



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

**DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH**

DYSCYPLINA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA  
I TECHNOLOGIE KOSMICZNE

**AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

Analiza możliwości wykorzystania pasów  
technologicznych elektroenergetycznych linii  
przesyłowych do rozbudowy sieci dystrybucyjnych

Autor: mgr inż. Konrad Franciszek Kochanowicz

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Wiesław Nowak, prof. AGH  
Promotor pomocniczy: dr inż. Rafał Tarko

Praca wykonana:  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki  
i Inżynierii Biomedycznej  
Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki

Kraków, 2023

Polski system elektroenergetyczny stanął przed wyzwaniem koniecznej i trudnej transformacji, wynikającej głównie z czynników i uwarunkowań zewnętrznych związanych z sytuacją geopolityczną, jak również z licznymi czynnikami wewnętrznymi, których źródłem jest wieloletni okres zastoju w obszarze rozwoju i rozbudowy sieci elektroenergetycznych. Przyjęte przez Komisję Europejską i zaakceptowane przez państwa członkowskie Unii Europejskiej akty prawne związane z tzw. *zielonym ładem*, mają dostosować politykę klimatyczną, energetyczną, transportową i podatkową na potrzeby realizacji celu, jakim jest ograniczenie emisji gazów cieplarnianych do 2030 roku o co najmniej 55% w porównaniu z poziomem z roku 1990. Dla polskiej gospodarki – która tradycyjnie oparta była i jest na paliwach kopalnych, głównie węgla kamiennym i brunatnym – realizacja powyższych założeń jest procesem trudnym, bowiem w chwili obecnej generacja z tych dwóch paliw odpowiada za ponad 71% całkowitej ilości energii elektrycznej wytworzonej w naszym kraju.

Trwający obecnie w Polsce proces transformacji energetycznej skupia się głównie na sektorze wytwarzania energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii oraz na modernizacji i rozbudowie sieci przesyłowej o napięciu 400 kV. Realizowane są pierwsze duże inwestycje w morskie farmy wiatrowe na Bałtyku, a na wstępnym etapie prac przygotowawczych znajduje się planowana od wielu lat pierwsza polska elektrownia atomowa. Równocześnie obserwuje się duży i dynamiczny rozwój sektora mikroinstalacji fotowoltaicznych montowanych przez osoby prywatne, a także rosnącą liczbę inwestycji w farmy fotowoltaiczne o mocach rzędu kilkudziesięciu, a nawet kilkuset megawatów. Działania te, wraz z rosnącym zapotrzebowaniem na energię elektryczną, a także w pewnym stopniu zmianą przyzwyczajień konsumentów energii wywołane zmianą stylu życia, obnażyły słabość systemu elektroenergetycznego w zakresie dystrybucji energii elektrycznej na poziomie średniego i wysokiego napięcia.

Wskutek tak dynamicznych procesów modernizacji sektora wytwarzania energii elektrycznej, obszar gospodarki związany z jej dystrybucją nie jest w stanie nadążyć za postępującymi zmianami. Wynika to z szeregu czynników dotyczących finansowania nowych, jak i modernizowania istniejących linii oraz stacji elektroenergetycznych, poprzez czynniki środowiskowe, kwestie społeczne, a kończąc na uwarunkowaniach prawnych. Operatorzy systemów dystrybucyjnych realizując swoją bieżącą działalność, nie dysponują zasobami finansowymi na tak szybką rozbudowę sieci dystrybucyjnych, szczególnie na poziomie napięcia 110 kV. Dodatkowo procesy inwestycyjne związane z budową tych obiektów mogą trwać nawet kilka lat.

Jednym z zasadniczych elementów procesów inwestycyjnych rozbudowy sieci dystrybucyjnych jest pozyskanie terenu i prawa do gospodarowania nieruchomościami dla celów budowlanych. Proces ten jest niezmiernie czasochłonny i wymagający znacznego zaangażowania w prowadzenie negocjacji z właścicielami gruntów. Równocześnie wymaga znacznych nakładów finansowych, koniecznych do wykupu gruntów pod stacje elektroenergetyczne oraz na ustanowienie służebności gruntowej przesyłu pod linie dystrybucyjne.

