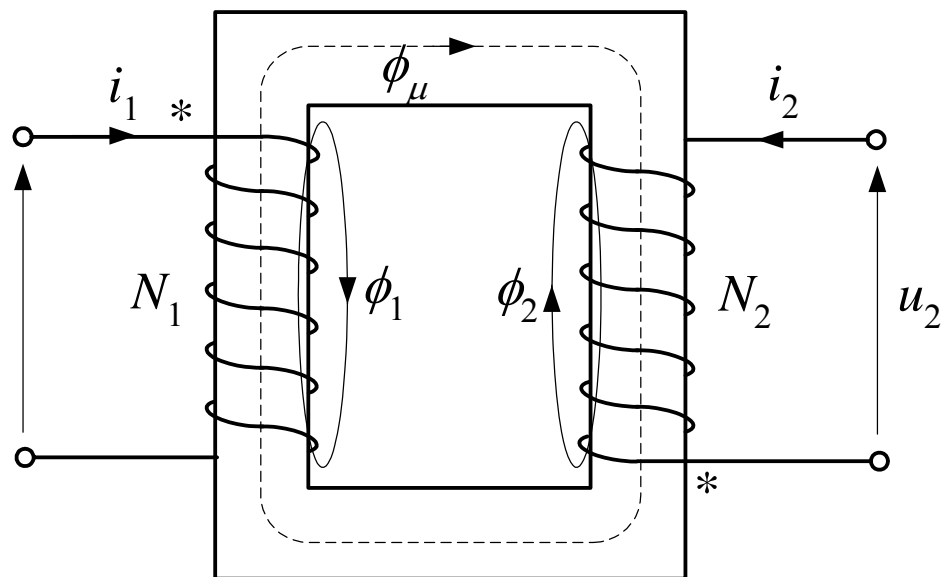


Modelowanie transformatorów

Transformator jednofazowy



$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{-i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2} = g \quad - \text{przekładnia zwojowa}$$

Modelowanie transformatorów

Strumienie skojarzone z uzwojeniami:

$$\psi_{1M} = \psi_M + \psi_1 = N_1(\phi_M + \phi_1)$$

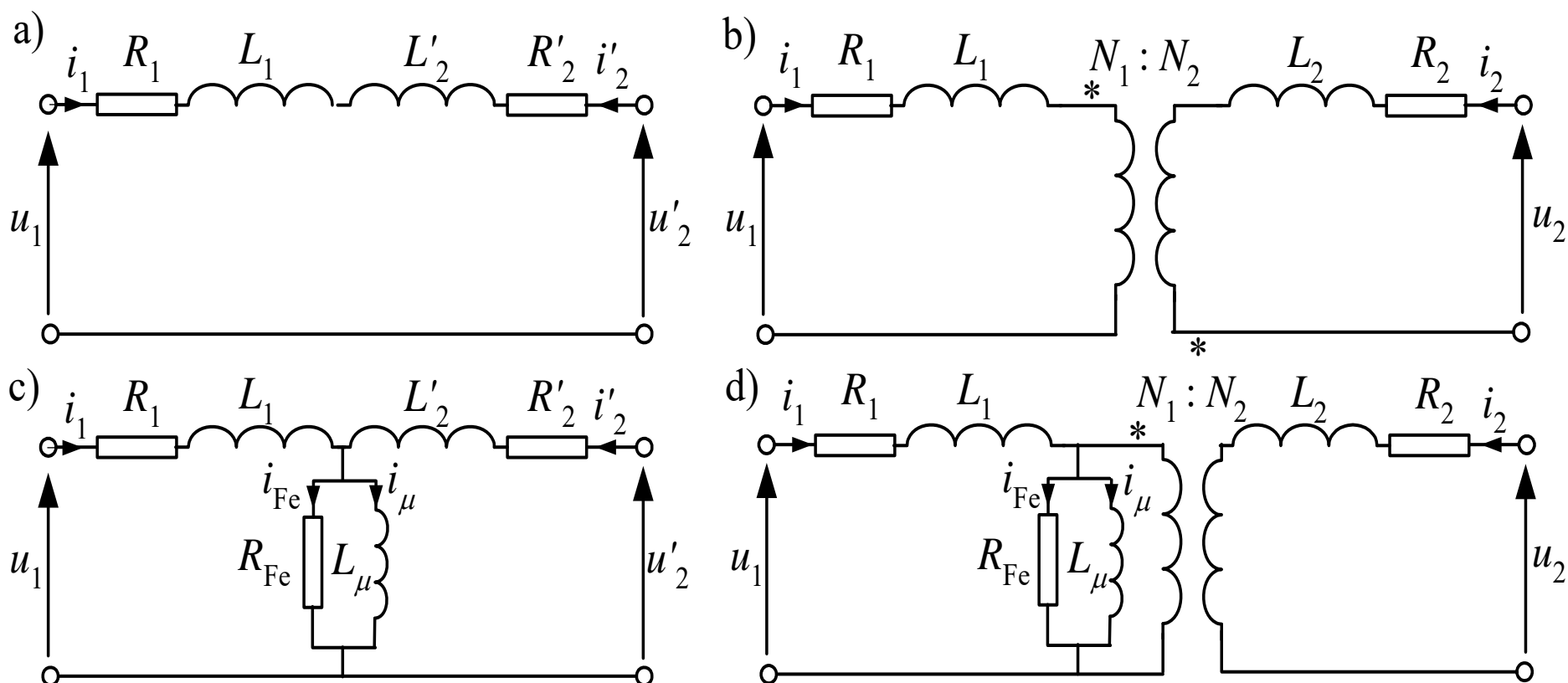
$$\psi_{2M} = \psi_M + \psi_2 = N_2(\phi_M + \phi_2)$$

$$\psi = Li$$

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{-i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2} = \mathfrak{g} \quad - \text{przekładnia zwojowa}$$

Modelowanie transformatorów

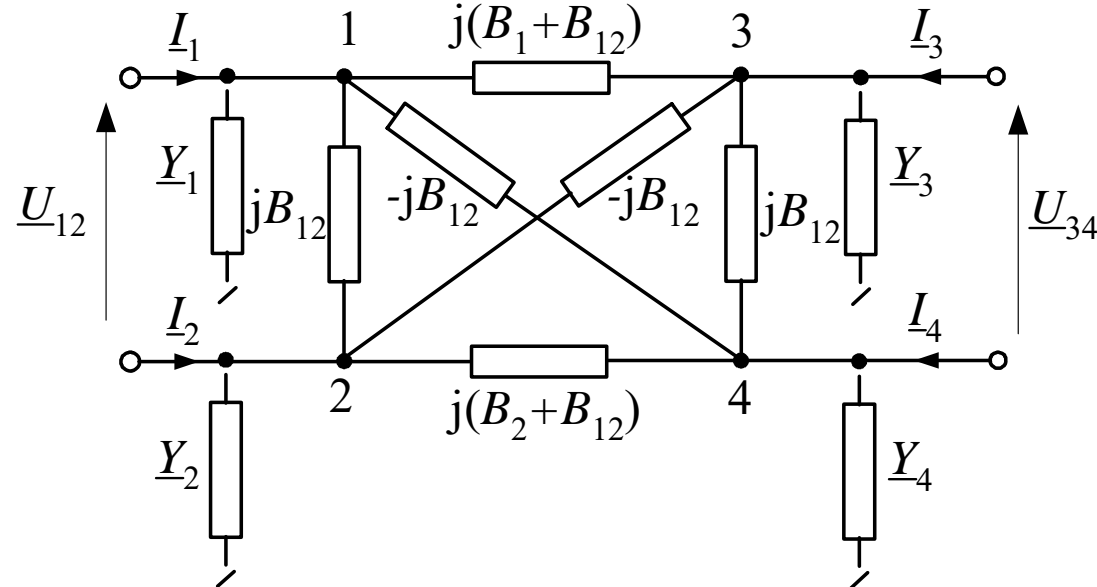
Różne formy schematów zastępczych transformatorów



Modelowanie transformatorów

Transformator może być również przedstawiony w formie wielobiegunnika. Schemat w odniesieniu do stanu ustalonego jest następujący:

$$B = \frac{1}{\omega L}$$



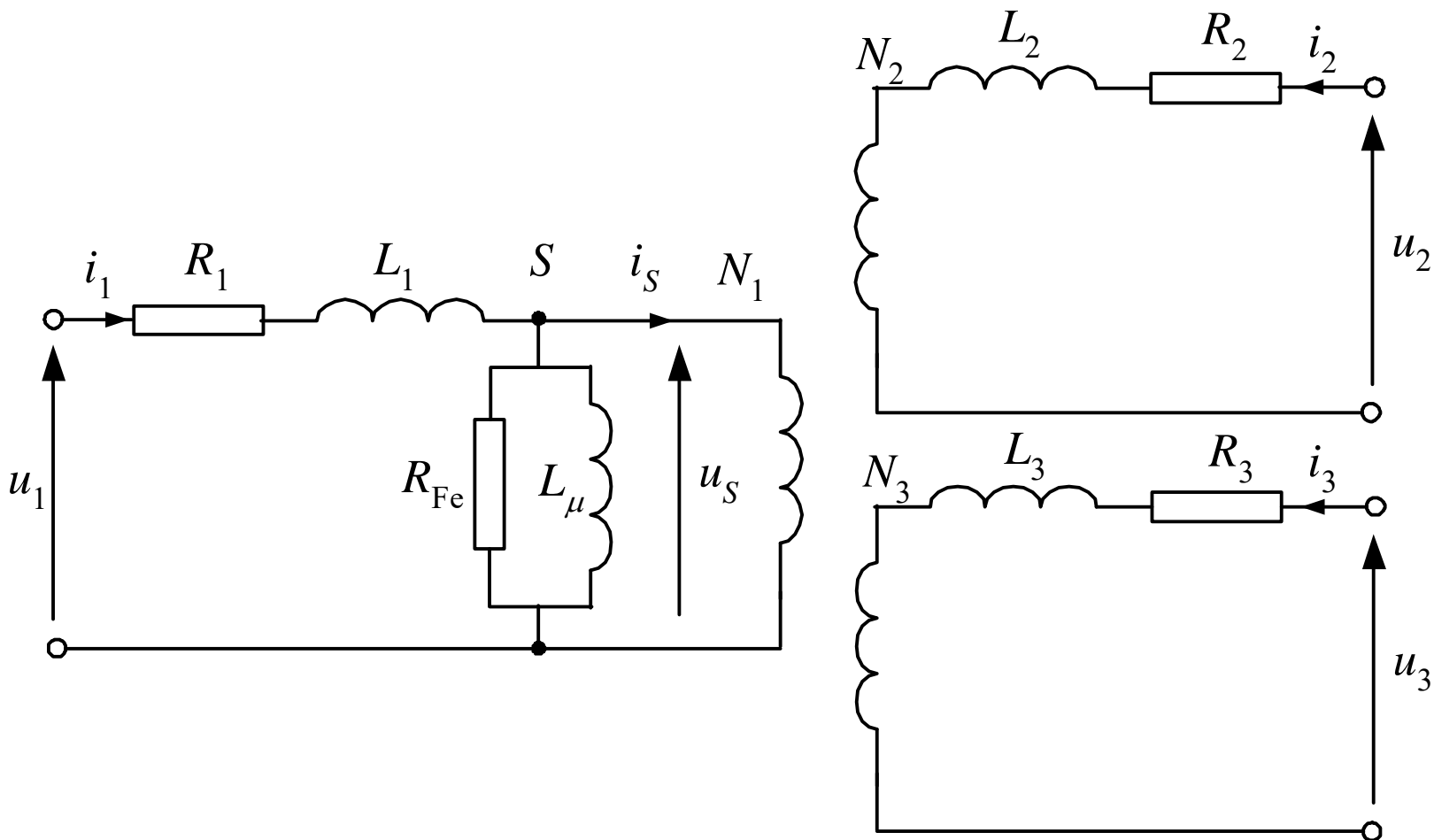
gdzie:

(z pominięciem rezystancji)

$$-j \begin{bmatrix} B_1 + B_{12} & -B_{12} & -B_1 - B_{12} & B_{12} \\ -B_{12} & B_2 + B_{12} & B_{12} & -B_2 - B_{12} \\ -B_1 - B_{12} & B_{12} & B_1 + B_{12} & -B_{12} \\ B_{12} & -B_2 - B_{12} & -B_{12} & B_2 + B_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \\ \underline{U}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \\ \underline{I}_4 \end{bmatrix}$$

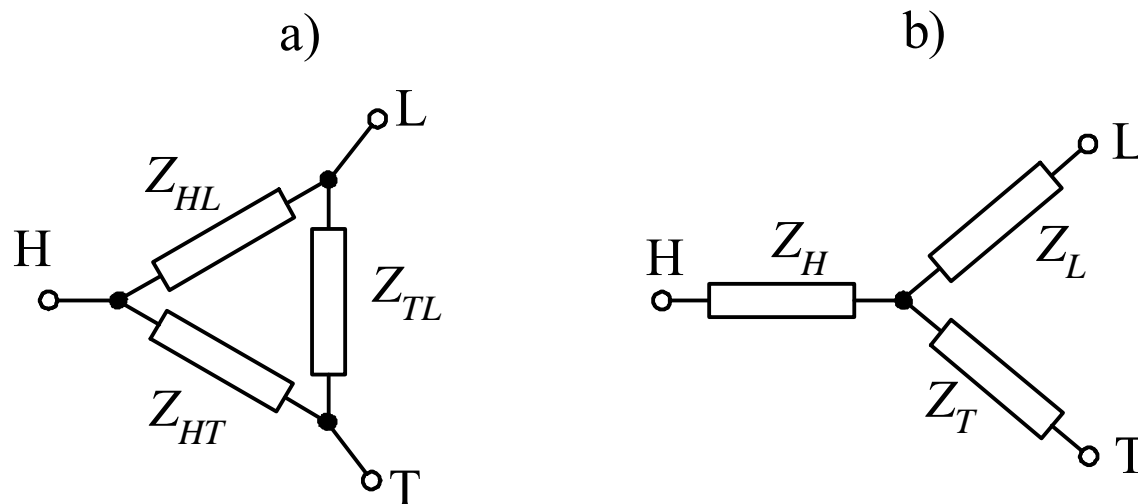
Modelowanie transformatorów

Model transformatora wielouzwojeniowego



Modelowanie transformatorów

Parametry transformatora trójzwojeniowego



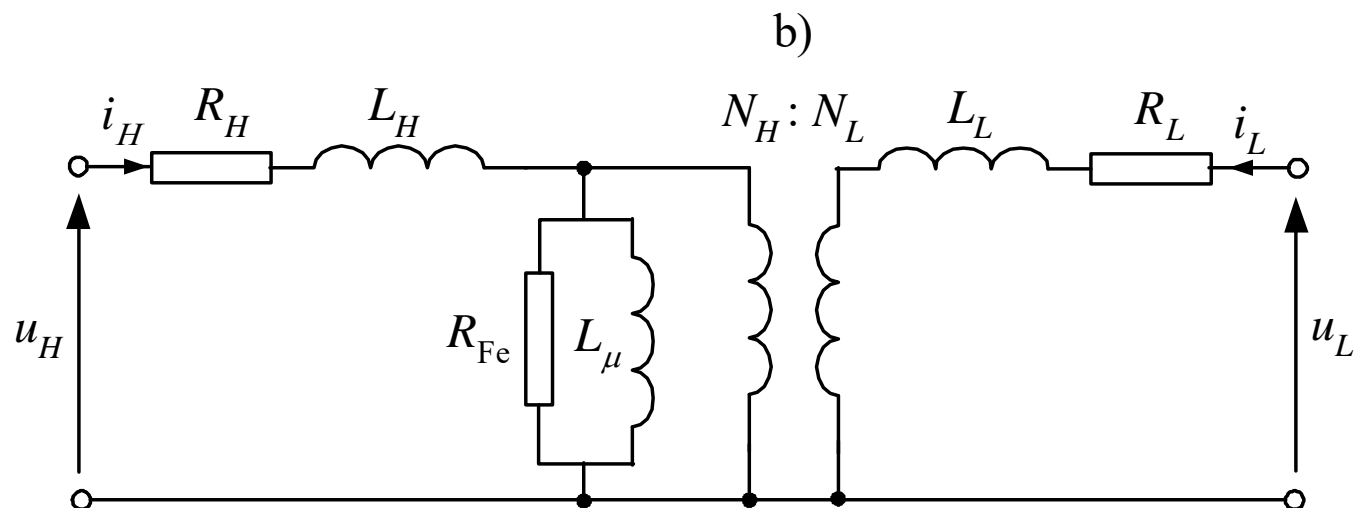
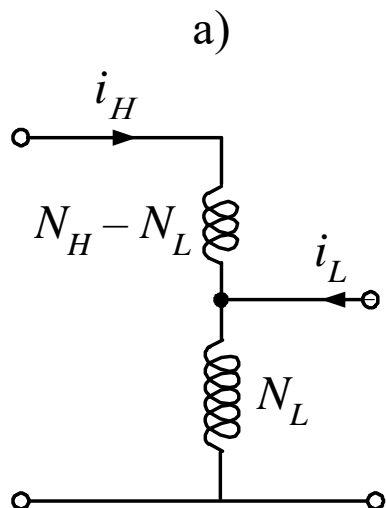
$$Z_{HL} = \frac{u_{KHL} U_{rH}^2}{100 \cdot S_r} \quad Z_{HT} = \frac{u_{KHT} U_{rH}^2}{100 \cdot S_r} \quad Z_{LT} = \frac{u_{KLT} U_{rL}^2}{100 \cdot S_r}$$

$$R_{HL} = \frac{\Delta P_{CuHL} U_{rH}^2}{S_r^2} \quad R_{HT} = \frac{\Delta P_{CuHT} U_{rH}^2}{S_r^2} \quad R_{LT} = \frac{\Delta P_{CuLT} U_{rL}^2}{S_r^2}$$

u_{KHL} – napięcie zwarcia [%]; U_{rH} – napięcie znamionowe [kV];
 S_r – moc znamionowa [MVA]; ΔP_{Cu} – moc strat w uzwojeniach [kW].

