

# Inżynierskie metody obliczeń i symulacji działania układów z ogranicznikami przepięć na przykładzie darmowego programu ATP/EMTP

Mgr inż. Jarosław WIATER  
Politechnika Białostocka

W artykule zaprezentowano praktyczny przykład wykorzystania pakietu ATP-EMTP do oceny skuteczności ochrony przed przepięciami powstającymi podczas wyładowań piorunowych w linie średniego napięcia. Poprawność obliczeń wykonywanych przez pakiet ATP była już wielokrotnie weryfikowana w praktyce.

## 1. Wstęp

ATP (Alternative Transients Program) to pakiet programów służący do wykonywania obliczeń w układach i systemach elektroenergetycznych. Należy on do grupy programów opracowanych do wszechstronnej analizy stanów nieustalonych w dziedzinie czasu – w skrócie EMTP (Electromagnetic Transients Program). W celu ułatwienia i uproszczenia obliczeń użytkownik ma do dyspozycji ponad dwieście elementów, które wchodzi w skład systemu elektroenergetycznego. Począwszy od prostych elementów RLC, poprzez elementy nieliniowe takie jak na przykład ograniczniki przepięć, zaś skończywszy na nieliniowych maszynach elektrycznych (transformatorach, silnikach asynchronicznych, synchronicznych i silnikach prądu stałego).

Program ATP został udostępniony przez autorów bezpłatnie dla wszystkich, którzy chcą z niego korzystać. Nie ma znaczenia sposób, cel i miejsce jego wykorzystania. Wymagana jest jedynie rejestracja. Warunki licencji zabraniają komercyjnego czerpania zysków ze sprzedaży udostępnionego oprogramowania.

Wszystkie szczegóły dotyczące programu ATP dostępne są poprzez stronę internetową o adresie <http://www.emtp.org/>. Po przeprowadzeniu pełnej rejestracji na w/w stronie w przeciągu 1-2 tygodni otrzymamy na podany w formularzu adres potwierdzenie na piśmie o posiadanej licencji wraz z hasłami dostępu do stron internetowych, z których możemy pobrać oprogramowanie.



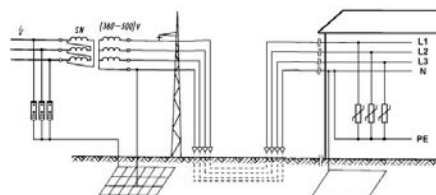
Rys. 1 Strona domowa pakietu ATP.

Dodatkowo należy zauważyć, iż dostępna wersja pracuje bez problemów pod Windows'em 95,98,2000,XP. Istnieje też wersja przystosowana do pracy pod Linux'em. Program jest rozwojowy, ciągle unowocześniany stąd warto się jemu bliżej przyjrzeć. Pakiet składa się z trzech programów – ATP Draw, ATPMingW, PlotXY. ATP Draw jest post-procesorem graficznym, czyli programem umożliwiającym zdefiniowanie układu, który będzie poddany obliczeniom. Jest on bardzo przyjazny użytkownikowi. Najważniejszym programem jest ATPMingW. Jest to główny moduł obliczeniowy. To właśnie ten program wykonuje wszystkie operacje zadane przez ATP Draw. Komunikuje użytkownikowi o zaistniałych błędach, generuje ostrzeżenia i raporty. PlotXY jest to program umożliwiający graficzną prezentację wyników obliczeń. Dzięki niemu staje się możliwe wybranie interesujących nas przebiegów w dziedzinie czasu, ich zapis lub wydruk. Daje on również możliwość wyznaczenia widma sygnału, wykonanie prostych operacji takich jak sumowanie, odejmowanie, mnożenie i dzielenie dwóch przebiegów.

## 2. Przykład wykorzystania ATP-EMTP

Do obliczeń z wykorzystaniem ATP-EMTP wybrano typowy wycinek systemu elektroenergetycznego - stację SN/nN zasilaną linią napowietrzną średniego napięcia z przyłączonymi odbiorcami po stronie niskiego napięcia za pomocą podziemnych linii kablowych (rys.2.).

