

Daria ZŁOTECKA \*

## **WPLYW EKSTREMALNYCH ZJAWISK ATMOSFERYCZNYCH NA SYSTEM ELEKTROENERGETYCZNY**

Podstawowym zadaniem systemu elektroenergetycznego jest zapewnienie ciągłości i niezawodności dostaw energii elektrycznej. W warunkach realnego niebezpieczeństwa wystąpienia awarii systemowych, do których przyczyn należy zaliczyć czynniki atmosferyczne, techniczne oraz czynniki ludzkie, istnieje ryzyko związane z zagrożeniem bezpieczeństwa systemu elektroenergetycznego. Do najczęstszych przyczyn awarii systemowych należą ekstremalne warunki atmosferyczne, których wpływ na pracę systemu elektroenergetycznego zostanie przeanalizowany w niniejszej pracy. Dla trzech wariantów ekstremalnych warunków atmosferycznych, takich jak osad sadzi, silny wiatr i wysoka temperatura, przedstawiona zostanie zmiana wysokości zwisu na przykładzie przęsła linii 20 kV.

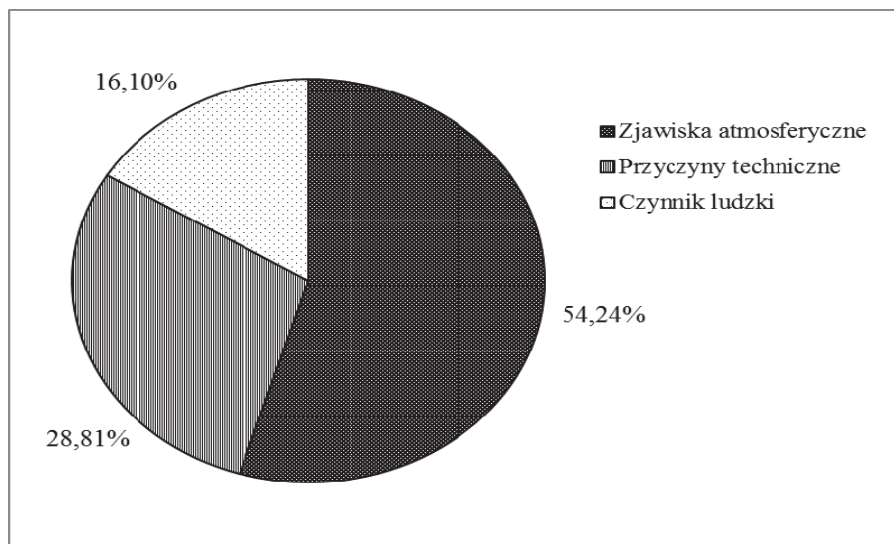
SŁOWA KLUCZOWE: bezpieczeństwo energetyczne, awarie systemu elektroenergetycznego, ekstremalne zjawiska atmosferyczne, zwis przewodów.

### **1. ZAGROŻENIA BEZPIECZEŃSTWA SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO**

Na potrzeby analizy przyczyn powstawania awarii w systemach elektroenergetycznych zebrano 118 największych awarii jakie dotknęły systemy elektroenergetyczne na całym świecie na przestrzeni lat 1965-2017 [7]. Podczas realizacji zadania badawczego, analizie poddano liczbę osób dotkniętych awarią systemową, czas trwania awarii, utratę zdolności wytwórczych na skutek awarii i ostatecznie bezpośrednie przyczyny awarii, które uogólniono do zjawisk atmosferycznych, przyczyn technicznych oraz czynników ludzkich. Wyniki analizy przedstawiono na rysunku 1.

