

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Wydział ELEKTRYCZNY

Autoreferat rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Michał Borecki

**„Analiza warunków powstawania przebiegów atmosferycznych w liniach
średniego napięcia z przewodami niepełnoizolowanymi”**

Promotor:

dr. hab. inż. Jacek Starzyński, prof. nadzw. PW – Politechnika Warszawska

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Kazimierz Jakubiuk - Politechnika Gdańska

dr hab. inż. Waldemar Skomudek, prof. PO - Politechnika Opolska

Warszawa, 2017

Spis treści

1. Cel pracy	3
2. Teza pracy	6
3. Charakterystyka poszczególnych rozdziałów	7
4. Podsumowanie i wnioski.....	16

1. Cel pracy

Zmiany na rynku usług energetycznych zmuszają dostawców energii do coraz większej troski o jakość energii i ciągłość jej dostaw. Stosowanie przewodów niepełnoizolowanych [1] pozwala zwiększyć niezawodność (zmniejszyć awaryjność) linii przesyłowych niskich i średnich napięć, których łączna długość na terenie Polski przekracza 500 tysięcy km. Stosowanie przewodów pokrytych izolacją jest szczególnie wskazane w przypadku linii przebiegających w środowiskach leśnych (przynajmniej częściowo), gdzie zabieg ten zwiększa odporność linii na skutki oddziaływań środowiskowych i atmosferycznych. Linie wyposażone w przewody gołe ulegały w obszarach zadrzewionych częstym awariom wskutek kontaktu przewodów z gałęziami drzew, więc za najprostsze rozwiązanie uznano tam izolowanie przewodów, gdyż dodatkowe wycinki drzew były zbyt kosztowne. Początkowo stosowano w tym celu przewody w pełnej izolacji, ale okazało się, że bardziej sensowne jest zastosowanie przewodów niepełnoizolowanych. Pierwsze linie tego typu pojawiły się w Polsce na początku lat dziewięćdziesiątych XX w.

Jak pokazano w dalszej części pracy, jedną z głównych przyczyn awaryjności linii średnich napięć są wyładowania piorunowe. Inicjują one około połowy ogólnej liczby wyłączeń sieciowych [3], którym towarzyszą zwarcia i uszkodzenia przewodów oraz izolatorów a nawet elementów konstrukcyjnych. Ze względu na stosunkowo małą wytrzymałość napięciową izolatorów liniowych, praktycznie wszystkie trafienia piorunowe bezpośrednie i znaczna część trafień pobliskich powoduje przeskoki na tych izolatorach, a ponadto – przy dużej mocy zwarciowej układu i małych impedancjach pętli zwarciowych, a więc z dużym prawdopodobieństwem – takie przeskoki przekształcają się w łuk. W przypadku stosowania przewodów pokrytych izolacją rozwój wyładowań łukowych jest odmienny, niż w przypadku przewodów gołych, a ich konsekwencje ekonomiczne są znacznie poważniejsze. Rozmiar występujących zagrożeń zmusza do przeprowadzenia ich wnikliwej analizy i do właściwego doboru środków ochrony, a nawet do zastosowania zbiorczego ich zestawu. Tylko właściwie dobrane i zainstalowane środki ochrony pozwalają zminimalizować uszkodzenia izolacji i innych elementów linii napowietrznych oraz przyłączonych do nich stacji transformatorowo-rozdzielczych [4].

Dokonany poniżej przegląd zagrożeń przepięciowych i metod ich redukcji w liniach średnich napięć z przewodami niepełnoizolowanymi wskazuje na celowość skoncentrowania uwagi na czterech środkach ochrony tych linii przed przepięciami i przeprowadzenia bardziej wnikliwej analizy ich właściwości ochronnych oraz inwestycyjnych. Wyniki analizy tych

właściwości umożliwiają dokonanie rankingu skuteczności, konkurencyjności i podatności na modyfikacje tych środków, a jednocześnie na wytypowanie środka, który powinien być poddany dalszym modyfikacjom, w celu zapewnienia najbardziej obiecującej (skutecznej i ekonomicznej) metody ochrony. Rozważania niniejszej rozprawy doktorskiej są ukierunkowane na rozwiązanie tego zagadnienia i poświęcone są w szczególności:

- analizie właściwości wybranych układów zarówno na tle warunków powstawania przebiegów atmosferycznych, jak i ich oddziaływania na linie średnich napięć z przewodami niepełnoizolowanymi,
- wybraniu najbardziej skutecznego i podatnego na modyfikacje środka ochrony linii przed jej uszkodzeniami piorunowymi (prądowo-przebiegowymi),
- opracowaniu modelu poddawanego modyfikacjom środka ochrony, który poprawi skuteczność ochrony przy jednoczesnym obniżeniu kosztów jej funkcjonowania.

Zrealizowanie powyższych zadań pozwoli osiągnąć cel pracy, którym jest opracowanie efektywnego, nowoczesnego sposobu ochrony przeciwprzebiegowej dla linii średniego napięcia z przewodami niepełnoizolowanymi. Jak pokazano dalej, można to osiągnąć przez opracowanie odpowiednich iskierników wieloelektrodowych.

Właściwy dobór środków ochrony linii z przewodami niepełnoizolowanymi przed oddziaływaniem przebiegów atmosferycznych, a w tym przed uszkodzeniami warstwy izolacyjnej tych przewodów, wymaga znajomości prawdopodobieństwa wystąpienia takich uszkodzeń podczas zwarć i wyłączeń linii, wspartej analizą techniczną i ekonomiczną [2, 5, 6, 7].

Analizy procesów, zachodzących w liniach średnich napięć z przewodami niepełnoizolowanymi pod wpływem przebiegów piorunowych, pozwoliły wytyczyć nowe kierunki niezbędnych zmian w zakresie modyfikacji sposobów i środków ochrony tych linii zarówno przed przebiegami, jak i ich skutkami [9].

Aby zredukować liczbę i rozmiar uszkodzeń powłoki izolacyjnej, głównie w sąsiedztwie izolatorów, postanowiono wyposażyć ją w chroniące elementy metalowe. Pojawiło się kilka rozwiązań [10] w takich krajach jak Finlandia, St. Zjednoczone Ameryki, Japonia, Rosja itp.

W St. Zjednoczonych Ameryki wprowadzono zaciski łukoodporne, które instalowane są przy izolatorze, na krańcach odcinka przewodu z usuniętą powłoką izolacyjną

do odległości ok. 20 cm od izolatora. W przypadku wystąpienia tam przepięć, na izolatorze następuje przeskok iskrowy, który zwykle przechodzi w łuk, a jego kraniec przemieszcza się właśnie do zacisku ochronnego, chroniącego przewód przed przetopieniem. Nie unika się jednak wyłączenia linii i zacisk może ulec uszkodzeniu.

