

MODELOWANIE KONSTRUKCJI WSPORCZYCH LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH WYSOKICH NAPIĘĆ DLA ANALIZA PRZEPIĘĆ ATMOSFERYCZNYCH

Mariusz BENESZ, Rafał TARKO

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
tel: (12) 617 36 53 fax: (12) 634 57 21
e-mail: mariusz.benesz@agh.edu.pl; rafal.tarko@agh.edu.pl

Streszczenie: Artykuł dotyczy analizy wpływu zastosowanego modelu konstrukcji wsporczej na poziom przepięć atmosferycznych w układach izolacyjnych napowietrznych linii elektroenergetycznych o napięciu 110 kV i wyższym. Symulacje obejmują trzy rodzaje modeli konstrukcji wsporczych, które opracowano dla konstrukcji typu: B2P (110 kV, linia jednotorowa), H52P (220 kV, linia jednotorowa) i Z52P (400 kV, linia dwutorowa). Podczas analizy założono, że uderzenie pioruna następuje w konstrukcję wsporcą powodując przeskok odwrotny. Symulacje przeprowadzone zostały przy pomocy programu *The Electromagnetic Transients Program - Alternative Transients Program (EMTP-ATP)*.

Słowa kluczowe: model konstrukcji wsporczej, przeskok odwrotny, *EMTP – ATP*.

1. WPROWADZENIE

W układach elektroenergetycznych elementami najbardziej narażonymi na wyładowania atmosferyczne, ze względu na swoją rozległość, są linie napowietrzne. Analizując ten typ narażeń linii elektroenergetycznych rozważa się dwa zagadnienia:

- uderzenie bezpośrednie pioruna w przewód fazowy,
- oraz uderzenia pioruna w przewód odgromowy lub konstrukcję wsporcą linii i możliwość wystąpienia przeskoku odwrotnego.

W pierwszym przypadku, opierając się jedynie na geometrii zawieszenia przewodów na analizowanej konstrukcji wsporczej oraz stosując teorię elektrogeometryczną można określić maksymalną wartość szczytową prądu pioruna, który może uderzyć w przewód fazowy. W drugim przypadku, określenie minimalnego prądu powodującego przeskok odwrotny jest problemem znacznie bardziej złożonym i uzależnione jest to od właściwego przedstawienia m.in. wytrzymałości udarowej łańcucha izolatorów oraz konstrukcji wsporczej.

W artykule zaprezentowano wnioski z analizy wpływu poszczególnych elementów konstrukcji wsporczej na poziom przepięć atmosferycznych spowodowanych wystąpieniem przeskoku odwrotnego w układach izolacyjnych linii wysokiego napięcia. Analizę oparto o trzy modele konstrukcji wsporczej, biorąc pod uwagę różne szczegóły budowy analizowanej konstrukcji.

1.1. Model 1

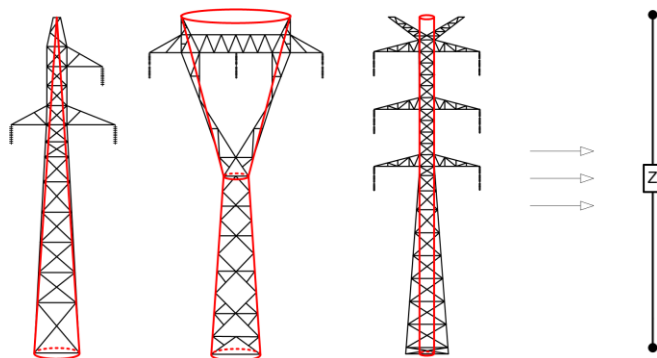
Jest to najprostszy model konstrukcji wsporczej, do stworzenia, którego należy podać: wysokość konstrukcji, prędkość propagacji fali i impedancję falową konstrukcji wyznaczoną w oparciu o sylwetki konstrukcji (rys. 1) [1]:

$$Z_{st} = 60 \ln \left(\sqrt{\frac{2(H^2 + r^2)}{r^2}} \right) \quad (1)$$

$$\begin{cases} Z_{2st} = 60 \ln \left(\operatorname{ctg} \left(\frac{\operatorname{arctg} \Psi}{2} \right) \right) \\ \Psi = \frac{r_1 h_2 + r_2 H + r_3 h_1}{H^2} \end{cases} \quad (2)$$

