



# Az RVM diagnosztika hatékonyabb alkalmazása különös tekintettel az olaj-papír szigetelésű transzformátorok élettartam hosszabbítására - 2023

Csépes Gusztáv, Diagnostics Kft



## Tartalomjegyzék

1. A téma 2023-as aktualitása, az előadás célja.
2. Olaj-papír szigetelésű trafók romlása, élettartama.
3. Olaj-papír szigetelések általános állapotának ellenőrzés: „hagyományos” és „spektrum jellegű” diagnosztika.
4. RVM diagnosztika alkalmazása olaj-papír trafóknál.
5. Az RVM diagnosztika alapján lehetséges beavatkozások.
6. Konklúziók.



## A téma aktualitása 1:

### Új CIGRE TECHNICAL BROCHURE jelent meg: **TB 887/2022: „Life extension of oil filled transformers and shunt reactors”**

- Az **utóbbi időszakban** a karbantartás időállapú stratégia egyre inkább állapot alapúra változott.
- **Cél:** optimalizálni a berendezések kihasználását.
- **Jelentősen fejlődtek és javultak a diagnosztikai módszerek is**, így a felhasználók keresik azokat a technikákat, amelyekkel az üzemelő trafók élettartamát minél inkább meg tudnák hosszabbítani.
- A CIGRE legújabb, 2022-ben megjelent TB 887-es kiadványa egy „**útmutatónak (GUIDELINE)**” tekinthető.



- A kiadványban megtalálható a **tématerület fontosabb fejezetei:**
  - szóba jöhető fontosabb dokumentumok felsorolása,
  - élettartam definiálása, különböző stratégiák bemutatása,
  - trafó fontosabb részeinek áttekintése, különös tekintettel a szigetelésekre,
  - **romlás, öregedés, ellenőrzési módszerek, diagnosztikák,**
  - megfelelő ellenőrzési módszerek és diagnosztikák alkalmazása,
  - **beavatkozási lehetőségek az élettartam kiterjesztésére,**
  - esettanulmányok bemutatása,
  - függelékek hasznos adatokkal, információkkal.
- **A CIGRE TB 887 2022-es, tehát új kiadvány és rendkívül hasznos információkat tartalmaz.**



## **– A téma aktualitása 2:**

- Az **RVM** diagnosztikára a **közelmúltban több tanulmány jelent meg a nemzetközi szakirodalomban**, sőt, számos diplomaterv is foglalkozott a témával.
- Külön említést érdemel, hogy a **MEE Elektrotechnikába 2021/5-6 számában magyarul** is hozzáférhető egy, az RVM diagnosztika hatékonyabb felhasználását tárgyaló tanulmány.
- **Itt kapcsolódik a két „téma” TB 887 és az RVM diagnosztika felhasználási lehetősége a trafók élettartam meghosszabbításával kapcsolatban.**

***A TB tanulmány 2022-es, a MEE tanulmány 2021-es, meglehetősen frissek, érdemes áttekinteni.***

### **Trafó üzemeltető számára a legfontosabb felismerés:**

Amikor a trafó élettartamáról, ill. élettartam kiterjesztéséről beszélünk, tudnunk kell, hogy **a trafó élettartama végső soron egyenlő a papírszigetelés élettartamával.**



- ***Ha romlik az olaj, akkor regenerálható, ha tönkre ment egy átvezető, akkor kicserélhető, ha elromlik egy OLTC, akkor javítható, stb. de ha a trafó olajjal impregnált papír szigetelése egy bizonyos szint alá romlik, akkor új tekercseket kell készíteni, és ha az összes tekercset újra kell gombolyítani, akkor lehet, hogy az a trafó élettartamának a vége, egy új trafó vétele gazdaságosabb.***
- ***Tehát a figyelmet papír romlására kell fordítani, ezért az általános romlásra vonatkozó diagnosztikák közül nagyon fontos az RVM diagnosztika.***
- ***Előzetesen elmondható, hogy az RVM diagnosztika az olajjal impregnált szilárd papírszigetelés általános romlására jellemző adatokat szolgáltat.***  
***Fontos kiemelni, hogy az RVM diagnosztika nemcsak a pillanatnyi állapotra szolgáltat információt, adatokat kaphatunk az üzemeltetés biztonságára, a karbantartási beavatkozási lehetőségekre, várható élettartamra, stb.***



- Az **RVM viszonylag új módszer**, sajnos még nincs rá nemzetközi szabvány, a magyar szabvány is igazán csak a mérés elvégzésére ad információt, a kiértékelés leginkább tanulmányokból követhető. Ezért volt fontos a magyar MEE tanulmány 2021-es megjelenése.
- Most a cél, a **hatékony diagnosztika főbb elemeinek rövid áttekintése**.
- A **hagyományos módszerekre vannak szabványok**, utasítások, ezért a **„klasszikus”** (nem spektrumos) diagnosztika hatékony használatára szabványok segíthetnek.
- Célunk, hogy a CIGRE TB 887 alapján felívjuk a figyelmet az élettartam kiterjesztés fontosságára, különös tekintettel az RVM vizsgálatokra, amellyel a trafó élettartama hatékonyan meghatározható.
- **Trafó üzemeltetők célja** a trafó élettartamának olyan menedzselése, amely **minimalizálja az összköltséget**: azaz optimális arányt alakít ki a **beruházási, üzemeltetési, karbantartási, felújítási és javítási költségek** terén.

Az előadás **célja** a röviden áttekinteni azokat az alapvető folyamatokat, amelyek **nem ismerete, vagy felületes ismerete megnehezíti a trafók megfelelő menedzselését**.



**Tehát a „klasszikus”, viszonylag kis információtartalommal bíró diagnosztikára rengeteg szabvány nyújthat segítséget, amíg a „spektrumos”, jóval nagyobb információt tartalmazó diagnosztikára „csak” különböző tanulmányokból, ill. ilyen DIAG előadásokból kaphatunk segítséget.**

**Ebben az előadásban főleg azon alapvető jelenségekre kerül a figyelem felhívásra, amelyek a tapasztalatok szerint nem a szükséges hangsúllyal kerülnek alkalmazásra, így ez a diagnosztika nem tud olyan hatékony lenni, mint amilyen lehetne.**

**Az RVM hatékonyságának tárgyalása előtt érdemes néhány alapfogalmat CÉLIRÁNYOSAN áttekinteni.**





# Olaj-papír szigetelések romlása, élettartama

(Diagnosztika szempontjából fontos alapvető ismeretek rövid áttekintése)



-A trafó az egyik **legnagyobb értékű** berendezés a hálózaton, még a **jó és jobb döntés között is százmilliós költségkülönbség lehet.**

-Cél: trafó **költséghatékonyan** minél **üzembiztosabban** üzemelhessen.

-**A trafóban kétfajta** nemkívánatos változás mehet végbe: az **egész olaj-papír** szigetelésre kiterjedő **öregedés és elnedvesedés**, valamint a gyártási hiba, ill. termikus, villamos és mechanikai túl igénybevétel miatti un. **lokális hibák megjelenése.**

-Az elkövetkezőekben a **romlási folyamatok, ill. a diagnosztizálási és a beavatkozási** lehetőségeket olyan **áttekintése** következik, amely **segítséget** nyújt a „félreértések tisztázása” terén.  
**Most lokális hibákról nem beszélünk!!!!**

-**Nagyfeszültségű trafók** szigetelése még mindig az **olaj-papír**, így az elkövetkező **40-50 évben** a menedzselése még mindig fontos lesz. Az olaj-papír szigetelés eléggé „összetett” rendszer, így **romlása is „bonyolult” változást jelent.**

**Tudjuk, hogy a legfontosabb felismerés:**

**A trafó élettartama egyenlő a papírszigetelés élettartamával.**

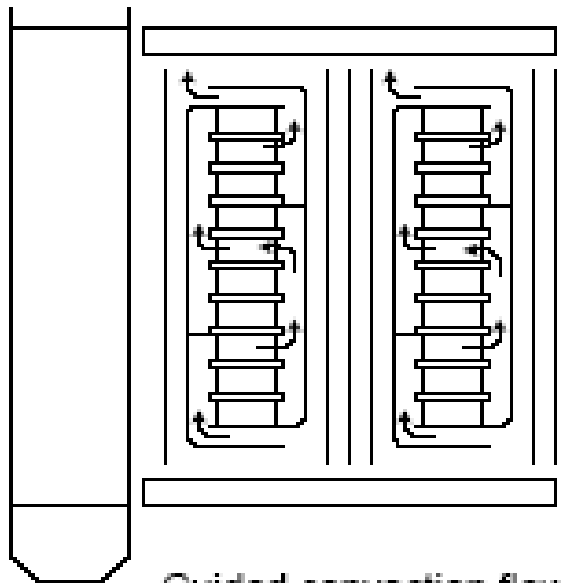


- Olajromlásának követése könnyű, mert **olajminta csapolható, a laborban szinte bármilyen vizsgálata elvégezhető, szükség esetén regenerálható. A lokális hibák behatárolása viszonylag egyszerű, egyre több módszer áll rendelkezésre (HGA, PD, stb.).**
- **De az általános romlás vizsgálatainál sok az „anomália”. Miért?**
- **Sokszor keverik a szigetelés általános romlását a lokális meghibásodással.**
- **„Egyetlen jelező számot adó” hagyományos diagnosztikák (pl. 50Hz-es tgδ) erősen inhomogén állapotot nem tudják egyetlen diagnosztikai paraméterrel jellemezni. Miért?**
- **10-60 tonna szigetelőanyag hőmérséklet eloszlása, elnedvesedése ill. öregedése inhomogén, ezért vannak ellentmondó eredmények, anomáliák a kiértékelésben.**
- **Ezért látszott szükségesnek az egész világon** az alapvető folyamatok és összefüggések **mélyebb ismerete**, másrészt a mérés technika **megfelelő szintre emelése.**
- **Minden hőmérsékletfüggő, egyetlen szigetelés jellemző eloszlása sem homogén: akkor mi mennyi?**

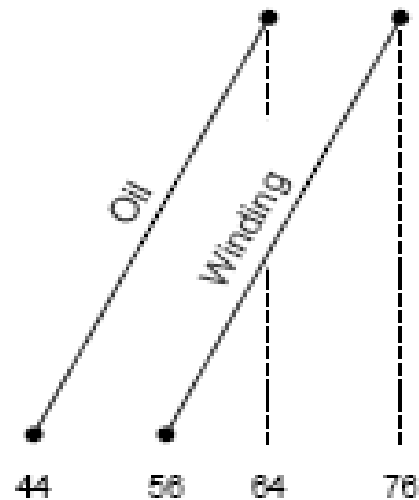


## Nedvességtartalom eloszlás a trafó szigetelésben

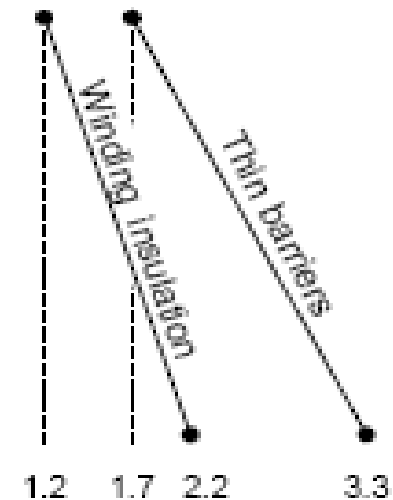
Transformer rated voltage	Maximum water content in oil (ppm)			Equivalent water content in paper
	50°C	60°C	70°C	
Up to 69kV	27	35	55	3%
69 to 230kV	12	20	30	2%
230kV and above	10	12	15	1.25%



Guided convection flow through disk windings



Temperature (°C)



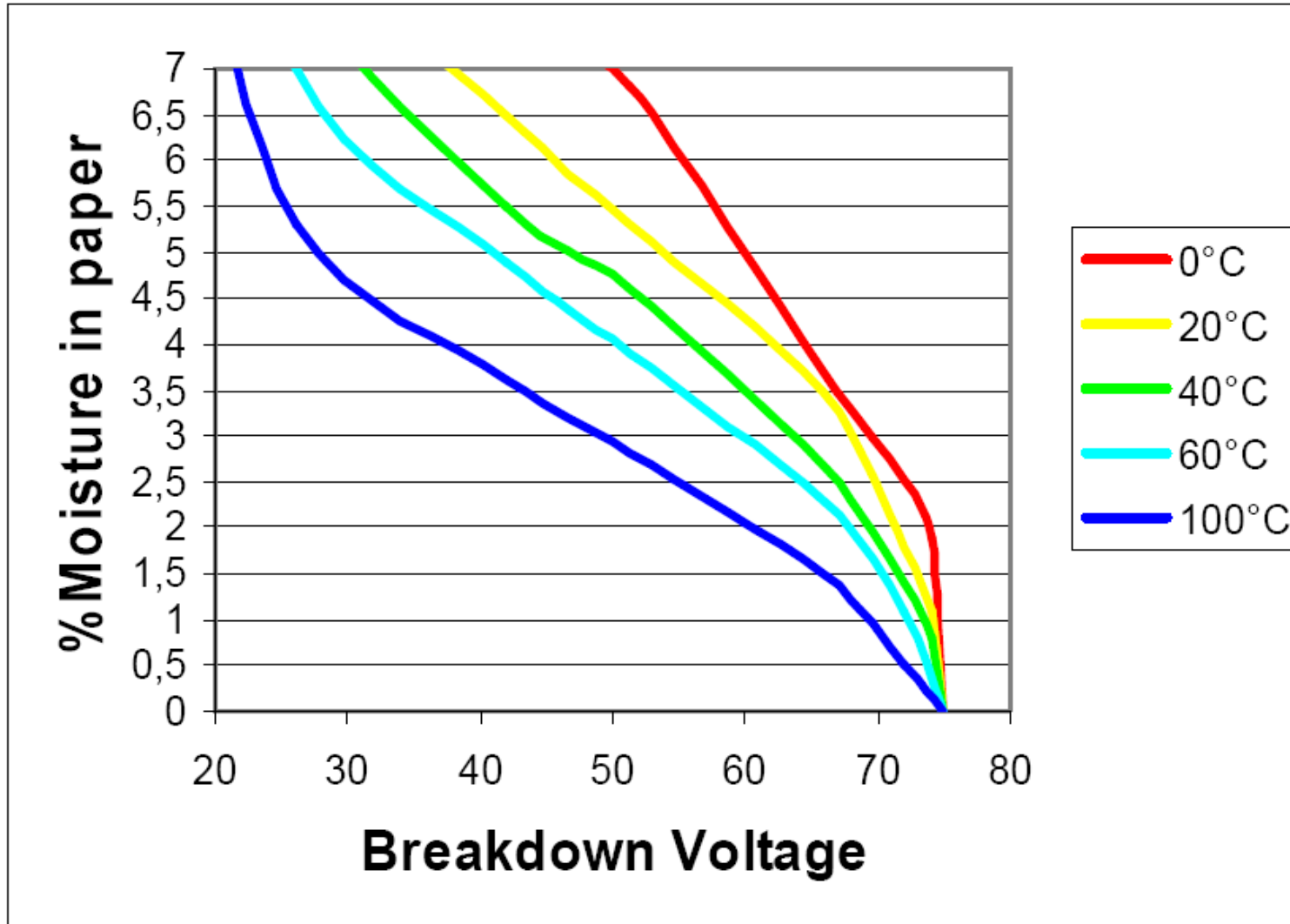
Moisture content (%)



- Ha ennyire inhomogén a rendszer, akkor **irreális igény** a jellemzők pontos meghatározása.
- Tudnunk kell, hogy csak valami **átlagértéket** kaphatunk.
- **De szükséges-e** ezen paraméterek **pontos** meghatározása?
- Az olaj-papír szigetelésnél **végső fokon főleg arra vagyunk kíváncsiak, hogy az üzem közbeni változások következtében az átütési szilárdság lecsökkent-e egy bizonyos szint alá, milyen a trafó pillanatnyi üzembiztonsága, valamint mi a várható élettartam.**
- Az átütési szilárdság csak **roncsolásos vizsgálattal** állapítható meg, ezért csak **roncsolás mentes** vizsgálatok jöhetnek szóba.
- **Mi az összefüggések** az átütési feszültség és az általános állapot romlása között, ami **roncsolás mentesen vizsgálható.**



## Átütési feszültség és a papír víztartalma közötti összefüggés



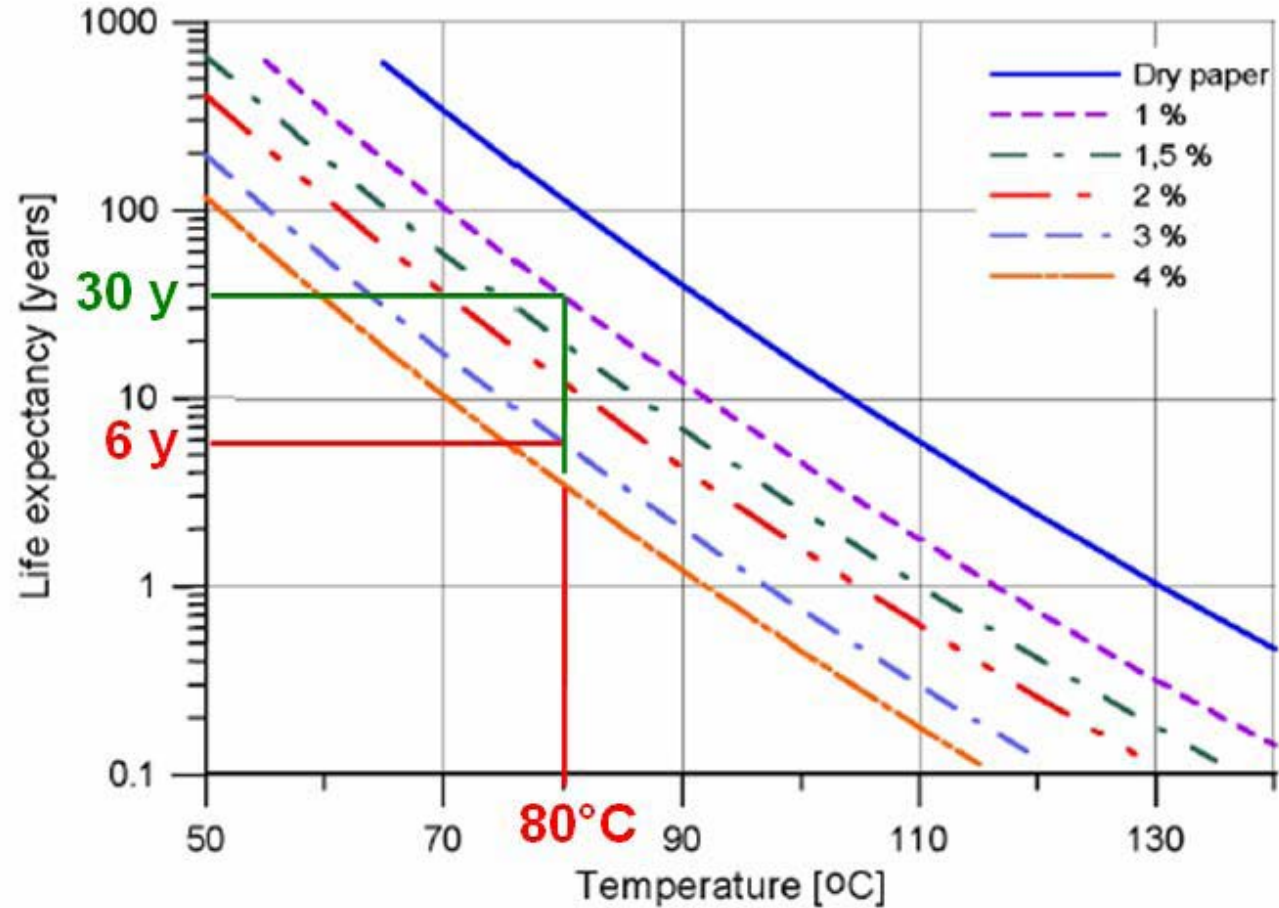


## Trafó élettartam függés a hőmérséklettől és a nedvességtartalomtól (öregedés?)

Moisture in paper (%)

1%

3%



Source: SINTEF

**80°C-on üzemeltetve a trafót 1% papír víztartalomnál a várható élettartam kb. 30 év.  
Ha a víztartalom 3%-ra nőne, akkor a várható élettartam kb. 6 évre csökkenne.**



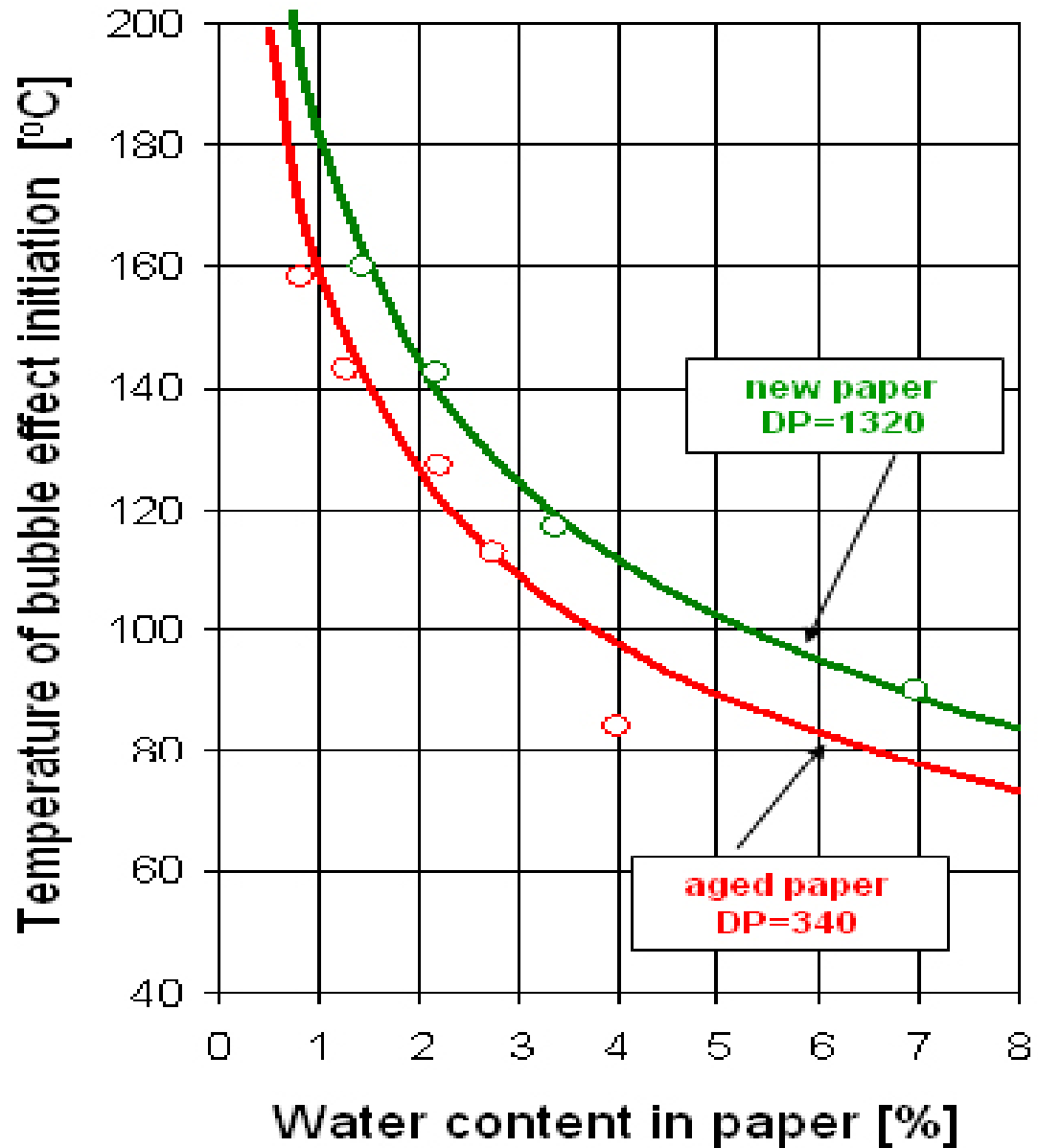
### Röviden az olaj-papír szigetelés buborékképződéséről

- Az 50Hz-es térerő hatására **veszteség** keletkezik a szigetelőanyagban.
- **Nedvesség és öregedési** termékek hatására **növekszik a veszteség**, nagyobb veszteség miatt **nő a hőmérséklet**, ami miatt növekszik a veszteség, azaz **egyre magasabb lesz a hőmérséklet**.

