

# **FEROREZONANCE**

- Jev, který vzniká při přesycení jádra induktoru v RLC obvodu s nelineární indukčností (induktor s feromagnetickým jádrem).
- Popis nelineárními diferenciálními rovnicemi – obtížné nebo nemožné analytické řešení → vhodné řešit metodami numerického modelování.

## Hlavní rozdíly mezi ferorezonancí a rezonancí:

- průběhy napětí a proudu při ferorezonanci nemají sinusový průběh, ačkoliv je ferorez. obvod napájen sinusovým zdrojem napětí
- pro jednu konfiguraci ferorez. obvodu existuje více pracovních stavů obvodu (více řešení)

## **Ferorezonance může být:**

- sériová nebo paralelní (podle řazení prvků L a C)
- jednofázová nebo vícefázová (např. při magneticky vázaných nelineárních indukčnostech)

## Typické projevy ferorezonance:

- přechodná nebo trvalá přepětí a nadproudy
- silná deformace sinusových průběhů napětí a proudů
- zahřívání transformátorů ve stavu bez připojené zátěže
- netypický hluk transformátoru
- poškození elektrických zařízení (vlivem tepelného nebo elektrického namáhání)

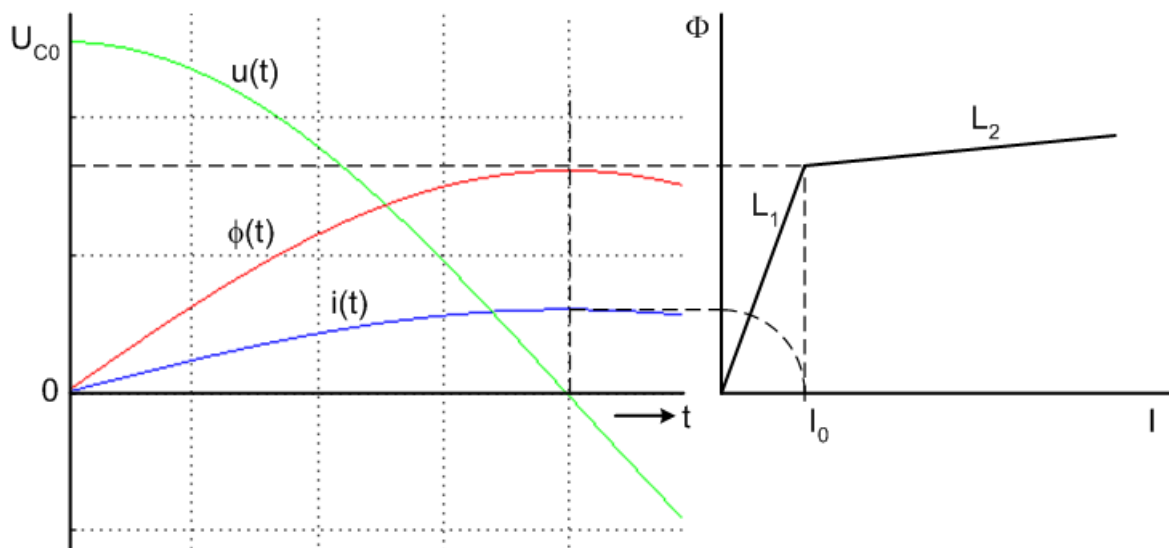
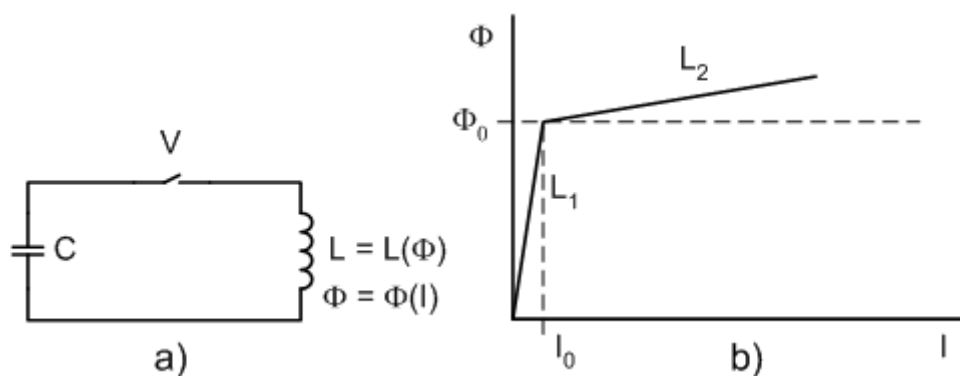
## **Podmínky vzniku ferorezonance:**

Obvod musí mít:

- zdroj střídavého napětí (obvykle sinusový průběh)
- nelineární indukčnost (feromagnetické, přesytitelné jádro)
- kapacitu (kondenzátor, kapacita kabelu, vedení,...)
- nízké ztráty

# Analýza sériového RLC obvodu s nelineární indukčností

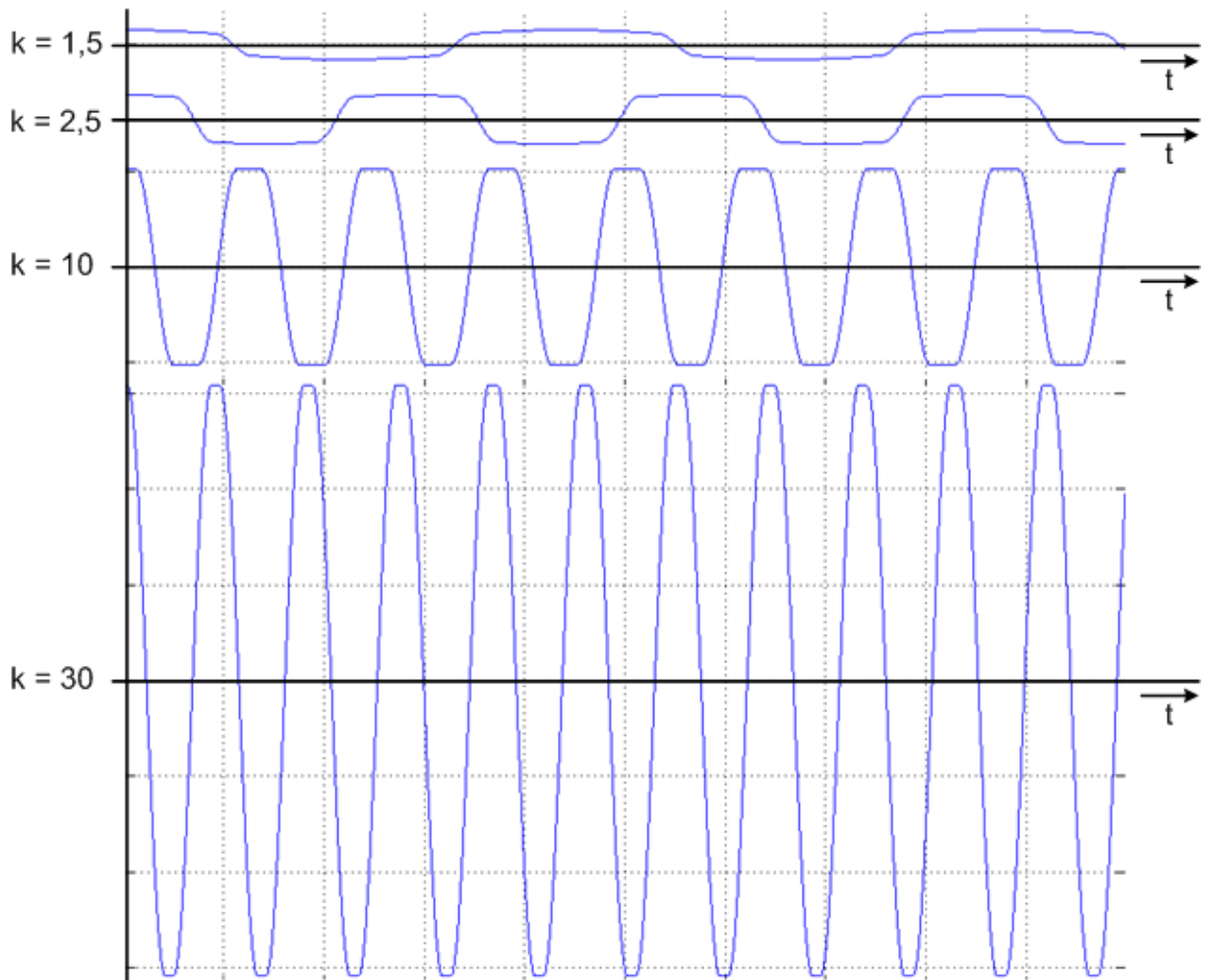
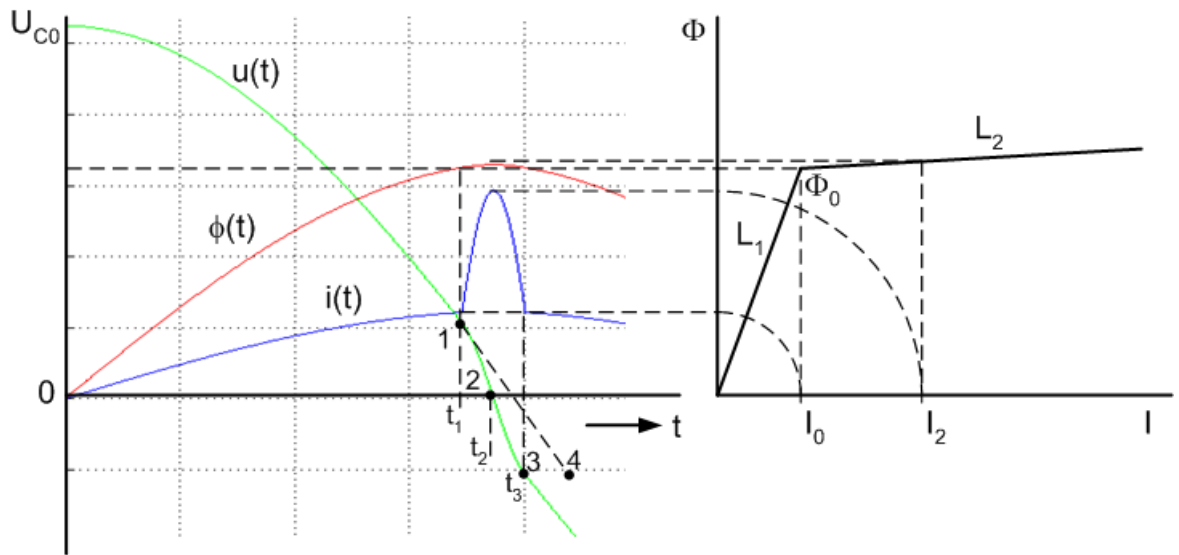
Vlastní kmity obvodu bez ztrát (bez rezistance):