$$Z_{wl} = 60 \ln \left(\frac{2\sqrt{2}H}{r} \right) \quad (3)$$

gdzie: Z_{st} , Z_{2st} , Z_{wl} – impedancja falowa konstrukcji o sylwetce odpowiednio stożka, dwóch stożków i walca [Ω], H , h_1 , h_2 – wysokość odpowiednio całej konstrukcji, górnego stożka i dolnego stożka [m], r – promień podstawy sylwetki [m], r_1 , r_2 , r_3 – promienie podstaw górnego i dolnego stożka [m].



Rys. 1. Graficzne interpretacja typów sylwetek konstrukcji wsporczych proponowanych w modelu 1: a) sylwetka stożka; b) sylwetka dwóch stożków; c) sylwetka walca.

1.2. Model 2

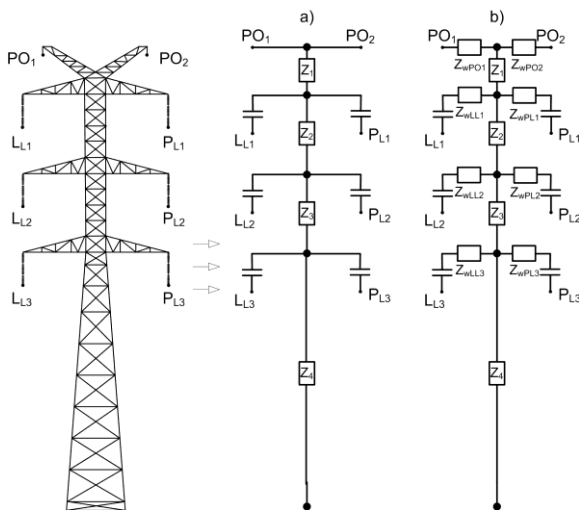
Model konstrukcji wsporczej do stworzenia, którego należy podać: wysokość segmentów tworzących trzon konstrukcji, prędkość propagacji fali i impedancję falowe segmentów (rys. 2a), wyznaczone w oparciu o zależność [2]:

$$Z_i = 60 \ln \left(\frac{2\sqrt{2}h_i}{r_z} \right) \quad (4)$$

gdzie: h_i – wysokość danego segmentu tworzącego trzon konstrukcji wsporczej [m], r_z – zastępczy promień segmentu wyznaczony na podstawie zależności [2]:

$$r_z = 2^{\frac{1}{8}} \sqrt[4]{r_g^{\frac{1}{3}} r_d^{\frac{2}{3}} \sqrt{\left(D_g^{\frac{1}{3}} D_d^{\frac{2}{3}}\right)^3}} \quad (5)$$

gdzie: r_g , r_d – promienie zastępcze kątowników tworzących dany segment odpowiednio na jego dole i górze [m], D_d , D_g – odległość między kątownikami tworzącymi dany segment odpowiednio na jego dole i górze [m].



Rys. 2. Graficzna interpretacja elementów konstrukcji wsporczej branej pod uwagę w: a) modelu 2; b) modelu 3.

1.3. Model 3

Model konstrukcji wsporczej, który oprócz poszczególnych segmentów, tworzących trzon konstrukcji, bierze pod uwagę wysięgniki konstrukcji. Aby stworzyć model należy dodatkowo podać: wysokość i długość wysięgników, prędkość propagacji fali i impedancję falowe wysięgników (rys. 2b), wyznaczone w oparciu o zależność [2]:

