

Zbigniew GACEK
Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów
Politechnika Śląska, Gliwice

KSZTAŁTOWANIE WYSOKONAPIĘCIOWYCH UKŁADÓW IZOLACYJNYCH WSPOMAGANE KOMPUTEROWO

Streszczenie. Przedmiotem rozważań jest metodyka nadawania cech geometrycznych wysokonapięciowym układom izolacji powietrznej i bezpowietrznej stosowanym w elektroenergetyce. Są to odstępy powietrzne w sieciach elektroenergetycznych SN i WN, niektóre izolatory liniowe i stacyjne, przepusty transformatorowe, kondensatory elektroenergetyczne i gazoszczelne przewody szynowe. Układy izolacyjne są kształtowane ze względu na wymagania elektryczne, cieplne i mechaniczne, a jedno z zagadnień jest zilustrowane przykładem obliczeniowym.

COMPUTER-AIDED SHAPING OF HIGH VOLTAGE INSULATING SYSTEMS

Summary. Methodology how to give geometrical features to high voltage aerial and non-aerial insulating systems used in power engineering is considered. The following systems are taken into account: air gaps within MV and HV power networks, some line and post insulators, transformer bushings, power condensers and gas-tight solid conductors. Insulating systems are shaped in respect of electric, thermal and mechanic requirements. One problem is illustrated by means of a calculation example.

1. WPROWADZENIE

Wysokonapięciowe układy izolacyjne, stosowane w sieciach oraz urządzeniach i aparatach elektrycznych, oddzielają tory prądowe różnych faz od siebie oraz od uziemionych części sieci, urządzenia lub aparatu. Powietrze jest tutaj traktowane alternatywnie:

- albo jako podstawowy ośrodek izolujący (tzw. izolacja powietrzna),
- albo jako materiał niepożądany i zastępowany innymi materiałami izolacyjnymi (tzw. izolacja bezpowietrzna).

Kryterium ogólnego podziału układów izolacyjnych jest możliwość samoczynnej regeneracji ich właściwości elektroizolacyjnych po zaniknięciu wyładowania zupełnego [3, 4, 10].

Postać konstrukcyjna układu izolacyjnego zależy w dużym stopniu od rodzaju sieci (napowietrzna, kablowa) lub urządzenia w stacji elektroenergetycznej, a ponadto od możliwości produkcyjnych, technologicznych i warunków eksploatacyjnych. Jest ona uwarunkowana wieloma czynnikami, często współzależnymi lub nawet przeciwnymi. Dlatego też w praktyce stosuje się na ogół rozwiązania kompromisowe.

Artykuł zawiera wiadomości dotyczące metodyki kształtowania lub wymiarowania wysokonapięciowych układów izolacyjnych stosowanych w elektroenergetyce, wykonywanego ze wspomaganie komputerowym. Kształtowanie, będące istotną częścią projektowania i konstruowania, jest rozumiane jako proces nadawania izolacji cech geometrycznych -

kształtu i charakteryzujących go wymiarów. Jest ono dokonywane zarówno ze względu na wymagania elektryczne, jak cieplne i mechaniczne (tam gdzie to niezbędne).

Zakres tematyczny artykułu obejmuje zasadnicze zagadnienia projektowe oraz pobieżny przegląd procedur obliczeń niektórych układów izolacji powietrznej i bezpowietrznej. Zamieszczono również przykład obliczeniowy dotyczący przepustu transformatorowego, kształtowanego ze względu na kryteria wynikające z wymagań elektrycznych. Szczegółowe informacje dotyczące kształtowania układów izolacyjnych można znaleźć w [5].

2. OGÓLNE ZASADY KSZTAŁTOWANIA UKŁADÓW IZOLACYJNYCH

Wymiary, kształt i rozwiązanie konstrukcyjne wysokonapięciowego układu izolacyjnego są uzależnione od jego przeznaczenia, miejsca zainstalowania i stawianych mu wymagań technicznych. Poprawnie zaprojektowany, skonstruowany i wykonany układ izolacyjny powinien mieć przede wszystkim odpowiednie właściwości elektryczne, ale nie umniejsza to znaczenia pozostałych wymagań technicznych, szczególnie dotyczących właściwości cieplnych (układy izolacji bezpowietrznej) i mechanicznych (układy konstrukcyjne izolatorów).

Kryteria doboru i kształtowania izolacji ze względu na wymagania elektryczne zależą głównie od tego, czy jest ona izolacją powietrzną (regenerującą się), czy bezpowietrzną (nie regenerującą się) oraz od spodziewanych warunków pracy w czasie eksploatacji. Kryteria te sprowadzają się do kilku ogólnych postulatów, które mają na celu:

- 1) efektywne wykorzystanie właściwości elektroizolacyjnych materiałów,
- 2) uniknięcie wyładowań niepełnych w normalnych warunkach roboczych,
- 3) zagwarantowanie wystarczającej wytrzymałości elektrycznej długotrwałej (w stanie normalnej pracy) i krótkotrwałej (podczas przebiegów).

Sposoby realizacji tych postulatów są dość zróżnicowane. Dwa pierwsze postulaty mają charakter ogólny i dotyczą przede wszystkim izolacji bezpowietrznej. W praktyce są realizowane przez umiemy dobór materiałów elektroizolacyjnych (jedno- lub wielowarstwowych) oraz sterowanie rozkładem pola elektrycznego metodą rezystancyjną lub pojemnościową [4]. Dzięki stosowaniu izolacji kombinowanej i sterowaniu można konstruować układy izolacyjne o relatywnie niewielkich wymiarach, zdolne wytrzymać duże natężenie pola elektrycznego bez wyładowań niepełnych i zwarć (wskutek przeskoków i przebiegów), a ponadto wystarczająco odporne na procesy starzeniowe.