*A nedvességtartalom és öregedés mértékétől függő hőmérsékleten beindul a buborékképződés, majd részleges kisülések keletkeznek az olajban, végül átütés következhet be.*

- Magasabb hőmérséklet, nagy **papír víztartalom**, nagy **olaj öregedési termék felhalmozódás**: **már 10 kV/cm** térerősség mellett megindulhat a buborékképződés.
- Ezek után **részkisülések léphetnek fel**, olyan geometriájú helyeken is, ahol a **buborékok nélkül** ez nem volna várható.
- *Az egyszer megindult részkisülés viszont már önfenntartó, kialakása rendszerint csak jóval kisebb térerőnél következik be.*





**Buborékképződés küszöbhőmérséklete a papír víztartalma függvényében új (DP=1320) és öregedett papír (D=340) esetén**



# Röviden az olaj-papír szigetelések diagnosztikájáról, élettartam kiterjesztéséről, különös tekintettel az RVM módszerre



## SPEKTRUM MÓDSZEREK – HAGYOMÁNYOS ELJÁRÁSOK

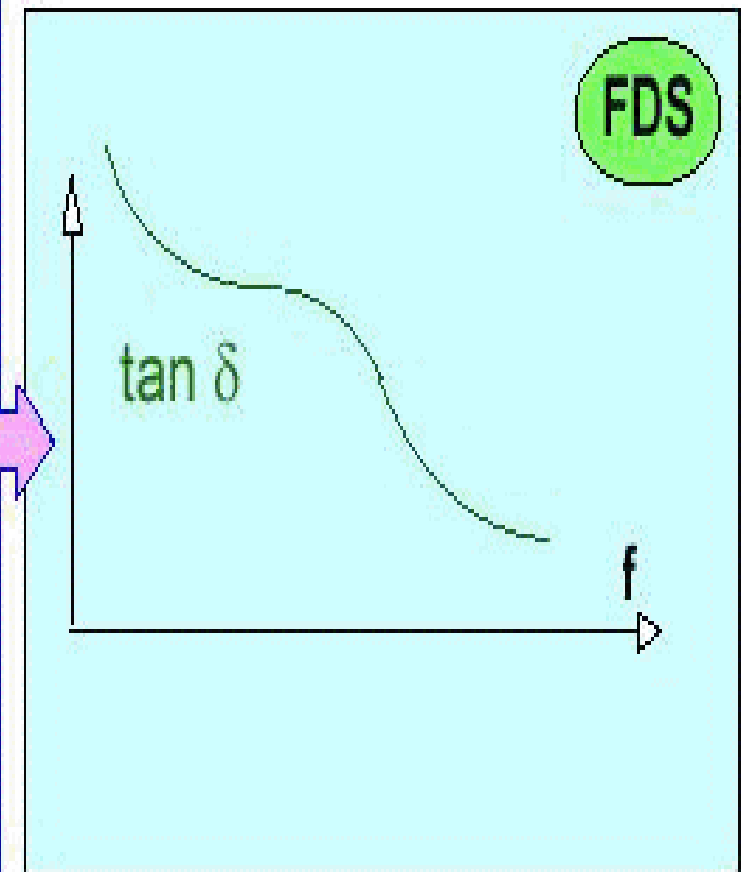
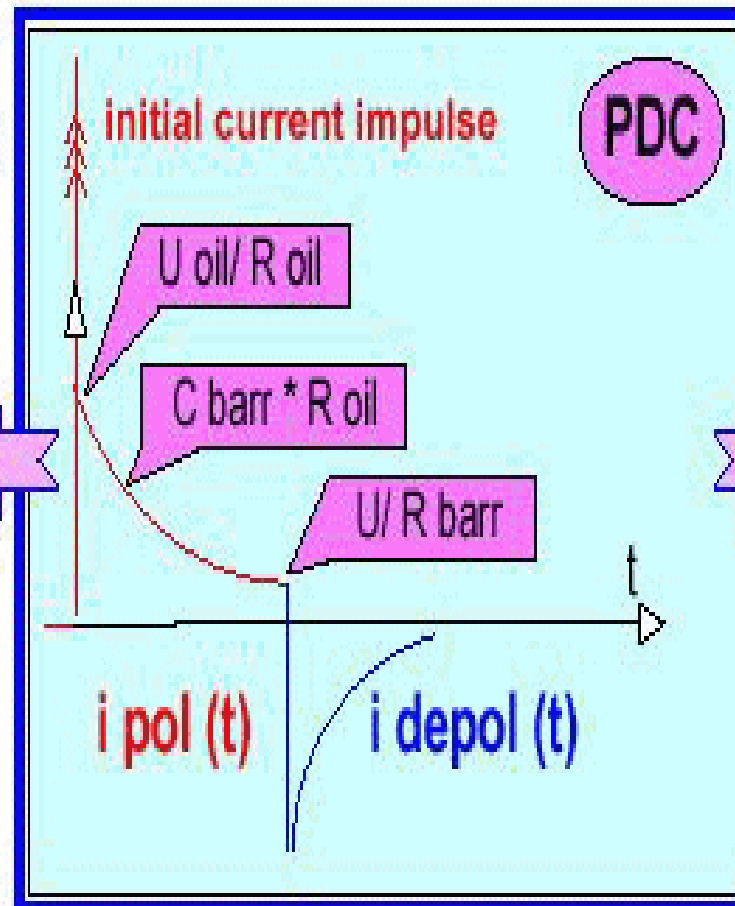
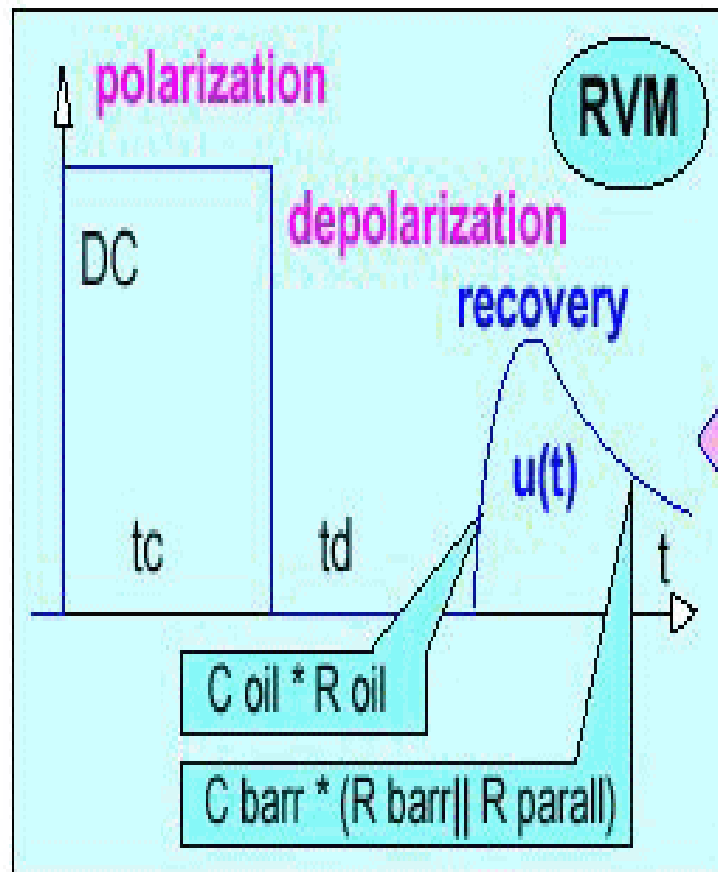
- Az olaj-papír szigetelés eléggé „összetett” rendszer, így romlása is „bonyolult” változást jelent.
- A „spektrum” méréseknél egy spektrumot kapunk, amely jellegénél fogva képes a „bonyolult változást követő inhomogén rendszert jellemezni. Hogyan?
- A spektrum módszerekre (RVM, FDS, PDC) **nincsenek szabványok**, mérések végzése **tanulmányok, gépkönyvek, stb.** alapján történik.
- FONTOS: felhívni a figyelmet, melyek a szem előtt tévesztett alapokra. Erre a legjobb az 1970-es évek BME kutatása.***
- Kutatás eredménye:** az olaj-papír szigetelés romlásának jobb áttekintése, romlás pontosabb megértése, **anomáliák tisztázása, új mérési módszerek kidolgozása.** Ez alapján kerültek bevezetésre a **spektrum módszerek is (RVM, FDS, PDC).**



## BME kutatás eredménye: három polarizációs spektrum módszer kidolgozása

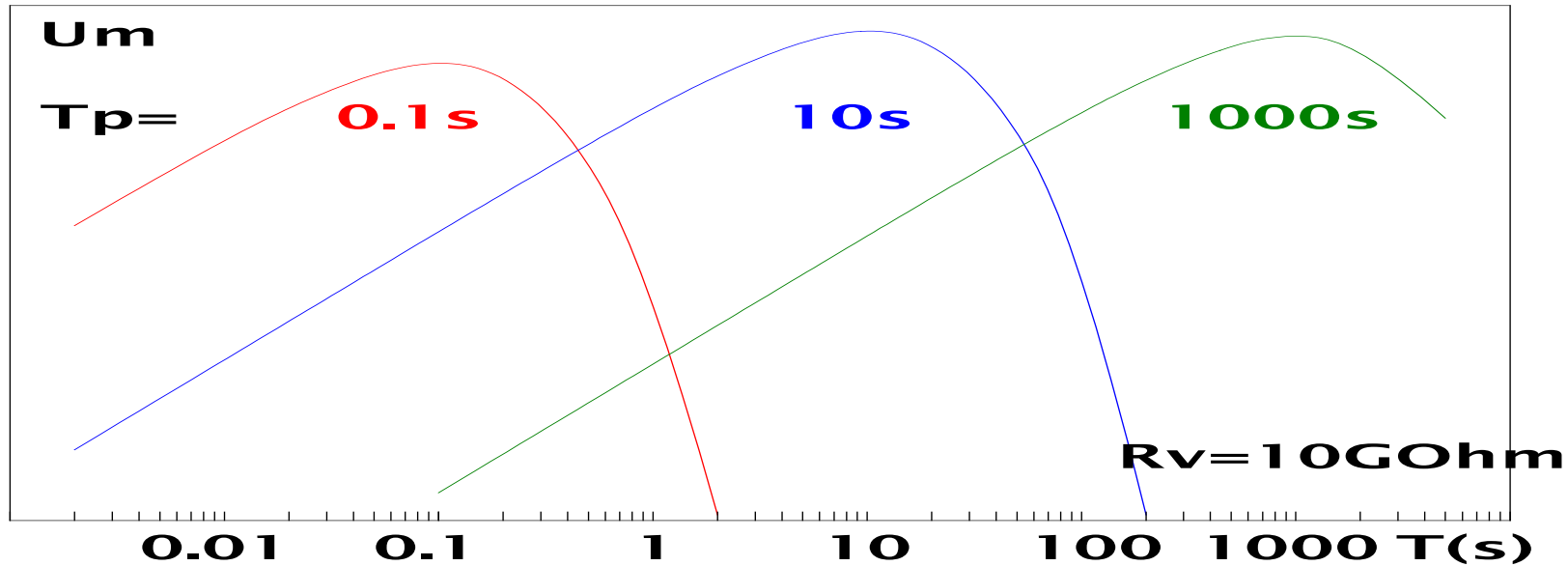
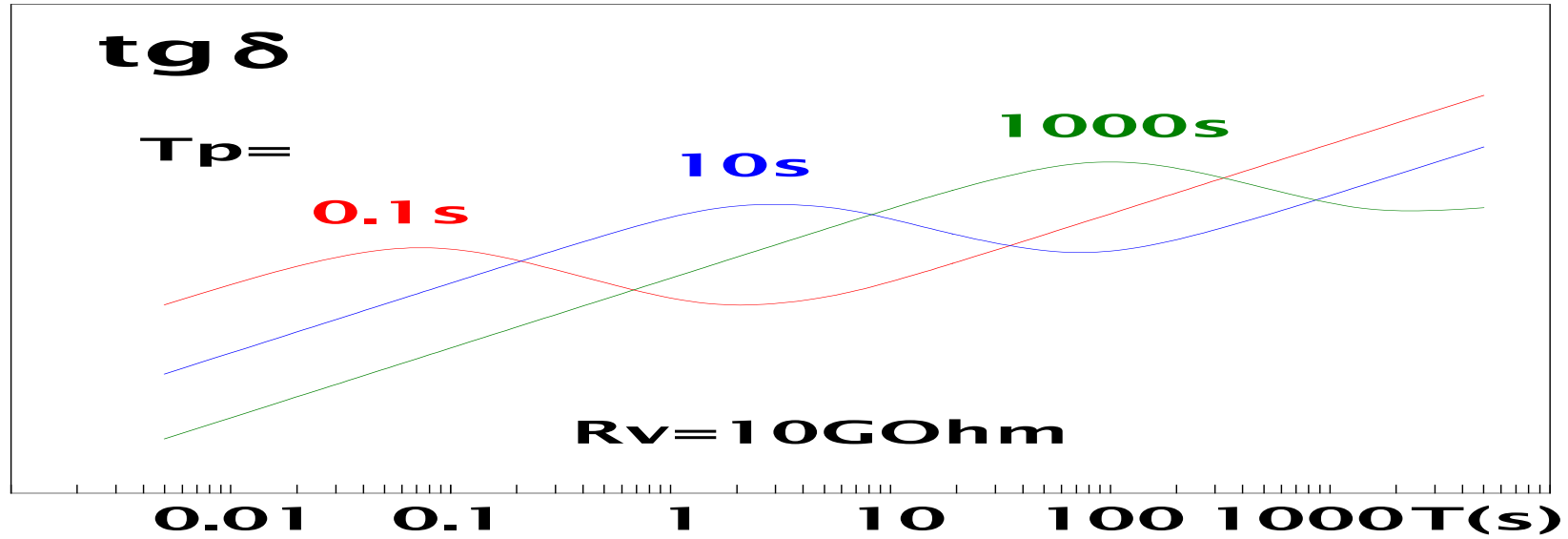
time domain analysis

frequency domain analysis



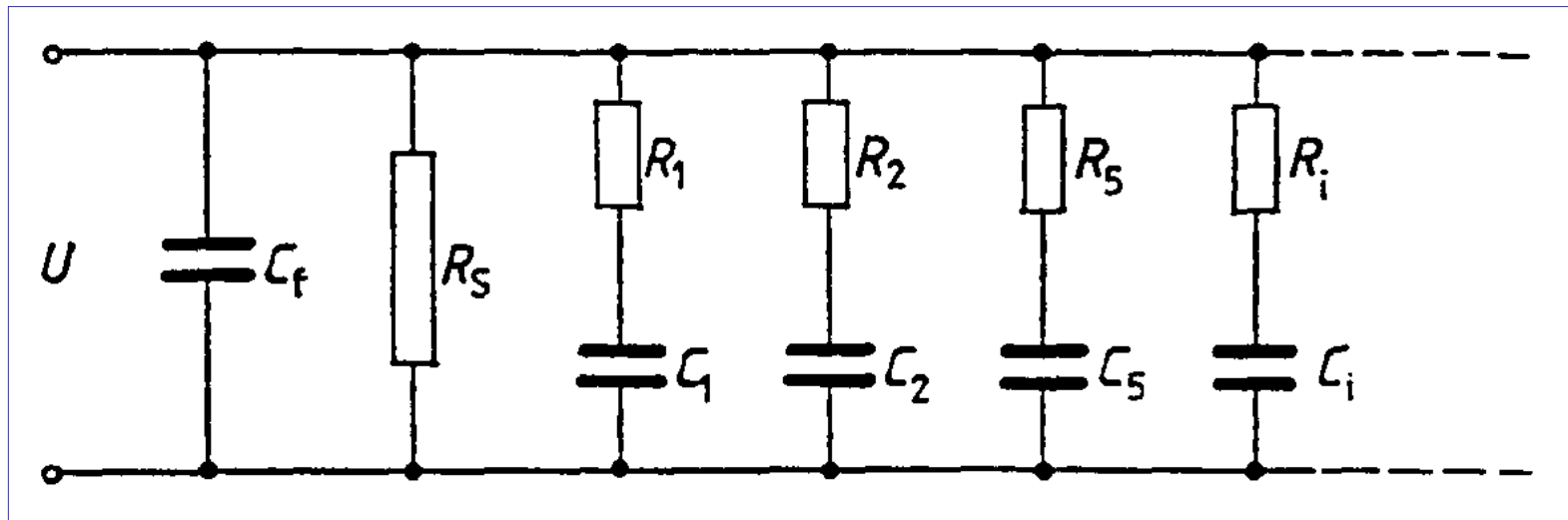
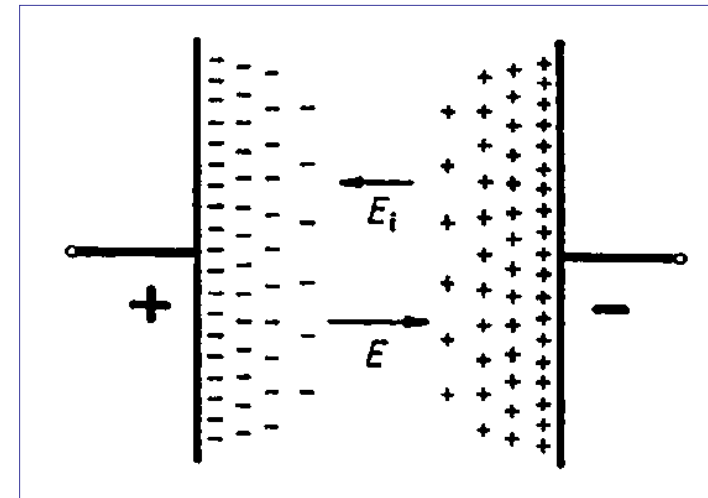
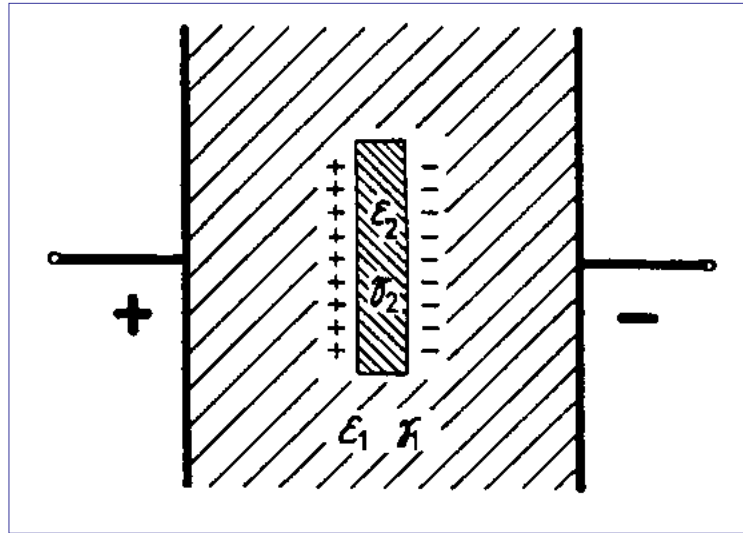