W Finlandii i we Francji wprowadzono **układy łukoochronne**, instalowane w takiej samej mniej więcej odległości od izolatora jak zaciski łukoodporne, ale bez usuwania powłoki izolacyjnej z zawartego między nimi odcinka przewodu, na którym jednak występuje spirala przewodząca. Łuk – po przeskoku iskrowym – przesuwa się po spirali do różka, po czym może nastąpić stąd przeskok iskrowy na sąsiednie fazy i przerzut tam łuku. Dlatego w tym przypadku wymagane jest wyposażenie w różki przewodów wszystkich faz. Należy zauważyć, że różki – podobnie jak zaciski – wymagają stałej kontroli i w miarę potrzeby ich wymiany, zwłaszcza w pobliżu źródła zasilania.

W Japonii został po raz pierwszy wprowadzony **warystorowy odgromnik z zewnętrznym iskiernikiem**. Ma on umieszczoną na przewodzie jedną z elektrod iskiernika, a sam – wraz z drugą – jest zainstalowany na konstrukcji wsporczej izolatora. Przeskok iskrowy w iskierniku powoduje włączenie nieliniowego członu warystorowego i następuje skuteczne odprowadzenie znacznej części prądu piorunowego po słupie do ziemi, dzięki czemu unika się uszkodzenia izolatora i wytopienia przewodu. Z uwagi na rezystancję odgromnika nie dochodzi do powstawania łuku w przerwie iskrowej. Stosunkowo duży koszt tego środka ochrony jest kompensowany przez jego wysoką skuteczność, co pozwala uznać go jako jedno z najbardziej przyszłościowych urządzeń.

W Rosji w ostatnich latach zastosowano **iskierniki wieloelektrodowe (IW)**, instalowane – podobnie jak odgromniki warystorowe – blisko izolatora między jego konstrukcją wsporczą a zaciskiem na przewodzie. Istnieje kilka typów iskierników wieloelektrodowych, z których najbardziej rozpowszechniony w sieciach średniego napięcia jest pętlowy iskiernik wieloelektrodowy.

Zadaniem **pętlowego iskiernika wieloelektrodowego** jest przejęcie przeskoku iskrowego z powierzchni izolatora na własną powierzchnię, mimo jej kilka razy większej długości niż wysokość chronionego izolatora. Następuje to dzięki znacznie mniejszej wytrzymałości niż wytrzymałość izolatora, co sprawia, że wyładowanie, powstające przy stosunkowo niskim napięciu, rozwija się lawinowo wzdłuż iskiernika wieloelektrodowego.

Rozwiązanie to wydaje się być bardzo sensowne i może być skuteczne, ale ustalenie stopnia tej skuteczności i ewentualne jej zwiększenie wymaga bardziej wnikliwych badań.

Wyszczególnione środki ochrony linii z przewodami niepełnoizolowanymi, przed skutkami wyładowań piorunowych, można już śmiało obecnie zaliczyć do najbardziej rozpowszechnionych i rozwojowych [4, 8, 11, 12], ale żaden z nich nie charakteryzuje się doskonałością. Na podstawie analizy ich cech można określić te, które przyciągają uwagę z racji ich skuteczności, konkurencyjności i podatności modyfikacyjnej.

2. Teza pracy

Teza oraz zakres pracy zostały opracowane w oparciu o przedstawiony stan badań w zakresie stosowania i możliwości rozwoju jednego z najbardziej perspektywicznych środków ochrony, którym jest iskiernik wieloelektrodowy.

Na podstawie analizy oddziaływania przepięć atmosferycznych na linie napowietrzne średnich napięć z przewodami niepełnoizolowanymi oraz przeglądu możliwych środków ochrony rozpatrywanych linii przed przepięciami autor proponuje nadanie tezie rozprawy następującego brzmienia:

Symulacje i modyfikacje konstrukcji pętlowego iskiernika wieloelektrodowego oraz rozkładu natężenia pola elektrycznego wokół tego iskiernika pozwalają zoptymalizować jego strukturę, która przez zmniejszenie liczby pierścieni i zmiany ich kształtu prowadzi do polepszenia rozkładu i zwiększenia poziomego natężenia pola elektrycznego oraz redukcji kosztów ochrony w porównaniu z kosztami odgromnika warystorowego z zewnętrzną przerwą iskrową i zapewnia nie mniejszą jego skuteczność.

W ten sposób zmodyfikowany pętlowy iskiernik wieloelektrodowy staje się konkurencją dla odgromnika warystorowego z zewnętrzną przerwą iskrową. Ponadto, ujawnia się potrzeba wprowadzenia zmian w postanowieniach normatywnych ochrony przeciwprzepięciowej, a w konsekwencji upowszechnienie zmodyfikowanego iskiernika, jako podstawowego środka ochrony przeciwprzepięciowej linii średnich napięć z przewodami niepełnoizolowanymi. Nie wykluczona jest też możliwość zastosowania analogicznego środka ochrony w przypadku linii wyższych napięć.

3. Układ rozprawy

Praca składa się z sześciu rozdziałów, których treść wynika z zakresu rozprawy i analizowanych problemów..

W niniejszej rozprawie doktorskiej w **pierwszym rozdziale** przedłożono tezę oraz zakres pracy, na podstawie których przeprowadzono dalsze analizy oraz badania w zakresie oceny warunków formowania przebiegów atmosferycznych w liniach napowietrznych średniego napięcia z przewodami niepełnoizolowanymi oraz możliwości ich redukcji.

W **drugim rozdziale** przedstawiono charakterystyczne cechy linii napowietrznych średniego napięcia z przewodami niepełnoizolowanymi. Najważniejszymi elementami konstrukcyjnymi tych linii, które wyróżniają te linie, są warstwa izolacyjna oraz zaawansowany osprzęt liniowy [2]. Omówiono również przewagę linii napowietrznych średniego napięcia z przewodami niepełnoizolowanymi nad liniami z przewodami gołymi. Ze względu na to, że liczba awarii linii napowietrznych z przewodami gołymi jest większa niż w przypadku linii średniego napięcia z przewodami niepełnoizolowanymi w wyniku kontaktu przewodów z gałęziami drzew, stosowanie przewodów niepełnoizolowanych uznano jako najprostsze rozwiązanie, ponieważ zwiększenie wycinki drzew generuje koszty.