Trzeci postulat związany jest z wytrzymałością elektryczną długotrwałą, będącą miarą odporności izolacji na napięcie robocze w warunkach eksploatacyjnych i krótkotrwałą elektryczną wytrzymałością, będącą miarą odporności izolacji na różnorodne przebiegi. Ogólne wymagania w zakresie wytrzymałości elektrycznej izolacji wynikają z zasad współczesnej koordynacji izolacji, które umożliwiają wybór znormalizowanych napięć wytrzymywanych (probiernych) dla układów izolacyjnych w sieciach, urządzeniach i aparatach [3]. W normie [10] rozróżnia się dwa zróżnicowane zakresy napięciowe: zakres o najwyższym napięciu roboczym sieci $U_m \leq 245$ kV i zakres o najwyższym napięciu roboczym sieci $U_m > 245$ kV. W sieciach średnich i wysokich napięć decydującą rolę w procesie kształtowania i doboru izolacji odgrywają przebiegi piorunowe, a w sieciach najwyższych napięć – przebiegi łączeniowe.

Podstawowe wymaganie wytrzymałościowe stawiane izolacji w danym punkcie sprowadza się w uproszczeniu do warunku, aby największe natężenie pola elektrycznego – wynikające z jednego spośród przewidywanych obciążeń napięciowych, nie przekraczało w żadnym miejscu wartości dopuszczalnej (długotrwałe lub krótkotrwałe). Przez natężenie dopuszczalne rozumie się taką wartość natężenia pola elektrycznego, które nie powoduje jeszcze zjawisk prowadzących do utraty lub wyraźnego pogorszenia istotnych właściwości układu. Natężenie pola elektrycznego dopuszczalne długotrwałe warunkują różnorodne zjawiska starzeniowe, powodowane różnymi oddziaływaniami eksploatacyjnymi. Natężenie pola

elektrycznego dopuszczalnego krótkotrwale związane jest przede wszystkim z wytrzymałością elektryczną krótkotrwale izolacji, sprawdzaną podczas badań laboratoryjnych napięciami probierczymi. Wartości tego natężenia pola należy ustalać w taki sposób, aby ryzyko przeskoku lub przebicia było minimalne.

Kształtowanie izolacji ze względu na wymagania elektryczne może być wykonywane:

- albo na podstawie jednego ze wzorów empirycznych opisujących współzależności między napięciami przeskoku a długością odstepu izolacyjnego w zastępczym układzie elektrod (izolacja powietrzna, olejowa i gazowa ciśnieniowa);
- albo na podstawie ogólnej zależności między znormalizowanym napięciem wytrzymałym a iloczynem grubości izolacji i natężenia pola elektrycznego dopuszczalnego dla określonej wartości współczynnika nierównomierności pola (izolacja powietrzna i bezpowietrzna jednorodna o małych i umiarkowanych grubościach).

Układy izolacyjne ukształtowane i zwymiarowane ze względu na wymagania elektryczne wymagają na ogół sprawdzenia, czy dobrze odprowadzają na zewnątrz wydzielające się w nich ciepło. W praktyce inżynierskiej uwzględnia się najczęściej wymaganie, aby proces chłodzenia odbywał się w przedziale temperatur wyznaczonym przez najwyższe dopuszczalne temperatury układu izolacyjnego i otoczenia [6]. Jest to szczególnie istotne dla izolacji bezpowietrznej, potencjalnie zagrożonej przebieciem cieplnym [3, 4]. Obliczenia termokinetyczne są wprawdzie zazwyczaj skomplikowane, ale nie muszą być wykonywane w pełnym zakresie. Głównym celem obliczeń cieplnych kontrolnych jest określenie temperatury w najbardziej nagrzanym miejscu układu izolacyjnego i porównanie jej z najwyższą dopuszczalną temperaturą izolacji (długo- lub krótkotrwale). Obliczenia mają często charakter iteracyjny, toteż chętnie korzysta się z metod numerycznych i programów komputerowych.

Wysokonapięciowe układy izolacyjne są dość często konstrukcjami przeznaczonymi zarówno domechanicznego mocowania, jak i elektrycznego izolowania, dlatego też powinny być sprawdzane ze względu na wymagania mechaniczne dotyczące zdolności do przyjmowania obciążeń zewnętrznych bez nadmiernych odkształceń lub zniszczenia [7]. Podstawowy warunek wytrzymałościowy można wyrazić albo w postaci lokalnej (w odniesieniu do wybranego punktu), albo w postaci całościowej (w odniesieniu do całości konstrukcji). W pierwszym przypadku żąda się, aby naprężenia rzeczywiste w miejscu najbardziej niebezpiecznym nie przekraczały naprężeń dopuszczalnych, a w drugim – częściej stosowanym w praktyce inżynierskiej – aby obciążenia działające na całą konstrukcję nie przekraczały wartości dopuszczalnych.

Typowymi konstrukcjami przeznaczonymi do mechanicznego mocowania i elektrycznego izolowania elementów osprzętu elektrycznego lub przewodów, między którymi występuje różnica potencjałów, są izolatory elektroenergetyczne. Różnią się one między sobą pod względem funkcjonalnym, wymiarowym i materiałowym [8]. Izolatory mogą być obciążone siłami ściskającymi lub rozciągającymi oraz momentami zginającymi lub skręcającymi. Dlatego też w obliczeniach sprawdzających uwzględnia się różne składniki obciążenia i wartości współczynnika bezpieczeństwa; obciążenie mechaniczne izolatora nie może przekraczać wartości dopuszczalnej, wynikającej ze znamionowej wytrzymałości podzielonej przez współczynnik bezpieczeństwa.

Specyficznym rodzajem obciążenia krótkotrwalego, m.in. izolatorów wsporczych i przepustowych, są siły dynamiczne od prądów zwarciovych. Skutkami działania takich sił dynamicznych są: naprężenia zginające w przewodach sztywnych, naciągi i wychylenia przewodów giętkich oraz zginanie izolatorów wsporczych i osłon izolacyjnych. Metody wyznaczania takich obciążeń oraz wynikających stąd naprężeń i naciągów są opisane w normie [12], odpowiadającej normie IEC 865.

