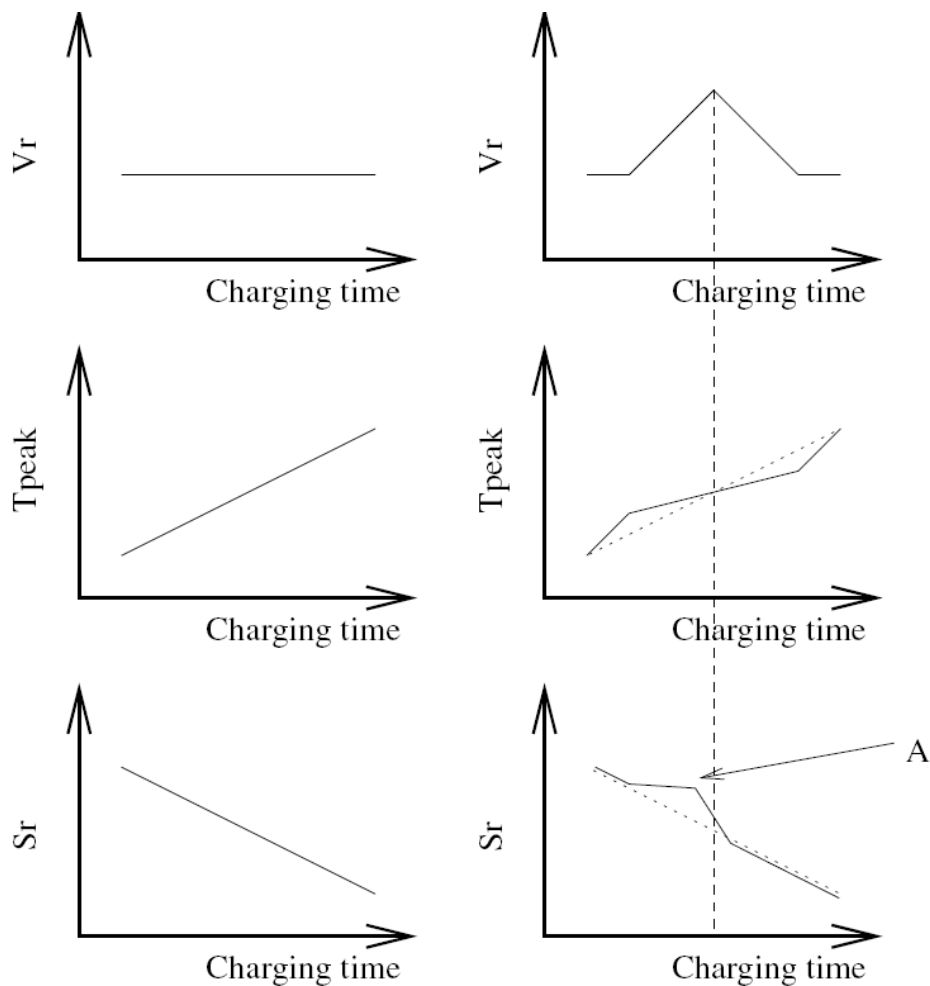
Kábeles RVM kiértékelési esettanulmányok

„Újszerű” kábelszakasz RVM görbéi (V_r és S_r)

