

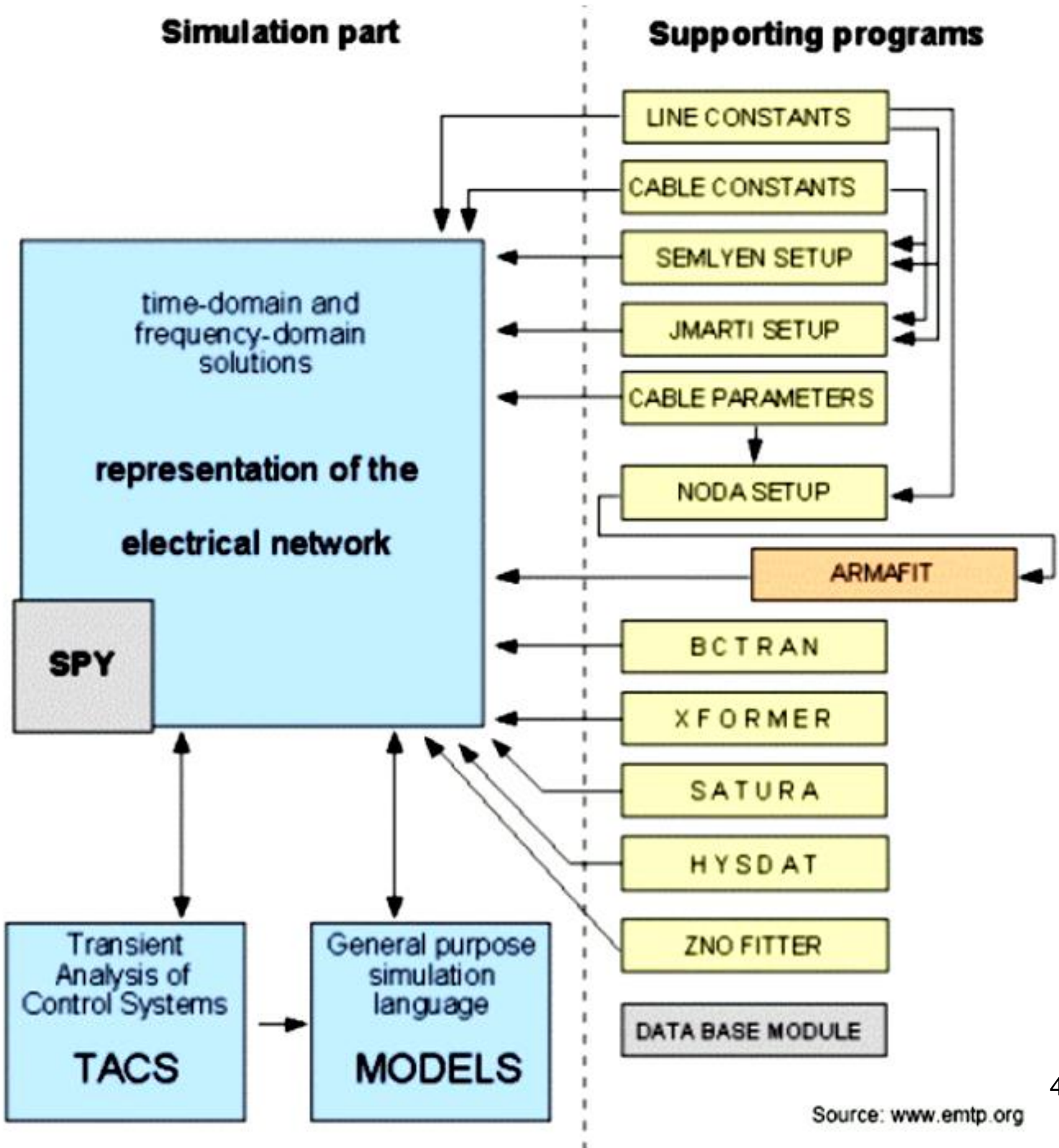
ZAKŁÓCENIA W UKŁADACH ELEKTROENERGETYCZNYCH