3. PRZEGLĄD PROCEDUR OBLICZEŃ NIEKTÓRYCH UKŁADÓW IZOLACJI POWIETRZNEJ I BEZPOWIETRZNEJ

Poniżej dokonano pobieżnego przeglądu komputerowych procedur kształtowania następujących układów izolacji powietrznej i bezpowietrznej:

- u1) odstępów powietrznych w sieciach elektroenergetycznych SN i WN z przewodami gołymi,
- u2) niektórych izolatorów liniowych (wiszących długopniowych i kołpakowych) oraz izolatorów stacyjnych wsporczych i przepustowych,
- u3) przepustów transformatorowych typu kondensatorowego o izolacji twardej i miękkiej,
- u4) niektórych kondensatorów elektroenergetycznych o izolacji papierowej i mieszanej,
- u5) jednobiegunowych gazoszczelnych przewodów szynowych izolowanych sprężonym SF₆.

Przedstawione procedury obliczeń opracowano w Instytucie Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej. Są one napisane w środowisku programowania Delphi 5 i mogą być uruchamiane na komputerach z zainstalowanym systemem operacyjnym Windows'95 lub nowszym, wyposażonych w monitor o rozdzielczości ekranu co najmniej 800x600. W rozważaniach pominięto nie do końca jeszcze zalgorytmizowane procedury kształtowania izolacji kabli elektroenergetycznych (oraz muf i głowic kablowych), a ponadto złożonych układów izolacji wewnętrznej transformatorów i specyficznych układów izolacyjnych stosowanych w aparatach i maszynach elektrycznych.

Wymiary (długości) izolacyjnych odstępów powietrznych w sieciach elektroenergetycznych (u1) są zróżnicowane¹. Decydują o tym przede wszystkim:

- najwyższe napięcie sieci (U_s) lub urządzenia (U_m),
- rodzaj elementu składowego sieci (linia napowietrzna lub stacja elektroenergetyczna),
- znamionowy poziom izolacji, czyli zbiór znormalizowanych napięć wytrzymywanych,
- rodzaj i metalowych elementów między którymi występuje różnica potencjałów (o kształcie zbliżonym przeważnie do ostrzowego).

Najmniejsze dopuszczalne odległości pionowe przewodów elektroenergetycznej linii napowietrznej od powierzchni ziemi przy największym zwisie normalnym i katastrofalnym wynikają ze wzorów zawartych w normie [11]. Najmniejsze dopuszczalne odstępy izolacyjne w powietrzu w konwencjonalnych rozdzielnicach wewnętrznych i napowietrznych wynikają z przepisów budowy urządzeń elektroenergetycznych; można je znaleźć m.in. w poradniku [9]. Zależą one od napięcia znamionowego i rodzaju rozwiązania konstrukcyjnego rozdzielnic (wewnętrzna lub napowietrzna).

Podstawą wymiarowania odstępów powietrznych w sieciach elektroenergetycznych jest uproszczony warunek ogólny, aby średnie przemienne napięcie przeskoku oraz 50–procentowe udarowe napięcie przeskoku (piorunowe i łączeniowe) nie było mniejsze od załżonego napięcia obliczeniowego [5]. Napięcia przeskoku można obliczyć ze wzorów empirycznych dla zastępczych układów elektrod. Napięcie obliczeniowe traktuje się albo jako doziemne napięcie robocze sieci, albo jako jedno ze znormalizowanych napięć wytrzymywanych w zadanych warunkach probierczych.

Przed przystąpieniem do kształtowania izolacyjnego odstepu powietrznego należy:

- podać napięcie robocze linii napowietrznej lub stacji sieci (np. przez zadeklarowanie napięcia U_m),
- skojarzyć znamionowy poziom izolacji z napięciem U_m ,

¹ Nie rozpatruje się tutaj linii elektroenergetycznych z przewodami w osłonie izolacyjnej oraz stacji z rozdzielnicami izolowanymi sprężonym SF₆.

- wybrać układ zastępczy elektrod jako model obliczeniowy rzeczywistego układu izolacyjnego (np. pręt – pręt, pręt – płyta uziemiona).

Długość odstepu oblicza się za pomocą wybranego wzoru empirycznego [5]. Takie postępowanie jest uzasadnione dla niezbyt dużych odstępów (do ok. 2,5 - 3m) charakterystycznych dla zakresu napięciowego I ($1 \text{ kV} < U_m \leq 245 \text{ kV}$).

Powietrzne odstepy w sieciach bardzo wysokich i najwyższych napięć wyznacza się albo metodą statystyczną (uwzględniając dopuszczalne ryzyko przeskoku), albo za pomocą specyficznych wzorów empirycznych wyrażających krytyczne minimalne 50-procentowe udarowe napięcie przeskoku (znormalizowane udary łączeniowe) w zależności od długości odstepu, np. za pomocą wzoru Galleta-Leroy'a [3, 4, 5].

Do obliczania minimalnych odstępów powietrznych w liniach elektroenergetycznych opracowano procedurę obliczeniową ODSTĘPY. Należy podkreślić, że długości odstępów powietrznych stosowanych w praktyce są większe niż wynikałoby z takich obliczeń, ponieważ ich wytrzymałość elektryczna nie jest jedynym i wystarczającym kryterium wymiarowania.

Warunek ogólny wyznaczania długości lub wysokości izolatorów elektroenergetycznych (u2) jest taki sam jak dla odstępów powietrznych, ale należy uwzględnić również [5, 8]:

- 1) warunek zapewniający wystarczającą wytrzymałość²⁾ elektryczną izolatorów przy napięciu pobierczym przemiennym w deszczu,
- 2) warunek zapewniający wystarczającą wytrzymałość⁴⁾ elektryczną powierzchniową w określonej strefie zabrudzeniowej.

Wysokonapięciowe izolatory elektroenergetyczne nie są na ogół poddawane obliczeniom cieplnym, ale muszą poddać się sprawdzeniu ze względu na właściwości mechaniczne.

Do kształtowania izolatorów elektroenergetycznych liniowych wiszących długo-pniowych, izolatorów wsporczych cylindrycznych (z okuciami zewnętrznymi i wewnętrznymi) oraz izolatorów przepustowych stacyjnych sworzniowych można wykorzystać komputerową procedurę obliczeniową IZOLATORY (pakiet kilku programów).