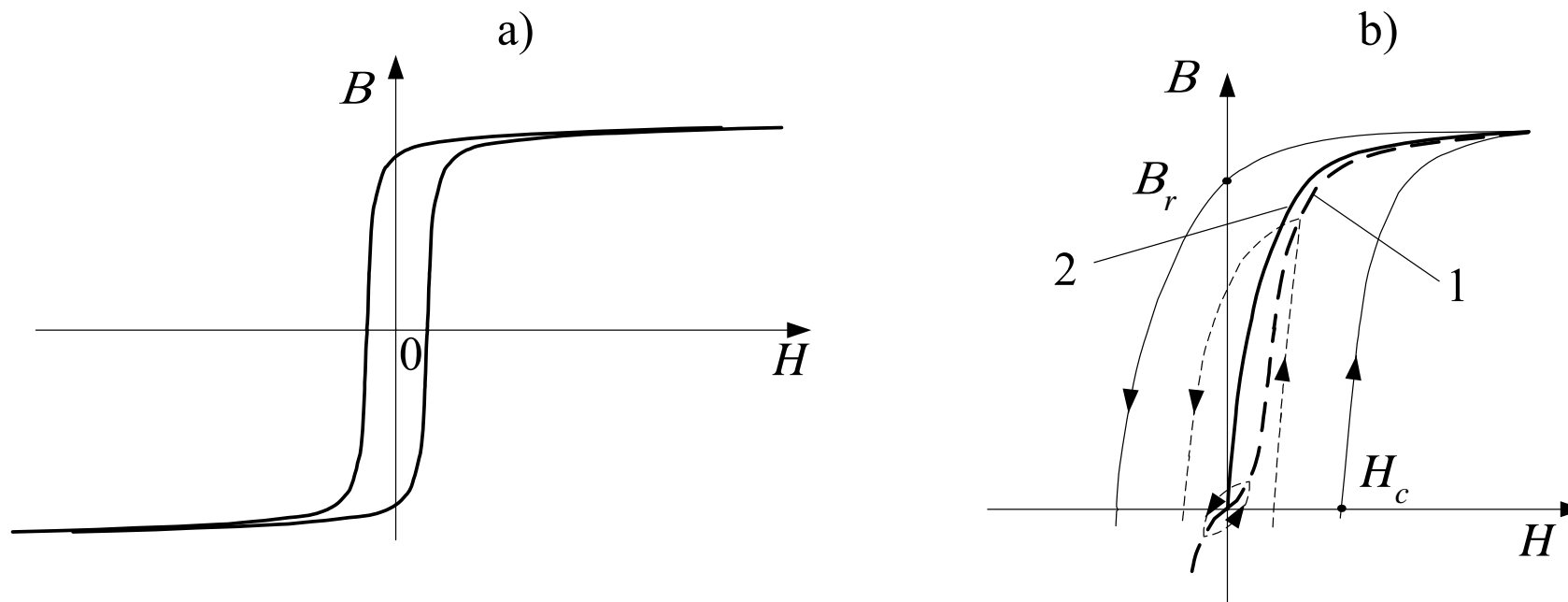
Modelowanie transformatorów

Model autotransformatora



Modelowanie transformatorów

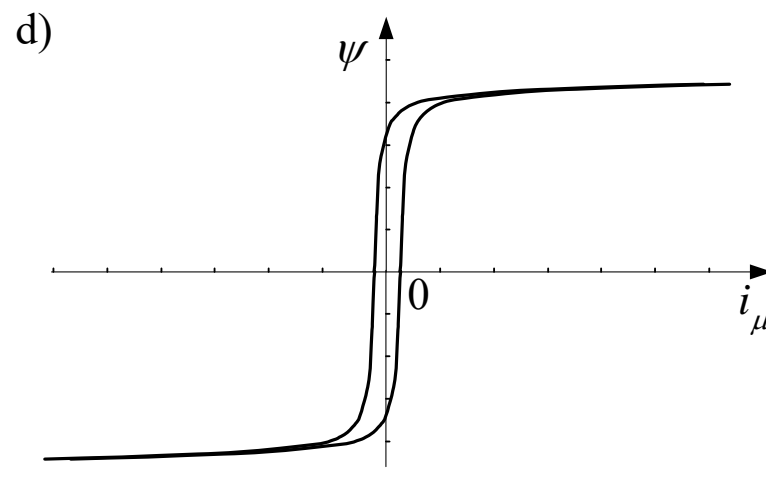
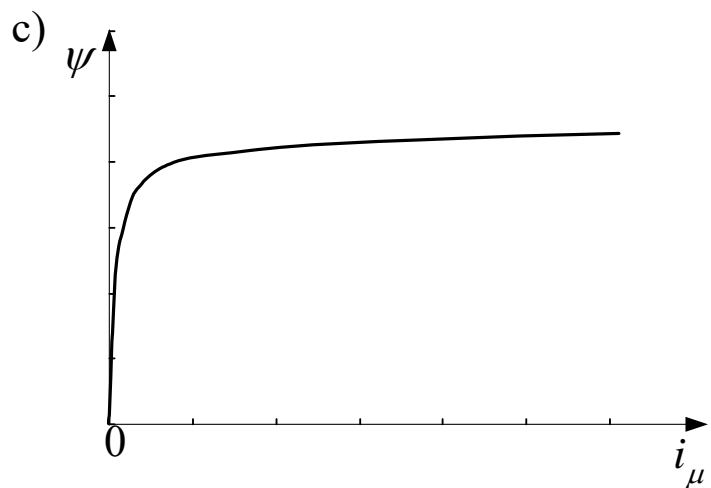
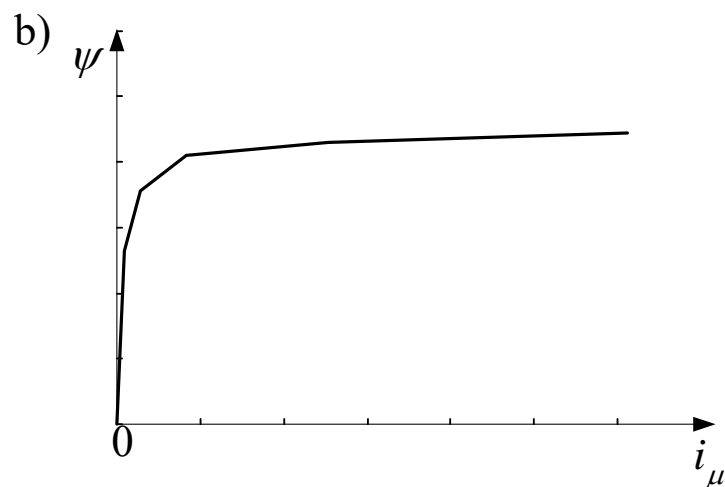
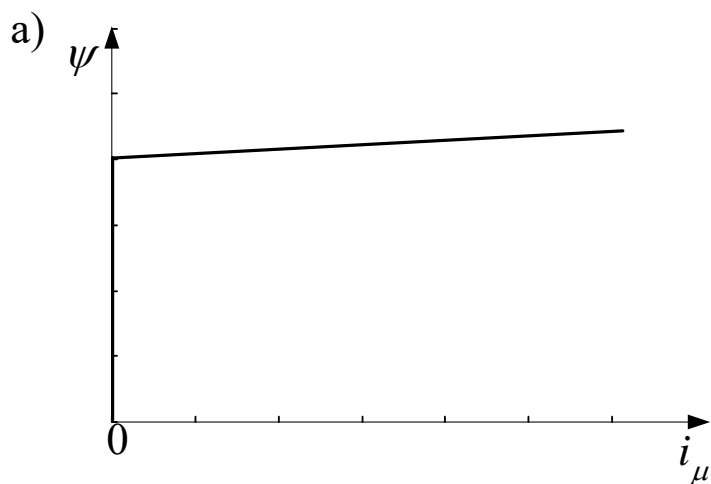
Obwód magnetyczny



Charakterystyka magnesowania z histerezą

Modelowanie transformatorów

Sposoby reprezentacji charakterystyki magnesowania



Modelowanie transformatorów

Podstawowe zależności

natężenie pola magnetycznego (A/m)

$$H = \frac{N_c}{l} i$$

strumień magnetyczny (Wb),

$$\psi = N_c S B = N_c \phi$$

S – powierzchnia przekroju (m^2),

$$\psi(t) = \int_{t_0}^t u(\tau) d\tau + \psi_0$$

B – indukcja magnetyczna ($\text{T} = \text{Wb}/\text{m}^2$)

przenikalność magnetyczna (H/m)

$$\mu = \frac{dB}{dH}$$

relacje stanu ustalonego:

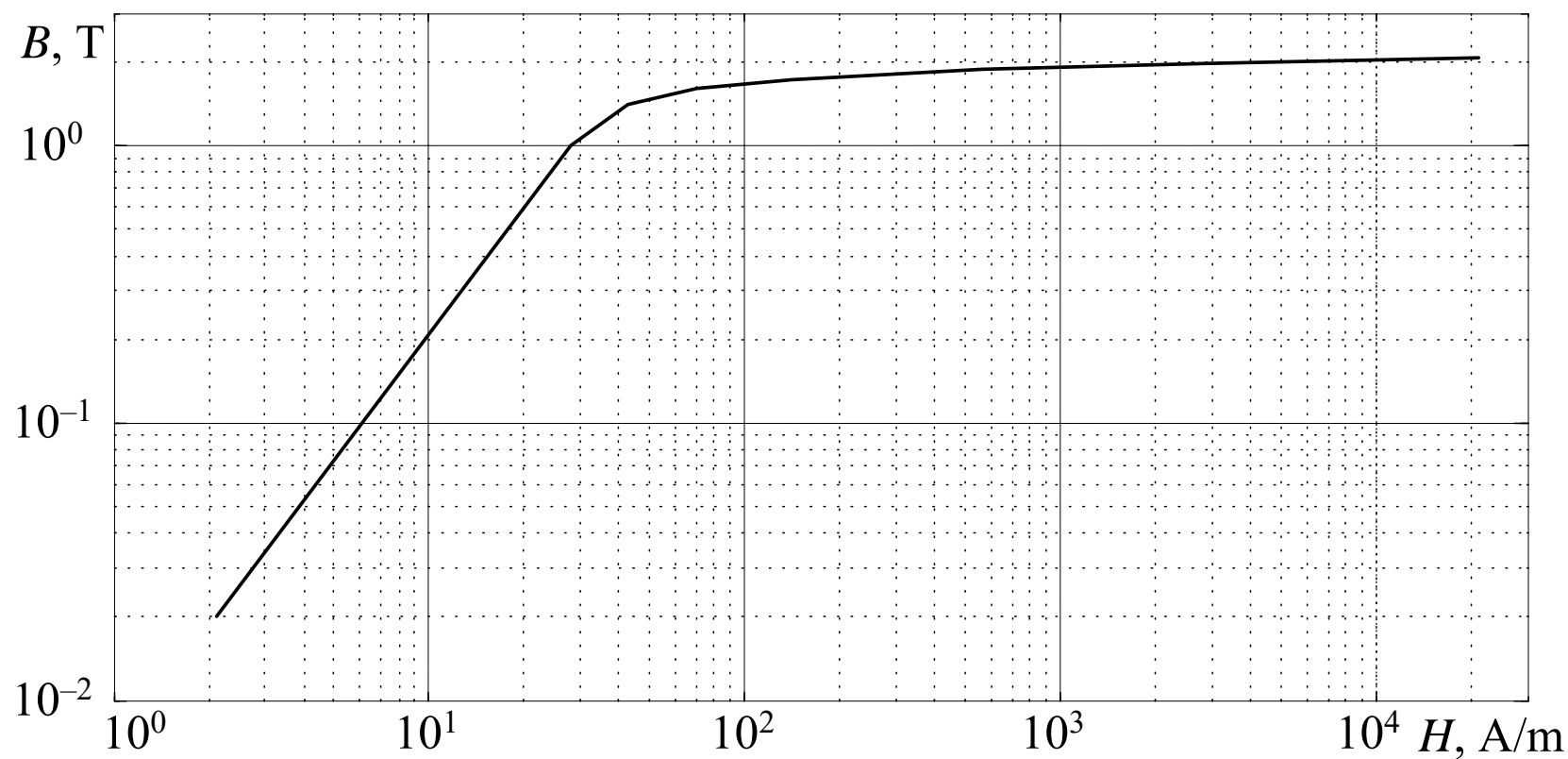
$$\Psi = \frac{1}{\omega} U$$

indukcyjność (H)

$$L = \frac{d\psi}{di} = \frac{N_c^2 S}{l} \mu$$

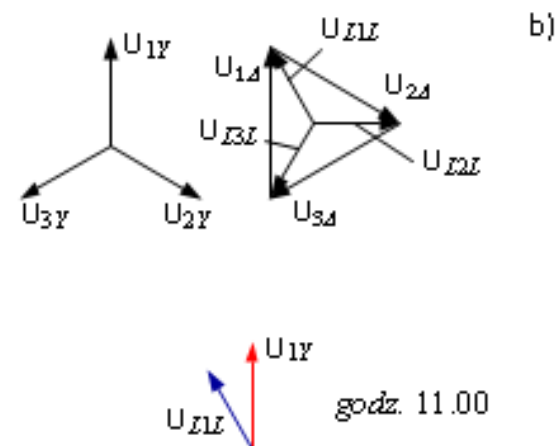
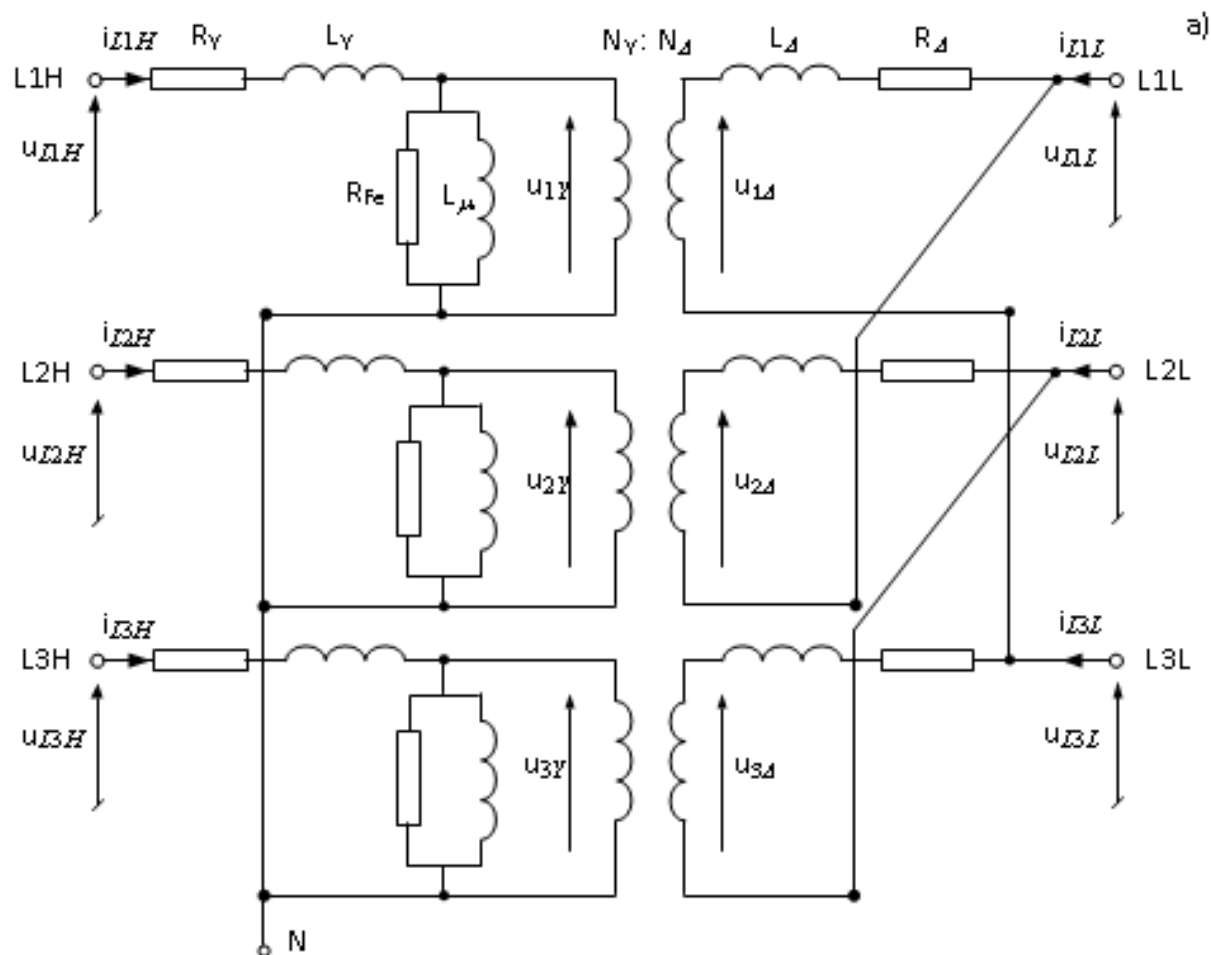
Modelowanie transformatorów

Charakterystyka magnesowania rdzenia przekładnika prądowego



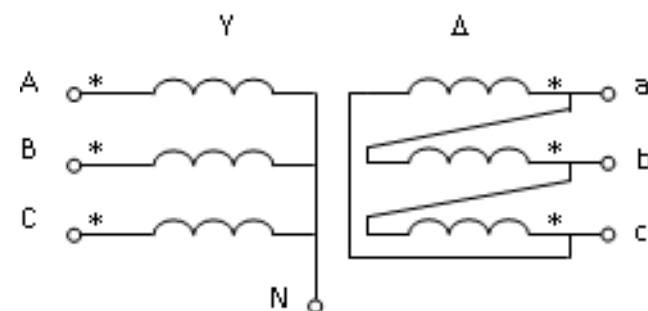
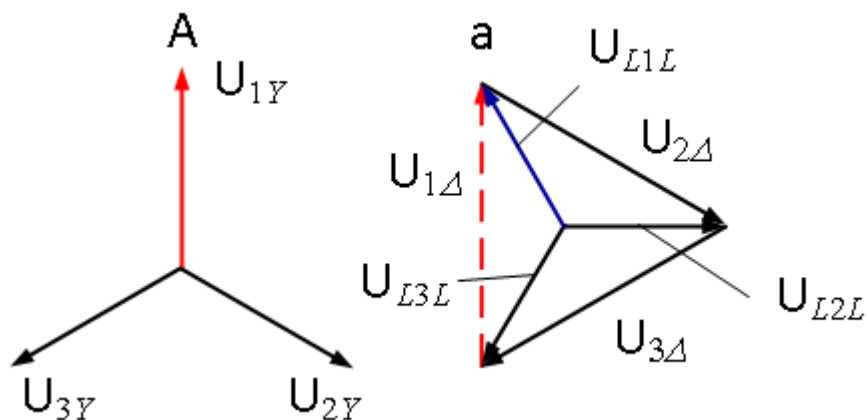
Modelowanie transformatorów