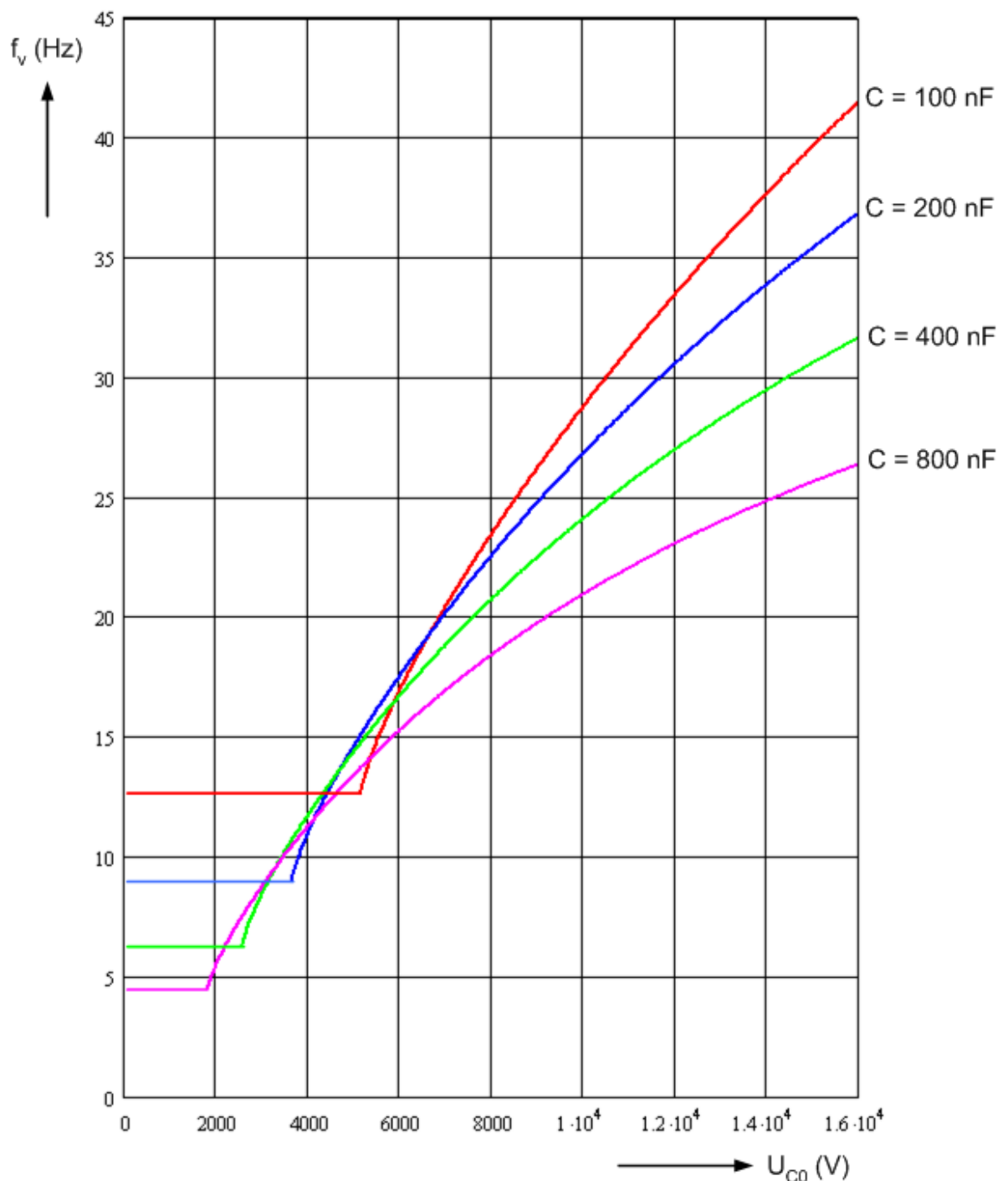
činitel překročení –  $k$ :

$$U_{C0} = k \cdot U_{C0K}$$

(při  $U_{C0} > U_{C0K}$  dochází k přesycování magn.obvodu)

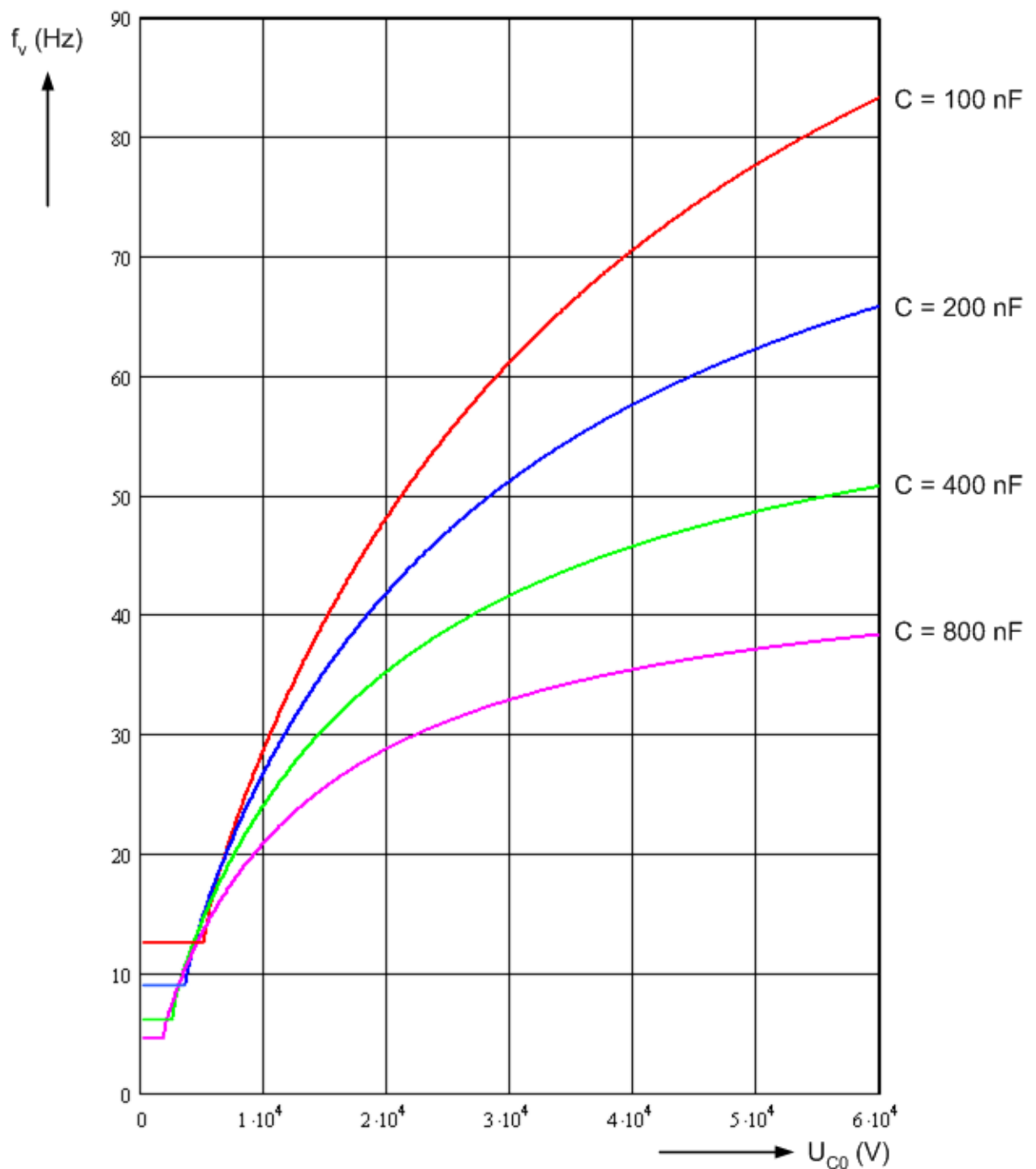


Závislost frekvence vlastních kmitů  
na počátečním napětí  $U_{C0}$  a  
kapacitě  $C$ :  
(případ pro obvod s PTN 6 kV)