Stacja SN/nN pracuje z punktem neutralnym izolowanym po stronie średniego napięcia i uziemionym po stronie niskonapięciowej (układ połączeń uzwojeń transformatora – Dyn). Stacja jak i odbiorca energii elektrycznej zostali wyposażeni w warystorowe ograniczniki przepięć na poziomie średniego i niskiego napięcia.



Rys.2. Uproszczony schemat stacji SN/nN 15/0.4 kV z przyłączonym odbiorcą energii zasilanym linią kablową

Symulując występujące zagrożenie piorunowe wprowadzono prądy udarowe do:

- pojedynczego przewodu fazowego linii SN,
- każdego z trzech przewodów fazowych SN.

W obliczeniach uwzględniono nie równomierny podziału prądu piorunowego w instalacjach przewodzących dochodzących do obiektu budowlanego. Do obliczeń wybrano prądy o wartościach szczytowych 10 kA i kształtach:

- 10/350 $\mu$ s - odpowiadający zagrożeniu stwarzanemu przez prąd piorunowy pierwszego wyładowania piorunowego,
- 0,25/100 $\mu$ s - symulujący prąd udarowy kolejnego wyładowania piorunowego w kanale.

Dodatkowo w prowadzonych obliczeniach przyjęto następujące założenia:

- rezystancyjne obciążenie transformatora po stronie nN (układ rezystorów o wartości 5 $\Omega$  połączonych w gwiazdę),
- wewnątrz obiektu budowlanego instalacja elektryczna wykonana jest w systemie TN-C-S,
- rezystancja uziomu stacji SN/nn w warunkach dynamicznych wynosi 2 $\Omega$ ,
- rezystancja dynamiczną uziomu otokowego obiektu budowlanego wynosi 10 $\Omega$ ,
- wartość impedancji falowej pojedynczego przewodu linii napowietrznej SN przyjęto równą 400 $\Omega$ .

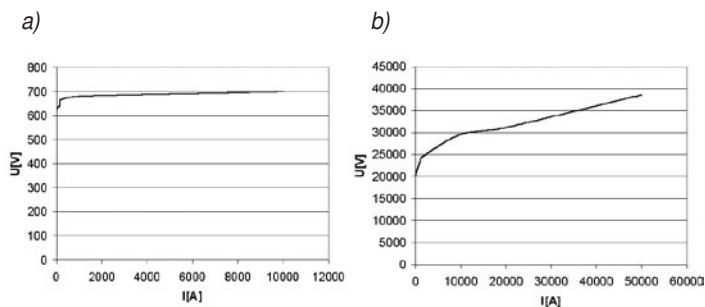
W programie zamodelowano rozważany układ stacji SN/nn 15/0.4kV wraz z instalacją elektryczną po stronie SN i nn. W prowadzonej analizie teoretycznych wykorzystano modele:

- rzeczywistego transformatora firmy ABB typu TNOSCF 1000/15 PN [11] w układzie połączeń Dyn5 o mocy znamionowej 1000kVA,
- typowych ograniczników przepięć w stosowanych liniach SN,
- urządzeń do ograniczania przepięć w instalacji elektrycznej w obiekcie budowlanym.

W przypadku ograniczników przepięć SN wykorzystano charakterystykę typowego odgromnika zaworowego SN (rys.3b). Do odwzorowania charakterystyki napięciowo-prądowej elementów do ograniczania przepięć można wykorzystać zarówno dane katalogowe jak i wyniki własnych pomiarów. Do obliczeń wykorzystano typowy ogranicznik warystorowy nN o następujących parametrach:

- najwyższe napięcie robocze 275V,
- napięcie obniżone poniżej 1500V,
- znamionowy prąd wyładowczy 20 kA,
- największy prąd wyładowczy 40 kA.