Transformator 3-fazowy Yd11

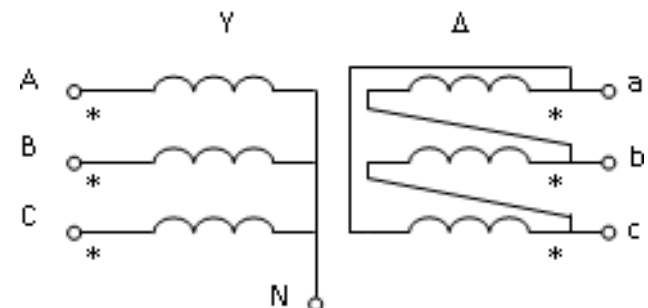
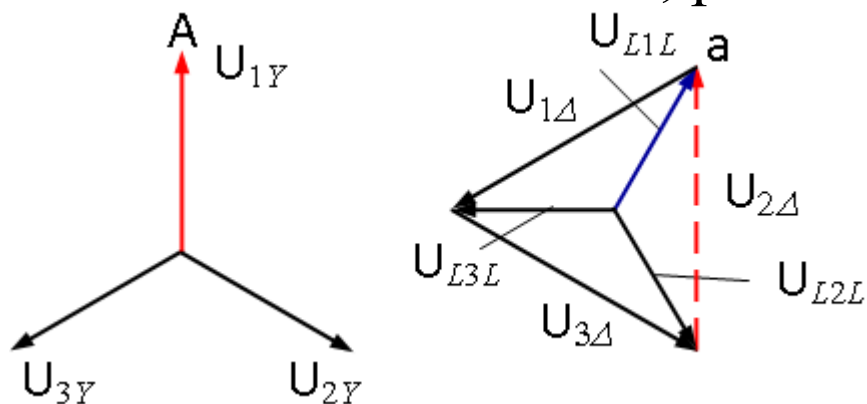


Modelowanie transformatorów

Zasada tworzenia połączeń uzwojeń transformatorów Yd



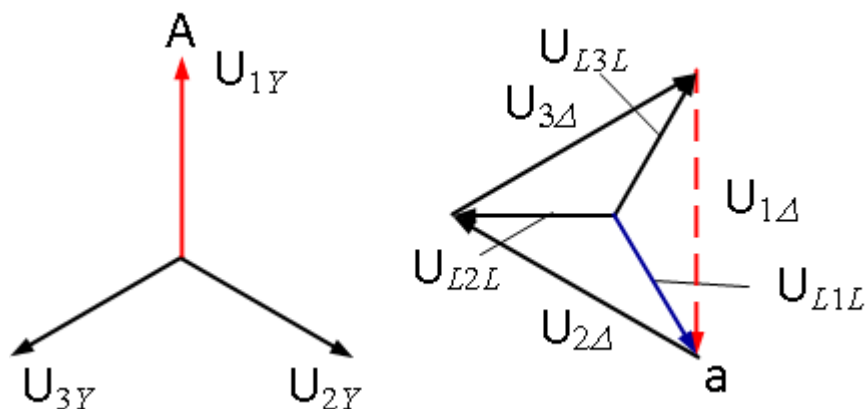
Uzwojenia U_{1Y} i $U_{1\Delta}$ są nawinięte zgodnie na tych samych kolumnach; podobnie: U_{2Y} i $U_{2\Delta}$ oraz U_{3Y} i $U_{3\Delta}$



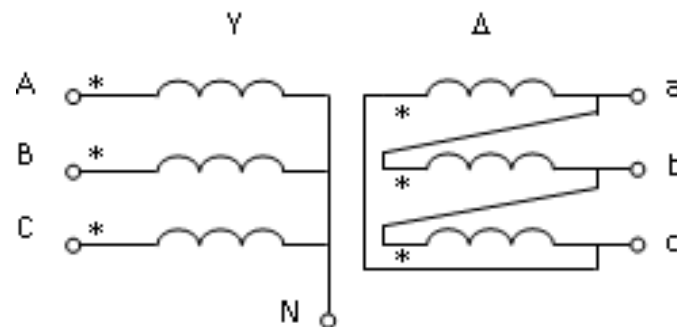
Uzwojenia U_{1Y} i $U_{2\Delta}$ są nawinięte zgodnie na tych samych kolumnach; podobnie: U_{2Y} i $U_{3\Delta}$ oraz U_{3Y} i $U_{1\Delta}$

Modelowanie transformatorów

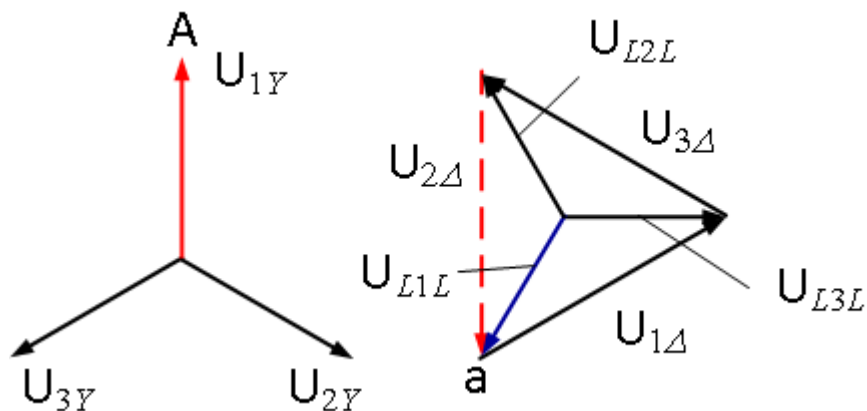
Zasada tworzenia połączeń uzwojeń transformatorów Yd



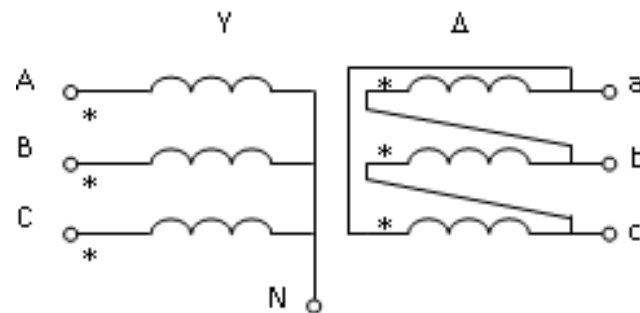
Yd5



Uzwojenia U_{1Y} i $U_{1\Delta}$ są nawinięte przeciwnie na tych samych kolumnach; podobnie: U_{2Y} i $U_{2\Delta}$ oraz U_{3Y} i $U_{3\Delta}$



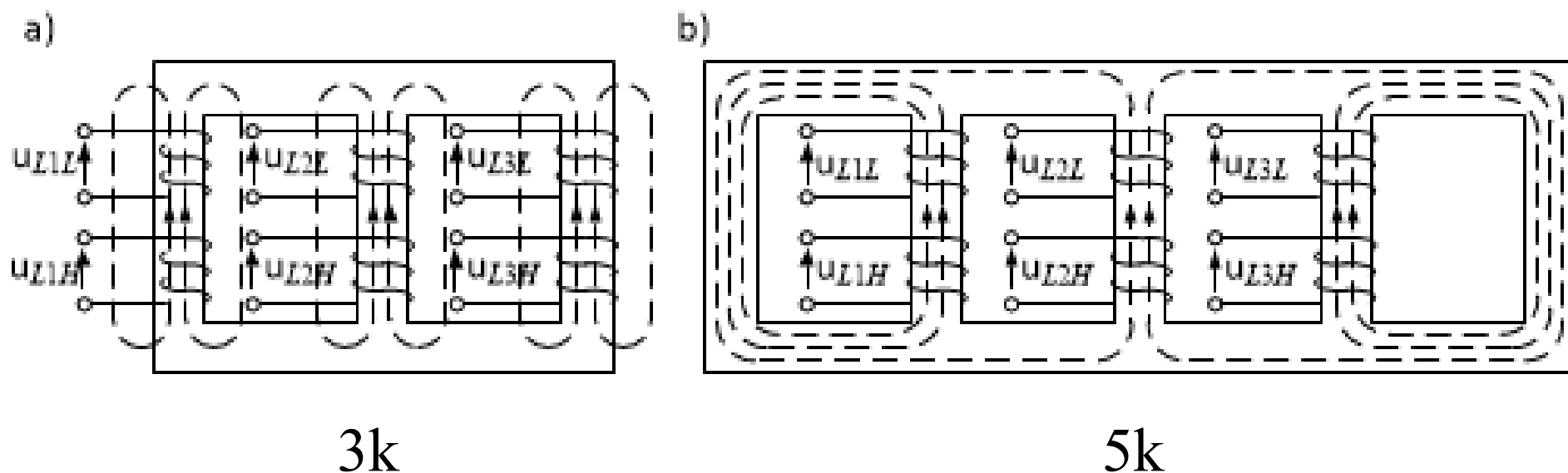
Yd7



Uzwojenia U_{1Y} i $U_{2\Delta}$ są nawinięte przeciwnie na tych samych kolumnach; podobnie: U_{2Y} i $U_{3\Delta}$ oraz U_{3Y} i $U_{1\Delta}$

Modelowanie transformatorów

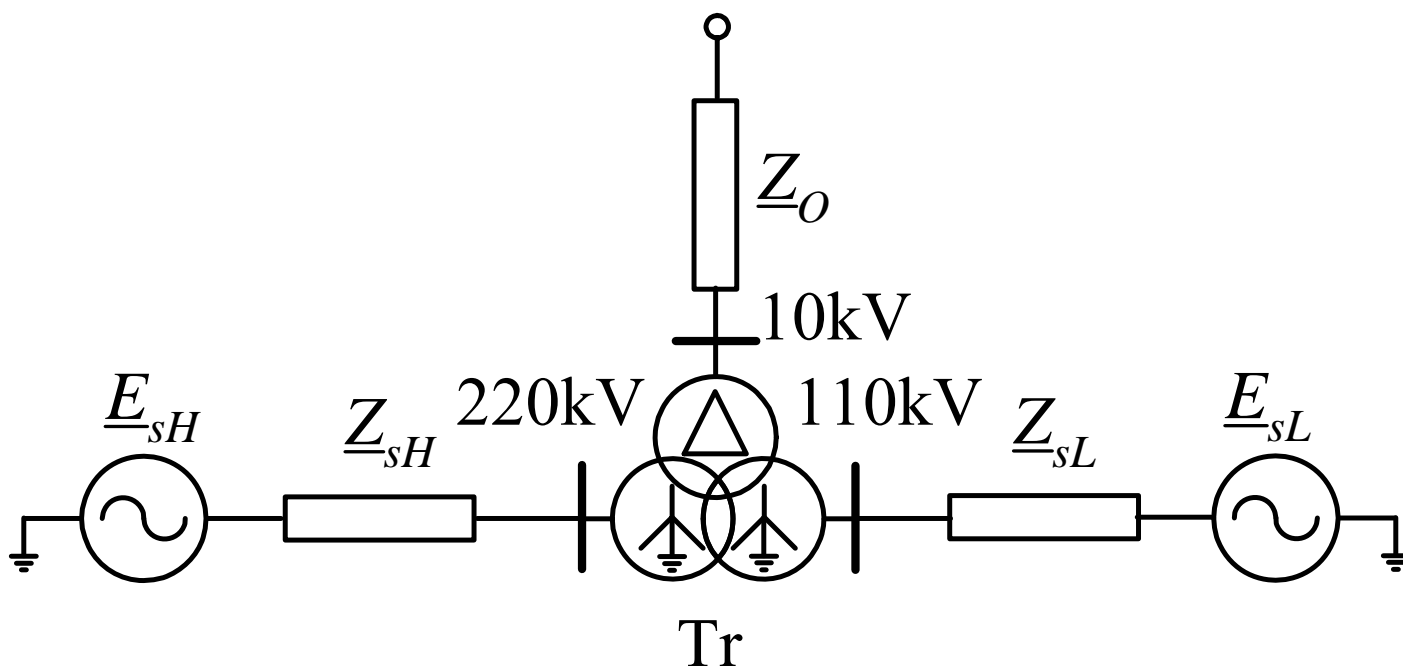
Budowa rdzenia



Składowa zerowa w rdzeniu 3k ma dużą oporność magnetyczną (reluktancję) dla składowej zerowej prądu

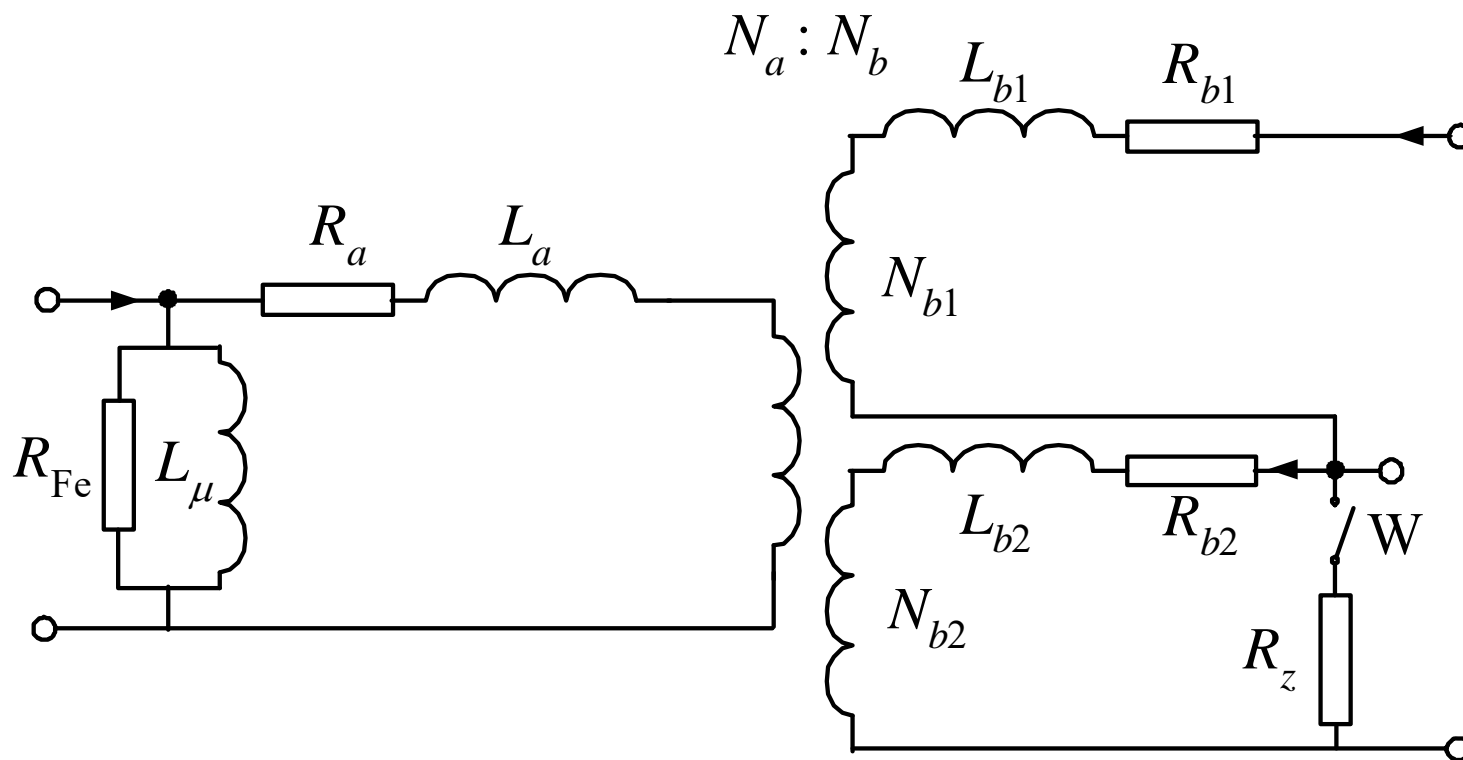
Modelowanie transformatorów

Transformatory wielouzwojeniowe



Modelowanie transformatorów

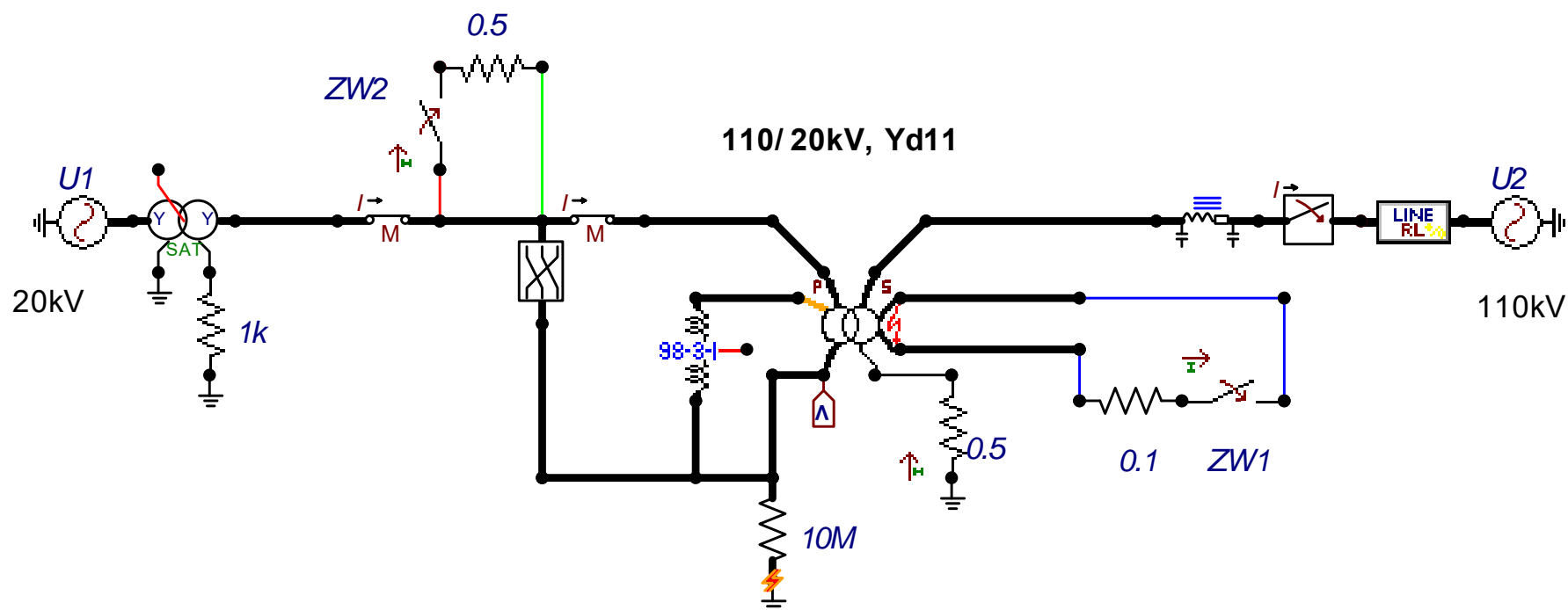
Modelowanie zwarcia wewnętrznego zwojowego