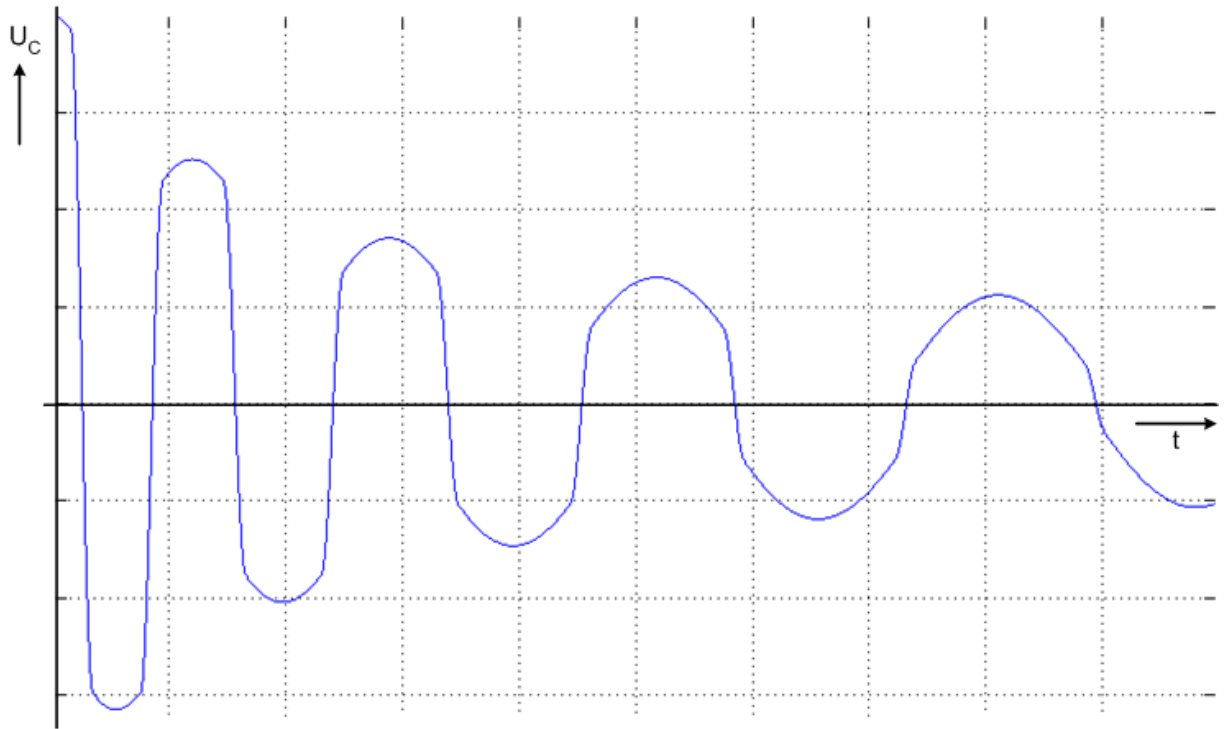




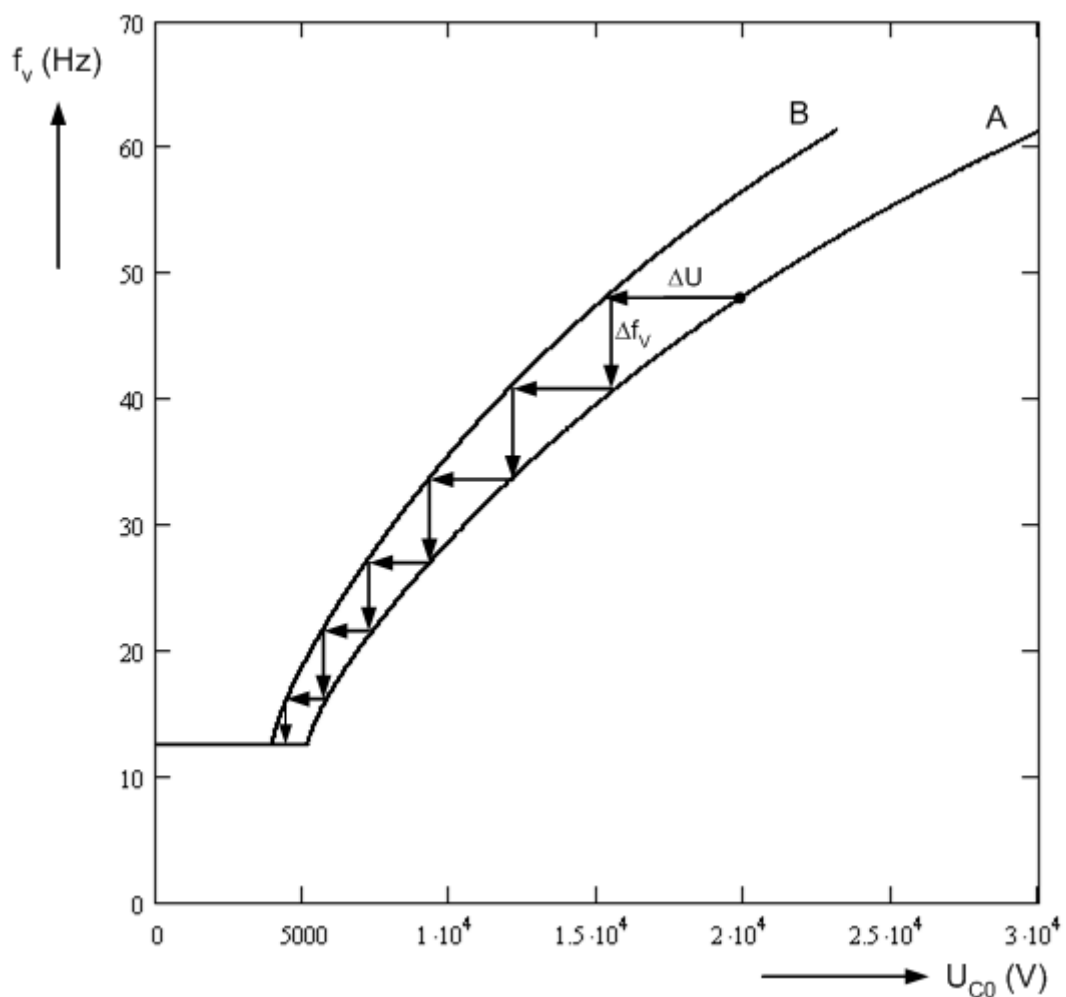
Závislost frekvence vlastních kmitů  
na počátečním napětí  $U_{C0}$  a  
kapacitě  $C$ :  
(případ pro obvod s PTN 6 kV)



# Ferorezonanční obvod se ztrátami (se zařazeným rezistorem):



Závislost frekvence vlastních kmitů  
na počátečním napětí  $U_{C0}$  a  
kapacitě  $C = 100 \text{ nF}$ :  
(případ pro obvod s PTN 6 kV)



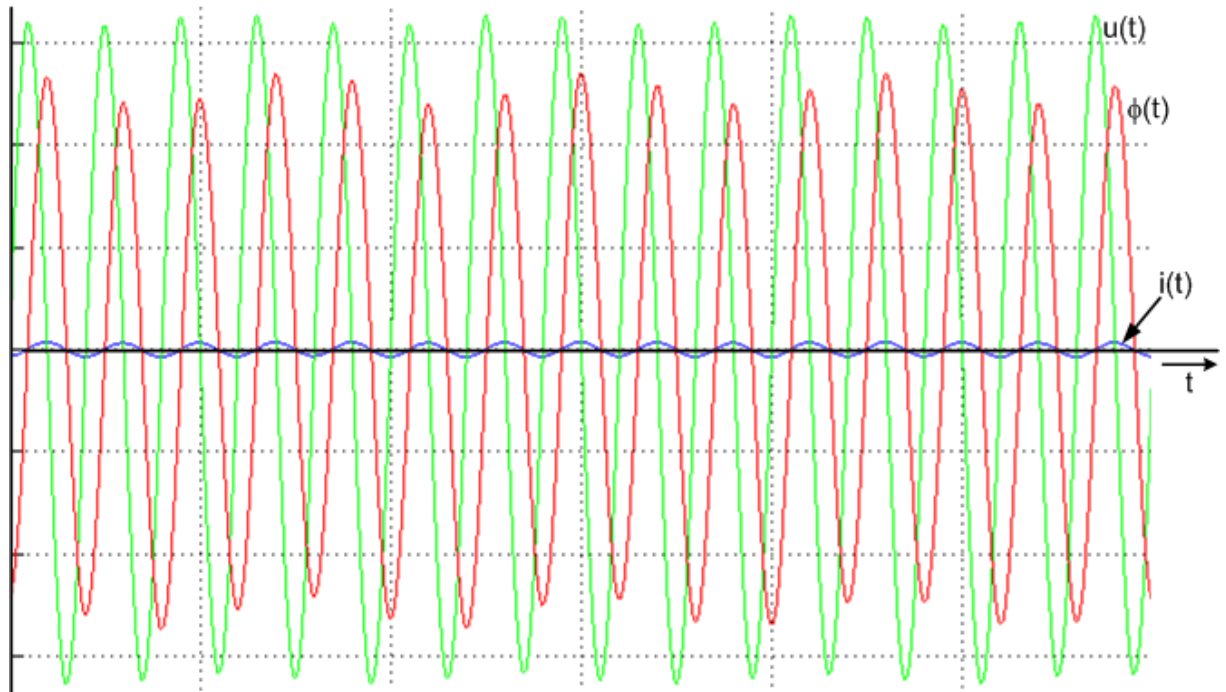
$\Delta U$  ... změna amplitudy napětí při  
komutaci napětí na PTN

$\Delta f_v$  ... změna frekvence vlastních  
kmitů obvodu při komutaci

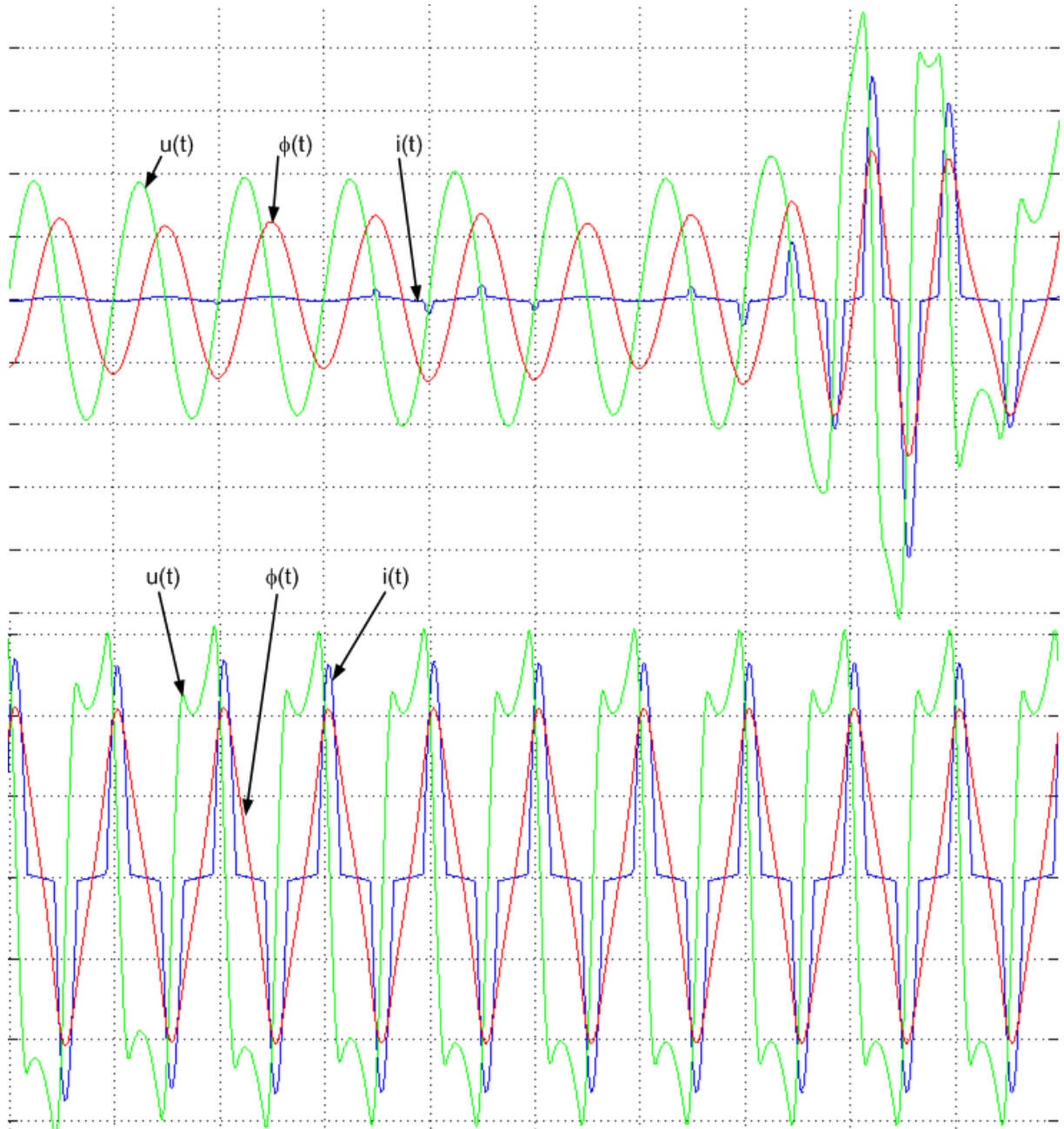
## Vnucené kmity – napájení obvodu zdrojem střídavého napětí