$$Z_i = 60 \ln \left(\frac{2h_{iw}}{r_{zw}} \right) \quad (6)$$

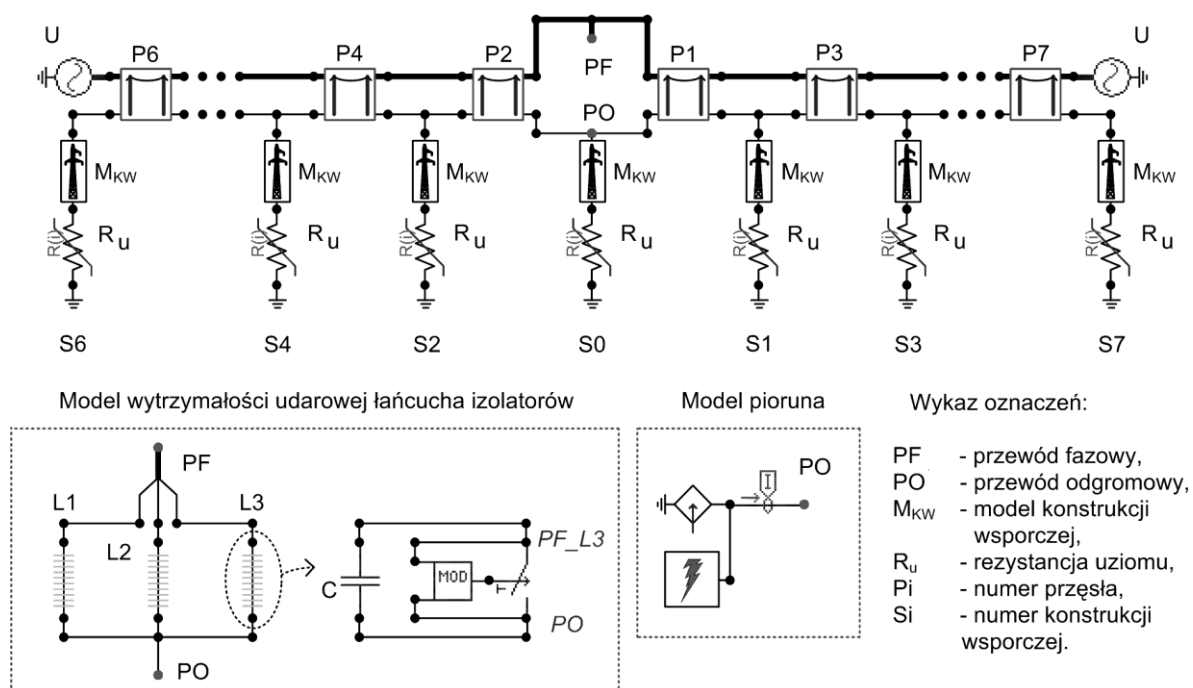
gdzie: h_{iw} – wysokość zawieszenia danego wysięgnika [m], r_{zw} – zastępczy promień wysięgnika wyznaczony na podstawie zależności (5) [m].

2. MODEL ANALIZOWANEGO UKŁADU

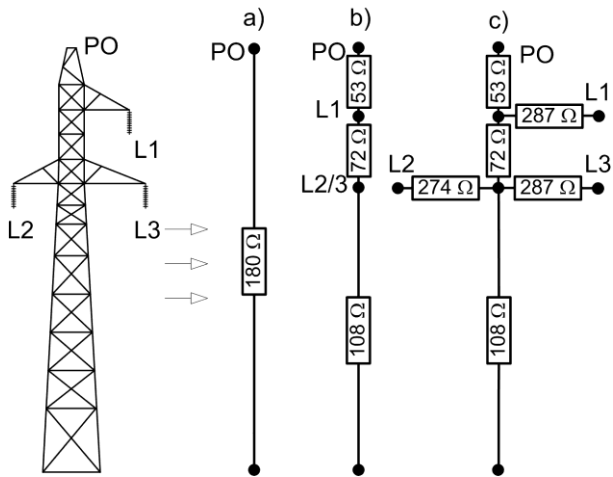
Dla analizy wpływu modelu konstrukcji wsporczej na poziom przepięć atmosferycznych opracowano, przy użyciu programu *EMTP-ATP*, model układu, w którym wyróżnić można następujące elementy składowe:

- model przęsła linii napowietrznej uwzględniający efekty falowe powstające przy wyładowaniu atmosferycznym (*model Semlyena*) [3],
- model konstrukcji wsporczej – jeden z trzech modeli opracowanych przez odpowiednie połączenie impedancji falowych,
- model nieliniowej rezystancji uziomu,
- model wytrzymałości udarowej łańcucha izolatorów, który oparto na metodzie rozwoju lidera *LDM* [4],
- model pioruna, który odwzorowano za pomocą udarowego źródła prądowego o zmiennej wartości maksymalnej i kształcie z wklęsłym czołem.