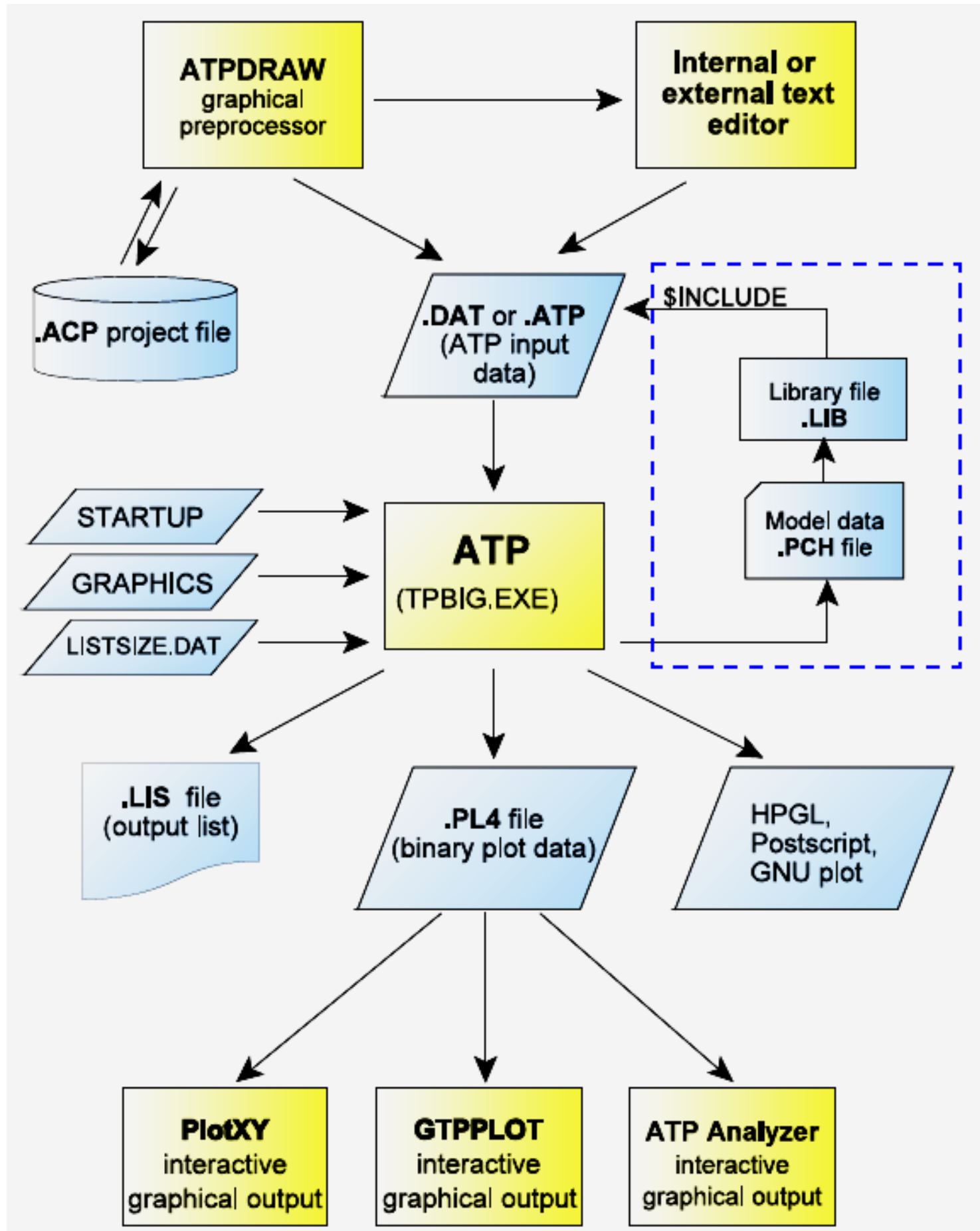
1. Stany przejściowe w układach elektroenergetycznych powodowane zaburzeniami elektromagnetycznymi. Wprowadzenie do modelowania układów elektroenergetycznych w ATP-EMTP i symulacji zakłóceń.
2. Zwarcia; przyczyny i skutki; metody obliczania przebiegów prądu zwarciovego w układach elektroenergetycznych. Ograniczanie skutków zwarć.
3. Przepięcia wewnętrzne i zewnętrzne w sieciach elektroenergetycznych; rozchodzenie się przepięć. Ochrona przeciwprzepięciowa urządzeń elektrycznych.
4. Wahania napięcia i odchylenia częstotliwości, spowodowane zmianami obciążenia sieci. Powstawanie wyższych harmonicznnych w sieci, spowodowane dużymi odbiornikami nieliniowymi. Sposoby ograniczania wahań napięcia i wyższych harmonicznnych.
5. Stabilność systemu elektroenergetycznego; stabilność lokalna i globalna, środki poprawy stabilności. Podstawy matematyczne badania stabilności; zastosowanie programów komputerowych.
6. Wykonanie projektu obejmującego symulację wybranych zakłóceń w zadanym układzie elektroenergetycznym.