---

\* Politechnika Poznańska



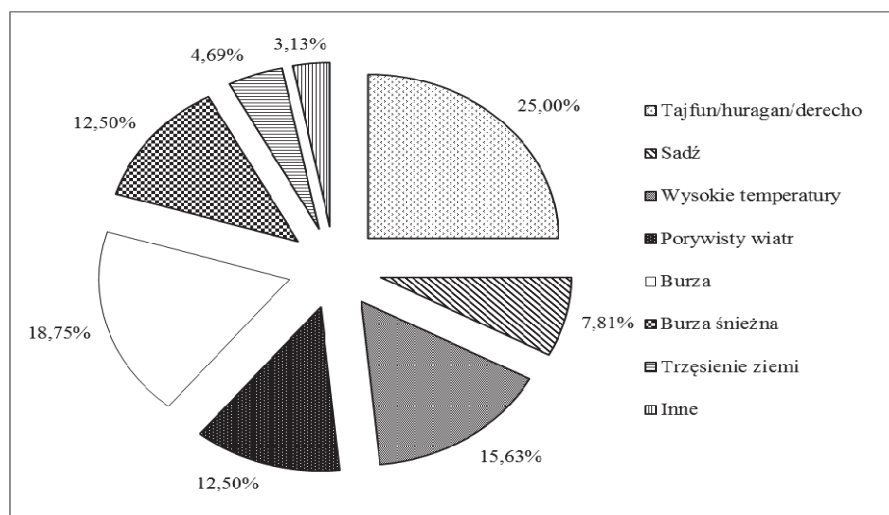
Rys. 1. Przyczyny awarii w systemach elektroenergetycznych

Z wykresu na rysunku 1 wśród przyczyn awarii można zauważyć znaczny udział czynników technicznych, do których należy zaliczyć m. in.: awarie urządzeń, deficyt mocy, ograniczenie wymiany transgranicznej, zawodność systemów informatycznych i komunikacyjnych [5]. Udział czynników ludzkich na poziomie ok. 16% w powstawaniu awarii systemowych dotyczy najczęściej błędów lub zaniechań operatorów, zaniedbań eksploatacyjnych, a w skrajnym przypadku, aktów terroryzmu i wandalizmu [5]

Z przedstawionego wykresu można zauważyć, że zdecydowanie najczęstszą przyczyną awarii systemowych (ponad 54%) są czynniki atmosferyczne, które postępując kaskadowo, prowadzą do lawinowego rozwoju awarii systemowych. Do pogodowych czynników powstawania awarii zalicza się:

- ekstremalne temperatury powietrza - zarówno niskie, jak i wysokie,
- burze śnieżne,
- wyładowania atmosferyczne,
- porywisty wiatr,
- katastrofy naturalne – huragany, tajfuny, trzęsienia ziemi.

Udział poszczególnych zjawisk atmosferycznych wśród pogodowych czynników powstawania awarii zestawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Atmosferyczne przyczyny awarii w systemach elektroenergetycznych

Statystyczne przedstawienie atmosferycznych przyczyn występowania awarii w systemach elektroenergetycznych wskazuje na znaczący udział katastrof naturalnych (huragany, trzęsienia ziemi) w bezpośrednich przyczynach dużych awarii systemowych, stanowiąc łącznie prawie 30% atmosferycznych przyczyn występowania awarii. Z wykresu można zauważyć znaczny udział burz, które są przyczyną powstawania obszarów o dużej wietrzności oraz wyładowań atmosferycznych. Ekstremalnie wysokie temperatury stanowiły ponad 15% przyczyn awarii ze względu na liczne zagrożenia, z jakimi są związane. Spore zagrożenie stanowią również silne podmuchy porywistego wiatru, których udział w atmosferycznych przyczynach powstawania awarii wynosi 12,5%. Wśród grupy przyczyn określonych na rysunku 2 jako inne znalazły się takie zjawiska jak: burza geomagnetyczna, zwarcie linii wysokiego napięcia wskutek przelotu klucza ptaków i uszkodzenie stacji i linii WN w wyniku osunięcia osuwiska skalnego.

Najpowszechniejsze zagrożenia wynikające z warunków atmosferycznych oraz ich konsekwencje dla systemu elektroenergetycznego, zostaną omówione w rozdziale 2, natomiast w rozdziale 3 przedstawiony zostanie model pręśla linii napowietrznej, w którym zbadany zostanie wpływ zależności wielkości zwisu od osadu sadzi, silnego podmuchu wiatru oraz wzrostu temperatury zewnętrznej.

## **2. WPŁYW POSZCZEGÓLNYCH ZJAWISK ATMOSFERYCZNYCH NA SYSTEM ELEKTROENERGETYCZNY**

### **2.1. Ekstremalne temperatury powietrza**

Z punktu widzenia bezpieczeństwa energetycznego, zagrożenie dla systemu elektroenergetycznego stanowią zarówno ekstremalnie wysokie, jak i ekstremalnie niskie temperatury powietrza.