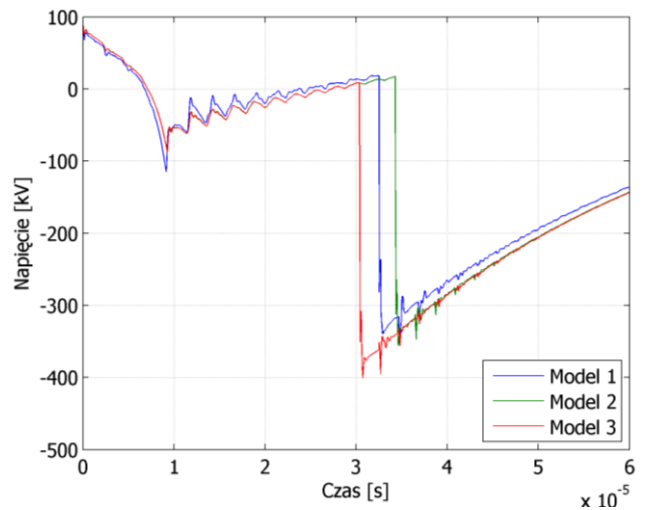
Model analizowanego układu opracowany w preprocesorze graficznym *ATPDraw* przedstawiono na rysunku 3.



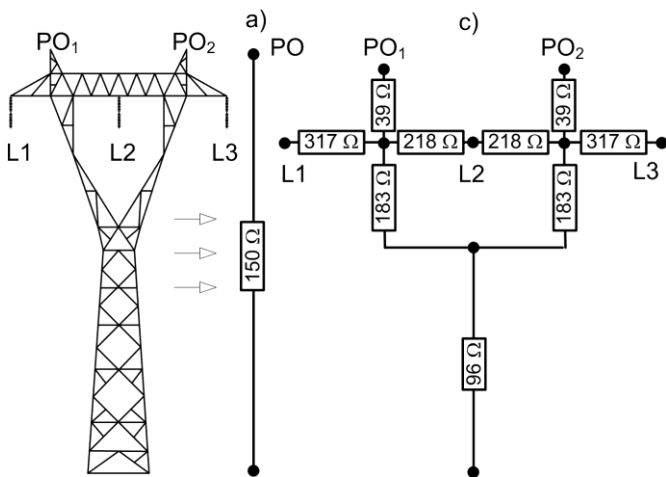
Rys. 3 Model analizowanego układu w programie *EMTP-ATP*.



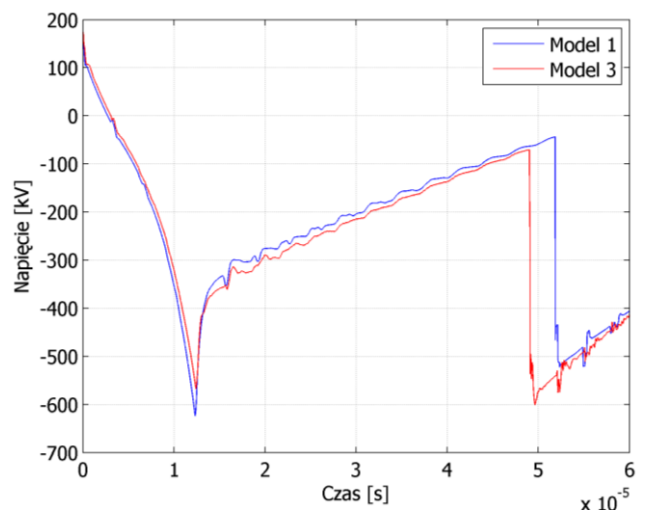
Rys. 4. Model konstrukcji wsporczy typu B2P: a) model 1; b) model 2; c) model 3.