Literatura

1. Markiewicz H., Urządzenia elektroenergetyczne, PWN SA., 2016
2. Machowski J., Bernas S.: Stany nieustalone i stabilność SEE. WNT, Warszawa 1989.
3. Flisowski Z.: Technika wysokich napięć. WNT, Warszawa 2015.
4. Kujszczyk S. (red.): Elektroenergetyczne układy przesyłowe. WNT, Warszawa 1997.
5. Kremens Z., Sobierajski M.: Analiza systemów elektroenergetycznych. WNT, Warszawa 1999.
6. Kujszczyk S. (red.): Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze, T. 1 i 2, OWPW, Warszawa 2004.
7. Żmuda K., Elektroenergetyczne układy przesyłowe i rozdzielcze: wybrane zagadnienia z przykładami, Wydaw. PŚI, Gliwice., 2016

Wprowadzenie
do modelowania układów elektroenergetycznych
w ATP-EMTP i symulacji zakłóceń





WSTĘP DO METOD OBLICZENIOWYCH W ATP-EMTP

cyfrowa symulacja elektromagnetycznych stanów nieustalonych:

- w sieciach elektroenergetycznych
- w układach elektronicznych
- w elektrycznych układach pomiarowych
- w układów automatyki itp.

dyskretna symulacja przebiegów:

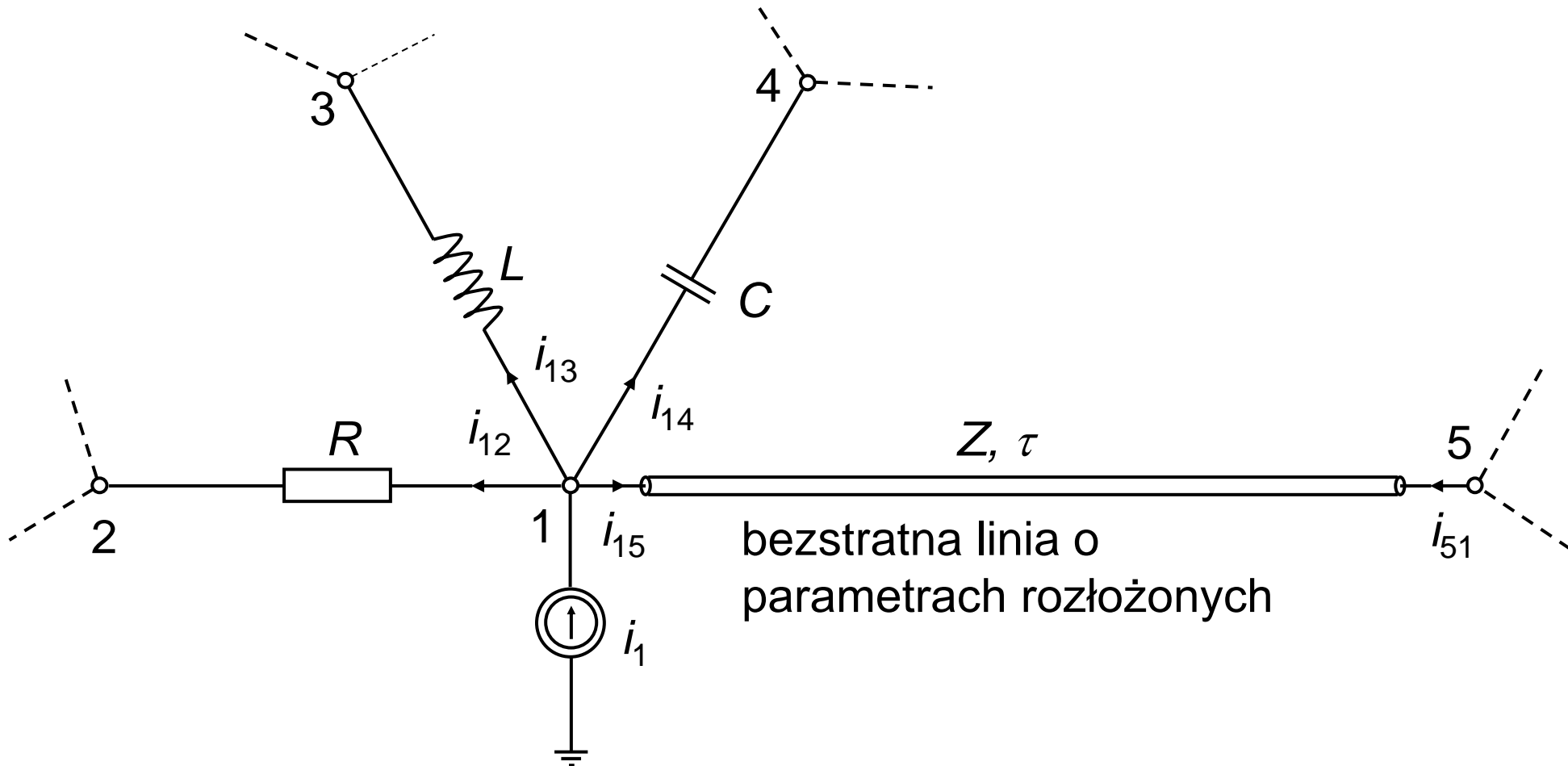
- komputery cyfrowe symulują w sposób dyskretny, w momentach oddzielonych krokiem czasowym Δt
- błędy spowodowane zaokrągleniem wyników cząstkowych
- kumulacja błędów w kolejnych krokach obliczeń
- metody zastosowane w ATP-EMTP są numerycznie stabilne i nie powodują powstawanie tego rodzaju błędów