## „Átjárhatóság”: RVM és FDS ( $\text{tg}\delta$ ) mérés összehasonlítása





## A határréteg polarizációra vonatkozó helyettesítő ábra

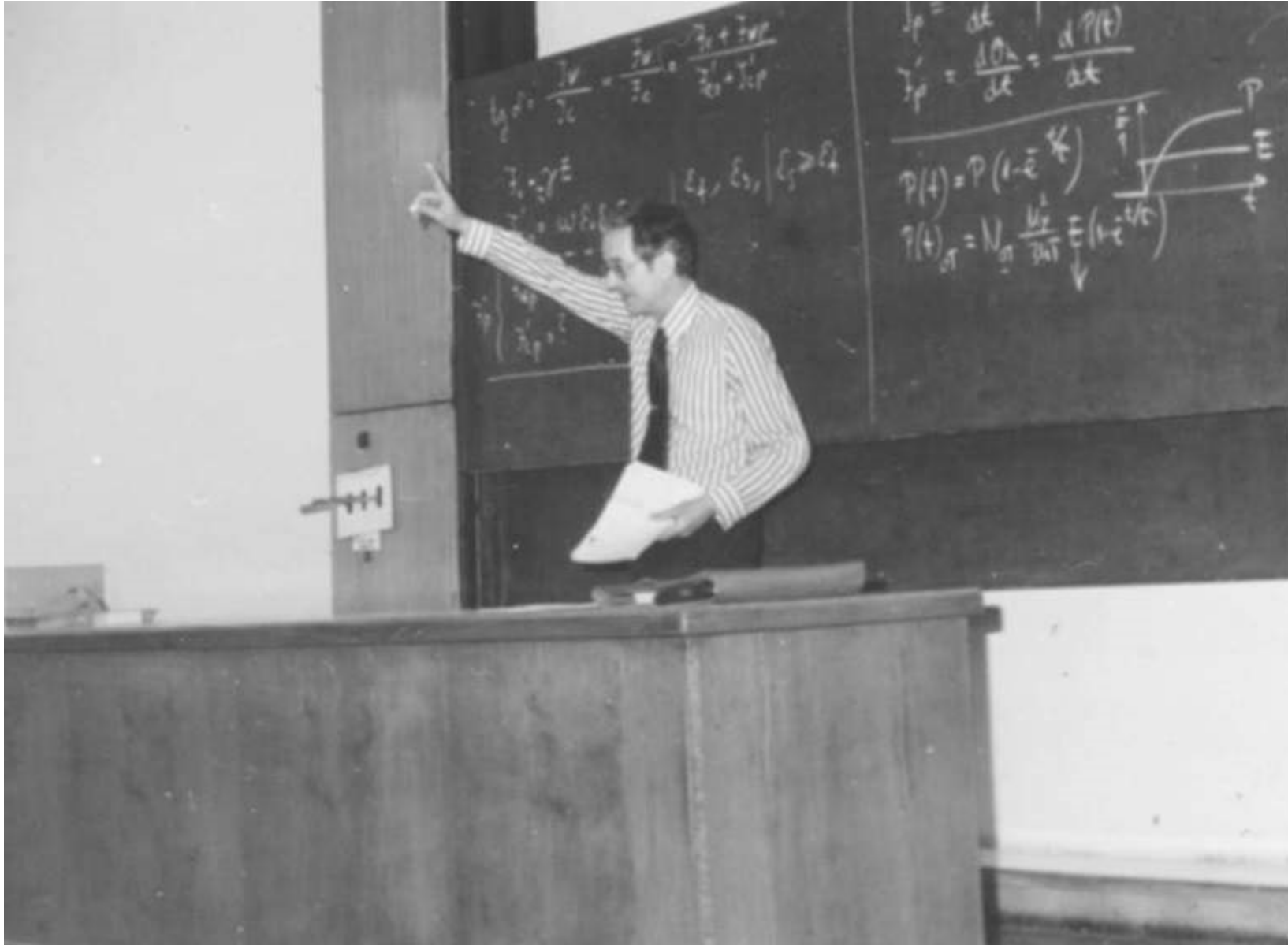




## Magyar (BME) ismeretanyag a polarizációs spektrummérésekre

- Kitűzött cél:** olaj-papír szigetelés elnedvesedés és öregedés vizsgálata.
- A munkát az **MVMT-OTUSZ** ellenőrizte, a NIM-OMFB-MVMT finanszírozta, **Dr. Csernátony-Hoffer András** irányította a kutatást (**CIGRE SC 15 tag**). **ISH2019 CsH megemlékezés!**
- BME kutatás** az 1970-es években új diagnosztikai módszerek keresésében.
- Főbb kutatók: BME NTT, BME Kémiai Technológia Tanszék, VKI, VEIKI, MÁFKI, MTA, OVIT, ELMÜ, Ganz, stb.
- Nem használjuk az eredményeket!!!!**









## BME kutatás főbb eredményei

**A víztartalom és az öregedés hatásának vizsgálatára készített olajjal impregnált papíros próbatárgyak:**

- **Új próbatárgy:** (Pt:lp/01:  $\text{tg}\delta = 0,01\%$ , vagy  $10^4 \text{tg}\delta = 100$  90°C-on),
- **Közepesen öregített:** (Pt:lp/02:  $\text{tg}\delta = 0,1\%$  vagy  $10 \text{tg}\delta = 1000$  90°C-on),
- **Erősen öregített:** Pt:lp/03:  $0.5\% \leq \tan(\delta) \leq 0.7\%$  ( $10^4 \text{tg}\delta = 5-7000$  90°C-on).
- Pt:lp+pp: lágy papír, presspan távtartók
- Pt:lp: lágy papír távtartó nélkül
- Hőmérséket: 6 különböző érték, 13°C-os lépések 25°C és 90°C között.
- Nedvességtartalom 5 különböző érték: 0.5%, 1%, 2%, 3% and 4 %.
- **tg  $\delta$ /C mérésnél:** 0.05Hz és 50 Hz között 8 frekvencia.
- AC mérések: 6 – 1400 V között 8 értéken.
- DC mérések: 5 - 1000 V között 8 értéken.
- **Visszatérő feszültség:** töltés/kisütési idő 0.02s/0.01s és 1000s/500s között 15 érték.



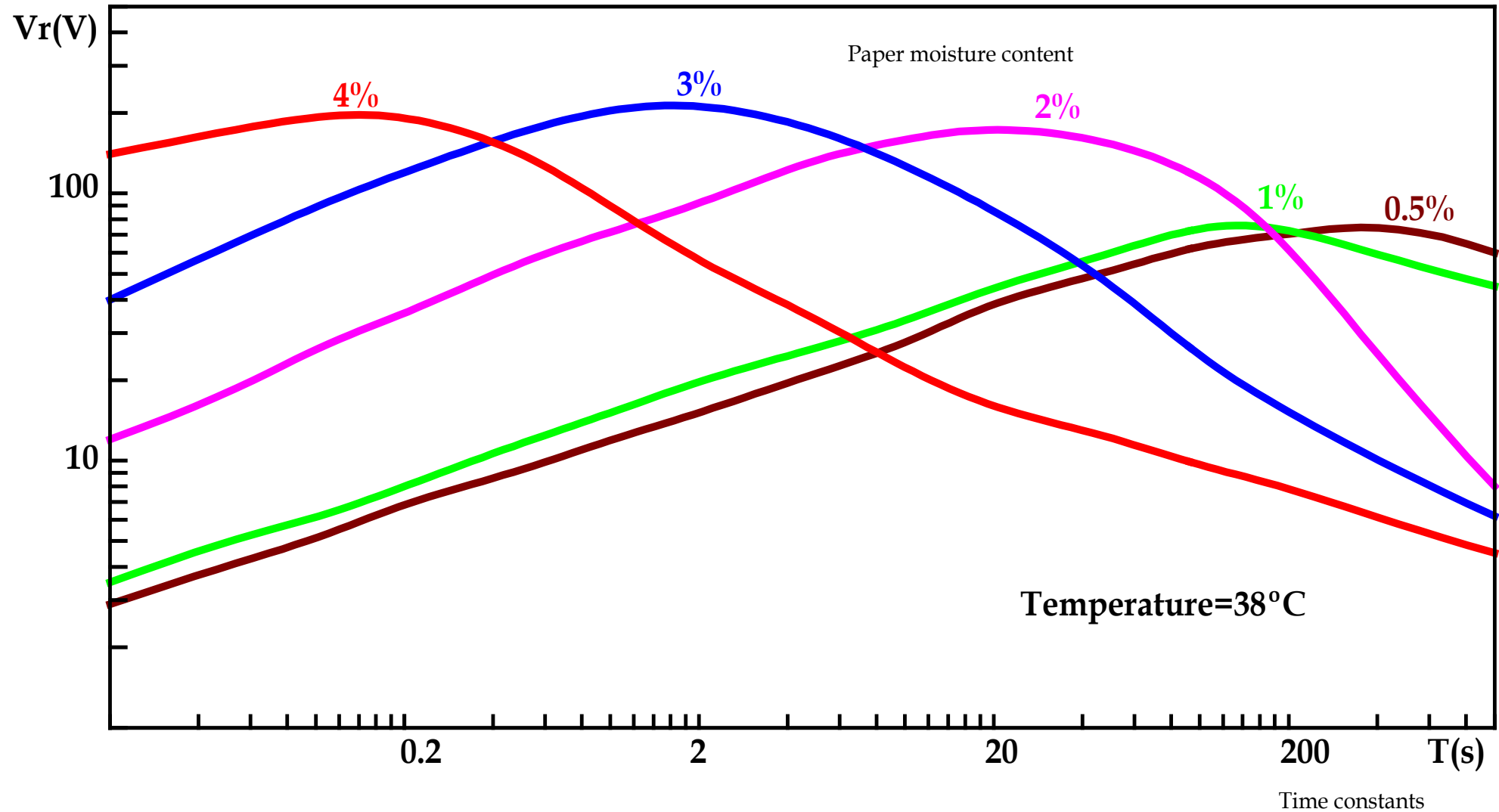
**A BME kutatás során a következő mérések kerültek elvégzésre:**

- **R10: 10 perces szigetelési ellenállás (U/I hányados),  $R_{10}(U;T;X)$  jelentése:** 10 perces ellenállás a feszültség (U), hőmérséklet (T) és a papír víztartalma (X) függvényében.
- **$tg\delta_{50Hz}$ : dielektromos veszteségi tényező 50Hz-en:  $10^4 tg\delta(U;T;X)$  jelentése,** mint fentebb.
- **$tg\delta$ : dielektromos veszteségi tényező állandó feszültségen mérve:  $tg\delta(f;T;X)$  jelentése:** mérés a frekvencia (f), hőmérséklet (T) és a papír víztartalmának (X) függvényében (**FDS**).
- **C: kapacitás állandó feszültségen mérve:  $C(f;T;X)$  jelentése:** mérés a frekvencia (f), hőmérséklet (T) és a papír víztartalmának (X) függvényében (**FDS**).
- **Visszatérő feszültség (RVM) két paraméterének mérése:**
- **Visszatérő feszültség maximum értéke:  $U_R \max(t_C/t_D;T;X;)$  jelentése:**  $U_v$  mérése a töltési/kisütési idő ( $t_C/t_D$ ), hőmérséklet (T) és a nedvességtartalom (X) függvényében.
- **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.



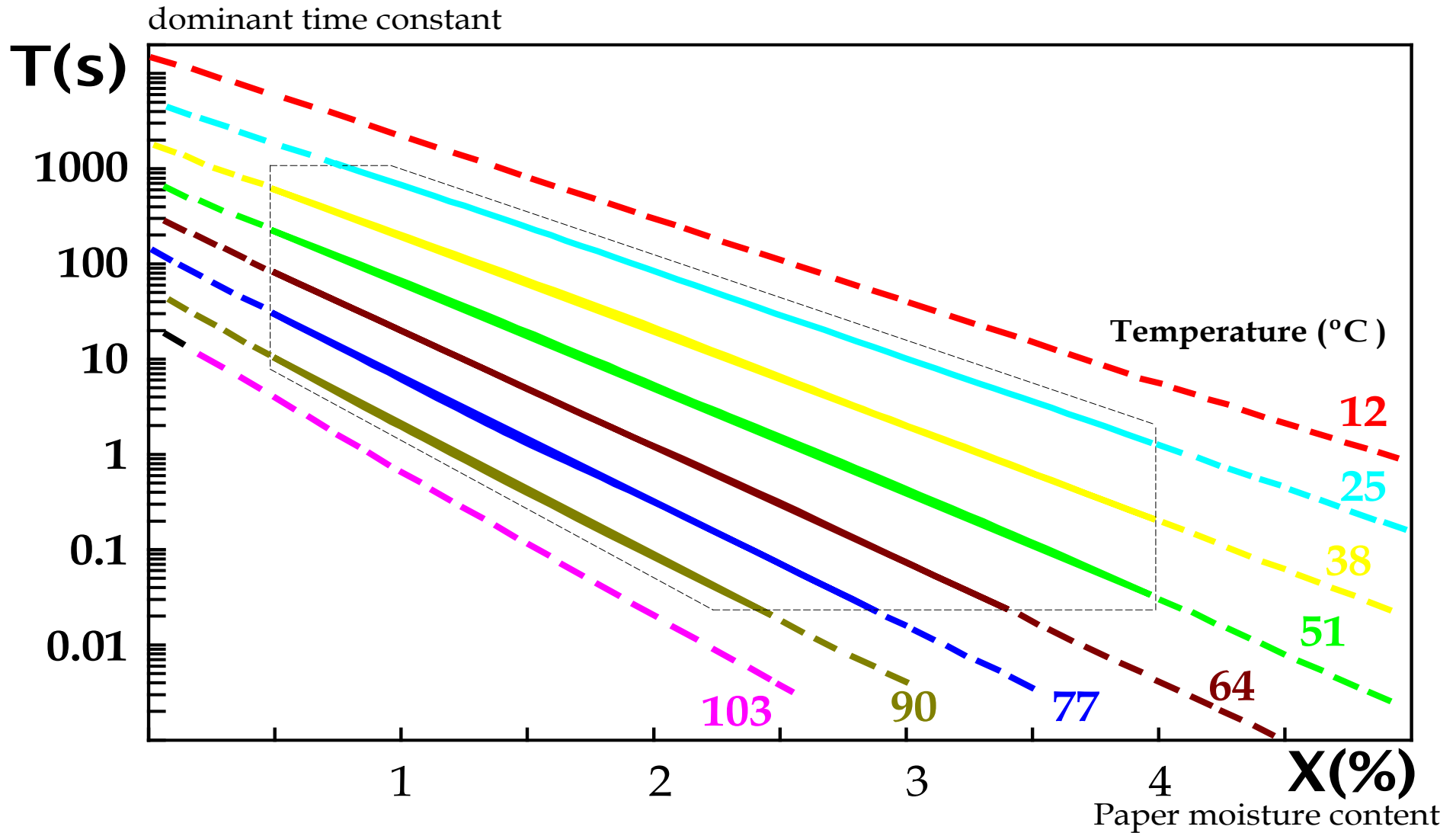
## 38°C mérési hőmérsékleten mért RVM görbék

Curves, derived from the maxima of the return voltages





## Nomogram: RVM mérések 25-90°C közötti hőmérsékleten





- A BME kutatás eredményei alapján megismerhetőek az alapvető romlási folyamatokat, magyarázhatóak a klasszikus vizsgálatok anomáliái, mégsem használjuk értékének megfelelően ezt a magyar kutatási eredményt.

De miért?

Megfelelő mennyiségű és minőségű ismeretanyag hiánya!

Megfigyelhető: ha nincs szabvány valamire, azt jóval kevesebben használják.

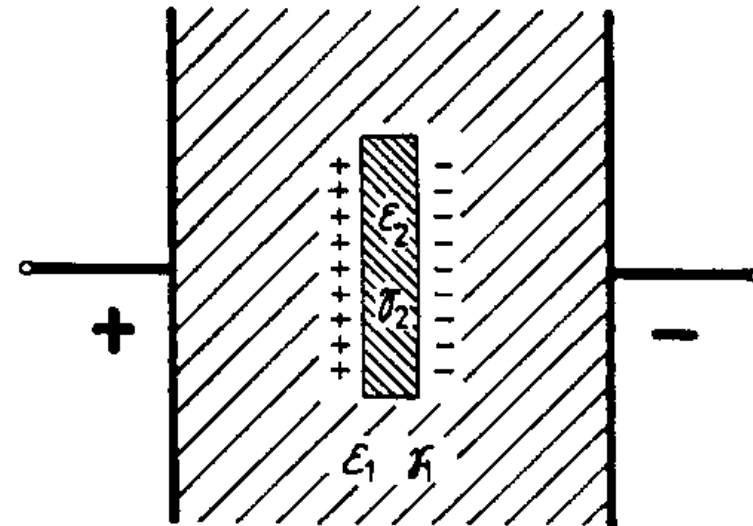
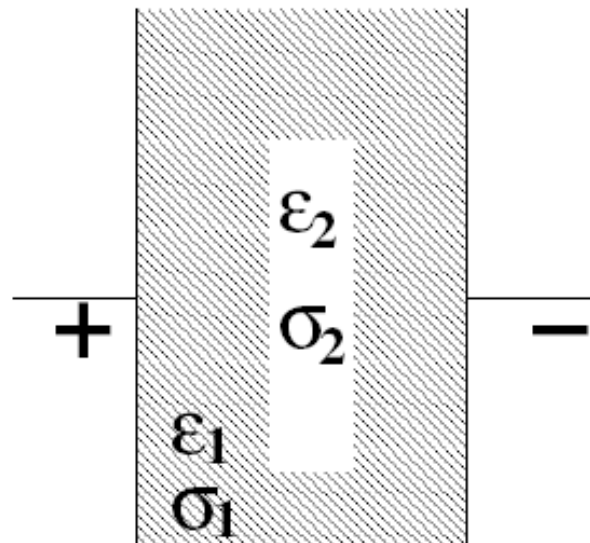
- A kifejlesztett három új mérési módszerrel diagnosztizálható a romlás, költséghatékonyan be lehet avatkozni az élettartam kiterjesztésébe.
- A szakemberek legfontosabb célja kellene, hogy legyen folyamatos ismeretbővítés (Tutorial, DIAG konferenciák, stb. pl. Doble!).



## Spektrum módszerek alapja a papírban működő határréteg polarizáció

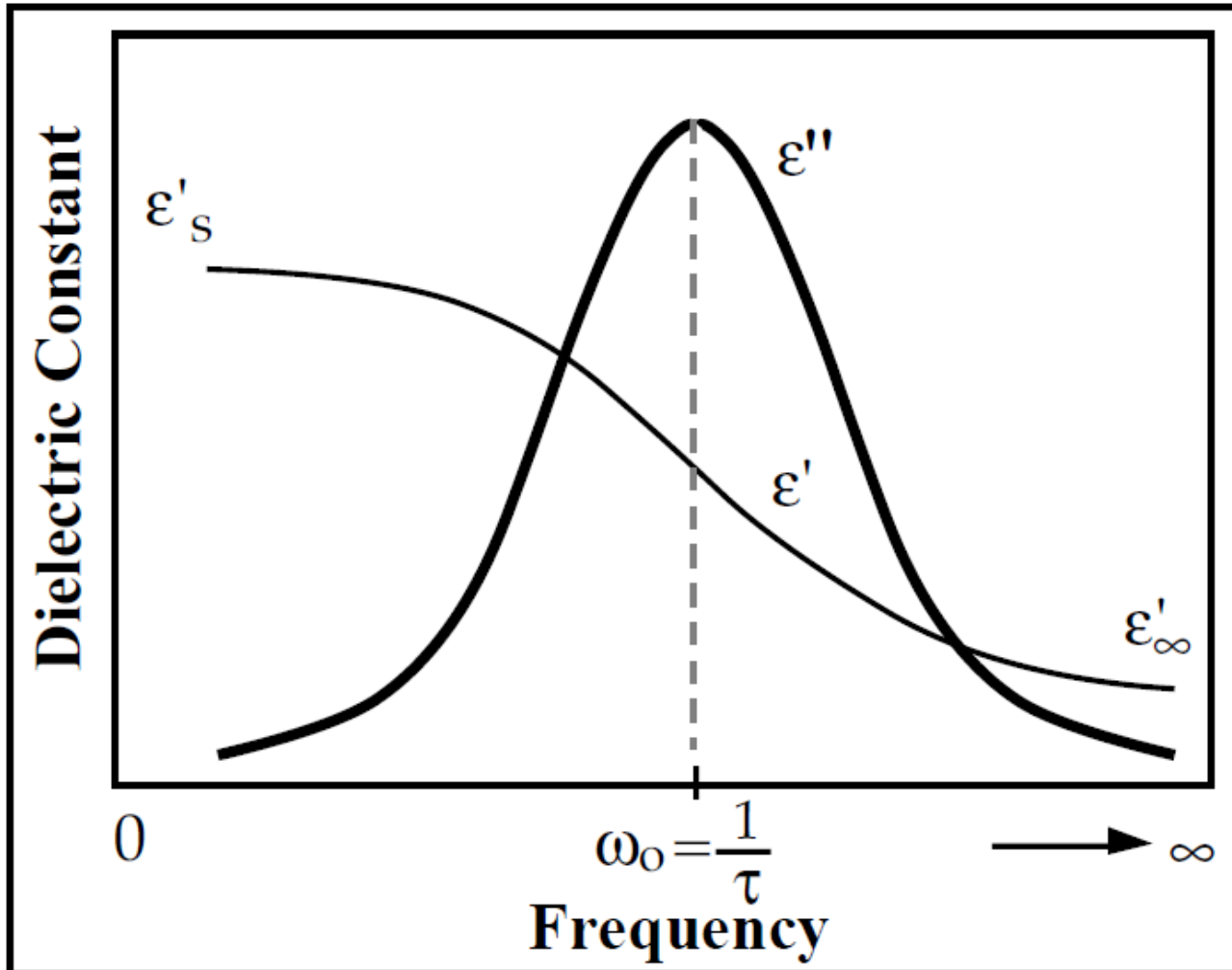
-Határréteg polarizáció akkor alakul ki, amikor a rétegzett szigetelőanyag **különböző „arányú” permittivitással és fajlagos vezetőképességgel** rendelkezik, ill. ha nem teljesül az alábbi egyenlőség:  $\epsilon_1 \sigma_2 = \epsilon_2 \sigma_1$

-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.