Wysokie temperatury zewnętrzne wpływają przede wszystkim na wydłużenia termiczne przewodów linii napowietrznych, prowadząc do zwiększania zwisów przewodów. Stanowi to poważne ryzyko zmniejszenia przerwy izolacyjnej między linią a obiektami znajdującymi się bezpośrednio pod pracującą linią z możliwością przeskoku napięcia. Zaniedbania eksploatacyjne w obszarze pasa zieleni pod linią w wyniku zwiększenia zwisów przewodów mogą prowadzić do wystąpienia zwarcia do drzew.

Wzrost temperatury zewnętrznej koresponduje również z maksymalną temperaturą pracy przewodów. Nadmierny wzrost temperatury powietrza, skutkujący zwiększeniem temperatury pracy przewodów prowadzi zatem do pogorszenia się warunków eksploatacyjnych linii napowietrznych wskutek wzrostu rezystancji, a tym samym ograniczenia ich przepustowości, szczególnie w okresach bezwietrznych. Problem utrudnienia wymiany ciepła dotyczy również infrastruktury sieciowej, m. in. układów chłodzenia transformatorów [1].

Z perspektywy pracy systemu elektroenergetycznego, opartego na konwencjonalnych elektrowniach cieplnych, pracujących w trybie kondensacyjnym, temperatura zewnętrzna odgrywa kluczową rolę dla pracy skraplaczy. Zapewnienie jak najniższej temperatury wody chłodzącej sprzyja obniżeniu ciśnienia w skraplaczu, a tym samym - poprawie sprawności elektrowni. Zmniejszenie ciśnienia kondensacji i spadek poziomu wód wykorzystywanych na potrzeby chłodzenia jest przyczyną konieczności ograniczenia mocy elektrowni, co skutkuje znaczą utratą sumarycznej rezerwy mocy w systemie. W okresach upałów zauważalny jest wpływ zwiększonego zapotrzebowania na moc ze względu na dodatkowe obciążenie spowodowane pracą urządzeń klimatyzacyjnych. W skrajnej sytuacji utraty większości rezerw mocy i poziomu zapotrzebowania na moc przekraczającego zdolności wytwórcze Operator Systemu Przesyłowego wprowadza stopnie zasilania, polegające na ograniczaniu dostaw i poboru energii elektrycznej w celu zapewnienia bezpieczeństwa pracy systemu elektroenergetycznego. Wprowadzenie stopni zasilania dotknęło Krajowy System Elektroenergetyczny w sierpniu 2015 roku, kiedy najwięksi odbiorcy przemysłowi musieli ograniczyć pobór energii elektrycznej oraz nastąpiło wymuszenie pracy bloków energetycznych utrzymywanych w rezerwie.

W warunkach wysokiej temperatury i niskiej wilgotności powietrza przy jednoczesnym występowaniu silnego wiatru wzrasta ryzyko wystąpienia niekontrolowanych pożarów lasów. Wysokonapięciowa infrastruktura sieciowa może być narażona zarówno na zajęcie ogniem w wyniku poszerzania zasięgu pożaru, powodując lawinę wyłączeń, jak i stanowić dodatkowe źródło zapłonu [3].

Ekstremalnie niskie temperatury powietrza stanowią równie niebezpieczne źródło zagrożenia dla systemu elektroenergetycznego, ponieważ prowadzą do akumulacji osadów lodowych na liniach napowietrznych i naprężeń mechanicznych. Gromadzenie osadów śnieżnych czy lodowych w szczególności związane jest z występowaniem burz śnieżnych, które były bezpośrednią przyczyną awarii w systemach elektroenergetycznych Chin, USA czy Kanady [6].

