

## Wyznaczanie zagrożenia piorunowego stopni wejściowych zabezpieczeń stacji elektroenergetycznej

**Streszczenie.** W niniejszym artykule zostanie zaprezentowana metoda połączenia możliwości obliczeniowych dwóch programów komputerowych CDEGS i EMTP. Zastosowanie nowego podejścia stwarza możliwość wyznaczenia rzeczywistego zagrożenia piorunowego stopni wejściowych zabezpieczeń stosowanych w stacjach elektroenergetycznych wysokiego napięcia. Program CDEGS umożliwia wyznaczenie wzrostu potencjału systemu uziomowego podczas wyładowania atmosferycznego na terenie stacji, zaś EMTP pozwala analizować rozległy i złożony system elektroenergetyczny. Zaproponowane sprzężenie uzupełnia wady poszczególnych programów powodując ich wzajemne uzupełnianie się.

**Abstract.** This paper will present software that allows transferring computation results from CDEGS to EMTP. By this software a lightning hazard of the protection relays will be computed. The CDEGS software will compute a HV substation ground potential rise during the lightning. Authoring tool will transfer results to the EMTP. The EMTP allows computing a voltage level on the inputs of protection relays. (**Lightning hazard approximation of the relay's control input in HV substation**).

**Słowa kluczowe:** CDEGS, EMTP, zagrożenie piorunowe, zabezpieczenia, stacja WN/SN.

**Keywords:** CDEGS, EMTP, lightning hazard, protection relays, HV/MV substation.

### Wstęp

Nadrzędną kontrolę nad stanem stacji WN posiadają układy elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej (EAZ). Głównym zadaniem EAZ jest zapobieganie rozprzestrzenianiu się skutków awarii linii przesyłowych i urządzeń zainstalowanych na stacji. Prawidłowe funkcjonowanie EAZ zapewnia dodatkowo ochronę przeciwporażeniową podczas stanów awaryjnych. W trakcie normalnej pracy stacji urządzenia te cały czas kontrolują stan obiektu i podejmują kluczowe decyzje w przypadku pojawiającego się zagrożenia.

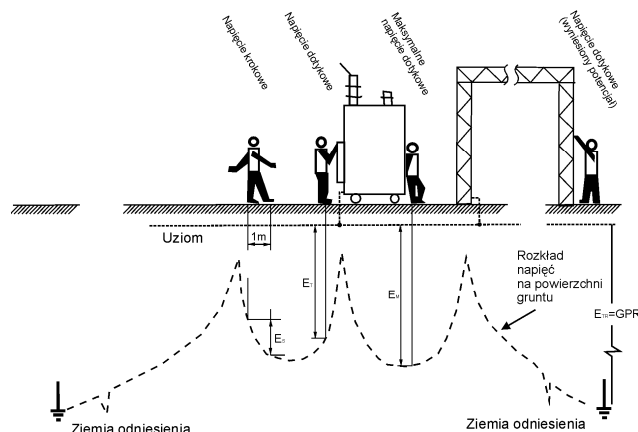
Jednym z zagrożeń dla prawidłowego funkcjonowania EAZ jest bezpośrednie wyładowanie piorunowe na terenie stacji. Najczęściej stosowaną metodą określenia skutków oddziaływania rozprzestrzeniającego się prądu piorunowego na system elektroenergetyczny jest analiza układów nieliniowych. Opiera się ona na dekompozycji systemu na część nieliniową zawierającą elementy o stałych skupionych i sieć liniową zawierającą zarówno elementy o stałych skupionych jak i elementy o stałych rozłożonych.

Najważniejsze ograniczenie wiąże się pominięciem wzajemnych oddziaływań między elementami sieci poprzez promieniowane pole elektromagnetyczne. Pomijane są również wszystkie zjawiska związane z propagacją fal. W sposób automatyczny determinują te zjawiska rozmiary obiektów w porównaniu z długością fali prądowej wyładowania atmosferycznego. Widmo wyładowania atmosferycznego ma znaczące składowe w zakresie częstotliwości do kilku megaherców. Ogranicza to dopuszczalne wymiary obiektu do kilku metrów. Pominięcie sprzężeń pomiędzy elementami stacji prowadzi do nieuwzględnienia ewentualnych efektów rezonansowych. Są one szczególnie ważne w przypadku wyładowań w sąsiednie obiekty, linie przesyłowe, metalowe słupy konstrukcji nośnych, elementy składowe systemu uziomowego. Pomijany jest jednocześnie wpływ kanału wyładowania atmosferycznego. Dużą zaletą podejścia obwodowego jest możliwość analizy całego rozległego systemu elektroenergetycznego wraz z systemami sterowania i nadzoru stacji WN. Najczęściej wykorzystywany jest do tego celu program ATP-EMTP.