Aby ukształtować izolator liniowy wiszący długopniowy należy:

- wprowadzić dane wejściowe (U_n , U_m , U_{prob} oraz pozostałe parametry elektryczne, konstrukcyjne i mechaniczne izolatora);
- obliczyć długość części izolacyjnej w powietrzu między okuciami;
- określić najmniejszą długość drogi upływu;
- oszacować długość drogi przeskoku w deszczu;
- wybrać długość części izolacyjnej, a następnie ustalić średnicę pnia i obliczyć długość jego końcówek montażowych;
- obliczyć całkowitą długość montażową i przyjąć jedną z wartości znormalizowanych;
- obliczyć liczbę kloszy, podziałkę kloszową, wysięg i średnicę klosza izolatora.

Kształtowanie izolatorów stacyjnych wsporczych pniowych ze względu na wymagania elektryczne obejmuje wyznaczenie następujących parametrów geometrycznych: długości części izolacyjnej (odstepu między okuciami w powietrzu), liczby kloszy lub żeber, wymiarów i kształtów kloszy. Obliczenia w zakresie wytrzymałości mechanicznej mają na celu wyznaczenie średnicy pnia i wymiarów głównych okuć (przede wszystkim stopy).

Zgodnie z procedurą obliczeniową IZOLATORY, aby ukształtować izolator wsporczy pniowy napowietrzny należy:

- wprowadzić szczegółowe dane wejściowe i obliczyć długość części izolacyjnej w powietrzu między okuciami (jak w przypadku izolatorów liniowych długopniowych);
- określić najmniejszą długość drogi upływu i długość drogi przeskoku w deszczu;
- wybrać długość odstepu między okuciami izolatora;
- obliczyć minimalną liczbę kloszy oraz podziałkę kloszową i wysięg klosza;
- obliczyć średnicę pnia izolatora, a następnie wysokość wpustu pnia w okucie dolne i górne oraz średnicę klosza;
- obliczyć przybliżoną wysokość izolatora wsporczego z okuciami zewnętrznymi.

Zgodnie z procedurą obliczeniową IZOLATORY, aby ukształtować izolator stacyjny przepustowy sworzniowy, należy:

- wprowadzić szczegółowe dane wejściowe i obliczyć grubość ścianki korpusu porcelanowego oraz promień sworznia przepustu;
- obliczyć długość drogi przeskoku w powietrzu oraz średnicę wewnętrzną i zewnętrzną osłony porcelanowej;
- obliczyć naprężenie zginające, porównać go z wartością dopuszczalną i kontynuować obliczenia iteracyjne aż do spełnienia warunku wytrzymałościowego;
- sprawdzić grubość ścianki korpusu porcelanowego, posługując się wymaganiami w zakresie wytrzymałości elektrycznej na przebicie.

W procesie kształtowania wysokonapięciowych przepustów typu kondensatorowego (u_3) uwzględnić się następujące wymagania:

- elektryczne, dotyczące obciążalności toru prądowego oraz wytrzymałości elektrycznej izolacji i dopuszczalnej intensywności wyładowań niezupełnych,
- cieplne, dotyczące wymiany ciepła z otoczeniem w warunkach roboczych i zwarciovych,
- mechaniczne, dotyczące wytrzymałości mechanicznej elementów nośnych konstrukcji i naprężeń w uszczelnieniach (w szerokim przedziale temperatur).

Izolację wysokonapięciowego przepustu transformatorowego kształtuje się przede wszystkim na podstawie wyników obliczeń, w których uwzględnia się wymagania elektryczne stawiane rdzeniowi izolacyjnemu oraz górnej i dolnej osłonie izolacyjnej. Najważniejszymi właściwościami elektrycznymi, charakteryzującymi układ izolacji przepustu, są co najwyżej umiarkowana nierównomierność pola elektrycznego i wysokie napięcie zapłonu wyładowań niezupełnych na końcach ekranów sterujących.

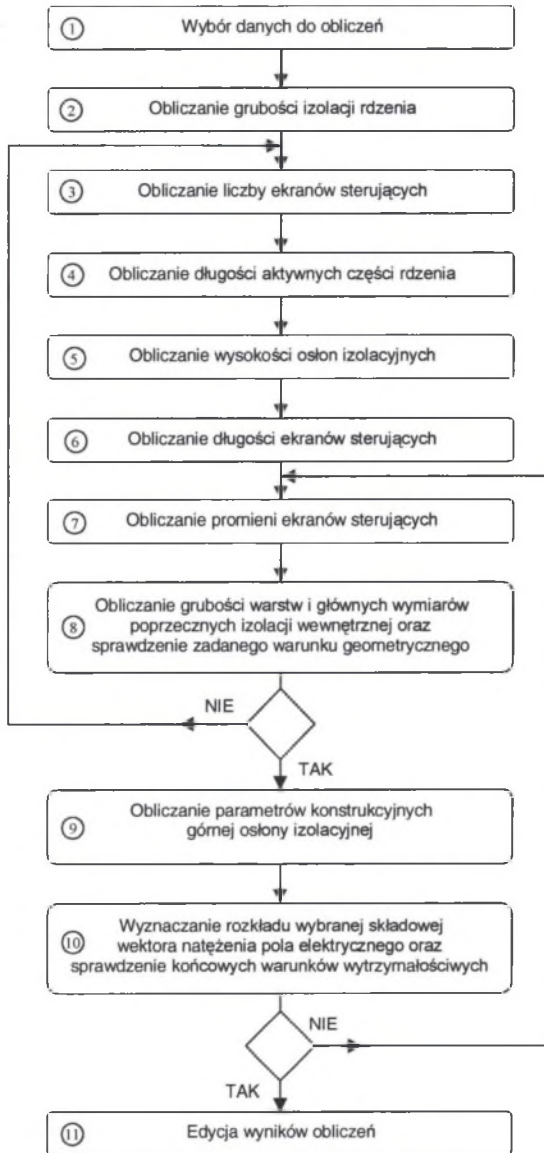
Czynności wykonywane kolejno podczas procesu kształtowania wysokonapięciowych przepustów transformatorowych typu kondensatorowego przedstawione są na rys. 1, a wynikające stąd zasady kształtowania izolacji przepustów transformatorowych wykorzystano do opracowania komputerowej procedury obliczeniowej PPK (patrz przykład obliczeniowy).