ATP-EMTP może symulować pracę sieci składającej się z połączonych ze sobą:

- rezystancji, indukcyjności, pojemności
 - pojedynczych i wielofazowych czwórników typu Π
 - linii o parametrach rozłożonych
 - łączników i elementów półprzewodnikowych
 - źródeł napięcia i prądu
 - maszyn elektrycznych
 - wielu innych elementów
- maksymalne liczby elementów w jednym modelu:

Busses	6000	Sources	900
Branches	10000	Nonlinear elements	2250
Switches	1200	Synchronous machines	90

Podstawy matematyczne obliczeń w ATP-EMTP



Fragment większej sieci elektrycznej zawierający najbliższe otoczenie węzła nr 1

Założenie:

wartości napięcia i prądu zostały policzone dla chwil czasu:
 $0, \Delta t, 2\Delta t, \dots t-\Delta t$

należy znaleźć wartości napięcia i prądu dla chwili t

- w każdej chwili czasu suma prądów wypływających z węzła 1 do gałęzi musi być równa prądowi dopływającemu do tego węzła:

$$i_{12}(t) + i_{13}(t) + i_{14}(t) + i_{15}(t) = i_1(t) \quad (1)$$

- napięcia węzłowe są zmiennymi stanu
- należy wyrazić prądy gałęziowe w funkcji napięć węzłowych

dla rezystancji R :

$$i_{12}(t) = \frac{1}{R} \{v_1(t) - v_2(t)\} \quad (2)$$

dla indukcyjności L :

- równanie różniczkowe:

$$v = L \frac{di}{dt}$$

- można zastąpić centralnym równaniem różnicowym:

$$\frac{v(t) + v(t - \Delta t)}{2} = L \frac{i(t) - i(t - \Delta t)}{\Delta t}$$

- dla gałęzi 1-3 równanie to przybierze postać:

$$\frac{v_1(t) - v_3(t) + v_1(t - \Delta t) - v_3(t - \Delta t)}{2} = L \frac{i_{13}(t) - i_{13}(t - \Delta t)}{\Delta t}$$

- stąd:

$$i_{13}(t) = \frac{\Delta t}{2L} \{v_1(t) - v_3(t)\} + i_{13}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} \{v_1(t - \Delta t) - v_3(t - \Delta t)\} \quad (3a)$$