- Skládání vlastních kmitů obvodu s napětím napájecího zdroje

# Složené kmity – bez vzniku jevu ferorezonance:

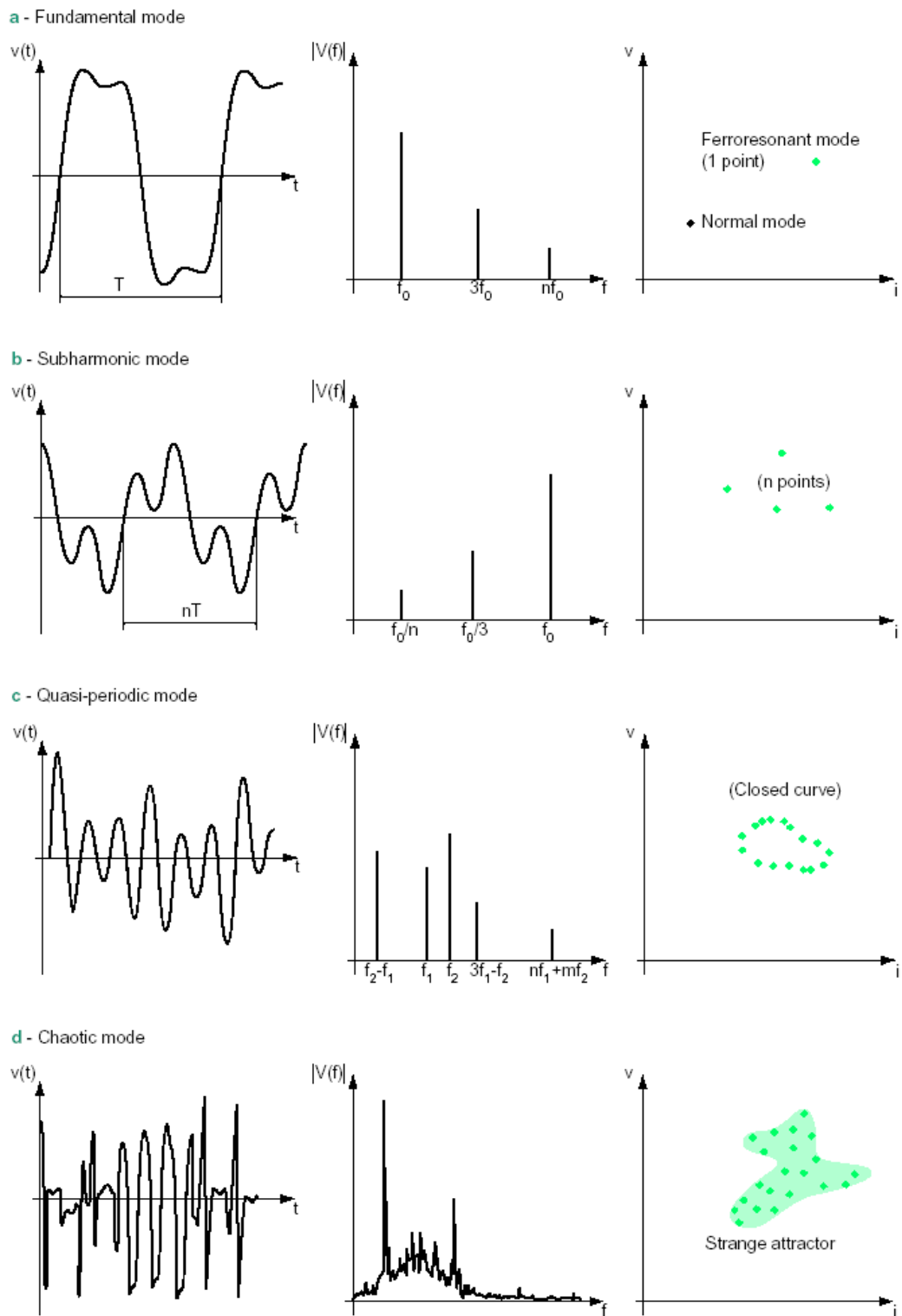


# Složené kmity – přechod do ferorezonance:



## Typy ferorezonance:

- základní (fundamental)  
(základní + vyšší harmonické)
- subharmonická  
( $1/n$  násobky základ.periody)
- kvazi-periodická  
(frekvence:  $n \cdot f_1 + m \cdot f_2$ )
- chaotická

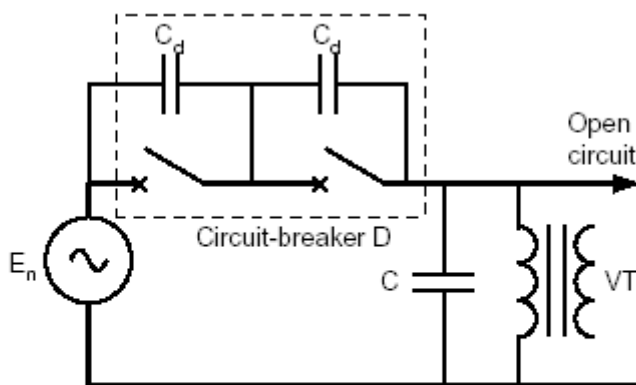
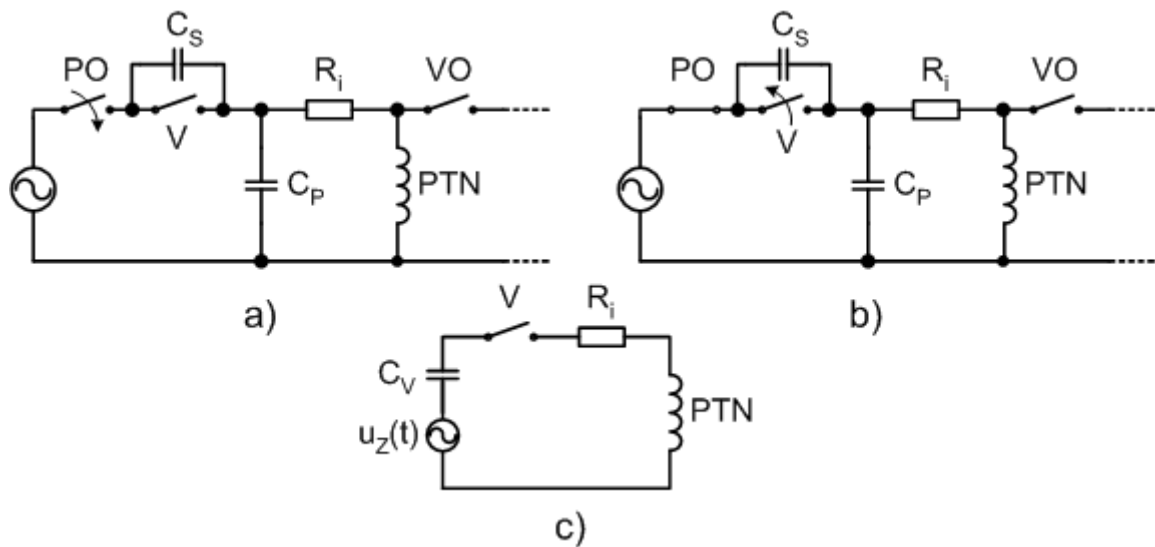


*Fig. 4: illustration of ferroresonance characteristics.*



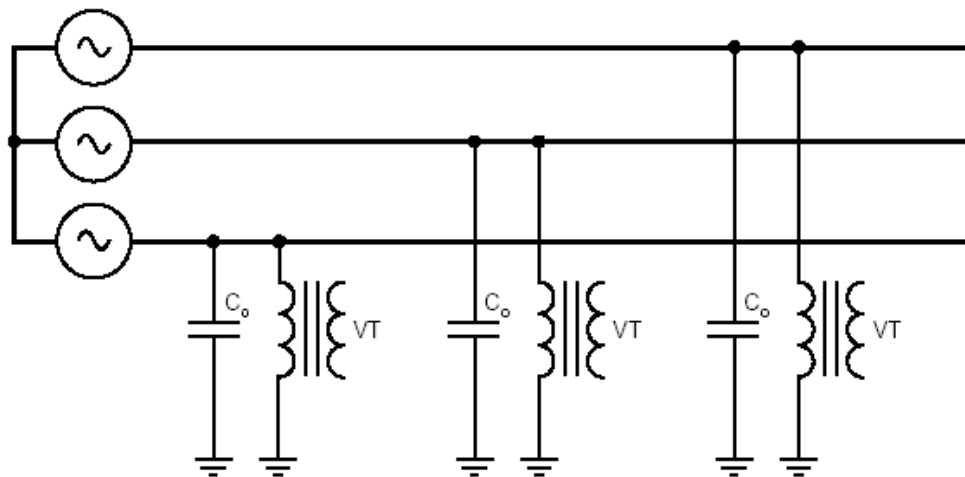
# Typické případy ferorezonančního obvodu:

Ferorezonance PTN a kapacity vypínače v poli rozvodny:



*Fig. 5: : ferroresonance of a voltage transformer connected in series with an open circuit-breaker.*

# Ferorezonanční obvody PTN (VT) a kapacit vůči zemi ( $C_0$ ) v systému s izolovaným uzlem:



$C_0$  : system zero-sequence capacitance

*Fig. 6: ferroresonance of a VT between phase and earth in an isolated neutral system.*