Modelowanie transformatorów

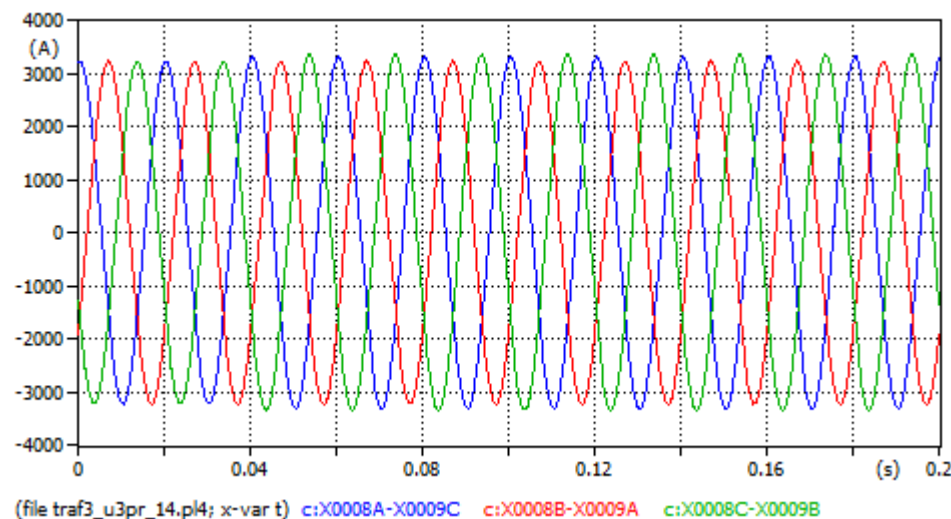
Model transformatora 110/20kV, Yd11

- zwarcie wewnętrzne obejmujące 1% uzwojenia strony 110kV, $R_F = 0,1\Omega$, $t_F = 35\text{ms}$

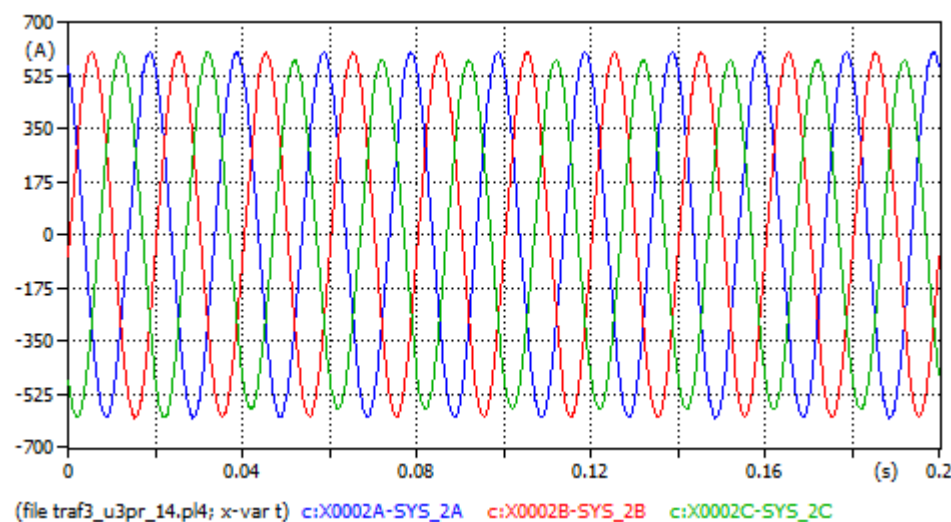


Modelowanie transformatorów

- prądy zwarciovye I_{20kV}

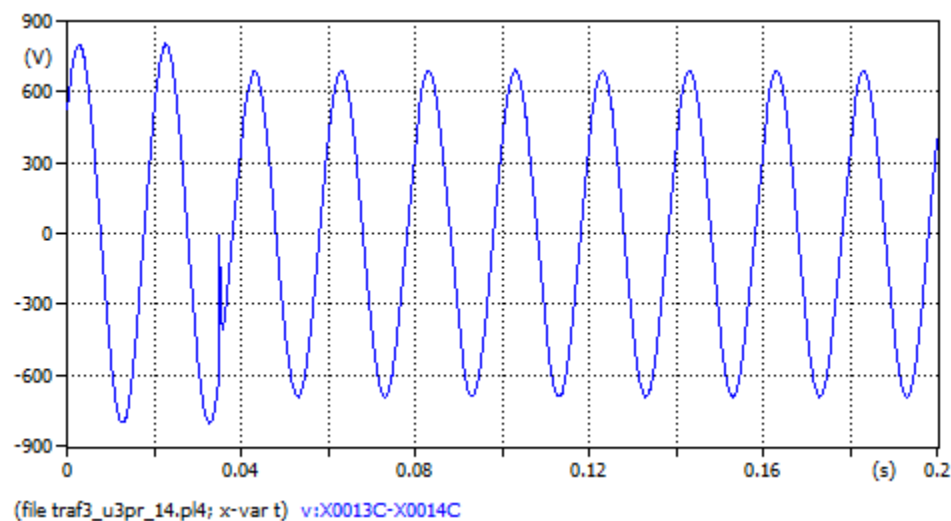


- prądy zwarciovye I_{110kV}

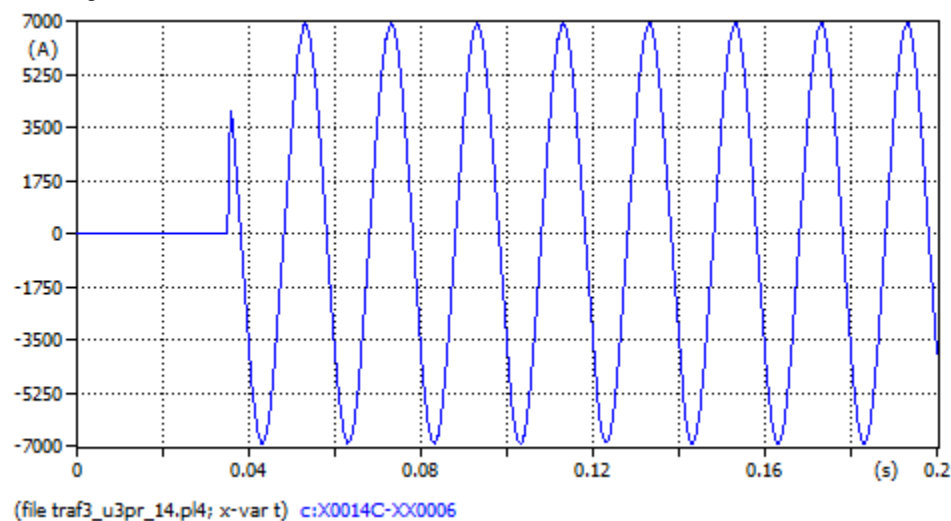


Modelowanie transformatorów

- napięcie w miejscu zwarcia

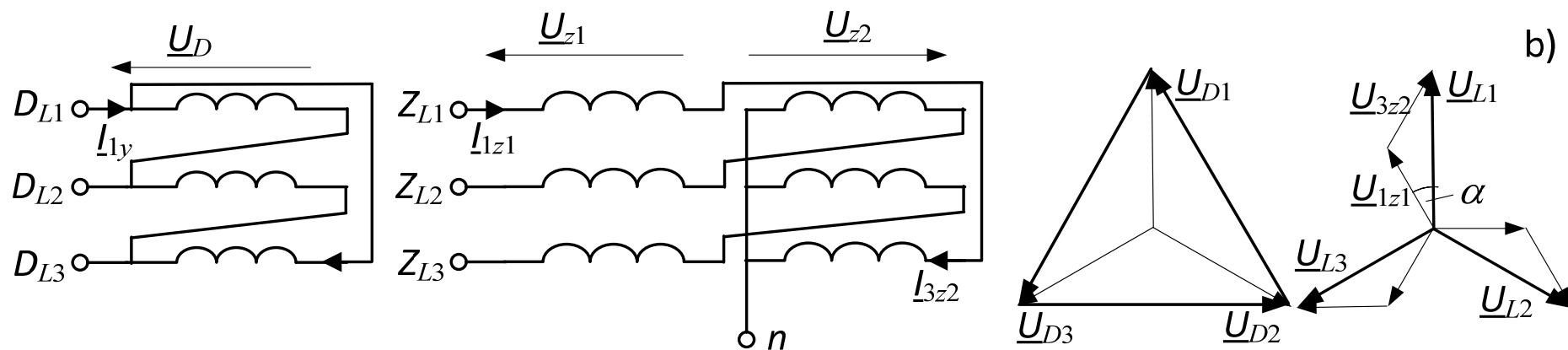
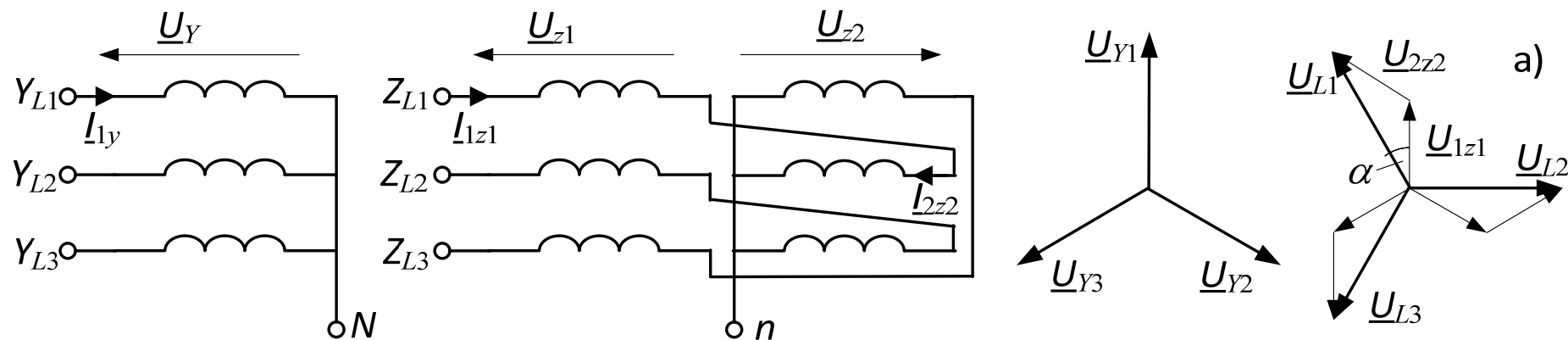


- prąd zwarciaowy



Modelowanie transformatorów

Transformatory z uzwojeniem Z



Przekładnia zwojowa:

$$g_z = \frac{N_{z2}}{N_{z1}} = \left| \frac{U_{z2}}{U_{z1}} \right| = \frac{\sin \alpha}{\sin(\pi/3 - \alpha)}$$

Modelowanie transformatorów

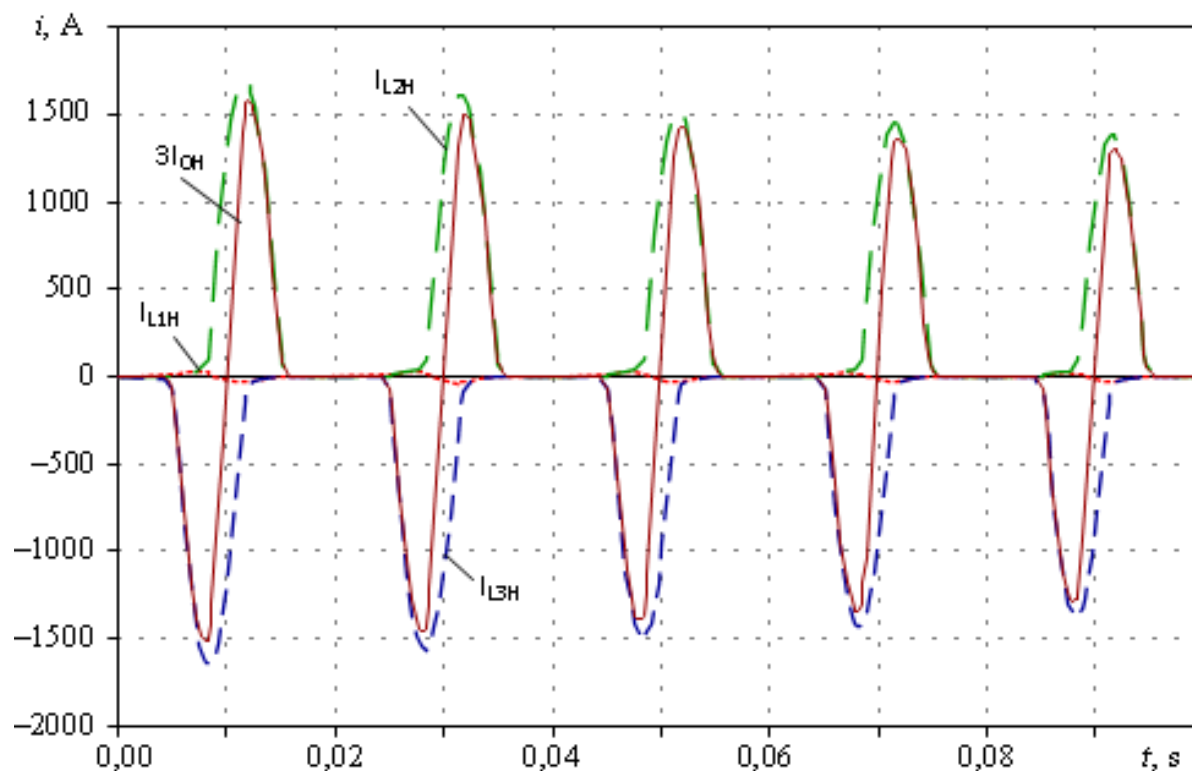
Transformatory z uzwojeniem Z

Transformatory z uzwojeniem Z są najczęściej stosowane jako transformatory uziemiające w sieciach średnich napięć. Wówczas $N_{z1} = N_{z2}$, co daje: $\alpha = \pi/6$.

Przez zmianę przekładni zwojowej można uzyskać różne kąty przesunięcia α , co wykorzystuje się w transformatorach stosowanych do zasilania przekształtników energoelektronicznych.

Modelowanie transformatorów

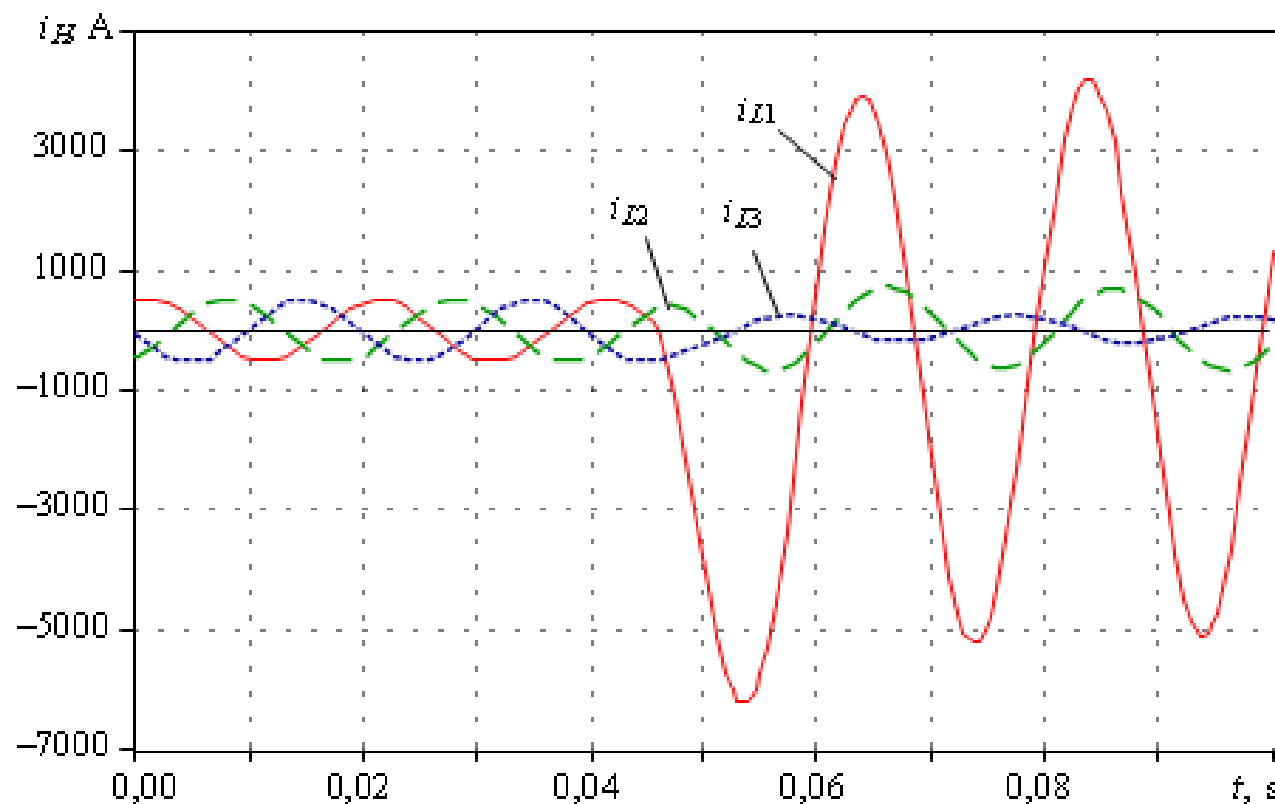
Przykład: załączanie nieobciążonego transformatora Yd11



Przebiegi prądów fazowych i składowej zerowej po stronie Y.
Widać prawie jednopółwkowy prąd w dwóch fazach.