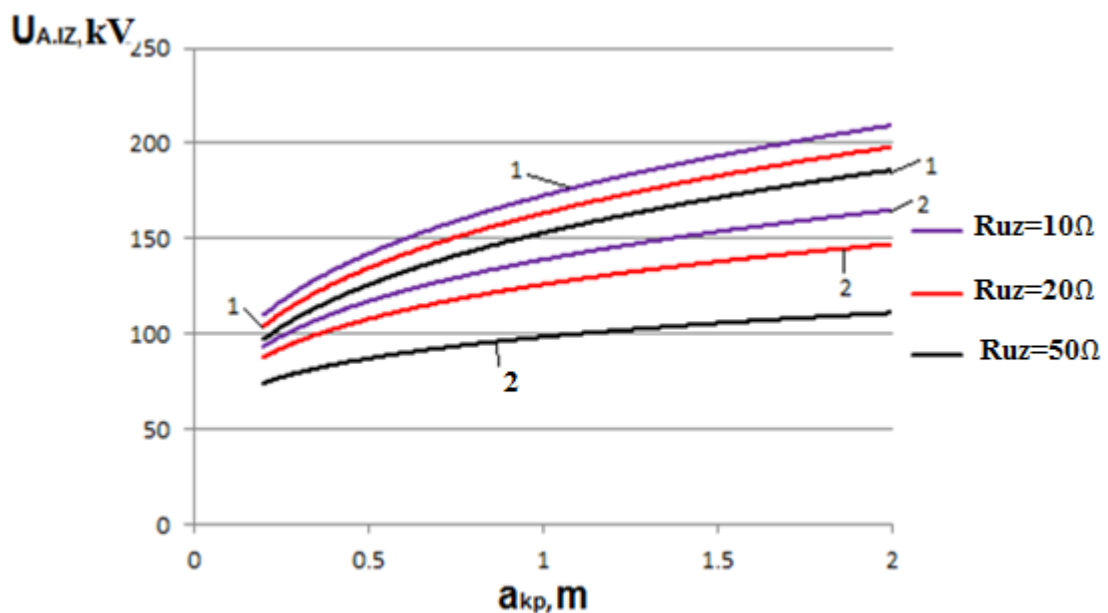
W **trzecim rozdziale** omówiono zagrożenia piorunowe linii z przewodami niepełnoizolowanymi. Przedstawiono także cztery najbardziej popularne sposoby (systemy) ochrony linii napowietrznych z przewodami niepełnoizolowanymi przed przepaleniem warstwy izolacyjnej oraz czynniki, które wpływają na dobór odpowiedniego systemu.

W **czwartym rozdziale** rozpatrzono procesy przepięciowe zachodzące w sieciach średniego napięcia, gdzie są zainstalowane odgromniki warystorowe z zewnętrzną przerwą iskrową i iskierniki wieloelektrodowe w zależności od typu przebiegów atmosferycznych: przepięcia indukowane oraz bezpośrednio uderzenia pioruna. Ponadto przeprowadzono porównanie skuteczności stosowania powyższych odgromników warystorowych z zewnętrzną przerwą iskrową i pętlowych iskierników wieloelektrodowych na podstawie matematycznego modelu. Obliczenia zostały zrealizowane znaną i adaptowaną tu metodą analityczną [4], przez dostosowanie jej algorytmów do potrzeb obliczeniowych rozpatrywanych odgromników. Rozpatrzone dwa warianty usytuowania urządzeń ochrony przepięciowej na słupach

przelotowych, a następnie porównano otrzymane wyniki dla pętlowego iskiernika wieloelektrodowego oraz odgromnika warystorowego z zewnętrzną przerwą iskrową:

- wariant 1 – urządzenia ochrony przepięciowej są instalowane na każdym słupie z trójkątnym układem faz, przy izolatorze najwyższej usytuowanej fazy. W wyniku będzie ustalona odległość między przewodami fazowymi, która zapewni aby na izolatorach sąsiednich faz (bez zainstalowanych urządzeń) nie dochodziło do przeskoku;

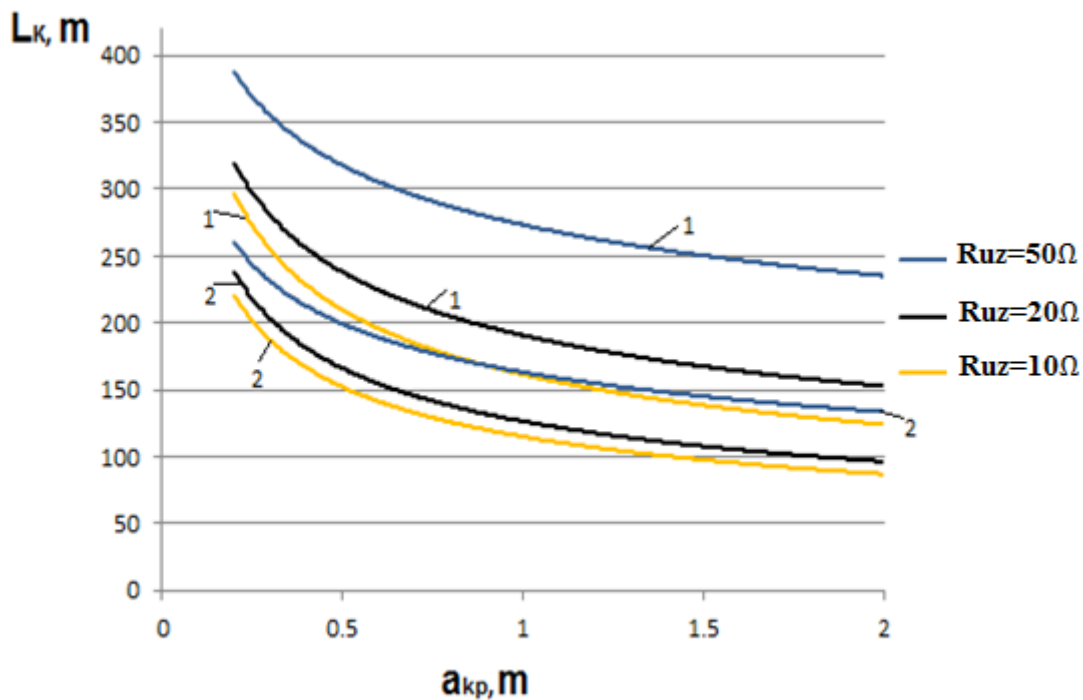
Według wykresu przedstawionego na rysunku 1 poczynione spostrzeżenia są niezbyt korzystne w rankingu skuteczności dla iskierników wieloelektrodowych, ale tracą negatywny odcień po skoordynowaniu wartości napięć na izolatorach niechronionych z odległością między przewodami poszczególnych faz. W przypadku nie dużej odległości między przewodami fazowymi (do 0,5 m) różnica napięć w przypadku stosowania różnych środków ochrony oscyluje na poziomie 10 kV, ale w obydwu przypadkach ta wartość nie przekracza wytrzymałości izolatora w rozpatrywanej linii. Natomiast przy większych odległościach ($a_{kp} > 0,5$ m) między przewodami fazowymi linii wyposażonej w iskierniki wieloelektrodowe, wg wariantu 1, należy stosować w niej izolatory o zwiększonej wytrzymałości.



Rysunek 1. Zależność napięcia na izolatorze niechronionym od zmiany odległości a_{kp} między przewodami i od rezystancji uziemienia słupa R_{uz} w przypadku ochrony za pomocą: 1 – iskierników wieloelektrodowych, 2 – odgromników warystorowych z zewnętrzną przerwą iskrową.

- wariant 2 – urządzenia ochrony przepięciowej są instalowane na każdym słupie z płaskim układem faz, przy izolatorach kolejno zmienianych faz. W wyniku tego uzyskano krytyczną długość przęsła, która zapewni, aby na izolatorach sąsiednich faz (bez zainstalowanych urządzeń) nie dochodziło do przeskoku.