Część procedury PPK dotyczącą obliczeń cieplnych sprawdzających opracowano na podstawie zastępczego modelu obwodowego [5]. Wynik sprawdzania przepustu pod względem wymagań w zakresie obciążalności prądowej długotrwałej jest negatywny, jeśli temperatura otoczenia – jaką należałoby wymusić – jest niższa od znormalizowanej najwyższej temperatury otoczenia. Należy wtedy albo przyjąć mniejszy prąd znamionowy przepustu, albo zwiększyć przekrój rury nośnej rdzenia izolacyjnego i powtórzyć wszystkie obliczenia projektowe.

Częścią procedury PPK jest również procedura obliczeń mechanicznych sprawdzających, w których zakłada się, że: całe obciążenie jest przejmowane przez górną osłonę izolacyjną, układ izolacji wewnętrznej nie jest obciążony mechanicznie, największe siły zginające występują podczas zwarcia, a największe naprężenia mechaniczne - przy kołnierzu przepustu. Obliczenia mechaniczne wykonuje się w kilku kolejnych etapach, z których najważniejszy to porównanie wartości obliczonej i wartości dopuszczalnej naprężenia zginającego w przekroju niebezpiecznym, znajdującym się przy kołnierzu przepustu.

Kolejność czynności w procesie kształtowania układów izolacyjnych kondensatorów elektroenergetycznych (u_4) powinna być następująca:

- 1) wybór materiału lub materiałów elektroizolacyjnych,
- 2) wybór najwyższego dopuszczalnego roboczego natężenia pola elektrycznego,



Rys. 1. Etapy kształtowania wysokonapięciowych przepustów transformatorowych typu kondensatorowego

Fig. 1. Stages of shaping of HV condenser transformer bushings

- 3) obliczenie grubości izolacji między okładzinami głównymi i liczby zwojów połączonych szeregowo,
- 4) obliczenie wymiarów i liczby zwojów połączonych równolegle,
- 5) rozplanowanie układu zwojów (pakietowanie) i uściślenie wymiarów kondensatora.

W celu wyznaczenia wymiarów geometrycznych zwojki należy kolejno obliczyć: rzeczywistą grubość dielektryka, wypadkową przenikalność elektryczną względną układu izolacyjnego oraz pojemność, średnicę zewnętrzną i liczbę zwojów w zwojce. Znając grubość izolacji w jednej zwojce oraz pojemność jednej zwojki i całego kondensatora, można obliczyć liczbę zwojów w pakiecie połączonych szeregowo i połączonych równolegle.

Kompozycja izolacji wewnętrznej kondensatora zależy od kształtu zwijki, położenia wyprowadzeń z okładzin zwijek i estetyki konstrukcji. Pionowe ułożenie zwijek w pakiecie ułatwia odprowadzenie ciepła, co jest szczególnie istotne w przypadku zwijek z dielektrykiem papierowym. Pakiety muszą być izolowane od metalowych kadzi kondensatorów. Wymiary pakietu oblicza się znając wymiary zwijki, liczbę zwijek i układy ich połączeń oraz grubość wyprowadzeń, ślepych zwojów i przekładek między grupami zwijek.

Izolację kondensatorów kształtuje się przede wszystkim na podstawie wyników obliczeń dotyczących wymagań elektrycznych, ale konieczne są również obliczenia cieplne sprawdzające. Do kształtowania układów izolacyjnych kondensatorów przeznaczonych do kompensacji mocy bierniej służy procedura obliczeniowa KONDENSATOR.

Gazoszczelny przewód szynowy (izolowany sprężonym SF_6) musi spełniać jednocześnie kilka nieraz znacznie różniących się od siebie wymagań technicznych dotyczących wytrzymałości elektrycznej i mechanicznej oraz odporności cieplnej i jakości wykonania. Procedura obliczeń elektrycznych, mających na celu kształtowanie układów izolacyjnych w jednobiegunowym gazoszczelnym przewodzie szynowym (u5), sprowadza się do doboru stosownej kombinacji skoordynowanych wymiarów poprzecznych elektrod (szyny prądowej i osłony zewnętrznej) oraz izolatorów odstępnikowych i grodziowych. Układem geometrycznym elektrod jest układ walcowy współosiowy (identyczny w trzech fazach przewodu), a podstawowe kryteria wymiarowania izolacji gazowej przewodów wynikają z kilku warunków wytrzymałościowych [4, 5]. Procedura określania minimalnego promienia wewnętrznego osłony przewodu dla zadanego promienia toru prądowego polega na sprawdzeniu, czy:

gazowy odstęp izolacyjny ma wystarczającą wytrzymałość przy najwyższym napięciu urządzenia, znormalizowanych napięciach probierczych i ciśnieniu roboczym SF_6 oraz przy najwyższym napięciu urządzenia i awaryjnym wycieku gazu, obliczona długość odstępu gazowego, odpowiadająca średnicy zewnętrznej izolatora odstępnikowego lub grodziowego, nie jest zbyt mała.

Do wyznaczania minimalnych odstępów izolacyjnych między szyną prądową a osłoną zewnętrzną przewodu opracowano procedurę obliczeniową IZOLACJA, będącą jednym ze składników pakietu optymalizacyjnych procedur obliczeniowych i programu komputerowego SZYNY.² Istnieje również procedura NPS_JH1 do wykonywania obliczeń cieplnych w warunkach roboczych i zwarciovych, umożliwiającą obliczenie:

- strat mocy w szynie prądowej i osłonie zewnętrznej (w tym strat dodatkowych),
- mocy odprowadzanych z szyny prądowej i osłony przewodu,
- oporów cieplnych wynikających z obwodowego modelu zastępczego,
- temperatur w zadanych punktach układu dla bieżących wartości jego parametrów.

