

Wojciech PONIECKI

METODA SYMULACJI DZIAŁANIA PODCZAS PROCESU WYŁĄCZANIA PRĄDU WYSOKONAPIĘCIOWEGO WYŁĄCZNIKA Z SZEŚCIOFLUORKIEM SIARKI NA PRZYKŁADZIE WYŁĄCZNIKA TRZECIEJ GENERACJI

STRESZCZENIE: Podstawowym celem pracy jest opracowanie metody symulacji działania podczas procesu wyłączania prądu wysokonapięciowego wyłącznika z sześćciofluorkiem siarki - SF₆ - na przykładzie wyłącznika trzeciej generacji. W wyłączniku tego typu do wytworzenia przyrostu ciśnienia gazu w komorze gaszeniowej, koniecznego do wywołania przepływu sześćciofluorku siarki w układzie dyszowym, wykorzystywane jest oprócz pracy napędu także zjawisko termoeekspansji. W pracy omówiono podstawowe kierunki badań dotyczących wyłączników wysokonapięciowych, a także metody obliczeniowe wykorzystywane podczas konstruowania i badań wyłączników. Przedstawiono budowę i sposób działania komory gaszeniowej i napędu wyłącznika trzeciej generacji a także kolejne etapy procesu wyłączania prądu, gdy gaszenie łuku elektrycznego odbywa się w dwustrumieniowym układzie dyszowym a czynnikiem gaszącym jest sześćciofluorek siarki. Omówiono mechanizm powstawania zjawiska termoeekspansji i wpływ na jego przebieg ablacji materiałów izolacyjnych. Zaprezentowano wyniki badań modelowej komory gaszeniowej jak również wybrane wyniki badań wyłączników rzeczywistych. Na tej podstawie sformułowano równania opisujące pracę wszystkich podstawowych elementów wyłącznika uwzględniając współzależność zjawisk odbywających w różnych jego częściach. Wzięto także pod uwagę wpływ łuku elektrycznego na warunki przepływu gazu w układzie dyszowym a także na przebiegi wielkości termodynamicznych sześćciofluorku siarki w komorze gaszeniowej. Opracowano metodę rozwiązania tego układu równań i wykonano obliczenia dla różnych wartości wyłączanego prądu, czasu łukowego, wymiarów komory gaszeniowej oraz energii napędu. Oceniono współdziałanie podstawowych elementów wyłącznika. Wyznaczono przebiegi charakterystyk ruchu styków, powierzchni przepływu gazu przez oba zawory, wielkości termodynamicznych SF₆ w komorze gaszeniowej oraz wielkości mechanicznych charakteryzujących pracę napędu. Dokonano weryfikacji wyników obliczeń na podstawie badań przeprowadzonych na specjalnym modelu komory gaszeniowej nowej generacji, do budowy którego wykorzystano elementy rzeczywistego wyłącznika (np. dyszę główną, zestyk opalny, osłonę izolacyjną styku ruchomego, cylinder). W oparciu o wyniki badań laboratoryjnych modelu komory oraz rzeczywistego wyłącznika, wykorzystując również wyniki obliczeń symulujących określono czynniki decydujące o przebiegu procesu wyłączania prądu we wszystkich charakterystycznych przypadkach pracy wyłącznika w systemie elektroenergetycznym. Sformułowano liczne wnioski dotyczące działania wyłącznika, współpracy komory gaszeniowej i napędu, zjawisk termoeekspansji i ablacji oraz przebiegu procesu wyłączania prądu przez wyłącznik trzeciej generacji z sześćciofluorkiem siarki.

Indeks ważniejszych oznaczeń:

- a - przyspieszenie;
- a_c - prędkość dźwięku w SF_6 w strefie gazu zimnego;
- a_{sd} - stała sprężyny zaworu tłoka;
- a_A - prędkość dźwięku w SF_6 w strefie kolumny łukowej;
- A - powierzchnia kanału, przez który odbywa się przepływ SF_6 ;
- $A(x)$ - siła oporowa amortyzatora olejowego napędu;
- A_{do} - całkowita powierzchnia otworu zaworu tłoka;
- $A_d(z_d)$ - powierzchnia wypływu sześćciofluorku siarki ze zbiornika dolnego przez zawór tłoka do bieguna;
- $A_g(z_g)$ - powierzchnia przepływu sześćciofluorku siarki przez zawór cylindra;
- A_{gg}, A_{gp} - powierzchnie przepływu sześćciofluorku siarki, odpowiednio przez: dyszę główną, dyszę pomocniczą;
- A_{go} - całkowita powierzchnia otworu zaworu cylindra;
- A_k - powierzchnia przepływu gazu w przekroju krytycznym dyszy;
- A_{kg}, A_{kp} - powierzchnia przekroju krytycznego: dyszy głównej; dyszy pomocniczej
- $A_{wg}(t,x)$ - powierzchnia przepływu gazu w strefie gazu zimnego w dyszy głównej;
- $A_{wp}(t,x)$ - powierzchnia przepływu gazu w strefie gazu zimnego w dyszy pomocniczej;
- A_A - powierzchnia przekroju kolumny łukowej;
- $A_{AD}(x,t)$ - powierzchnia przekroju kolumny łukowej w przekroju krytycznym dyszy pomocniczej;
- $A_{AG}(x,t)$ - powierzchnia przekroju kolumny łukowej w przekroju krytycznym dyszy głównej;
- $A_D(x,t)$ - powierzchnia przekroju dyszy pomocniczej ¹;
- $A_G(x,t)$ - powierzchnia przekroju dyszy głównej ¹;
- A_N - powierzchnia nieszczelności w dyszy głównej;
- B - powierzchnia tłoka dolnego zbiornika sprężania;
- B_m - uniwersalna stała gazowa;
- c_p - ciepło właściwe SF_6 przy stałym ciśnieniu;

¹ tzw. powierzchnia geometryczna uzależniona od wymiarów otworu wewnętrznego dyszy zmieniająca się w funkcji drogi styku ruchomego;

- c_V - ciepło właściwe SF_6 przy stałej objętości;
- dL_1, dL_2 - praca zewnętrzna;
- d_d - średnica przekroju krytycznego dyszy głównej;
- d_A - średnica kolumny łukowej;
- dQ - ciepło doprowadzane z łuku elektrycznego na skutek zjawiska termoeekspansji;
- dQ_1 - ciepło wymieniane z otoczeniem na skutek dopływu lub wypływu SF_6 do lub ze zbiornika górnego cylindra;
- dQ_2 - ciepło wymieniane z otoczeniem na skutek dopływu lub wypływu SF_6 do lub z dolnego zbiornika cylindra;
- dU_1 - energia wewnętrzna SF_6 zawartego w zbiorniku górnym;
- dU_2 - energia wewnętrzna SF_6 zawartego w zbiorniku dolnym;
- E - gradient napięcia łuku;
- E_k - krytyczny stosunek ciśnienia SF_6 ;
- E_P - stosunek przeciwcisnienia do ciśnienia spiętrzenia SF_6 ;
- $F(E_P)$ - funkcja przepływu podkrytycznego;
- $f_p(p_p/p_s)$ - funkcja przepływu SF_6 zależna od relacji między ciśnieniem spiętrzenia a przeciwcisnieniem;
- $f_1(x), f_2(x)$ - funkcje określające wartość stosunku prędkości ogniwa układu kinematycznego w miejscu przyłożenia siły oporowej lub napędowej do prędkości styku ruchomego obranego jako ogniwo sprowadzone;
- F_{d1} - siła parcia SF_6 działająca na powierzchnię górną pokrywy zaworu tłoka;
- F_{d2} - siła parcia SF_6 działająca na dolną powierzchnię pokrywy zaworu tłoka;
- F_{d3} - siła parcia SF_6 działająca na dodatkową powierzchnię górną pokrywy zaworu tłoka;
- F_{sd} - siła sprężyny działająca na powierzchnię dolną pokrywy zaworu tłoka;
- F_{g1} - siła parcia SF_6 działająca na powierzchnię górną pokrywy zaworu cylindra;
- F_{g2} - siła parcia SF_6 działająca na dolną powierzchnię pokrywy zaworu cylindra;
- F_{gx} - siła parcia SF_6 działająca na dodatkową powierzchnię dolną pokrywy zaworu cylindra;
- F_{So} - siła początkowa sprężyny zaworu tłoka;
- $F_N(x)$ - suma sił sprężyn otwierających napędu;
- F_P - siła parcia gazu na dolną część cylindra;
- F_{2N}, F_{1N} - końcowa, początkowa wartość siły sprężyn otwierających;
- g - przyspieszenie ziemskie;
- G - siła ciężkości części ruchomych wyłącznika (sprowadzone do styku ruchomego);
- G_d - siła ciężkości pokrywy zaworu tłoka;
- G_g - siła ciężkości pokrywy zaworu cylindra;
- h_t - entalpia właściwa par teflonu;
- h_A - entalpia właściwa SF_6 w strefie kolumny łukowej;
- h_1 - entalpia właściwa SF_6 zawartego w górnym zbiorniku cylindra;
- h_2 - entalpia właściwa SF_6 zawartego w dolnym zbiorniku cylindra;