W przypadku wariantu 2, wykres przedstawiony na rys. 2 prezentuje, że instalowanie odgromników warystorowych z zewnętrzną przerwą iskrową powoduje, że długość przęsła L_k , która zapewnia skuteczną ochronę przeciwprzepięciową, jest większa niż w przypadku instalowania iskierników wieloelektrodowych. Ponadto z wykresu widać, że zmiana odległości między przewodami fazowymi nie powoduje znacznej zmiany różnicy długości przęseł przy omawianych środkach ochrony i jednakowych wartościach rezystancji uziemienia słupa. Natomiast różnica ta jest duża, nawet przy niewielkich odległościach ($a_{kp} \approx 0,2$ m) między przewodami fazowymi, i sięga wartości $L_k \approx 100$ m.



Rysunek 2. Zależność krytycznej długości przęsła L_k od odległości a_{kp} między przewodami fazowymi i od rezystancji uziemienia słupa R_{uz} : 1 – odgromniki warystorowe z zewnętrzną przerwą iskrową, 2 – iskierniki wieloelektrodowe.

Uwzględniając nawet to, że wraz ze zwiększeniem odległości między przewodami fazowymi, długość przęsła we wszystkich rozpatrywanych przypadkach zmniejsza się, co negatywnie wpływa na skuteczność ochrony, można stwierdzić, że podane w poprzednim akapicie wnioski tracą swój negatywny odcień, ponieważ długości przęseł nawet przy

odległości między przewodami fazowymi na poziomie 2 m znacznie przekraczają (kilkadziesiąt metrów) długości pręseł, które są stosowane w rozpatrywanych liniach.

W związku z powyższym można wywnioskować, że omawiane urządzenia ochrony przeciwprzepięciowej spełniają warunki, które powodują prawidłowe i skuteczne funkcjonowanie przeciwprzepięciowej ochrony linii, a więc przy wyborze środków tej ochrony należy również uwzględnić inne czynniki.

Uwzględniając mniejszą awaryjność i łatwiejszą eksploatację iskierników wieloelektrodowych, co zostanie uwzględnione w obliczeniach kosztów stosowania poszczególnych środków ochrony przeciwprzepięciowej w dalszej części pracy, można wnioskować, że iskierniki te, jako środek ochrony linii mają przed sobą przyszłość, gdyż ich skuteczność jest porównywalna ze skutecznością odgromnika warystorowego z zewnętrzną przerwą iskrową.

Ponadto można ją zwiększyć w drodze przewidywanej tu modyfikacji, która wymaga zmian konstrukcyjnych, wpływających na wartość i rozkład natężenia pola elektrycznego. Narzędziem do wysterowania tego rozkładu jest symulacja komputerowa, która pozwoli zwiększyć skuteczność i przyczyni się do obniżenia kosztów.

W **piątym rozdziale** przedstawiono wyniki symulacji procesów rozkładu natężenia pola elektrycznego w modelu pętlowego iskiernika wieloelektrodowego (rys. 3) wykonanego w programie Comsol. Symulacje dotyczące analizy wpływu wybranych elementów konstrukcyjnych iskiernika na rozkład oraz poziom natężenia pola elektrycznego zostały przeprowadzone w zakresie:

- wyłączenie poszczególnych pierścieni na powierzchni iskiernika wieloelektrodowego,
- przykładanie napięcia do poszczególnych pierścieni.

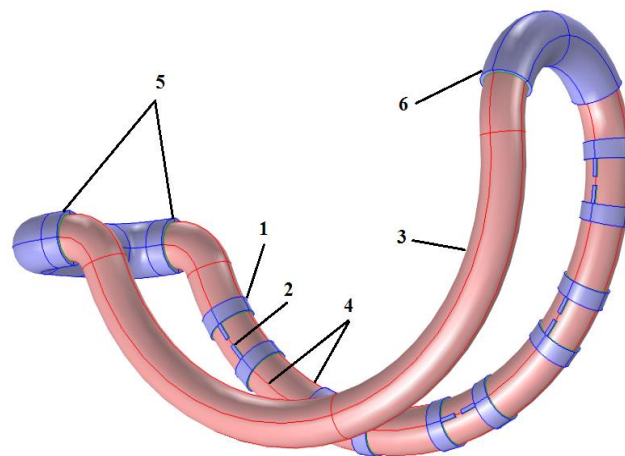
Wstępne symulacje, których zadaniem było ustalenie kierunku modyfikacji, pozwoliły wyróżnić elementy iskiernika, które mogą mieć wpływ na jego właściwości ochronne. Elementy te wyróżniono numerami 1 i 2 i wraz z innymi uwidoczniono na rys. 3.

W wyniku przeprowadzenia trzech wariantów modyfikacji:

- modyfikacja nr 1 w zakresie wydłużenia pierścieni oraz zmiany ich lokalizacji, liczby i ustawienia,
- modyfikacja nr 2 w zakresie wydłużenia pierścieni i ząbków oraz zmiana lokalizacji, liczby i ustawienia pierścienia wraz z utworzeniem nowego ząbka,

- modyfikacja nr 3 w zakresie zmiany rozmiarów pierścieni i ząbków oraz zmiana ich lokalizacji, liczby i kierunku,

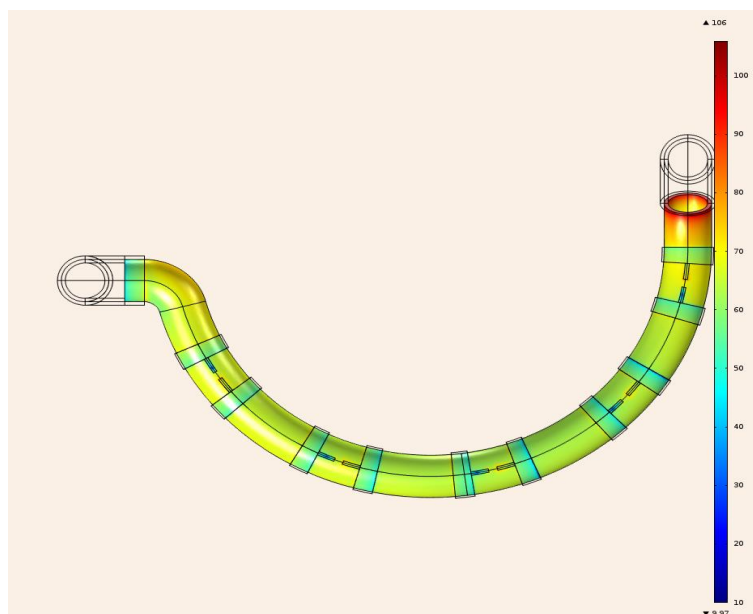
okazuje się, że zmiana liczby i wymiarów pierścieni oraz ząbków, a także analiza ich wpływu w stosunku do czterech krawędzi (bocznej, dolnej, górnej oraz bocznej z ząbkiem) pozwala uprościć konstrukcję iskiernika i obniżyć jego koszty, a co najważniejsze pozwala też osiągnąć bardziej równomierny rozkład natężenia pola elektrycznego, mimo większych jego wartości, które sprzyjają szybszemu rozwojowi iskry i lepszemu sterowaniu przeskokiem.