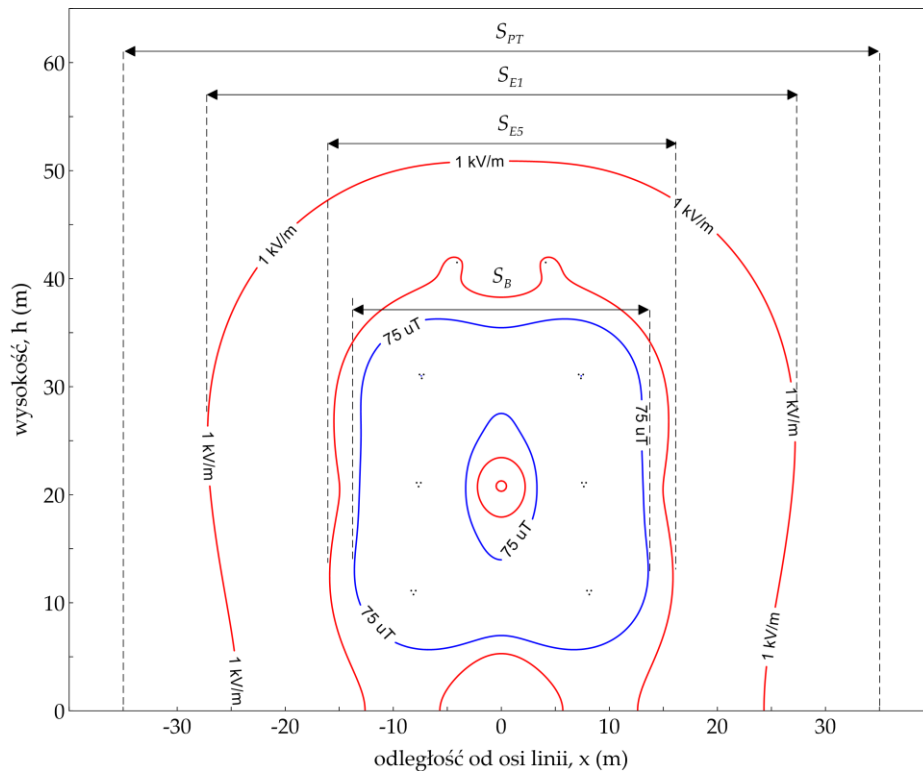
Z powyższych względów pożądanym jest poszukiwanie rozwiązań alternatywnych, co stało się inspiracją do podjęcia problematyki będącej przedmiotem niniejszej rozprawy. Przedstawiono w niej badania dotyczące możliwości przyspieszenia procesu budowy i modernizacji sieci dystrybucyjnych, poprzez wykorzystanie istniejących pasów technologicznych linii przesyłowych. W rozprawie sformowano następującą tezę:

*Intensyfikacja rozbudowy elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych – wynikająca z procesów transformacji energetycznej – możliwa jest przez wykorzystanie do tego celu pasów technologicznych elektroenergetycznych linii przesyłowych.*

Celem badań, których wyniki przedstawiono w niniejszej dysertacji było określenie głównych czynników i warunków determinujących możliwość bezpiecznej budowy oraz niezawodnej eksploatacji napowietrznych linii dystrybucyjnych w pasach technologicznych linii przesyłowych. Należy nadmienić, że płynące z przeprowadzonych badań wnioski słuszne są nie tylko dla polskiej energetyki, ale również mogą być aplikowane w innych krajach.

Treść pracy została zawarta w siedmiu rozdziałach. Rozdział 2 poświęcono problematyce oddziaływania pól elektromagnetycznych w otoczeniu linii elektroenergetycznych. Szczególną uwagę poświęcono wpływowi na zdrowie i życie ludzkie oraz negatywnym skutkom oddziaływania tych pól na infrastrukturę techniczną. Zasięg strefy oddziaływania elektromagnetycznego wynika z przestrzennego rozkładu pola elektrycznego oraz pola magnetycznego i ograniczony jest miejscem występowania założonych wartości dopuszczalnych. Przykładowy zasięg strefy oddziaływania pola elektrycznego o natężeniu  $E = 1 \text{ kV/m}$  i  $E = 5 \text{ kV/m}$  oraz natężenia pola magnetycznego  $B = 75 \text{ }\mu\text{T}$  przedstawiono na rysunku 1 na którym naniesiona została również szerokość pasa technologicznego dwutorowej linii 400 kV.