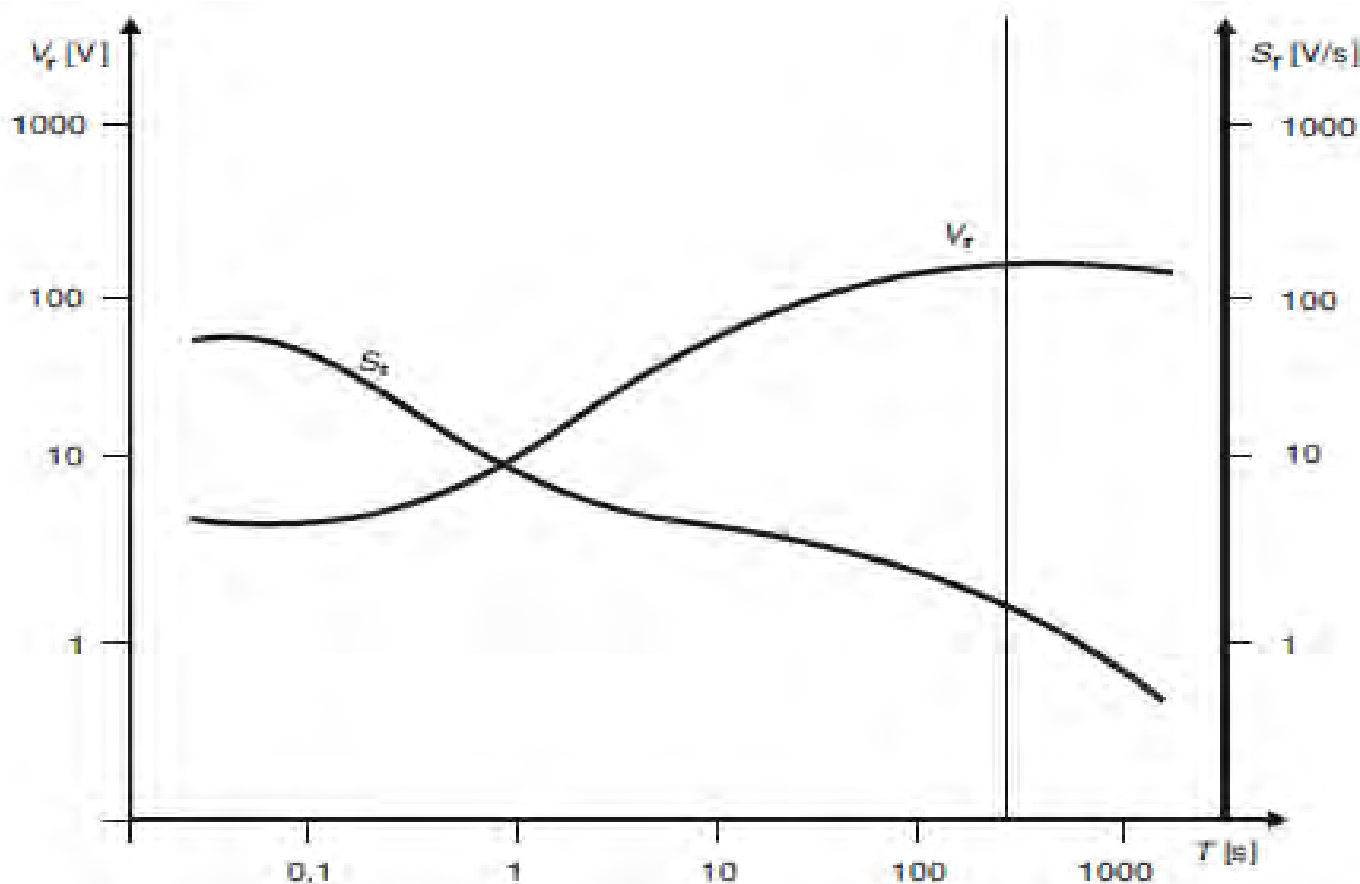
- A kurzor a domináns időállandó helyét jelzi.
- Új, száraz papírszigetelés domináns időállandója általában 20 °C-on 2000 s vagy annál nagyobb. Jó állapotú XLPE kábelnél 5000s vagy nagyobb.
- Egy időállandó (1000 s), homogén, tehát jó állapot.



A teljes vizsgált tartományban állandó, ill. egy időállandós polarizáció RVM technikával mért spektrumai