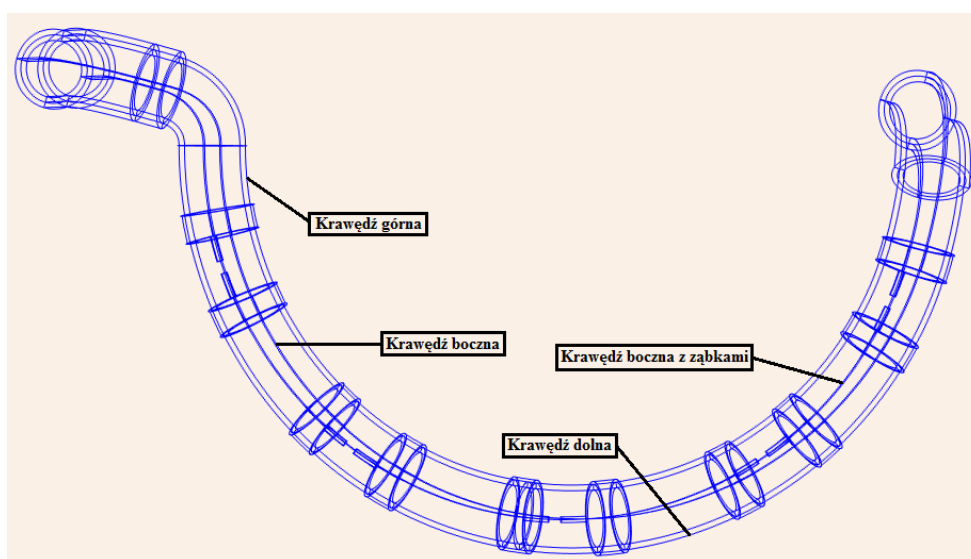
Rysunek 3. Model przekroju pętlowego iskiernika wieloelektrodowego (1 – pierścień, 2 – ząbek pierścienia, 3 – warstwa polietylenowa, 4 – krawędzie (krawędź boczna z ząbkiem oraz górna), 5 – metalowy zacisk, 6 – metalowa rurka)..

Podsumowując przeprowadzone symulacje w zakresie oceny wpływu liczby, kształtu oraz usytuowania pierścieni wraz z ząbkami na rozkład oraz poziom natężenia pola elektrycznego można stwierdzić, że:

1. Zostały przeprowadzone symulacje w zakresie pętlowego iskiernika wieloelektrodowego, wyłączając poszczególne jego pierścienie. Obserwowano rozkład natężenia pola elektrycznego na powierzchni modelu 3D iskiernika wykonanego w programie Comsol (rys. 4). Rozkład natężenia pola elektrycznego był nierównomierny, ulegając zmianie z każdym kolejnym wyłączeniem pierścienia. Natomiast z przeprowadzonych symulacji można wyciągnąć wniosek, że pierścienie sprzyjają lepszej koordynacji i kontroli poziomu natężenia pola elektrycznego na IW. Przeanalizowano również poziom natężenia pola elektrycznego dla czterech krawędzi IW według rys. 5. Największa wartość natężenia pola elektrycznego jest na krawędzi, gdzie są zainstalowane ząbki pierścieni, najmniejsza – na dolnej i bocznej.



Rysunek 4. Rozkład natężenia pola elektrycznego ($20 \cdot \log |E|$) na iskierniku wieloelektrodowym z wszystkimi aktywnymi pierścieniami.



Rysunek 5. Model 3D iskiernika wieloelektrodowego typu pętla w programie Comsol z wyszczególnieniem krawędzi.

2. Zostały wykonane symulacje w zakresie przyłożenia napięcie do poszczególnych pierścieni. Pomijając wyniki dla dwóch szczytowych wartości natężenia pola elektrycznego w zakresie pierścieni do których zostało przyłożone napięcie, sytuacja dla krawędzi dolnej, górnej oraz bocznej jest podobna. Natężenie na krawędzi bocznej z ząbkami osiąga maksymalne wartości natężenie pola elektrycznego dla dwóch szczytowych wartości w zakresie pierścienia do którego zostało przyłożone napięcie oraz do pozostałych pierścieni. Reasumując można stwierdzić, że wraz z przykładaniem napięcia do kolejnych pierścieni,

wartości szczytowe natężenia pola elektrycznego wzrastają dla wszystkich krawędzi (dla kolejnych pierścieni do których zostało przyłożone napięcie), natomiast sytuacja w zakresie różnicy pomiędzy tymi wartościami jest zróżnicowana i jest uzależniona od tego którą krawędź rozpatrujemy.

3. Zaproponowano kilka wariantów modyfikacji pętlowego iskiernika wieloelektrodowego.

3.1 Modyfikacja nr 1 w zakresie wydłużenia pierścieni oraz zmiany ich lokalizacji, liczby i ustawienia.

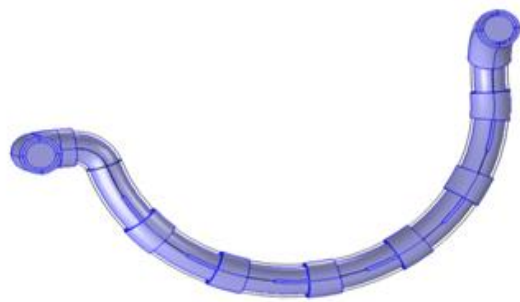
W wyniku symulacji w przypadku wszystkich aktywnych pierścieni forma wykresów rozkładu natężenia pola elektrycznego na powierzchni iskiernika wieloelektrodowego wskazuje, iż dokonane zmiany w ramach niniejszej modyfikacji nie wpływają na rozkład natężenia pola elektrycznego w znacznym stopniu.

3.2 Modyfikacja nr 2 w zakresie zmiany szerokości pierścieni, wydłużenia ząbków oraz zmiany lokalizacji, liczby i ustawienia pierścieni wraz z utworzeniem nowego ząbka.

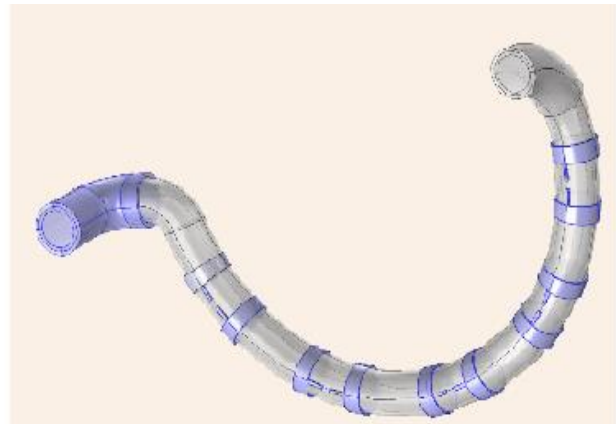
Dokonanie tej modyfikacji spowodowało, że na krawędzi bocznej z ząbkami wartość natężenia pola elektrycznego osiągnęła maksymalną wartość (około 6 kV/m). Wydłużenie ząbka oraz jego ukierunkowanie skutecznie wpływa na poziom oraz rozkład natężenia pola elektrycznego. Również z modyfikacji nr 2 można wyciągnąć wniosek że drugi ząbek nie powoduje znacznych zmian w zakresie rozkładu oraz poziomu natężenia pola elektrycznego.