Wynikiem obliczeń cieplnych sprawdzających przewodu obciążonego prądem roboczym i – alternatywnie – prądem zwarciovym są temperatury szyny prądowej wyższe od temperatur osłony zewnętrznej. Temperatury te decydują o dopuszczalności danego rozwiązania konstrukcyjnego przewodu ze względu na wymagania cieplne.

Obliczenia sprawdzające wytrzymałość mechaniczną wybranych elementów konstrukcyjnych przewodów szynowych należy wykonywać przede wszystkim ze względu na dwa najważniejsze i całkowicie różniące się oddziaływania mechaniczne, będące efektem:

- a) wpływu sił ciężkości (w warunkach statycznych),
- b) dynamicznego przyrostu ciśnienia gazu wskutek zwarcia wewnątrz przedziału przewodu.

Opracowano metody i procedury obliczeniowe DYSK_MECH i KIEL_MECH, służące do wyznaczania naprężenia powstającego w izolatorach dyskowych i kielichowych wskutek dynamicznego przyrostu ciśnienia gazu podczas zwarcia wewnątrz przedziału przewodu.

² Program obliczeniowy SZYNY służy do kształtowania układów izolacyjnych jednobiegunowych gazoszczelných przewodów szynowych ze względu na wymagania elektryczne (niezawodnościowe), mechaniczne i cieplne. Program powstał na podstawie ujednoliconych procedur obliczeniowych IZOLACJA, PRESSURE, NIEZAWODNOŚĆ, DYSK_MECH i DYSK_KIEL (zapisanych wcześniej w środowisku MATHCAD 6) oraz procedury CIEPŁO (powstałej z przekształcenia procedury NPS_JH1, zapisanej wcześniej w języku Pascal 5).

4. PRZYKŁAD OBLICZEŃ

Należy obliczyć parametry decydujące o ukształtowaniu izolacji wysokonapięciowego przepustu transformatorowego o izolacji miękkiej, typu kondensatorowego (rys. 2), uwzględniając wymagania elektryczne stawiane izolacji przepustu o następujących danych znamionowych: napięcie znamionowe $U_r = 123$ kV, prąd znamionowy $I_r = 630$ A, napięcie przemienne wytrzymywane krótkotrwanie $U_{w(j=2)} = 230$ kV, napięcie wytrzymywane piorunowe $U_{w(j=3)} = 550$ kV. Pozostałe dane wejściowe: średnica zewnętrzna rury nośnej $2r_0 = 35$ mm, największa grubość pierwszej warstwy izolacyjnej rdzenia $a_{i\max} = 1$ mm, umowna długość osiowa kołnierza $l_k = 150$ mm, obie osłony porcelanowe, pole elektryczne sterowane według kryterium stałej składowej osiowej E_r [4, 5].

Obliczenia rozpoczyna się od określenia grubości pasywnej części rdzenia izolacyjnego (etap 2 na rys. 1), czyli całkowitej grubości izolacji rdzenia jako wartości największej spośród a_j (j – wskaźnik rodzaju napięcia) według uogólnionego wzoru:

$$a_j = \sum_{i=0}^n a_{i(j=1,2,3)} = \frac{\beta U_{obl(j=1,2,3)}}{E_{rd(j=1,2,3)}}, \quad (1)$$

w którym:

n – liczba czynnych warstw izolacyjnych (ekranów sterujących) w rdzeniu,

$a_i = r_i - r_{i-1} = \text{var}$ – grubość jednej warstwy izolacyjnej w mm,

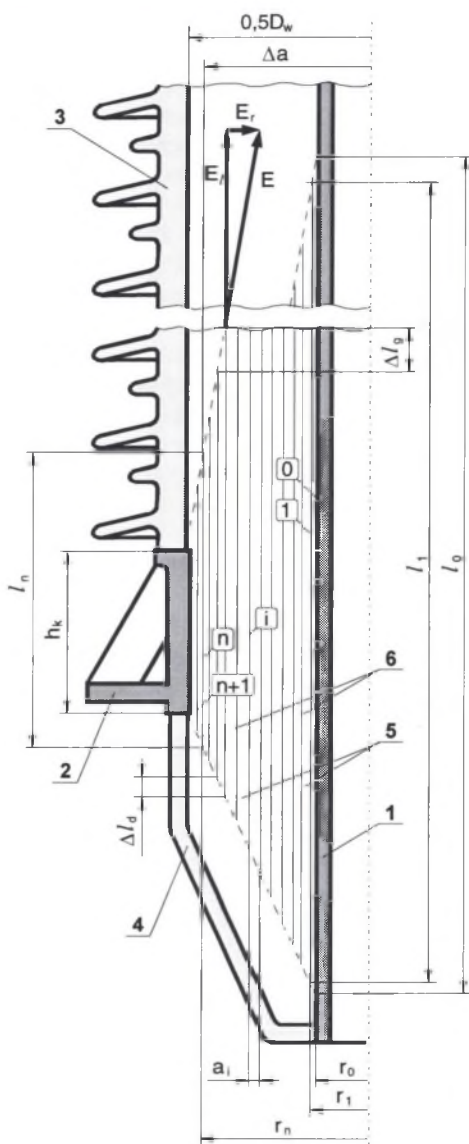
$\beta = E_{r\max}/E_{r\text{sr}} = 1 \div 1,3$ – współczynnik nierównomierności pola wewnątrz rdzenia;

$E_{rd(j=1,2,3)} = k_{d(j=1,2,3)} a_{i\max}^{-0,58}$ – największa dopuszczalna wartość składowej E_r (w kV/mm) na krawędziach ekranów,

$a_{i\max} = 0,8 \div 1$ mm – największa grubość jednej warstwy izolacji miękkiej rdzenia,

$k_{d(j=1,2,3)}$ – parametr obliczeniowy w kV/mm (wg [1]), zależny od rodzaju napięcia obliczeniowego $U_{obl(j=1,2,3)}$, o wartościach jak poniżej:

rodzaj napięcia (j)	robocze (1)	wytrzymywane przemienne (2)	wytrzymywane udarowe piorunowe (3)
U_{obl} (w kV)	$(1 \div \sqrt{3}) U_m / \sqrt{3}$	$(1,05 \div 1,1) U_{w(j=2)}$	$(1,05 \div 1,1) U_{w(j=3)}$
k_{dj} (w kV/mm)	4	9 ÷ 12	40 ÷ 50



Rys. 2. Szkic wielowarstwowego układu izolacyjnego przepustu ze sterowaniem pojemnościowym:
 1 - tor prądowy, 2 - uziemiony kołnierz, 3 - osłona izolacyjna górna, 4 - osłona izolacyjna dolna, 5 -
 warstwy izolacyjne, 6 - ekrany sterujące

Fig.2. Sketch of multi-layer insulating system of a bushing with capacitive control.

