

Symulacja elektromagnetycznych stanów przejściowych

Eugeniusz Rosołowski

pok. 420 D-20

e-mail: eugeniusz.rosolowski@pwr.edu.pl

www.rose.pwr.edu.pl

podstawowy podręcznik:

*Komputerowe metody analizy
elektromagnetycznych stanów
przejściowych*

Symulacja elektromagnetycznych stanów przejściowych

- Kod kursu: APR012118

- Program:

Wykład: 15 godz

Laboratorium: 15 godz.

Symulacja elektromagnetycznych stanów przejściowych

APR 012118

CELE PRZEDMIOTU

- C1.** Poznanie zasad komputerowego modelowania jedno- i trójfazowych obwodów elektrycznych.
- C2.** Poznanie zasad tworzenia modeli matematycznych podstawowych elementów obwodu elektrycznego.
- C3.** Poznanie zasad wykorzystania wyników symulacji komputerowych do pomiaru wybranych wielkości elektrycznych oraz analizy stanów dynamicznych sieci.
- C4.** Poznanie sposobów tworzenia komputerowych modeli złożonych układów elektrycznych i elektromechanicznych

PRZEDMIOTOWE EFEKTY KSZTAŁCENIA

Z zakresu wiedzy:

PEK_W01. Ma uporządkowaną wiedzę w zakresie tworzenia komputerowych modeli symulacyjnych do analizy stanów dynamicznych sieci elektrycznej.

PEK_W02. Ma wiedzę w zakresie zastosowania wybranych narzędzi komputerowych do symulacji podstawowych źródeł generacji rozproszonej.

Z zakresu umiejętności:

PEK_U01. Potrafi opracować modele matematyczne i symulacyjne fragmentów trójfazowej sieci elektrycznej.

PEK_U02. Potrafi zastosować wyniki symulacji komputerowej do analizy stanów dynamicznych badanej sieci elektrycznej.

Z zakresu kompetencji społecznych:

PEK_K01. Potrafi współpracować z zespołem przy realizacji złożonego zadania inżynierskiego pełniąc powierzoną rolę w zespole, potrafi wykonać przydzielone zadania zgodnie z harmonogramem prac.

OCENA OSIĄGNIĘCIA PRZEDMIOTOWYCH EFEKTÓW KSZTAŁCENIA

Oceny (F – formująca (w trakcie semestru), P – podsumowująca (na koniec semestru))	Numer efektu kształcenia	Sposób oceny osiągnięcia efektu kształcenia
WYKŁAD		
F1	PEK_W01, PEK_W02,	uczestnictwo w zajęciach
F2	PEK_W01, PEK_W02,	Kolokwium zaliczeniowe
$P=0,1 \cdot F1 + 0,9 \cdot F2$		
LABORATORIUM		
F1	PEK_U02, PEK_U03	aktywność na zajęciach
F2	PEK_U02, PEK_U03	sprawozdanie z ćwiczeń laboratoryjnych
$P=0,3 \cdot F1 + 0,7 \cdot F2$		

Symulacja elektromagnetycznych stanów przejściowych

APR 012118 Syllabus

1. Zasady modelowania matematycznego podstawowych liniowych elementów sieci elektrycznej o parametrach skupionych: RLC.
2. Modele źródeł napięciowych i prądowych oraz uproszczone modele łączników.
3. Modelowanie linii elektrycznej: model o parametrach skupionych oraz rozłożonych według metody Bergerona.
4. Model jednofazowej linii jako obiektu o parametrach rozłożonych: uwzględnianie rezystancji oraz zależności parametrów od częstotliwości.
5. Tworzenie i rozwiązywanie równań sieci liniowej według metody potencjałów węzłowych.
6. Modelowanie nieliniowych elementów obwodu elektrycznego: nieliniowa rezystancja, indukcyjność i pojemność.
7. Tworzenie i rozwiązywanie modeli obwodu elektrycznego według równań stanu.
8. Kolokwium zaliczeniowe

- Literatura

ROSOŁOWSKI E., *Komputerowe metody analizy elektromagnetycznych stanów przejściowych odstawy automatyki*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2009.

http://zas.ie.pwr.wroc.pl/ER/przyklady_D1/index.html - przykłady wybranych modeli wraz z plikami źródłowymi do programu ATP-EMTP.

WATSON M., ARRILAGA J., *Power systems electromagnetic transients simulation*. The Institution of Electrical Engineering, 2003.

AMETANI A., NAGAOKA N., BABA Y., OHNO T., *Power system transients. Theory and Applications*. CRC Press. Taylor & Francis Group, 2014.

Rodzaje modeli:

- Modele o parametrach skupionych
- Modele o parametrach rozłożonych
- Modele liniowe
- Modele nieliniowe
- Modele statyczne
- Modele dynamiczne
- Modele jednofazowe
- Modele wielofazowe
- ...

Wprowadzenie

Podział ze względu na stosowane narzędzia obliczeniowe:

- Stały krok modelowania
- Zmienny krok modelowania
- Modelowanie poza procesem (off-line)
- Modelowanie w tempie procesu (on-line, real time)
- Modelowanie w układzie otwartym (bez uwzględnienia efektów oddziaływania)
- Modelowanie w pętli zamkniętej
- ...

Wprowadzenie

Sposoby wykorzystania modelowania:

- Analiza zjawisk
- Sprawdzenie koncepcji sterowania
- Weryfikacja projektu
- Sprawdzenie zakresu stosowalności metody
- Określenie charakterystyk technicznych
- Generowanie zbioru danych do uczenia SSN
- ...

