

# Komputerowe metody analizy impulsowych narażeń elektromagnetycznych

**Streszczenie.** W referacie zaprezentowano wybrane, komercyjne oraz ogólnie dostępne narzędzia obliczeniowe znajdujące zastosowanie w analizie impulsowych narażeń elektromagnetycznych związanych głównie z wyładowaniami piorunowymi oraz stanami nieustalonymi w instalacji elektrycznej. Przedstawiono metody obliczeń stosowane w prezentowanych programach oraz omówiono ich zalety, wady, możliwości i ograniczenia.

**Abstract.** The article presents selected commercially and freely available simulation tools. They are used for analysis of impulse electromagnetic exposures related mainly to lightning strikes and transient processes in electrical installation. The calculation methods applied in the presented simulation tools are described. Their main advantages, disadvantages, possibilities and limitations are discussed too. (**Computer simulation methods of impulse electromagnetic exposure analysis**).

**Słowa kluczowe:** komputerowe metody analizy, metody numeryczne, narażenia impulsowe, stany nieustalone.

**Keywords:** computer simulation methods, numerical methods, impulse exposures, transient processes.

## Wstęp

Opracowanie skutecznych sposobów ochrony przed impulsowymi narażeniami elektromagnetycznymi wymaga prowadzenia szczegółowych badań. Komputerowe metody symulacyjne umożliwiają prowadzenie analiz narażeń elektromagnetycznych różnorodnych układów i systemów elektrycznych i elektronicznych w dowolnych obiektach budowlanych już w fazie ich projektowania. Koszty takich analiz są zwykle niższe w porównaniu do kosztów badań eksperymentalnych lub strat powodowanych zniszczeniem urządzeń w przypadku nieskutecznej ochrony.

Wśród dostępnych obecnie narzędzi numerycznych można wyróżnić dwie główne grupy. Pierwszą stanowią programy wykorzystujące obwodowe metody analizy, drugą – programy oparte na metodach polowych.

Specyfika ogólnej idei prowadzenia obliczeń w każdej z tych grup, oraz specyfika konkretnej metody symulacyjnej nakładają swoiste ograniczenia, szczególnie istotne przy analizie impulsowych narażeń elektromagnetycznych.

## Narzędzia oparte na obwodowych metodach analizy

Wśród narzędzi bazujących na metodach obwodowych należy wymienić powszechnie znany i ogólnie dostępny program ATP-EMTP [1] lub jego komercyjna wersja EMTP-RV [2]. Są to specjalistyczne narzędzia przeznaczone do analizy rozbudowanych układów elektrycznych oraz systemów elektroenergetycznych. Umożliwiają m.in. analizę zakłóceń symetrycznych i niesymetrycznych, zwarć, przepięć łączeniowych i atmosferycznych oraz innych stanów nieustalonych. Do zastosowań ogólnych wykorzystywany może być program PSpice.

W metodach obwodowych modelowany układ lub system przedstawiany jest w postaci obwodu elektrycznego o stałych skupionych lub rozłożonych. Przykład modelu symulacyjnego zbudowanego w programie ATP-EMTP przedstawiono na rysunku 1a).

W programie EMTP modelowane mogą być m.in.:

- liniowe elementy  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , sprzężone lub nie;
- jedno- i trójfazowe transformatory nasycające się;
- nieliniowe elementy  $R$ ,  $L$ , warystory metalowo-tlenkowe i elementy o zmieniającej się w czasie rezystancji;
- różnego rodzaju przełączniki, np. z wyzwaniem czasowym, napięciowym, statystycznym;
- różnego typu źródła napięcia i prądu, np. sinusoidalne, skok jednostkowy, eksponencjalne udarowe;
- elementy definiowane przez użytkownika.

Symulacje można prowadzić w dziedzinie czasu lub częstotliwości. W obu przypadkach obwód elektryczny

opisywany jest za pomocą równań, w których zmiennymi są napięcia w węzłach. Prądy płynące w gałęziach obwodu wyznaczone są na podstawie znajomości napięć.