i	- chwilowa wartość prądu płynącego przez kolumnę łukową;
I_s	- skuteczna wartość prądu;
I_{ws}	- znamionowy symetryczny wyłączalny prąd wyłącznika;
k	- wykładnik izentropy SF_6 ;
K_{ps}	- współczynnik kierunku przepływu SF_6 ;
l_{kg}	- długość przekroju krytycznego (gardzieli) dyszy głównej;
$l_{wg}(x)$	- długość wlotowej części dyszy;
l_2	- początkowa długość zbiornika dolnego;
m_{dg}	- natężenie wypływu SF_6 ze zbiornika górnego do zbiornika dolnego cylindra;
m_{gc}	- natężenie przepływu SF_6 przez strefę gazu zimnego w dyszy głównej;
m_{gd}	- natężenie wypływu SF_6 ze zbiornika dolnego do zbiornika górnego cylindra;
m_{gA}	- natężenie przepływu SF_6 przez kolumnę łukową w dyszy głównej;
m_{nd}	- natężenie wypływu SF_6 ze zbiornika dolnego do bieguna wyłącznika przez zawór tłoka;
m_{ng}	- natężenie wypływu SF_6 ze zbiornika górnego do bieguna przez dyszę główną;
m_{np}	- natężenie wypływu SF_6 ze zbiornika górnego do bieguna przez dyszę pomocniczą;
m_{pc}	- natężenie przepływu SF_6 przez strefę gazu zimnego w dyszy pomocniczej;
m_{pA}	- natężenie przepływu SF_6 przez kolumnę łukową w dyszy pomocniczej;
m_{w1}	- suma całkowitego natężenia wypływu SF_6 z górnej części cylindra i natężenia dopływu SF_6 do górnej części cylindra;
m_{w2}	- suma całkowitego natężenia wypływu SF_6 z dolnej części cylindra oraz natężenia dopływu SF_6 do dolnej części cylindra;
m_A	- średnia masa cząsteczki SF_6 w strefie łukowej;
m_T	- średnia masa cząsteczki par teflonu;
m_1	- masa SF_6 zawartego w górnym zbiorniku cylindra;
m_2	- masa SF_6 zawartego w dolnym zbiorniku cylindra;
M	- Liczba Macha;
M_k	- liczba Macha w przekroju krytycznym dyszy;
$M_{sk}(x)$	- masa części ruchomych (tzw. masa sprowadzona, zależna od położenia styku ruchomego);
M_{zd}	- masa pokrywy zaworu tłoka;
M_{zg}	- masa pokrywy zaworu cylindra;
N	- siła nacisku pokrywy zaworu na ściankę cylindra;
p	- ciśnienie SF_6 w strefie gazu zimnego,
$p(z)$	- ciśnienie SF_6 wzdłuż osi dyszy;
p_P	- ciśnienie SF_6 w zbiorniku, do którego następuje napływ gazu (tzw. przeciwcisnienie);
p_S	- ciśnienie SF_6 w zbiorniku, z którego następuje wypływ gazu (tzw. ciśnienie spiętrzenia);
p_w	- ciśnienie SF_6 we wlocie dyszy głównej;
p_{wyl}	- ciśnienie SF_6 w przekroju wylotowym dyszy głównej;

p_N	- ciśnienie SF_6 w biegunie wyłącznika;
p_{sd}	- ciśnienie działające na dodatkową powierzchnię górną pokrywy zaworu tłoka;
p_{sg}	- ciśnienie działające na dodatkową powierzchnię dolną pokrywy zaworu cylindra
p_1	- ciśnienie SF_6 w górnym zbiorniku cylindra;
p_2	- ciśnienie SF_6 w dolnym zbiorniku cylindra;
Q	- energia wydzielająca się w kolumnie łukowej we wlotowej części dyszy;
R	- rezystancja obwodu elektrycznego;
R_G	- stała gazowa SF_6 ;
S_{d1}	- powierzchnia górna pokrywy zaworu tłoka;
S_{d2}	- powierzchnia dolna pokrywy zaworu tłoka;
S_{dx}	- dodatkowa powierzchnia górna pokrywy zaworu tłoka;
S_{g1}	- powierzchnia górna pokrywy zaworu cylindra;
S_{g2}	- powierzchnia dolna pokrywy cylindra;
S_{gx}	- dodatkowa powierzchnia dolna pokrywy zaworu cylindra;
t	- czas;
t_a	- bieżąca wartość czasu łukowego;
t_P	- czas własny wyłącznika;
t_S	- czas do chwili utraty styczności przez zestyk opalny;
T	- siła tarcia połączeń suwliwych;
T_a	- założona wartość czasu łukowego;
T_c	- temperatura SF_6 w strefie gazu zimnego;
T_t	- średnia temperatura par teflonu;
T_A	- temperatura SF_6 w strefie kolumny łukowej;
$T_S(x)$	- siła tarcia zestyków;
T_{RL}	- stała czasowa zanikania składowej nieokresowej prądu;
T_{1Z}, T_{2Z}	- siła tarcia zestyku opalnego i głównego, siła tarcia styku ruchomego; nierozłącznego;
T_1	- temperatura SF_6 zawartego w górnym zbiorniku cylindra;
T_2	- temperatura SF_6 zawartego w dolnym zbiorniku cylindra;
u_1	- energia wewnętrzna właściwa SF_6 zawartego w górnym zbiorniku cylindra;
u_2	- energia wewnętrzna właściwa SF_6 zawartego w dolnym zbiorniku cylindra;
v_a	- prędkość tłoka amortyzatora olejowego;
v_d	- prędkość pokrywy zaworu tłoka;
v_g	- prędkość pokrywy zaworu cylindra;
v_x	- prędkość styku ruchomego opalnego;
V_1	- stała objętość górnego zbiornika cylindra;
V_2	- objętość dolnego zbiornika cylindra;
w	- osiowa prędkość SF_6 ;
w_A	- prędkość osiowa SF_6 w strefie kolumny łukowej;
w_c	- prędkość osiowa SF_6 w strefie gazu zimnego;

- $w_c(z)$ - prędkość SF_6 wzdłuż osi dyszy dla strefy gazu zimnego;
- w_t - osiowa prędkość par teflonu;
- w_w - prędkość SF_6 we wlocie dyszy głównej;
- $W(p,T)$ - moc promieniowania z jednostki objętości łuku;
- W_N, W_P - współczynnik przepływu: nadkrytycznego, podkrytycznego;
- W_t - moc odprowadzana z jednostki długości łuku na drodze promieniowania powodująca parowanie materiału dyszy;
- x - droga styku ruchomego opalnego;
- x_a - droga styku ruchomego początku strefy amortyzacji;
- x_C - całkowita droga styku ruchomego opalnego;
- x_P - droga styku ruchomego do zakończenia etapu przejściowego;
- x_S - droga styku ruchomego do punktu utarty styczności;
- X - reaktancja obwodu elektrycznego;
- Y_d - obwód otworu zaworu tłoka;
- Y_g - obwód otworu zaworu cylindra;
- z - odległość od wlotu dyszy;
- z_d - droga pokrywy zaworu tłoka;
- z_{dc} - całkowita droga pokrywy zaworu tłoka;
- z_g - droga pokrywy zaworu cylindra;
- z_{gc} - całkowita droga pokrywy zaworu cylindra;
- ϑ - bezwymiarowy współczynnik określający relację między mocą wydzielającą się w jednostce długości łuku a mocą odprowadzoną na drodze promieniowania z jednostki łuku elektrycznego powodującą parowanie materiału dyszy;
- λ - współczynnik tłumienia amortyzatora olejowego;
- λ_c - stosunek prędkości dźwięku dla par teflonu i zjonizowanego SF_6 ;
- μ_{dn} - współczynnik oporu przepływu SF_6 z dolnego zbiornika cylindra do bieguna;
- μ_{gd}, μ_{dg} - współczynnik oporu przepływu SF_6 - z dolnego zbiornika cylindra, z górnego zbiornika cylindra, przez zawór cylindra;
- μ_{ng} - współczynnik oporu przepływu SF_6 przez dyszę główną;
- μ_{np} - współczynnik oporu przepływu SF_6 przez dyszę pomocniczą;
- μ_p - bezwymiarowy współczynnik oporu przepływu SF_6 ;
- μ_{1t} - natężenie par teflonu na jednostkę długości łuku;
- μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m]);
- ξ - bezwymiarowy współczynnik określający część energii wydzielającej się w kolumnie łukowej we wlotowej części dyszy dostarczanej do gazu zawartego w górnej części cylindra w wyniku zjawiska termoeekspansji;
- ρ - gęstość SF_6 ;
- ρ_S - gęstość SF_6 w zbiorniku, z którego następuje wypływ gazu (tzw. gęstość spiętrzenia);
- ρ_c - gęstość SF_6 w strefie gazu zimnego;
- ρ_A - gęstość SF_6 w strefie kolumny łukowej;
- ρ_1 - gęstość SF_6 w górnym zbiorniku cylindra;

- ρ_2 - gęstość SF_6 w dolnym zbiorniku cylindra;
- ρ_t - gęstość par teflonu;
- σ_A - przewodność elektryczna SF_6 w strefie kolumny łukowej;
- φ - kąt opóźnienia składowej okresowej prądu względem napięcia;
- ψ - faza napięcia w chwili załączania prądu;
- ω - pulsacja prądu;
- Δp_a - lokalny przyrost ciśnienia w obszarze przekroju krytycznego dyszy głównej spowodowany ablacją teflonu (PTFE);
- Δp_m - lokalny przyrost ciśnienia w obszarze przekroju krytycznego dyszy spowodowany zjawiskiem "pinch-effect" u";
- $\Sigma F_d(x,t)$ - wypadkowa siła działająca na pokrywę zaworu tłoka;
- $\Sigma F_g(x,t)$ - wypadkowa siła działających na pokrywę zaworu cylindra;
- $\Sigma F_{nw}(x,t)$ - suma sił napędowych sprowadzonych do styku ruchomego;
- $\Sigma F_r(x,t)$ - suma sił oporowych sprowadzonych do styku ruchomego;
- ΣF_{sp} - wypadkowa siła działająca na ruchomy cylinder komory gaszeniowej.

1. WPROWADZENIE

Od uruchomienia pierwszych wysokonapięciowych linii przemysłowych i powstania elektrycznej sieci rozdzielczej, co miało miejsce blisko sto lat temu, niezmiennym zadaniem energetyków we wszystkich krajach świata jest zapewnienie ciągłej i pewnej pracy nadzorowanych przez nich krajowych systemów elektroenergetycznych. W związku z tym konieczne jest stosowanie urządzeń rozdzielczych o bardzo wysokiej jakości, gdyż tylko w przypadku gdy wszystkie elementy linii przesyłowych i rozdzielczych oraz stacji energetycznych będą cechowały się wysoką pewnością działania możliwe jest zrealizowanie podstawowego zadania energetyki polegającego na nieprzerwanym dostarczaniu energii elektrycznej do wszystkich zgłaszających taką potrzebę odbiorców, bez względu na odległość dzielącą ich od źródeł energii.

Realizacja sformułowanego powyżej postulatu stawia specjalne zadania przed wysokonapięciowymi wyłącznikami. Porównując rolę wyłączników z zadaniami innych urządzeń eksploatowanych w systemie elektroenergetycznym należy bardzo mocno podkreślić ich specjalne znaczenie dla zagwarantowania bezpiecznej pracy całego systemu. Wyłączniki pełnią bowiem w systemie energetycznym bardzo odpowiedzialne zadanie związane z przesyłem energii elektrycznej, pracą manewrową w rozdzielniach, umożliwiając dokonywanie zmian w konfiguracji obwodów służących do przesyłu i rozdziału energii elektrycznej, zabezpieczając system przed skutkami zwarć, likwidując stany awaryjne, a łącznie z odłącznikami i uziemnikami zapewniają bezpieczeństwo obsługi podczas wykonywania niezbędnych prac konserwacyjnych.