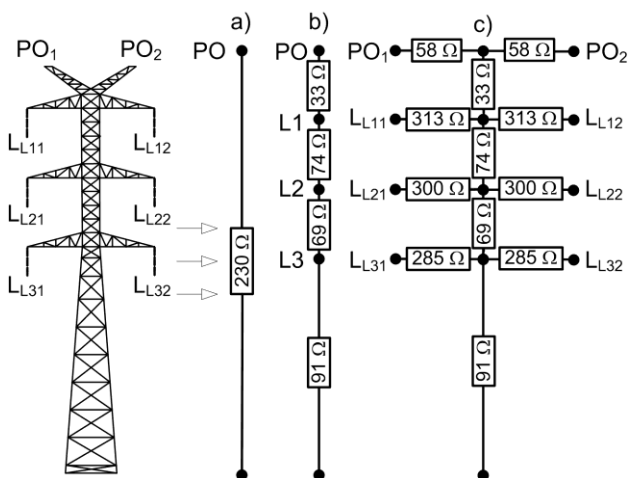
Rys. 7. Przebiegi napięć fazy L3 (konstrukcja typu B2P) po wystąpieniu przeskoku odwrotnego.



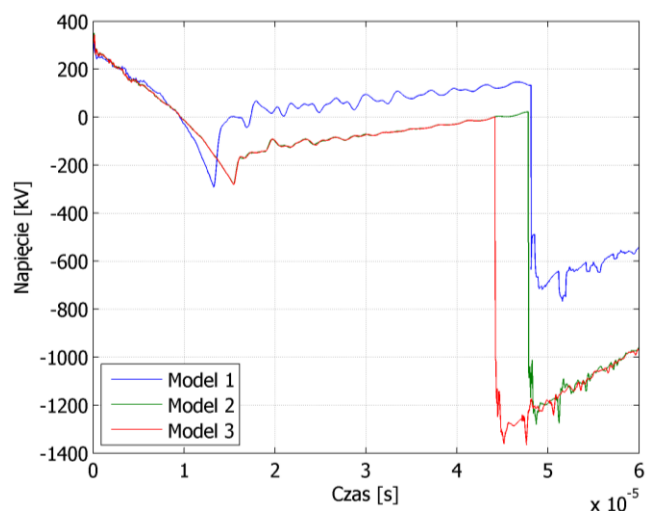
Rys. 5. Model konstrukcji wsporczy typu H52P: a) model 1; c) model 3.



Rys. 8. Przebiegi napięć fazy L1 (konstrukcja typu H52P) po wystąpieniu przeskoku odwrotnego.



Rys. 6. Model konstrukcji wsporczy typu Z52P: a) model 1; b) model 2; c) model 3.



Rys. 9. Przebiegi napięć fazy L31 (konstrukcja typu Z52P) po wystąpieniu przeskoku odwrotnego.

3. WYNIKI SYMULACJI

Celem symulacji jest ocena wpływu modeli konstrukcji wsporczej na poziom przepięć atmosferycznych w układach izolacyjnych wysokiego napięcia.

Obliczenia przeprowadzono przy następujących założeniach:

- uwzględnieniu napięcia fazowego $U_f = 89,81$ kV, $U_f = 179,63$ kV i $U_f = 326,60$ kV odpowiednio dla konstrukcji wsporczej typu B2P, H52P i Z52P,
- doborze fazy trójfazowych źródeł napięcia przemiennego, dołączonych do końcowych przęseł rozpatrywanego układu, w taki sposób, aby narażenie układu izolacyjnego było największe (wartość prądu powodującego wystąpienie przeskoku odwrotnego była najmniejsza),
- model wytrzymałości udarowej uwzględniano tylko na konstrukcji wsporczej, do której następowało wyładowanie atmosferyczne,
- na podstawie badań przeprowadzonych w [5] rozważono układ siedmiostupowy, uwzględniając znamionowe długości przęseł dla poszczególnych konstrukcji wsporczych,
- uwzględnieniu trzech modeli konstrukcji wsporczych,
- obliczenia przeprowadzono dla wartości rezystywności gruntu $\rho = 200$ Ω m i rezystancji uziemienia konstrukcji wsporczych $R_{Sz} = 10$ Ω (dla konstrukcji typu B2P) i 15 Ω (dla konstrukcji typu H52P i Z52P),
- symulacje dotyczyły bezpośredniego uderzenia pioruna w konstrukcję wsporczą (punkt PO na rysunku 3), w chwili $t = 0$ s.