# Transformátor náhodně napájený z jedné nebo dvou fází: (vyznačeny cesty ferorez.obvodu)

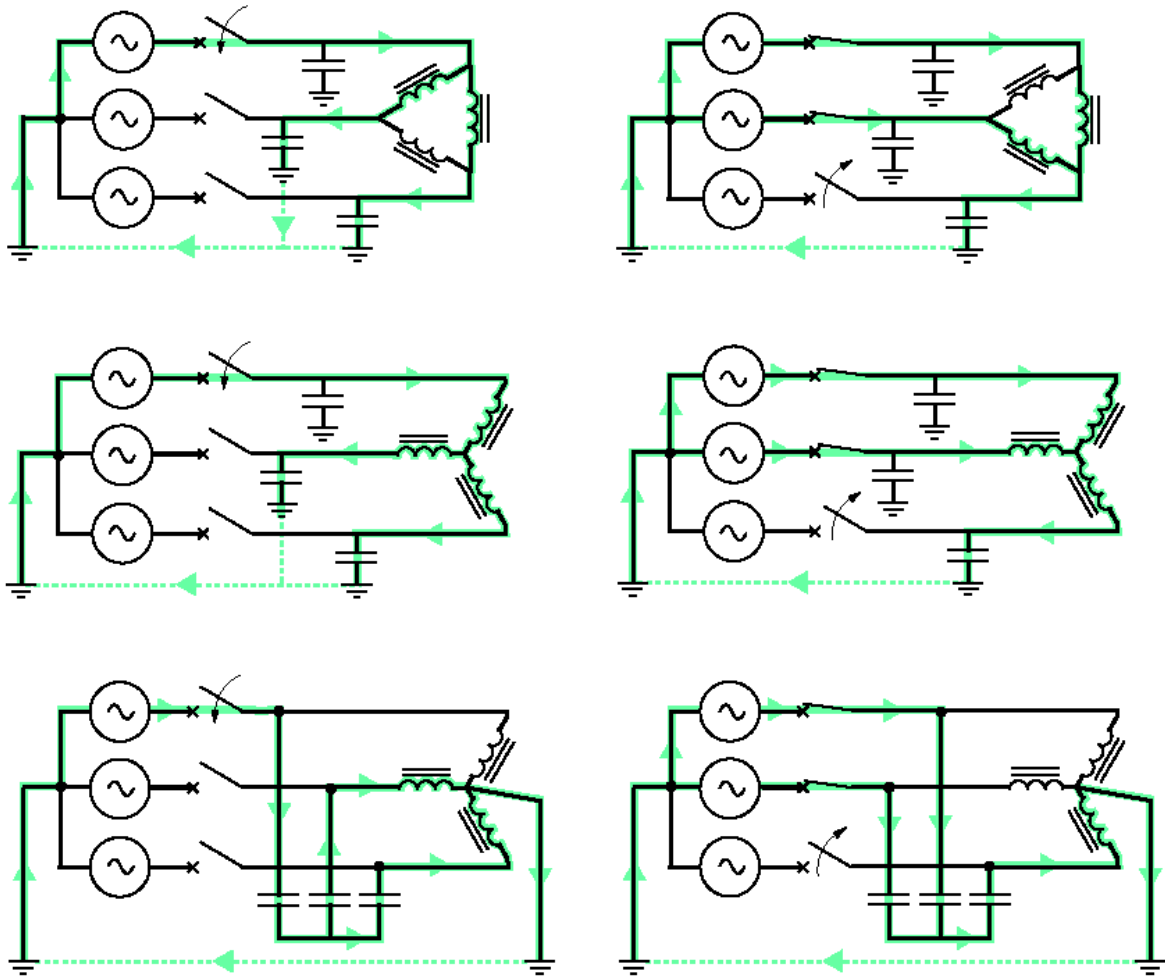


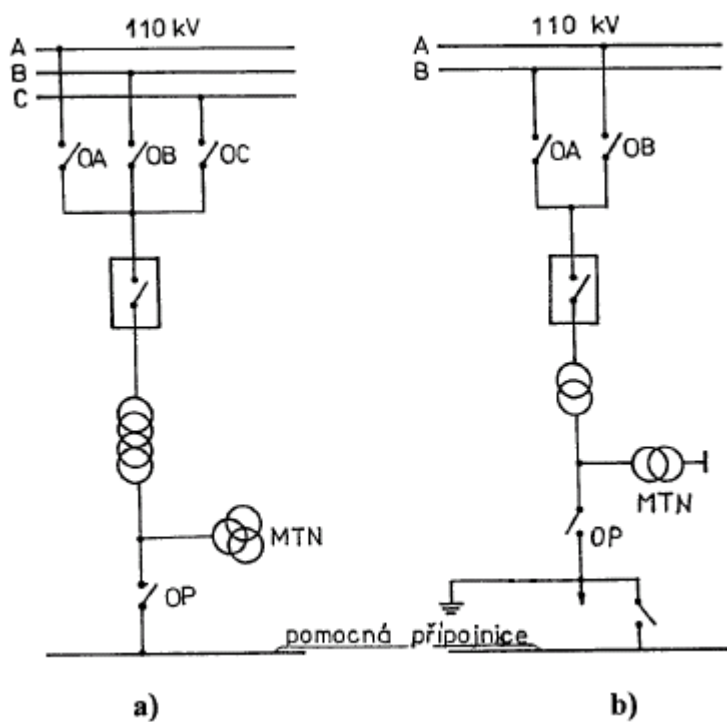
Fig. 7: examples of unbalanced systems at risk from ferroresonance.

# Příklady výskytu ferorezonance

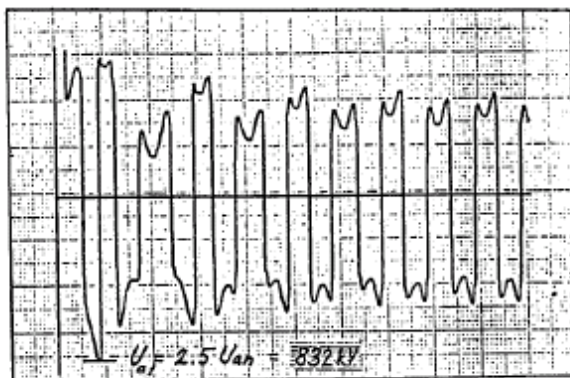
## Ferorezonance vvn:

Rozvodny Spišská Nová Ves a Týnec nad Labem

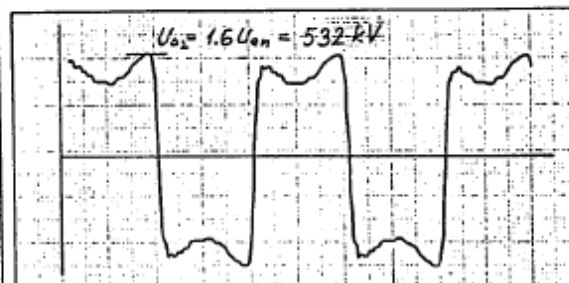
(vývodová pole rozvoden 110 kV)



# Rozvodna Nošovice (vývodová pole rozvoden 400 kV)

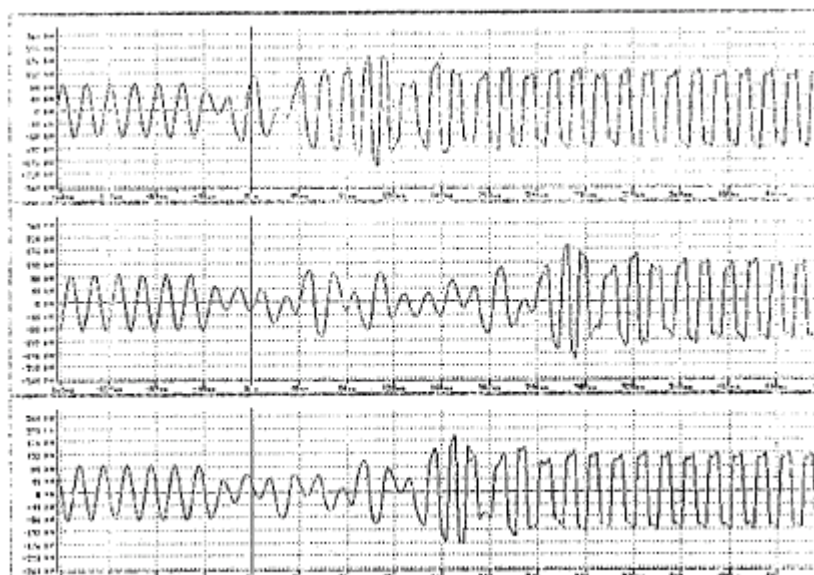


a)



b)

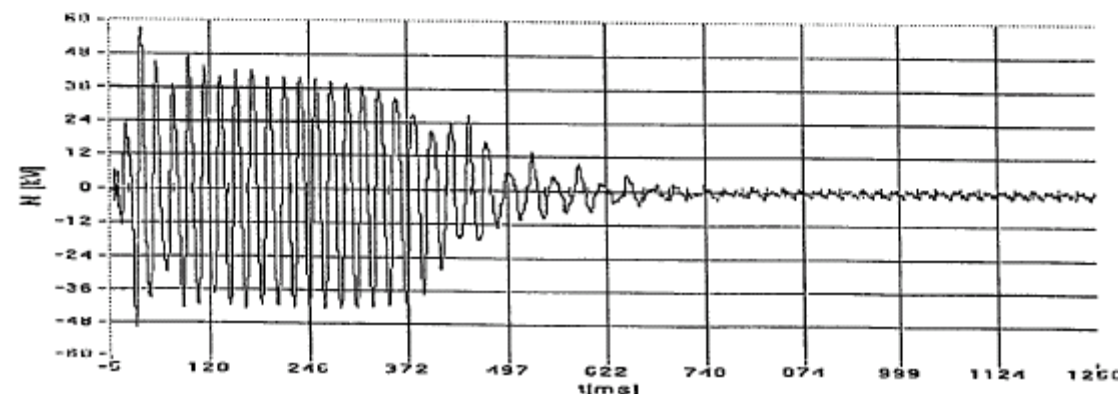
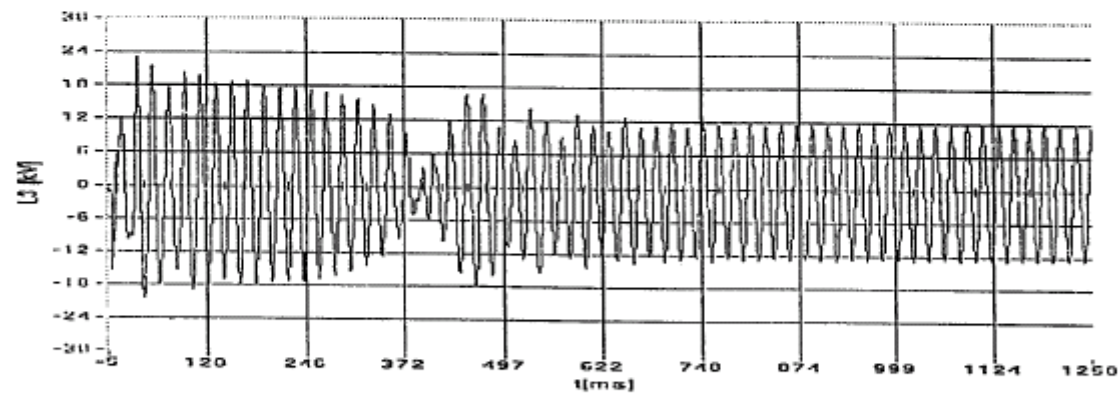
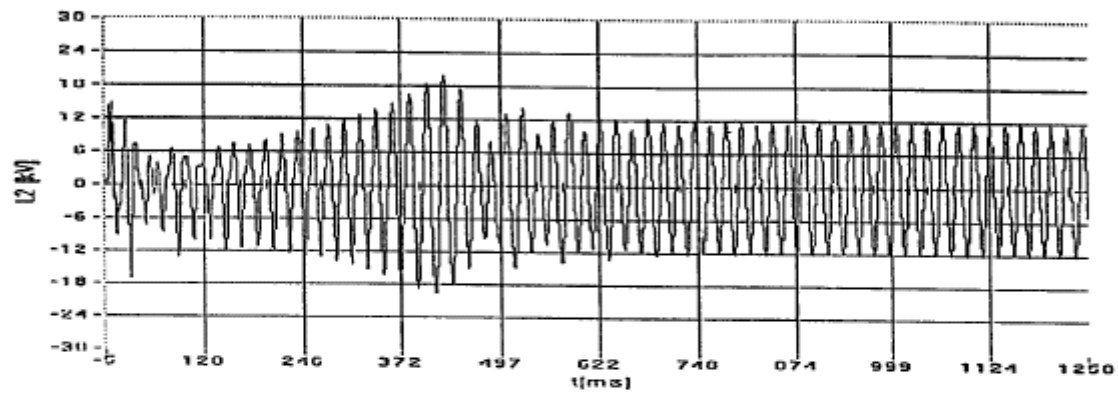
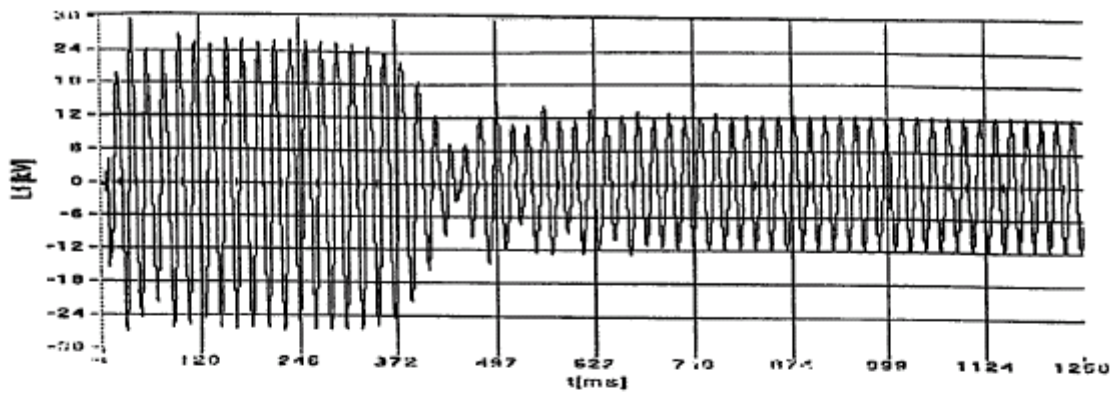
# Rozvodna Bezděčín (vývodová pole rozvoden 110 kV)