Użytkownicy systemów energetycznych w związku z tym ciągle zwiększają wymagania dotyczące wyłączników wysokiego napięcia a odbywa się to stale, licząc od początków ich eksploatacji do chwili obecnej, czyli przez ostatnie sto lat. Początkowo wymagania te dotyczyły zastosowania jedynie pewnej techniki gaszenia łuku elektrycznego, gwarantując, żeby w przypadku powstania zwarcia w systemie energetycznym zawsze nastąpiło wyłączenie prądu. Wymaganie to zostało spełnione po wprowadzeniu do eksploatacji wyłączników małoolejowych, co miało miejsce na początku lat czterdziestych bieżącego stulecia (należy jednak zaznaczyć, że mimo stosowania najbardziej nowoczesnych wyłączników zawsze istnieje prawdopodobieństwo, wprawdzie bardzo małe, iż wyłącznik nie wyłączy prądu). Następne wymagania dotyczyły zwiększenia parametrów łączeniowych, gdyż wyłączniki małoolejowe nie osiągały wymaganych parametrów łączeniowych (przykładowo do wyłączenia prądu 16 kA konieczne było stosowanie dwóch połączonych szeregowo komór gaszeniowych),

miały ponadto ograniczoną trwałość łączeniową (przeciętnie wyłączniki małoolejowe mogły wykonać dwa lub trzy cykle ZW przy znamionowym prądzie wyłączalnym) a w związku z tym wymagały dokonywania częstych okresowych przeglądów połączonych z wymianą elementów układu gaszącego (np. styków opalnych oraz specjalnych poprzecznych, w stosunku do osi komory gaszeniowej, izolacyjnych przekładek).

Wyłącznikami o zdecydowanie wyższych wartościach prądów załączalnych i wyłączalnych a równocześnie o kilkukrotnie większej trwałości łączeniowej były wyłączniki pneumatyczne. Ich rozwój trwał kilkadziesiąt lat w okolicach połowy bieżącego wieku, wówczas były powszechnie stosowane w bardzo wielu systemach energetycznych. Miały jednak swoje liczne wady, wyłączniki pneumatyczne są bowiem konstrukcjami o bardzo złożonej budowie (wyłączniki tego typu są zawsze wyłącznikami dwuciśnieniowymi, a przepływ powietrza w obrębie bieguna sterowany jest zespołem skomplikowanych zaworów) – zwykle w jednym biegunie wyłącznika na napięcie znamionowe 400 kV było od 4 do 6 komór gaszeniowych), wymagają stosowania dodatkowych układów sprężonego powietrza, a ich działanie cechuje wysoki poziom hałasu. Złożoność konstrukcji a także konieczność wykorzystania istniejących w rozdzielniach instalacji wytwarzających sprężone powietrze sprawił, iż uzyskanie wysokiego poziomu niezawodności wyłączników tego typu było bardzo trudne. Dlatego formułowane wcześniej przez użytkowników wymagania dotyczące jedynie parametrów łączeniowych wyłączników (trwałości i wartości wyłączanych prądów) zostały poszerzone o niezawodność działania, bezwzględne bezpieczeństwo dla personelu, niewielki zakres prac obsługowych a ponadto także konieczność przystosowania do pracy w warunkach specjalnych (opozycja faz, wyłączanie małych prądów indukcyjnych transformatorów i dławików kompensacyjnych oraz prądów pojemnościowych pojedynczej lub wieloczęłkowej baterii kondensatorowej).

Wymienione powyżej wymagania stawiane przez użytkowników systemów elektroenergetycznych były w stanie spełnić wprowadzone do eksploatacji na początku lat siedemdziesiątych samosprężne wyłączniki z szesciofluorkiem siarki. W związku z tym w wielu wysoko rozwiniętych krajach zaprzestano produkcji wyłączników małoolejowych i pneumatycznych, obecnie stopniowo oba typy tych wyłączników są wycofywane z eksploatacji (dotyczy to zwłaszcza wyłączników małoolejowych) a w ich miejsce instaluje się wyłączniki z SF₆.

Ponadto wszystkie prowadzone obecnie prace rozwojowe poświęcone wysokonapięciowym wyłącznikom dotyczą wyłączników z sześćfluorkiem siarki. Głównym celem tych prac jest skonstruowanie wyłącznika spełniającego wszystkie wymagania użytkowników, a zatem cechującego się wysokimi parametrami łączeniowymi we wszystkich występujących w eksploatacji warunkach, dużą trwałością łączeniową i mechaniczną, o wysokiej niezawodności działania,

nie wymagającego częstego przeprowadzania prac obsługowych, wyposażonego w napęd o prostej budowie i niskiej energii oraz przystosowanego do pracy w zdalnie sterowanych automatycznych systemach oraz do stosowania monitoringu.

Realizacja sformułowanych powyżej postulatów wymaga bardzo wnikliwego poznania zjawisk fizycznych występujących podczas procesu wyłączania prądu, określenie czynników wpływających na przebieg tych zjawisk podczas różnych operacji łączeniowych występujących w sieci elektrycznej. Bardzo przydatnym i pomocnym narzędziem do poznania przebiegu procesu wyłączania prądu są obliczeniowe metody symulujące działanie wyłącznika. Metody symulujące umożliwiają także już w początkowym etapie prac konstrukcyjnych lub optymalizacyjnych przeanalizowanie wielu wariantów rozwiązania konstrukcyjnego bieguna wyłącznika, dokonania wyboru podstawowych wymiarów elementów komory gaszeniowej i napędu, określenie współzależności działania poszczególnych zespołów komory oraz sformułowania wymagań dla napędu. Metody obliczeniowe mogą stanowić, obok badań laboratoryjnych, bardzo cenne narzędzie służące do weryfikacji przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego wyłącznika. Umożliwiają zdecydowanie skrócenie i ograniczenie zakresu prób konstruktorskich, co ma bardzo istotny wpływ na czas trwania prac konstruktorskich, a także na ich efektywność, przyczyniają się także znacząco do zmniejszenia nakładów finansowych.

Niniejsza praca jest kontynuacją prac wykonanych w latach ubiegłych poświęconych przedstawieniu metody symulującej działanie podczas wyłączania prądów roboczych, przeciążeniowych, zwarciovych wyłącznika wysokiego napięcia z sześćciofluorkiem siarki nowej generacji (mówiąc ściślej trzeciej), który obecnie (od końca lat osiemdziesiątych) zastępuje wyłącznik samosprężny jest powszechnie wprowadzany do produkcji i eksploatacji. W wyłączniku trzeciej generacji podczas procesu gaszenia łuku elektrycznego wykorzystywane są zjawiska: termoeekspansji oraz ablacji. Zjawisko termoeekspansji polega na dostarczaniu energii z kolumny łukowej do gazu zawartego w tzw. zbiorniku sprężania co wywołuje dodatkowy przyrost tego ciśnienia. Ma ono decydujący wpływ na przebieg wyłączania prądów o dużych wartościach np. zbliżonych do znamionowego prądu wyłączalnego. Podczas wyłączania prądów o mniejszych wartościach zjawisko to także występuje lecz jego źródłem nie jest ograniczenie powierzchni przekroju krytycznego dyszy głównej przez kolumnę łukową ale zjawisko ablacji materiałów izolacyjnych. Zjawisko ablacji (parowania materiału izolacyjnego – politetrafluoroetyleny – z wewnętrznych ścianek dyszy głównej oraz z powierzchni czołowej i wewnętrznej osłony izolacyjnej styku opalnego ruchomego) jest wywołane przez część energii wydzielającej się z łuku a odprowadzanej na drodze promieniowania.

Celem obecnego etapu pracy jest opracowanie założeń, schematu blokowego a następnie programu komputerowego symulującego działanie komory gaszeniowej wyłącznika.

1.1. Uzasadnienie podjęcia pracy

Dla zapewnienia prawidłowej, pewnej i nieprzerwanej pracy systemu elektroenergetycznego konieczne jest stosowanie wyłączników wysokonapięciowych² o wysokiej zdolności łączeniowej, cechujących się stałą gotowością do działania we wszystkich warunkach występujących w eksploatacji. Wyłączniki pełnią bowiem w sieciach wysokonapięciowych bardzo odpowiedzialne zadania:

- są niezbędne dla sterowania pracą systemu elektroenergetycznego oraz przy dokonywaniu zmian konfiguracji obwodów służących do przesyłu i rozdziału energii elektrycznej;
- równocześnie służą do zabezpieczania systemu wyłączając prądy zwarciowe, których powstania pomimo stosowania urządzeń elektroenergetycznych o coraz wyższej jakości nie można całkowicie wyeliminować;
- ponadto wyłączniki z odłącznikami i uziemnikami zapewniają bezpieczeństwo personelowi obsługi podczas wykonywania przeglądów oraz prac konserwacyjnych urządzeń rozdzielczych³.

² W niniejszej pracy, zgodnie z powszechnie stosowanym w praktyce nazewnictwem, pojęcie - wyłącznik wysokonapięciowy określa wyłącznik na napięcie znamionowe wyższe lub równe 72 kV; w normach [208,209] wyłącznikami wysokonapięciowym nazywane są także wyłączniki na średnie napięcia znamionowe czyli 3.6÷54 kV. Wyłączniki średnionapięciowe jednakże różnią się znacznie konstrukcją od wyłączników na wyższe napięcia znamionowe ponieważ stosowana jest w nich odmienna technika gaszenia łuku elektrycznego (np. wyłączniki próżniowe) lub komory gaszeniowe o zupełnie innej zasadzie działania (np. wyłączniki sześćciofluorkowe z łukiem wirującym). Wypełniają one ponadto inne zadania w systemie elektroenergetycznym - pracują bowiem głównie w sieciach rozdzielczych. Stawiane są im zwykle łagodniejsze wymagania odnośnie stromości napięć powrotnych czy łączenia zwarć pobliskich, za wyjątkiem specjalnych przypadków gdy na przykład wyłącznik średnionapięciowy jest zainstalowany w pobliżu miejsc gdzie występuje duża koncentracja odbiorów przemysłowych [7,10,27,71,72,73,83,99,77,94,143,144,188]. Należy również zaznaczyć, iż spośród wyłączników wysokonapięciowych wyróżnia się wyłączniki na najwyższe napięcia (tzw. ultra high voltage circuit-breakers) stosowane w sieciach przesyłowych, których napięcie znamionowe przekracza 800 kV (sieci takie eksploatowane są jednak jedynie w niewielu krajach - np.: Japonii, USA, Brazylii, Kanadzie, Rosji). W sieciach o tak wysokim poziomie napięcia występuje bowiem wiele specyficznych problemów np. przepięcia o bardzo wysokiej wartościach [27,57,144,189,190, 191,210].