Metoda obliczeń w dziedzinie czasu polega na dyskretyzacji sygnałów w czasie. Na podstawie znajomości wartości zmiennych w układzie w chwili  $t - \Delta t$  wyznacza się ich wartości w chwili  $t$ . Krok czasowy  $\Delta t$  jest na tyle mały, że równania różniczkowe mogą być aproksymowane równaniami różnicowymi. Odpowiada to całkowaniu numerycznemu metodą trapezową z krokiem  $\Delta t$ . Napięcia w niektórych węzłach są znane, ponieważ są dołączone do źródeł lub uziemione. Po wyznaczeniu napięć w węzłach, w następnym kroku czasowym tworzone są nowe macierze zmiennych historii układu w chwili  $t - \Delta t$  i cały proces się powtarza. Symulacja rozpoczyna się może od warunków początkowych zerowych, określonych dla źródła harmonicznego o zadanej częstotliwości lub dla wielu źródeł harmonicznych o różnych częstotliwościach [1].

Metoda trapezowa całkowania może niekiedy prowadzić do powstania błędów objawiających się tzw. „oscylacjami numerycznymi”. Powstają one w sytuacji skokowej zmiany pochodnej prądu płynącego przez indukcyjność lub pochodnej napięcia na kondensatorze. Oscylacje te należy tłumić za pomocą szeregowej rezystancji [1].

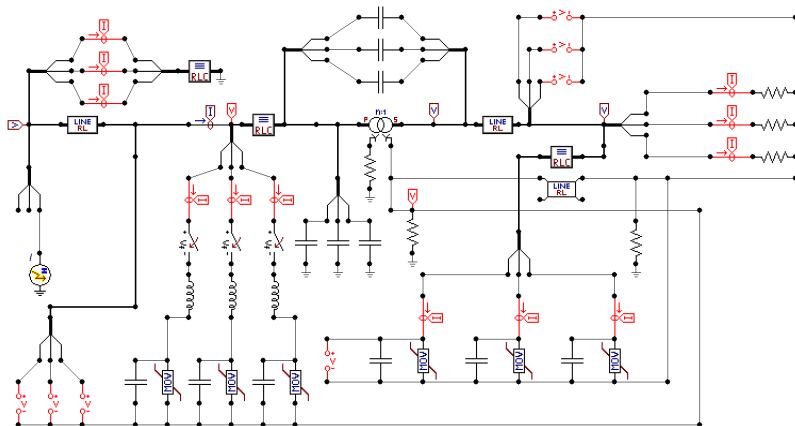
Obecność elementów nieliniowych w obwodzie wymaga stosowania nieliniowych metod obliczeń dla całego obwodu. Wychodząc z założenia, że podejście takie jest mało efektywne w przypadku obecności tylko kilku elementów nieliniowych, w programie ATP-EMTP zastosowano zmodyfikowane metody liniowe do analiz elementów nieliniowych. Elementy, które mogą być modelowane tymi metodami to nieliniowe indukcyjności do reprezentacji zjawisk nasycania się transformatorów, nieliniowe rezystancje jako ograniczniki przepięć oraz rezystancje zmienne w czasie do reprezentacji łuku elektrycznego.

Jedną z metod jest metoda kompensacyjna, zgodnie z którą gałąź zawierająca element nieliniowy może być odłączona od obwodu liniowego i zastąpiona źródłem prądu. Napięcie na elemencie nieliniowym  $u$  musi spełniać dwa równania. Pierwsze, równanie liniowej części obwodu, tj. chwilowe napięcie zastępczego obwodu Thevenina:

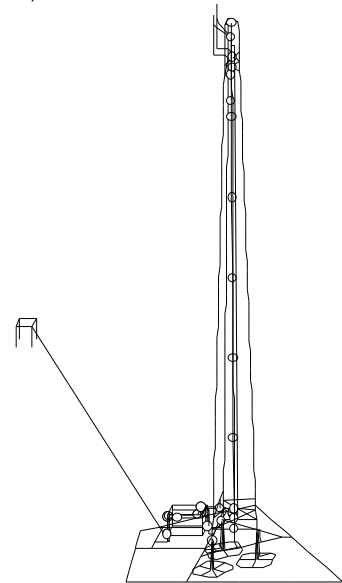
$$(1) \quad u = u_0 - R_T \cdot i$$

gdzie:  $u_0$  – napięcie pomiędzy punktami włączenia gałęzi nieliniowej bez obecności tej gałęzi w obwodzie,  $i$  – prąd płynący przez element nieliniowy,  $R_T$  – zastępcza rezystancja Thevenina.

a)



b)



Rys 1. Modele symulacyjne: a) stacji elektroenergetycznej SN/nN w programie ATP-EMTP; b) stacji bazowej GSM w programie HIFREQ

Drugie równanie charakteryzuje sam element nieliniowy:

$$(2) \quad u = f(i, di/dt, t, \dots)$$

Rezystancja  $R_T$  wyznaczana jest na początku pętli dyskretyzacji czasowej, a następnie w każdym następnym kroku. W przypadku charakterystyki elementu nieliniowego opisanej analitycznie obliczenia wykonywane są iteracyjną metodą Newtona-Raphsona. Może ona prowadzić do braku zbieżności obliczeń w przypadku obecności elementów silnie nieliniowych lub wielu elementów nieliniowych w obwodzie [1].