Wprowadzenie

Popularne programy do modelowania elektromagnetycznych stanów przejściowych - EMTP:

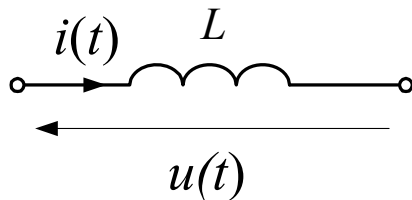
- ATP-EMTP z edytorem ATPDraw (lab)
- EMTDC z edytorem PSCAD
- EMTP RV
- Matlab/SIMULINK
- Programy Real-Time:
- RTDS
- ...

Wprowadzenie

Podstawy modelowania sieci elektrycznych:

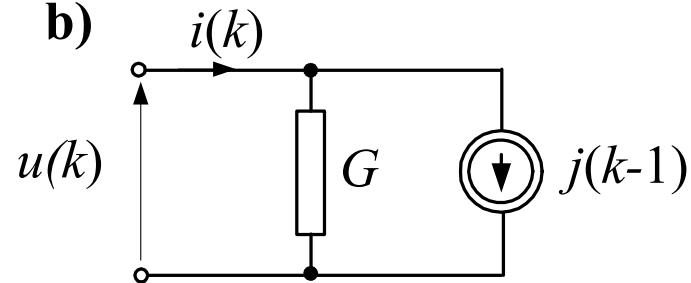
- sieć liniowa RLC o parametrach skupionych

a)



$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{L}u(t) \quad \rightarrow$$

b)



$$i(k) = i(k-1) + \frac{T}{2L} [u(k-1) + u(k)]$$

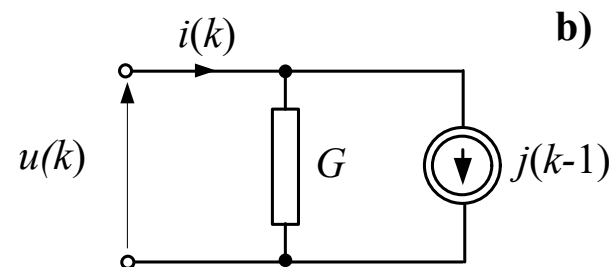
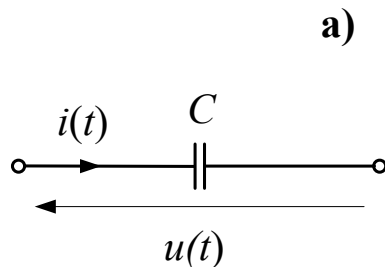
or

$$i(k) = Gu(k) + i(k-1) + Gu(k-1), \quad G = \frac{T}{2L}$$

Wprowadzenie

Podstawy modelowania sieci elektrycznych:

- sieć liniowa RLC o parametrach skupionych



$$\frac{du(t)}{dt} = \frac{1}{C} i(t) \quad \rightarrow$$

$$u(k) = u(k-1) + \frac{T}{2C} [i(k-1) + i(k)]$$

$$i(k) = Gu(k) + j(k-1)$$

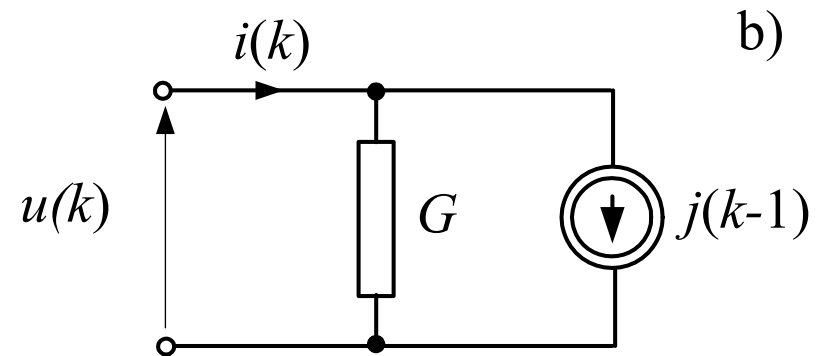
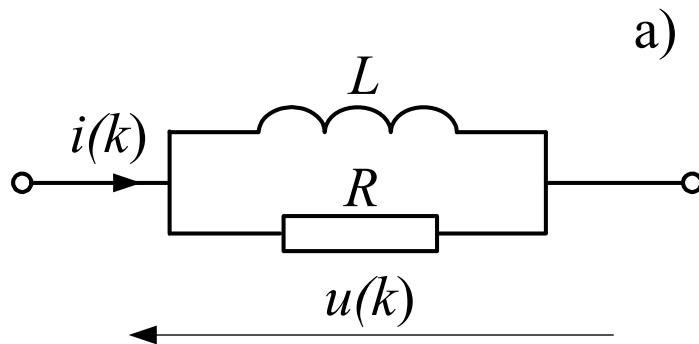
in which :

$$j(k-1) = -i(k-1) + Gu(k-1), \quad G = \frac{2C}{T}$$

Wprowadzenie

Podstawy modelowania sieci elektrycznych:

- sieć liniowa RLC o parametrach skupionych – modele złożonych gałęzi



$$i(k) = Gu(k) + j(k-1)$$

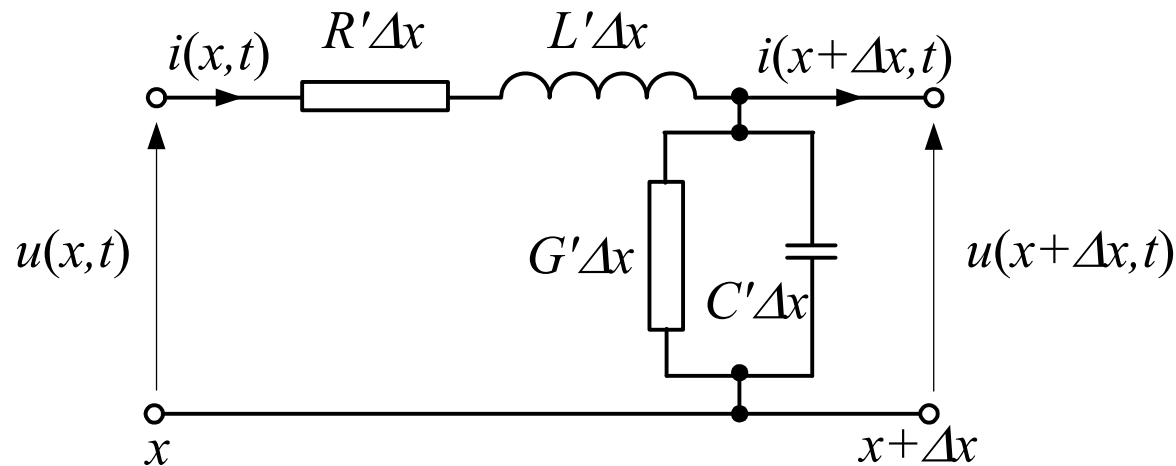
→

$$G = \frac{TR + 2L}{2LR} \quad j(k-1) = i(k-1) + \frac{TR - 2L}{2LR}u(k-1)$$

Wprowadzenie

Podstawy modelowania sieci elektrycznych:

- sieć liniowa o parametrach rozłożonych



$$-\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = R' i(x, t) + L' \frac{\partial i(x, t)}{\partial t},$$

$$-\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = G' u(x, t) + C' \frac{\partial u(x, t)}{\partial t}.$$



Wprowadzenie

Podstawy modelowania sieci elektrycznych:

- sieć liniowa o parametrach rozłożonych - uproszczenie

$$\frac{\partial u^2}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial u^2}{\partial t^2} = 0,$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{L'C'}}$$

$$\frac{\partial i^2}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial i^2}{\partial t^2} = 0.$$

$$Z_f = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

→

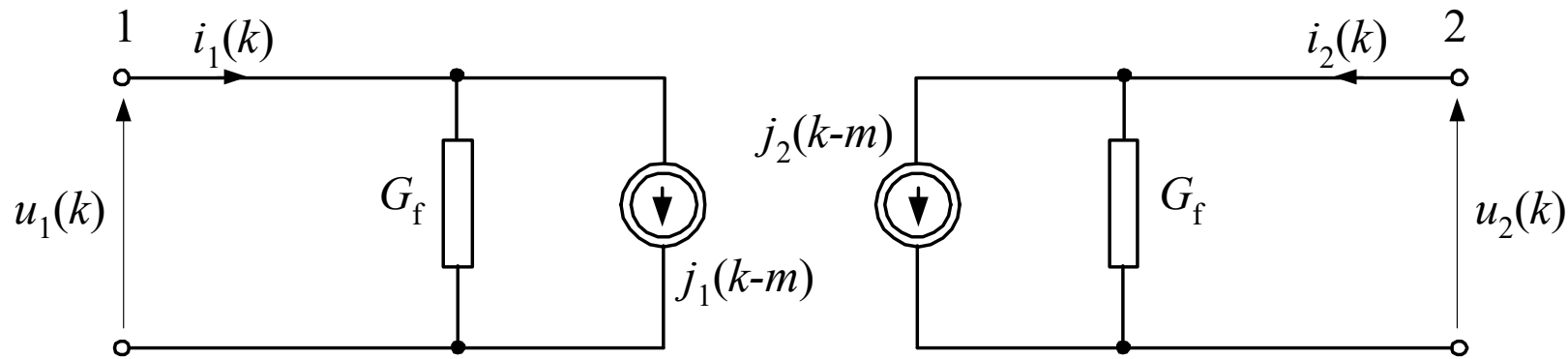
$$i_2(k) = G_f u_2(k) - G_f u_1(k-m) - i_i(k-m)$$

$$m = \frac{\tau}{T} = \frac{l}{vT}$$

Wprowadzenie

Podstawy modelowania sieci elektrycznych:

- sieć liniowa o parametrach rozłożonych – dyskretny model linii długiej jednofazowej



$$i_1(k) = G_f u_1(k) + j_1(k - m),$$

$$i_2(k) = G_f u_2(k) + j_2(k - m),$$

→

$$j_1(k - m) = -G_f u_2(k - m) - i_2(k - m),$$

$$j_2(k - m) = -G_f u_1(k - m) - i_1(k - m),$$

Modelowanie linii 3-fazowej

Model o parametrach skupionych, czy rozłożonych?

- to zależy od długości fali wzdłuż linii:

- długość fali:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

gdzie: - v – prędkość rozchodzenia się fali: $v \approx c$ [m/s]

- f – częstotliwość drgań [Hz]