³ W praktyce polega to na wykonaniu następujących kolejnych operacji: wyłączeniu określonych fragmentów sieci, następnie stworzeniu widocznych przerw izolacyjnych i uziemieniu odpowiednich urządzeń elektroenergetycznych.

Opierając się na wynikach prac Komitetu Studiów 13 - Aparatura Łączeniowa CIGRE, wykorzystując również szczegółowe analizy tendencji rozwojowych aparatury rozdzielczej wysokiego i średniego napięcia przeprowadzone przez autora [24,25,27,30,39,40,75,119,144,148,161,189,190,191], można powiedzieć, że obecnie oraz w nadchodzących latach nie ma alternatywy dla wysokonapięciowych wyłączników stykowych, ponieważ urządzenia oparte na technice tyrystorowej nie są w stanie spełnić wszystkich wymagań stawianych przez użytkowników przed aparaturą łączeniową. Przewiduje się ponadto, że w obszarze elektroenergetyki zjawisko nadprzewodnictwa w przyszłości znajdzie w praktyce zastosowanie przede wszystkim w ogranicznikach prądów zwarciovych⁴.

Każdy wysokonapięciowy wyłącznik, zgodnie z wymaganiami normalizacyjnymi [208,209] musi wyłączać prądy robocze i wszystkie prądy zwarciove powstające na skutek zwarć na zaciskach i zwarć pobliskich oraz prąd linii napowietrznej w stanie jałowym. Wyłącznik powinien ponadto być przystosowany do pracy w warunkach specjalnych - łączenia w warunkach opozycji faz, wyłączania małych prądów indukcyjnych oraz łączenia prądów pojemnościowych pojedynczej lub wieloczęłkowej baterii kondensatorowej. Współczesnym wyłącznikom wysokonapięciowym stawiane są ponadto liczne dodatkowe wymagania dotyczące na przykład: trwałości łączeniowej i mechanicznej, niezawodności, odporności na wpływy środowiska i braku wpływu na środowisko, łatwej i ograniczonej do minimum obsługi.

Obecnie w wysokonapięciowych systemach elektroenergetycznych eksploatowane są wyłączniki: małoolejowe, pneumatyczne oraz wyłączniki z sześciofluorkiem siarki - SF₆, ale sformułowane powyżej wymagania są w stanie spełnić jedynie wyłączniki z SF₆, ponieważ:

- wyłączniki małoolejowe nie osiągają wymaganych obecnie parametrów łączeniowych, mają ograniczoną trwałość łączeniową i w związku z tym wymagają częstego dokonywania okresowych przeglądów połączonych z wymianą elementów układu gaszącego (np. styków opalnych, przegród izolacyjnych itp.);
- wyłączniki pneumatyczne są konstrukcjami o bardzo złożonej budowie (zwykle, nawet w przypadku wyłącznika na napięcie znamionowe 123 kV w jednym biegunie znajduje się kilka połączonych szeregowo komór gaszeniowych, najczęściej wyposażonych w kondensatory sterujące rozkładem napięcia), wymagają stosowania dodatkowych zewnętrznych

⁴ Nie można jednak całkowicie wykluczyć, że w dalszej przyszłości zarówno urządzenia energoelektroniczne jak i wykorzystujące zjawisko nadprzewodnictwa znajdą szersze niż obecnie zastosowanie w systemach elektroenergetycznych i będą w specjalnych przypadkach wykorzystywane do wypełniania funkcji łączeniowych.

instalacji sprężonego powietrza, a ich działaniu zawsze towarzyszy bardzo wysoki poziom hałasu.

Należy zaznaczyć, że od wielu lat w wysokonapięciowych sieciach elektroenergetycznych krajów zachodnioeuropejskich instaluje się praktycznie wyłącznie wyłączniki z sześćciofluorkiem siarki [22,25,27,39,40,70], a ostatnio duża liczba wyłączników tego typu została wprowadzona do eksploatacji w krajowym systemie elektroenergetycznym.

Zdecydowana większość prowadzonych obecnie, przez przodujące firmy światowe, prac badawczych i rozwojowych poświęconych wyłącznikom wysokonapięciowym dotyczy wyłączników z sześćciofluorkiem siarki. Głównym celem prac badawczych jest poznanie przebiegu zjawisk fizycznych występujących w komorze gaszeniowej i w napędzie, towarzyszących procesowi wyłączania prądu. Wyniki tych badań wykorzystywane są w pracach konstruktorskich lub optymalizacyjnych mających na celu opracowanie wyłącznika spełniającego wszystkie wymienione powyżej surowe wymagania użytkowników, cechującego się ponadto wysokimi parametrami znamionowymi, także podczas pracy w warunkach specjalnych. Wyniki prac badawczych służą także do określenia racjonalnych zasad eksploatacji wyłączników zainstalowanych w systemie elektroenergetycznym a także opracowanie urządzeń umożliwiających prowadzenie stałego nadzoru⁵ nad działaniem najważniejszych elementów wyłącznika.

Należy także bardzo mocno podkreślić, że równie istotnym powodem kontynuowania prac badawczych dotyczących gaszenia łuku w środowisku sześćciofluorku siarki są wady tego gazu (o czym nie mówi się tak często jak o jego zaletach). Gaz ten bowiem pod wpływem temperatury ulega rozkładowi tworząc prostsze związki chemiczne, wchodzące łatwo w reakcje z powietrzem, wodą⁶ oraz z metalami, co powoduje powstanie szkodliwych dla człowieka i dla środowiska związków chemicznych. Zjawisk tych nie można uniknąć, gdyż dzięki rozpadowi cząstek następuje jonizacja gazu i uwolnienie bardzo dużej liczby wolnych elektronów, co jest niezbędne dla uzyskania przewodzącej plazmy łukowej.

Możliwe jest jednak znaczące ograniczenie tego szkodliwego wpływu sześćciofluorku siarki, a zwłaszcza jego trujących produktów rozpadu, na środowisko i człowieka poprzez:

- zmniejszenie ilości szkodliwych substancji tworzących się w komorze gaszeniowej podczas pojedynczej operacji łączeniowej;

⁵ Stały nadzór nad działaniem wyłącznika na podstawie ciągłego pomiaru wybranych wielkości fizycznych obecnie powszechnie nazywa się monitoringiem.

⁶ Mimo rygorystycznego przestrzegania procedur montażu i napełniania gazem wyłącznika z sześćciofluorkiem siarki pewne niewielkie ilości wody i powietrza zawsze znajdują się we wnętrzu jego bieguna.

- wydłużenie przerw między kolejnymi przeglądami komory;
- zwiększenie całkowitego czasu eksploatacji wyłącznika⁷.

Podstawowym warunkiem do spełnienia tych trzech postulatów jest ograniczenie energii wydzielającej się w łuku elektrycznym. Wraz ze wzrostem energii zwiększa się bowiem ilość produktów reakcji chemicznych, a równocześnie znacznie szybciej następuje erozja elementów układu gaszeniowego, co w istotny sposób zmienia warunki gaszenia łuku elektrycznego. Zmniejszenie energii można osiągnąć przez skrócenie czasu łukowego (wówczas bowiem oprócz bezpośredniego zmniejszenia energii skróceniu ulega długość łuku a tym samym zmniejszone jest jego napięcie). Można zatem stwierdzić, iż bardzo istotne jest prowadzenie prac mających na celu optymalizację konstrukcji komór gaszeniowych.

Ponadto obecnie rozważa się możliwość stosowania w wyłącznikach wysokonapięciowych jako czynnika gaszącego łuk elektryczny mieszaniny sześćciofluorku siarki z azotem lub zupełnie całkiem nowego związku chemicznego. Prowadzone są w związku z tym obecnie prace badawcze, wykorzystuje się także wyniki badań z przełomu lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych [18,19,20,21,56,147,181,183,192]. Podstawową przyczyną podjęcia tego zagadnienia jest wpływ sześćciofluorku siarki zawartego w atmosferze na wzmocnienie tzw. „efektu cieplarnianego”, który powstaje na skutek emisji do atmosfery dwutlenku węgla, wytwarzanego w wielu procesach technologicznych stosowanych w przemyśle. Należy jednak bardzo mocno podkreślić, iż oddziaływanie SF₆ na to zjawisko jest zdecydowanie mniejszy niż wpływ CO₂. Nie można jednakże całkowicie pominąć oddziaływania sześćciofluorku siarki na wzrost temperatury atmosfery ziemskiej, ponieważ gaz ten dla warunków panujących w stratosferze odznacza się wyjątkowo dużą trwałością⁸, a w każdym kolejnym roku zwiększa się liczba zainstalowanych urządzeń energetycznych izolowanych SF₆, z których mimo stosowania układów zapewniających bardzo wysoki stopień szczelności tych urządzeń, przedostaje się do atmosfery pewna niewielka ilość gazu, co powoduje stały choć powolny wzrost stężenia sześćciofluorku siarki. Jedną z prostszych metod ograniczenia szkodliwego wpływu na środowisko sześćciofluorku siarki i jego produktów rozpadu

⁷ Należy bardzo mocno podkreślić, iż podczas prowadzenia wszelkich prac przy wyłącznikach z sześćciofluorkiem siarki, związanych z otwieraniem komory gaszeniowej lub wymianą gazu, konieczne jest przestrzeganie specjalnych procedur postępowania, gdyż jest to podstawowym warunkiem dla zapewnienia bezpieczeństwa ludziom i wyeliminowania szkodliwego wpływu na środowisko [211]. Oczywiście jest także, że równie ważne jest ograniczenie stężenia szkodliwych substancji powstających w biegunie wyłącznika i ograniczenia częstości dokonywania przeglądów, gdyż jest to jednoznaczne ze zmniejszeniem narażenia dla personelu obsługującego wyłączniki z sześćciofluorkiem siarki.