W niniejszym artykule zostanie zaprezentowane nowe autorskie oprogramowanie umożliwiające połączenie możliwości obliczeniowych dwóch programów komputerowych CDEGS i EMTP znoszące ograniczenia nakładane przez oba programy.

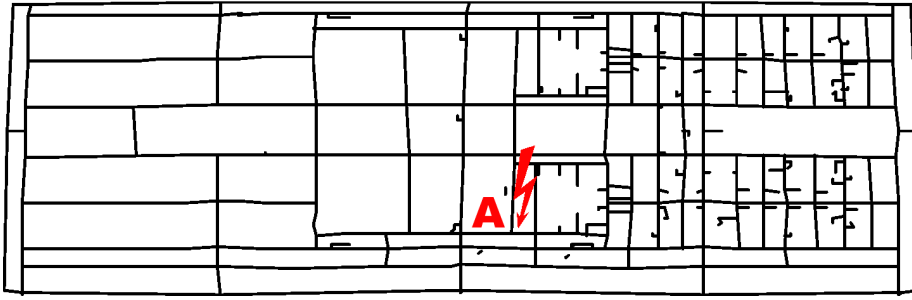
### Wzrost lokalnego potencjału uziomu

Parametry systemu uziomowego stacji elektroenergetycznej ulegają dynamicznym zmianom w wyniku przepływu prądu piorunowego. Rezystancja uziomu wzrasta i powoduje również wzrost lokalnego potencjału uziomu odniesienia (Ground Potential Rise - GPR) – rys. 1. Powstaje w ten sposób różnica potencjałów, która stwarza realne zagrożenie dla urządzeń zainstalowanych na terenie stacji. Wymusza ona jednocześnie przepływ prądów wyrównawczych. Stacje elektroenergetyczne umiejscowione najczęściej na otwartych terenach są szczególnie narażone na skutki GPR. Problem potęguje dodatkowo wzajemne połączenie systemów uziomowych sąsiednich stacji poprzez przewody odgromowe – dodatkowo wzrost różnicy potencjałów.

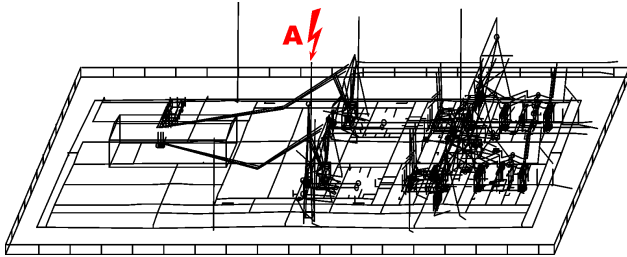


Rys. 1. Wzrost lokalnego potencjału uziomu (GPR) [1].

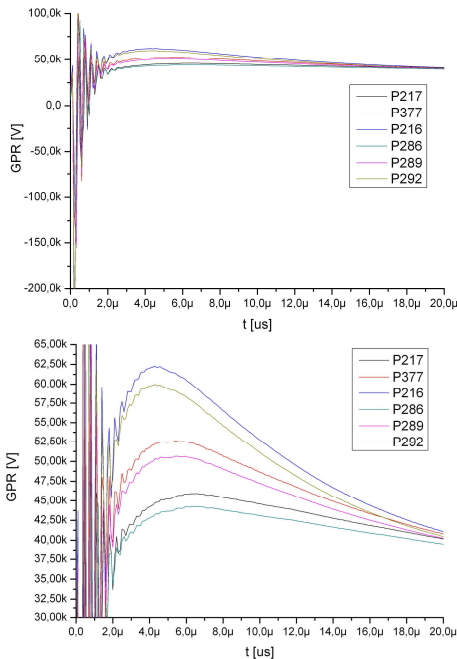
Program CDEGS [3] umożliwia wyznaczenie wzrostu potencjału systemu uziomowego. W analizie rozkładu GPR najważniejszą sprawą jest dokładne odwzorowanie samego systemu uziomowego stacji, który głównej mierze wpływa na wartości napięć na jej terenie. Wyłączniki, transformatory, przekładniki będące na wyposażeniu stacji nie mają bezpośredniego wpływu na wartość GPR podczas przepływu prądu piorunowego w systemie uziomowym. System uziomowy typowej stacji elektroenergetycznej 110/15kV przedstawiono na rys.2.