- dwa ostatnie wyrazy równania (3a) to tzw. historia stanu układu znana z poprzedniego kroku obliczeń:

$$hist_{13}(t - \Delta t) = i_{13}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} \{v_1(t - \Delta t) - v_3(t - \Delta t)\} \quad (3b)$$

dla pojemności C:

- równanie różniczkowe:

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

- można zastąpić centralnym równaniem różnicowym:

$$\frac{i(t) + i(t - \Delta t)}{2} = C \frac{v(t) - v(t - \Delta t)}{\Delta t}$$

- dla gałęzi 1-4 równanie to przybierze postać:

$$\frac{i_{14}(t) + i_{14}(t - \Delta t)}{2} = \frac{C}{\Delta t} \{v_1(t) - v_4(t) - v_1(t - \Delta t) + v_4(t - \Delta t)\}$$

- stąd:

$$i_{14}(t) = \frac{2C}{\Delta t} \{v_1(t) - v_4(t)\} - i_{14}(t - \Delta t) - \frac{2C}{\Delta t} \{v_1(t - \Delta t) - v_4(t - \Delta t)\} \quad (4a)$$

- dwa ostatnie wyrazy równania (4a) to tzw. historia stanu układu znana z poprzedniego kroku obliczeń:

$$hist_{14}(t - \Delta t) = -i_{13}(t - \Delta t) - \frac{2C}{\Delta t} \{v_1(t - \Delta t) - v_4(t - \Delta t)\} \quad (4b)$$

dla linii długiej bezstratnej o stałych rozłożonych:

- równania linii długiej jednorodnej (różniczkowe, cząstkowe):

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

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

- gdzie: R' , L' , G' , C' - wartości jednostkowe odpowiednio R , L , G , C (np. na 1 km długości linii); x - odległość od początku linii

- dla $R' = 0$ i $G' = 0$:

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

$$-\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = C' \frac{\partial v(x,t)}{\partial t}$$

- rozwiązanie d'Alemberta:

$$i = f_1(x - ct) - f_2(x + ct) \tag{5a}$$

$$v = Z \cdot f_1(x - ct) + Z \cdot f_2(x + ct)$$

$$Z = \sqrt{L'/C'} \quad (\text{impedancja falowa linii})$$

$$c = \sqrt{L' \cdot C'} \quad (\text{prędkość propagacji})$$

- po pomnożeniu pierwszego równania (5a) przez Z i dodaniu go stronami do równania drugiego:

$$v + Z \cdot i = 2 \cdot Z \cdot f_1(x - ct) \tag{5b}$$

- jeżeli obserwator przemieszcza się wzdłuż linii z prędkością c , to obserwuje tę samą wartość chwilową: $v + Z \cdot i$
- czas przebiegu linii: $\tau = (\text{długość linii})/c$
- obserwator startuje z punktu 5 (rys. 1) w chwili $t - \tau$, widzi wartość:

$$v_5(t - \tau) + Z \cdot i_{51}(t - \tau)$$

- po czasie τ widzi w punkcie 1 wartość taką samą:

$$v_1(t) - Z \cdot i_{15}(t)$$

- należy pamiętać, że $i_{15} = -i_{51}$

$$v_5(t - \tau) + Z \cdot i_{51}(t - \tau) = v_1(t) - Z \cdot i_{15}(t)$$

- stąd:

$$i_{15}(t) = \frac{1}{Z} v_1(t) - i_{51}(t - \tau) - \frac{1}{Z} v_5(t - \tau) \quad (6a)$$

- dwa ostatnie wyrazy równania (6a) to tzw. historia stanu układu znana z poprzedniego kroku obliczeń:

$$hist_{15}(t - \tau) = -i_{51}(t - \tau) - \frac{1}{Z} v_5(t - \tau) \quad (6b)$$

Przykład:

- niech: $\Delta t = 100 \mu\text{s}$, $\tau = 1 \text{ ms}$
- historia linii musi być znana i przechowywana przez czas τ
- wartości potrzebne do podstawienia do równania (6a) lub (6b) to te obliczone 10 kroków czasowych wcześniej
- równania (6) dają dokładne wyniki obliczeń, jeżeli τ jest podzielny przez Δt , jeżeli nie - stosuje się liniową interpolację godząc się na wprowadzany przez nią błąd
- straty mogą być uwzględnione przez wprowadzenie rezystancji skupionych w kilku miejscach wzdłuż linii
- dokładne traktowanie strat jest możliwe przez zastosowanie elementów o parametrach zależnych od częstotliwości

dla wszystkich elementów połączonych z węzłem nr 1:

- równanie węzłowe dla węzła nr 1 otrzymuje się przez wstawienie równań (2), (3a), (4a) i (6a) do równania (1):

$$\left(\frac{1}{R} + \frac{\Delta t}{2L} + \frac{2C}{\Delta t} + \frac{1}{Z} \right) v_1(t) - \frac{1}{R} v_2(t) - \frac{\Delta t}{2L} v_3(t) - \frac{2C}{\Delta t} v_4(t) =$$

$$i_1(t) - hist_{13}(t - \Delta t) - hist_{14}(t - \Delta t) - hist_{15}(t - \tau) \quad (7)$$

- jest to równanie algebraiczne liniowe, gdzie niewiadomymi są napięcia węzłów w odniesieniu do wspólnej masy (ziemi)
- wartość wyrażenia po prawej stronie jest znana na podstawie obliczeń przeprowadzonych w poprzednich krokach czasowych

dla dowolnej sieci elektrycznej o n węzłach:

- dla sieci o n węzłach można utworzyć układ n równań takich, jak równanie (7)
- stosując zapis macierzowy i wektorowy, układ można zapisać:

$$[G][v(t)] = [i(t)] - [hist]$$

gdzie:

$[G] = n \times n$ - symetryczna węzłowa macierz konduktancji

$[v(t)]$ - wektor n napięć węzłowych

$[i(t)]$ - wektor n prądów źródłowych

$[hist]$ - wektor n wartości z poprzednich kroków czasowych

Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

Zwarcie jest stanem zakłóceniovym sieci elektroenergetycznej, polegającym na nieprzewidzianym w normalnej pracy połączeniu dwóch lub więcej punktów układu o różnych potencjałach, przy czym za punkt sytemu uważa się również ziemię.

Przyczyny zwarć

Przyczyny elektryczne:

- przepięcia atmosferyczne,
- przepięcia łączeniowe,
- omyłki łączeniowe,
- długotrwałe przeciążenia prądowe niszczące izolację.

Przyczyny nieelektryczne:

- zawilgocenie lub zanieczyszczenie izolacji linii i urządzeń,
- uszkodzenia mechaniczne kabli, słupów, izolatorów,
- wady fabryczne urządzeń,
- ingerencja zwierząt,
- przewracające się drzewa lub spadające gałęzie.

Zwarcia klasyfikuje się według różnych kryteriów.