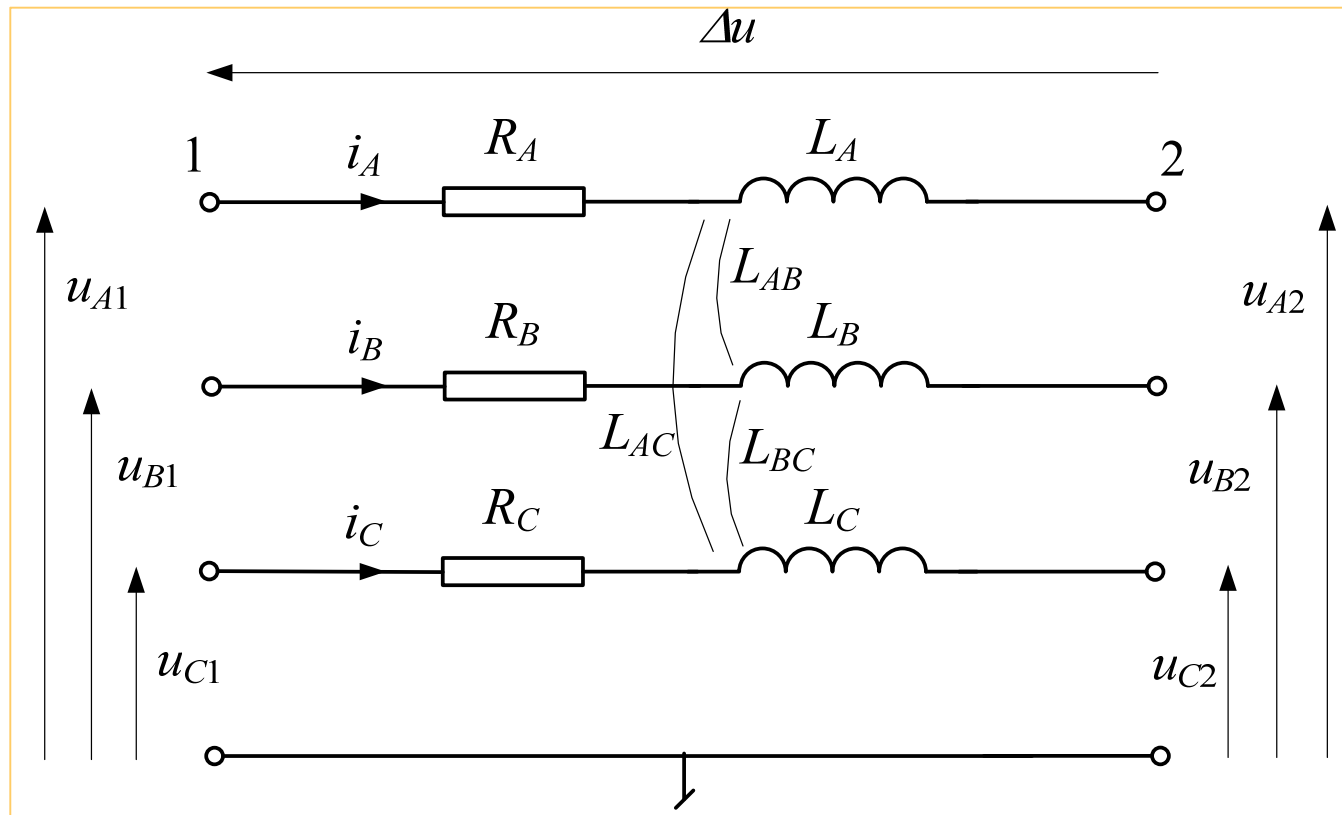
$$l_{gr} \approx \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f}$$

Dla $f = 1000$ Hz, $l_{gr} = 3,0 \cdot 10^5 / (4 \cdot 1000) = 75$ km

Modelowanie linii 3-fazowej

Model linii o parametrach skupionych

1. Model uproszczony (bez uwzględnienia pojemności):



Model dynamiczny:

$$\Delta \mathbf{U}(t) = \mathbf{R}_f \mathbf{I}_f(t) + \mathbf{L}_f \frac{d}{dt} \mathbf{I}_f(t)$$

Modelowanie linii 3-fazowej

Model linii o parametrach skupionych

Parametry równania macierzowego:

$$\Delta \mathbf{U}(t) = \begin{bmatrix} u_{A1}(t) - u_{A2}(t) \\ u_{B1}(t) - u_{B2}(t) \\ u_{C1}(t) - u_{C2}(t) \end{bmatrix} \quad \mathbf{I}_f(t) = \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix}$$

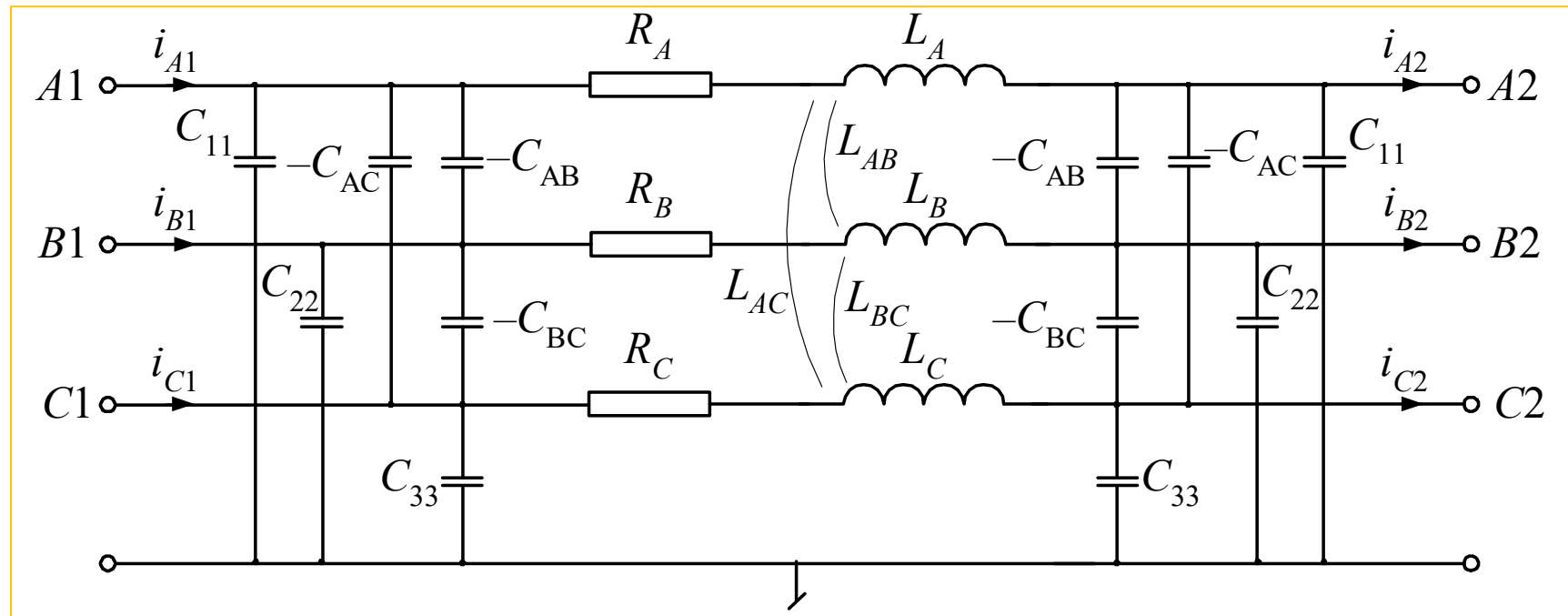
$$\mathbf{R}_f = \begin{bmatrix} R_{AA} & R_{AB} & R_{AC} \\ R_{AB} & R_{BB} & R_{BC} \\ R_{AC} & R_{BC} & R_{CC} \end{bmatrix} \quad \mathbf{L}_f = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{AB} & L_{BB} & L_{BC} \\ L_{AC} & L_{BC} & L_{CC} \end{bmatrix}$$