Rys.2. System uziomowy typowej stacji 110/15kV na podstawie oryginalnej dokumentacji [2].



Rys. 3 Model przestrzenny stacji stosowany w programie CDEGS.



Rys.4. Wzrost lokalnego potencjału uziomu stacji względem ziemi odniesienia – wyniki obliczeń z CDEGS.

W celu uproszczenia obliczeń założono, iż stacja elektroenergetyczna jest odłączona z systemu elektroenergetycznego. W modelu komputerowym wykorzystano trójwymiarowy system odwzorowywania konstrukcji przestrzennej stacji elektroenergetycznej. Każdy z metalowych elementów stacji został odwzorowany jako przewodnik o odpowiednich parametrach zależnych od materiału z jakiego został wykonany, zaś każdy element izolacyjny jako przerwa w obwodzie. W sumie model składa się z 1932 elementów. Każdemu zdefiniowanemu metalowemu elementowi w wyniku matematycznego modelowania przypisano jedną niewiadomą. Każda niewiadoma odpowiada za wartość prądu płynącego w przyporządkowanym mu przewodniku. Przy opisie matematycznym pominięto ewentualne różnice pomiędzy stanem faktycznym a projektem – rys. 3.

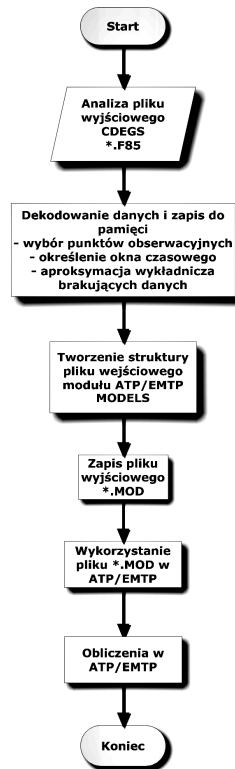
Szczegółowe obliczenia GPR wykonano przyjmując następujące założenia:

- jednowarstwowy model struktury gruntu o rezystywności  $100 \Omega \cdot m$ ,
- prąd wymuszający wprowadzony został w punkcie A, w którym znajduje się zwód pionowy,
- prąd wymuszający, odpowiadający prądowi piorunowemu wyładowania doziemnego na terenie stacji o wartości szczytowej  $100 \text{ kA}$  i kształcie  $10/350 \mu s$ , opisano równaniem wyładowanie (patrz rys. 2).

$$(1) \quad i(t) = \frac{I}{\eta} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$$

gdzie:  $t$  - czas,  $\alpha = 2049,38 \text{ s}^{-1}$ ,  $\beta = 563\,768,3 \text{ s}^{-1}$ ,  $I = 100 \text{ kA}$ ,  $\eta = 0,976$

Obliczenia przeprowadzono dla 6 punktów łączących poszczególne przekładniki napięciowe i prądowe z systemem uziomowym. Wyznaczony w ten sposób wzrost potencjału (rys.4) w dalszej części rozważań zaimplementowano do programu ATP/EMTP przy pomocy opracowanego algorytmu – rys. 5.