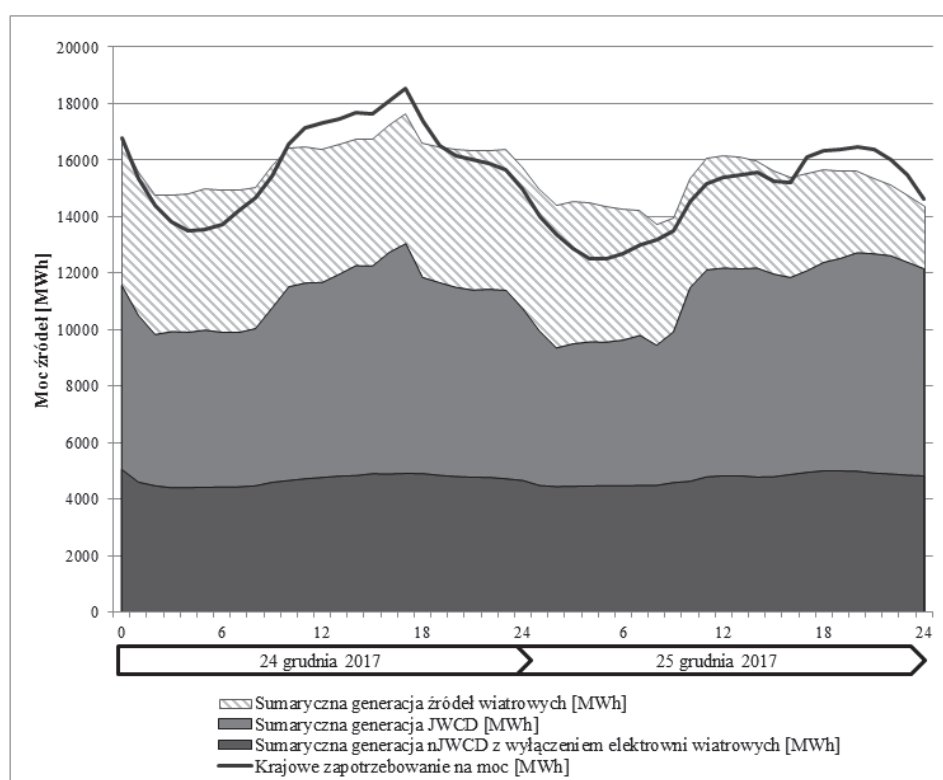
## 2.2. Wiatr

Warunki ekstremalnej wietrzności wpływają na system elektroenergetyczny w dwojaki sposób.

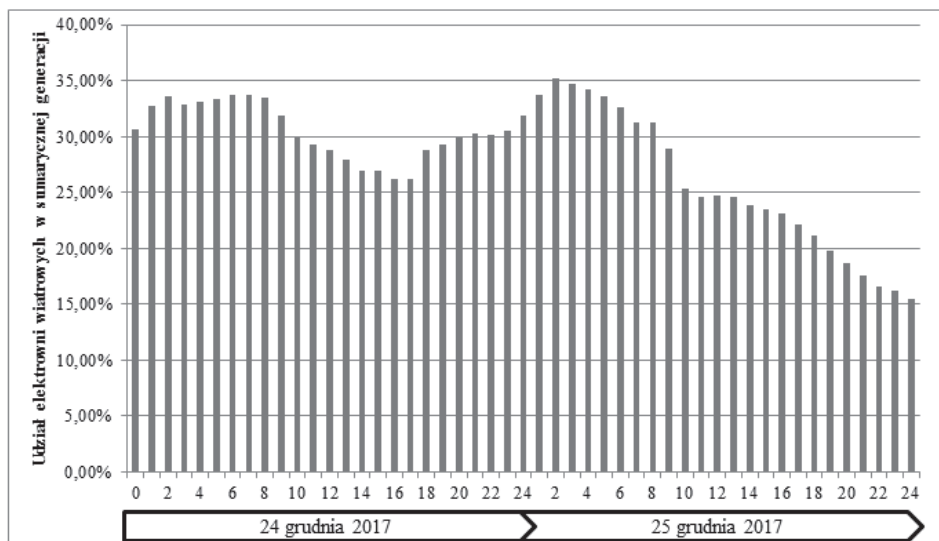
W warunkach kiedy prędkość wiatru przekracza 20 m/s, zaczyna być zauważalna zależność liniowego wzrostu prawdopodobieństwa uszkodzenia linii elektroenergetycznej od prędkości wiatru do wartości około 40 m/s. Zwiększenie prawdopodobieństwa zawalenia się słupów elektroenergetycznych następuje po przekroczeniu prędkości wiatru około 40 m/s. Po przekroczeniu prędkości wiatru powyżej 100 m/s prawdopodobieństwo awarii linii napowietrznych jest w zasadzie stuprocentowe, powodując jej uszkodzenia mechaniczne, prowadząc do lawinowego zawalenia się znacznych fragmentów sieci elektroenergetycznej [4].