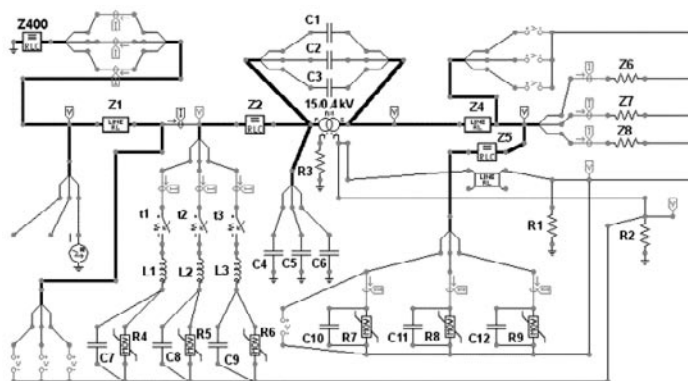
Po zdjęciu charakterystyki wprowadzono współrzędne do programu ATP-EMTP – element typu MOV.



Rys. 3 Charakterystyka napięciowo-prądowa ogranicznika przepięć: a) niskiego napięcia, b) średniego napięcia

W modelu transformatora, w celu odwzorowania zjawisk zachodzących przy wystąpieniu przebiegów szybkochwytowych, uwzględniono pojemności pomiędzy uzwojeniami strony pierwotnej i wtórnej.

Schemat analizowanego układu oraz zestawienie wartości podstawowych parametrów elementów w symulowanym systemie przedstawia rys.4. oraz tablica 1.



Rys. 4. Schemat analizowanego układu w programie ATP-EMTP

Tab. 1 Zestawienie wartości elementów użytych do symulacji

Element	Wartość
$R_1$	10 $\Omega$
$R_2$	2 $\Omega$
$R_3$	10M $\Omega$
$R_{4,5,6}$	wg ch-styki nieliniowej rys.3a
$R_{7,8,9}$	wg ch-styki nieliniowej rys. 3b
$C_{1,2,3,4,5,6}$	100pF
$C_{7,8,9,10,11,12}$	5000pF
$L_{1,2,3}$	10 $\mu$ H
$t_{1,2,3}$	80ns (zwłoka w zadziałaniu)
$Z_1$	$R_{ABC}=10\Omega$ $L_{ABC}=1mH$ (podejście do stacji SN/nn)
$Z_2$	$R_{ABC}=2,205\Omega$ $L_{ABC}=42\mu H$ (parametry transformatora przeliczone na stronę SN)
$Z_{3,4}$	$R_{ABCN}=0,9\Omega$ $L_{ABCN}=10\mu H$ (typowa linia kablowa niskiego napięcia o długości 300m)
$Z_5$	LABC=1 $\mu$ H
$Z_{6,7,8}$	R=5 $\Omega$
$Z_{400}$	Z=400 $\Omega$ (impedancja falowa linii SN)

### 3. Analiza otrzymanych wyników

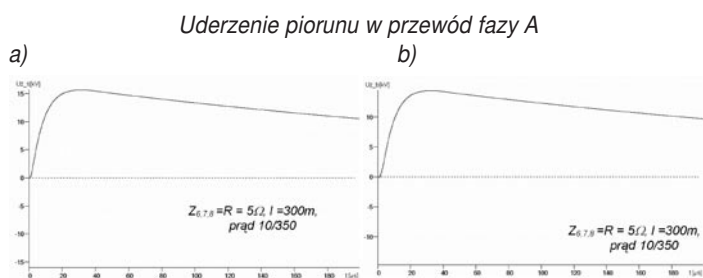
Podczas bezpośredniego wyładowania piorunowego w przewody linii SN od miejsca uderzenia w obu kierunkach linii przesuwa się fale napięciowe wywołane przez rozptylający się prąd piorunowy. Wywołują one przeskoki iskrowe na kolejnych izolatorach. Pomimo tych przeskoków znaczna część prądu piorunowego dochodzi do transformatora i po zadziałaniu ograniczników przepięć SN sływa do systemu uziomowego stacji. Przepływ prądu udarowego wywołuje lokalny skok potencjału. Uziemienie punktu neutralnego strony niskonapięciowej transformatora powoduje przenoszenie tego skoku potencjałów na stronę wtórną transformatora a następnie przewodami instalacji elektrycznej bezpośrednio do odbiorcy energii elektrycznej. Wartość szczytowa wynoszonego napięcia, uzależniona jest od wzajemnego rozmieszczenia miejsc uziemień transformatora i ograniczników przepięć SN.