Drugą z metod symulacji elementów nieliniowych jest metoda tzw. reprezentacji pseudo-nieliniowej. W metodzie tej charakterystyka elementu nieliniowego aproksymowana jest charakterystyką kawałkami-liniową. Macierz konduktancji dla węzłów obwodu jest w takim przypadku aktualizowana za każdym razem, gdy rozwiązanie przesunie się z obszaru odpowiadającego jednemu liniowemu segmentowi charakterystyki w obszar innego. Ponieważ zmiana segmentu charakterystyki może być rozpoznana tylko w momencie, gdy rozwiązanie przesunie się poza zakres bieżącego segmentu, dla uniknięcia dużych błędów konieczne jest dobranie odpowiednio małego kroku czasowego symulacji. Błędy te są także tym większe, im większy jest stopień nieliniowości elementu.

Obie metody mogą prowadzić do błędów liniowej aproksymacji rozwiązania przy wymuszeniu harmonicznym.

Metody obliczeń w dziedzinie częstotliwości opierają się na znalezieniu rozwiązania dla obwodu liniowego przy wymuszeniu harmonicznym. Równania węzłowe są przedstawiane w postaci zespolonych wektorów napięć i prądów oraz macierzy admitancji. Symulacje mogą być automatycznie powtarzane dla kolejnych częstotliwości z wybranego zakresu. Istnieje także rozwiązanie pozwalające na zadanie wymuszenia w postaci sygnałów harmonicznymi z określonego zakresu częstotliwości o zdefiniowanych dla każdej częstotliwości wartościach amplitudy i fazy.

Oprogramowanie oparte na metodach obwodowych jest korzystne w zastosowaniu do analiz zakłóceń niskoczęstotliwościowych. Widmo zakłóceń impulsowych, charakteryzujących się zwykle krótkimi czasami narastania, sięga dziesiątków a czasami nawet setek MHz. W tym przypadku istotną rolę mogą odgrywać zjawiska związane z

występowaniem sprzężeń elektromagnetycznych i promieniowanych pomiędzy elementami instalacji, zależnością od częstotliwości parametrów jednostkowych długich elementów instalacji (np. efekt naskórkowości), występowaniem odbić fal prądowych i napięciowych poruszających się w elektrycznie długich elementach instalacji itp. Efekty te uwiadcniają się szczególnie w przypadku rozbudowanych systemów, w pobliżu których znajdują się silne źródła zaburzeń elektromagnetycznych, np. wyładowania piorunowe. Dodatkowo z bezpośrednim wyładowaniem pioruna wiąże się konieczność opisu struktur przewodzących znajdujących się w niejednorodnym ośrodku (odprowadzanie prądu pioruna przez uziom, wpływ właściwości elektrycznych gruntu i kanału wyładowania).

Modelowanie w programach bazujących na metodach obwodowych wymaga wstępnego oszacowania wielkości wszystkich sprzężeń i efektów powodowanych wspomnianymi zjawiskami oraz przedstawienia ich w formie odpowiednich parametrów obwodowych [3]. Większość z tych parametrów może być oszacowana analitycznie lub eksperymentalnie, niektóre tylko eksperymentalnie lub numerycznie na bazie równań teorii pola. Zatem zadanie to może okazać się bardzo skomplikowane lub wręcz niewykonalne. Wszystko to sprawia, że programy oparte na metodach obwodowych stosowane są tylko w odniesieniu do prostych instalacji umieszczonych w jednorodnym ośrodku [4, 5], a sprzężenia pomiędzy nadziemnymi i zakopanymi częściami instalacji oraz zależność parametrów układu od częstotliwości są w nich pomijane.