Debye-modell dielektromos állandóinak frekvencia spektruma komplex dielektromos állandó összetevői:  $\epsilon'$  és  $\epsilon''$  dielektromos állandók ( $\epsilon = \epsilon'$ ,  $\text{tg}\delta = \epsilon''$ ) frekvenciafüggése



$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2}$$

$$\epsilon'' = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \omega \tau$$

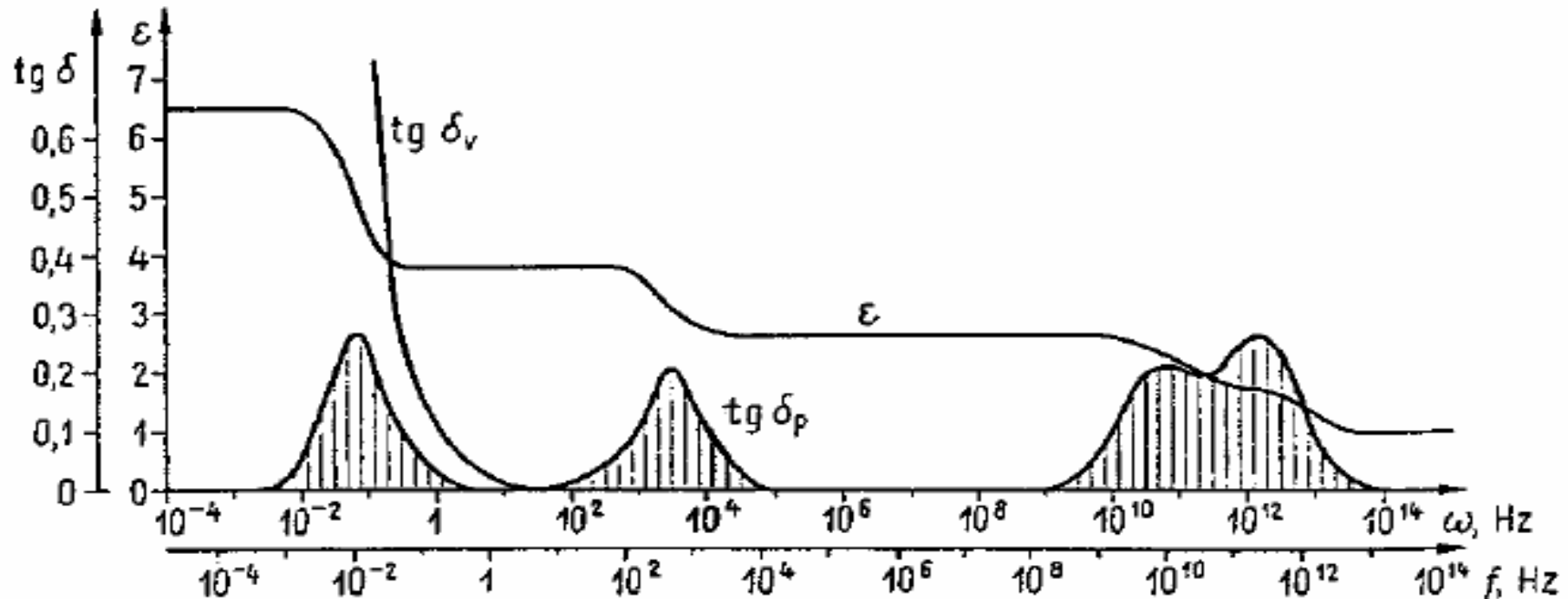
## PI: Három különböző időállandójú polarizációval rendelkező spektrum

- Egyes polarizáció fajták intenzitásának + vezetési veszteség ( $\text{tg}\delta = \text{tg}\delta_v + \text{tg}\delta_p$ ) 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  $\epsilon$ :  $\text{tg}\delta = \text{tg}\delta_v + \text{tg}\delta_p (= \epsilon'')$  és  $C = \epsilon$ , ill.  $\epsilon'$ .

$$\text{tg } \delta = 1 / (\rho \epsilon_0 \epsilon \omega) = 1 / (\rho \epsilon_0 \epsilon 2 \pi f) \text{ (fordítva arányos a frekvenciával)}$$







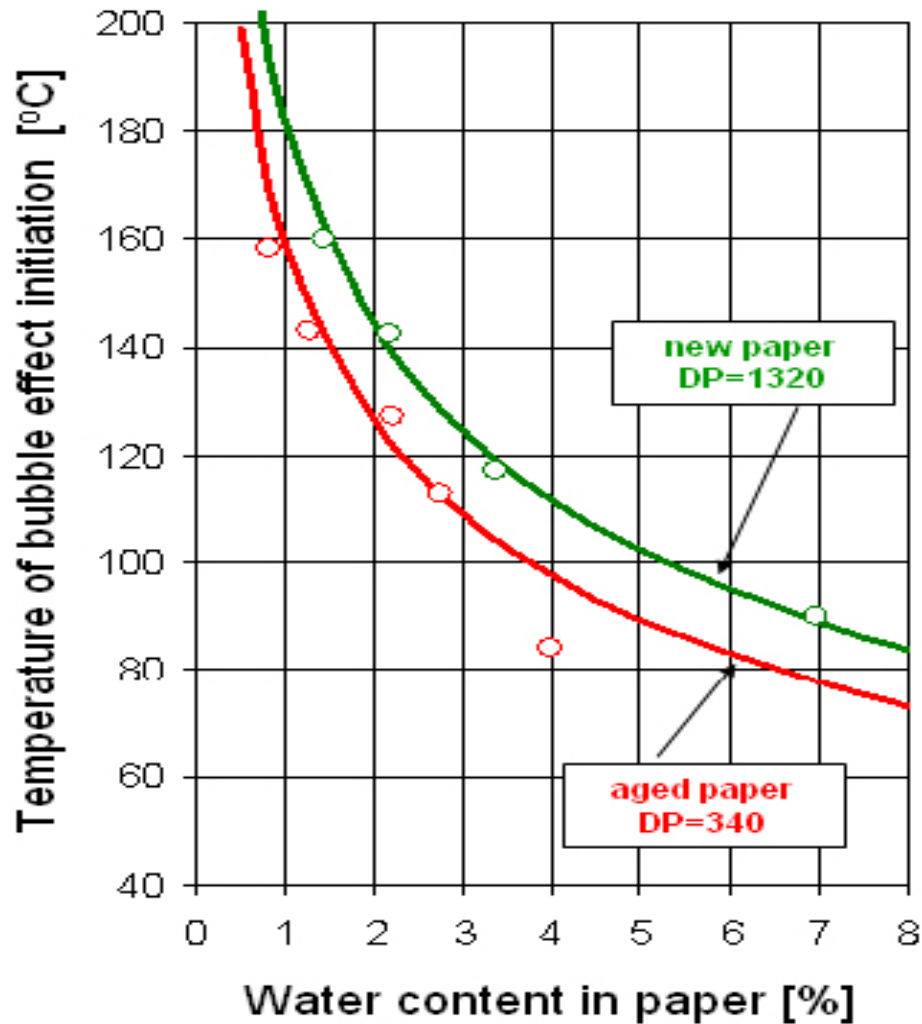
- A romlás inhomogénné teszi az **anyag szerkezetét**, új állapotban **még homogén** eloszlású **polarizáció** is **inhomogén** lesz, így hagyományos módszerek kevésbé diagnosztizálандók, de **a polarizáció spektrális eloszlásával már jól diagnosztizálható a szigetelés.**
- Jellemzésre a polarizációs spektrum ***időállója és az intenzitása*** használható.
- Adott időállójú **(kritikus frekvenciájú) polarizáció csak saját időállójával történő gerjesztés esetén termel veszteséget (lásd az előző két ábrát).**
- A polarizációs veszteségek hatására helyi túlmelegedés, majd az elégtelen hővezetés miatt **buborék képződik, PD, akár közvetlen hő-villamos átütés jön létre (analógia: „50Hz-es mikrohullámú sütő”!!).**
- Esetünkben az **50Hz-es értékhez tartozó tgδ érték a fontos, hogy üzemben mekkora hő** termelődik a szigetelésben.
- Ha beindul a **buborék** képződés, akkor **átütés** lehet a folyamat vége.
- **Cél: megakadályozni, hogy buborékok képződjenek.**



- Ismerjük, hogy a határréteg polarizáció milyen sok információt tartalmaz. Feladatunk a határréteg polarizáció spektrumának megfelelő kiértékelése.
- A BME mérésekből és a mi gyakorlatunkból is ismert, hogy a határréteg polarizáció időállandója 20°C hőmérsékleten 5000 s körüli, ha új állapotú és száraz a szigetelés (víztartalom 0,5% alatt).
- Ha a szigetelés **elkezd nedvesedni és öregedni**, a polarizáció **időállandója annyira lecsökken, hogy 3ms közelébe kerül, beindul a buborékképződés, az olaj-papír szigetelés átüt.**
- Nagytrafók esetén a papír víztartalmának növekedése 4% értékre (ami már a papírszigetelés **végállapota**), az időállandó értéke 20°C hőmérsékleten 0,1s értékűre esik le.
- A kiértékelés legpontosabban a BME adatbázis referencia spektrumaival történő összehasonlításával végezhető el.
- Egyszerűbb és gyakorlatban elegendő pontosságú a „buborék képződés kezdeti hőmérsékletének” alapuló kiértékelés, amelyhez a polarizációs veszteség „rezonancia frekvenciáját” kell kiszámítani és viszonyítani az 50Hz-hez tartozó kb. 3ms-hoz.



**Buborékképződés küszöbhőmérséklete a papír víztartalma függvényében új (DP=1320) és öregedett papír (D=340) esetén**



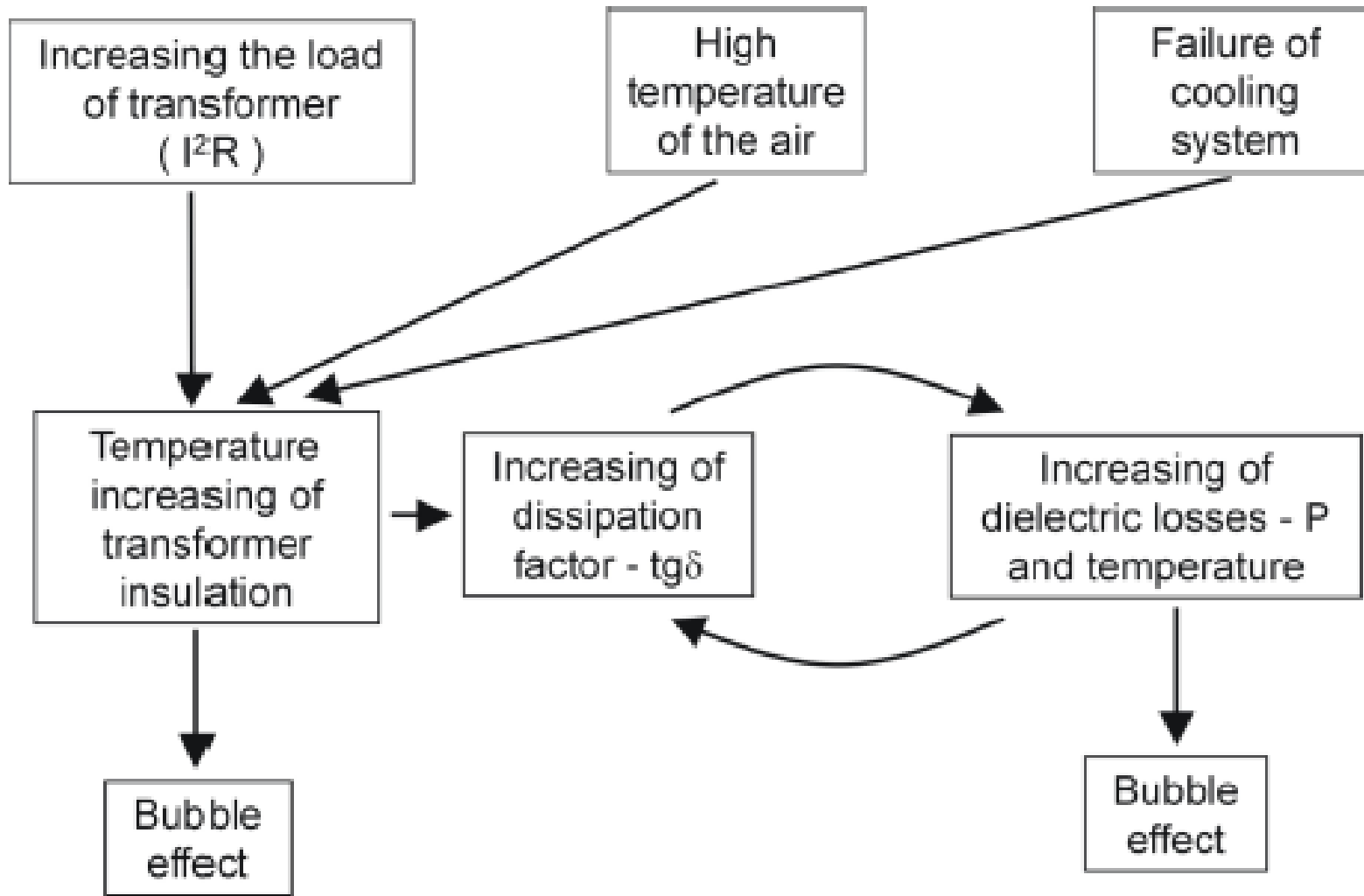


## Röviden még a buborékképződésről

- Hőmérséklet emelkedés, különösen **vastag rétegben**, nagy gőz és gáz nyomás mellett **elgőzölögteti az adszorbeált vizet**.
- Nyomás **nagy lehet**, kinyomja az olajat a **papír makro kapillárisaiból**.
- Két veszélyes helyzetet lehet: - Vízgőz **üregek keletkeznek (buborékok)** a szigetelés felületén, ezáltal csökken a villamos szilárdság, **menetszigetelés de-impregnálódik**. Ha a belsőnyomás növekedése nagyobb, mint az ellene ható erők hatása, a **vízgőz távozni fog a papír makro kapillárisaiból**.
- Főleg a cellulóza makro **kapillárisaiban lévő vízből** keletkeznek a **buborékok**, de az öregedés során keletkező **CO** ugyancsak hozzájárul a buborékok képződéséhez.
- Buborék képződést befolyásolják: **hőmérséklet, víztartalom, a poláros szennyezések, öregedési termékek, cellulóza szerkezete és minősége**.
- A különböző tanulmányok azt mutatják, hogy a kapillárisok átmérője **0,01 – 7µm** között változhat.
- A buborék keletkezését okozó **felületi feszültség függ a hőmérséklettől**.