Modelowanie transformatorów

Przykład: Transformator Yd11; zwarcie A-G na zaciskach Y

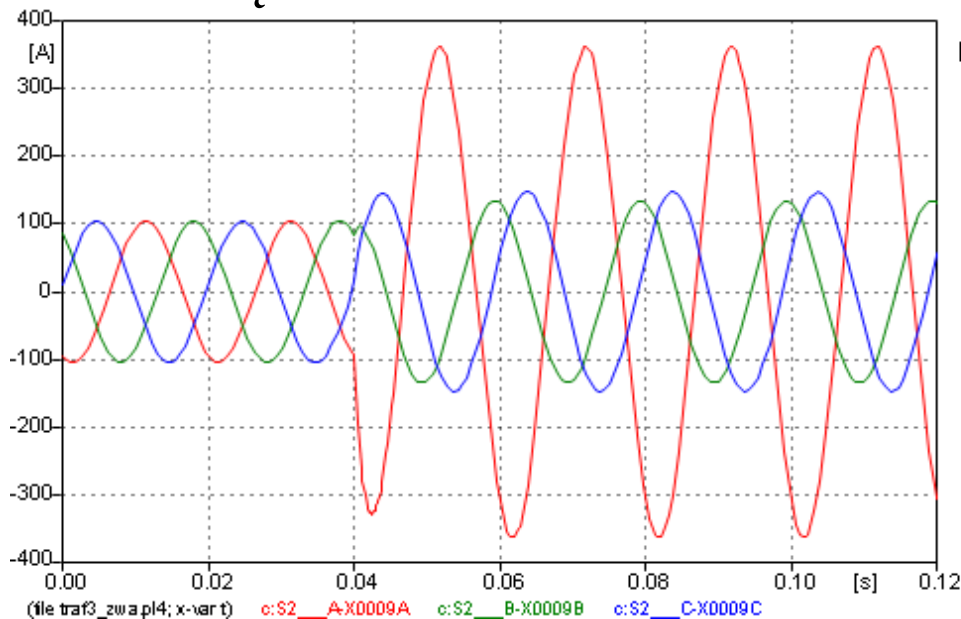


Przebiegi prądów fazowych. Widać obecność składowej nieokresowej w prądzie zwarciovym.

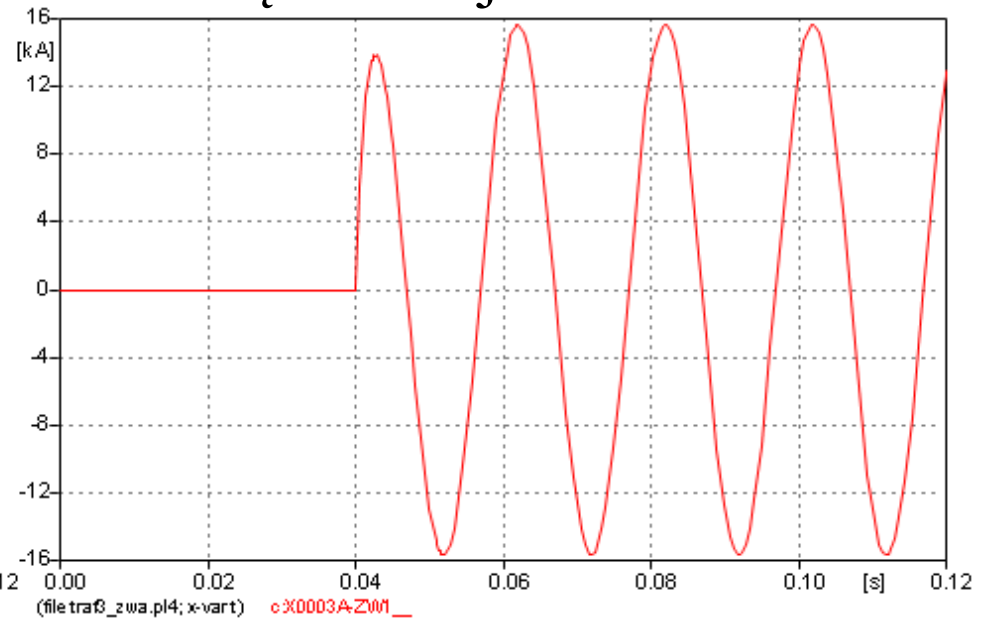
Modelowanie transformatorów

Przykład: Transformator Yd11; zwarcie 2,5% uzwojenia fazy A po stronie Y

Prąd na zaciskach Y



Prąd w miejscu zwarcia



Prąd zwarciový jest bardzo duży, podczas gdy prąd mierzony na zaciskach strony Y wykazuje tylko niewielki wzrost po zwarcu

The diagram illustrates the architecture of a digital protection system. It shows a power system with a source S , a busbar, a circuit breaker *Wylącznik*, and a line *Linia*. A protection unit *PN* is connected to the busbar, measuring voltage u_s and current i_L . The unit's internal processing is shown in a dashed box:

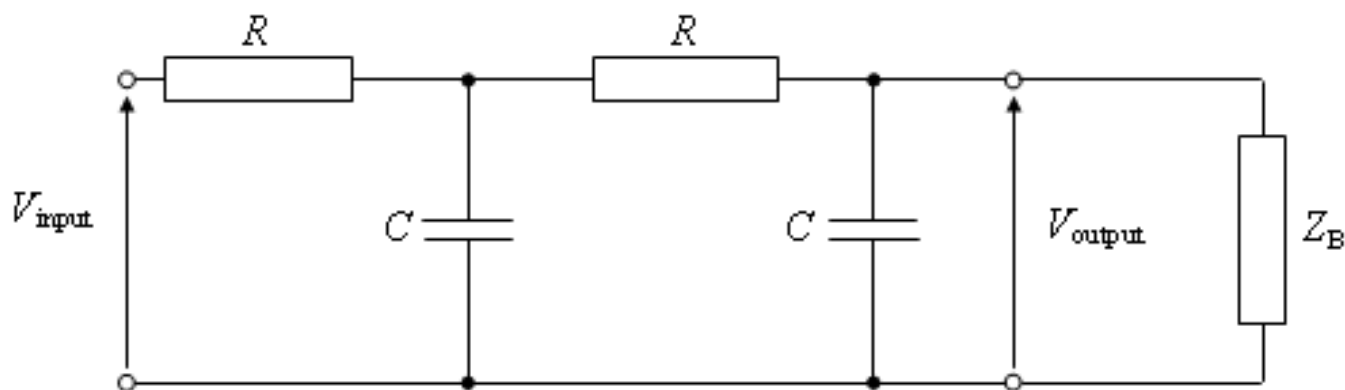
- Filtracja analogowa** (Analog filtering) - associated with *Filtry odcinające (antyaliasingowe)*
- Przetwarzanie A/C** (A/D conversion)
- Przetwarzanie cyfrowe** (Digital processing) - associated with *Filtracja cyfrowa*
- Algorytmy funkcjonalne** (Functional algorithms) - associated with *Określenie wielkości kryterialnych*
- Algorytmy decyzyjne** (Decision algorithms) - associated with *Podjęcie decyzji*

A vertical label *Przekaznik* is on the left.

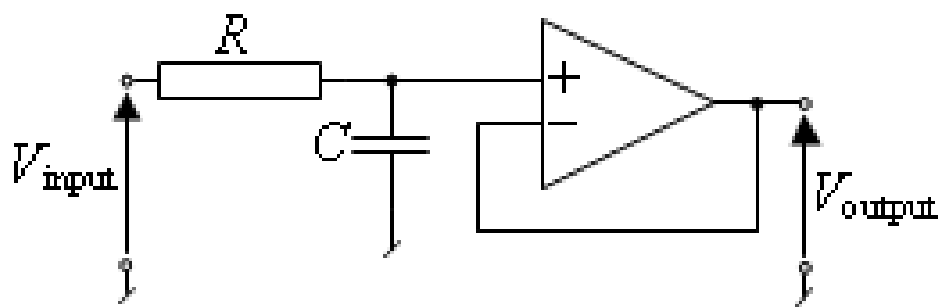
Modelowanie przekładników i obwodów wtórnych

Schematy analogowych filtrów odcinających

filtr pasywny



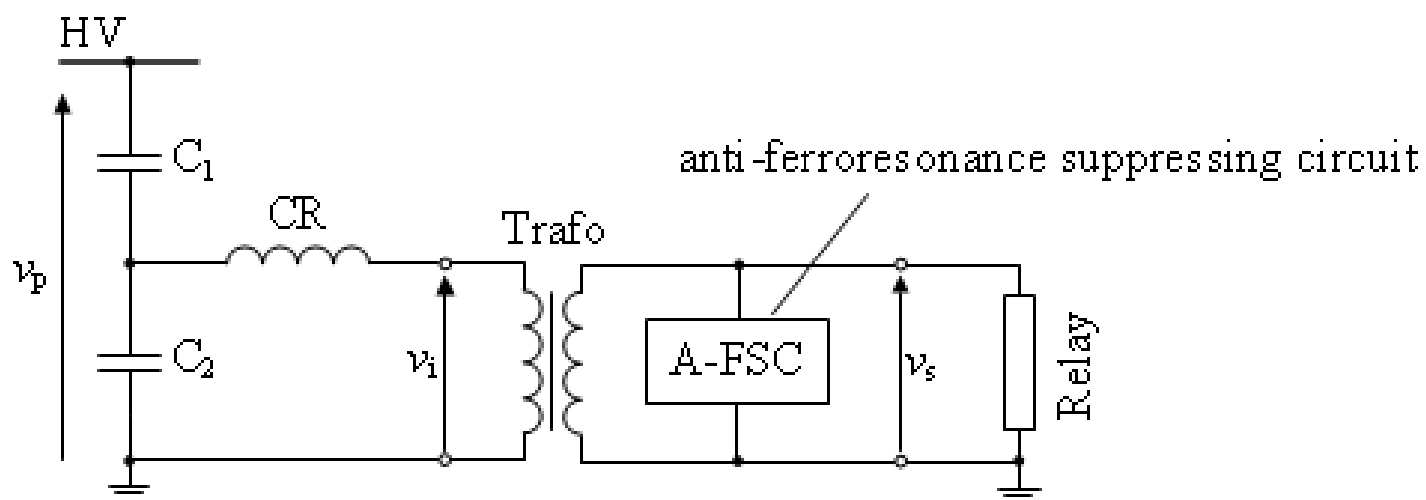
filtr aktywny



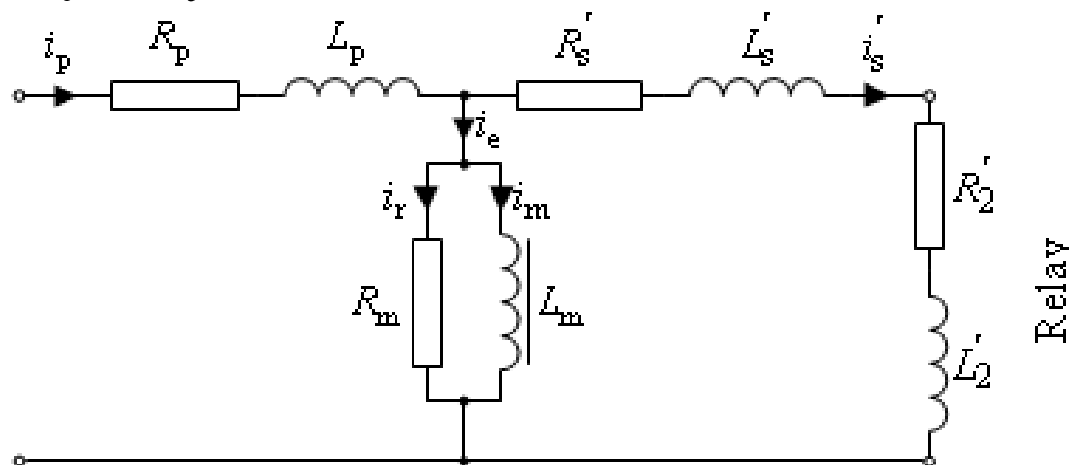
Modelowanie przekładników i obwodów wtórnych

Przekładniki zabezpieczeniowe

Pojemnościowy Przekładnik Napięciowy - PPN



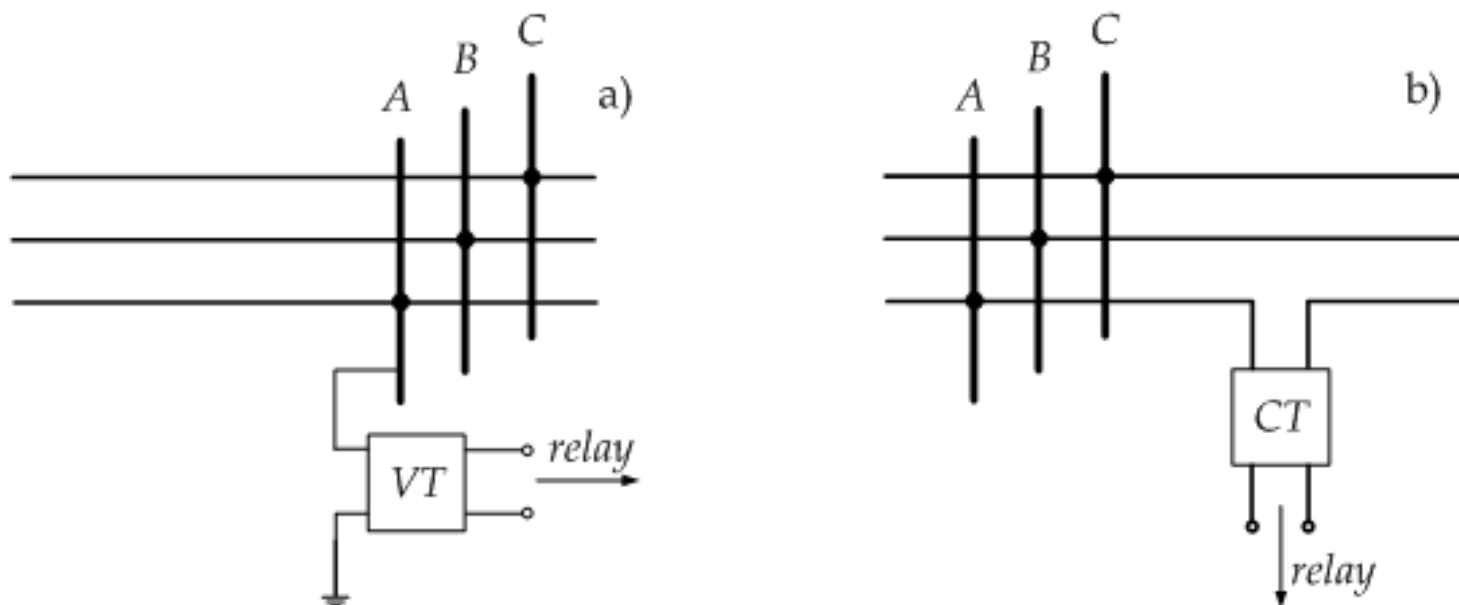
Przekładnik Prądowy - PP



Przekładniki zabezpieczeniowe

instrument transformers

1. Konwencjonalne przekładniki napięciowe (PN) mają budowę jedno- lub trójfazowych transformatorów.
2. Przekładniki prądowe (PP) różnią się od standardowych transformatorów obwodem magnetycznym. Uzwojenie pierwotne jest szeregowo łączone z obwodem zabezpieczanego urządzenia.

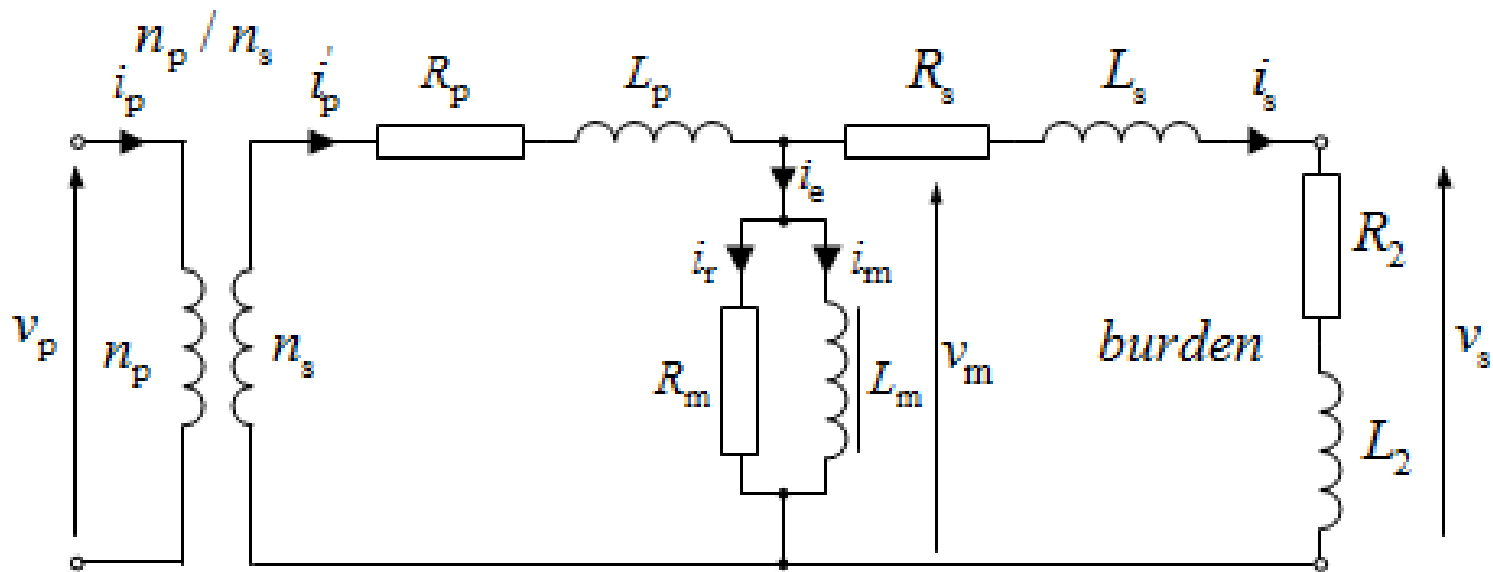


Przekładniki zabezpieczeniowe

Schemat zastępczy

$$\frac{n_p}{n_s} = \frac{V_{pN}}{V_{sN}} \quad - \text{ dla PN}$$

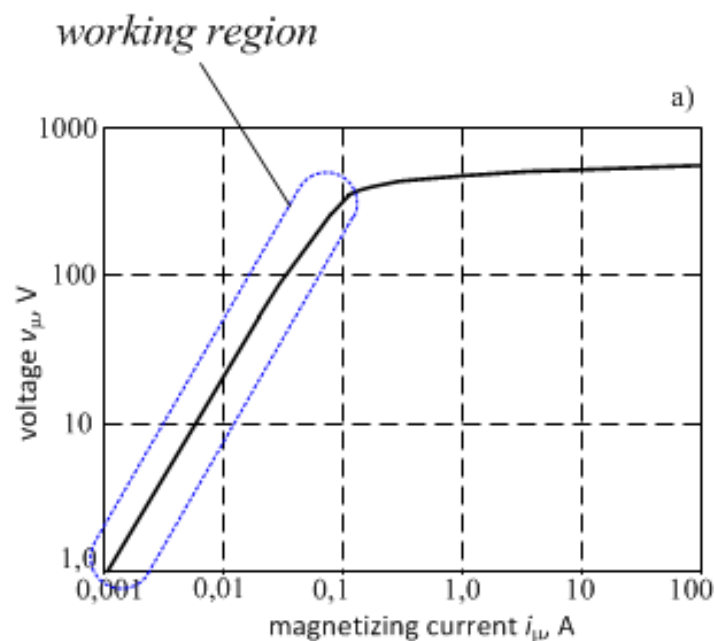
$$\frac{n_p}{n_s} = \frac{I_{sN}}{I_{pN}} \quad - \text{ dla PP}$$



Przekładniki zabezpieczeniowe

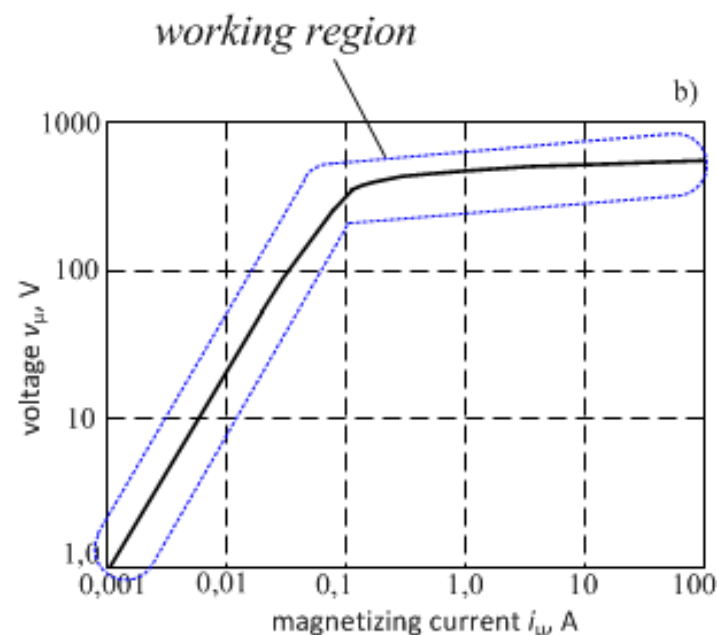
Charakterystyka magnesowania rdzenia.