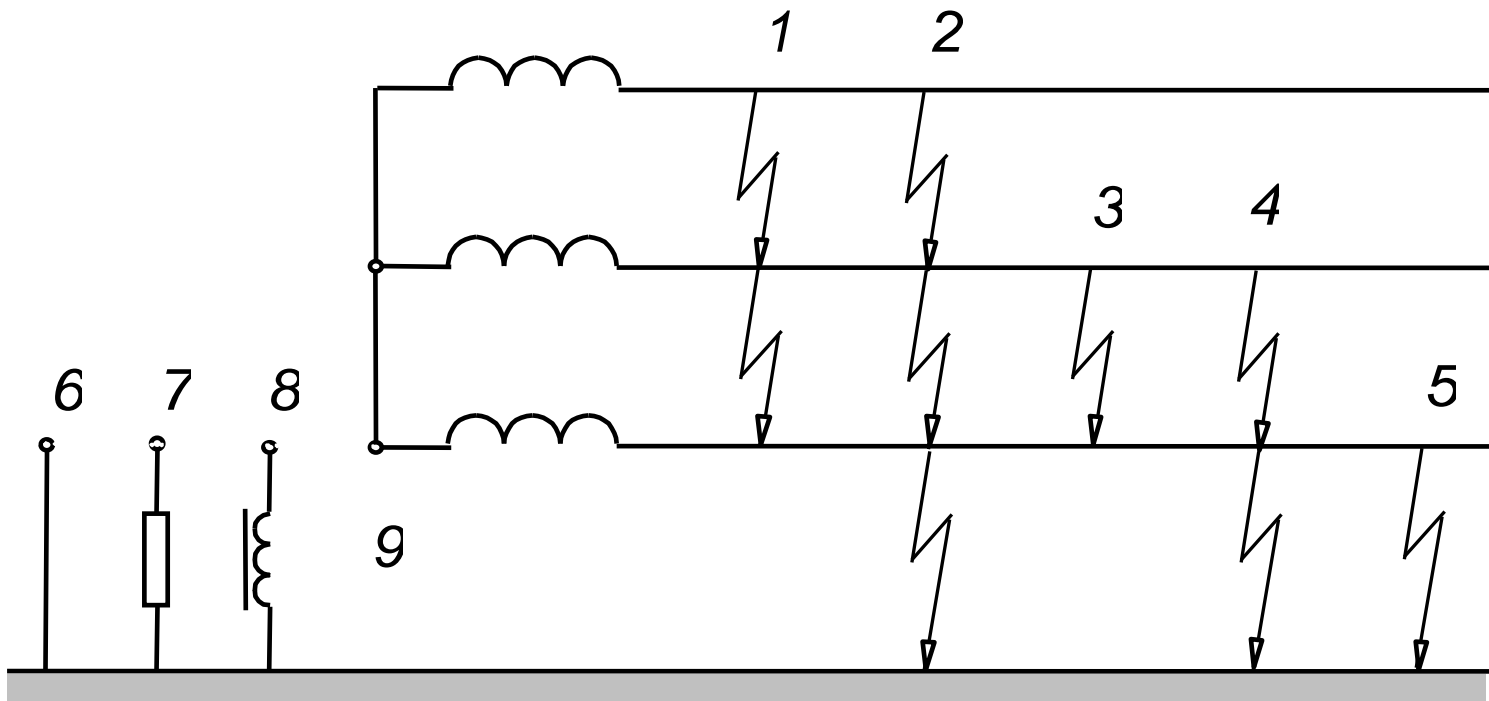
Najczęściej wyróżnia się zwarcia:

- symetryczne i niesymetryczne,
- trwałe i przemijające,
- metaliczne (bezpośrednie) i oporowe (niemetaliczne, pośrednie, występujące za pośrednictwem impedancji, np. łuku elektrycznego),
- jednoczesne i niejednoczesne,
- pojedyncze i wielomiejscowe.

Zwarciami **symetrycznymi** są zwarcia 3-fazowe i 3-fazowe doziemne, do **niesymetrycznych** zalicza się 1- i 2-fazowe oraz 2-fazowe z ziemią.

Zwarcia **jednoczesne** zachodzą w tej samej chwili czasowej we wszystkich fazach, które biorą udział w zwarceniu.

Zwarcia **pojedyncze** występują w jednym miejscu sieci, a **wielomiejscowe** to kilka zwarć pojedynczych w różnych miejscach.



Rodzaje zwarć:

- 1 - trójfazowe,
- 2 - trójfazowe doziemne,
- 3 - dwufazowe,
- 4 - dwufazowe doziemne,
- 5 - jednofazowe;

w sieci z punktem neutralnym:

- 6 - skutecznie uziemionym,
- 7 - uziemionym przez opornik,
- 8 - uziemionym przez dławik,
- 9 - izolowanym

Średnie częstości występowania różnych rodzajów zwarć (zgodnie ze statystykami międzynarodowymi):

- zwarcie jednofazowe – **65 %** (30 – 97 %),
- podwójne i dwufazowe zwarcie z ziemią – **20 %** (0 – 55 %),
- zwarcie dwufazowe – **10 %** (0 – 55 %),
- zwarcie trójfazowe – **5 %** (0 – 35 %).

Częstość zwarć jednofazowych zależy od:

- napięcia znamionowego sieci,
- udziału linii napowietrznych w całkowitej długości linii.

Udział zwarć jednofazowych rośnie wraz z napięciem znamionowym sieci i udziałem linii napowietrznych.

W sieciach 400 kV do 97 % wszystkich zwarć to zwarcia jednofazowe.

Liczba zwarć na 100 km linii na rok

Sieć	WN	SN	nn
Linie napowietrzne	0,8	6	20
Linie kablowe	---	22	30