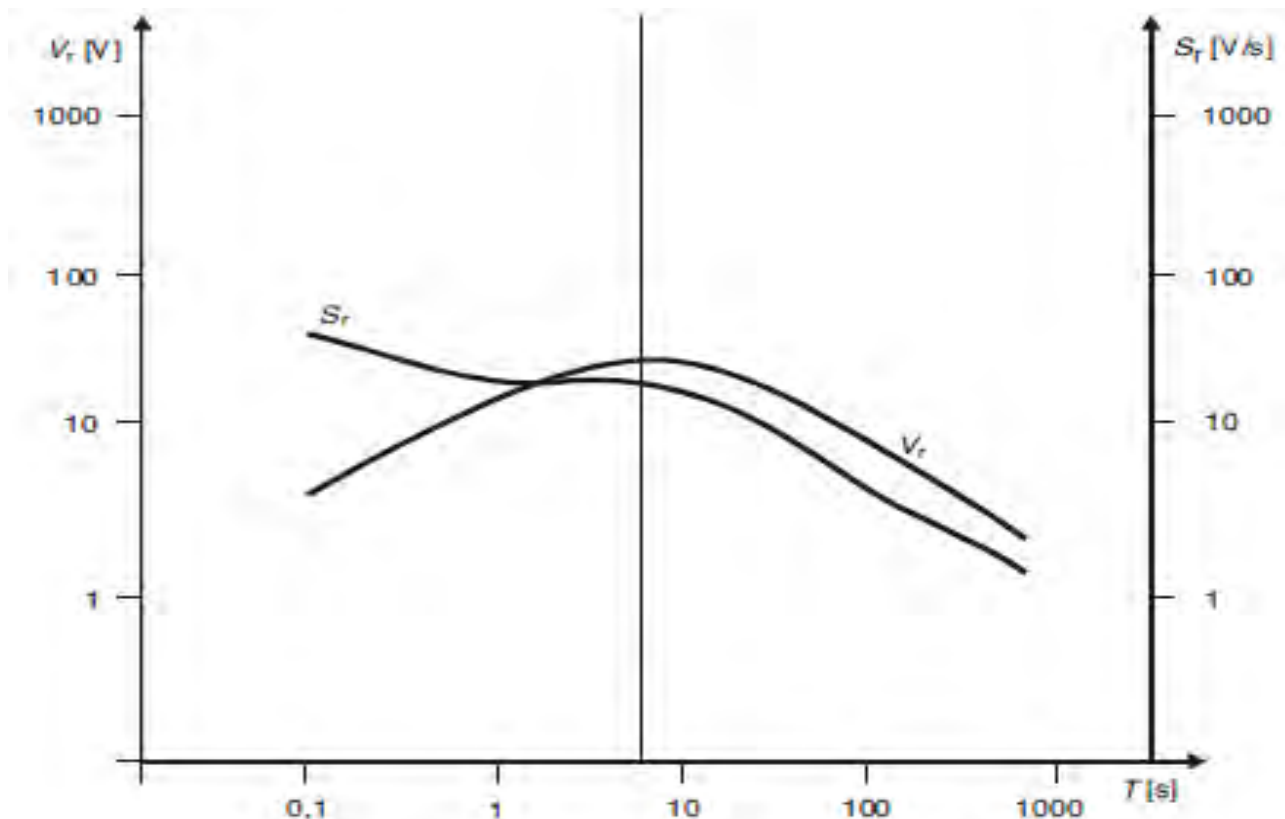


Nem új, de jó közepes állapotú, 10kV-os kábelszakasz RVM görbéi
Enyhén inhomogén, folytonos eloszlású spektrum, de a legrosszabb rész is 10 s vagy nagyobb időállandóval rendelkezik.