Główne przyczyny błędów wynikają z przebiegu charakterystyki magnesowania w obszarze pracy podczas zakłóceń w sieci pierwotnej.



Dla PN: $0 \leq V \leq 1.2V_N$

$$\phi = K \int_{t_1}^{t_2} v_m dt$$

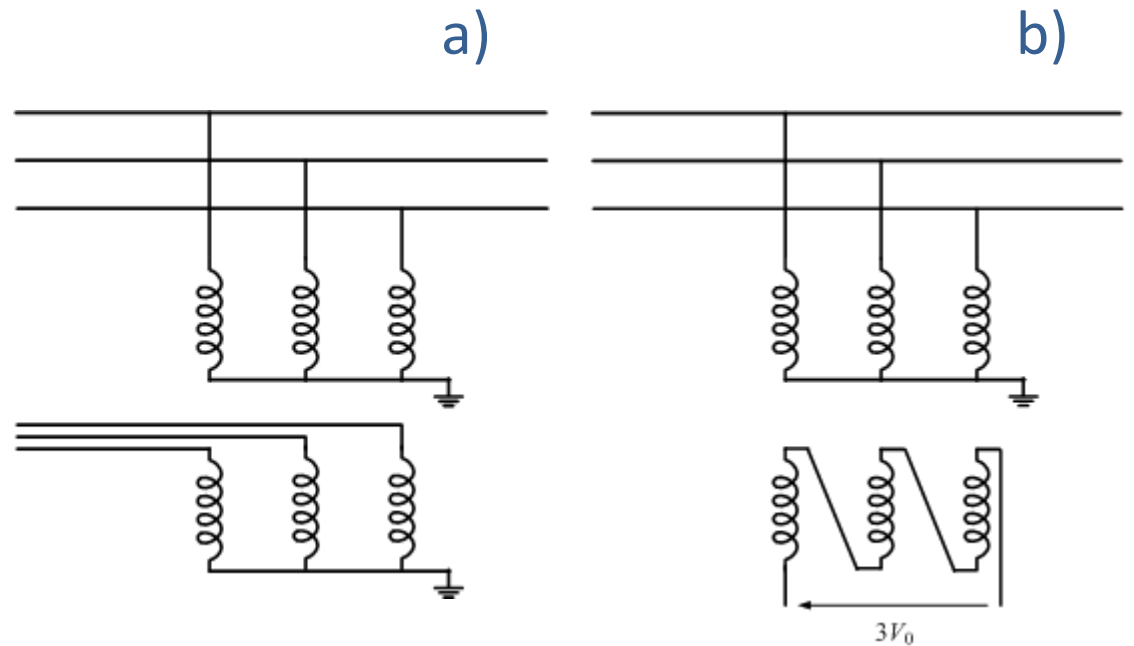


Dla PP: $0 \leq I \leq 150I_N$

Przekładniki napięciowe



Typowe rozwiązanie
dla sieci SN



Schematy połączeń do pomiaru napięcia
fazowego (a) oraz składowej zerowej
napięcia: $v_0 = (v_a + v_b + v_c)/3$

Przekładniki napięciowe

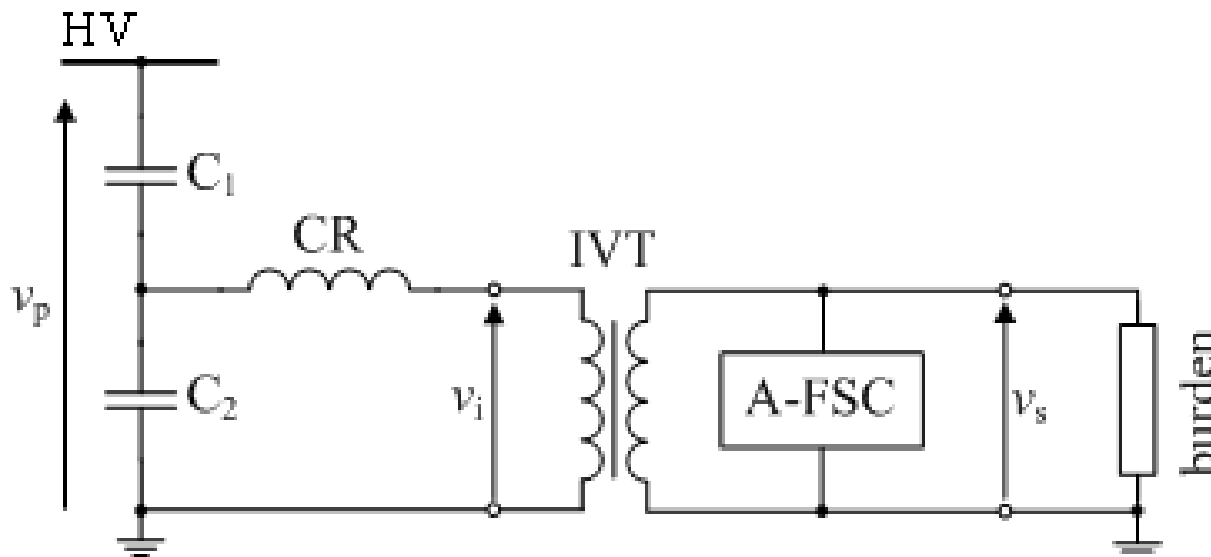
Podstawowa charakterystyka:

1. Typowa wartość napięcia wtórnego: 100V (napięcie międzyfazowe) lub 57,7V (napięcie fazowe).
2. Błędy związane z nieliniowością rdzenia przekładnika są zazwyczaj pomijane, gdyż najczęściej napięcie sieci nie przekracza standardowego zakresu: od 0 to do 120% wartości znamionowej.
3. Przekładniki wykonane w postaci transformatorów elektromagnetycznych są często źródłem ferromagnetycznych stanów przejściowych.

Przekładniki napięciowe

Pojemnościowe przekładniki napięciowe (PPN)

PPN są najczęściej stosowane w sieciach o napięciu znamionowym $U_N \geq 220\text{kV}$



C_1, C_2 – dzielnik pojemnościowy,

CR – dławik kompensujący

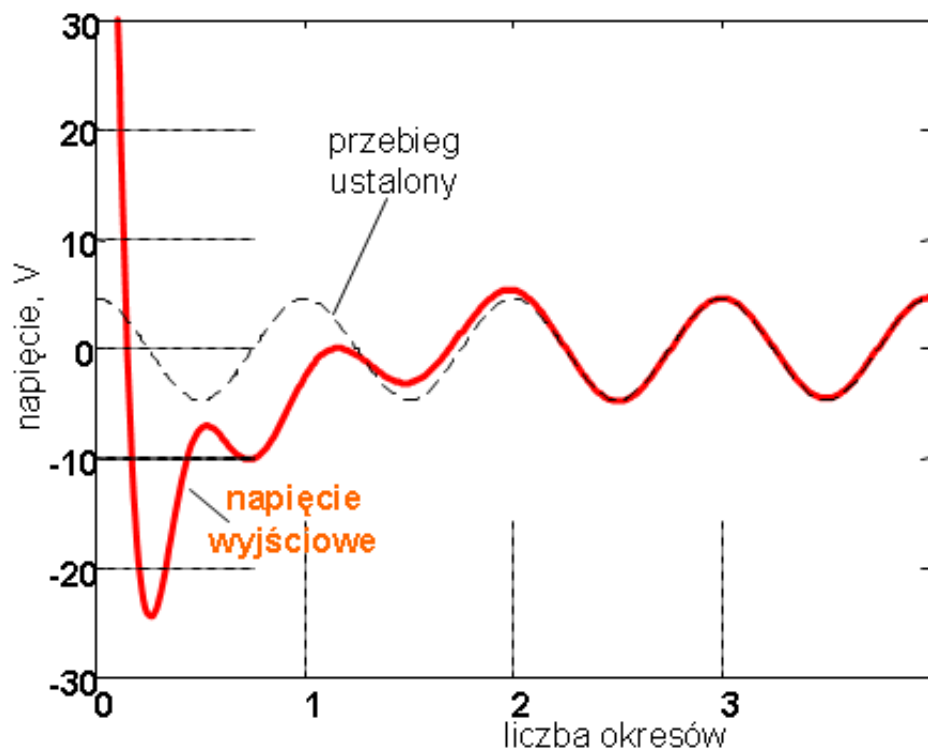
IVT – transformator pośredni,

A-FSC – obwód tłumiący anty-ferrorezonansowy

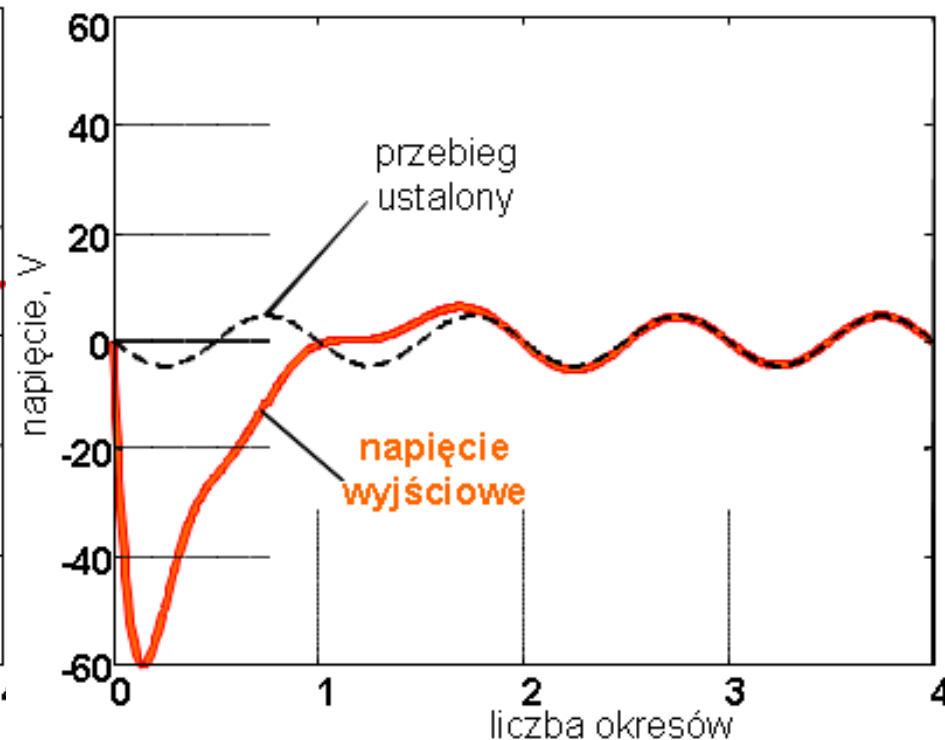
Pojemnościowy przekładnik napięciowy PPN