Bezpośrednie oddziaływanie pola elektromagnetycznego na organizmy żywe i środowisko jest często trudne do zweryfikowania, pomimo prowadzonych w tym obszarze licznych badań, których przedmiotem są: zjawiska entoptyczne, zaburzenia neurobehawioralne, wpływ na układ neuroendokryny, zaburzenia neurodegeneracyjne, problemy z układem rozrodczym czy rozwój nowotworów. Pośrednim skutkiem oddziaływania pól elektromagnetycznych na organizmy żywe jest zagrożenie porażeniowe prądem elektrycznym, spowodowane dotknięciem części urządzeń elektroenergetycznych, na których został wyindukowany potencjał przez pole elektromagnetyczne. Oddziaływanie prądu na ludzki organizm objawia się szeregiem skutków, zależnych od wartości przepływającego prądu oraz indywidualnych właściwości biofizycznych organizmów żywych. Skutki działania prądu na człowieka w głównej mierze zależą od drogi jego przepływu przez organizm, natężenia oraz czasu trwania co potwierdzają liczne publikacje naukowe.



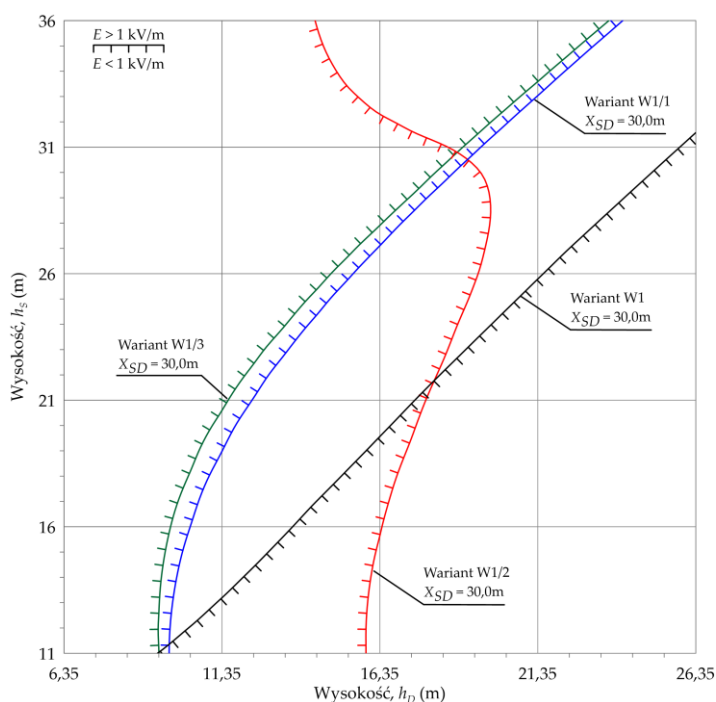
Rysunek 1. Porównanie szerokości pasa technologicznego  $S_{PT}$  oraz szerokości stref  $S_{EI}$  i  $S_{ES}$  oddziaływania pola elektrycznego oraz strefy  $S_B$  pola magnetycznego w przekroju poprzecznym linii dwutorowej 400 kV

W rozdziale 3 przedstawiono zagadnienia normatywne projektowania zbliżonych do siebie linii elektroenergetycznych. Przeprowadzono analizę obejmującą wymagania techniczne, zgodnie z aktualnie obowiązującymi wymaganiami normatywnymi w zakresie projektowania linii napowietrznych. Celem tej części rozprawy było wyznaczenie minimalnej odległości  $X_{SD}$  między osiami linii przesyłowej oraz zbliżonej do niej linii dystrybucyjnej. Wymagania co do odległości  $X_{SD}$  wynikają z dokumentów normatywnych. Prekwalifikacja rozwiązań technicznych została przeprowadzona zgodnie z zapisami obowiązującej normy PN-EN 50341-1:2013-03 dla wymaganych według załącznika krajowego do normy dwóch układów obciążeń mechanicznych przewodów: 1) przy maksymalnej projektowej temperaturze pracy przewodów oraz 2) przy obciążeniu przewodów wiatrem nominalnym. W wyniku tych badań wyznaczono trzy grupy zakresów odległości między osiami linii w których: zabroniona jest lokalizacja linii; możliwa jest lokalizacja linii w szczególnych przypadkach (np. w zakresie ograniczonych długości przęseł lub odpowiednia lokalizacja słupów); dopuszczalna jest lokalizacja linii bez żadnych ograniczeń technicznych. Zakresy odległości  $X_{SD}$  dla analizowanych konstrukcji wsporczych przedstawiono w tabeli 1. Rezultaty tej analizy stały się podstawą do określenia zakresów zmienności parametrów badanych w dalszych częściach rozprawy.