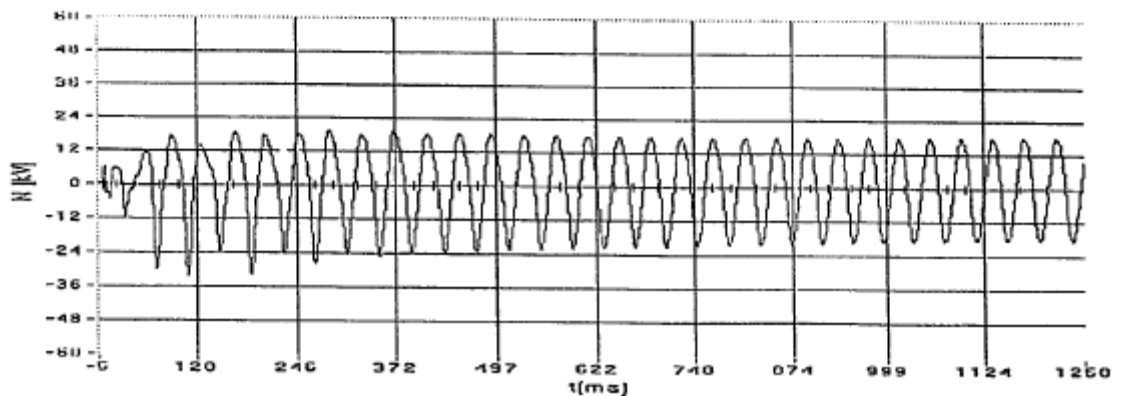
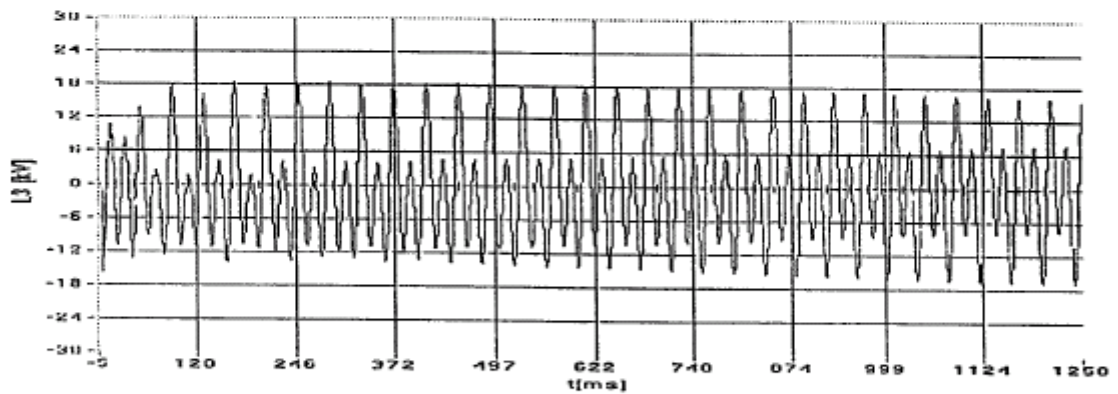
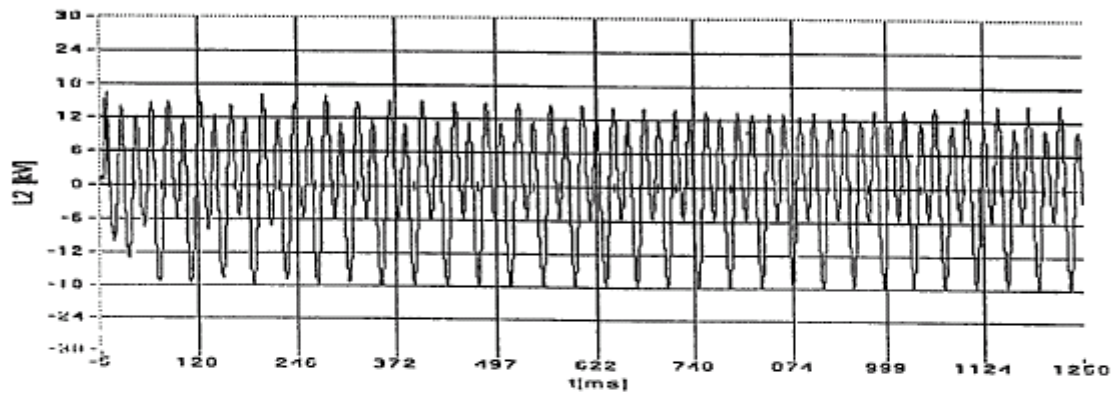
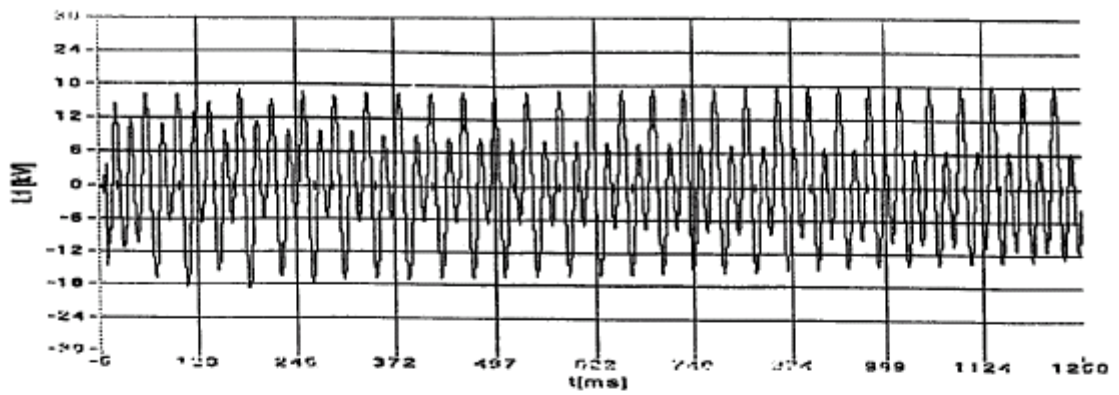
## Ferorezonance vn:

Ferorezonance v obvodech  
nezatíženého vinutí nižšího napětí ve  
vodní elektrárně Orlík  
(trafo D-vinutí 15 kV s připojeným  
PTN spojeným do Y-uzemněné)