W linii transponowanej: $R_{AA} = R_{BB} = R_{CC}$, $R_{AB} = R_{AC} = R_{BC}$
i podobnie dla indukcyjności (oraz pojemności).

Modelowanie linii 3-fazowej

Model linii o parametrach skupionych

2. Wielofazowy czwórnik Π :



Z uwzględnieniem przewodności:

$$\mathbf{I}_Y = \mathbf{Y}_f \mathbf{U}_f \quad \text{gdzie:} \quad \mathbf{Y}_f = \mathbf{G}_f + j\omega \mathbf{C}_f \quad (\text{S/m})$$

Modelowanie linii 3-fazowej

Model linii o parametrach skupionych

Stan ustalony w **gałęzi poprzecznej** (równanie macierzowe):

$$\mathbf{I}_Y = \mathbf{Y}_f \mathbf{U}_f \quad \text{gdzie:} \quad \mathbf{Y}_f = \mathbf{G}_f + j\omega \mathbf{C}_f \quad (\text{S/m})$$

Stan przejściowy w dziedzinie czasu (prądy fazowe poprzeczne):

$$\mathbf{I}_Y(t) = \mathbf{G}_f \mathbf{U}_f(t) + \mathbf{C}_f \frac{d}{dt} \mathbf{U}_f(t)$$

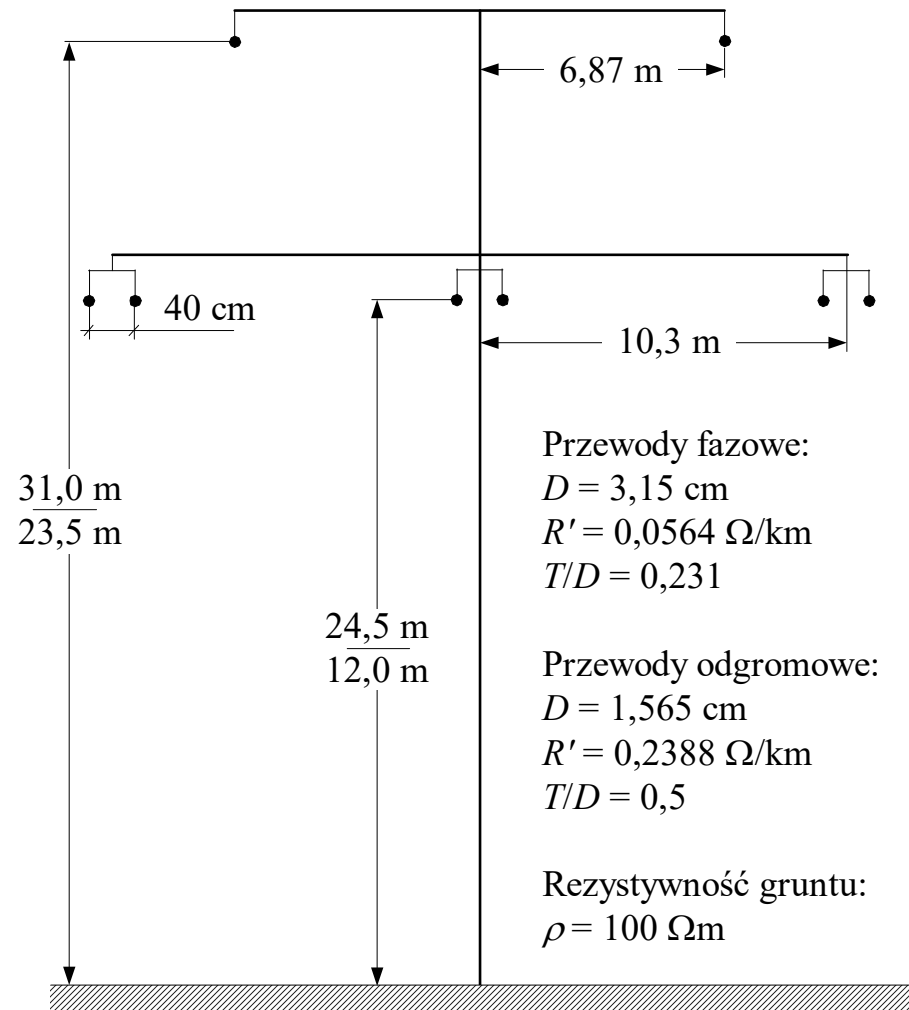
Modelowanie linii 3-fazowej

Parametry linii mogą być obliczone na podstawie wymiarów geometrycznych oraz danych materiałowych

Dane dla linii napowietrznej:

W przypadku linii kablowej:

- wymiary geometryczne;
- rodzaj kabla (liczba żył, dane materiałowe);
- głębokość zakopania;
- rozmieszczenie żył;
- ...