Tabela 1. Zakresy zabronionych, przejściowych oraz dopuszczalnych odległości między osiami dwóch równoległych linii dla wybranych układów przewodów linii systemowej oraz linii dystrybucyjnej.

Linia systemowa	Linia dystrybucyjna	Odległość $X_{SD}$ (m)		
		strefa zabroniona	strefa przejściowa	strefa dopuszczalna
400 kV – linia jednotorowa Y25 P – układ płaski	110 kV – linia jednotorowa EJ24 PL – układ pionowy	< 18,94	18,94÷27,83	> 27,83
	15 kV – linia jednotorowa LSNS P2 – układ płaski	< 17,66	17,66÷29,16	> 29,16
400 kV – linia dwutorowa E33 P – układ pionowy	110 kV – linia jednotorowa EJ24 PL – układ pionowy	< 17,24	17,24÷27,81	> 27,81
	15 kV – linia jednotorowa LSNS P2 – układ płaski	< 15,96	15,96÷29,14	> 29,14

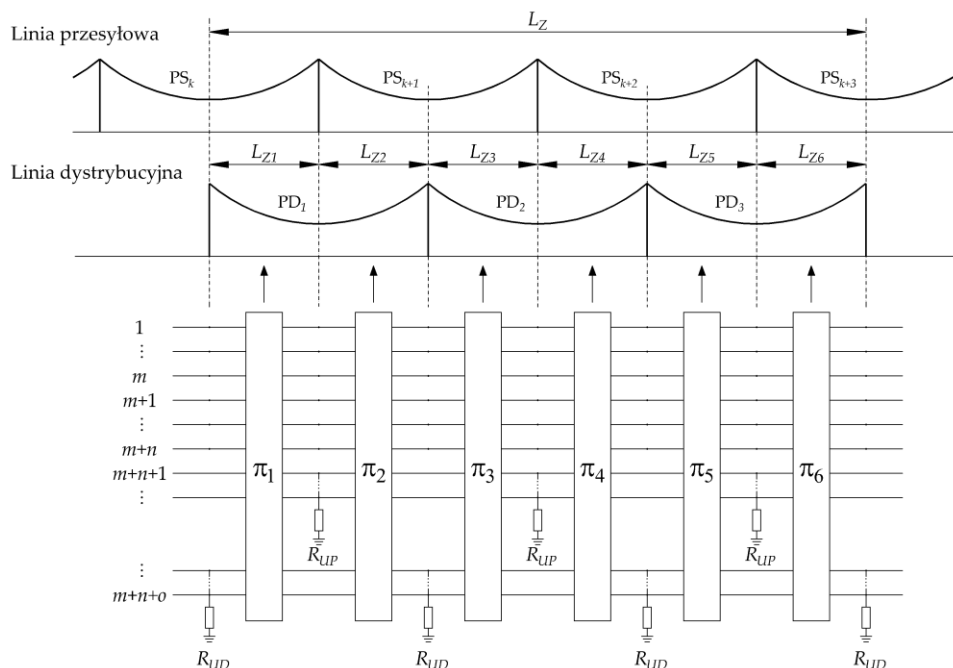
Rozdział 4 poświęcono zagadnieniu skumulowanych pól elektrycznych w zbliżonych liniach elektroenergetycznych. Przedstawiono w nim opracowany w oparciu o metodę ładunków symulowanych model obliczeniowy, który stał się podstawą określenia warunków koniecznych do lokalizacji napowietrznej linii dystrybucyjnej w zbliżeniu do linii przesyłowej. Wyniki tych badań przedstawiono w postaci nomogramów (rysunek 2) natężenia pola elektrycznego  $E = 1$  kV/m na granicy pasa technologicznego linii przesyłowej dla zmiennych wysokości  $h_S$ ,  $h_D$  przewodów linii przesyłowej i dystrybucyjnej oraz odległości  $X_{SD}$  między osiami tych linii.