⁸ W grudniu 1997 roku na konferencji w Kito poświęconej zmianom klimatycznym, sześćciofluorek siarki został zaliczony do tzw. „gazów cieplarnianych”, których średnia emisja do atmosfery powinna być ograniczona około 5,2% przyjmując jako poziom wyjściowy stan z roku 1990.

jest więc ograniczenie ilości tego gazu w urządzeniach energetycznych przez zastępowanie znacznej jego części przez azot - gazu będącego składnikiem powietrza, a zatem przyjaznego dla środowiska. Należy jednak zaznaczyć, iż obecnie zarówno prace nad wykorzystaniem mieszaniny SF_6 i N_2 o dużym stężeniu azotu jak i innych związków jako czynników gaszących łuk elektryczny nadal znajdują się w początkowej fazie. Warto również podkreślić, iż wielu specjalistów uważa, że ze względu na wyjątkowe własności dielektryczne i termodynamiczne jeszcze przez wiele lat sześćciofluorek siarki będzie stosowany jako czynnik gaszący w wyłącznikach [np.: 21,99]⁹. Jednakże równocześnie postulowana jest konieczność wdrożenia odpowiednich przepisów nakazujących powszechne stosowanie recyklingu gazu lub jego bezpiecznej utylizacji w przypadku gdy zawiera on bardzo dużą ilość zanieczyszczeń¹⁰. Z drugiej strony wydaje się celowe ograniczone stosowanie tego gazu jako izolacji kabli, szynoprzewodów, a także w niektórych przedziałach szczelnych rozdzielnicach osłoniętych.

W Zakładzie Aparatury Rozdzielczej Instytutu Elektrotechniki od początku lat siedemdziesiątych prowadzone są prace dotyczące zagadnień związanych z rozdzielnicami i wyłącznikami w izolacji z SF_6 oraz gaszeniem łuku elektrycznego w atmosferze sześćciofluorku siarki [78, 81, 82, 83, 123÷148]. Jedną z najważniejszych prac było skonstruowanie dwóch typów prototypowych wysokonapięciowych wyłączników. Pierwszy z nich przeznaczony był do eksploatacji w tradycyjnych rozdzielniach napowietrznych, natomiast drugi był przystosowany do zainstalowania w szczelnej rozdzielnicy osłoniętej izolowanej SF_6 . Wykonano bardzo szeroki zakres prób tych konstrukcji obejmujących zarówno wszechstronne badania laboratoryjne jak i wieloletnie badania eksploatacyjne prototypów wyłączników zainstalowanych w stacjach rozdzielczych energetyki zawodowej.

Zebrane podczas prowadzenia tych prac doświadczenia umożliwiły autorowi podjęcie całkowicie nowego, bardzo istotnego obecnie zagadnienia – opracowanie metody symulacji działania, podczas procesu wyłączania prądu, wysokonapięciowego wyłącznika z SF_6 najnowszej, trzeciej generacji. W wyłączniku tego typu stosowana jest nowoczesna, o zmodyfikowanej konstrukcji komora gaszeniowa, w której do wytworzenia przyrostu ciśnienia gazu w tzw. zbiorniku sprężania, co jest konieczne do wywołania przepływu sześćciofluorku siarki w układzie dyszowym, wykorzystywane jest oprócz pracy napędu także zjawisko

⁹ Identyczny pogląd reprezentuje od wielu lat autor niniejszego opracowania podkreślając konieczność opracowania krajowych przepisów dotyczących instalowania, obsługi i wycofywania z eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych z sześćciofluorkiem siarki [np.: 129,133,134, 135,136,138,140,143,147,148].

¹⁰ W związku z tym istnieje pilna potrzeba opracowania procedur obsługi sześćciofluorku siarki w oparciu o istniejące normy oraz opracowania CIGRE [26,28,211].

termoekspansji¹¹, a w związku z tym całkowicie odmiennie przebiega proces wyłączania prądu obejmujący odprowadzanie energii z kolumny łukowej i odbudowę wytrzymałości dielektrycznej przerwy międzystykowej.

Metoda symulacji stanowi podstawę do wykonania wielu niezbędnych prac, których wyniki są wykorzystywane w procesie konstruowania lub optymalizacji wyłącznika, podczas prowadzenia badań laboratoryjnych (konstruktorskich lub typu) a także prób eksploatacyjnych oraz podczas pracy wyłącznika w systemie elektroenergetycznym. W szczególności metoda symulująca jest bardzo przydatna do:

- wyjaśnienia przebiegu procesu wyłączania prądów roboczych i zwarciowych;
- dokonania oceny działania rzeczywistych wyłączników;
- określenia czynników decydujących o działaniu komory gaszeniowej i napędu;
- podjęcia prac konstrukcyjnych mających na celu: opracowanie całkowicie nowej komory gaszeniowej wyłącznika nowej generacji, określenie wymagań dla nowego napędu, skonstruowanie jednoprzerwowej komory gaszeniowej na wyższe napięcie znamionowe;
- prowadzenia prac optymalizacyjnych mających na celu zwiększenie niezawodności wyłącznika, trwałości łączeniowej czy podniesienie parametrów łączeniowych;
- opracowania obiektywnych kryteriów oceny stanu wyłącznika pracującego w systemie elektroenergetycznym oraz metod i zakresu badań diagnostycznych a także określenia wielkości fizycznych, których stały monitoring umożliwi ciągłą ocenę działania podstawowych zespołów wyłącznika;
- przystosowania wyłącznika do łączenia synchronizowanego (kiedy konieczne jest określenie obszaru, w którym istnieją optymalne warunki do wyłączenia prądu), a także do pracy w zdalnie sterowanych automatycznych systemach elektroenergetycznych;
- sformułowania racjonalnych wymagań dla wyłączników przeznaczonych do pracy w warunkach specjalnych (łączenie w warunkach opozycji faz, wyłączenie prądów indukcyjnych, łączenie prądów pojemnościowych), a także opracowania zaleceń dotyczących budowy najistotniejszych elementów wyłącznika.

¹¹ Zjawisko termoekspansji występuje podczas wyłączania dużych prądów, jego skutkiem jest dodatkowy przyrost ciśnienia gazu w komorze gaszeniowej. Mechanizm powstania tego zjawiska, rola jaką w jego przebiegu odgrywa parowanie politetrafluoroetyleny - PTFE (teflonu) z którego wykonana jest dysza główna i specjalna osłona styku ruchomego opalnego, co jest nazywane ablacją materiału izolacyjnego, a także działanie komory gaszeniowej w takich warunkach zastało szczegółowo przeanalizowano w punkcie 2.3 niniejszego opracowania.

1.2. Ocena stanu wiedzy w zagadnieniach dotyczących wyłączników wysokonapięciowych

Obszar tematów związanych z wyłącznikami wysokiego napięcia jest wyjątkowo szeroki i obejmuje następujące główne zagadnienia¹²:

- zjawiska fizyczne towarzyszące gaszeniu silnopięciowego łuku elektrycznego i odbudowie wytrzymałości dielektrycznej przerwy międzystykowej po przerwaniu przepływu prądu roboczego lub zwarcia w przypadku powstania zwarcia na zaciskach lub zwarcia pobliskiego;
- wpływ konfiguracji elementów sieci elektrycznej oraz odbiorów, a także wartości napięcia znamionowego, na stromość przejściowego napięcia powrotnego;
- łączenie w warunkach specjalnych (prądów pojemnościowych, indukcyjnych, przy opozycji faz), powstawanie przebiegów w obwodach pojemnościowych i indukcyjnych;
- problemy związane z wytrzymałością dielektryczną materiałów stałych i gazowych¹³, (rozkład pola elektrycznego, zależność wytrzymałości od kształtu udaru, ciśnienia gazu, stanu i kształtu elektrod itp.; obecnie badania dotyczą także wyładowań niezupełnych a odnoszą się również do środowiska mieszanin gazowych);
- sprawy konstrukcyjne obejmujące: komorę gaszeniową (określenie wymaganych parametrów termodynamicznych gazu w komorze gaszeniowej w poszczególnych okresach procesu wyłączania prądu przy uwzględnieniu jego wartości i kształtu, dobór materiałów zwłaszcza na elementy układów stykowego i dyszowego), napęd (określenie wymaganej energii i przebiegu siły napędowej w zależności od typu komory gaszeniowej), układ kinematyczny wiążący podstawowe elementy wyłącznika (wytrzymałość elementów, prędkość, amortyzacja);
- badania w układach modelowych, próby konstruktorskie, próby typu, badania podczas eksploatacji;
- metody symulacyjne; matematyczny opis zjawisk fizycznych, procedury obliczania parametrów charakteryzujących pracę podstawowych elementów wyłącznika;

¹²

Niektóre z tych zagadnień zostały skrótkowo przedstawione w poprzednim punkcie 1.1.

¹³

Należy przyjąć, iż obecnie nie prowadzi się żadnych prac badawczych dotyczących wyłączników olejowych, w związku z tym zagadnienia związane z badaniami cieczy izolacyjnych dotyczą zastosowania ich w innych urządzeniach elektroenergetycznych - transformatorach, przekładnikach.

- problemy trwałości, jakości, niezawodności, stałej gotowości do działania we wszystkich warunkach występujących w trakcie eksploatacji; wyposażenie wyłącznika w obwody sterujące i sygnalizacyjne¹⁴;
- zarządzanie eksploatacją wyłącznika od momentu zainstalowania w stacji elektroenergetycznej do chwili wycofania z eksploatacji przy uwzględnieniu funkcji pełnionej przez wyłącznik w systemie elektroenergetycznych a także, bardzo istotnej obecnie, sprawy dotyczącej wpływu szesciofluorku siarki na organizm ludzki i środowisko naturalne oraz zagadnienia związane z recyklingiem gazu.