3.3 Modyfikacja nr 3 w zakresie zmiany szerokości pierścieni oraz wydłużenia ząbków oraz zmiana lokalizacji, liczby i ustawienia pierścieni.

Przeprowadzona symulacja na podstawie modelu pętlowego iskiernika wieloelektrodowego została wykonana z uwzględnieniem otrzymanych wyników z poprzednich modyfikacji, co spowodowało, że na krawędzi bocznej z ząbkami wartość natężenia pola elektrycznego osiągnęła maksymalną wartość (około 11 kV/m).



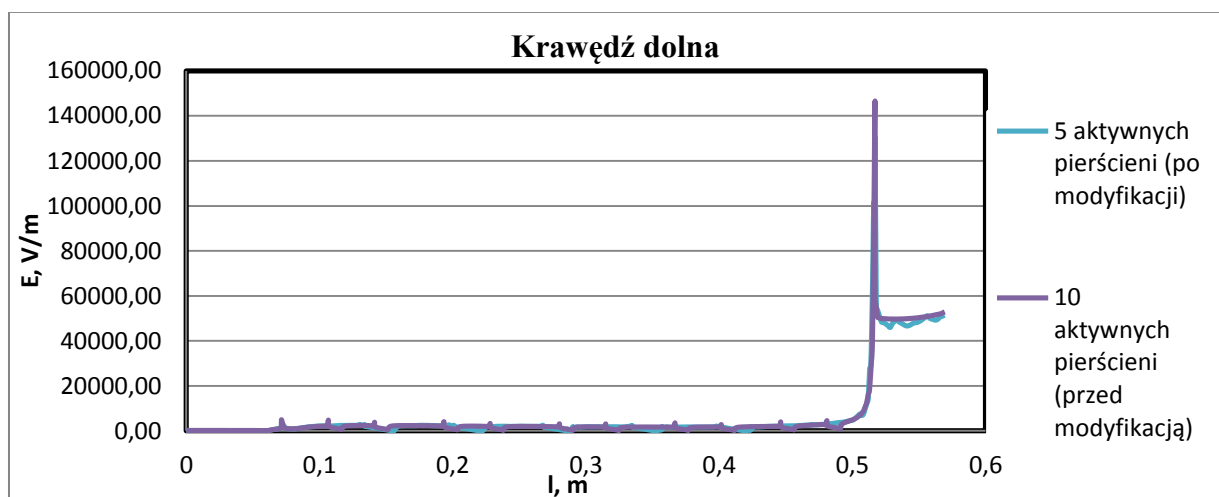
a)



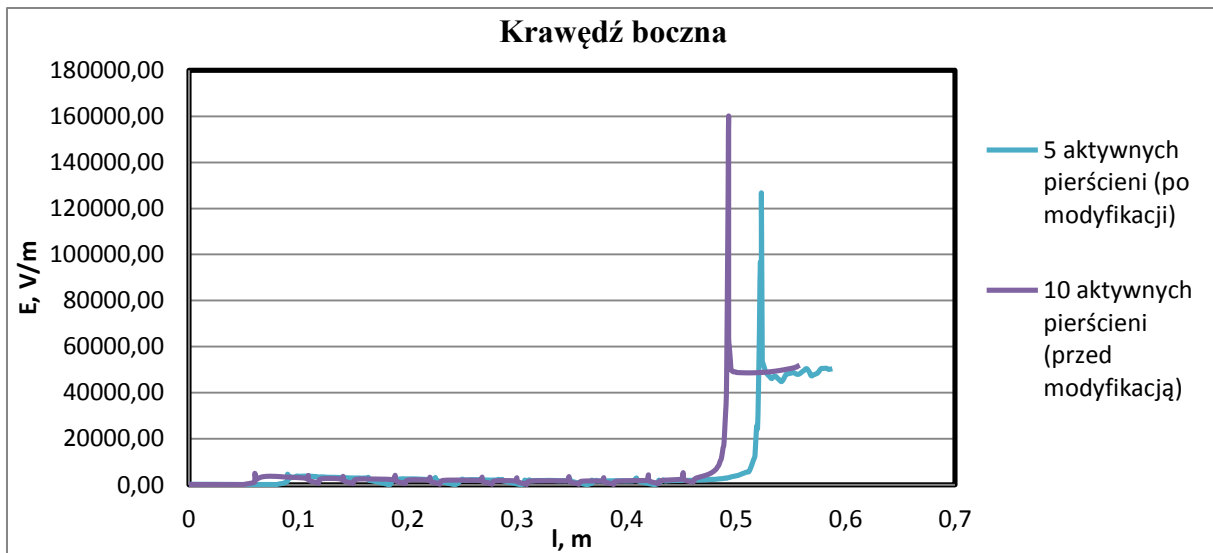
b)

Rysunek 6. Model 3D pętlowego iskiernika wieloelektrodowego po modyfikacji (początkowe założenia w zakresie liczby pierścieni w ramach modyfikacji nr 3) (a) oraz model 3D pętlowego iskiernika wieloelektrodowego przed modyfikacjami (b).

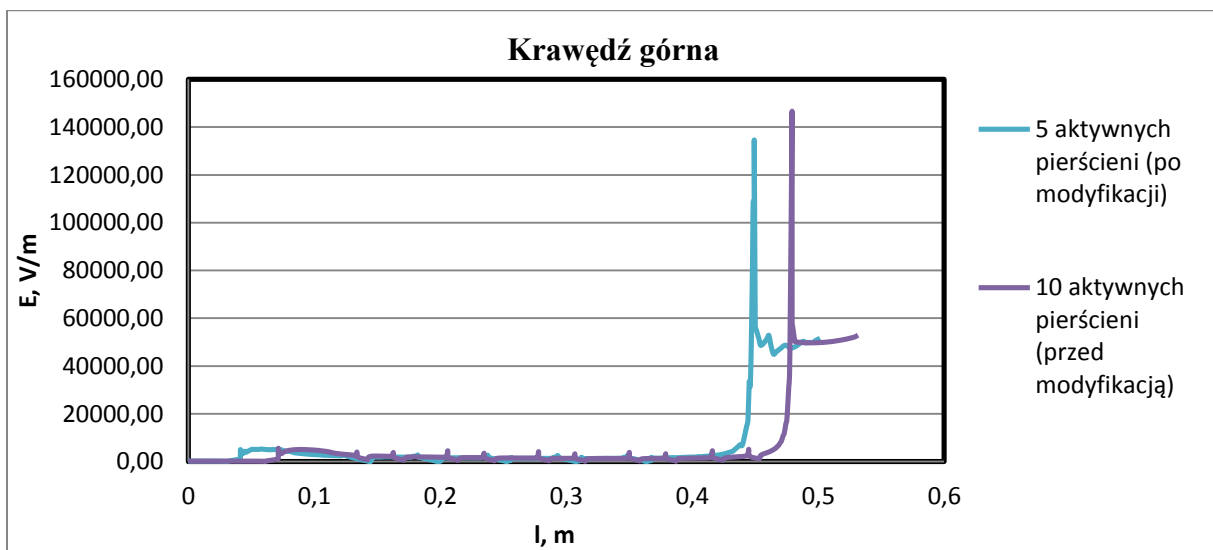
Na podstawie powyższych modyfikacji można wnioskować (rys. 6), że optymalnym rozwiązaniem jest iskiernik z trzema (minimalny koszt) lub pięcioma (optymalne rozwiązanie pod kątem poziomu natężenia pola) aktywnymi pierścieniami, co pozwala minimalizować koszty i zwiększyć poziom natężenia pola elektrycznego, co jest przedstawione na rysunkach 7-10, gdzie jest pokazane porównanie poziomu natężenia pola elektrycznego dla 10 aktywnych pierścieni przed modyfikacją i 5 aktywnych pierścieni po modyfikacji.