Stan przejściowy po zwarcu

$$u_{zw} = u_{max}$$



$$u_{zw} = 0$$



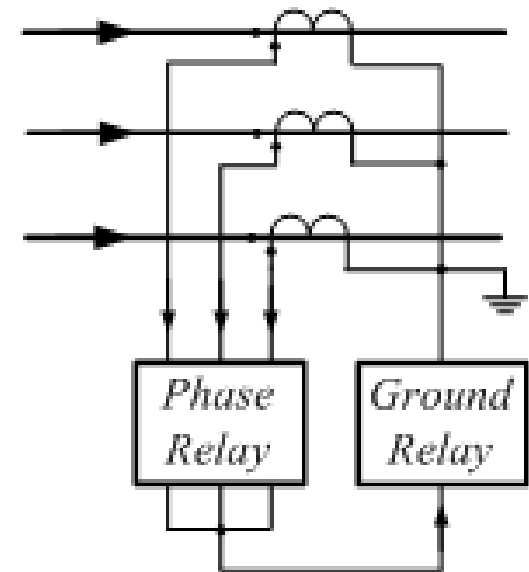
Przekładnik prądowy PP



Typowe wykonanie dla
sieci SN



Typowe wykonanie dla
sieci nN



Przyłączenie do sieci
trójfazowej

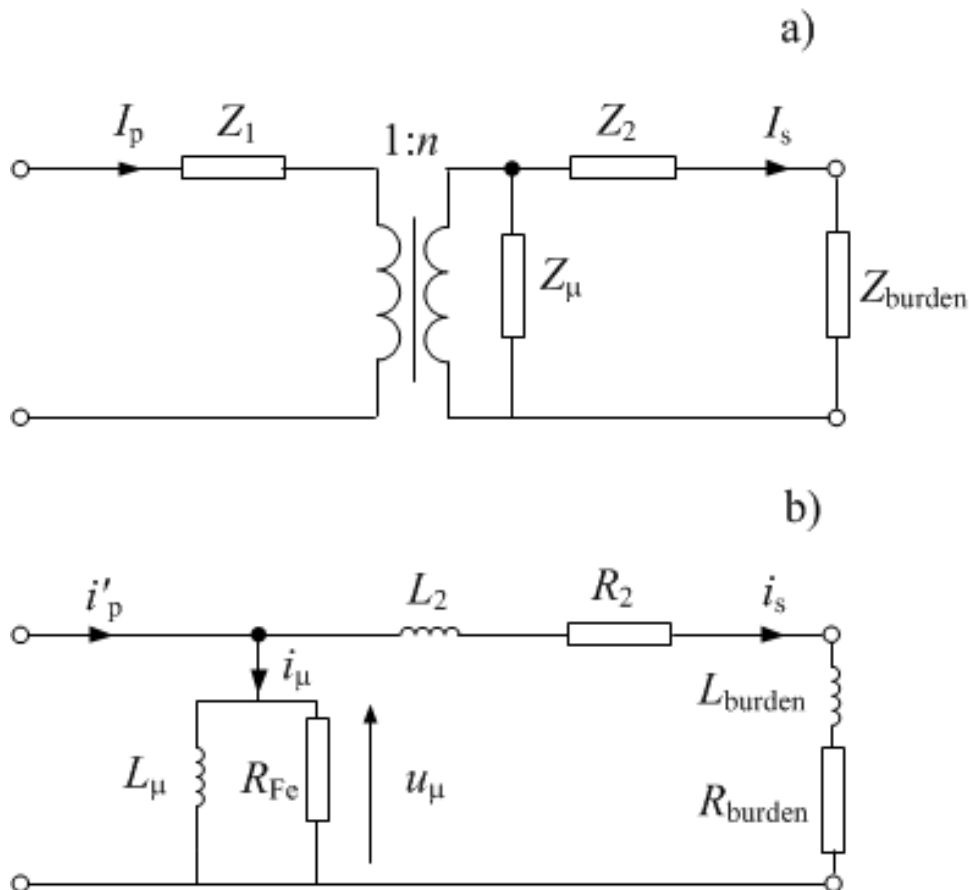
Przekładnik prądowy PP



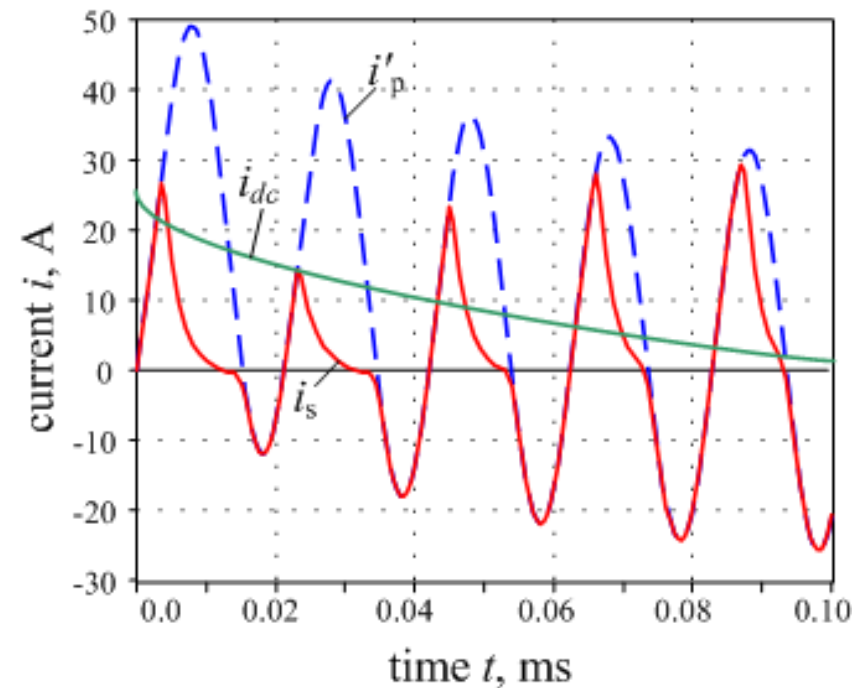
Przekładnik prądowy w sieci 110kV

Przekładnik prądowy PP

Analiza stanów przejściowych



schematy zastępcze



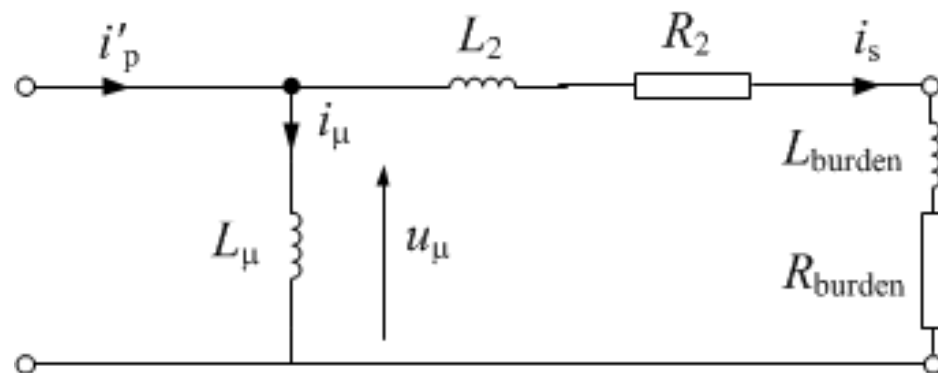
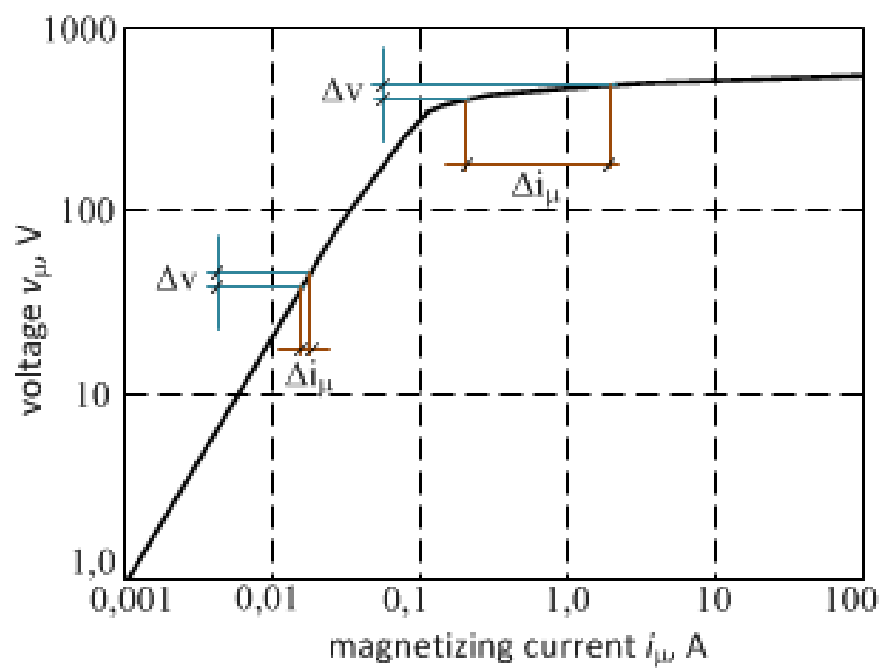
i'_p – prąd pierwotny;

i_{dc} – składowa aperiodyczna;

i_s – prąd wtórny;

Przekładnik prądowy PP

Nasycenie rdzenia przekładnika

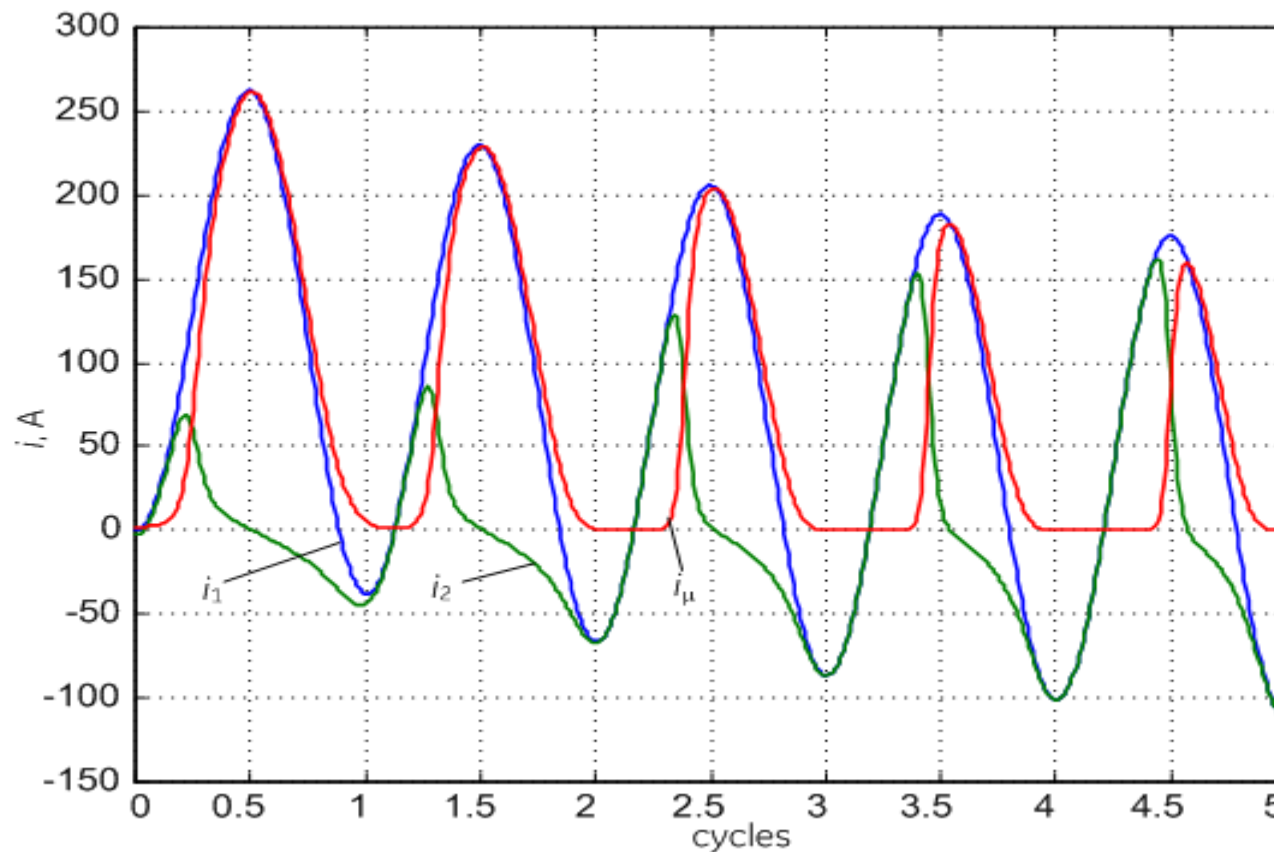


$$i_s = i'_p - i_\mu$$

Charakterystyka magnesowania

Przekładnik prądowy PP

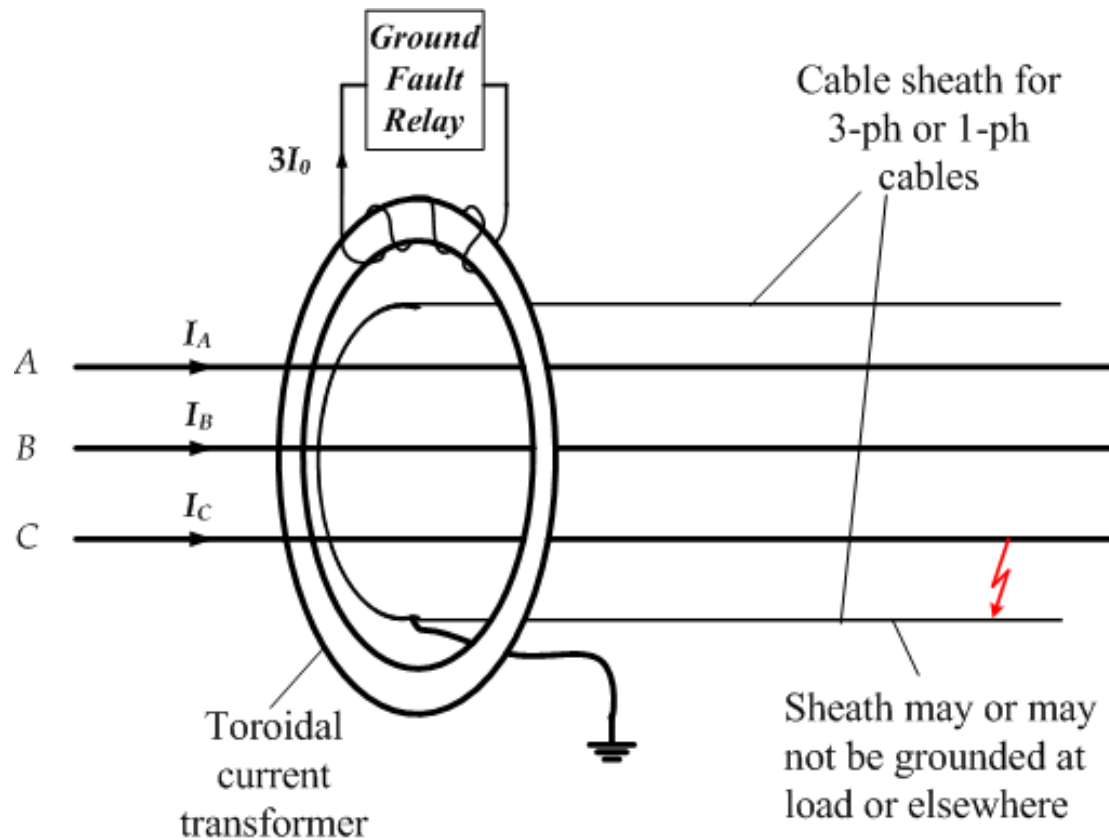
Przebiegi związane z nasyceniem rdzenia



i_1 – prąd pierwotny; i_2 – prąd wtórny; i_μ – prąd magnesujący;

Przekładnik prądowy PP

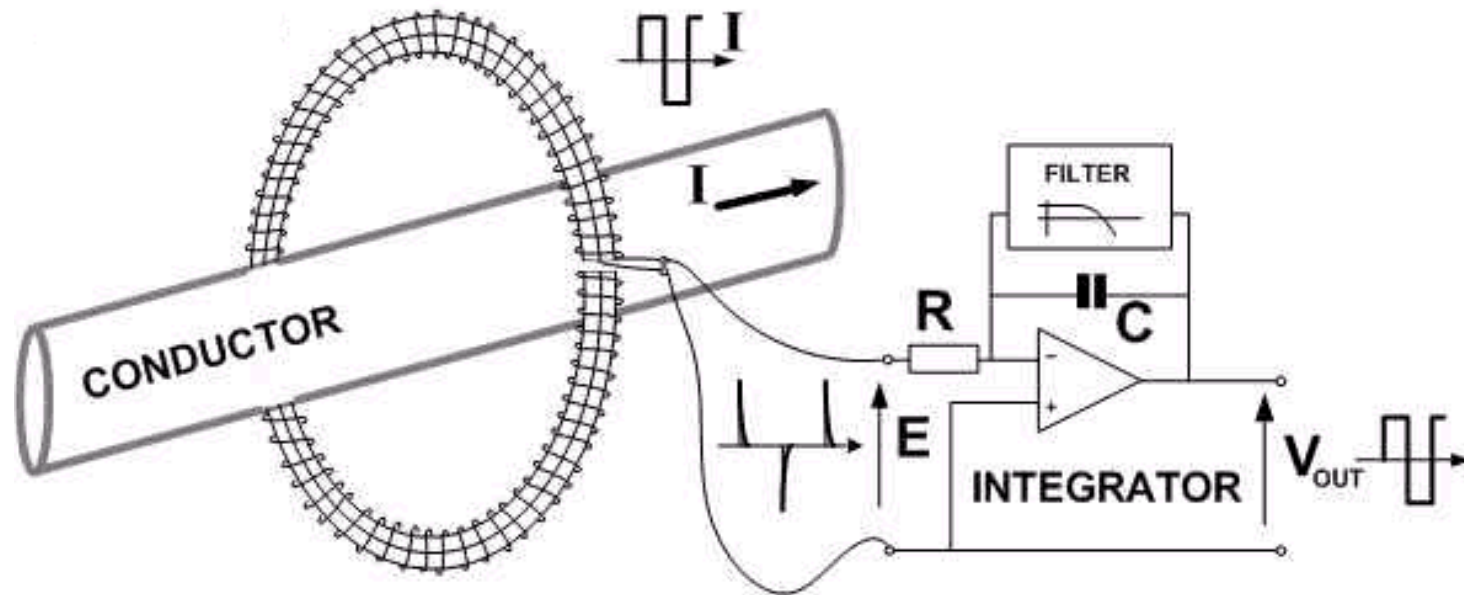
PP stosowane w sieciach kablowych



Przekładnik Farranti'ego: pomiar składowej zerowej prądu odbywa się na zasadzie sumowania strumieni magnetycznych pochodzących z trzech faz

Przekładnik prądowy PP

Cewka Rogowskiego



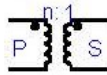

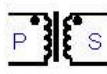



$$E = H \frac{dI}{dt}$$

$$V_{out} = \frac{1}{RC} \int E dt$$

H – natężenie strumienia magnetycznego, Vs/A;

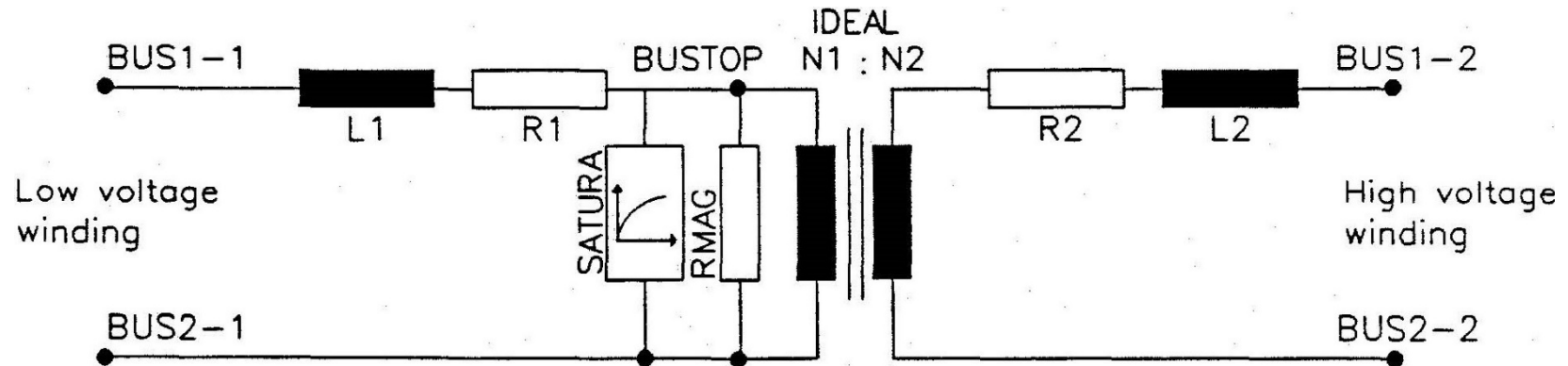
V_{out} jest proporcjonalne do prądu pierwotnego I

Modele transformatorów w ATP/EMTP

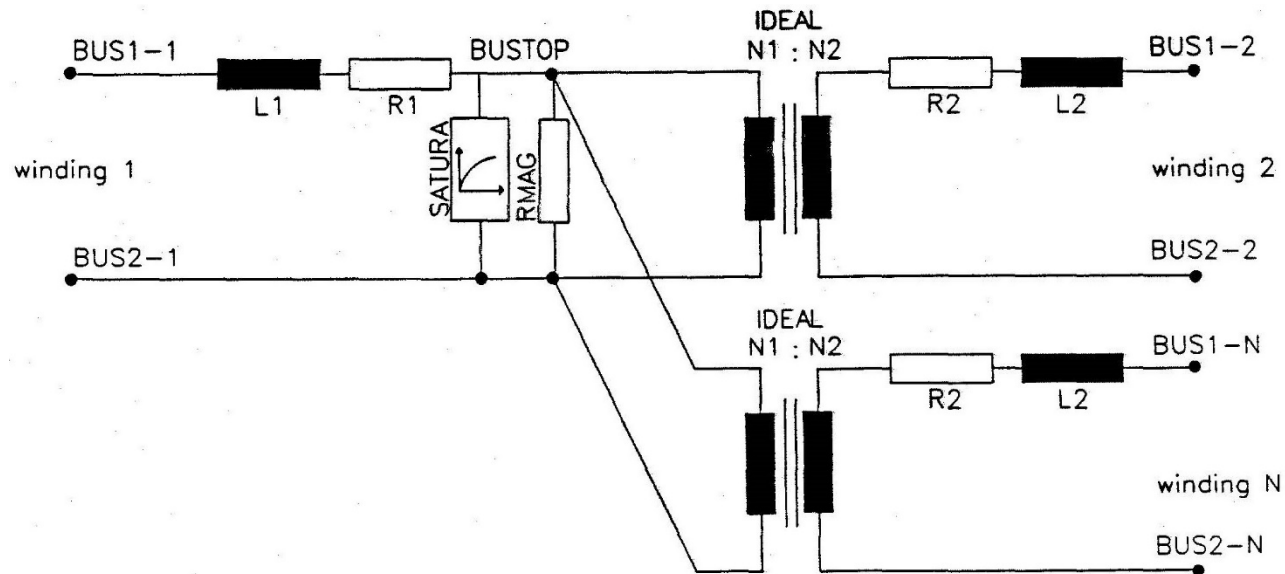
Selection	Object name	Icon	ATP card	Description
<i>Ideal 1 phase</i>	TRAFO_I		SOURCE type 18	Single-phase ideal transformer.
<i>Ideal 3 phase</i>	TRAFO_I3		SOURCE type 18	3-phase ideal transformer.
<i>Saturable 1 phase</i>	TRAFO_S		BRANCH TRANSFORMER	Single-phase saturable transformer.
<i>Saturable 3 phase</i>	SATTRAFO		BRANCH TRANSFORMER	General saturable transformer. 3-phase. 2 or 3 windings.
<i>BCTRAN</i>	BCTRAN		BRANCH Type 1...9	Direct support of BCTRAN transformer matrix modeling.
<i>Hybrid model</i>	XFMR		BRANCH	Winding resistance, leakage inductance, topologically correct core, capacitance. Test report, design data or typical.