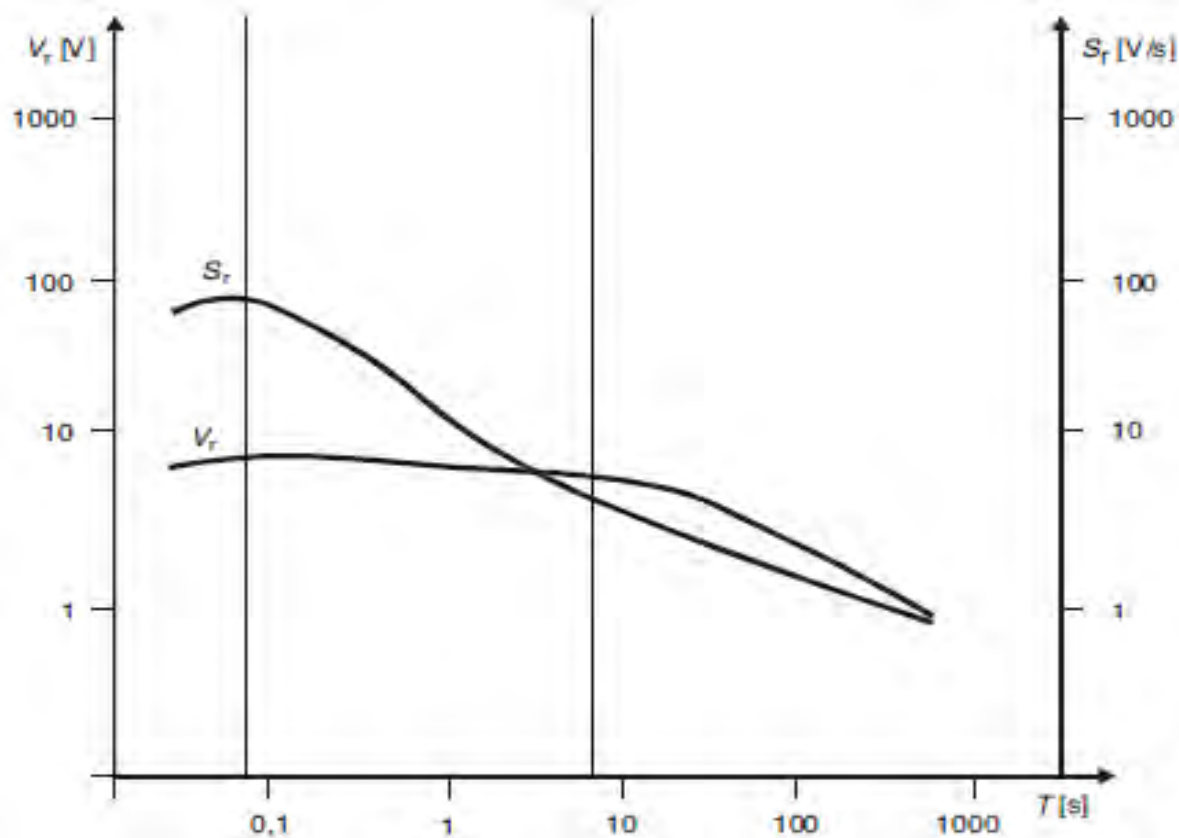
Közepes vagy annál rosszabb állapotú 10 kV-os kábel RVM görbéi

A spektrum kb. 8-10 s-os domináns időállandó keskeny környezetében „oszlik el”, a leágazást ez az időállandóval jellemzi, a kábel általános állapota közepes, vagy annál rosszabb.