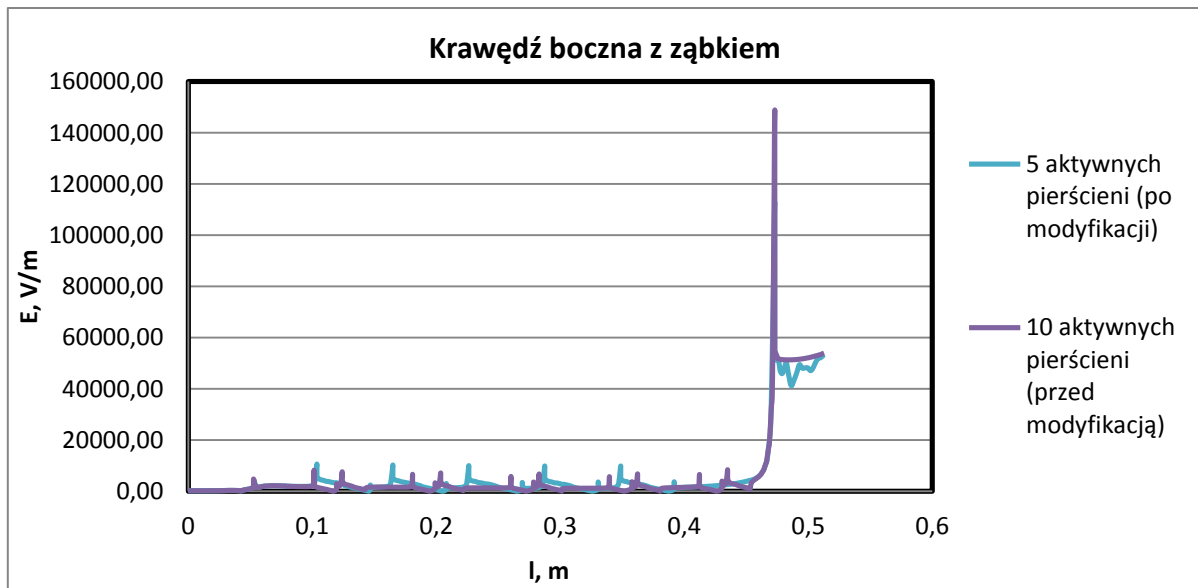
Rysunek 7. Wykresy poziomu natężenia pola elektrycznego na powierzchni pętlowego iskiernika wieloelektrodowego w odniesieniu do krawędzi dolnej w przypadku z pięcioma aktywnymi pierścieniami po modyfikacji oraz dziesięcioma aktywnymi pierścieniami przed modyfikacją.



Rysunek 8. Wykresy poziomu natężenia pola elektrycznego na powierzchni pętlowego iskiernika wieloelektrodowego w odniesieniu do krawędzi bocznej w przypadku z pięcioma aktywnymi pierścieniami po modyfikacji oraz dziesięcioma aktywnymi pierścieniami przed modyfikacją.



Rysunek 9. Wykresy poziomu natężenia pola elektrycznego na powierzchni pętlowego iskiernika wieloelektrodowego w odniesieniu do krawędzi górnej w przypadku z pięcioma aktywnymi pierścieniami po modyfikacji oraz dziesięcioma aktywnymi pierścieniami przed modyfikacją.



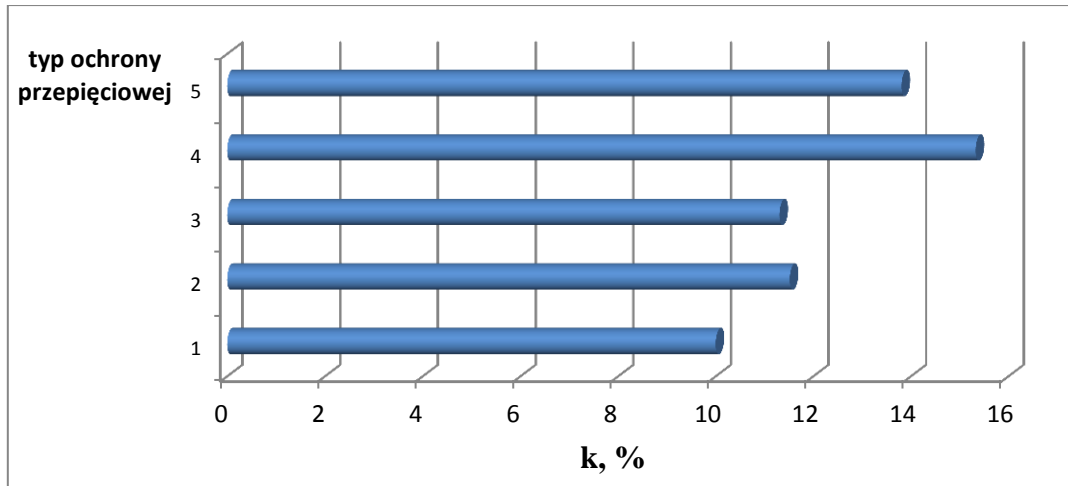
Rysunek 10. Wykresy poziomu natężenia pola elektrycznego na powierzchni pętlowego iskiernika wieloelektrodowego w odniesieniu do krawędzi bocznej z zębkiem w przypadku z pięcioma aktywnymi pierścieniami po modyfikacji oraz dziesięcioma aktywnymi pierścieniami przed modyfikacją.