### Narzędzia oparte na teorii pola elektromagnetycznego

Do grupy programów symulacyjnych opartych na teorii pola elektromagnetycznego zaliczyć należy programy HIFREQ i MALZ wchodzące w skład pakietu CDEGS [6, 7, 8], program TRAGSYS a także programy AWAS i NEC-2.

Programy AWAS i NEC-2, pierwotnie przeznaczone do analizy kompleksów antenowych, chociaż wykorzystywane także do analizy wyładowań piorunowych. Umożliwiają prowadzenie symulacji jedynie dla struktur przewodzących umieszczonych nad przewodzącą płaszczyzną ziemi. Ziemia ta może być idealna lub rzeczywista o dowolnie zdefiniowanych parametrach elektrycznych, jednak nie jest możliwe modelowanie elementów zakopanych. W programach MALZ i TRAGSYS modelowane mogą być

instalacje przewodzące zakopane w rzeczywistej ziemi. Zastosowane metody nie pozwalają na uwzględnienie elementów nadziemnych. Zakres częstotliwości jest również ograniczony, w programie MALZ do ok. 1 MHz.

Najbardziej elastycznym i posiadającym największe możliwości modelowania różnorodnych zjawisk elektromagnetycznych jest program HIFREQ. Umożliwia on równoczesne uwzględnienie elementów nadziemnych i zakopanych, a więc modelowanie zjawisk związanych z wyładowaniami piorunowymi w konstrukcje przewodzące, stanów nieustalonych powstających podczas wyładowań piorunowych i procesów łączeniowych, oddziaływania wyższych harmonicznych pól elektromagnetycznych itp.. Charakteryzuje się szerokim zakresem częstotliwości, od prądu stałego do kilkudziesięciu MHz. Program umożliwia m.in. obliczenia:

- potencjałów uziomów oraz połączonych z nimi konstrukcji nadziemnych;
- rozkładów pól elektromagnetycznych wokół stacji elektroenergetycznych oraz innych systemów i konstrukcji przewodzących;
- prądów i napięć indukowanych w rurach, różnego rodzaju konstrukcjach i obwodach wtórnych, powodowanych przepływem dużych prądów w pobliskich obwodach pierwotnych;
- prądów wirowych w ziemi powodowanych przepływem prądów w pobliskich elementach przewodzących.

W metodach opartych na teorii pola, zachodzące zjawiska elektromagnetyczne opisywane są za pomocą dwupotencjałowych równań różniczkowo-całkowych, formułowanych najczęściej w dziedzinie częstotliwości i rozwiązywanych numerycznie metodą momentów. Struktura przewodząca reprezentowana jest za pomocą geometrycznej sieci cienkich cylindrycznych przewodów o zdefiniowanych wymiarach i właściwościach elektrycznych (rys. 1b), umieszczonej w jednorodnym lub niejednorodnym ośrodku (powietrze i grunt). Przewody sieci muszą zostać podzielone na krótsze segmenty. Przy założeniu, że średnice segmentów są co najmniej kilkukrotnie mniejsze od ich długości, segmenty te funkcjonują jak dipole elektryczne. Poszukiwany rozptył prądów w segmentach wyznaczany jest na podstawie sformułowania [9]:

- na bazie równań Maxwella, równań dwupotencjałowych opisujących warunki brzegowe pól na powierzchniach segmentów oraz na granicy warstw ośrodków o różnych właściwościach elektrycznych;
- równań wynikających z zachowania praw Kirchhoffa w węzłach sieci i prądów wpływających do węzłów ze źródeł;
- równania matematycznego aproksymującego rozkład prądu wzdłuż pojedynczego segmentu sieci.

Po wyznaczeniu rozptyłu prądów, obliczane są wszystkie pozostałe wielkości elektromagnetyczne.

W przypadku programów HIFREQ i MALZ rozkład prądu wzdłuż pojedynczego segmentu aproksymowany jest linią prostą [9]. Narzuca to dodatkowy warunek, aby segmenty były przynajmniej dziesięciokrotnie krótsze od długości fali odpowiadającej najwyższej analizowanej częstotliwości. W przeciwnym razie błąd aproksymacji jest duży.

W przypadku programów AWAS i NEC-2 stosowana jest aproksymacja wielomianowa. Dla zminimalizowania błędów aproksymacji segmenty powinny być tu dłuższe (nawet kilkukrotnie w porównaniu z długością fali) [10]. Prowadzi to do ograniczenia możliwości zastosowania tych programów od strony niskich częstotliwości.