# Přechodná ferorezonance (Orlík):



# Ustálená ferorezonance (Orlík):

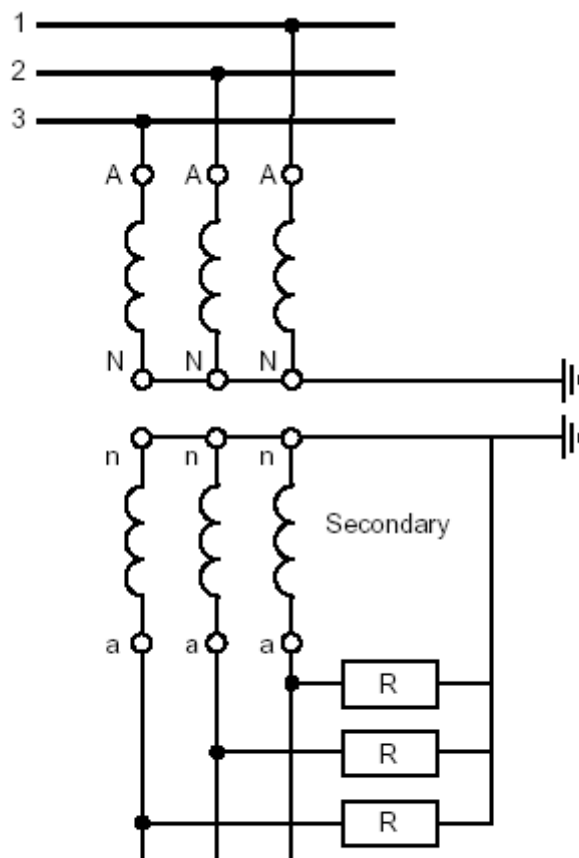




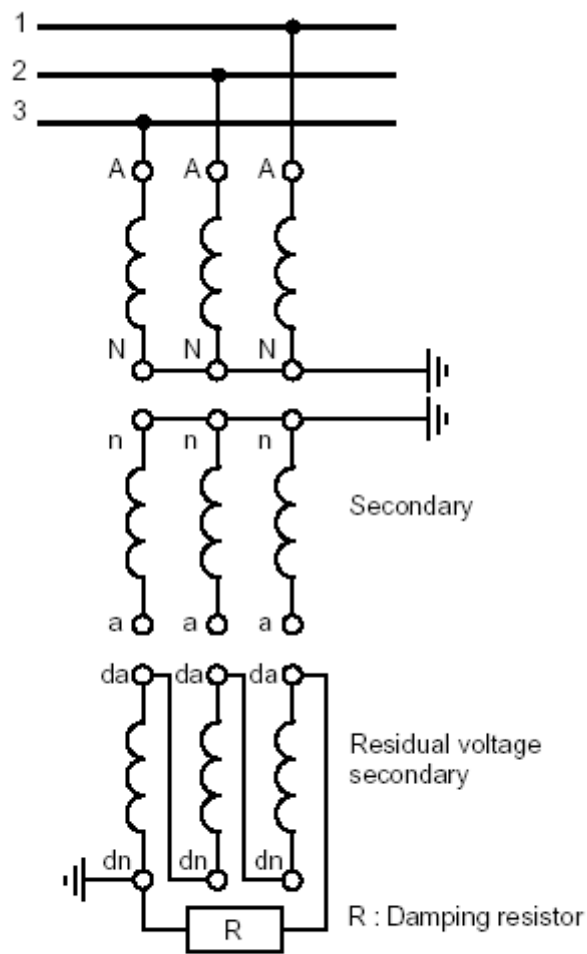
## Zabránění vzniku ferorezonance:

- zvýšením ztrát v obvodu (připojení R k vinutí PTN, zvětšení zátěže transformátoru)
- zabránění vzniku nebezpečných konfigurací obvodu (např. při spínacích operacích)

# Připojení R k vinutí PTN:



*Fig. 11: protection device against the risk of ferroresonance for VTs with one secondary.*



*Fig. 12: protection device against the risk of ferroresonance for VTs with two secondaries.*

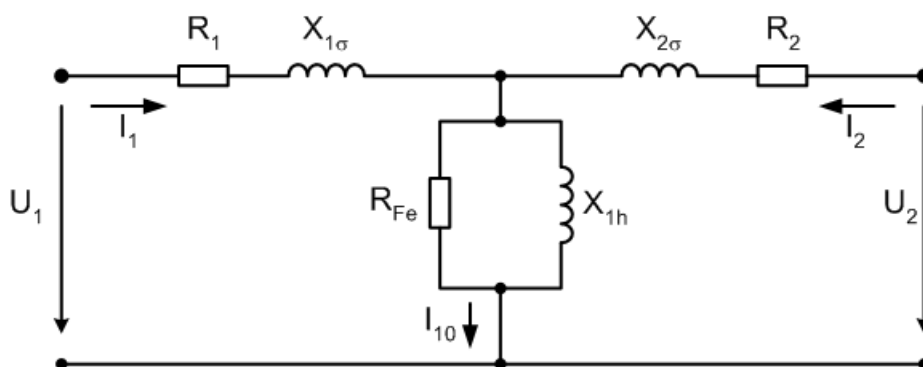
## **Numerické modelování ferorezonančního obvodu**

- zjištění parametrů PTN, transformátoru (parametry pro náhradní schéma)
- vytvoření numerického modelu, sestavení obvodu
- výpočet

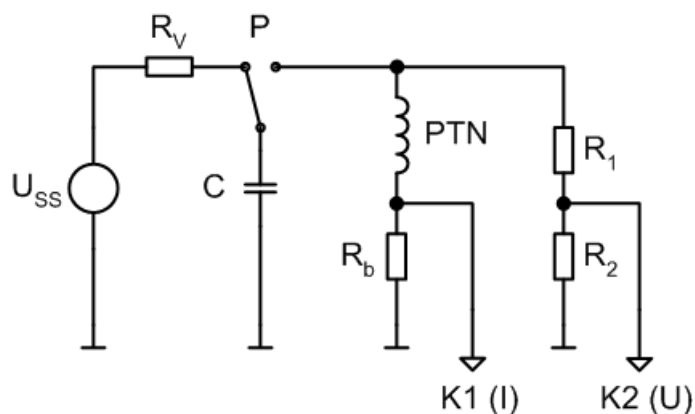
## Zjištění parametrů transformátoru:

- změření magnetizační charakteristiky
- měření naprázdno, nakrátko

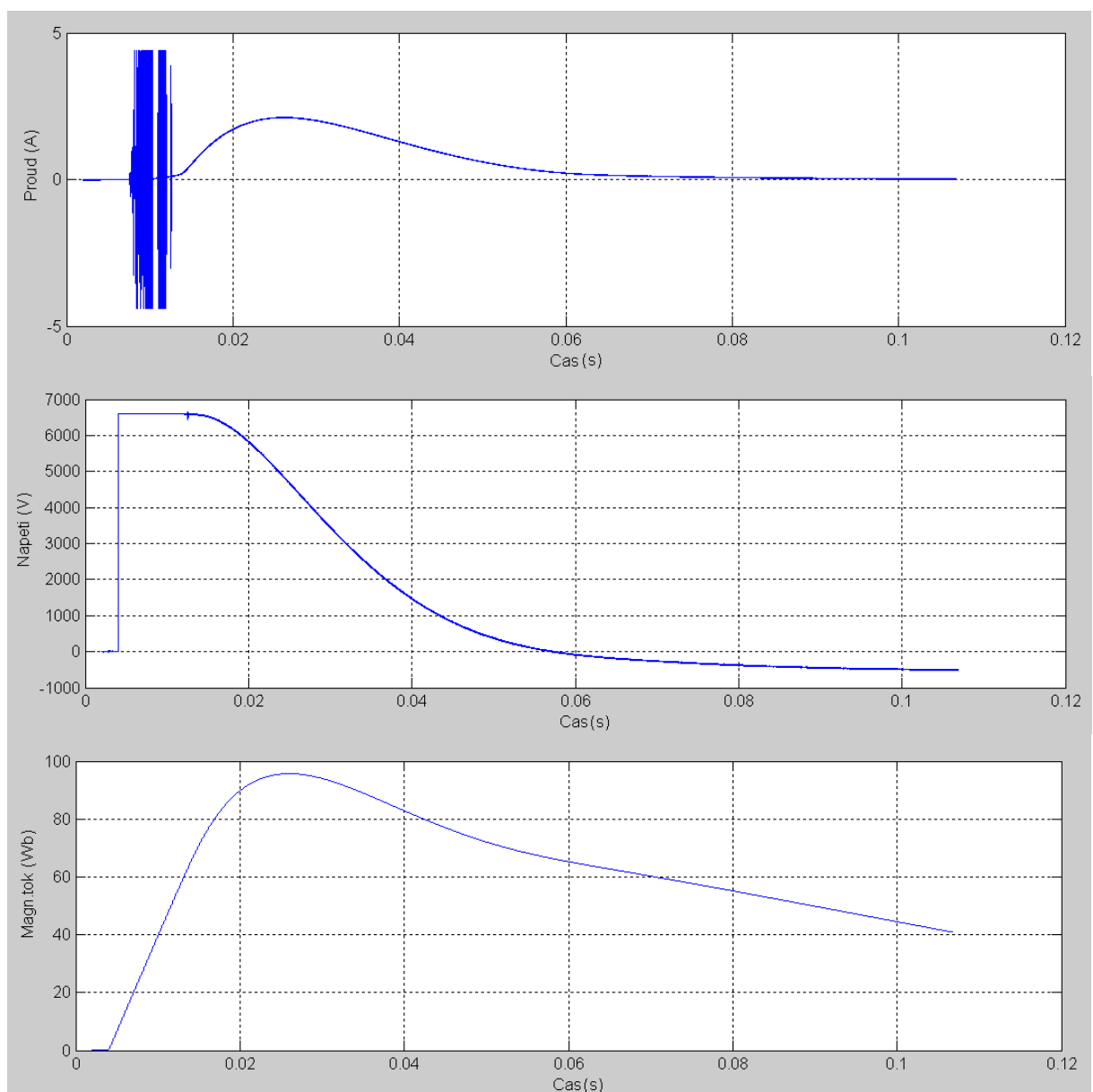
## Náhradní schéma trafo:



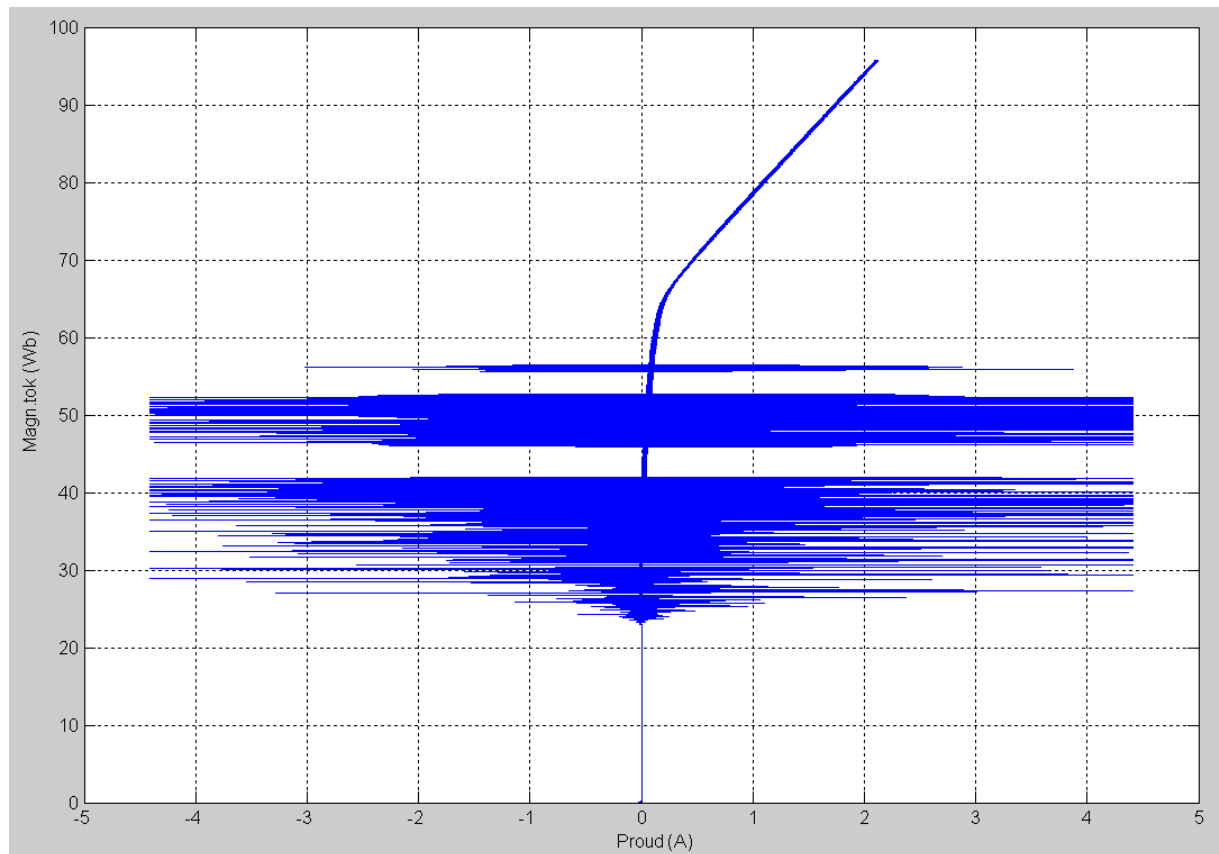
Příklad způsobu měření magnetizační charakteristiky trafo: (měření vlastních kmitů RLC)