Rysunek 2. Przykład nomogram  $E(h_S, h_D, X_{SD}) = 1$  kV/m na granicy pasa technologicznego linii przesyłowej 400 kV dla wariantu konfiguracji W1 dla układy faz W1, W1/1, W1/2, W1/3

Przedstawione nomogramy stanowią oryginalny sposób wyznaczania maksymalnej odległości między osiami linii zbliżonych do siebie oraz wzajemnej korelacji wysokości zawieszenia ich przewodów. Nomogramy mają charakter użytkowy i umożliwiają wstępny dobór rozwiązań przyczyniających się do intensyfikacji wykorzystania pasów technologicznych linii przesyłowych do budowy i powadzenia w nich linii dystrybucyjnych. Mogą one zostać wykorzystane również przez operatorów sieci dystrybucyjnych, w celu wykorzystania pasów technologicznych jako korytarzy dla własnej infrastruktury. Umożliwiają także dobór odpowiedniego układu przewodów fazowych linii dystrybucyjnej.

W rozdziale 5 przedstawiono uproszczone modele oddziaływań pojemnościowych i magnetycznych, które opracowano i zastosowano do badań napięć i prądów indukowanych w liniach zbliżonych. Umożliwiły one określenie wpływu analizowanych parametrów zbliżenia na skutki wzajemnego oddziaływania linii. Pomimo wysokich walorów użytkowych uproszczone modele oddziaływań nie mają bezpośredniego zastosowania do badań skutków oddziaływań w bardziej złożonych, zbliżonych do rzeczywistości przypadkach. Wynika to z trzech powodów: jednoczesności oddziaływania pojemnościowego i magnetycznego, uwzględniania tylko oddziaływania pomiędzy odcinkami linii o skończonej długości oraz konieczności dokładnego odwzorowania przebiegów napięć i prądów. Z tych powodów na potrzeby badań opracowano zaawansowany model odcinków zbliżeń linii przesyłowych i dystrybucyjnych, który jednocześnie stanowi istotne rozszerzenie możliwości obliczeniowych i udoskonalenie programu ElectroMagnetic Transients Program – Alternative Transients Program (EMTP–ATP).



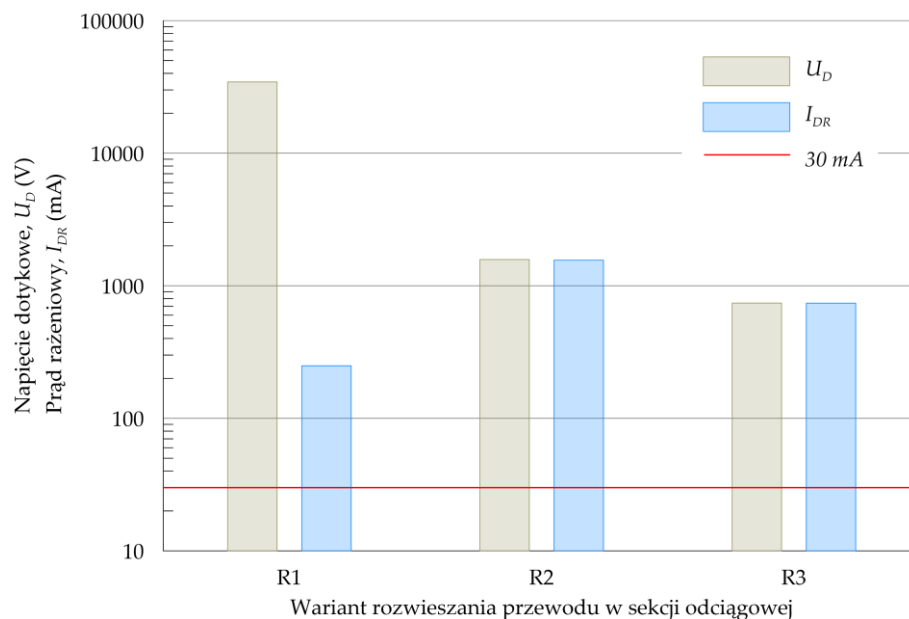
Rysunek 3. Modele odcinka zbliżenia w postaci szeregowego połączenia modeli cząstkowych kolejnych odcinków typu  $\pi$