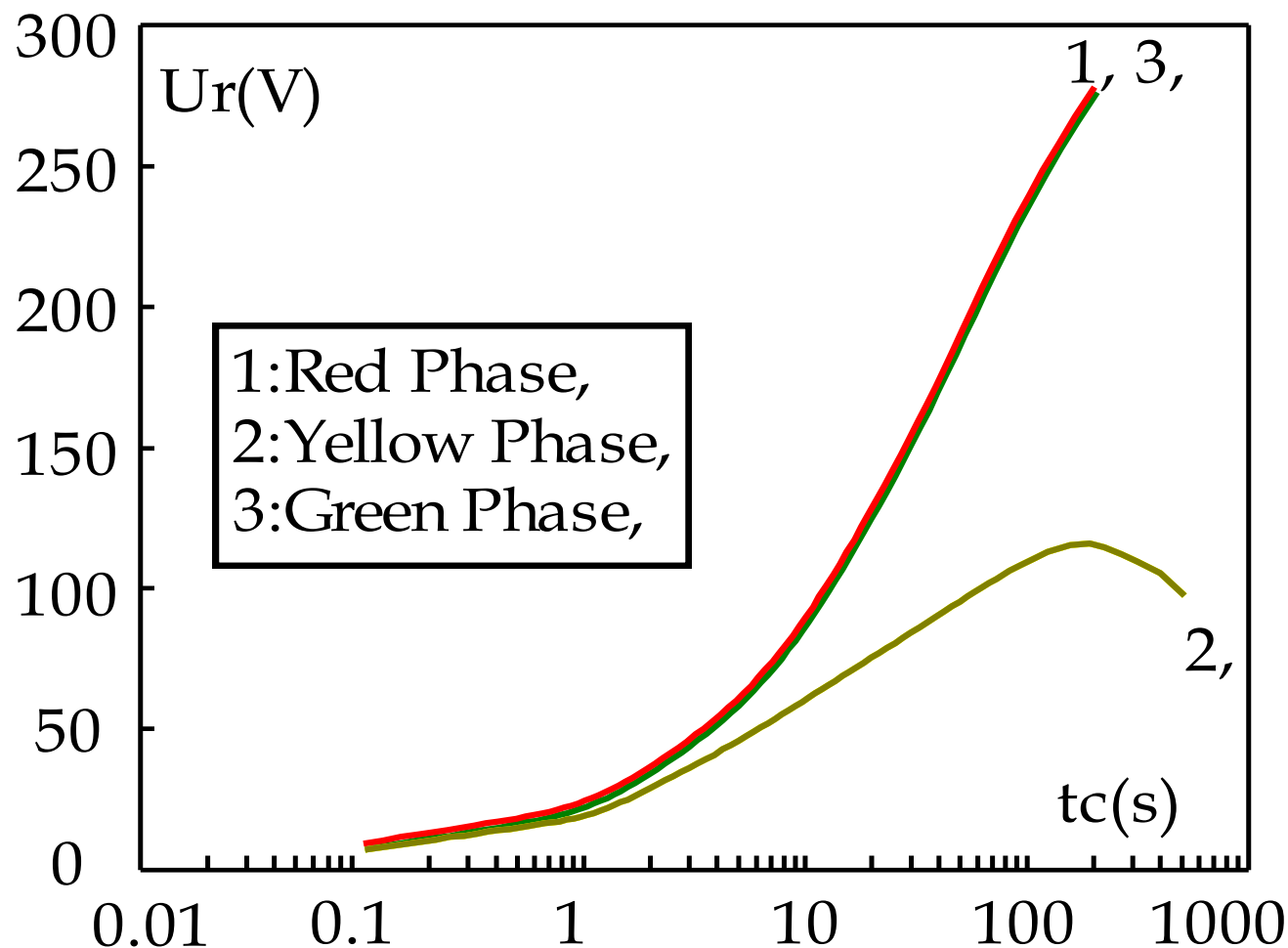
Nagyon rossz állapotú kábel RVM spektrumgörbéi

Lényegében két időállandó környezetében oszlik el a polarizáció, mindkettő értéke elég kicsi. A kisebbik 0,1 s körüli (papír esetén kb. 5% egyenértékű víztartalom). Ez lehetne 20°C-on a rossz állapotra vonatkozó határérték. Ha ilyen állapotba kerül a szigetelés, akkor 20°C felett is átütés valószínű (mérés után kb. két héttel átütés).