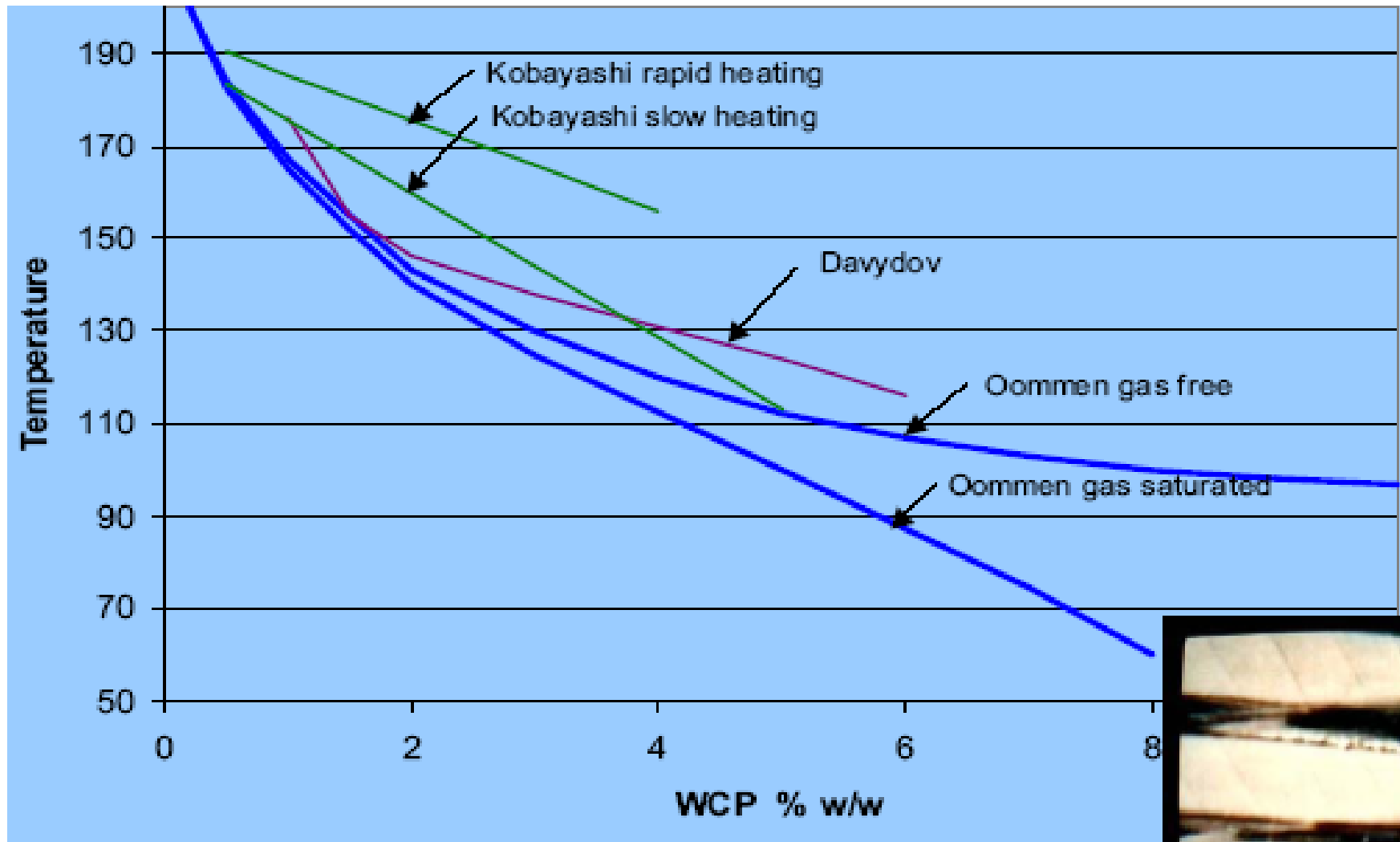


## A buborékképződés mechanizmusa az olaj-papír szigetelésben



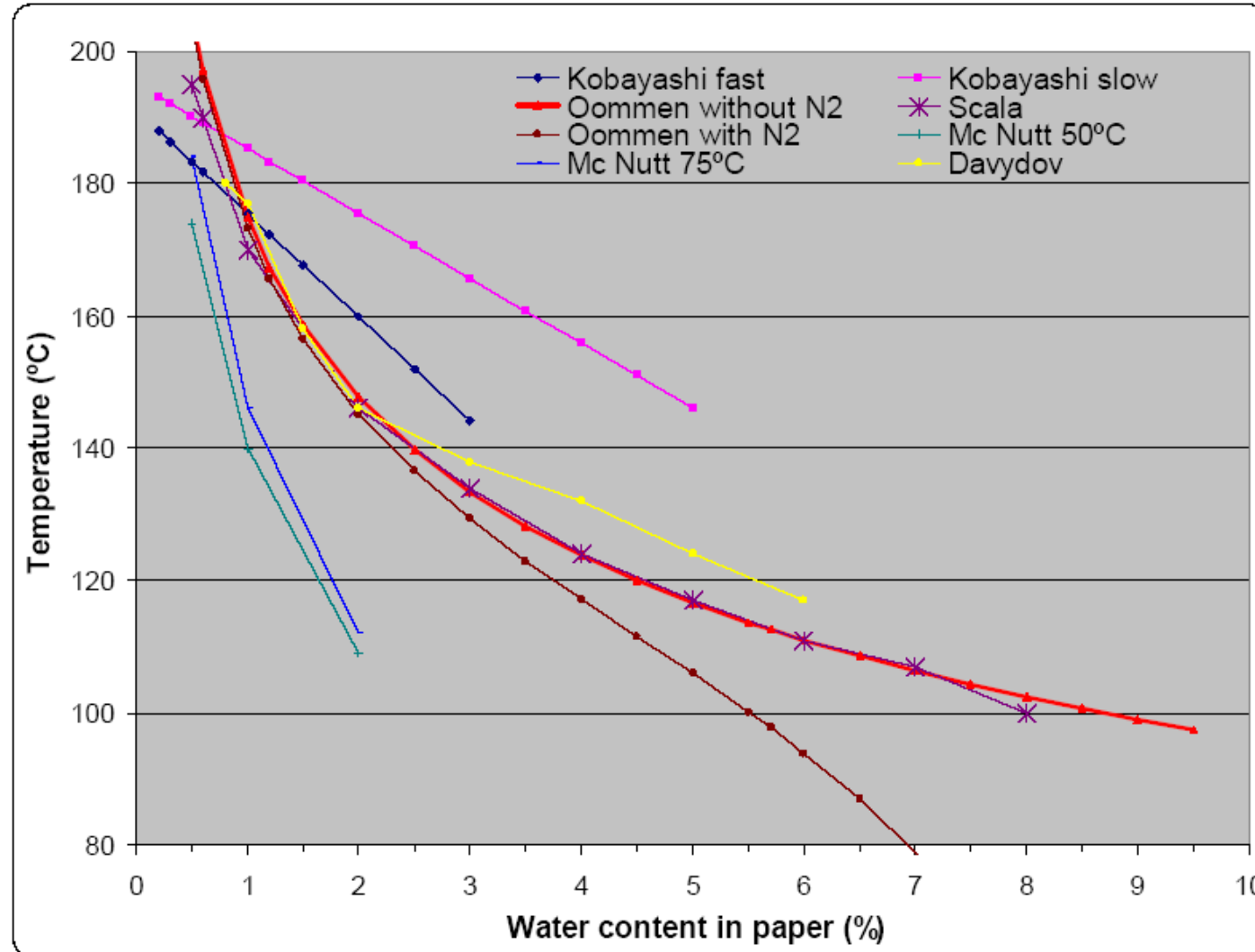


## Buborékképződés kritikus hőmérsékletei: Oommen, Davydov és Kobayashi görbék



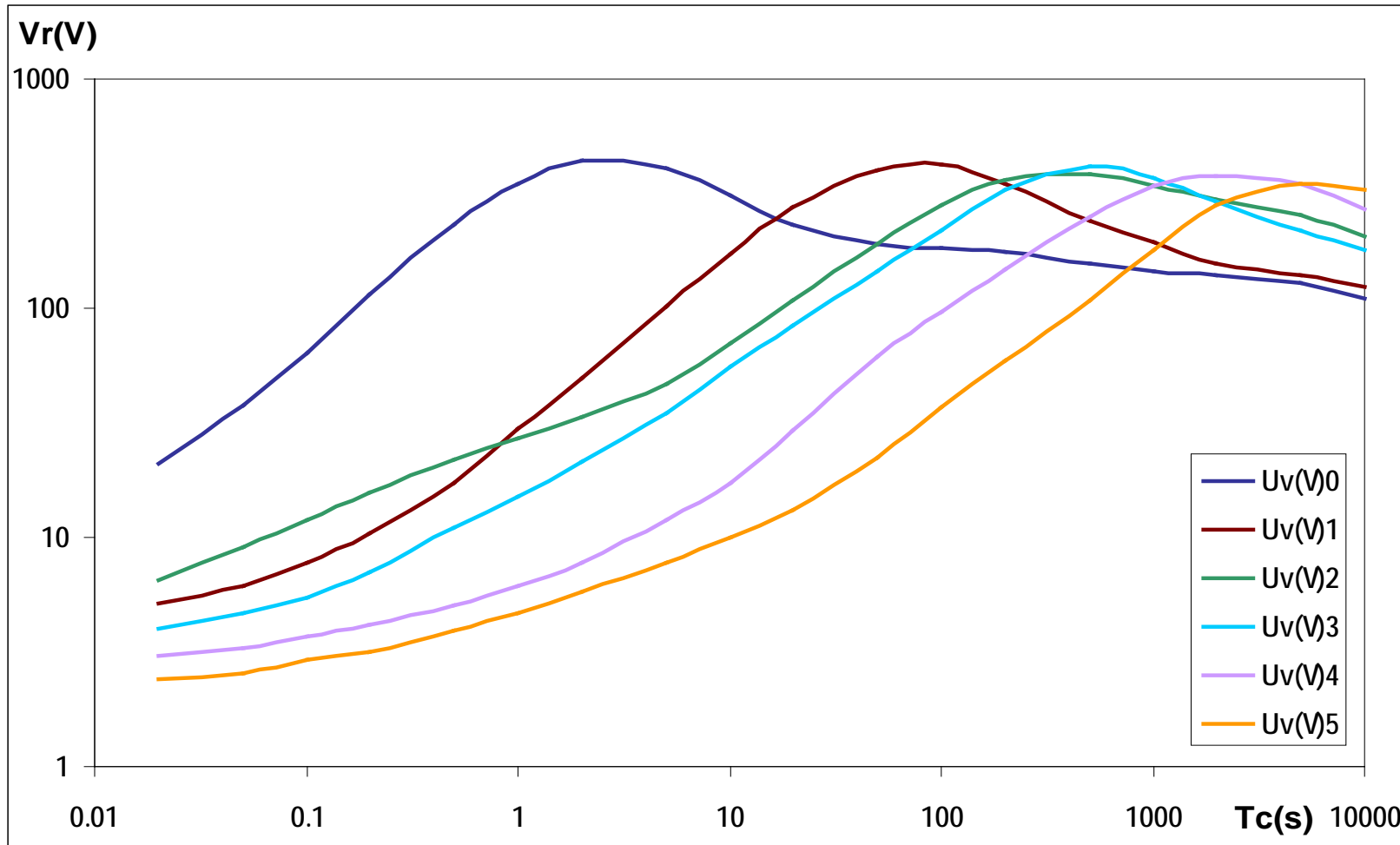


## Buborékképződési küszöb hőmérséklet a papír víztartalma függvényében





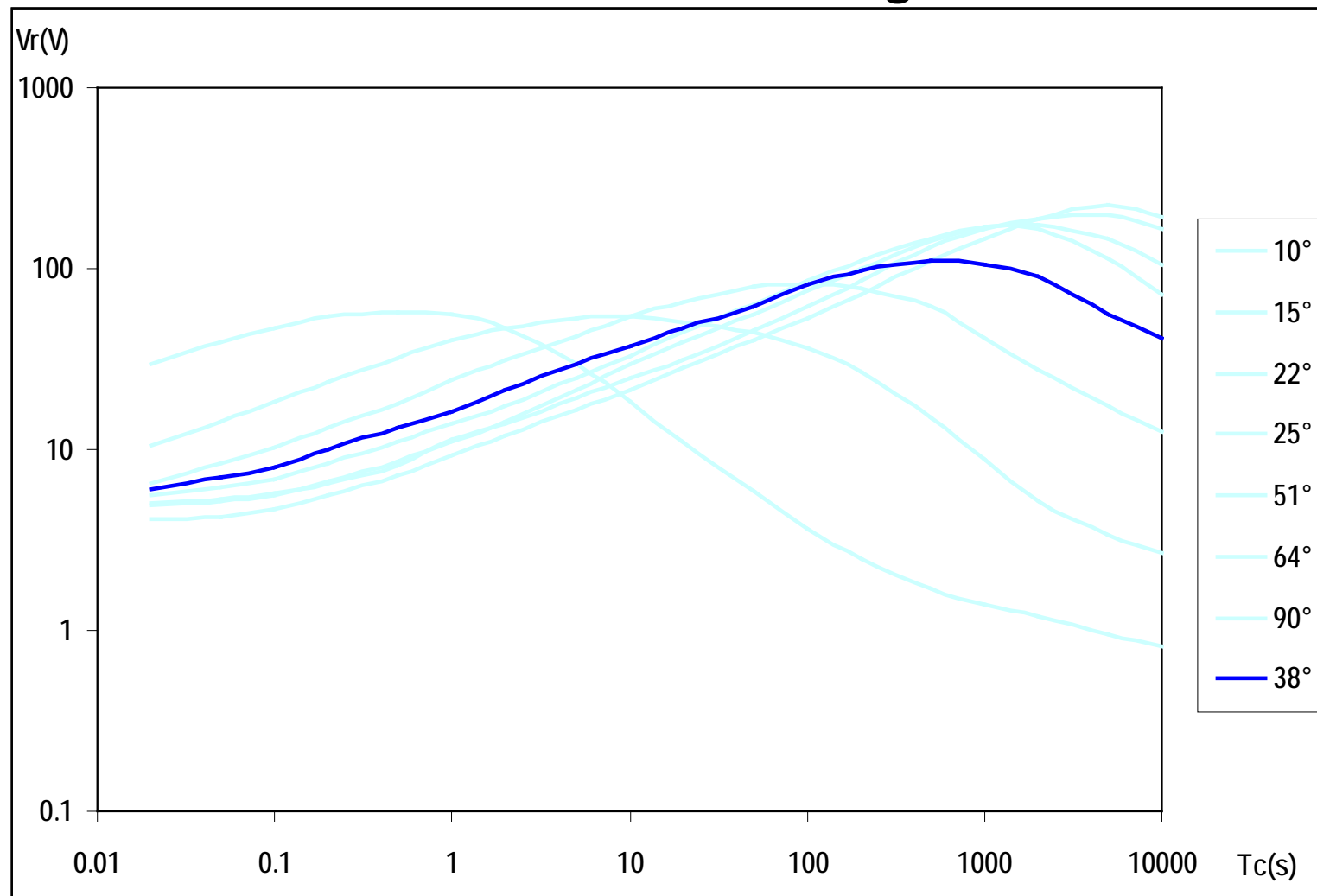
**RVM spektrumok mozgása a papír víztartalmának függvényében: a polarizáció időállandója folyamatosan közelít az 50HZ hálózati feszültség 3ms időállandóhoz.**