W przypadku wyładowania atmosferycznego napięcie wynoszone w ten sposób nakłada się na występujące w tej chwili napięcie fazowe po stronie niskiego napięcia. Różnica wartości szczytowych napięć fazowych względem przewodu neutralnego nie zmienia się. Powoduje to nieprawidłowe działanie urządzeń do ograniczania przepięć w sieciach rozdzielczych niskiego napięcia, gdyż stosowane obecnie SPD reagują tylko na różnicę potencjału między swoimi wyprowadzeniami.

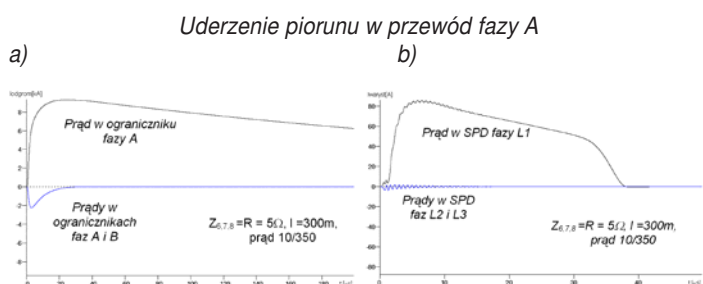
Przykładowe wyniki obliczeń:

- prądów płynących w ogranicznikach średnich i niskich napięć,
- różnic potencjałów pomiędzy uziomami stacji i obiektu a ziemią odniesienia,
- napięć na obciążeniu

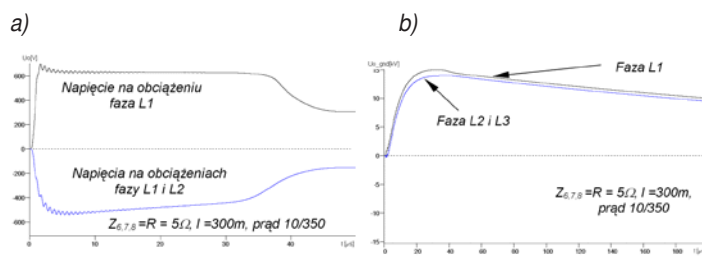
przy wyładowaniu piorunowych w jeden z przewodów nawięztrzej linii SN przedstawiono na rys.4, 5, 6, 7 i 8.



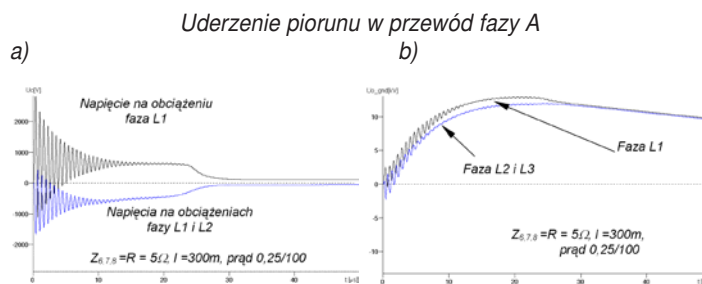
Rys. 4. Napięcia względem ziemi odniesienia; a) na uziomie stacji SN/nn, b) na uziomie obiektu budowlanego



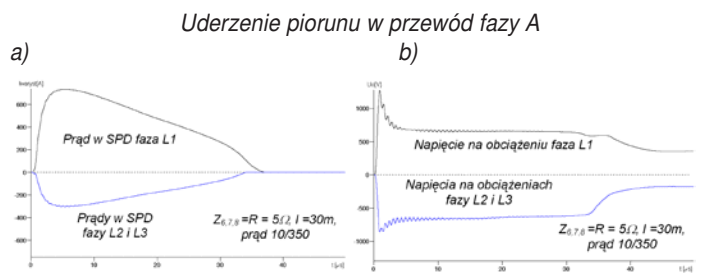
Rys. 5. Prądy płynące w : a) ogranicznikach przepięć SN, b) urządzeniach do ograniczania przepięć w instalacji elektrycznej