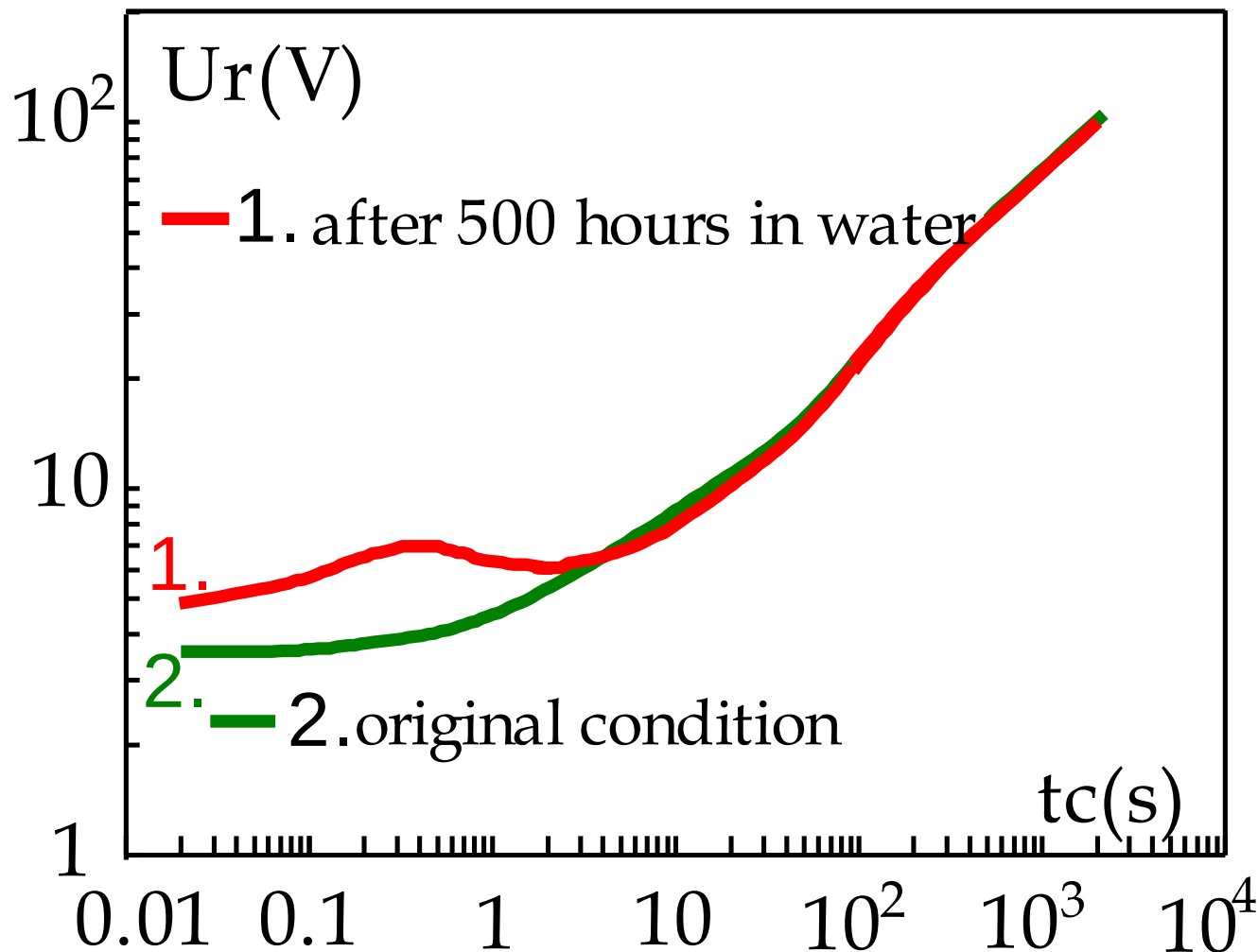


Kábelek RVM mérése: a három fázis közül az egyik (2) rossz (log-lin skálázás)

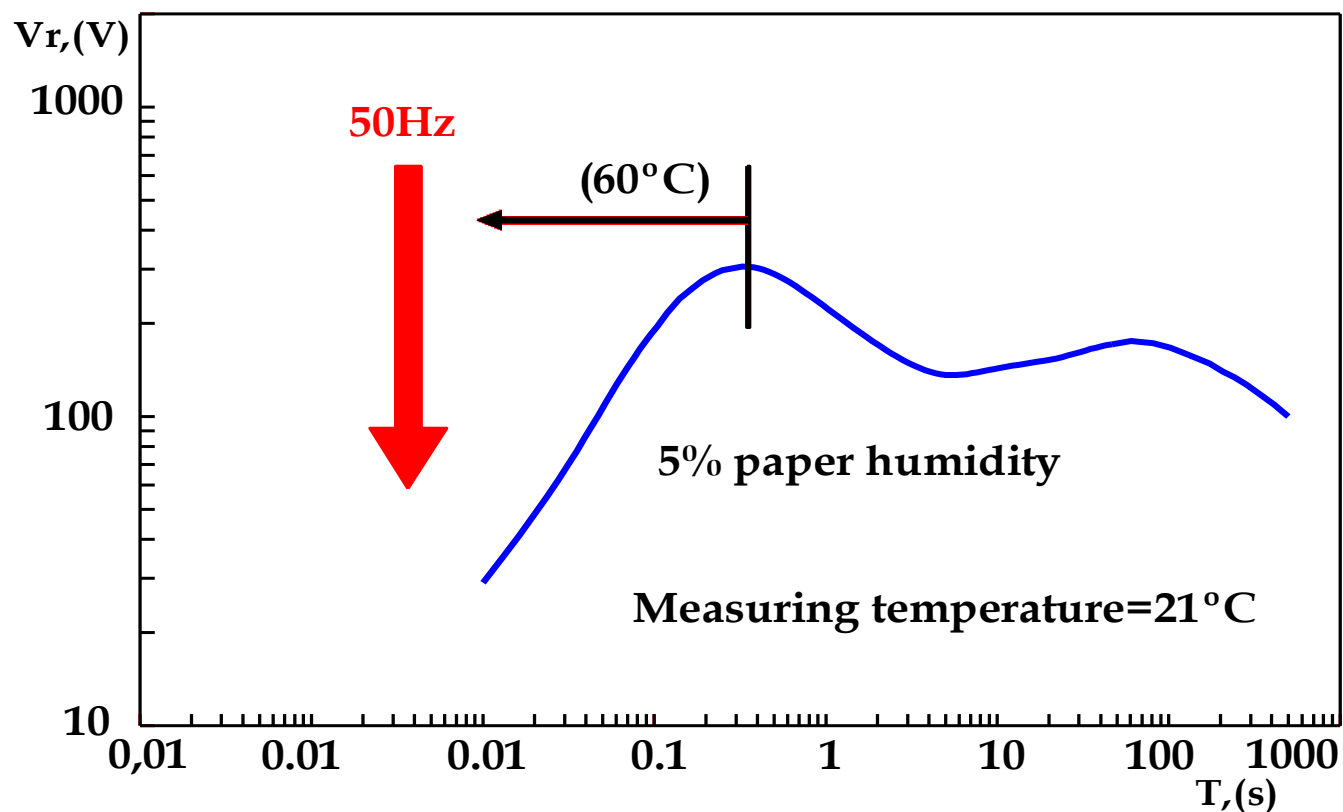
Egy hárommerű érköpenyes kábelekből álló kábelszakaszon RVM-el felvett spektrumokat mutat lineáris/logaritmusos léptékben.