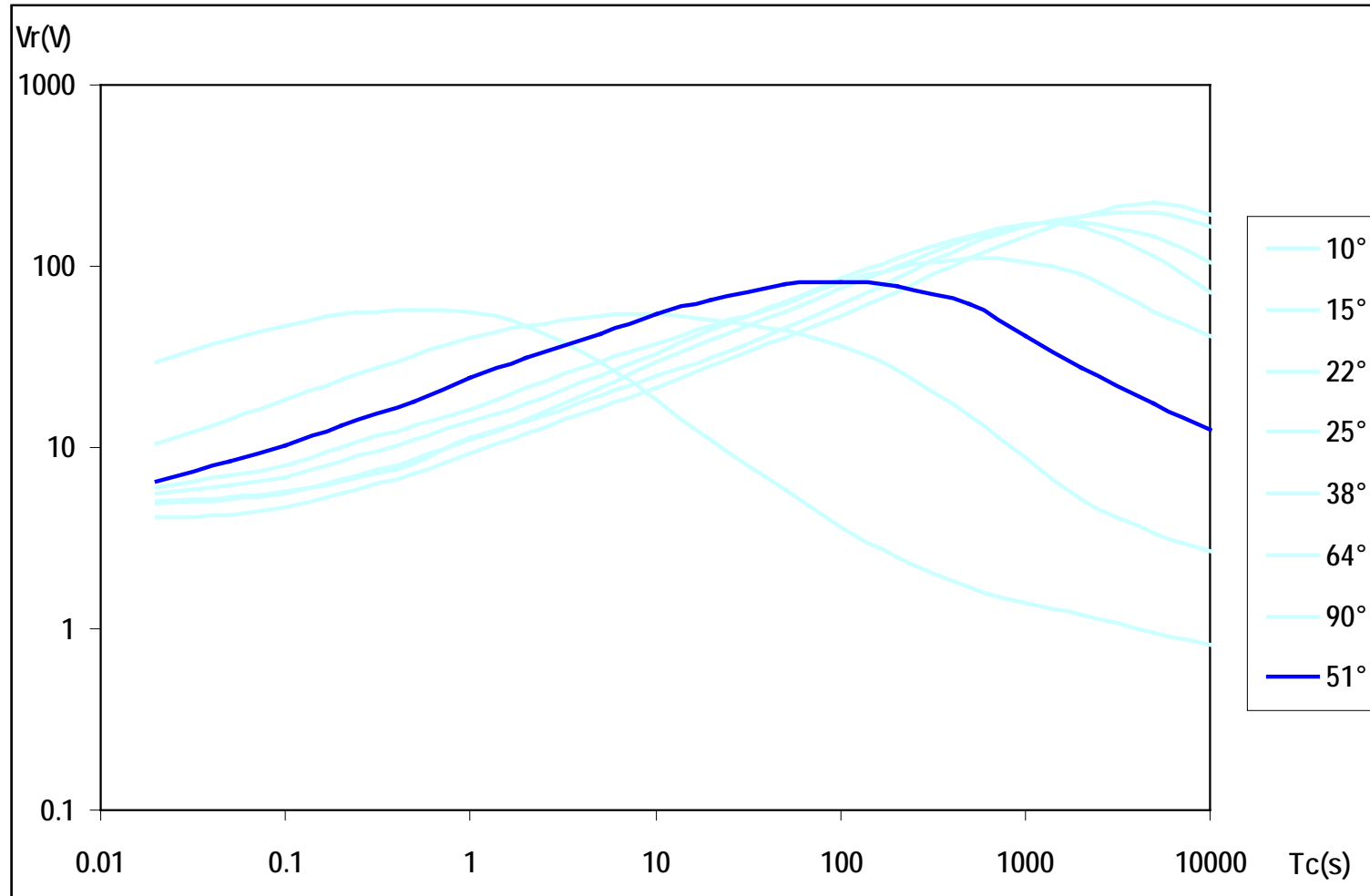


**Az RVM „spektrum” görbéje a papír víztartalmának függvényében folyamatosan közelít az 50Hz-es feszültség 3ms-hoz.**



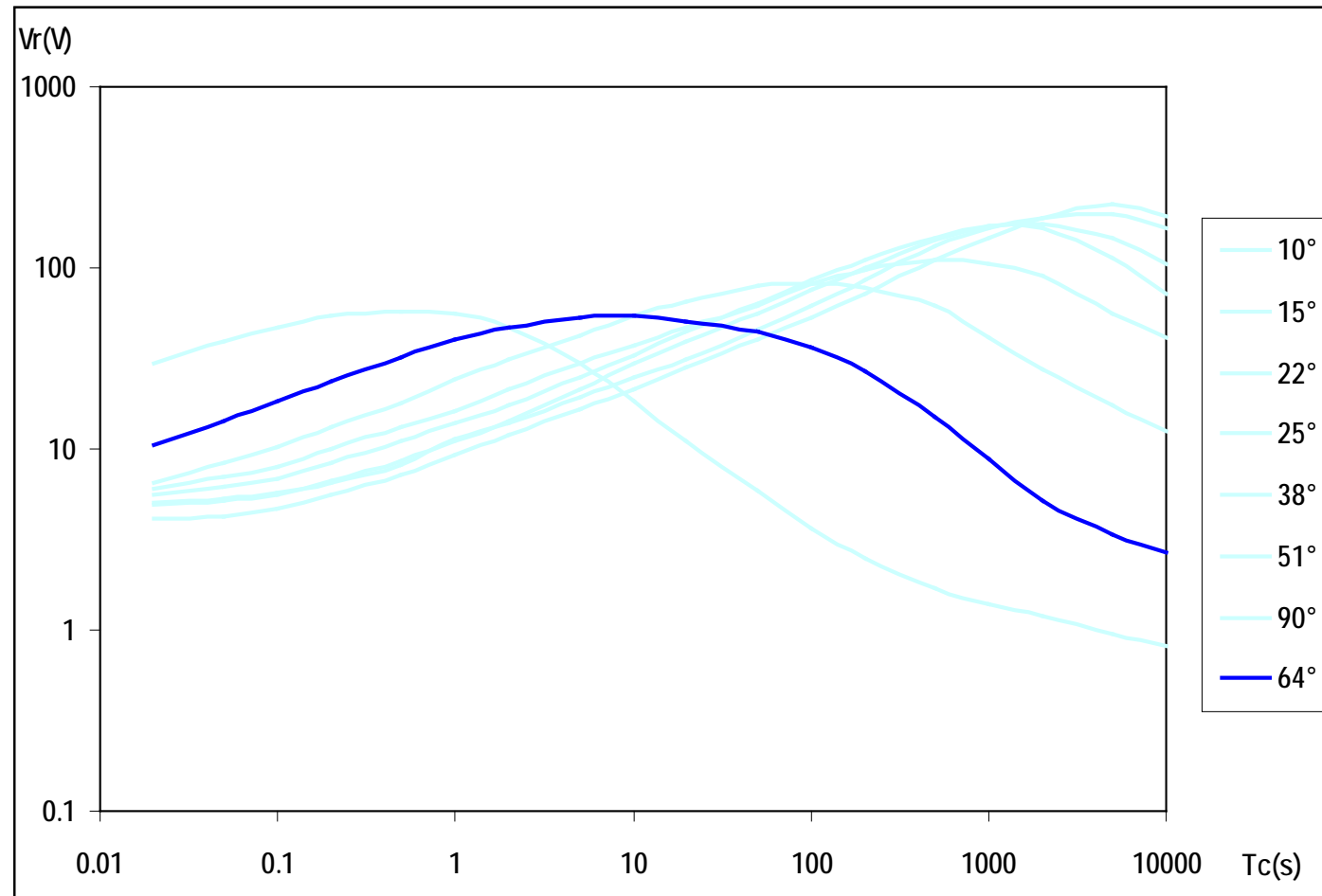


**Az RVM „spektrum” görbéje a papír víztartalmának függvényében folyamatosan közelít az 50Hz-es feszültség 3ms-hoz.**



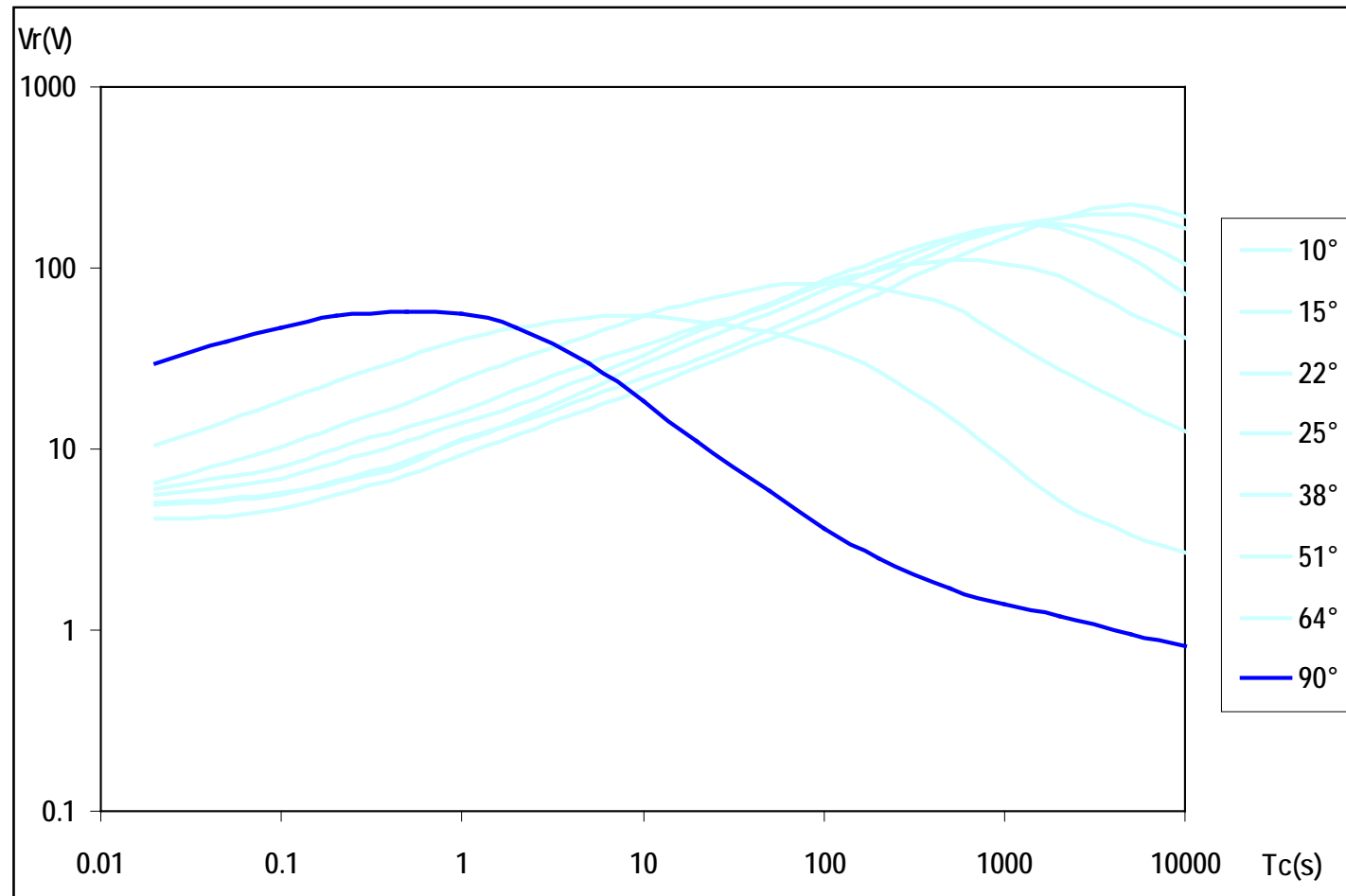


**Az RVM „spektrum” görbéje a papír víztartalmának függvényében folyamatosan közelít az 50Hz-es feszültség 3ms-hoz.**



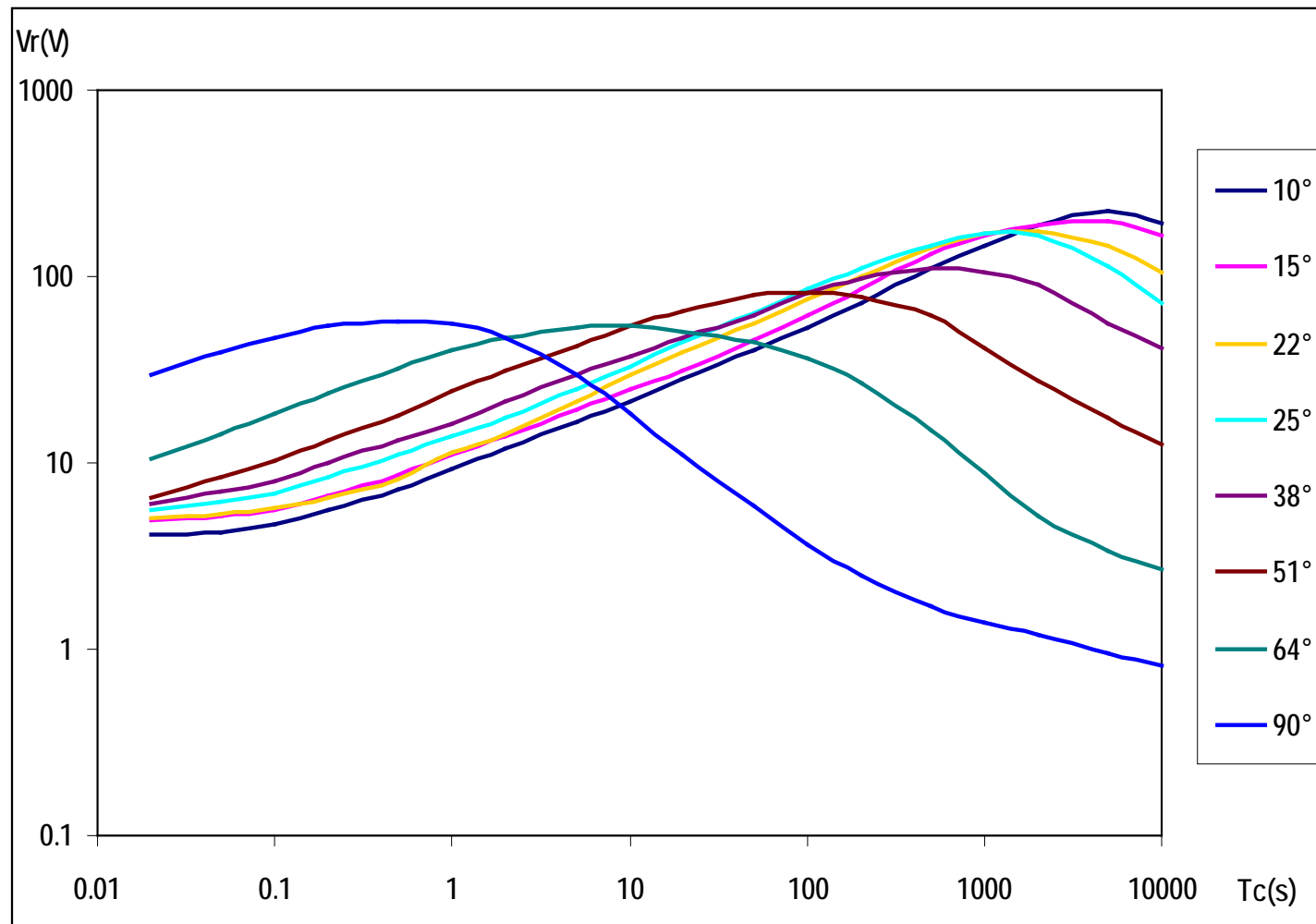


**Az RVM „spektrum” görbéje a papír víztartalmának függvényében folyamatosan közelít az 50Hz-es feszültség 3ms-hoz.**



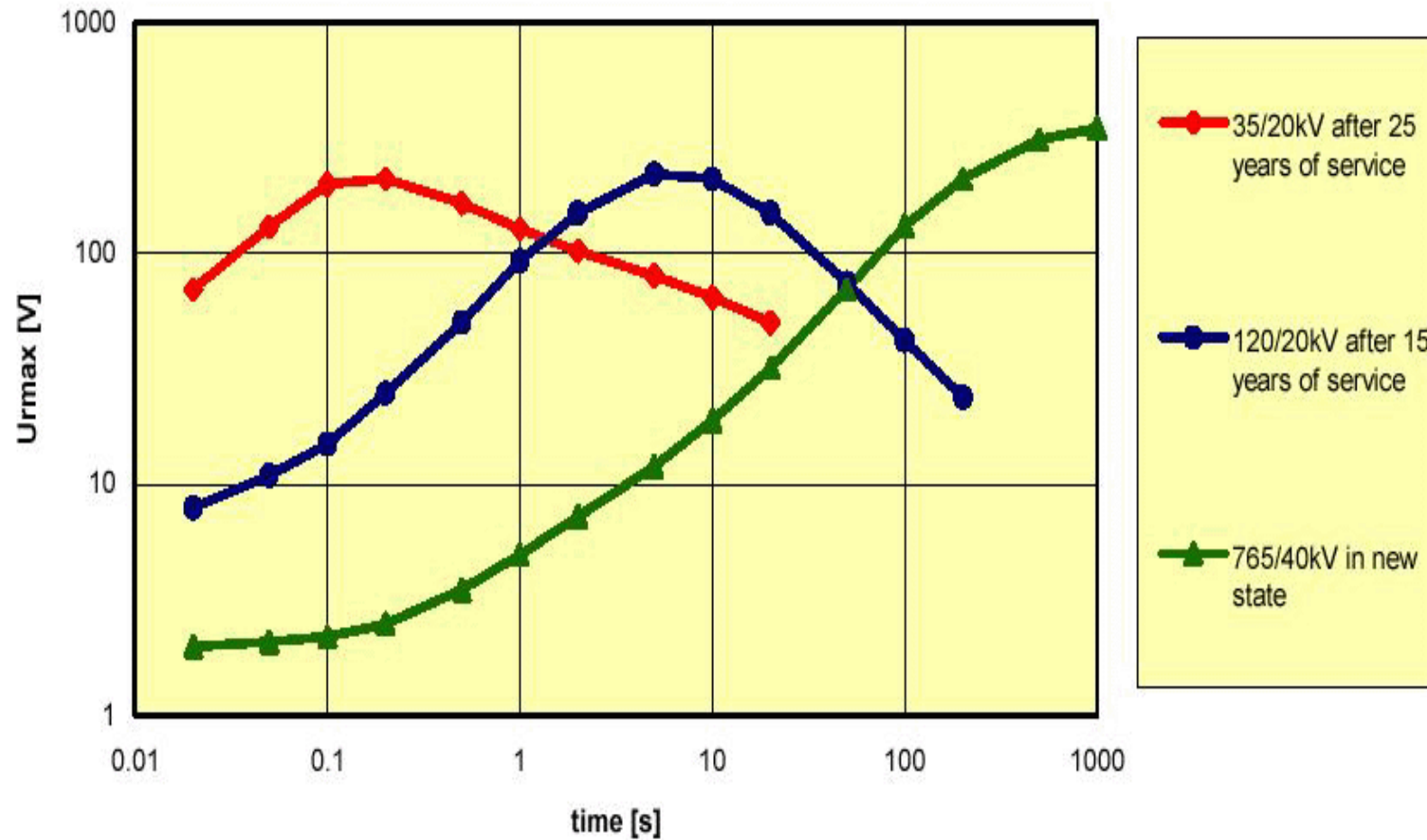


**Az RVM „spektrum” görbéje a papír víztartalmának függvényében folyamatosan közelít az 50Hz-es feszültség 3ms-hoz.**





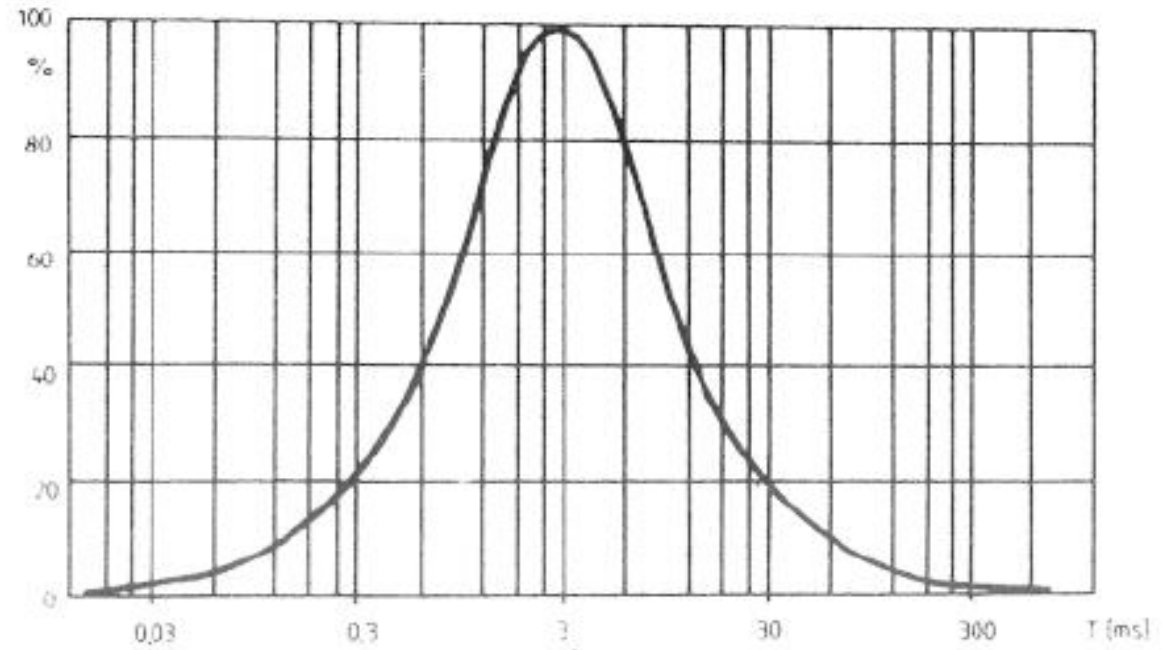
## Tipikus RVM görbék új, közép idős és nagyon öreg trafók esetén



A hő-villamos átütés úgy jön létre, hogy a **térerősség** következtében jelentkező polarizációs és vezetési veszteségi tényező **felmelegíti az anyagot és a meleg anyagnak annyira lecsökken a villamos szilárdsága, hogy a hidegen mérhető átütési térerősségnél sokkal kisebb igénybevétel is átütést okoz.**

Ha az **időállandó függvényében konstans eloszlású polarizációt** feltételezünk, akkor adott frekvencián az alábbi ábrán látható módon alakul a polarizáció okozta veszteség az elemi folyamatokra vonatkoztatva (**50Hz esetén „r” a viszonylagos veszteség**).

$$T = \frac{1}{2\pi f} \approx 3$$



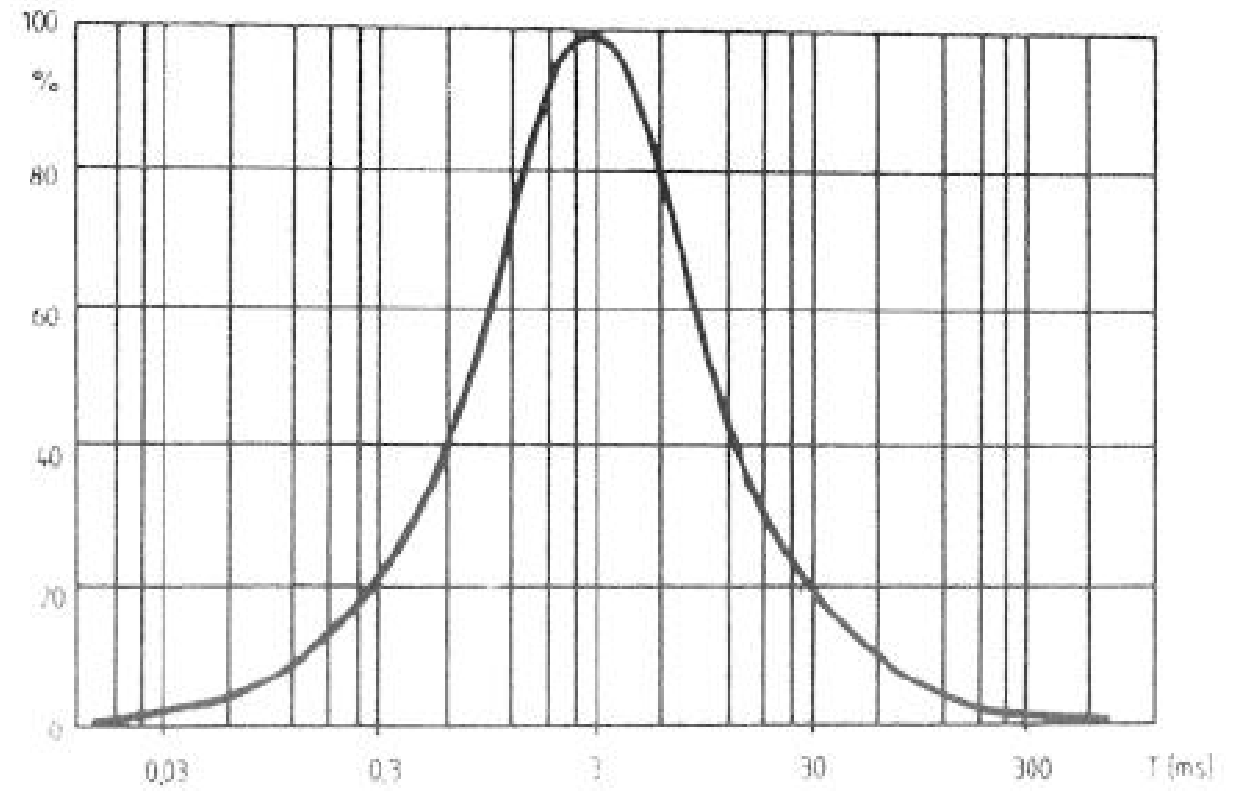
**Az elemi folyamatokra vonatkoztatott viszonylagos veszteség (tgδ) 50Hz-es mérőfrekvencián: r (%). 50 Hz-nek megfelelő időállandó ms mértékegységben**



**Az elemi folyamatokra vonatkoztatott viszonylagos veszteség ( $\text{tg}\delta$ ) 50Hz-es mérőfrekvencián:  $r$  (%). 50 Hz-nek megfelelő időállandó „ms” mértékegységben**

Látható, **hogy maximális veszteség a  $T=1/\omega$  időállandónál (kb. 3ms) lép fel**, ettől kisebb vagy nagyobb frekvenciánál a veszteség erősen csökken.

**Egy nagyságrenddel** kisebb vagy nagyobb frekvenciák esetén a polarizáció által okozott veszteség a maximális veszteségnek már csak **kb. 20%-a**, **két nagyságrenddel** eltérésnél pedig a maximális veszteség csak **3%-a**.



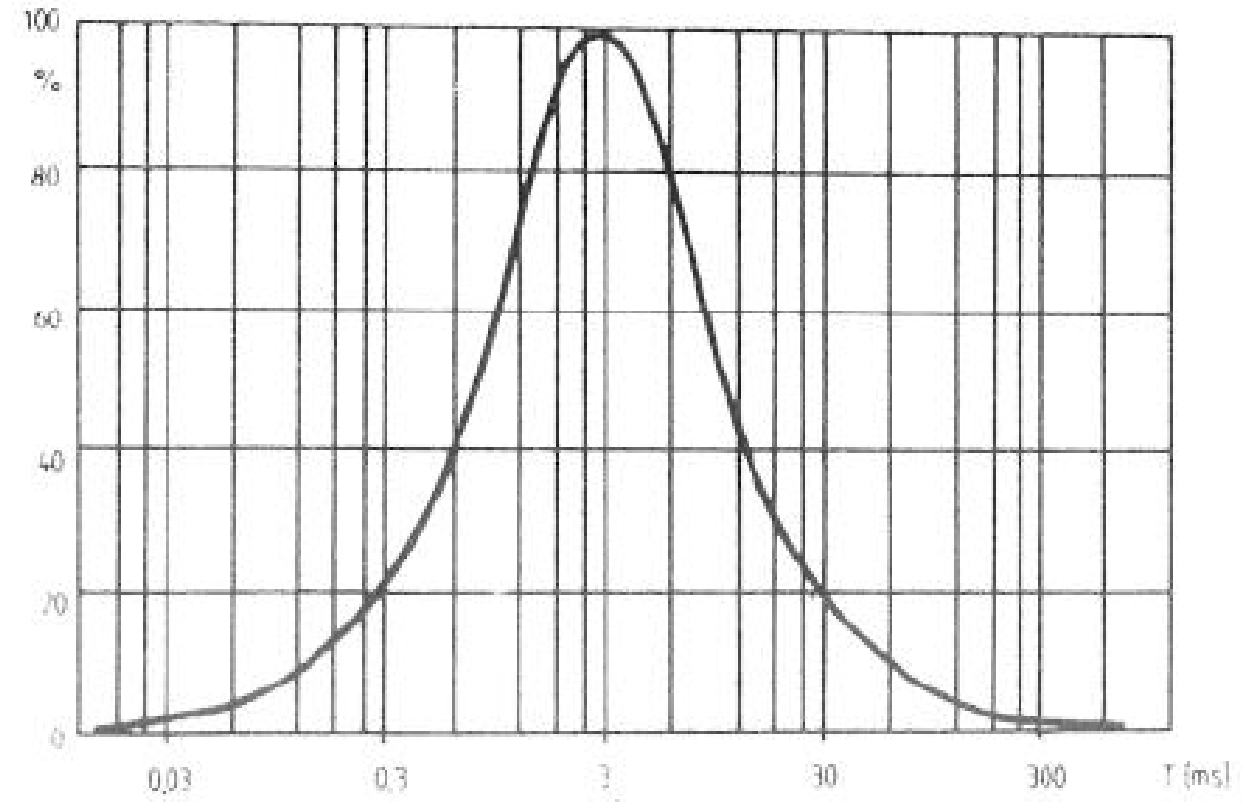


Az időállandó függvényében folytonosan eloszló polarizációs folyamatú szigetelőanyagban egy meghatározott „ $\omega$ ” **körfrekvencián ( $T=1/\omega$  időállandónál)** mért veszteséget azok az elemi polarizációs folyamatok befolyásolják lényegesen, amelyeknek az időállandója  $T_p$  a következő  $T_{\text{alsó}}$  és  $T_{\text{felső}}$  határok között esik:

$$T_{\text{alsó}} \approx \frac{1}{10\omega} < T < \frac{10}{\omega} \approx T_{\text{felső}}$$

Azok az elemi folyamatok, amelyeknek az időállandója a **következő határokon kívül esik, a mért veszteséget gyakorlatilag nem befolyásolják.**

$$T_{\text{alsó}} \approx \frac{1}{10^2\omega} < T < \frac{10^2}{\omega} \approx T_{\text{felső}}$$



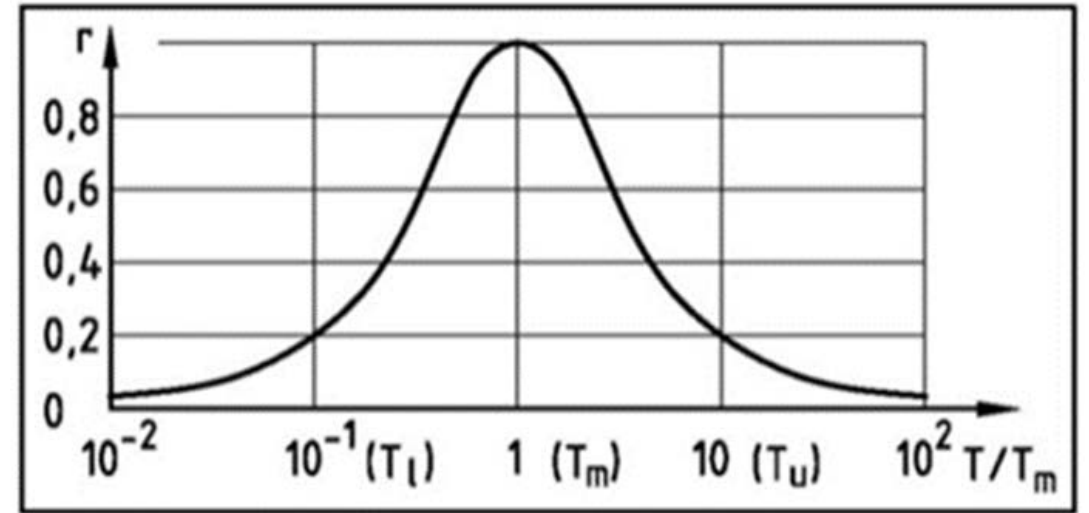
50 Hz esetén  $T=1/2\pi f = 3$  ms elemi folyamatok okozzák a legnagyobb veszteséget, az ettől eltérők - az előzőekben tárgyaltaknak megfelelően - kisebb mértékben fejtik hatásukat.