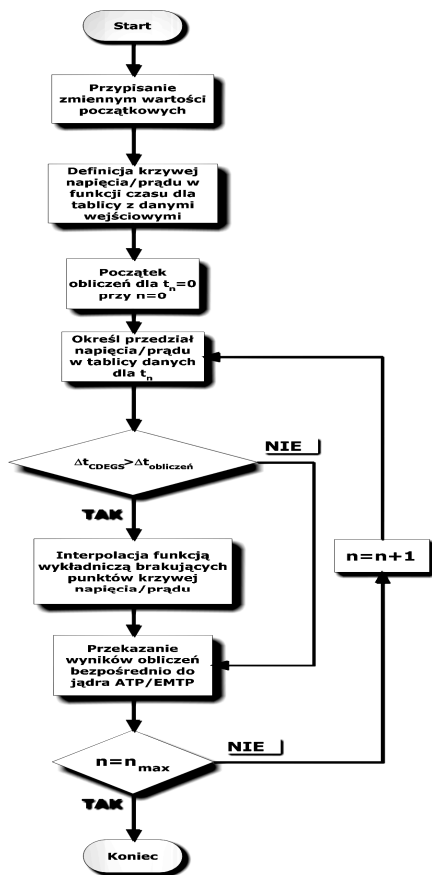
Rys. 5. Algorytm programu sprzęgającego CDEGS i ATP/EMTP

### Algorytm konwersji danych

Kolejne etapy procedury postępowania zamieszczone są na rys. 5. Kluczowym punktem jest proces dekodowania danych i określenia okna czasowego przebiegu. Oprogramowanie służące do konwersji wykorzystuje zdekodowane dane i implementuje je do modelu wcześniej przygotowanego, który umożliwi wykorzystanie wyników z CDEGS w ATP/EMTP. Szczegółowy algorytm działania wspomnianego modułu przedstawia rys. 6. Najważniejszym punktem i kluczowym ze względu na wyniki obliczeń w ATP/EMTP jest przekazanie danych bezpośrednio do jądra obliczeniowego TPBIG. Algorytm kontroluje krok obliczeń i dostosowuje każdorazowo dane wejściowe do parametrów symulacji. W przypadku, gdy krok jest mniejszy niż rozdzielczość importowanych danych algorytm automatycznie dokonuje aproksymacji funkcją wykładniczą brakujących punktów przebiegów. Rozdzielczość danych wejściowych musi być stosunkowo duża tak, aby uniknąć

błędów wynikających z aproksymacji krzywej. Wymaga to oczywiście przeprowadzenia obliczeń dla innego zakresu częstotliwości w module HIFREQ. Pod tym względem oba procesy obliczeniowe powinny być między sobą skorelowane. Właściwym wydaje się stosowanie tego samego okna czasowego w obu programach w celu uniknięcia zbędnych przybliżeń i błędów konwersji.

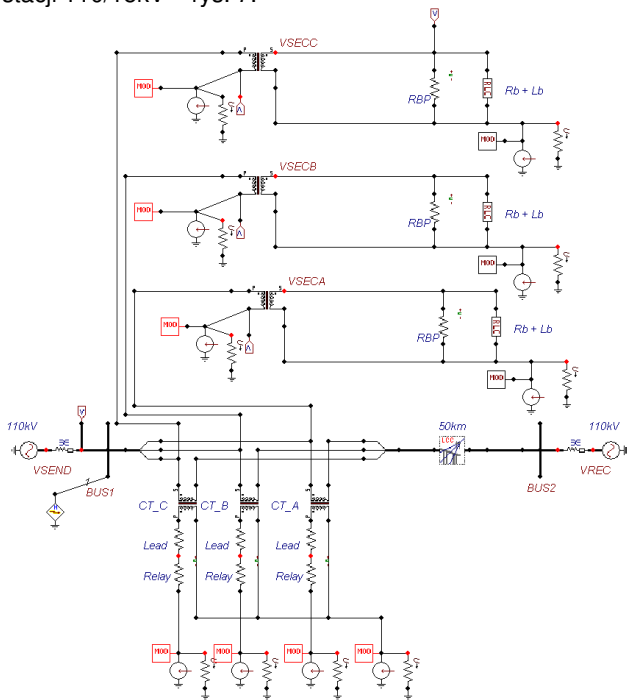
Zaproponowany algorytm jest w fazie rozwoju i prowadzone są dalsze prace mające na celu usprawnienie i przyspieszenie procesu konwersji. Docelowo stworzone zostanie odpowiednie oprogramowanie wykorzystujące bezpośrednio jądro TPBIG do tworzenia konkretnych bibliotek bezpośrednio z poziomu CDEGS.



Rys. 6. Algorytm modułu wykorzystanego w ATP/EMTP Models.