Z powyższych wykresów poziomu i rozkładu natężenie pola elektrycznego kluczowym wynikiem jest osiągnięcie znacznie większych (około 50% większe) maksymalnych wartości skoków natężenia pola elektrycznego dla poszczególnych pierścieni po modyfikacji na krawędzi bocznej z zębkiem oraz utrzymanie porównywalnego poziomu natężenia pola elektrycznego na pozostałych krawędziach przed i po modyfikacji. W wyniku przeprowadzonych symulacji można kontynuować modyfikację w zakresie rozmieszczenia ząbków na pozostałych krawędziach co pozwoli na lepszą kontrolę poziomu natężenia pola elektrycznego na powierzchni izolacji iskiernika wieloelektrodowego.

W **szóstym rozdziale** dokonano analizy efektywności inwestycyjno-eksploatacyjnej przedstawionych w niniejszej rozprawie środków ochrony przeciwprzebiegowej oraz ocenę skuteczności przeprowadzonych modyfikacji pętlowego iskiernika wieloelektrodowego na podstawie zrealizowanych symulacji w zakresie wpływu liczby, kształtu oraz usytuowania pierścieni wraz z ząbkami na rozkład oraz poziom natężenia pola elektrycznego. Również przeprowadzono ogólną ocenę możliwości modyfikacji postanowień normatywnych w celu ich aktualizacji pod kątem pętlowych iskierników wieloelektrodowych.

Obliczenia wykonano, stosując program dla opracowania dokumentacji kosztorysowej według jednopoziomowego utworzenia cen zgodny ze zmieniającymi się przepisami prawnymi oraz technologiami budowlanymi ABK 2.8.5, a wyniki tych obliczeń

w procentowym ujęciu (w odniesieniu do ustalonej kwoty) przedstawiono na rys. 11. Wyraźnie widać, że na podstawie powyższych założeń – z ekonomicznego punktu widzenia – pętlowy iskiernik wieloelektrodowy jest tańszy od wybranych urządzeń ochrony przeciwprzebieciowej.



Rysunek 11. Diagram w ujęciu procentowym kosztów k wykonania 1 km linii napowietrznej średniego napięcia z przewodami niepełnoizolowanymi w zależności od rodzaju urządzenia ochrony przeciwprzebieciowej: 1 – pętlowe iskierniki wieloelektrodowe, 2 – odgromniki warystorowe z zewnętrzną przerwą iskrową, 3 – różki łukochronne, 4 – układ różków łukochronnych i odgromników warystorowych z zewnętrzną przerwą iskrową, 5 – układ różków łukochronnych i pętlowych iskierników wieloelektrodowych.

4. Podsumowanie i wnioski

W celu osiągnięcia celu prowadzonych rozważań, za jaki właśnie można uznać opracowanie modelu zmodyfikowanego środka ochrony, wykonano:

- ocenę zagrożenia piorunowego (prądowo-przebieciowego) elementów linii średniego napięcia z przewodami niepełnoizolowanymi,
- przegląd – spośród najbardziej rozpowszechnionych środków ochrony – ich właściwości w celu wytypowania tych spośród nich, które można zaliczyć do najbardziej przydatnych w ochronie rozpatrywanych linii,
- analizę warunków sprzyjających zarówno modyfikacji wskazanych środków ochrony, jak i ich stosowaniu w praktyce,
- porównanie matematycznego modelu i właściwości najbardziej popularnych i przyszłościowych środków ochrony: iskiernika wieloelektrodowego

i warystorowego odgromnika z przerwą iskrową w celu ustalenia, który z nich może zapewnić bardziej skuteczną ochronę linii przed przepięciami atmosferycznymi,

- opracowanie modelu wytypowanego środka ochrony (pętlowego iskiernika wieloelektrodowego) w programie Comsol, a także przeprowadzenia analizy rozkładu natężenia pola elektrycznego i jego poziomu,
- modyfikację – na podstawie dokonanych analiz – wybranego środka ochrony, zapewniającego bardziej korzystny rozkład natężenia pola elektrycznego i minimalizację kosztów ochrony,
- analizę efektywności inwestycyjno-eksploatacyjnej rozpatrywanych środków ochrony.

Najważniejszym indywidualnym osiągnięciem autora pracy jest wykorzystanie komputerowej symulacji rozkładu pola elektrycznego w pętlowym iskierniku wieloelektrodowym do optymalizacji jego konstrukcji, co pozwala uzyskać najlepszy (z ekonomicznego punktu widzenia) i wystarczająco skuteczny system ochrony linii napowietrznych średniego napięcia z przewodami niepełnoizolowanymi.

Przeprowadzone symulacje oraz ich wynik wskazują na potrzebę kontynuowania prac w zakresie modyfikacji konstrukcji modyfikacji pętlowego iskiernika wieloelektrodowego oraz opracowania podobnych iskierników innych typów.

Literatura

- [1] N SEP-E 003 Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Projektowanie i budowa. Linie prądu przemiennego z przewodami pełnoizolowanymi oraz z przewodami niepełnoizolowanymi.
- [2] Żownir J. M., Żownir O. P., „Projektowanie linii napowietrznych z przewodami niepełnoizolowanymi 6-35 kV”, PP „Stadnyk S.O.” 2010. 208 s. – Lviv.
- [3] Zdobysław Flisowski „Technika Wysokich napięć” Wydawnictwo WNT, 2009 r.
- [4] Chalilow F. H, Ewdokunin G. A. – „Ochrona sieci 6-35 kV od przepięć”. – St. Petersburg, 2002, 260 s.
- [5] Urządzenie dla ochrony od przepięć „Przemysłowy Kazachstan”, nr 4(64), kwiecień 2011 r.

- [6] Kryżanowski V. V., Nowikow A., Szmarago O. W.: "Ochrona odgromowa linii napowietrznych z odcinkami bez przewodów odgromowych", przegląd referatów RAO „JES”, "Nowe technologie w energetyce", wyd. JSC "Informenergo", 2002.
- [7] Wskazówki do projektowania sieci elektrycznych/wyd. D. L. Fajbisovicha – Wydawnictwo 2 Zmienione i dop. – M: Wydawnictwo NTS Enas, 2006. 352 s.
- [8] PN-EN 60099-5:1999 Ograniczniki przepięć. Zalecenia wyboru i stosowania.
- [9] Shanqiang Gu, Shuiming Chen, Rong Zeng, Weijiang Chen, "Discussion on Measures Against Lightning Breakage of Covered Conductors on Distribution Lines", IEEE Transactions on power delivery, vol. 23, no. 2, April 2008.
- [10] M. Borecki, B. Kuca, T. Kisielewicz, I. Tarimer, H. Lysiak, "Practices of lightning protection of medium-voltage overhead lines with covered conductors", Electrical Review, 2015.
- [11] Podporkin G. V., Pilshchikov W. E., Sivaev A.D., "O stosowaniu OPN do ochrony przeciwprzepięciowej linii napowietrznych 6-10 kV", OAO «NPO Strimer», Sankt-Petersburg, 16 July 2009.
- [12] PN-EN 60099-8:2011 Ograniczniki przepięć. Część 8: Ograniczniki przepięć z tlenków metali z zewnętrznymi iskiernikami szeregowymi (EGLA) do napowietrznych przesyłowych i rozdzielczych linii napięcia przemiennego w sieciach powyżej 1 kV.