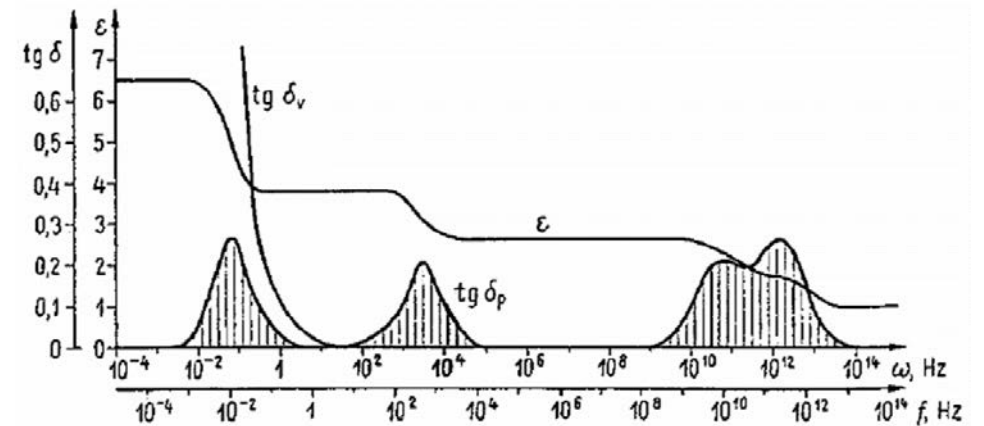
Az 50 Hz környezetében (mint rezonancia frekvencián) keletkező dielektromos veszteség a jobboldalifelső ábrán látható.

Estünkben az üzemi feszültség 50 Hz, a hozzátartozó polarizáció időállandója  $T_m = 1/\omega \sim 3\text{ms}$ .

A jobboldali felső és alsó ábrán jól látható, hogy polarizációs veszteség csak a „rezonancia” frekvencián, ill. két nagyságrendű közelében van (0,3 s-nál legyen nagyobbak az időállandók. Tehát veszteség csak akkor keletkezik, ha a polarizáció időállandójáú frekvenciás feszültséggel gerjesztjük (3ms).



50 Hz körüli időállandó tartomány

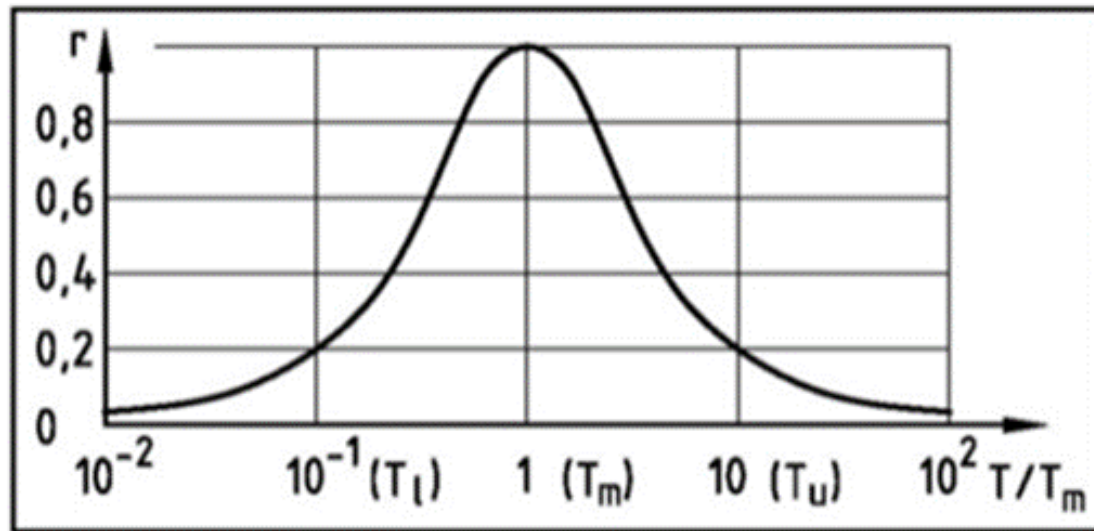


tgδ εr időállandó / frekvencia függése

- Ha akkora a **veszteség hő, hogy beindul a buborékképződés**, akkor **átütés lehet** a folyamat vége.
- Tehát a **diagnosztika alapja** az, hogy a **polarizációs veszteségek** hatására ne jöjjön létre olyan helyi túlmelegedés, ami akár **közvetlen hő-villamos átütést okozna**.
- Az **RVM görbékről közvetlenül leolvasható**, hogy milyen **domináns időállandók** fordulnak elő a **mérési hőmérsékleten**.
- Ezeket az **időállandókat át kell számítani a maximálisan megengedett üzemi hőmérsékletekre** és akkor megkapjuk, hogy a legnagyobb hőmérsékleten az adott állapotú szigetelésben milyen veszteség termelődik.
- Legnagyobb a **veszteség a 3 ms értékében**, két nagyságrenddel eltérő értéken viszont már **elhanyagolható**. Tehát azt a célt kell kitűzni, hogy **ne legyen olyan időállandó a spektrumban**, amely két nagyságrenddel **megközelíti a 3 ms-os értéket**.
- Azaz, a legnagyobb üzemi hőmérsékleten 0,3 s-nál ne legyen kisebb időállandó.
- **Ha ez mégis bekövetkezik**, akkor a megfelelő karbantartásig vagy javításig **nem engedünk meg olyan nagy üzemi hőmérsékletet**, csökkentjük a terhelést és fokozzuk a hűtést, lehetővé téve a biztonságos üzemelést.



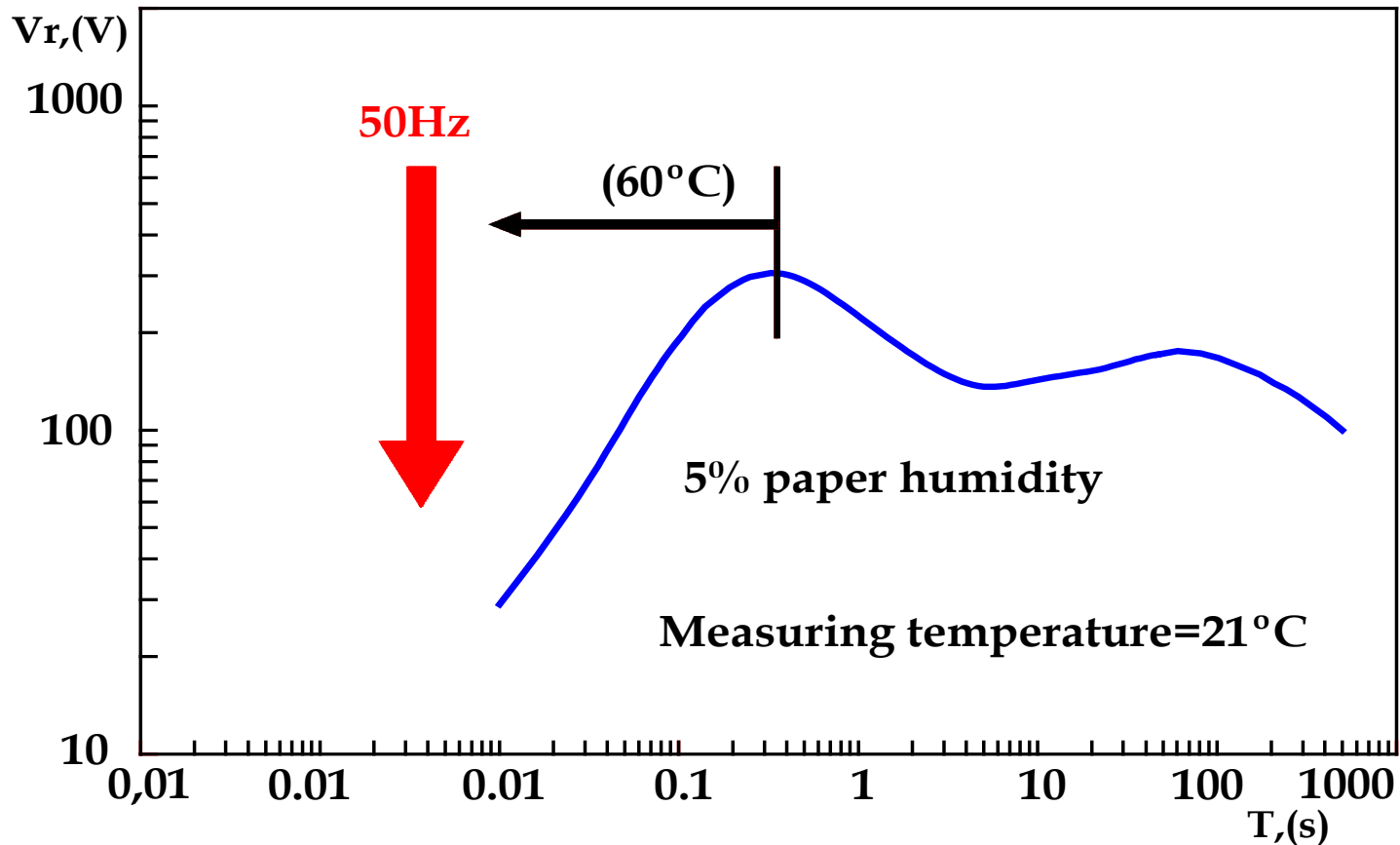
- **Célkitűzés:** a domináns centrális időállandók bármelyike bármely hőmérsékleten 0,3 s-nál biztosan nagyobbak legyenek.
- Ha ebben a tartományban, **valahol a szigetelésben**, ahol **lokálisan nagy a térerősség is**, akkor nagyobb a polarizációs veszteség is, **helyileg** túlzottan megnőhet a veszteség és túlzottan megemelkedik a hőmérséklet, elérheti a **buborékképződés küszöb hőmérsékletét**, vagy **megnőhet a veszteség és hő-villamos átütés jön létre.**



**50 Hz körüli időállandó tartomány**



**Cél, hogy a 3 ms környezetében még a legnagyobb üzemi hőfokon sem legyen jelentős polarizáció.** Ez a trafó üzemben ütött át kb. 60 fokon. RVM mérés és a BME adatbázis alapján az „egyenértékű” nedvességtartalom kb. 5%, de ami fontos, hogy üzemi hőfokon a legkisebb domináns időállandó kb. **3ms volt, tehát megindulhatott a buborékképződés.**



Ez a trafó az adott üzemi hőfokon már nem volt biztonságosan üzemeltethető, sőt szükségeszerű volt az átütés, mert beindult a **buborékkiválás.**



## Röviden az RVM gyakorlatában az alábbi kiértékelés adható:

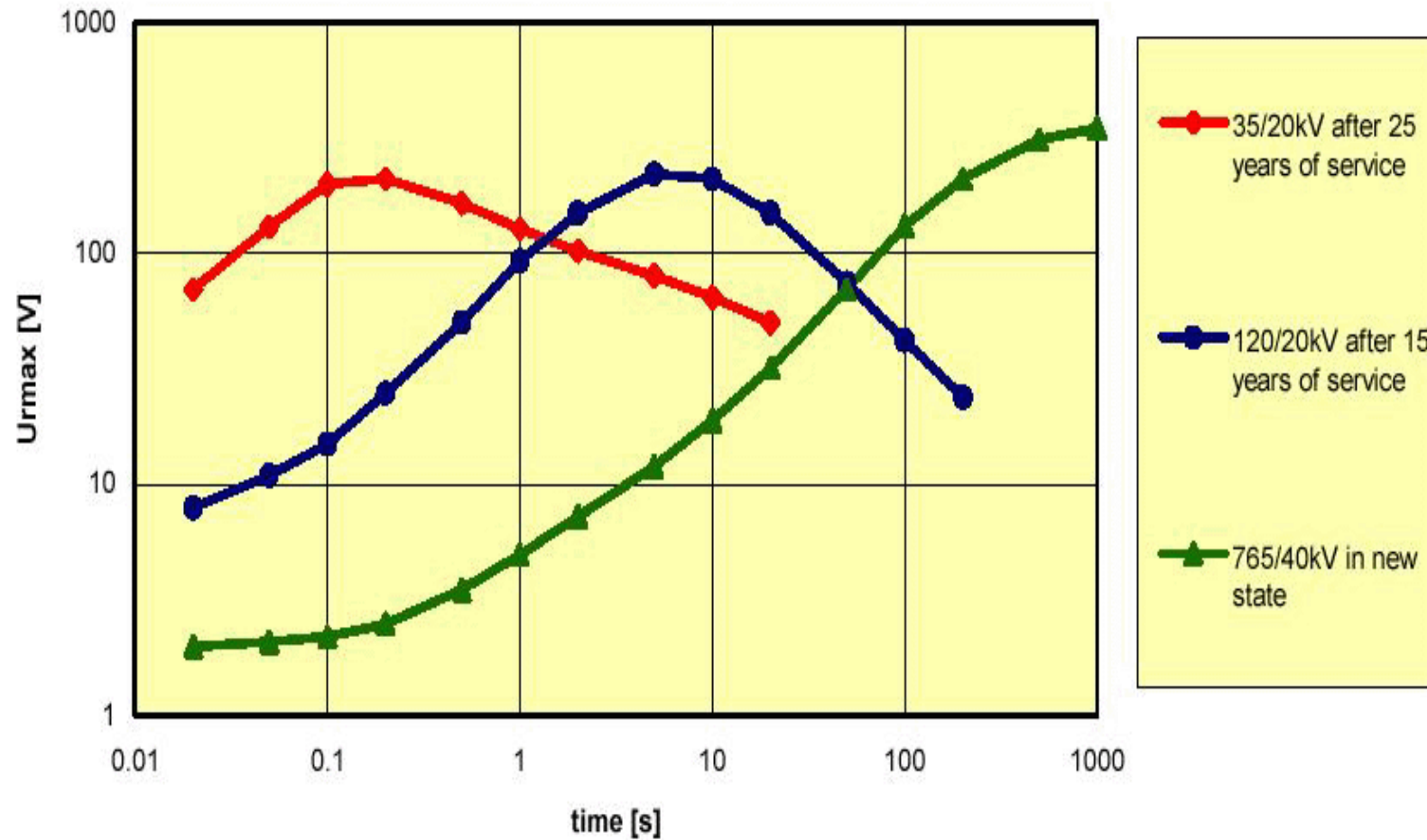
- Fel kell venni 20ms-2000s (5000s) közötti RVM spektrumot.
- Ismert a **domináns centrális időállandók hőfokfüggése (BME)**.
- **Számítsuk át a domináns időállandókat 20°C, ill. legnagyobb üzemi hőfokra.**
- Megfelelő az a szigetelés, amelyeknek a domináns időállandói **legnagyobb üzemi hőfokon nem kisebbek, mint 300 ms.**
- Ez a kritérium a **hő-villamos átütés (buborékképződés)** megfelelő biztonságú elkerüléséből állítható fel.
- **Az állapotok összehasonlítása céljából vehetjük a 20°C-ra történő átszámítást is:** megfelelő az a szigetelés, amelyeknek a domináns időállandói **nagyobbak, mint 1s és a 20ms-1s-os tartományban sem jelentős a polarizáció intenzitása.**
- Belátható, hogy **ugyanazt az eredményt** kapjuk polarizációs **veszteség, valamint buborékképződés** szempontjából az **alacsony hőmérsékleten üzemeltetett nedvesebb egységre**, mint kisebb víztartalmú trafó nagyobb hőmérsékletű üzemeltetésére.
- A buborék képződés és a hő-villamos átütés kockázata mindkét esetben lényegében azonos.



- Ha az **üzemviteli körülmények úgy alakulnak**, hogy a trafó a fenti követelményeket nem teljesíti, de bizonyos ideig az egységnek **üzemben kell maradnia**, akkor az alábbi javasolható: ha a **domináns időállandók kicsik**, ezért csak olyan **üzemi hőfokot engedünk meg**, amelynél a legkisebb domináns **időállandó is nagyobb, mint 300ms**.
- **Ez kisebb lesz, mint az olaj-papír rendszerre megengedett hőfok, de üzemben tartható egy olajregenerálásig.**
- **De figyelni kell arra a tényre**, hogy az alacsonyabb időállandó azért adódott, mert **nedves vagy öreg öregedési termékekkel telített a rendszer**, és mint azt korábban láthattuk, a **papír degradációja ebben az esetben rohamosabb**, tehát tartósan ez az állapot sem tartható fenn.
- Megállapítjuk a romlás okát és beavatkozunk: ha **nedves a papír akkor szárítunk, ha öregedés is van, akkor regenerálunk.**
- **Üzemvitel szempontjából ez a tudás és abból fakadó megoldás könnyebbséget jelent**, mert bár üzemzavar veszélyes az egység, de nem kell azonnali leállni, vagy cserét végrehajtani, a **hálózaton lévő egységek szigetelési állapotát ismerve optimális megoldás választható.**



## Tipikus RVM görbék új, közép idős és nagyon öreg trafók esetén





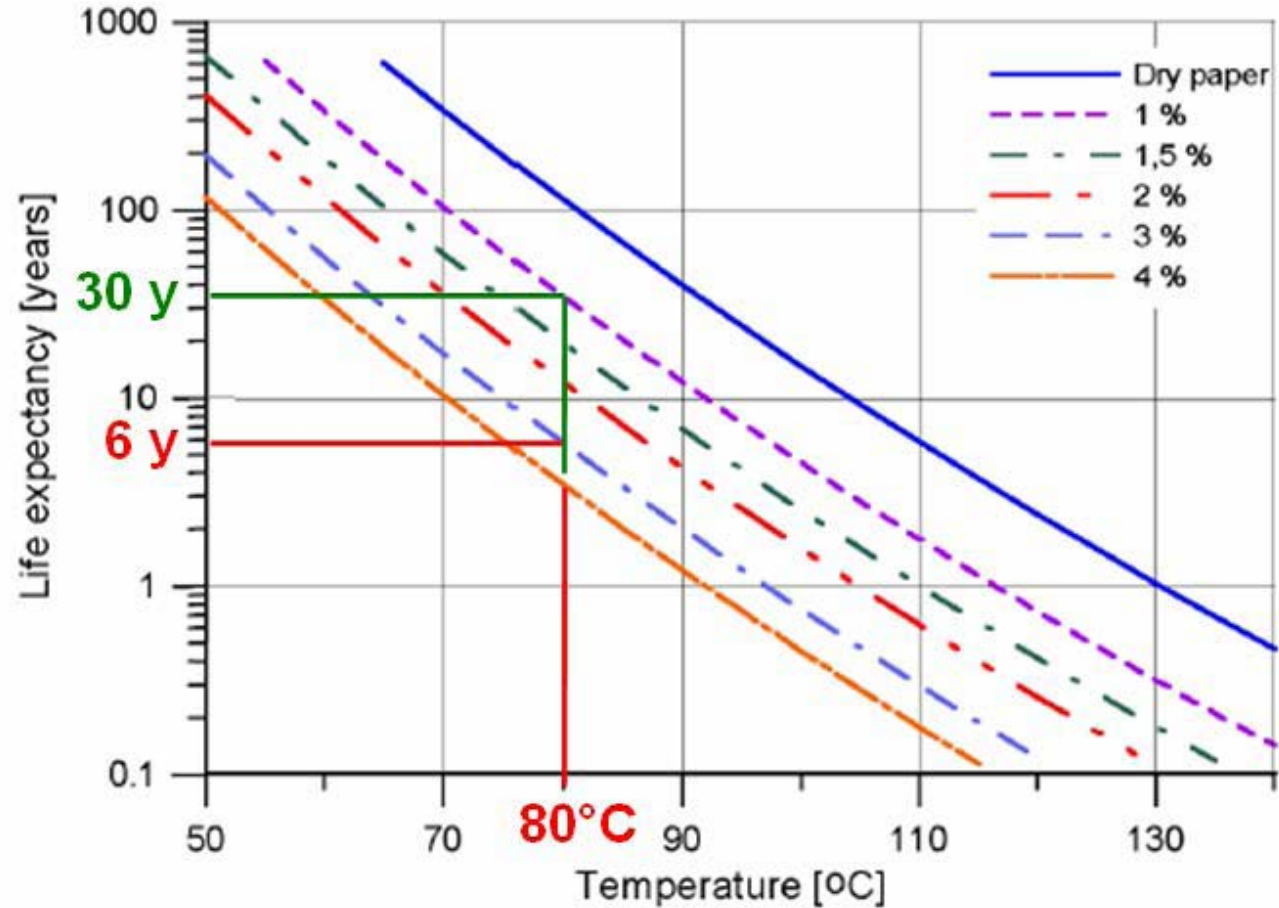


## Trafó élettartam függés a hőmérséklettől és a nedvességtartalomtól (öregedés?)

Moisture in  
paper (%)