Wybrane wyniki przeprowadzonych symulacji wpływu modelu konstrukcji wsporczej na poziom przepięć atmosferycznych przedstawiono na rysunkach 4 – 9, przy czym:

- rysunki 4 ÷ 6 przedstawiają opracowane modele analizowanych konstrukcji wsporczych,
- rysunki 7 i 9 przedstawiają przebiegi napięcia fazy, do której wystąpił przeskok odwrotny w zależności od zastosowanego modelu.

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonej analizy wpływu modelu konstrukcji wsporczej na poziom przepięć atmosferycznych w układach izolacyjnych wysokiego napięcia można wysunąć następujące spostrzeżenia:

- różnice w przebiegach napięć w fazach najbardziej narażonych na wystąpienie przeskoku odwrotnego (widoczne w wartościach maksymalnych i czasach ich

występowania dla poszczególnych konstrukcji wsporczych) są związane z różnymi wielkościami minimalnego prądu pioruna powodującego przeskok odwrotny po zastosowaniu danego modelu,

- największe różnice w otrzymanych przebiegach otrzymano dla konstrukcji typu Z52P, gdzie po zastosowaniu modeli szczegółowych (model 2 lub model 3) poziom przepięć jest dwa razy większy niż w przypadku przepięć otrzymanych po zastosowaniu modelu 1,
- dla konstrukcji wsporczych typu B2P i H52P, niezależnie od zastosowanego modelu, otrzymano przebiegi przepięć nieznacznie różniące się od siebie,
- wyniki symulacji, w których zastosowano modele szczegółowe konstrukcji wsporczej (niezależnie od poziomu napięcia) są bardzo zbliżone do siebie, z różnicami wynikającymi z różnych wartości prądów pioruna powodującego przeskok odwrotny.

Podsumowując, dokonana analiza wpływu modelu konstrukcji wsporczej na poziom przepięć atmosferycznych wykazała, że dla konstrukcji wsporczych linii o napięciu znamionowym 110 kV i 220 kV nie ma konieczności stosowania szczegółowych modeli (modelu 2 i modelu 3). Taka konieczność pojawia się przy konstrukcjach wsporczych linii o napięciu znamionowym 400 kV, gdzie wpływ wysięgników i poszczególnych segmentów tworzących konstrukcję może być istotny.

5. BIBLIOGRAFIA

1. CIGRÉ Working Group 33-01 of Study Committee 33 Overvoltages and Insulation Coordination, Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines, CIGRÉ Publication No. 63, 1991.
2. Hara T., Yamamoto O.: Modelling of transmission tower for lightning surge analysis, IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. Vol. 143, No. 3, 1996 s. 283-289.
3. Alternative Transients Program. *Theory Book*. Canadian/American EMTP User Group, 1987-92.
4. Nowak W.: Identyfikacja narażeń przepięciowych układów elektroenergetycznych wysokich napięć przy wyładowaniach atmosferycznych, Kraków 2005, ISSN 0867-6631.
5. Tarko R., Benesz M., Nowak W.: Modelowanie i analiza przeskoku odwrotnego w układach izolacyjnych napowietrznych linii wysokiego napięcia, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej ISSN 1425-5766. – 2009 nr 26 s. 113–116.

MODELLING OF TOWER OF HIGH VOLTAGE LINE FOR ANALYSIS OF LIGHTNING SURGE

Key-words: model of tower, back flashover, EMTP – ATP.

In this article analysis of tower model influence on overvoltages in high voltage overhead lines are presented. Simulations involved three types of towers: B2P (110 kV, single system line), H52P (220 kV, single system line) and Z52P (400 kV, double system line). During the analysis considered back flashover phenomenon as an result of lightning strike to overhead line. All simulation cases are made in simulation software *The Electromagnetic Transients Program - Alternative Transients Program (EMTP-ATP)*.