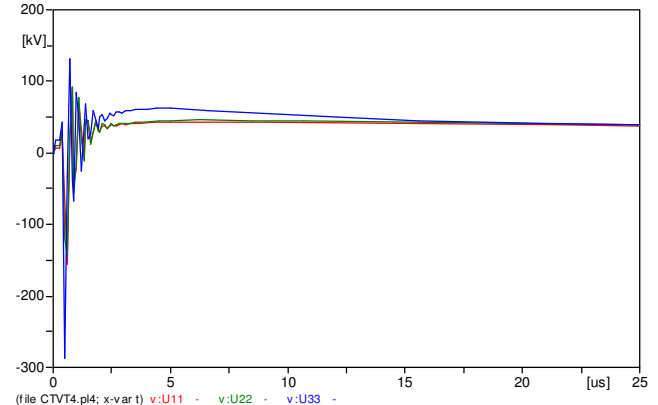
### Przykład wykorzystania algorytmu

Powyższe rozważania mają na celu określenie poziomu zagrożenia systemów sterowania i nadzoru stacji elektroenergetycznej. Działanie zaproponowanego algorytmu sprawdzono dla aparatury kontrolno-pomiarowej stacji 110/15kV – rys. 7.



Rys. 7. Analizowana stacja w ATP/EMTP z zastosowaniem opracowanego modelu.

Założono, iż dwie stacje połączone są między sobą linią napowietrzną o długości 50km – model linii typu Bergeron. Rezystywność gruntu, na którym prowadzono linię przyjęto na poziomie 100 Ω·m. Linię przesyłową prowadzono z wykorzystaniem słupów kratowych z serii B2. Pomięto zwis przewodów. Przekładniki napięciowe i prądowe odzworowano za pomocą modeli uwzględniających krzywe magnesowania (TRAFO\_S - saturable transformer. Single phase). Uwzględniono również zastępczą impedancję wejściową zabezpieczeń na poziomie 100 kΩ dla wejść napięciowych i 4 Ω dla wejść prądowych. Stworzony model stanowi dodatkowy element - na schemacie oznaczony jako MOD. Wyniki obliczeń w ATP/EMTP przedstawia rys.8.



Rys.8. Wzrost lokalnego potencjału uziomu stacji względem ziemi odniesienia przekładników napięciowych strony 110kV w ATP/EMTP.

### Wnioski

Wylądowanie atmosferyczne jako źródło zakłóceń w systemie wymaga przeprowadzenia obliczeń w przedziale czasowym od nanosekund do mikrosekund. Przy tak szybkozmiennych przebiegach urządzenia sterowania i nadzoru pracujące na stacjach wysokiego napięcia nie zdążą zareagować na dynamiczne zmiany stanu układu. W takich przypadkach wpływ pojemności i indukcyjności składowych systemu i ich wzajemna relacja ma kluczowy wpływ na odpowiedź układu. Wymaga to przestrzennego modelowania kluczowych elementów systemu, jakimi są stacje elektroenergetyczne wysokiego napięcia. Jedynie taka analiza w połączeniu klasycznymi metodami analizy stanów nieustalonych może dać w zadawalające rezultaty. Mając na uwadze stopień złożoności obecnego systemu elektroenergetycznego stosowanie komputerowych metod obliczeń jest uzasadnione.

Zaprezentowano metodę analizy zagrożenia piorunowego stopni wejściowych zabezpieczeń stacji elektroenergetycznej WN. Zastosowanie powyższej metody umożliwi również implementację wyników rzeczywistych pomiarów do poziomu ATP/EMTP, co może się okazać bardzo pomocne przy łączeniu praktyki i teorii.

### LITERATURA

- [1] PN-E-05115:2002, *Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym niż 1kV.*
- [2] Energoprojekt Kraków S.A., *Projekt typowej stacji 110/15kV typu KSU-3.*
- [3] Ses Software Canada, [www.sestech.com](http://www.sestech.com)
- [4] ElectroMagnetic Transients Program (EMTP) Rule Book
- [5] User Guide to Models in ATP <http://www.eeug.org>

Autor: mgr inż. Jarosław Wiater, Politechnika Białostocka, Katedra Telekomunikacji i Aparatury Elektronicznej, ul. Wiejska 45d, 15-351 Białystok, E-mail: [jaroslawwiater@we.pb.bialystok.pl](mailto:jaroslawwiater@we.pb.bialystok.pl)