Należy bardzo mocno podkreślić, iż równoczesne opracowanie wszystkich tych wymienionych powyżej problemów byłoby bardzo trudne, długotrwałe i złożone. Wynika to nie tylko z ich liczby ale z wielu bardzo różnorodnych powodów, do najważniejszych z nich można zaliczyć:

- całkowicie inną zasadę działania i budowę wyłączników poszczególnych typów, uzależnioną od zastosowanej techniki gaszenia łuku elektrycznego oraz napięcia znamionowego;
- występowanie odmiennych narażeń prądowych, a po przerwaniu przepływu prądu także napięciowych, podczas łączenia prądów roboczych, prądów zwarciovych przy zwarciach na zaciskach i pobliskich a także prądów w obwodach pojemnościowych lub indukcyjnych lub w przypadku występowania opozycji faz.;
- odmienność i współzależność wielu zjawisk fizycznych odbywających się w komorze gaszeniowej podczas kolejnych etapów procesu wyłączania prądu;
- ścisłe powiązanie współdziałania poszczególnych podzespołów wyłącznika, zwłaszcza komory gaszeniowej i napędu;
- silny wpływ wartości i kształtu wyłączanego prądu na przebieg gaszenia łuku elektrycznego a po jego zgaszeniu odbudowę wytrzymałości przerwy międzystykowej¹⁵;

¹⁴ Obecnie coraz częściej rozpatruje się możliwość dodatkowego wyposażania wyłącznika w urządzenia służące do stałego monitoringu charakterystycznych dla jego działania wielkości fizycznych.

¹⁵ Należy zwrócić uwagę, że w obwodach wysokonapięciowych zgaszenie łuku elektrycznego w komorze gaszeniowej nie jest równoznaczne z wyłączeniem prądu. Określenie „gaszenie łuku elektrycznego” należy zatem uznać dzisiaj za mało precyzyjne, ponieważ wyłączenie prądu jest procesem złożonym z kolejnych etapów a po przerwaniu przepływu prądu przerwa międzystykowa, w której może płynąć tzw. prąd połukowy o wartości rzędu kilku amperów lub mogą znajdować się swobodne elektrony oraz inne zjonizowane cząsteczki, jest naprężana przejściowym napięciem powrotnym o dużej szybkości narastania do swojej wartości szczytowej co może doprowadzić do powstania zapłonu termicznego lub dielektrycznego. Proces wyłączania jest uzależniony od wielu czynników np.: parametrów obwodu elektrycznego, konstrukcji komory gaszeniowej itp. (jego przebieg w wyłączniku trzeciej generacji a także mechanizm powstawania obu typów zapłonów jest omówiony w punkcie 2.1 niniejszego opracowania). W związku z tym pojęcie gaszenie łuku elektrycznego ma dzisiaj jedynie znaczenie historyczne, ale z drugiej strony jest nadal powszechnie stosowane (także przez wybitnych specjalistów), zatem w niniejszej rozprawie będzie używane jako pojęcie tożsame do określenia „proces wyłączania prądu”.

- konieczność bardzo starannego doboru materiałów, zwłaszcza układów stykowego i dyszowego;
- w przypadku wyłączników z SF_6 oddziaływanie zjawisk termoeekspansji i ablacji na przebieg etapu silnoprądowego gaszenia prądu, a także istotny wpływ tych zjawisk na działanie komory gaszeniowej.

Ponadto należy już na wstępie bardzo mocno podkreślić następujące dwa zagadnienia:

1. Nie istnieje powszechnie akceptowana, uniwersalna metoda postępowania służąca do opracowania rozwiązania konstrukcyjnego wyłącznika, nawet w przypadku gdy odnosi się to do jednej takiej samej techniki gaszenia łuku elektrycznego; wyłączniki opracowane w różnych firmach różnią się istotnie między sobą: budową i wymiarami poszczególnych elementów komory gaszeniowej, rodzajem napędu, rozwiązaniem układu kinematycznego łączącego siłownik z ciągnem napędzającym styk ruchomy komory gaszeniowej;

2. Nadal jedyną aprobowaną przez użytkowników metodą weryfikacji działania komory gaszeniowej są badania laboratoryjne, zwłaszcza w przypadku gdy określana jest maksymalna zdolność łączeniowa wyłącznika, lub jeśli należy w sposób najbardziej wiarygodny określić graniczne parametry dielektryczne lub mechaniczne wyłącznika, czy zweryfikować trwałość łączeniową lub mechaniczną.

Z drugiej jednak strony biorąc pod uwagę różnorodność oraz wzajemne powiązane przedstawionych powyżej zjawisk, konieczne jest szerokie potraktowanie problemu, unikanie zbędnych uproszczeń, zwłaszcza jeśli rozważania dotyczą rzeczywistych wyłączników a wyniki prac lub badań mają być wykorzystane w praktyce¹⁶.

Uwzględniając wszystkie sformułowane powyżej uwagi, postanowiono przedstawić aktualny stan wiedzy i kierunków badań wszystkich wymienionych na początku niniejszego punktu zagadnień, jednakże z konieczności w formie bardzo skondensowanej. Zrezygnowano natomiast z omawiania zagadnień dotyczących: zarządzanie eksploatacją wyłącznika (tzw. *"life management"*) od momentu zainstalowania w stacji elektroenergetycznej do chwili wycofania z eksploatacji a także szkodliwego wpływu sześćciofluorku siarki i jego produktów

¹⁶ Można to zilustrować następującym przykładem - w wyłącznikach z sześćciofluorkiem siarki bardzo istotnym problemem jest odpowiedni dobór napędu do komory gaszeniowej bowiem od charakteru i wartości siły wypadkowej wprawiającej w ruch cały układ kinematyczny wyłącznika bardzo silnie zależą parametry SF_6 w komorze gaszeniowej. Konieczne jest zatem bardzo precyzyjne zidentyfikowanie wszystkich sił oporowych i napędowych działających na całej drodze styków ruchomych łącznie na przykład z siłami amortyzatorów. Zbyt wczesne hamowanie ruchu styków bowiem może bardzo istotnie ograniczyć maksymalne wartości wielkości termodynamicznych gazu zawartego w tzw. zbiorniku sprężania komory gaszeniowej ale równocześnie konieczne jest zdecydowane zmniejszenie ich energii aby nie dopuścić do gwałtownego zderzania się elementów wyłącznika gdyż powoduje to bardzo duże zmniejszenie trwałości mechanicznej wszystkich jego podzespołów.

rozkładu na środowisko i organizm człowieka oraz spraw związanych z recyklingiem gazu pomimo, iż wiedza odnośnie tej tematyki jest w naszym kraju bardzo niepełna, a często rozpowszechniane są całkowicie błędne opinie. Przyczyna takiego podejścia do tych zagadnień wynika z dwóch następujących faktów:

- tematyka racjonalnej i prawidłowej eksploatacji wyłączników w izolacji sześćciofluorku siarki stanowi całkowicie odrębne zagadnienia i są stosunkowo daleko odległe od podstawowego zakresu niniejszej pracy;
- problematyka związana z wpływem produktów rozpadu na organizm ludzki oraz z ochroną środowiska jest na tyle ważna iż wymaga całościowego potraktowania i ograniczania uproszczeń aby uniknąć możliwości formułowania błędnych wniosków¹⁷.

Należy ponownie bardzo mocno podkreślić iż:

- dokonując przeglądu zagadnień jakie są przedmiotem prac Komitetów Studiów 13,15 oraz 23¹⁸ znanego międzynarodowego stowarzyszenia naukowo technicznego CIGRE, w których wspólnie biorą udział przedstawiciele wytwórców, użytkowników oraz uniwersytetów i niezależnych laboratoriów, a także do realizacji jakich zadań są obecne tworzone tzw. Grupy Robocze a wreszcie jakie formułowane są na sesje generalne tzw. *"preferensial subject"* - tematy preferowane, można z bardzo dużą pewnością stwierdzić, iż problemy przytoczone przez autora dysertacji całkowicie odzwierciedlają wszystkie najważniejsze obecnie kierunki prac poświęconych wysokonapięciowym wyłącznikom z sześćciofluorkiem siarki.

Oceniając stan wiedzy w poszczególnych w wymienionych powyżej zagadnieniach dotyczących wyłączników wysokonapięciowych można sformułować następujące wnioski:

Przebieg procesu wyłączania prądu jest bardzo ściśle uzależniony od czynnika odbierającego energię z kolumny łukowej (a następnie z kolumny po-łukowej) oraz powodującego wzrost wytrzymałości dielektrycznej przerwy mię-

¹⁷ Doświadczenia autora, związane z tymi zagadnieniami, a będące wynikiem wieloletnich unikalnych badań wyłączników w laboratorium i w eksploatacji, w których odzworowywano najbardziej ekstremalne warunki pracy komory gaszeniowej (np. wyłączano w ciągu jednego dnia 25 krotnie prąd zwarcioowy o wartości 31 kA) lub prowadzono długotrwałe (trwające przeszło 5 lat) badania wyłącznika w ciężkich warunkach eksploatacyjnych i równocześnie klimatycznych, zostaną opublikowane w odrębnym artykule. Warto przypomnieć, iż autor uczestniczył w przygotowaniu projektu normy [212].

¹⁸ Komitet Studiów 13 - Switching Equipment (Aparatura łączeniowa) zajmuje się zagadnieniami dotyczącymi konstrukcji, badań, obliczeń, eksploatacji łączników wysokonapięciowych, a także oddziaływaniem między siecią a aparaturą łączeniową, natomiast Komitet Studiów 15 (Materiały elektrotechniczne) powołany został dla rozwiązywania problemów materiałowych, wreszcie przedmiotem prac Komitetu Studiów 23 (Stacje elektroenergetyczne) są problemy konstrukcyjne i eksploatacyjne dotyczące rozdzielnic wysokonapięciowych.

dzystykowej. Zjawiska fizyczne towarzyszące temu procesowi są silnie związane z zasadą działania i budową komory gaszeniowej istotny wpływ na ich przebieg ma także rodzaj i energia zastosowanego napędu. W związku z tym przebieg wyłączania prądu przebiega w sposób odmienny w każdym wyłączniku wysokonapięciowym. Z drugiej strony jednakże gdy ograniczyć rozważania do jednego czynnika gaszącego łuk elektryczny (w przypadku niniejszej rozprawy jest to oczywiście sześćciofluorek siarki) można stwierdzić iż opisane zostały podstawowe mechanizmy odprowadzania energii z kolumny łukowej.