Svéd-német tenger alatti 500kV egyenfeszültségű olaj-papír kábel RVM görbéje: mesterséges „elnedvesítése”

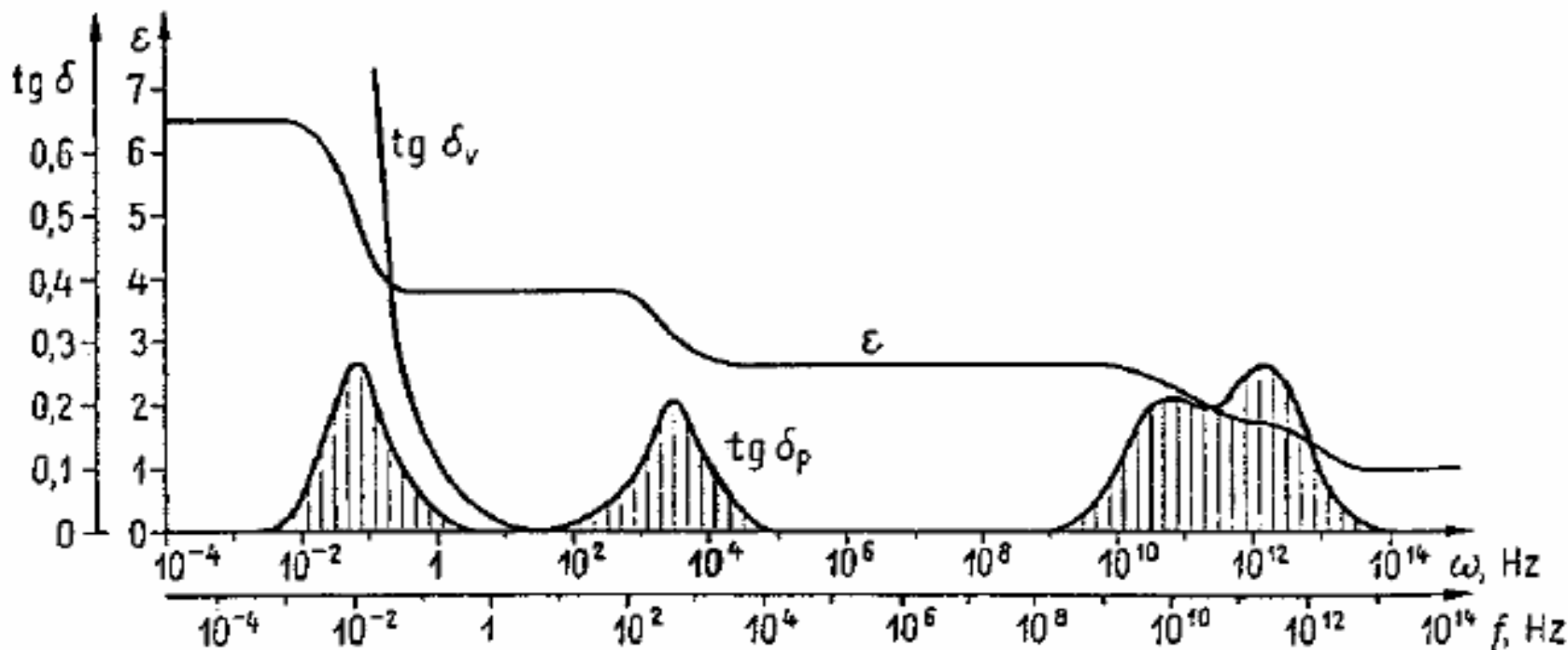


50Hz-es üzemi feszültség időállandója kb. 3ms. A domináns időállandó a hőmérséklettel csökken. Cél, hogy a 3 ms környezetében még a legnagyobb üzemi hőmérsékleten sem legyen jelentős polarizáció.. A kiértékelés lényege: a domináns időállandó értéke a lehetséges legnagyobb üzemi feszültségen se csökkenhessen le az 50Hz-es időállandó két nagyságrendű környezetébe (kb. 3ms). Az alábbi **trafó üzemben átütött**.



Kritikus frekvenciáknál „jellegzetesen” változik a $\operatorname{tg} \delta$ és ε :
 $\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_v + \operatorname{tg} \delta_p (= \varepsilon'')$ és $C = \varepsilon$, ill. ε').

- $\operatorname{tg} \delta_p$: csak akkor, ha a freki és a pol időállandó egyezik. kritikus freki esetünkben 50Hz: Ha a határréteg pol időállandója annyira lecsökken, csak egybeessen 50Hz időállandóval (3ms), akkor max a veszteség



Konklúziók

- Látható, hogy a szigetelési rendszer eléggé **összetett tulajdonságú**, a diagnosztikai **válaszfüggvények is viszonylag bonyolultak**.
- **Klasszikus módszerek** adta adatok információtartalma **jelentősen különbözik** a spektrummérésektől.
- **Sok ellentmondás a hagyományos** mérések kiértékelésekor.
- **Ellenmondások feloldhatók**, ha polarizációs spektrum módszereknél a **teljes polarizációs spektrumot** használjuk.
- A szigetelőanyagban a **romlás megváltoztatja az anyag szerkezetét**, az **anyag szerkezet szoros kapcsolatban van a polarizációval**.
- A romlás hatására az eredetileg **homogén anyag inhomogén lesz**, ez pedig **csak spektrum** módszerrel követhető.
- A „klasszikus” módszerek **egyetlen jelzőszámot** használnak, de az inhomogén szigetelőanyag jellemzésére a **teljes spektrum** szükséges.

Konklúziók (folyt.)

- Tehát a polarizációs spektrum módszerek azért hoztak **minőségi változást** ezen a területen, mert **nem egyetlen jelzőszámmal** jellemzik a szigetelést, hanem egy **teljes spektrummal**.
- A módszer alkalmas **inhomogenitások** kimutatására, az általános romlás követésére, a **leágazás különböző szakaszainak**, ill. **különböző állapotainak** a megkülönböztetésére.

Korrekt diagnosztika - költségmegtakarítás:

- Ha jó az általános állapot, csak **helyi hibát** kell javítani.
- Adott leágazásból kiválaszthatjuk a **hibás részt** és csak azt cserélik.
- **Trendanalízis, élettartambecslés, állapot változás követése.**
- A bevált módszerekkel, valamint az **RVM használatával költséghatékony** diagnosztikát, karbantartást vagyis **üzemeltetést** lehetne megvalósítani.

Köszönöm a figyelmet

Visszatérő feszültség mérés (RVM)



RVM 5461



RVM 5462