Rys. 6. Spadki napięć na obciążeniu (a) oraz napięcia na zaciskach obciążenia względem ziemi odniesienia (b)



Rys. 7. Spadki napięć na obciążeniu (a) oraz napięcia na zaciskach obciążenia względem ziemi odniesienia (b)



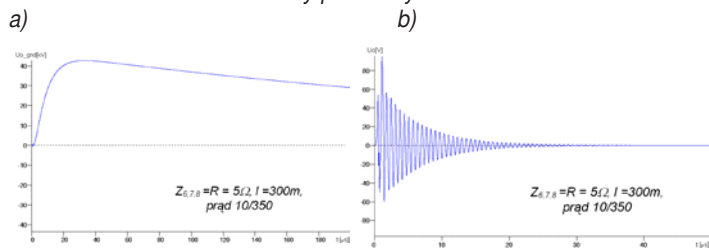
Rys. 8. Prądy płynące w urządzeniach do ograniczania przepięć w instalacji elektrycznej (a) oraz spadki napięć na obciążeniu (b)

Analizując otrzymane wyniki, z punktu widzenia zagrożeń zasilanych urządzeń w obiekcie budowlanym, należy zwrócić uwagę na:

- stosunkowo niewielkie wartości przepięć występujących na obciążeniach symulujących urządzenia,
- wysokoczęstotliwościowe oscylacje nakładające się przebiegi napięć na obciążeniu w przypadkach wprowadzania udarów prądowych o szybko narastających czołach (udary prądowe 0,25/100),
- niewielkie, w porównaniu z prądami udarowymi wprowadzanymi do przewodów, wartości szczytowe prądów płynących przez SPD w instalacji elektrycznej,
- wzrost napięcia na zaciskach obciążenia oraz wzrost prądów płynących przez SPD w przypadku skracania długości podziemnych linii kablowych,
- duże (osiągające kilkanaście kV) różnice potencjałów pomiędzy przewodami instalacji elektrycznej a ziemią odniesienia.

W przypadku wprowadzania prądów udarowych do każdego z trzech przewodów linii SN (symulacja jednoczesnego uderzenia piorunu w trzy przewody fazowe – przeniesienie wyładowania na sąsiednie fazy) wzrasta zagrożenie stwarzane przez różnice potencjałów, których wartości dochodzą 40 kV (rys.9 i 10).

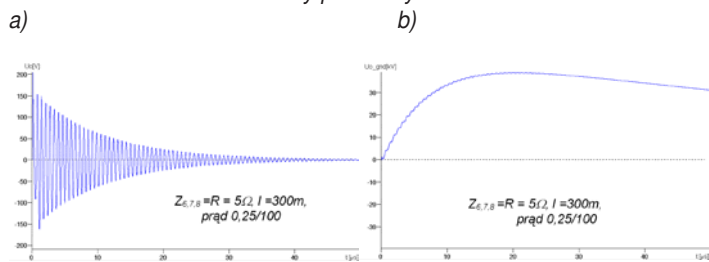
### Uderzenie w trzy przewody fazowe linii SN



Rys. 9. Uderzenie piorunu w trzy przewody fazowe;

a) napięcie na zaciskach obciążenia względem ziemi odniesienia, b) spadki napięć na obciążeniu

### Uderzenie w trzy przewody fazowe linii SN



Rys. 10. Uderzenie w trzy przewody fazowe:

a) spadki napięć na obciążeniu, b) napięcie na zaciskach obciążenia względem ziemi odniesienia

## 4. Wnioski końcowe

Dokonując porównania wartości szczytowych prądów płynących w ogranicznikach przepięć, skoków potencjału na uziomie zasilanego obiektu budowlanego oraz spadku napięcia na odbiorniku można stwierdzić, iż:

- Podstawowym zagrożeniem piorunowym w instalacji elektrycznej jest skok potencjałów przewodów, który może stanowić zagrożenie, jeśli:
  - ✓ do urządzeń dochodzą instalacje (np. telekomunikacyjne, kontrolno-pomiarowe) połączone z systemem uziomowym o innym potencjale własnym,

✓ w pobliżu znajdują się przewodzące instalacje (np. instalacja wodno-kanalizacyjna, CO, gazowa), które są połączone z innym systemem uziomowym w innym miejscu niż instalacja elektryczna i występująca różnica potencjałów może być niebezpieczna dla użytkownika urządzeń.