1.3. Cel i zakres pracy

Podstawowym celem pracy jest przedstawienie metody symulacji działania wyłącznika trzeciej generacji podczas wszystkich występujących w eksploatacji charakterystycznych przypadków wyłączania prądów roboczych, przeciążeniowych, zwarciovych wyłącznika wysokiego napięcia z sześćciofluorkiem siarki nowej generacji, w którym do gaszenia łuku elektrycznego wykorzystywane jest zjawisko termoeksansji (dostarczanie energii z kolumny łukowej do gazu zawartego w tzw. zbiorniku sprężania co wywołuje dodatkowy przyrost tego ciśnienia, który to przyrost jest wzmacniany zjawiskiem ablacji materiału dyszy głównej i osłony izolacyjnej styku opalnego ruchomego.

W praktyce w związku z tym proces konstruowania wyłącznika jest długotrwały obejmuje wiele etapów np.:

- wstępne określenie rozwiązania konstrukcyjnego komory gaszeniowej i przyjęcie wyjściowych wymiarów elementów toru prądowego, układu styków głównych, opalnych, układu izolacyjnego a w przypadku wyłączników gazowych układu dyszowego
- określenie parametrów czynnika gaszącego łuk elektryczny i sposobu ich wytworzenia,
- dobór napędu i opracowanie układu kinematycznego,
- dobór materiałów elementów układu stykowego,
- opracowanie i wykonanie modelu,
- wielokrotnie powtarzane próby konstruktorskie (mechaniczne, napięciowe, nagrzewania toru prądowego, zdolności łączenia), często rozpoczynające się od sprawdzenia działania najważniejszych podzespołów,
- ocena wyników prób i weryfikacja przyjętych założeń.

Końcowym etapem jest zawsze budowa prototypu i obszerne próby konstruktorskie, gdyż, co należy podkreślić, obecnie jedyną wiarygodną metodą służącą do sprawdzenia działania wyłącznika są badania laboratoryjne. Próby te obejmują: badania typu wykonywane zgodnie z wymaganiami norm, ale także próby mające na celu określenie trwałości łączeniowej, mechanicznej, maksymalnych czasów łukowych, granicznej wytrzymałości elektrycznej, określenie wpływu wybranych parametrów komory gaszeniowej i napędu na działanie wyłącznika.

Często równolegle z pracami konstrukcyjnymi prowadzone są badania modelowe mające na celu wyjaśnienie przebiegu wielu zjawisk towarzyszących procesowi wyłączania prądu oraz określenia czynników wpływających na ten proces.

Podczas prac konstrukcyjnych lub modernizacyjnych należy dążyć zatem do uzyskania rozwiązania optymalnego, które jest w stanie spełnić wszystkie stawiane przed wyłącznikiem wymagania.

W ostatnich latach podejmowane są na świecie prace nad metodami symulującymi działanie wyłącznika podczas wyłączania prądu.

Bardzo cennym narzędziem pomocnym w realizacji takich zadań optymalizacyjnych są obliczeniowe metody symulujące działanie wyłącznika podczas wyłączania prądu. Umożliwiają one bowiem:

- dokładne prześledzenie procesu wyłączania prądu i zidentyfikowanie czynników decydujących o jego przebiegu;
- wyznaczania podstawowych wymiarów komory gaszeniowej i napędu;
- wykonanie obliczeń dla wielu wariantów wymiarów komory gaszeniowej;
- dobór energii napędu do komory gaszeniowej;
- sprawdzenie działania obu zaworów komory wyłącznika trzeciej generacji.
- dokonania oceny współdziałania wszystkich elementów wyłącznika, co ma podstawowe znaczenie w procesie wyłączania prądu.

Metody symulujące umożliwiają bowiem, już w początkowym etapie prac konstrukcyjnych przeanalizowanie wielu wariantów rozwiązania konstrukcyjnego, określenie podstawowych wymiarów elementów komory gaszeniowej i napędu, określenie współzależności działania poszczególnych zespołów komory, sformułowania wymagań dla napędu oraz określenia czynników decydujących o przebiegu procesu wyłączania prądu.

Metody obliczeniowe mogą stanowić, obok badań laboratoryjnych, bardzo cenne narzędzie służące do weryfikacji przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego wyłącznika

Umożliwiają zdecydowane skrócenie i ograniczenie zakresu prób konstruktorskich, co ma bardzo istotny wpływ na czas trwania prac konstruktorskich, a także na ich efektywność, umożliwia to także zmniejszenie nakładów finansowych.

2. BUDOWA I ZASADA DZIAŁANIA WYŁĄCZNIKA TRZECIEJ GENERACJI

Sześćciofluorek siarki nie występuje naturalnie w przyrodzie. Jest gazem charakteryzującym się wyjątkowymi własnościami zarówno chemicznymi, dielektrycznymi jak i termicznymi, co ma bardzo istotne znaczenie na przebiegu procesu wyłączania prądu w jego atmosferze. Sześćciofluorek siarki w normalnych warunkach atmosferycznych, jest gazem szlachetnym, bardzo stabilnym, chemicznie nieczynnym, nie ma smaku ani zapachu, jest bezbarwny, nie jest toksyczny, nie działa w sposób szkodliwy na środowisko (nie powoduje niszczenia warstwy ozonowej, a jak wspomniano powyżej jego wpływ na powstanie tzw. „efektu cieplarnianego”, w porównaniu na przykład z dwutlenkiem węgla, jest minimalny). Należy jednak bardzo mocno podkreślić, iż wymienione powyżej własności zmieniają się istotnie kiedy SF_6 ulega dysocjacji na skutek działania wysokiej temperatury.

Sześćciofluorek siarki jest ciężkim gazem, jego ciężar właściwy jest pięciokrotnie większy od powietrza i wynosi około 6,16 g/l [50,53,96,97,102]. W związku z tym w przypadku powstania wycieku z urządzenia energetycznego gromadzi się w niższych partiach pomieszczenia, w którym to urządzenie jest zainstalowane (np.: w kanałach kablowych)¹⁹. W niskiej temperaturze i równocześnie przy wysokim ciśnieniu sześćciofluorek siarki znajduje się w stanie płynnym. Częściowe nawet przejście gazu ze stanu gazowego w stan płynny podczas pracy wyłącznika w systemie elektroenergetycznym nie jest korzystne, ponieważ powoduje to obniżenie gęstości gazu, czego wynikiem jest zawsze zmniejszenie wytrzymałości dielektrycznej, zatem ciśnienie znamionowe każdego wyłącznika powinno być bardzo starannie dobrane do najniższej temperatury otoczenia w miejscu zainstalowania wyłącznika (przykładowo jeśli wyłącz-

¹⁹ Zatem konieczne jest zawsze zachowanie ostrożności gdy podejmuje się pracę w takich obszarach, ponieważ można ulec uduszeniu w związku z wyparciem powietrza. Należy też zaznaczyć, że czujniki służące do wykrywania obecności sześćciofluorku siarki w zamkniętym pomieszczeniu należy umieszczać zawsze bardzo blisko podłogi.

nik ma pracować w temperaturze otoczenia dochodzącej do około $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ciśnienie gazu nie powinno być wyższe od 0.3 MPa)²⁰.

Dysocjacja i jonizacja gazu jest w bardzo dużym stopniu uzależniona od temperatury; dysocjacja rozpoczyna się w temperaturze około 1000 K , jej maksimum występuje około 2000 K , natomiast w temperaturze 4000 K gaz jest całkowicie rozłożony na atomy fluoru i siarki. Jonizacja cząsteczek rozpoczyna się przy wyższej temperaturze, jej maksimum występuje przy około 11000 K . W silnoprądowym łuku elektrycznym temperatura przekracza 20000 K , a zatem można z dużą pewnością przyjąć założenie, iż gaz zawarty w plazmie łukowej jest całkowicie zjonizowany. Jeśli w opisanym powyżej procesie nie biorą udziału cząsteczki innych substancji a temperatura kolumny łukowej zacznie się obniżać (co głównie jest związane ze zmniejszaniem się wartości chwilowej prądu a tym samym ograniczaniem ilości energii wydzielającej się w łuku) następuje całkowita rekombinacja gazu. Jednakże podczas normalnej pracy wyłącznika zawsze w gazie znajdują się cząsteczki metalu a także niewielkie ilości wody i powietrza. Związki te wchodzą dość łatwo w reakcje z rozłożonym sześćfluorkiem siarki (co ułatwia panująca w kolumnie łukowej temperatura) tworząc niewielkie ilości kwasu fluorowego, fluorków metali oraz związku tlenu siarki i fluoru - pewna ilość tych produktów reakcji chemicznych jest pochłaniana przez umieszczone w komorze gaszeniowej filtry (absorbenty lub sita molekularne). Niektóre z tych produktów reakcji chemicznych są toksyczne o czym wspomniano już powyżej.

Przewodność termiczna sześćfluorku siarki ma lokalne maksimum w okolicach 2000 K (jest spowodowane dużą intensywności dysocjacji występującą dla tego zakresu temperatury), w związku z tym dla bardzo niskich temperatur (w porównaniu na przykład z powietrzem gdzie dysocjacja pojawia się przy zdecydowanie wyższej temperaturze) istnieje bardzo efektywny mechanizm odprowadzanie energii z kolumny łukowej na drodze przewodnictwa promieniowego do otaczającego rdzeń łuku zimnego gazu. Zjawisko to występuje w okolicy zera prądu i ma istotny wpływ na przebieg tego etapu procesu wyłączania prądu. Sześćfluorek siarki ma w niskiej temperaturze także wyższą przewodność elektryczną od powietrza, co jest oczywiście jego kolejną zaletą. Natomiast prędkość dźwięku w powietrzu jest wyższa niż w sześćfluorku siarki co z jednej strony stanowi kolejną zaletę SF_6 ponieważ wypływ gazu ze zbiornika sprężania odbywa się wolniej a zatem dłużej utrzymuje się wysoka wartość ciśnienia gazu. Z drugiej jednak strony jest to jednak wada sześćfluorku siarki ponieważ natężenie wypływu (tzw. wydatek masowy) ma mniejszą wartość a ponadto zjawiska falowe występujące podczas przepływu gazu przez układ

²⁰ Dobrym zabezpieczeniem przed przechodzeniem sześćfluorku siarki w stan płynny w niskiej temperaturze jest stosowanie mieszaniny gazów np.: SF_6/N_2 lub SF_6/CF_4) [102].

dyszowy trwają dłużej. W tabeli 1 zestawiono podstawowe własności sześćciofluorku siarki dla zakresu temperatury i ciśnienia występujących w obszarze łukowym [53]; należy zaznaczyć, iż prawie wszystkie własności sześćciofluorku siarki silnie zależą od obu tych wielkości fizycznych.