W wymienionych wyżej programach bazujących na teorii pola obliczenia prowadzone są w dziedzinie częstotliwości. W związku z tym modelowanie zjawisk nieliniowych w sposób bezpośredni nie jest w nich możliwe, a w sposób

pośredni jest raczej skomplikowane. Opracowywane są wprawdzie metody obliczeń w dziedzinie czasu [11], jednak należą one jeszcze do rzadkości. Głównymi powodami są brak możliwości łatwego prognozowania zachowania się układu w przypadku zastosowania innego niż pierwotnie zadane wymuszenie oraz czasochłonność obliczeń.

Czasochłonność analiz jest generalnie cechą wszystkich programów opartych na teorii pola, w których modelowane są jednocześnie elementy nadziemne i podziemne.

## Podsumowanie

W artykule zaprezentowano narzędzia numeryczne, znajdujące zastosowanie w analizie impulsowych narażeń elektromagnetycznych w rozległych obiektach. Porównano narzędzia oparte na metodach obwodowych i na teorii pola.

W metodach obwodowych, w których możliwe jest prowadzenie obliczeń w dziedzinie czasu lub częstotliwości, szybko i w sposób bezpośredni badane mogą być charakterystyki częstotliwościowe oraz zjawiska nieliniowe. Znacznie bardziej skomplikowane jest prowadzenie analiz zjawisk wysokoczęstotliwościowych, szczególnie sprzężeń pomiędzy nadziemnymi i zakopanymi częściami instalacji oraz zależności parametrów układu od częstotliwości.

W metodach bazujących na teorii pola wszystkie efekty zjawisk wysokoczęstotliwościowych są uwzględniane w sposób bezpośredni. Obliczenia mogą być prowadzone tylko w dziedzinie czasu lub tylko w dziedzinie częstotliwości. Analizy czasowe nie pozwalają na łatwe prognozowanie zachowania się układu w przypadku zastosowania innego niż pierwotnie zadane wymuszenie, natomiast analizy częstotliwościowe nie umożliwiają bezpośrednio modelowania zjawisk nieliniowych.

## LITERATURA

- [1] ElectroMagnetic Transients Program (EMTP) Rule Book, [www.eeug.org](http://www.eeug.org)
- [2] EMTP-RV ElectroMagnetic Transient Program, [www.emtp.com](http://www.emtp.com)
- [3] Orlandi A., Mazzetti C., Flisowski Z., Yarmarkin M., Systematic Approach for the Analysis of the Electromagnetic Environment inside a Building during Lightning Strike, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 40, (1998), 521–535
- [4] Grcev L., Arnautovski V., Transient Voltages Coupling to Cables in Metal Tubes, 22nd International Conference on Lightning Protection, Budapest, Hungary, (1994), Proc. R 5-03
- [5] Geri A., Visacro S. F., Grounding systems under surge conditions: comparison between a field model and a circuit model, 26<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection, Cracow, Poland, (2002), 411–416
- [6] HIFREQ User's Manual, Safe Engineering Services & Technologies Ltd., Montreal, Canada (2000)
- [7] MALZ User's Manual, Safe Engineering Services & Technologies Ltd., Montreal, Canada (2000)
- [8] How To... Engineering Guide: Lightning Transient Study of a Communication Tower, Safe Engineering Services & Technologies Ltd., Montreal, Canada (1999)
- [9] Computation of electromagnetic fields created by rectilinear current sources in a stratified medium, Safe Engineering Services – HIFREQ theory, Materiały niepublikowane
- [10] Anisierowicz K., Analiza zagadnień kompatybilności elektromagnetycznej w rozległych obiektach narażonych na wyładowania atmosferyczne, Rozprawa habilitacyjna, Politechnika Białostocka, Białystok (2005)
- [11] Kordi B., Moini R., Janischewskij W., Hussein A. M., Shostak V. O., Rakov V. A., Application of the antenna theory model to a tall tower struck by lightning, Journal of Geophysical Research, vol. 108, 4542, (2003), no. D.17, ACL 7-1–7-9

**Autorzy:** dr inż. Renata Markowska, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45 D, 15-351 Białystok, E-mail: [remark@pb.edu.pl](mailto:remark@pb.edu.pl); mgr inż. Jarosław Michał Wiater, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45 D, 15-351 Białystok, E-mail: [jaroslawwiater@we.pb.edu.pl](mailto:jaroslawwiater@we.pb.edu.pl);