1 – current circuit, 2 – earthed flange, 3 – upper hollow insulator, 4 – insulating layers, 5 –
 electric screens

Dla kryteriów związanych z poszczególnymi rodzajami napięcia ($j = 1,2,3$) całkowita grubość izolacji rdzenia (w mm) wynosi:

j	1	2	3
a_j	23,1	27,4	15,7

Spośród obliczonych grubości rdzenia wybiera się wartość największą $a = 27,4$ mm, obliczając następnie kolejno:

- (etap 3) minimalną liczbę ekranów sterujących $n = \text{entier}(a/a_{i\max}) = \text{entier}(27,4/1) = 28$,
- (etap 4) długości odstepu osiowego między krawędziami ekranów w dolnej części rdzenia $\Delta l_d = 7,6$ mm dla $k_{d2} = 12$ kV/mm i $a_{i\max} = 1$ mm, wyznaczonej według wzoru:

$$\Delta l_{d(j=2)} = \frac{0,102 \left[\frac{U_{\text{obl}(j=2)}}{n} \right]^2 - 1 - \frac{U_{\text{obl}(j=2)}}{n E_{\text{rd}(j=2)}}}{\sqrt{\frac{U_{\text{obl}(j=2)}}{n E_{\text{rd}(j=2)}}}}, \quad (2)$$

- długość odstepu osiowego między krawędziami ekranów w górnej części przepustu $\Delta l_g = 1,8 \Delta l_d = 13,7$ mm.

Po zaokrągleniu do wartości całkowitych $\Delta l_d = 8$ mm i $\Delta l_g = 14$ mm stwierdzono, że $E_{i\max} \cong 1,13$ kV/mm $> E_{ld2} = 1,09$ kV/mm, a więc nie jest spełniony warunek:

$$E_{i\max} \cong \frac{U_{\text{obl}(j=2)}}{n \Delta l_d} \leq E_{ld(j=2)} = 3,16 \Delta l_d^{-0,5} a_{i\max}^{-0,58}, \quad (3)$$

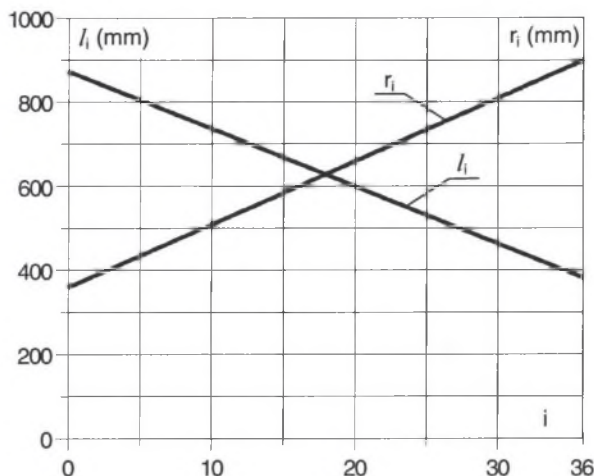
w którym $E_{rd(j=2)}$ i $E_{ld(j=2)}$ oznaczają największe dopuszczalne wartości składowej promieniowej i osiowej wektora natężenia pola elektrycznego (w kV/mm) przy napięciu probierczym przemiennym ($j=2$) w pobliżu krawędzi ekranów sterujących (wg [1]). W takiej sytuacji należy zwiększyć liczbę ekranów sterujących oraz obliczyć ponownie wartości Δl_d i Δl_g . Warunek (3) jest spełniony dopiero wówczas, gdy $n = 36$, stąd $\Delta l_d = 5$ mm i $\Delta l_g = 9$ mm.

Następnie obliczono długości aktywnych części rdzenia:

- w dolnej części przepustu $l_d = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta l_{id} = (n-1) \Delta l_d = 175$ mm,
- w górnej części przepustu $l_g = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta l_{ig} = (n-1) \Delta l_g = 315$ mm.

Etap 5 dotyczy kształtowania osłon izolacyjnych – górnej (h_g) i dolnej (h_d). Minimalną wysokość czynnej części osłony porcelanowej w powietrzu h_g wyznacza się jako wartość największą spośród h_{gj} , wynikających z następujących warunków wytrzymałościowych:

napięcie wytrzymałwane	przemienne ($j=2$)		udarowe piorunowe ($j=3$)
	na sucho	w deszczu	na sucho
h_{gj}	$\geq U_{\text{obl}(j=2)} / E_s$	$\geq U_{\text{obl}(j=2)} / E_d$	$\geq U_{\text{obl}(j=3)} / E_u$
średnie krytyczne natężenie przeskoku w kV/mm	$E_s = 0,33 \div 0,43$	$E_d = 0,22 \div 0,26$	$E_u = 0,5 \div 0,6$



Rys. 3. Wyniki obliczeń współrzędnych koordynacyjnych ekranów sterujących w rdzeniu izolacyjnym przepustu kondensatorowego

Fig.3. Calculation results of control screen coordinates within insulating core of the condenser bushing