Model ten został wykorzystany do badań parametrów jakości energii elektrycznej oraz zagrożenia porażeniowego, wynikających z napięć i prądów indukowanych podczas budowy i późniejszej eksploatacji linii dystrybucyjnej w pasach technologicznych linii przesyłowych. Schemat ideowy modelu odcinka zbliżenia przedstawiono na rysunku 3. Wyniki tych badań i wnioski przedstawiono w rozdziałach 6 – badania wpływu linii przesyłowych na wartości napięć i prądów indukowanych w budowanych liniach dystrybucyjnych oraz 7 – badania wpływu linii przesyłowych na wartości napięć i prądów indukowanych w eksploatowanych liniach dystrybucyjnych.

W rozdziale 6 wartość napięć dotykowych i prądów rażeniowych badano w funkcji długości  $L_R$  przewodu w rozwieszanej sekcji dla różnych odległości  $X_{SD}$  między osiami linii, obciążenia mocą  $S_4$  linii przesyłowej, a w przypadków stanów zwarć jednofazowych w linii 400 kV, również dla różnych miejsc jego wystąpienia i dla różnych przewodów fazowych dotkniętych tym zwarcie. Badania przeprowadzono dla trzech wariantów montażowych (przedstawionych w tabeli 2), które różnią się między sobą ze względu na sposób uziemienia bębna z hamownikiem, rolek montażowych oraz wciągarki.

Tabela 2. Rozważane warianty montażu sekcji odciągowej linii dystrybucyjnej

Wariant rozwieszania	Uziemiane elementy		
	bęben i hamownik	rolki montażowe	wciągarka
R1	–	–	–
R2	TAK	–	–
R3	TAK	TAK	TAK



Rysunek 4. Największe wartości napięć dotykowych  $U_D$  i prądów rażeniowych  $I_{DR}$  w wariantach R1, R2, R3 rozwieszania przewodów

Przeprowadzone badania wpływu linii przesyłowych na wartości napięć i prądów indukowanych w budowanych liniach dystrybucyjnych wykazały, że podczas budowy linii dystrybucyjnych w pasach technologicznych linii przesyłowych należy liczyć się z wysokim poziomem zagrożenia porażeniowego. Na rysunku 4 przedstawiono największe spodziewane wartości napięć dotykowych  $U_D$  i prądów rażeniowych  $I_{DR}$ , jakie mogą wystąpić w wyniku przepływu w linii przesyłowej prądów zwarciovych. Należy zauważyć, że wartości prądów  $I_{DR}$  są wielokrotnie większe od wartości 30 mA, uznawanej za próg wystąpienia fibrylacji komórek serca.

W rozdziale 7 badania przeprowadzono dla stanów pracy linii dystrybucyjnej według tabeli 3. Badania jakości energii przeprowadzono dla stanu normalnej pracy linii dystrybucyjnej (wariant E1), natomiast wyniki badań spodziewanych prądów rażeniowych w wyłączonych spod napięcia liniach dystrybucyjnych, jakie mogą być wywołane oddziaływaniem elektromagnetycznym linii przesyłowych przeprowadzono dla stanów pracy według wariantów E2÷E4.

Tabela 3. Rozważane warianty podczas eksploatacji linii dystrybucyjnej w pasie technologicznym linii przesyłowej.