1%

3%

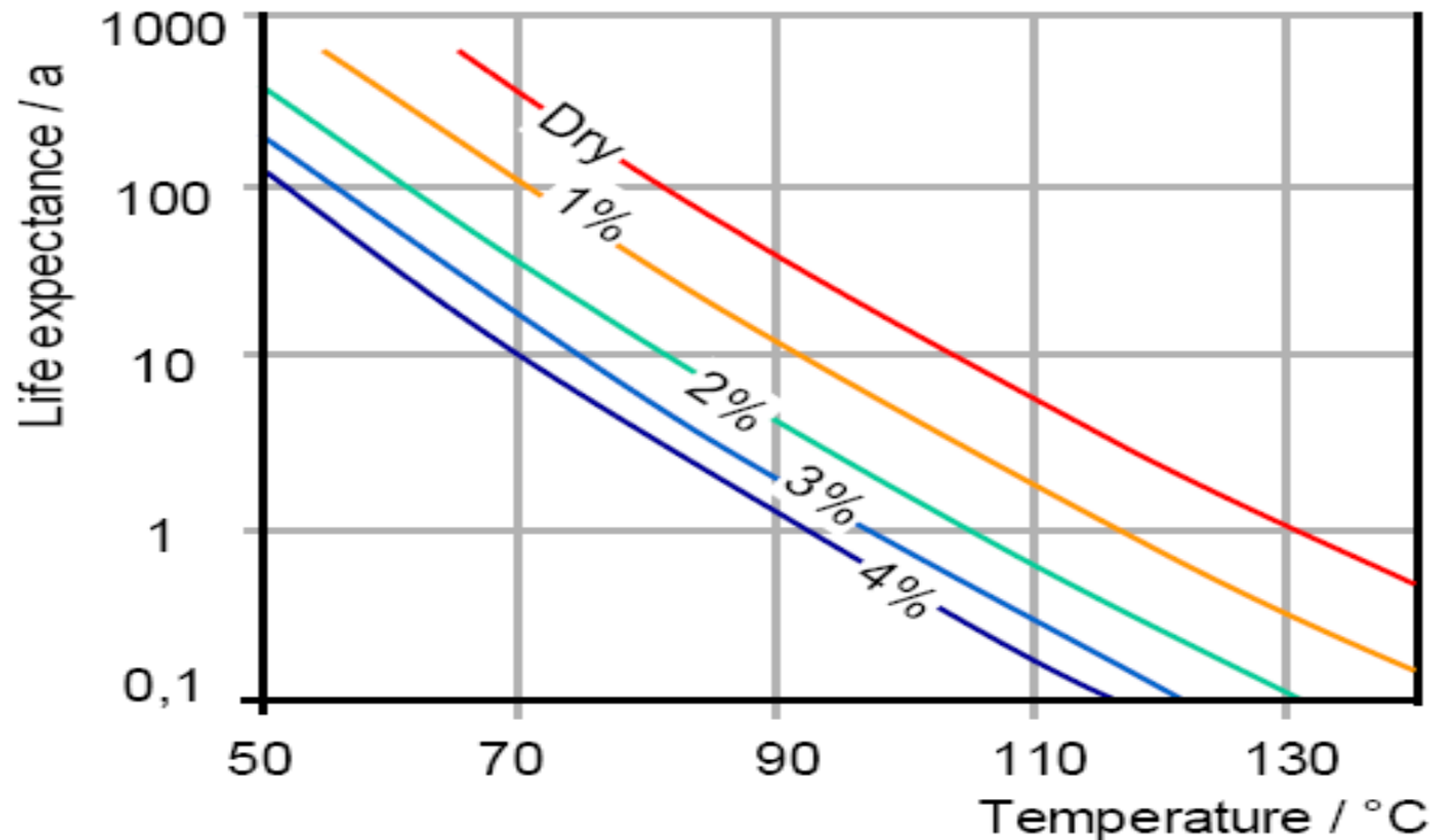


Source: SINTEF

**80°C-on üzemeltetve a trafót 1% papír víztartalomnál a várható élettartam kb. 30 év.  
Ha a víztartalom 3%-ra nőne, akkor a várható élettartam kb. 6 évre csökkenne.**



**Olaj-papír szigetelés víz hatására történő élettartam változásra még nincs IEC (IEEE igen) szabvány, csak tanulmányok, útmutatók állnak rendelkezésre. A technikailag száraz trafó élettartama nedvesség növekedésre úgy változik, mintha növeltük volna a hőmérsékletet.**





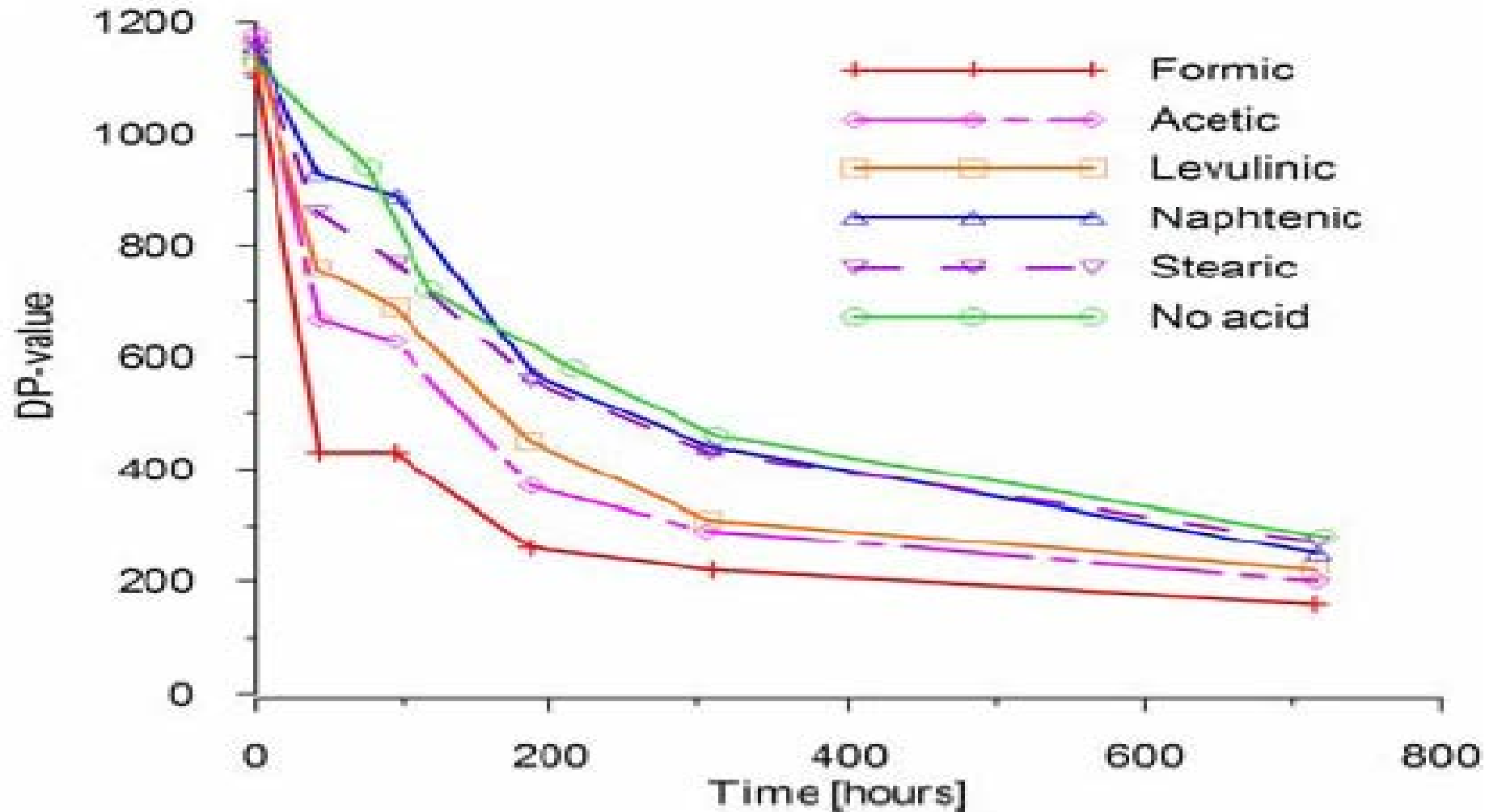
# BEAVATKOZÁSI LEHETŐSÉGEK AZ RVM DIAGNOSZTIKA UTÁN: OLAJREGENERÁLÁS



- Nagy **papír víztartalom**, jelentős a felhalmozódott olaj **öregedési termék** esetén, már **névleges terhelésen** buborékképződés, PD indulhat be.
- A gyakorlatban **kis értékre csökkent centrális időállandó** esetén **sem szükséges az azonnali kikapcsolás**. Ilyenkor csökkenteni kell a hőmérsékletet, azaz a terhelést.
- Mint láthattuk, hogy **ugyanazt az eredményt kapjuk polarizációs veszteség szempontjából az alacsony hőmérsékleten üzemeltetett nedvesebb egységre**, mint amit kisebb víztartalmú trafó nagyobb hőmérsékletű üzemeltetésével kapnánk (a hő-villamos átütés kockázata mindkét esetben lényegében azonos). **De figyelni kell arra a tényre**, hogy az alacsonyabb időállandó azért adódott, mert **nedves vagy öreg öregedési termékekkel telített a rendszer**, és mint azt korábban láthattuk, a **papír degradációja ebben az esetben rohamosabb**, tehát tartósan ez az állapot sem tartható fenn.
- Megállapítjuk a romlás okát és beavatkozunk: ha nedves a papír akkor szárítunk, ha öregedés is van, akkor regenerálunk.



## Különböző savak különbözően gyorsítják a papír degradációját (csökkentik a DP értékét)





## (Online) olaj regenerálás

- Ez olyan eljárás, amely a **mechanikai eszközökön túlmenően, kémiai és adszorpciós úton távolítja** el az oldható és az oldhatatlan szennyeződések az olajból abból a célból, hogy jellemzőit, amennyire csak lehet, az **eredeti értékre állítsa vissza**.
- Üzemelő trafónál hatékonyabb az eljárás, mert az állandó 100Hz-es rezgés elősegíti, hogy a papír rétegei közül minél több öregedési termék kerüljön **„kimosásra”**.
- Az olajcsere és olajregenerálás: trafó élettartamának kiterjesztésére **olajregenerálással egyértelműen hatékonyabb, gazdaságosabb és környezetkímélőbb eljárás**.
- Ez azért van, mert az öregedési termékek nagy része (**kb. 9/10 része**) a **papírosban** vagy annak felületén halmozódik fel, és csak **1/10 öregedési termék van az olajban**. Az **„egyszerű olajcserével” csak ez az 1/10 öregedési termék kerül eltávolításra**, az öregedési **termékek 9/10 része a papírrétegek között marad** és az újra bekapcsolás után az öregedési termékek egy része „kimosódik” a papírrétegek közül és az olaj paramétereit rövid időn **belül hasonló rossz értékekkel fognak rendelkezni, mint olajcsere előtt voltak**.

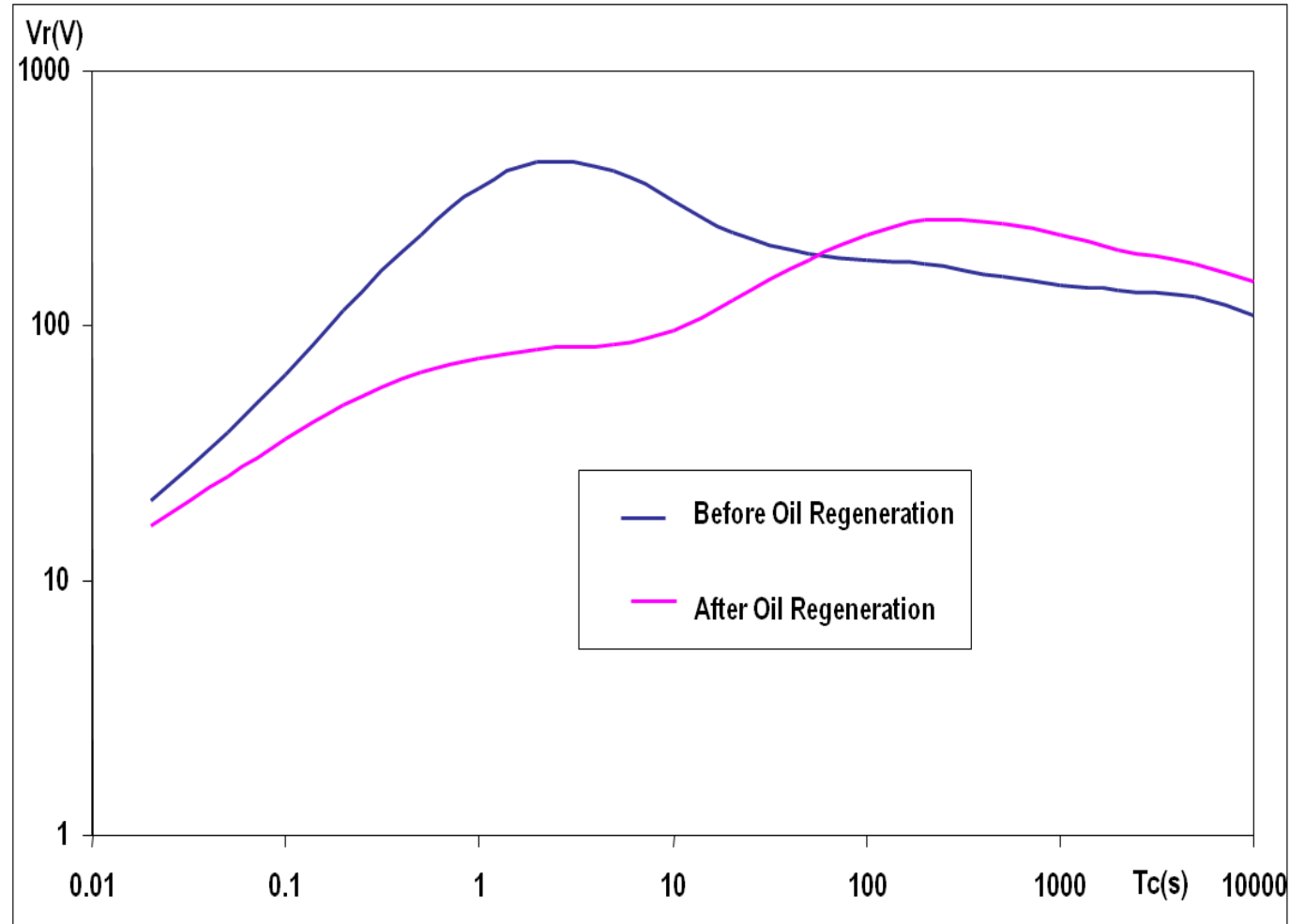


## (Online) olajregenerálás

- Az öregedés során a papíros villamos paraméterei kevésbé romlanak a papír mechanikai szilárdságához képest, de ha a **papír mechanikai szilárdsága egy adott érték alá csökken**, az lényegében a transzformátor élettartamának a végét jelenti.
- A regenerálás során végzett olajvizsgálat mindig az **adott ciklusú olajállapotot jellemzi**. A következő ciklusban a **papírból „beoldódás”** történik”, így az olaj állapota romlik, majd regenerálás után újra javul.
- A **papír állapotát, ill. az olajregenerálás hatékonyságát** RVM módszerrel lehetséges ellenőrizni.



## Olaj regenerálás hatása az RVM polarizációs spektrum görbékre



Kék görbe:

Piros görbe:

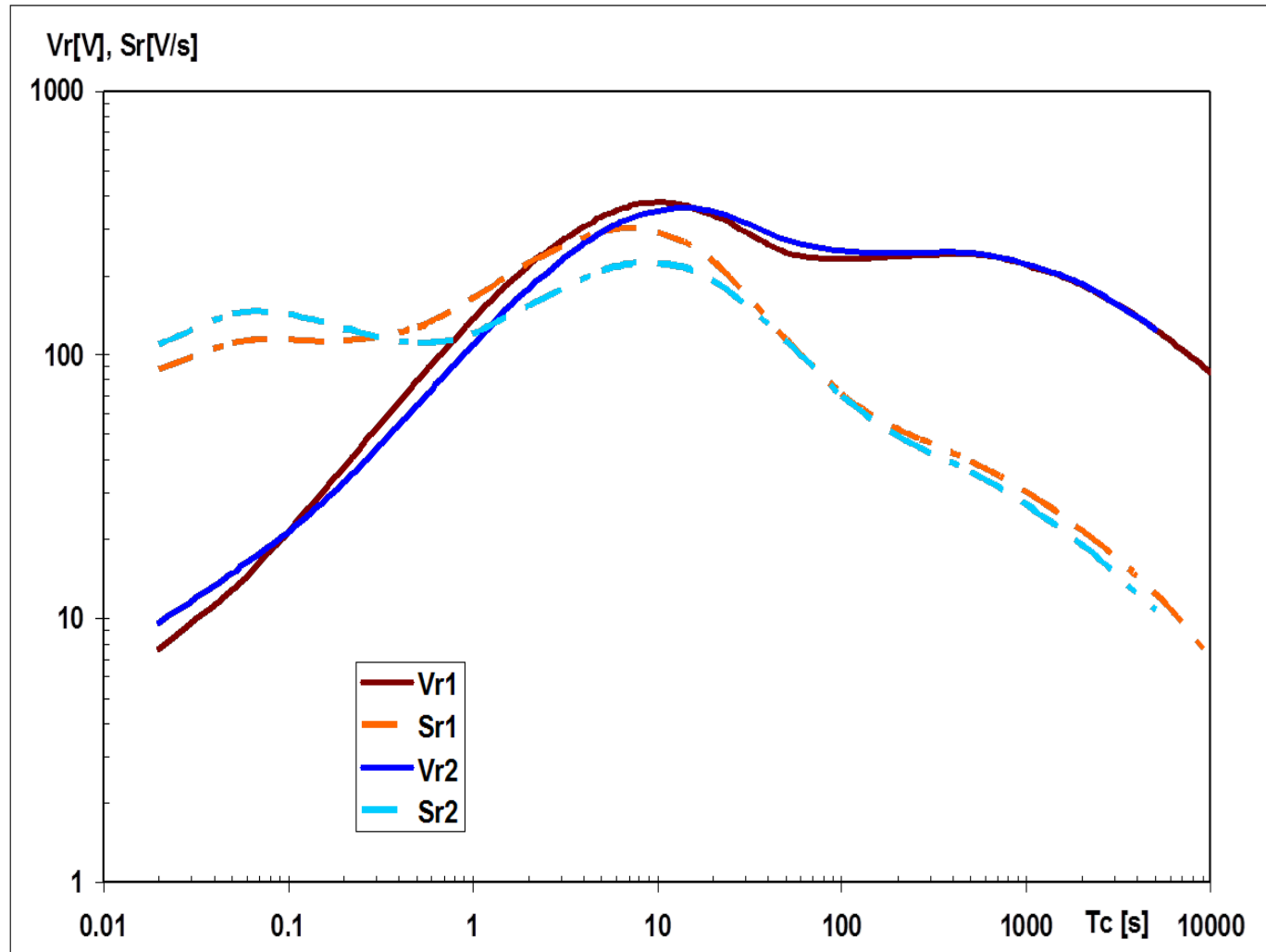
RVM spektrum regenerálás előtt

RVM spektrum regenerálás után





„Egyszerű trafófelújítás” (olajkezelés) előtt és után mért RVM görbék: enyhén nedves, sok öregedési termék felhalmozódás: sem olajcsere, sem regenerálás.





## Konklúziók

- A **hagyományos állapotellenőrzési módszerek ellentmondó tulajdonságai** miatt új mérési eljárásokra volt szükség.
- A BME az 1970-es években többéves kutatást végzett az olaj-papír szigetelések alapvető folyamatainak mélyebb ismerete céljából.
- **A kutatómunka legnagyobb eredménye a polarizációs spektrum módszerek (RVM, FDS, PDC) kidolgozása volt.**
- Polarizációs spektrum módszerek **minőségi változást** hoztak ezen a területen: nem **egyetlen jelzőszámmal** jellemzik a szigetelést, hanem egy teljes **spektrummal**.
- Az olaj-papír szigetelésű **nagytrafók élettartama egyenlő a papíros szigetelő élettartamával,** ezért alapvető fontosságú a papír szigetelés diagnosztikája.
- Az RVM módszer **kiválóan alkalmas a romlási folyamat követésére, a pillanatnyi állapot megállapítására, a trafó élettartamának beclésére, az optimális üzemeltetési paraméterek beállítására, a szükségessé váló karbantartási beavatkozások felmérésére, költséghatékony élettartam kiterjesztésre.**



## Konklúziók (folytatás)

- Az **RVM** használatával igen **költséghatékony** trafó diagnosztikát, karbantartást és **üzemeltetést** lehet megvalósítani.
- A jelenleg használatban lévő **szigetelőolajokat minőségtől és üzemeltetéstől függően kb. 15-25 év után** oly mértékben leromlanak, hogy be kell avatkozni, mert rendkívül **meggyorsítja a trafó öregedését.**
- Ha a szükséges beavatkozások nem indokolják a **gyárba történő szállítást**, akkor jobb és messzemenően olcsóbb a **helyszínen** felújítani a trafót.
- **Időben történő olajregenerálás nélkül** az olaj-papíros szigetelési rendszerben felhalmozódott öregedési termékek miatt a papíros **romlása meggyorsul**, idő előtt tönkremegy, ez pedig lényegében a **trafó élettartamának korai végét** jelentheti.



**Köszönöm a  
figyelmet!**