Wysokość osłony górnej (h_g) wynika z warunków wytrzymałościowych przy napięciach obliczeniowych: przemiennym na sucho ($h_{gs(j=2)} = 767$ mm), przemiennym w deszczu ($h_{gd(j=2)} = 1150$ mm), udarowym piorunowym na sucho ($h_{gn(j=3)} = 1210$ mm). Przyjęto mniejsze spośród wartości średnich krytycznego natężenia pola elektrycznego bezpośrednio przed przeskokiem: $E_s = 0,33$ kV/mm, $E_d = 0,22$ kV/mm, $E_u = 0,5$ kV/mm. Wysokość osłony górnej ustala się na podstawie największej spośród obliczonych wartości, więc $h_g = 1210$ mm. Spełnia ona warunek koordynacyjny, gdyż $h_g > 1,3 l_g = 409,5$ mm. Następnie ze wzoru

$$h_{d(j=2)} \geq \frac{U_{obl(j=2)}}{E_{ol}}, \quad (4)$$

(w którym $E_{ol} = 0,65 \div 0,8$ kV/mm jest średnim natężeniem przebiecia oleju wzdłuż osłony przy napięciu probierczym przemiennym) obliczono wysokość osłony dolnej $h_{d(j=2)} \geq 390$ mm (dla $E_{ol} = 0,65$ kV/mm), spełniającą również warunek koordynacyjny, gdyż $h_d > 1,2 l_d = 210$ mm.

W etapie 6 powrócono do kształtowania rdzenia izolacyjnego przepustu, obliczając: długości najkrótszego czynnego ekranu sterującego $l_n = h_k + 0,15 h_g + 0,1 h_d \cong 370$ mm, długości pozostałych ekranów $l_{n-1} = 384$ mm, ..., $l_1 = 860$ mm według wzorów:

$$l_{n-1} = l_n + \Delta l_d + \Delta l_g$$

$$\dots\dots\dots$$

$$l_1 = l_n + (n-1)\Delta l_d + (n-1)\Delta l_g; \quad (5)$$

długość obliczeniową rury nośnej zajętej przez rdzeń $l_0 = l_1 + \Delta l_d + \Delta l_g = 874$ mm.

Etap 7 polega na obliczeniu promieni ekranów sterujących, więc dla zadanego promienia rury nośnej ($r_0 = 17,5$ mm) i znanej grubości rdzenia ($a = 27,4$ mm) obliczono promień najkrótszego ekranu $r_n = r_0 + a \cong 45$ mm oraz promienie pozostałych ekranów ze wzorów:

$$\ln r_1 = \frac{l_0^2 - l_1^2}{l_0^2 - l_n^2} \ln \frac{r_n}{r_0} + \ln r_0$$

..... (6)

$$\ln r_{n-1} = \frac{l_0^2 - l_{n-1}^2}{l_0^2 - l_n^2} \ln \frac{r_n}{r_0} + \ln r_0.$$

Wyniki obliczeń długości (l_i) i promieni ekranów (r_i) są przedstawione w postaci graficznej na rys. 3.

Po wyznaczeniu grubości kolejnych warstw rdzenia $a_i = r_i - r_{i-1}$ obliczono:

średnicę zewnętrzną pasywnej części rdzenia $D_r \cong (r_0 + a + a_{n+1}) \cong 93$ mm ($a_{n+1} \cong 1,4$ mm),

średnicę wewnętrzną osłon w pobliżu kołnierza $D_w \cong D_r + 2 a_{sz} = 103$ mm ($a_{sz} = 5$ mm).

Stwierdzono, że jest spełniony warunek $a_i = 0,7$ mm $\leq a_{max} = 1$ mm oraz oszacowano minimalną grubość ścianki korpusu osłony $g_{iz} = 8,2$ mm [5] i wynikającą stąd średnicę zewnętrzną korpusu osłony $D_z = D_w + 2g_{iz} = 111,2$ mm $\cong 112$ mm.

5. PODSUMOWANIE

Artykuł zawiera wiadomości ogólne i szczegółowe z zakresu metodyki kształtowania (ze wspomaganiami komputerowymi) wysokonapięciowych układów izolacyjnych stosowanych w elektroenergetyce. Kształtowanie dokonywane jest nie tylko ze względu na wymagania elektryczne, ale również – tam gdzie jest to niezbędne – cieplne i mechaniczne. Rozważane są następujące układy: odstępy powietrzne w konwencjonalnych sieciach SN i WN, niektóre izolatory liniowe i stacyjne, przepusty transformatorowe, kondensatory elektroenergetyczne, jednobiegunowe gazoszczelne przewody szynowe.

LITERATURA

1. Afanasjew W.W. i dr.: Sprawocznik po elektrycznym apparatam wysokiego napriazienija „Energoatomizdat”, Leningrad 1987.
2. Dmitriewskij W.S.: Rasczet i konstruirowanije elektryczskoj izolacji. Energoizdat, Moskwa 1981.
3. Flisowski Zd.: Technika wysokich napięć (wyd. 4 zmienione). WNT, Warszawa 1999.
4. Gacek Z.: Wysokonapięciowa technika izolacyjna. Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 1996.
5. Gacek Z.: Kształtowanie wysokonapięciowych układów izolacyjnych stosowanych w elektroenergetyce. Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 2002.
6. Hering M.: Termokinytyka dla elektryków. WNT, Warszawa 1980.
7. Konarzewski Z.: Podstawy technicznej mechaniki ciała stałego. WNT, Warszawa 1985.
8. Pohl Z. i in.: Napowietrzna izolacja wysokonapięciowa w elektroenergetyce. Ofic. Wyd. Pol. Wrocławskiej, Wrocław 2003.
9. Praca zbiorowa: Poradnik inżyniera elektryka. WNT, tom 1: Warszawa 1994, tom 2: Warszawa 1995, tom 3: Warszawa 1996.
10. PN-EN 60071-1:1999/2001 Koordynacja izolacji – Definicje, zasady i reguły/Przewodnik stosowania.
11. PN-75-E-05100-1:1998 Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Projektowanie i budowa. Linie prądu przemiennego z przewodami roboczymi gołymi.
12. PN-90/E-05025 Obliczanie skutków prądów zwarciovych.