Wariant	Stan pracy linii dystrybucyjnej
E1	normalny
E2	wyłączona, nieuziemiona
E3	wyłączona, uzziemiona jednostronnie
E4	wyłączona, uzziemiona obustronnie

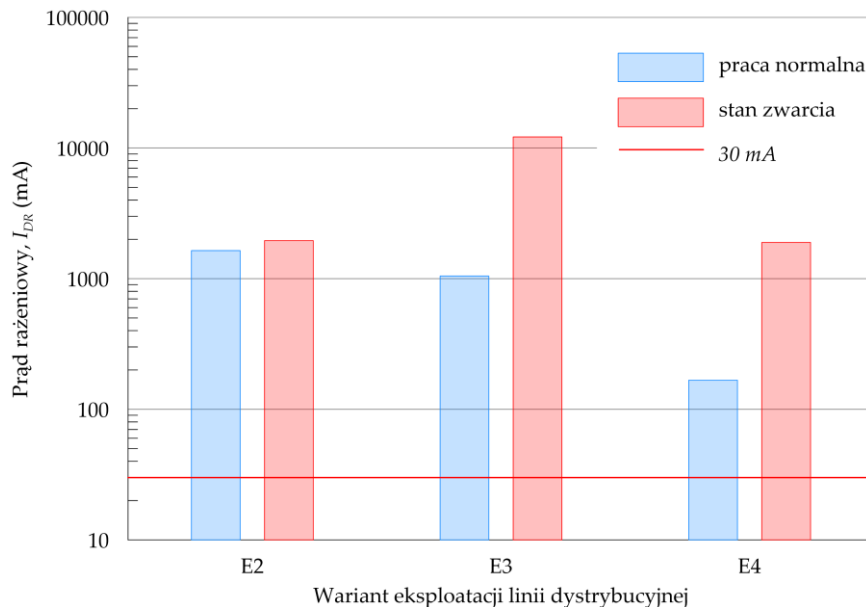
W linii dystrybucyjnej 110 kV badania wykazały, że linia przesyłowa 400 kV może być przyczyną przekroczenia w niej dopuszczalnej wartości napięcia wynoszącej 1,1 napięcia znamionowego sieci  $U_N$  przy odległości  $X_{SD} = 30$  m długość  $L_Z$  zbliżenia linii nie powinna przekraczać ok. 10 km, a przy odległości  $X_{SD} = 20$  m długość  $L_Z < 5$  km. Pomimo istotnej deformacji rozkładów napięć w linii dystrybucyjnej, wartości wskaźnika asymetrii  $W_A$  nie przekraczają dopuszczalnej według rozporządzenia określającego wymagania dotyczące parametrów jakości energii elektrycznej wartości 1%.

Z badań przeprowadzonych dla zbliżonej linii 15 kV wynika, że oddziaływanie elektromagnetyczne linii 400 kV jest tak silne, że wartości tych napięć praktycznie w każdej sytuacji nie mieszczą się w dopuszczalnym przedziale (0,9÷1,1)  $U_N$ . Pomimo tak silnej deformacji napięć wartości wskaźnika asymetrii mieszczą się w wymaganym przedziale 0÷2%. Otrzymane wyniki badań upoważniają więc do jednoznacznego stwierdzenia, że napowietrzne linie dystrybucyjne 15 kV nie powinny być lokalizowane w pasach technologicznych linii 400 kV.

Przeprowadzone badania wpływu linii przesyłowych na wartości napięć i prądów indukowanych w eksploatowanych liniach dystrybucyjnych wykazały, że również podczas eksploatacji linii dystrybucyjnych w pasie technologicznym linii przesyłowej



należy liczyć się z wysokim poziomem zagrożenia porażeniowego. Na rysunku 5 przedstawiono największe spodziewane wartości prądów rażeniowych  $I_{DR}$ , jakie mogą wystąpić podczas normalnej pracy oraz na skutek zwarć jednofazowych w linii 400 kV. Należy zauważyć, że również w tym przypadku wartości prądów  $I_{DR}$  są wielokrotnie większe od wartości 30 mA.



Rysunek 5. Największe wartości prądów rażeniowych  $I_{DR}$  w wariantach E2, E3, E4 eksploatacji linii dystrybucyjnej

W ogólności można więc stwierdzić, że prowadzenie prac budowlanych w pasie technologicznym linii przesyłowych, jak i prowadzenia eksploatacji na wyłączonej linii dystrybucyjnej wiąże się z możliwością wystąpienia porażień. Z tego powodu możliwość montażu przewodów oraz prowadzenia prac jest dopuszczalna tylko w przypadku czasowego wyłączenia linii przesyłowej z eksploatacji albo przy zastosowaniu technologii prac pod napięciem.