- Wprowadzanie prądu udarowego jednocześnie do przewodów trzech faz linii SN zwiększa dwukrotnie wartości szczytowej skoku potencjałów na uziomie budynku w porównaniu z przypadkiem wprowadzania prądu udarowego do jednego przewodu linii.
- Stosowanie urządzeń do ograniczania przepięć w instalacji elektrycznej nie ogranicza różnic potencjałów pomiędzy przewodami instalacji elektrycznej dochodzącymi a ziemią odniesienia.
- Używanie rzeczywistych charakterystyk urządzeń do ograniczania przepięć w instalacji elektrycznej do modelowania układów w programie ATP-EMTP w znaczący sposób przybliży wyniki symulacji do warunków występujących w rzeczywistości.

Należy zauważyć, że na konieczność zwrócenia uwagi na przepięcia udarowe między instalacjami niskiego napięcia a liniami telefonicznymi, które są przyłączone do urządzenie wskazuje również norma PN-IEC 61024-1-2 [7]. Występujące różnice potencjałów między instalacjami wprowadzanymi do obiektu budowlanego można wyeliminować stosując izolację galwaniczną urządzeń.

W artykule wykorzystano jeden z wielu programów do analizy obwodów w dziedzinie czasu. Poprawność obliczeń wykonywanych przez pakiet ATP był już wielokrotnie weryfikowany w praktyce z dobrym efektem. Program ma ogromne możliwości. W rękach sprawnego inżyniera będzie stanowił nieocenione narzędzie do pracy. Główne zalety programu to: bezpłatna licencja, prosta obsługa i duża szybkość działania.

## Literatura

- [1] Eugeniusz Jezierski „Transformatory. Podstawy teoretyczne”
- [2] Bassi W., Janiszewski J.M.” Evaluation of Currents and Charges in Low-Voltage Surge Arresters Due to Lightning Strikes” IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 18, No 1, 2003
- [3] Silva J.P., E Araujo A., Paulino J.O. “Calculation of Lightning Induced Voltage in Overhead Power Distribution Lines Protected by Metal Oxide Arresters: EMTP Simulations”. 25th International Conference on Lightning Protection, 9.8, ICLP 2000, Rhodes-Greece
- [4] Larsson A., Scuka V., Borgeest K., Luiken ter Haseborg J. „ Numerical Simulation of Gas Discharge Protector- A review”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No.2, April 1999
- [5] Yagasaki A. “Characteristics of a Special-Isolation Transformer capable of Protecting From High-Voltage Surges and Its Performance”. IEEE Transactions of Electromagnetic Compatibility, Vol. 43, No.3, August 2001
- [6] PN-IEC 61024-1:2001, Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Zasady ogólne
- [7] PN-IEC 61024-1-2:2002, Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Część 1-2: Zasady ogólne. Przeodnik B – Projektowanie, montaż, konserwacja i sprawdzania urządzeń piorunochronnych.
- [8] PN-IEC 61643-1:2001, Urządzenia ograniczające przepięcia dołączone do sieci rozdzielczych niskiego napięcia. Wymagania techniczne i metody badań.
- [9] PN-EN 60099-5:1999, Ograniczniki przepięć. Zalecenia doboru i specyfikacji.
- [10] PN-IEC 61643-1:2001 ” Urządzenie do ograniczania przepięć w sieciach rozdzielczych niskiego napięcia. Część 1: Wymagania techniczne i metodyka badań.
- [11] Katalog transformatorów firmy ABB Polska z 2000 roku.