Z drugiej strony, w warunkach wzmożonej wietrzności, kiedy naprężenia mechaniczne nie wpływają w drastyczny sposób na bezpieczeństwo pracy linii napowietrznych, istotny dla pracy systemu elektroenergetycznego zaczyna być wpływ zwiększonej generacji z elektrowni wiatrowych. Elektrownie wiatrowe, jako źródła odnawialne mają pierwszeństwo dostępu do sieci, ograniczając udział źródeł konwencjonalnych w strukturze wytwarzania. Niesie to za sobą zagrożenie dla bezpiecznej eksploatacji źródeł konwencjonalnych ze względu na konieczność odstawienia bloków z ewentualnością ponownego rozruchu, który jest procesem długotrwałym. Przykładem takich warunków pracy systemu elektroenergetycznego może być sytuacja w Polsce z okresu 24-26.12.2017 r. kiedy z powodu dużej wietrzności, generacja z Jednostek Wytwórczych Centralnie Dysponowanych (JWCD) musiała zostać ograniczona z powodu znacznego udziału źródeł wiatrowych w strukturze wytwarzania. Na podstawie raportów publikowanych przez Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. [9] sporządzony został wykres struktury źródeł wytwórczych dysponowanych centralnie JWCD, niedysponowanych centralnie nJWCD oraz źródeł wiatrowych w okresie 24-25

grudnia 2017 r., przedstawiony na rysunku 3. Z wykresu można zauważyć, że w nocnej dolinie obciążeniowej zarówno 24.12.2017 r., jak i 25.12.2017 r. w wyniku zwiększonej generacji z elektrowni wiatrowych suma generowanej mocy przekraczała zapotrzebowanie, skąd nastąpiła konieczność ograniczenia generacji ze źródeł JWCD. W rozpatrywanych dolinach obciążeniowych udział elektrowni wiatrowych w całkowitej generacji energii elektrycznej sięgał nawet 35%, co przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 3. Struktura źródeł wytwórczych w okresie wzmożonej wietrzności



Rys. 4. Udział elektrowni wiatrowych w sumarycznej generacji w okresie wzmożonej wietrzności

### 2.3. Katastrofy naturalne

Ekstremalne warunki atmosferyczne związane z występowaniem katastrof naturalnych, stanowią znaczny udział przyczyn dużych awarii w systemach elektroenergetycznych. Zaliczają się do nich takie zjawiska jak:

- tajfuny,
- huragany,
- cyklony,
- derecho,
- powodzie,
- trzęsienia ziemi,

które niosą za sobą falę zniszczeń, a powstrzymanie ich występowania jest wykluczone. Możliwością poprawy bezpieczeństwa systemów energetycznych może być zapewnienie poprawnej koordynacji operatorów w trakcie awarii i przygotowanie szczegółowych planów odbudowy systemu, polegających m. in. na utrzymaniu zdolności wytwórczych jak największej liczby źródeł, na przykład poprzez przejście do pracy na potrzeby własne, w celu zapewnienia możliwości podania napięcia i mocy rozruchowej do odstawionych jednostek wytwórczych.

### 3. WPŁYW WARUNKÓW ATMOSFERYCZNYCH NA ZWIS PRZEWODÓW LINII NAPOWIETRZNEJ

W pracy przedstawiony zostanie model przęsła linii napowietrznej (rys. 5) narażonego na działanie ekstremalnych warunków atmosferycznych, takich jak silny wiatr, osad sadzi i działanie wysokiej temperatury, które powodują zwiększenie zwisu przewodu. Do analizy wykorzystano dane dla linii napowietrznej 20 kV z katalogu Energolinia EN-340 [10] i Eltrim [8]:

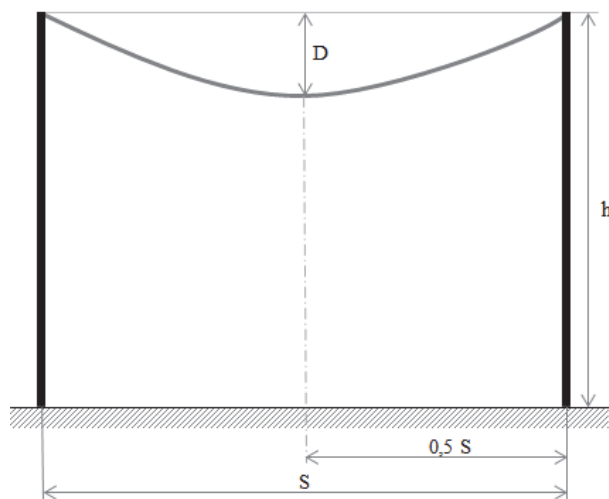
- przewody gołe AFL-6 70 mm<sup>2</sup>, układ płaski,
- masa jednostkowa przewodu  $w = 0,276$  kg/m,
- współczynnik rozszerzalności liniowej  $\alpha = 23 \times 10^{-6}$ ,
- naciąg podstawowy  $T = 8600$  N,
- słup przelotowy o izolacji stojącej,
- wysokość słupa  $h = 11,95$  m,
- rozpiętość przęsła  $S = 162$  m,
- strefa wiatrowa W1 – obciążenia wiatrem  $w_t = 0,488$  kg/m,
- strefa sadziowa S1 – obciążenie przewodu z sadzią  $w_s = 0,839$  kg/m.

Największy zwis maksymalny w warunkach sadzi ( $-5^{\circ}\text{C}$ ) lub w temperaturze  $+40^{\circ}\text{C}$  jest określony jako [10]:

$$D_{\max} = h - \left(5 + \frac{U}{150} + 0,5\right) \quad (1)$$

gdzie:  $h$  - wysokość zawieszenia przewodu [m],  $U$  - napięcie linii [kV].

Stąd, maksymalny zwis rozpatrywanego przewodu nie może przekroczyć w warunkach ekstremalnych  $D_{\max} = 6,31$  m.



Rys. 5. Przęsło linii napowietrznej;  $D$  – zwis,  $h$  – wysokość słupa,  $S$  – rozpiętość przęsła



Dla przyjętych parametrów w warunkach normalnych zwis przewodu można wyznaczyć z zależności [2]:

$$D_0 = \frac{w \cdot g \cdot S^2}{8 \cdot T} \quad (2)$$

gdzie:  $D$  - zwis [m],  $w$  - masa jednostkowa przewodu [kg/m],  $g$  - przyspieszenie ziemskie [m/s<sup>2</sup>],  $S$  - rozpiętość przęsła [m],  $T$  - naciąg [N].

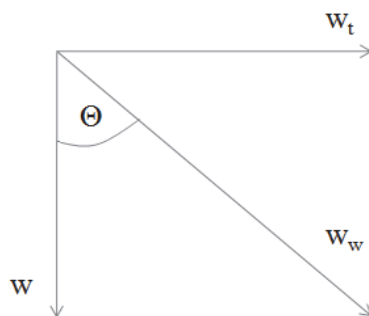
Długość przewodu w warunkach normalnych  $L_0$  jest równa [2]:

$$L_0 = S \left( 1 + \frac{8D^2}{3S} \right) \quad (3)$$

W warunkach obciążenia przewodu osadem sadzi, na przewód działać będzie dodatkowa siła pionowa wywołana zwiększeniem ciężaru przewodu. Stąd, zwis przewodu dla obciążenia sadią  $D_S$  będzie określony zależnością [2]:

$$D_S = \frac{w_S \cdot g \cdot S^2}{8 \cdot T} \quad (4)$$

Wypadkowa siła działająca na przewód podczas silnego wiatru  $w_w$  związana z występowaniem składowej poziomej  $w_t$ , jak przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Siły działające na przewód narażony na działanie silnego wiatru

Podczas działania wiatru zwis przewodu może być wyznaczony jako:

$$D_W = \frac{\sqrt{w^2 + w_t^2} \cdot g \cdot S^2}{8 \cdot T} \quad (5)$$

Składowa pionowa będzie równa:

$$D_{WV} = D_W \cdot \cos(\arctg \Theta) = D_W \cdot \cos(\arctg \frac{w_t}{w}) \quad (6)$$