Zagadnienie będące przedmiotem rozprawy należy do aktualnych problemów energetyki krajowej i światowej, wynikających z zachodzących w niej procesów transformacji w kierunku gospodarki niskoemisyjnej. Wyzwania jakie stawiają one przed sektorem elektroenergetyki wymusza konieczność poszukiwania alternatywnych, a zarazem innowacyjnych rozwiązań obniżenia kosztów i przyspieszenia realizacji tej transformacji. Do takich rozwiązań należy proponowana w rozprawie intensyfikacja rozbudowy elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych przez wykorzystanie do tego celu pasów technologicznych elektroenergetycznych linii przesyłowych.

Przeprowadzone badania wykazały, że energetyce krajowej możliwa jest lokalizacja linii dystrybucyjnych w pasach technologicznych linii 400 kV, ale tylko w przypadku linii o napięciu znamionowym 110 kV. W przypadku linii średnich napięć 15 kV lokalizacja taka nie jest możliwa ze względu na niedopuszczalną degradację parametrów określających jakość napięcia zasilającego, w postaci nadmiernych odchyień

wartości napięć fazowych, będących skutkiem oddziaływania elektromagnetycznego linii przesyłowych.

Przeprowadzone badania i analizy wykazały również, że w zależności od odległości między osiami linii, najdłuższe odcinki zbliżeń linii 110 kV w pasach technologicznych linii 400 kV nie powinny przekraczać długości  $5 \div 10$  km. Dla dłuższych odcinków zbliżeń należy liczyć się, podobnie jak w przypadku linii 15 kV, z nadmiernym odchyleniem wartości napięć fazowych.

Opracowane modele matematyczne oddziaływań elektromagnetycznych pozwoliły na określenie napięć indukowanych i wywołanych nimi prądów, będących skutkami oddziaływań elektromagnetycznych linii przesyłowych, zarówno w stanie pracy normalnej, jak i podczas przepływu w niej prądów wywołanych zakłóceniami zwarciovymi. Modele te zastosowano do określenia warunków budowy i przyszłej eksploatacji linii dystrybucyjnych usytuowanych w pasach technologicznych linii przesyłowych w aspekcie zagrożenia porażeniowego.

Otrzymane wyniki badań i analiz warunków budowy linii dystrybucyjnych wykazują, że wykonywane prace budowlane i montażowe odbywać się mogą w warunkach dużego zagrożenia porażeniowego, szczególnie podczas rozciągania przewodów i montażu osprzętu łańcuchów izolatorowych. Przeprowadzone badania wykazały, że spodziewane wówczas wartości prądów rażeniowych mogą wielokrotnie przekraczać wartości stanowiące próg wystąpienia fibrylacji komór serca. Z tych powodów wszelkie prace budowlane na liniach dystrybucyjnych zbliżonych do linii przesyłowych, powinny być traktowane jako prace pod napięciem i powinny być wykonywane z wykorzystaniem odpowiednich technologii. Alternatywą mogłoby być czasowe wyłączenie linii przesyłowej, jednak ze względów na niezawodność systemu przesyłowego uzyskanie na to zgody jego operatora jest praktycznie niemożliwe.

Podobne wnioski wypływają z badań i analiz dotyczących eksploatacji linii dystrybucyjnych wybudowanych w pasach technologicznych linii przesyłowych. Również w tej sytuacji należy liczyć się z dużym zagrożeniem porażeniowym podczas wykonywania prac eksploatacyjnych lub remontowych, co powoduje konieczność stosowania technologii prac pod napięciem nawet na odłączonej od zasilania i uziemionej obustronnie linii dystrybucyjnej.

Dokonując całościowego podsumowania przedstawionych w niniejszej rozprawie wyników badań, można stwierdzić, że postawiona w rozdziale pierwszym teza została udowodniona.

Rozprawa stanowi oryginalny wkład w problematykę projektowania i eksploatacji zbliżonych do siebie napowietrznych linii elektroenergetycznych. Osiągnięte rezultaty słuszne są nie tylko dla polskiej energetyki, ale również mogą być aplikowane w innych krajach. Stanowią one także punkt wyjścia do dalszych badań, dotyczących możliwości lokalizacji również kablowych linii dystrybucyjnych w pasach technologicznych napowietrznych linii przesyłowych.