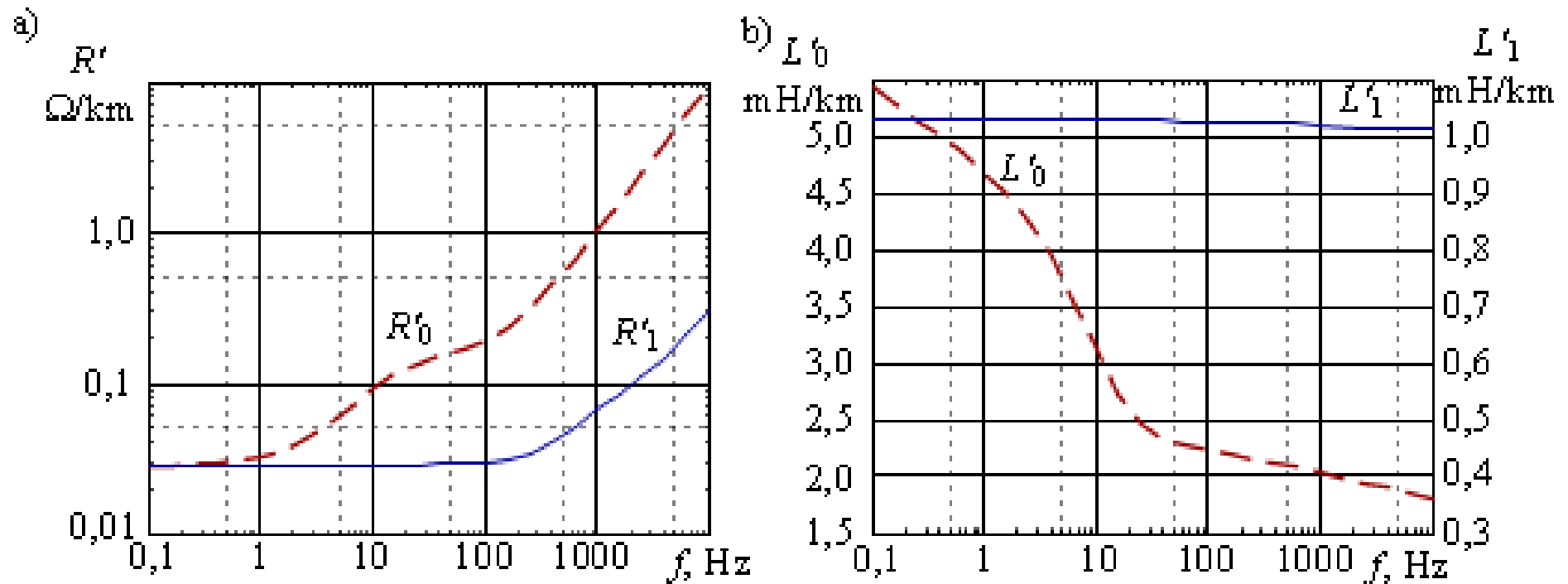
Modelowanie linii 3-fazowej

Parametry przykładowej linii 400 kV

Wielkość	Składowa zgodna	Składowa zerowa
Parametry dla częstotliwości 50 Hz:		
R' , Ω/km	0,0291	0,1576
L' , mH/km	1,0296	1,2966
C' , μF	0,01123	0,007729
Parametry dla częstotliwości 2000 Hz:		
R' , Ω/km	0,09619	2,0075
L' , mH/km	1,0194	1,968
C' , μF	0,01123	0,007729

Modelowanie linii 3-fazowej

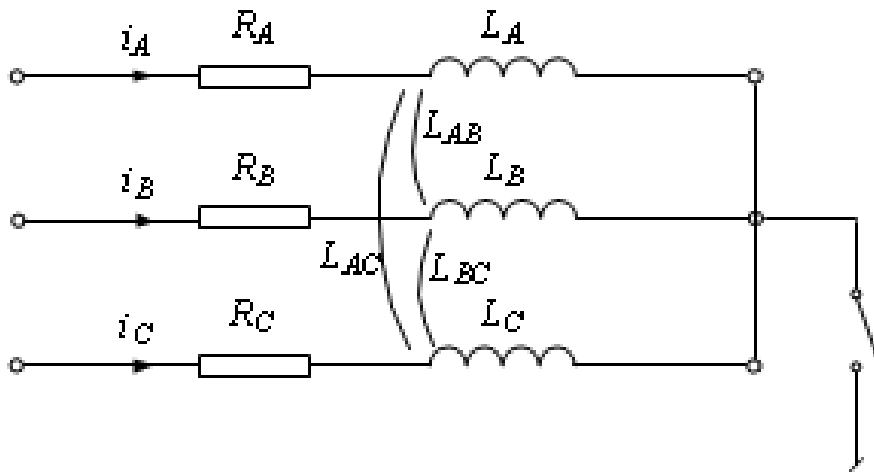
Zależność parametrów linii od częstotliwości (linia 400 kV)