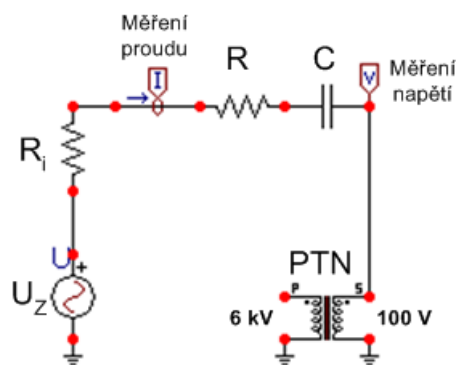
Naměřené časové průběhy napětí a proudu PTN 6 kV (při měření vlastních kmitů RLC obvodu)  
+ vypočítaný časový průběh magnetického toku (integrací průběhu napětí na PTN)



# Výsledná magnetizační charakteristika PTN 6 kV:



Vytvoření numerického modelu:  
(např. v programu ATP)



# Příklad dosazení změřených hodnot prvků náhradního schématu transformátoru do modelu PTN 6 kV:

Component: TRAF0\_S

Attributes | Characteristic

DATA	VALUE
Rmag	5300000
Rp	2048
Lp	4580
Vrp	6
Rs	0.5
Ls	1.27
Vrs	0.1
RMS	0

NODE	PHASE	NAME
P1	1	
P2	1	
S1	1	
S2	1	

Group No: 0 Label:

Comment:

Output

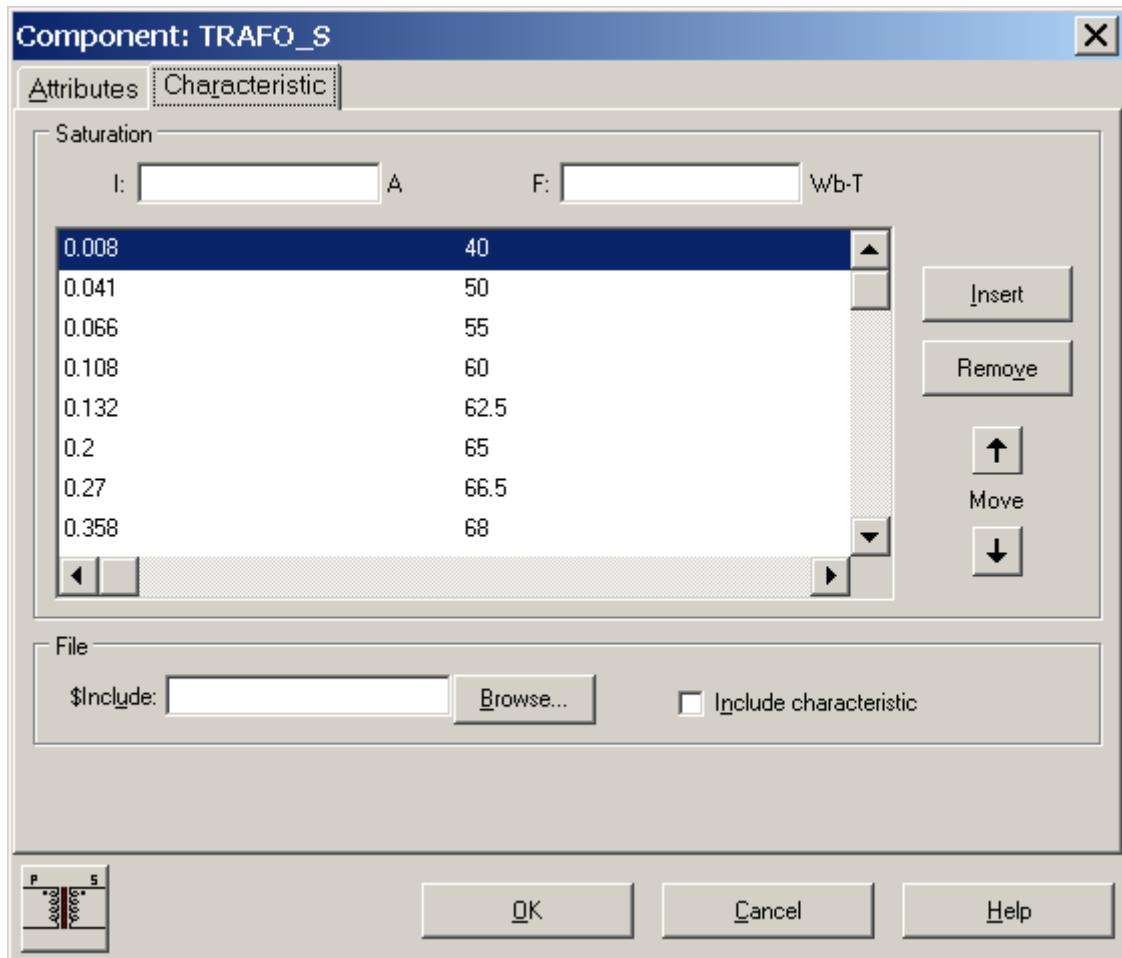
Current  Voltage  Curr&Volt  Power&Energy

Hide  Lock

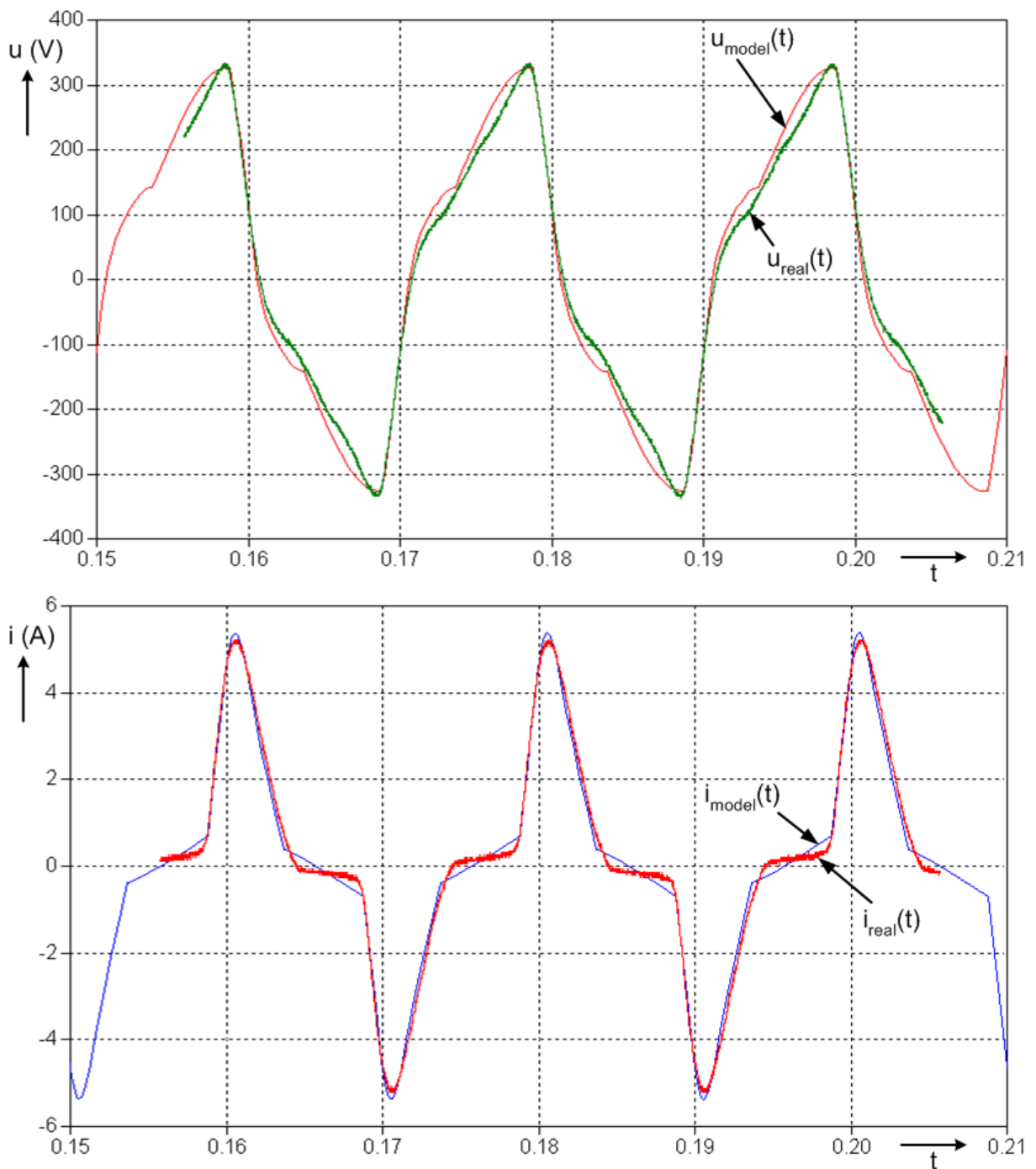
OK Cancel Help



Příklad dosazení vybraných bodů  
změřené magnetizační  
charakteristiky transformátoru do  
modelu PTN 6 kV:



Příklad výpočtu (v programu ATP)  
průběhů napětí a proudu PTN 6 kV  
(veličiny s indexy „model“) a  
porovnání se změřenými hodnotami  
(veličiny s indexy „real“):



Při hledání dalších informací o ferorezonanci doporučuji použít některý z webových vyhledávačů;

klíčové slovo: ferroresonance