W przypadku jednoczesnej akumulacji osadu sadzi na przewodzie i działania silnego wiatru, składowa pionowa uwzględniać będzie dodatkowo ciężar sadzi, zatem analogicznie do zależności (5) i (6) otrzymujemy:

$$D_{WS} = \frac{\sqrt{w_s^2 + w_t^2} \cdot g \cdot S^2}{8 \cdot T} \quad (7)$$

Składowa pionowa będzie równa:

$$D_{WSV} = D_{WS} \cdot \cos(\arctg \Theta) = D_W \cdot \cos(\arctg \frac{w_t}{w_s}) \quad (8)$$

Wpływ wysokiej temperatury powietrza na wielkość zwisu przewodu zauważalny będzie wskutek zjawiska rozszerzalności termicznej przewodu. Znając długość przewodu w warunkach normalnych  $L_0$ , obliczono długość przewodu  $L_T$  przy zmianie temperatury powietrza z 10°C na 40°C

$$L_T = L_0(1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad (9)$$

Wydłużenie termiczne przewodu wpłynie na zwiększenie zwisu:

$$D_T = \sqrt{\frac{3(L_T - S)}{8}} \quad (10)$$

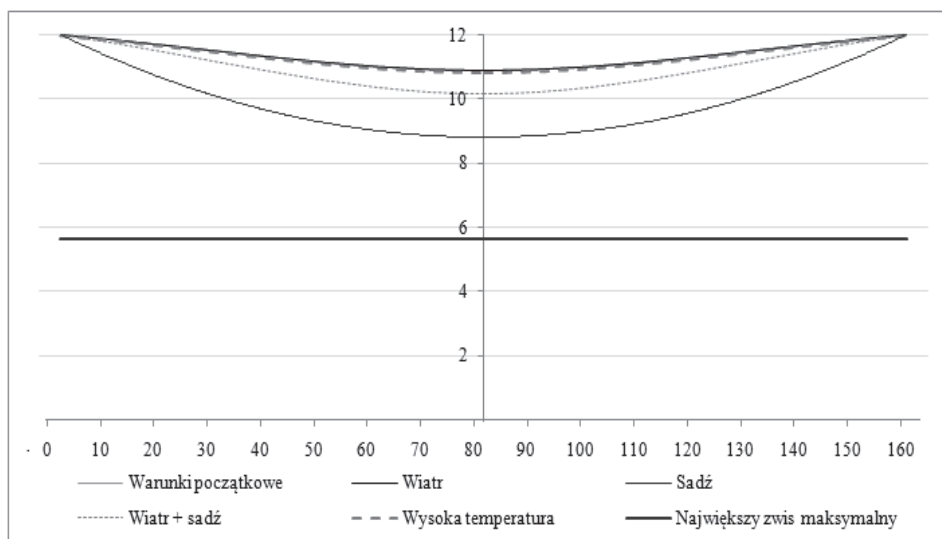
Po uwzględnieniu zależności (1)-(10), opracowany został algorytm obliczeniowy zmiennych wielkości zwisu związanych ze zmianą warunków atmosferycznych, którego wyniki symulacyjne zawarto w tabeli 1.

Dla obliczonych wartości zwisu, poprzez uproszczenie krzywej łańcuchowej do paraboli, wykreślone zostały przebiegi przedstawiające przeszło w każdym z przeanalizowanych warunków atmosferycznych. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 7.

Tabela 1. Wyniki obliczeń zwisów przewodów w zależności od zmiennych warunków pogodowych.

	Warunki początkowe	Osad sadzi	Silny wiatr	Silny wiatr i osad sadzi	Wysoka temperatura
Zwis	1,03 m	3,14 m	1,77 m 1,04 m*	3,63 m 1,79 m*	1,10 m
Długość przewodu	164,84 m	192,42 m	171,67 m	202,66 m	164,99 m

\* – składowa pionowa zwisu



Rys. 7. Wpływ warunków atmosferycznych na wielkość zwisu linii napowietrznej

Z przedstawionych wyników można zauważyć, że ekstremalne warunki atmosferyczne powodują znaczne zwiększenie zwisu przewodu, w skrajnym przypadku osadu sadzi zwiększył się trzykrotnie w porównaniu do warunków normalnych. Warunki wystąpienia wysokiej temperatury powietrza, wskutek zjawiska rozszerzalności cieplnej przewodu, przyczyniły się do całkowitego wydłużenia przewodu o 15 cm, co w rezultacie skutkowało zwiększeniem zwisu przewodu o 7 cm. W żadnym z analizowanych przypadków nie nastąpiło przekroczenie granicznej wartości maksymalnej zwisu przy zachowaniu 0,5 m rezerwy odległości od ziemi.