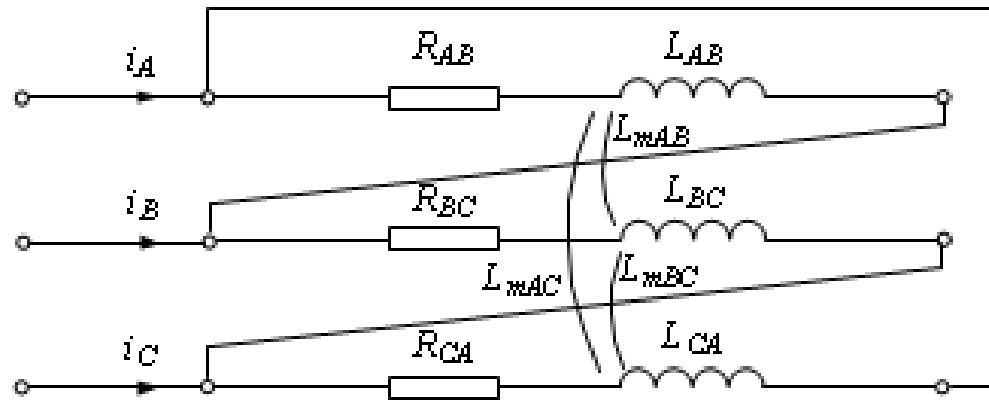
Obciążenie statyczne

Model obciążenia statycznego (stałe parametry RLC) może być wykonany na bazie modelu uproszczonej linii o parametrach skupionych:

Połączenie Y:



Połączenie D:



W schemacie modelu Y można dodatkowo uwzględnić parametry składowej zerowej.

Modelowanie linii 3-fazowej

Model linii o parametrach rozłożonych – ogólne równanie:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial \mathbf{U}(x,t)}{\partial x} &= \mathbf{R}' \mathbf{I}(x,t) + \mathbf{L}' \frac{\partial \mathbf{I}(x,t)}{\partial t} \\ -\frac{\partial \mathbf{I}(x,t)}{\partial x} &= \mathbf{G}' \mathbf{U}(x,t) + \mathbf{C}' \frac{\partial \mathbf{U}(x,t)}{\partial t} \end{aligned}$$

gdzie:

$$\mathbf{U}(x,t) = \begin{bmatrix} u_1(x,t) \\ u_2(x,t) \\ \vdots \\ u_n(x,t) \end{bmatrix} \quad \mathbf{I}(x,t) = \begin{bmatrix} i_1(x,t) \\ i_2(x,t) \\ \vdots \\ i_n(x,t) \end{bmatrix}$$

\mathbf{R}' , \mathbf{L}' , \mathbf{G}' , \mathbf{C}' – macierze $n \times n$ jednostkowych parametrów linii;
 n – liczba faz linii

Modelowanie linii 3-fazowej

W celu uproszczenia modelu prowadzi się diagonalizację macierzy parametrów, rozdzielając model linii n – fazowej na model n linii jednofazowych – wówczas dla linii bez strat (z pominięciem R , G):

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial x^2} - \mathbf{A}_u \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial t^2} &= 0 \\ \frac{\partial^2 \mathbf{I}}{\partial x^2} - \mathbf{A}_i \frac{\partial^2 \mathbf{I}}{\partial t^2} &= 0\end{aligned}$$

gdzie:

$$\mathbf{A}_u = \mathbf{L}' \mathbf{C}'$$

$$\mathbf{A}_i = \mathbf{C}' \mathbf{L}'$$

- macierze diagonalne

Modelowanie linii 3-fazowej

W celu diagonalizacji macierzy parametrów stosuje się znane przekształcenie:

$$\mathbf{A}_{i \text{ mod}} = \mathbf{T}_i^{-1} \mathbf{A}_i \mathbf{T}_i$$

gdzie kwadratowa macierz diagonalizująca \mathbf{T} jest obliczana według odpowiedniego algorytmu numerycznego.

Podobnie oblicza się macierz parametrów $\mathbf{A}_{u \text{ mod}}$

Dla linii transponowanej:

$$\text{gdzie: } v_k = \frac{1}{\sqrt{L'_k C'_k}}$$

jest prędkością rozchodzenia się fali w k – tej modzie.