Modele transformatorów w ATP/EMTP

Model transformatora jednofazowego z charakterystyką magnesowania

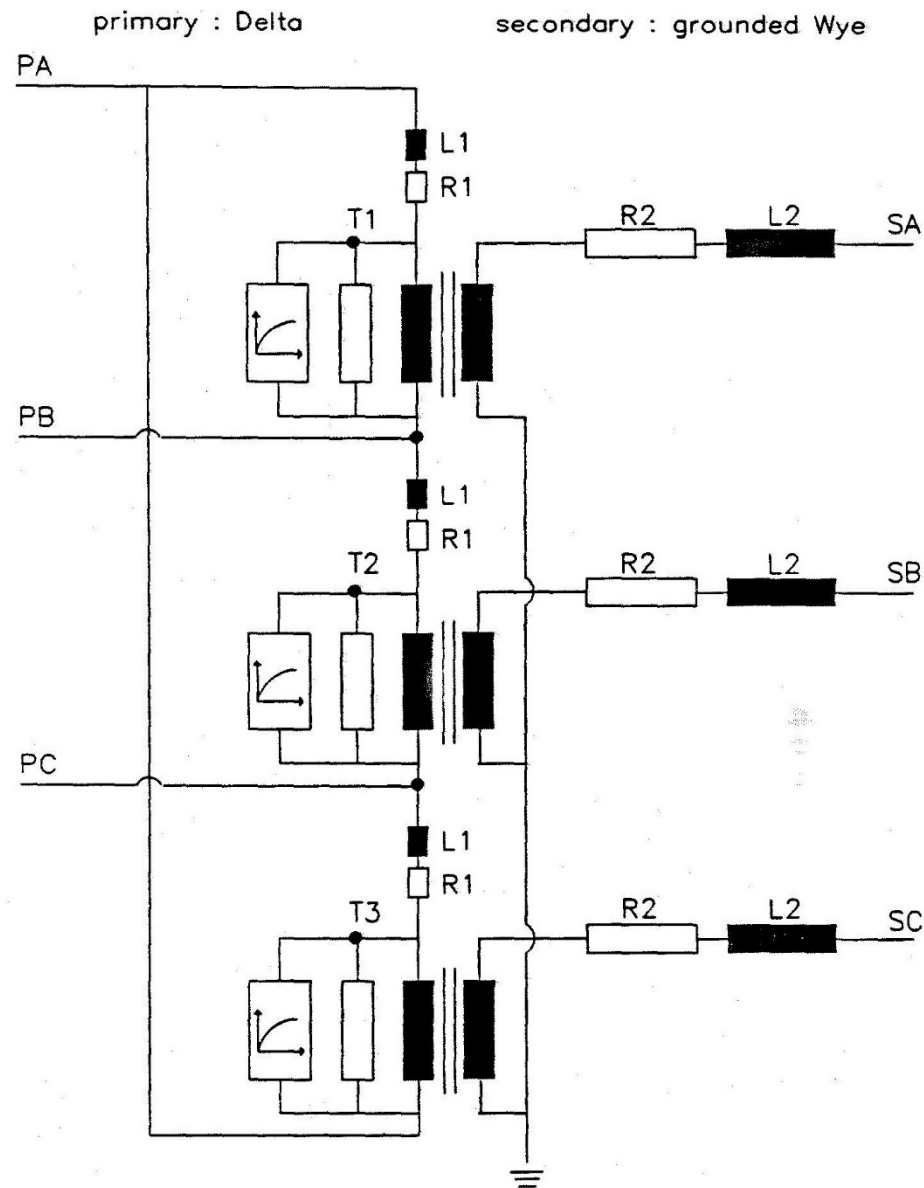


Model transformatora jednofazowego 3-uzwojeniowego z charakterystyką magnesowania



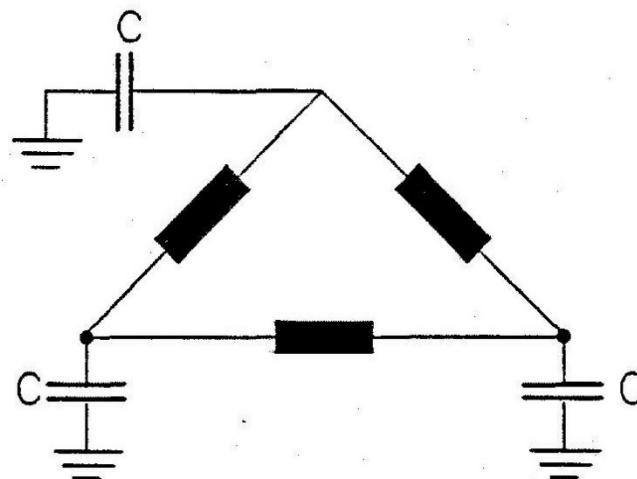
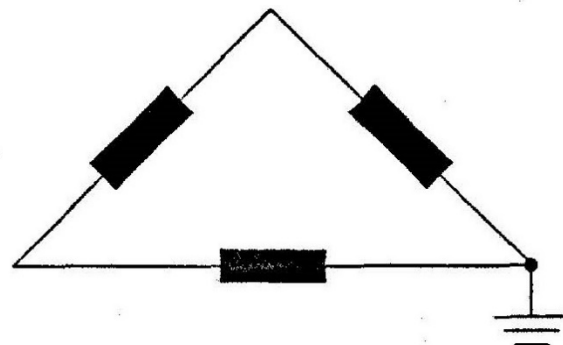
Modele transformatorów w ATP/EMTP

Model transformatora 3-fazowego
Dy (Δy), z charakterystyką
magnesowania



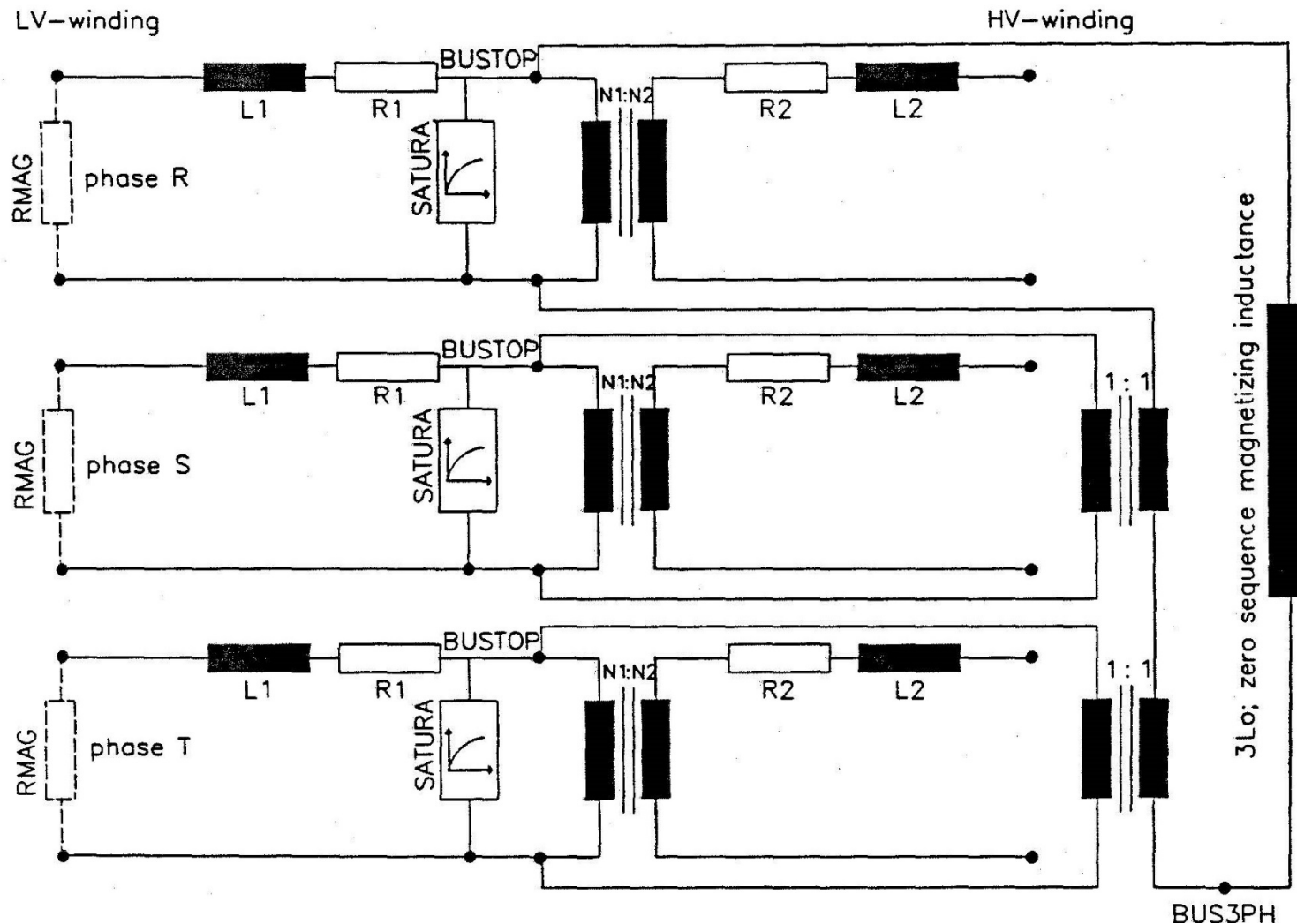
Modele transformatorów w ATP/EMTP

Uziemianie obwodów izolowanych od
,ziemi'



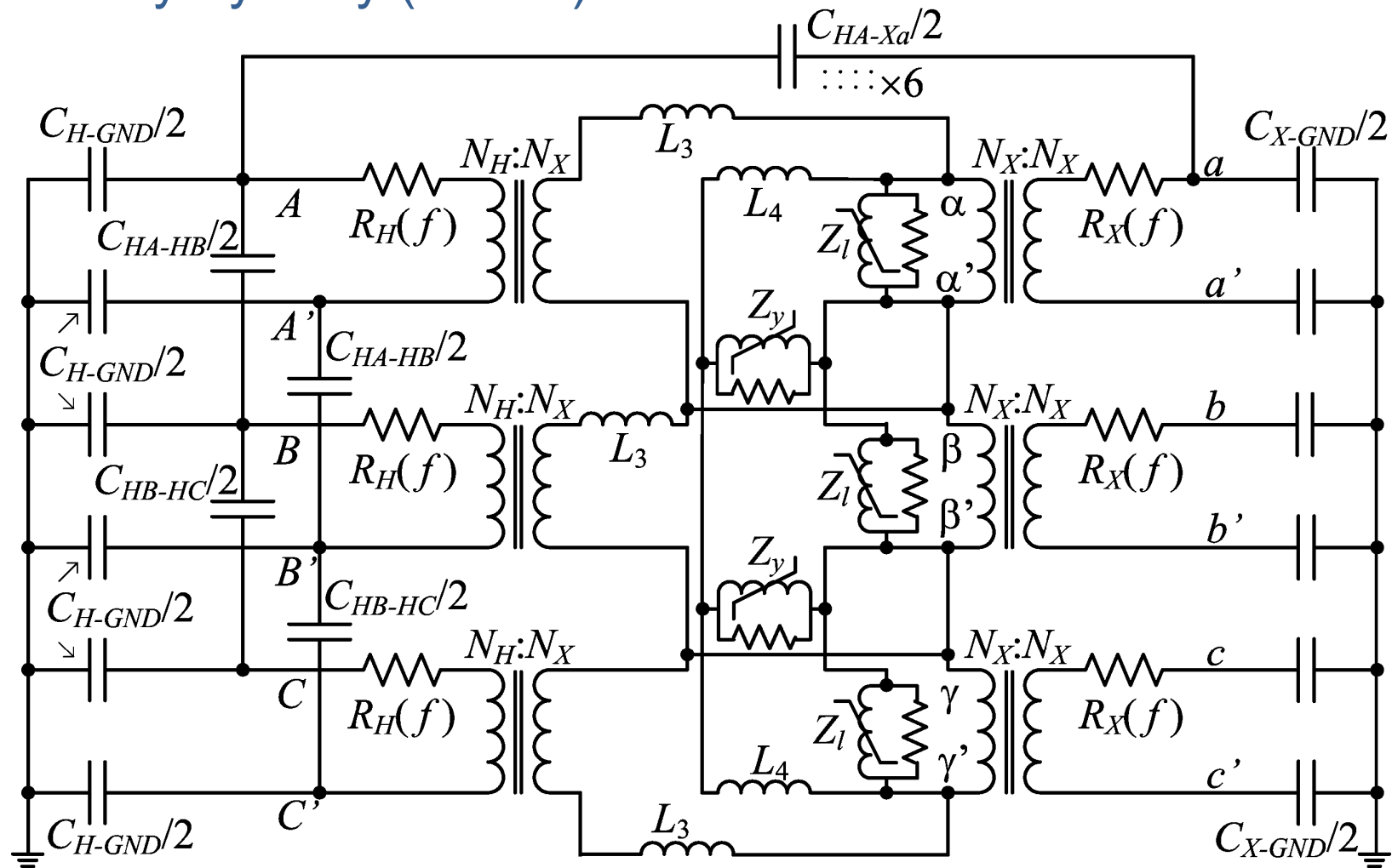
Modele transformatorów w ATP/EMTP

Model 3-fazowego transformatora z charakterystyką magnesowania z rdzeniem 3-kolumnowym (dodatkowy obwód do reprezentowania składowej zerowej w rdzeniu magnetycznym)



Modele transformatorów w ATP/EMTP

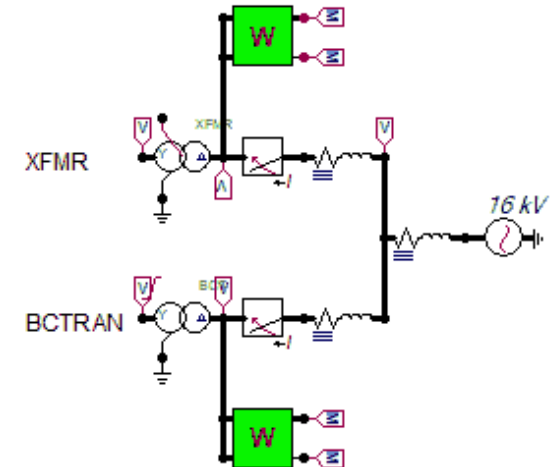
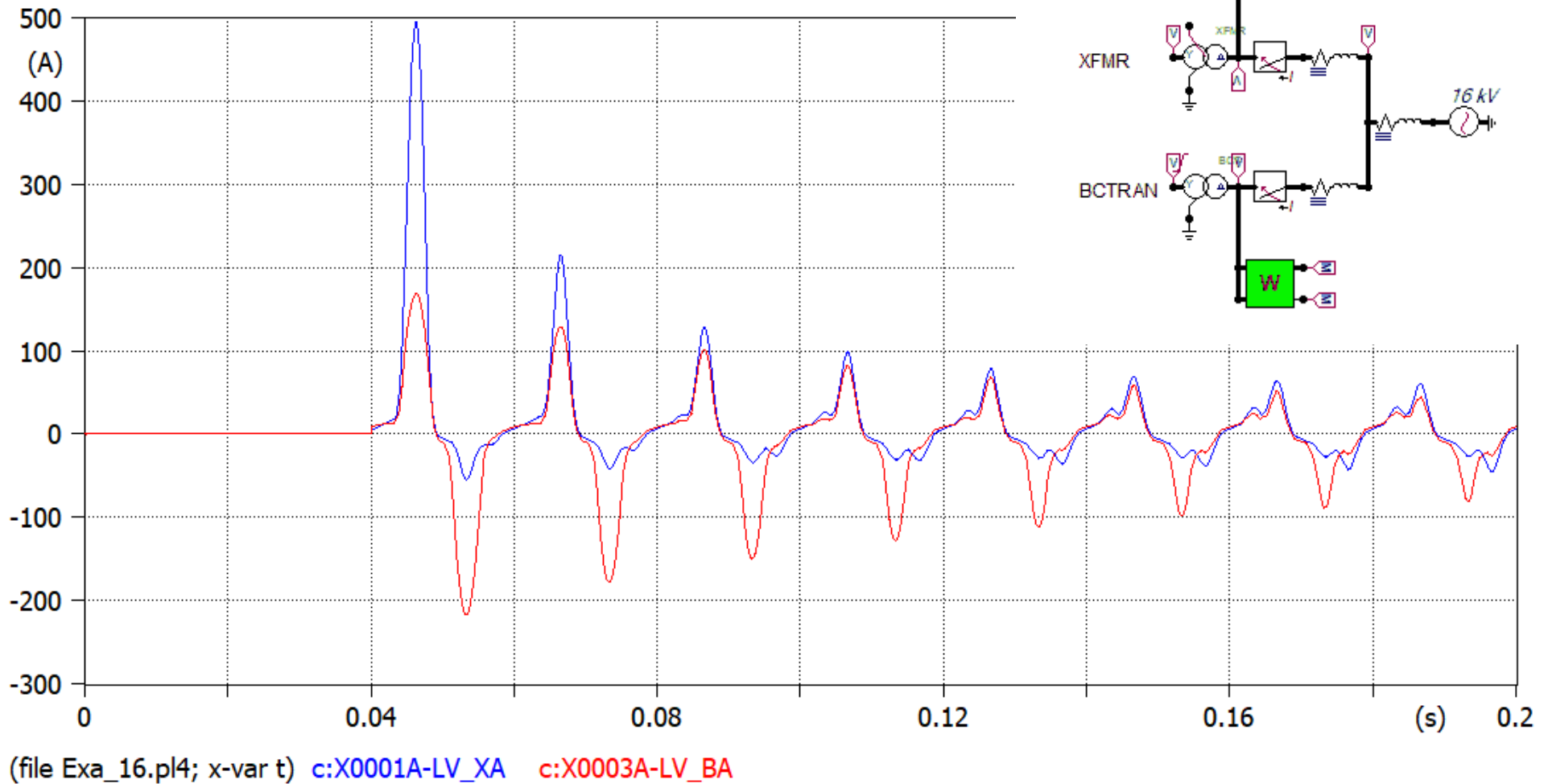
Model hybrydowy (XFMR)



Schemat modelu transformatora 3-fazowego, 2-uzwojeniowego z rdzeniem 3-kolumnowym

Modele transformatorów w ATP/EMTP

Porównanie modeli BCTRAN oraz XFMR



Załączenie nieobciążonego transformatora. Prąd w fazie A