## 5. WNIOSKI

Awarie systemów elektroenergetycznych ze względu na ich liczne przyczyny, są zjawiskiem nieuniknionym. Ekstremalne zjawiska pogodowe nie są możliwe do zapobieżenia, dlatego stanowią poważne zagrożenie dla systemów elektroenergetycznych. W pracy przedstawiono, że takie zjawiska jak wysoka temperatura powietrza, silny wiatr czy gromadząca się sadź wpływają na znaczne zwiększenie prawdopodobieństwa wystąpienia awarii systemu elektroenergetycznego.

Zjawiska atmosferyczne często analizowane są w literaturze w oparciu o modele matematyczne, co stwarza przesłankę do dalszych prac w kierunku analizy awarii systemowych w kontekście prognozowania rozwoju awarii w zależności od postępujących w czasie zjawisk pogodowych.

## LITERATURA

- [1] Abi-Samra N. C., Forsten K. R., Entriaken R., Sample Effects of Extreme Weather on Power Systems and Components, Part I: Sample Effects on Distribution Systems, Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE.
- [2] Hudym V., Jagiełło A. St., Zasady projektowania i eksploatacja elektroenergetycznych linii napowietrznych, Kraków 2016.
- [3] Mitchell J. W., Power line failures and catastrophic wildfires under extreme weather conditions, Engineering Failure Analysis 35 (2013).
- [4] Panteli M., Mancarella P., Modeling and Evaluating the Resilience of Critical Electrical Power Infrastructure to Extreme Weather Events, IEEE System Journal, Vo. 11, No. 3, September 2017.
- [5] Radsak D., Sroka K., Obrona i odbudowa zdolności wytwórczych elektrowni i elektrociepłowni w warunkach awarii katastrofalnej sytemu elektroenergetycznego, Przegląd Naukowo-Metodyczny Rok X nr 1/2017 (34), Edukacja dla bezpieczeństwa, ISSN 1899-3524.
- [6] Yang L., Zhong J., Risk Assessment of Power Systems under Extreme Weather Conditions - A Review, PowerTech, 2017 IEEE Manchester.
- [7] [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_major\\_power\\_outages](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_major_power_outages) - dostęp 15.12.2017 r.
- [8] [www.eltrim.com.pl/wp-content/uploads/2017/03/eltrim\\_final-1.pdf](http://www.eltrim.com.pl/wp-content/uploads/2017/03/eltrim_final-1.pdf) - dostęp 15.01.2018 r.
- [9] [www.pse.pl/dane-systemowe/funkcjonowanie-kse/raporty-dobowe-z-pracy-kse/wielkosci-podstawowe](http://www.pse.pl/dane-systemowe/funkcjonowanie-kse/raporty-dobowe-z-pracy-kse/wielkosci-podstawowe).
- [10] [www.radpol.eu/resources/katalogi\\_wirbet/1-EN-340-LSN-70\\_50.pdf](http://www.radpol.eu/resources/katalogi_wirbet/1-EN-340-LSN-70_50.pdf) - dostęp 15.01.2018 r.

### THE INFLUENCE OF EXTREME WEATHER CONDITIONS ON THE POWER SYSTEM

The major task of the power system is to ensure the continuity and reliability of electricity supply. In conditions of real danger of systemic failures, which reasons include atmospheric, technical and human factors, there is a risk related to the threat to the security of the power system. The most common causes of systemic failures include extreme atmospheric conditions, the impact of which on the operation of the power system will be analyzed in this work. For three variants of extreme weather conditions, such as planting sludge, strong wind and high temperature, there will be shown the changes in the overhead line slack on the example of a 20 kV span.

*(Received: 02.02.2018, revised: 04.03.2018)*