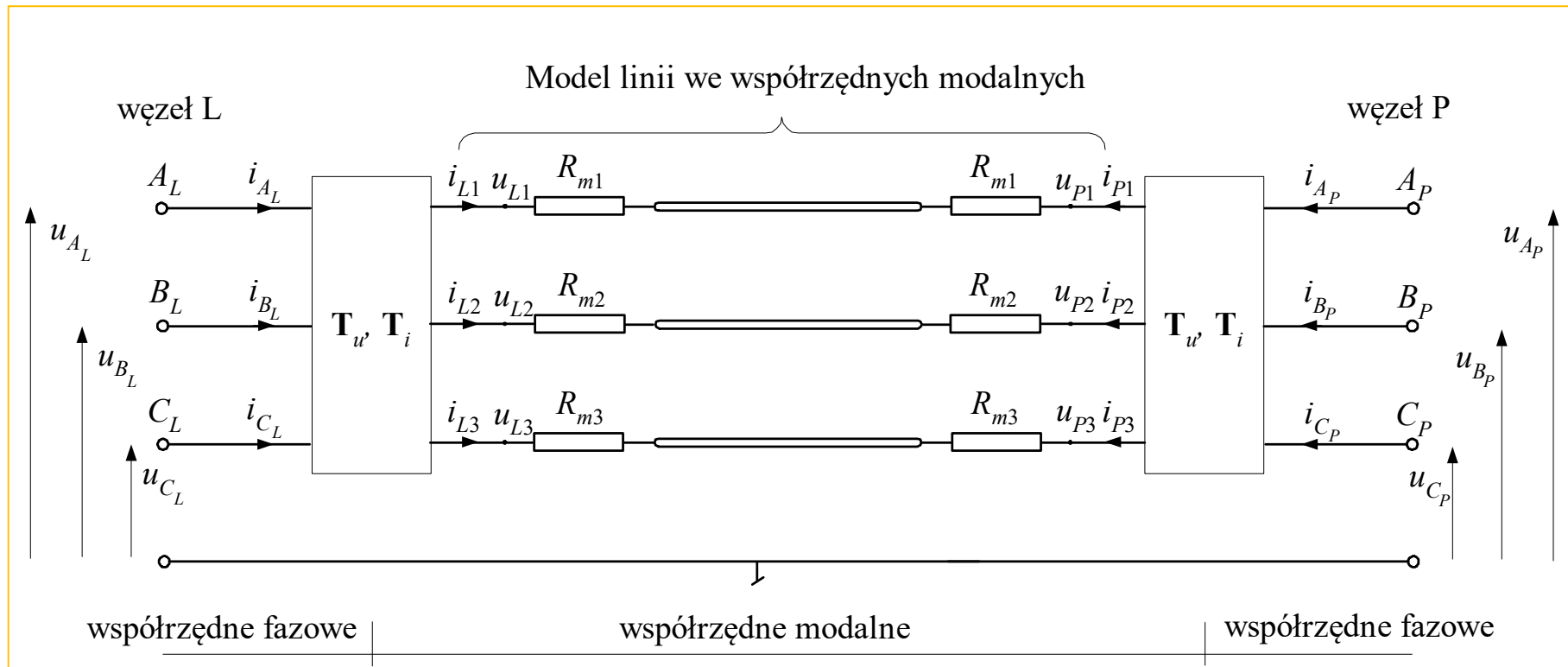
$$\mathbf{A}_{u \text{ mod}} = \mathbf{A}_{i \text{ mod}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{v_1^2} & & & \\ & \frac{1}{v_2^2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \frac{1}{v_n^2} \end{bmatrix}$$

Modelowanie linii 3-fazowej

- Dzięki takiemu podejściu, przez diagonalizację macierzy parametrów linii n -fazowej, uzyskuje się matematycznie model n linii jednofazowych, których modelowanie jest dobrze opanowane.
- W modelach tych linii jednofazowych można odwzorować rezystancję przez dodanie rezystancji skupionej do modelu linii bezstratnej.
- Zależność parametrów od częstotliwości można także uwzględnić za pomocą odpowiednich filtrów.
- Metoda ta może być stosowana w odniesieniu do linii transponowanych (symetrycznych), jak i linii nietransponowanych.

Modelowanie linii 3-fazowej

Schemat modelu linii wielofazowej reprezentowanej przez grupę linii jednofazowych:



W każdym kroku obliczeniowym na obu końcach modelu linii należy przeprowadzać transformacje współrzędnych fazowych <-> na składowe modalne i odwrotnie.

Modelowanie linii 3-fazowej

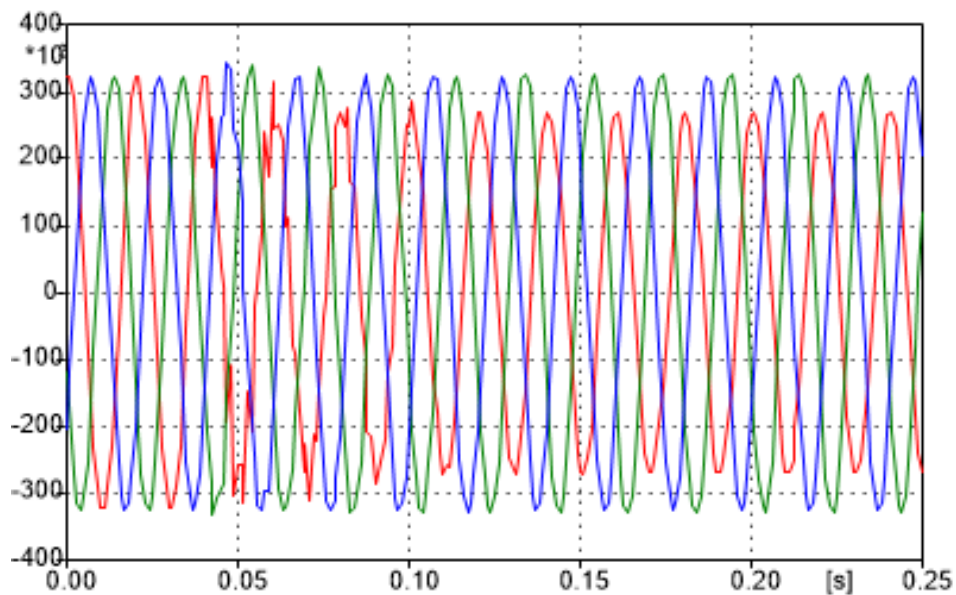
Rodzaje modeli linii o parametrach rozłożonych:

- **Model linii transponowanej/nietransponowanej**
- **Model linii z uwzględnieniem przewodów odgromowych**
- **Model linii pojedynczej/równoległej**
- **Model z uwzględnieniem zależności parametrów od częstotliwości (efekt naskórkowości)**

Modelowanie linii 3-fazowej

Przykład: zwarcie A-G w linii 400 kV

napięcia u_A , u_B , u_C



prądy i_A , i_B , i_C