Wytrzymałość dielektryczna sześćciofluorku siarki jest trzykrotnie wyższa w porównaniu z powietrzem przy tym samym ciśnieniu, czego głównym powodem są cechy elektryczne SF_6 , w związku z tym sześćciofluorek siarki może wiązać swobodne elektrony tworząc jony ujemne a zatem jonizacja zderzeniowa w sześćciofluorku siarki praktycznie nie występuje. Krytyczne natężenie pola dla SF_6 można określić jako równe 86 kV/cm, podczas gdy dla powietrza wynosi ono 27 kV/cm, czyli prawie trzykrotnie mniej [102].

Podczas wyłączenia dużych prądów na skutek energii odprowadzanej z kolumny łukowej na drodze promieniowanej i pochłanianej przez elementy układu dyszowego paruje materiał z wewnętrznej powierzchni dyszy głównej oraz z izolacyjnej osłony styku ruchomego opalnego. Oba te elementy, niezależnie od producenta wyłącznika, wykonane są obecnie praktycznie zawsze z politetrafluoroetyleny – PTFE, którego nazwą handlową jest "grey teflon" - teflon szary²¹. W związku z tym w komorze gaszeniowej następuje mieszanie par teflonu ze zjonizowanym sześćciofluorkiem siarki. Jest szczególnie ważne, że pary teflonu szarego mają bardzo zbliżone własności do czystego zjonizowanego sześćciofluorku siarki i nie powodują pogorszenia własności SF_6 , dzięki którym jest on doskonałym czynnikiem odprowadzającym energię z łuku elektrycznego; przykładowo przewodność elektryczna i entalpia mają prawie identyczne wartości dla obu tych związków chemicznych, a ponadto pary teflonu mają lepsze własności termodynamiczne [102,154,155].

Należy jednak bardzo mocno podkreślić, iż własności dielektryczne czystego sześćciofluorku siarki są zdecydowanie lepsze od własności dielektrycznych mieszaniny par PTFE z sześćciofluorkiem siarki. Również po przejściu prądu przez zero w rejonie zapłonów termicznych jedynie czysty sześćciofluorek może wiązać wolne elektrony bowiem tylko on ma cechy elektryczne. Ważne jest zatem, że intensywność parowania PTFE w obszarze zera prądu praktycznie jest równa zero, w związku zarówno ze zdecydowanym zmniejszeniem średnicy łuku elektrycznego jak i istotnym obniżeniem się jego temperatury.

²¹ Obecnie powszechnie stosuje się na dyszę główną oraz izolacyjną osłonę styku opalnego ruchomego teflon (nazywany jest on „teflonem szarym” co jest związane z jego barwą) domieszkowany grafitem oraz niewielką ilością innych związków nieorganicznych np. tlenkiem aluminium (zwiększenie zawartości Al_2O_3 powoduje, że skutecznie ograniczona jest intensywność parowania PTFE).

Tabela 1.

Własności sześćciofluorku siarki dla zakresu temperatury i ciśnienia występujących w obszarze łukowym [58].

Lp.	Temperatura łuku	Ciśnienie w łuku	Współczynnik przepływu entalpii	Entalpia Właściwa	Przewodność Elektryczna	Gęstość
-	[K]*10 ³	[MPa]	[W/N]*10 ²	[J/kg] *10 ⁶	[1/Ωm]*10 ²	[kg/m ³]*10 ⁻³
1	18	0.8	223.4	62	86	8.0
2	18	1.0	216.0	67	87	10.4
3	18	1.6	203.3	72	89	17.6
4	20	0.8	275.8	86	103	6.4
5	20	1.0	262.0	93	104	8.2
6	20	1.6	249.0	99	106	14
7	21	0.8	300.0	100	112	5.9
8	21	1.0	295.2	106	113	7.4
9	21	1.6	290.1	110	115	12.8
10	23	0.8	332.1	120	124	5.0
11	23	1.0	327.6	125	128	6.1
12	23	1.6	320.1	130	131	11.4
13	26	0.8	367.0	144	138	4.0
14	26	1.0	358.4	148	142	4.8
15	26	1.6	353.5	150	150	8.2

Sześćciofluorek siarki został po raz pierwszy zastosowany w elektrotechnice w roku 1940 przez amerykańską firmę General Electric jako izolacja generatorów elektrostatycznych oraz transformatorów stosowanych w urządzeniach rentgenowskich [160]. Do roku 1950 gaz ten był wykorzystywany jedynie przy wytwarzaniu specjalnych krótkoseryjnych urządzeń elektrycznych ze względu na bardzo małą jego produkcję i w związku z tym na bardzo wysoką cenę²².

Pierwsze wyłączniki, w których jako czynnik gaszący łuk elektryczny zastosowano sześćciofluorek siarki, zostały wprowadzone na rynek przez firmę amerykańską Westinghouse w 1960 roku. Wyłącznik ten jednakże nie odniósł dużego sukcesu rynkowego a zdecydowany rozwój wyłączników z SF₆ nastąpił

²² Obecnie sześćciofluorek siarki znajduje duże zastosowanie w licznych wyrobach przemysłu elektrotechnicznego, przede wszystkim w wyłącznikach a poza tym w wysokonapięciowych i średnionapięciowych rozdzielnicach osłoniętych izolowanym gazem - tzw. GIS (gas insulated switchgear), transformatorach i przekładnikach, kablach czy szynoprzewodach. Natomiast poza tą gałęzią przemysłu stosowany jest w aparaturze medycznej (aparatach rentgenowskich, aparaturze do leczenia odmy opłucnowej itp.); przyrządach naukowych (w mikroskopach elektronowych, elektrostatycznych akceleratorach cząstek); w oknach domów (umieszczany jest między szybami, gdyż stanowi doskonałą izolację termiczną i równocześnie akustyczną); w metrologii (jako gaz lokalizacyjny) w metalurgii (jako atmosfera ochronna) a także w wielu innych mniej ważnych zastosowaniach na przykład jako gaz wypełniający opony samolotów [147].

dopiero po rozpoczęciu ich produkcji przez firmy europejskie (np.: Siemens, BBC, AEG, Merlin Gerin) co nastąpiło w drugiej połowie lat sześćdziesiątych. Na początku lat siedemdziesiątych produkcja wyłączników z sześćfluorkiem siarki została także uruchomiona w Japonii (Hitachi, Toshiba, Mitsubichi).

Do eksploatacji w systemach elektroenergetycznych krajów europejskich wyłączniki z sześćfluorkiem siarki zostały wprowadzone na przełomie lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych. Pierwsze wyłączniki z SF₆ miały konstrukcję wzorowaną na wyłącznikach pneumatycznych i były wyłącznikami dwuciśnieniowymi²³ [6]. Wyłączniki dwuciśnieniowe miały jednak liczne wady - do najważniejszych można zaliczyć:

- bardzo złożoną konstrukcję,
- wyjątkowo dużą objętość sprężonego do ciśnienia około 2.0 MPa gazu,
- niepewny system zapewniający szczelność między obszarem wysokiego i niskiego ciśnienia w położeniu zamknięcia wyłącznika; (elementami tego systemu były styki opalne, zużywające się po każdej operacji łączenia prądu),
- konieczność stosowania urządzeń sprężarkowych służących do przetłaczania sześćfluorku siarki oraz dodatkowego układu do podgrzewania gazu, aby zapobiec jego skraplaniu w zbiorniku wysokiego ciśnienia.

W związku z tym bardzo szybko, na początku lat siedemdziesiątych, wyłączniki pierwszej generacji zostały zastąpione przez wyłącznik samosprężne (obecnie są one nazywane wyłącznikami drugiej generacji) [4,6,22,33,41,45,68,80,90,112,118,123,152,162,179], ponieważ już w wyłącznikach dwuciśnieniowych potwierdzone zostały wyjątkowe własności tego gazu, czego najlepszym dowodem było wyłączanie znacznie większych prądów zwarciovych niż prądy dotychczas wyłączane przez wyłączniki pneumatyczne.

Wyłączniki samosprężne są obecnie nadal eksploatowane w systemach elektroenergetycznych wielu krajów i nadal produkowane, głównie w krajach europejskich i w Japonii. Dla zakresu najwyższych napięć znamionowych gdy wynoszą one 400 kV lub więcej samosprężne komory gaszeniowe są nadal podstawowym rozwiązaniem konstruktorskim.

W końcu lat osiemdziesiątych, w rezultacie szeroko prowadzonych prac badawczych [1,5,35,43,67,88,100,155,158,196] oraz zastosowania metod obliczeniowych symulujących działanie wyłącznika [9,15,22,39,58,102,103,117,119,173,187], opracowano nowy typ wyłącznika z SF₆, w którego komorze gaszeniowej do wytworzenia przyrostu ciśnienia gazu oprócz pracy napędu jest

²³ Wyłączniki dwuciśnieniowe z sześćfluorkiem siarki nazywane są obecnie wyłącznikami pierwszej generacji z SF₆.

wykorzystywane także tzw. zjawisko termoeekspansji²⁴. W związku z tym w wyłącznikach tego typu, noszących nazwę wyłączników trzeciej generacji, całkowicie odmiennie przebiega proces wyłączania prądu, jest on bowiem ściśle uzależniony od wartości wyłączanego prądu²⁵.

2.1. Zjawisko termoeekspansji

Cechą charakterystyczną współczesnych wyłączników z SF₆ jest, że podczas operacji otwierania styków wytwarzany jest przyrost ciśnienia sześćciofluorku siarki konieczny do wywołania przepływu gazu przez układ dyszowy. Sześćciofluorek siarki płynący przez układ dyszowy jest bowiem w okresie łukowym czynnikiem odbierającym energię z kolumny łukowej, a po przejściu prądu przez zero czynnikiem powodującym bardzo szybką dejonizację obszaru znajdującego się wewnątrz dyszy głównej a następnie odbudowę wytrzymałości przerwy międzystykowej. W wyniku licznych badań eksperymentalnych [4,12, 22,46,89,180,198] stwierdzono, że do uzyskania zakładanej zdolności łączeniowej konieczne jest wytworzenie określonego przyrostu ciśnienia sześćciofluorku siarki w zbiorniku sprężania komory gaszeniowej (ciśnienie to nosi nazwę ciśnienia spiętrzenia). W przypadku wyłączania zwarć pobliskich, gdy równocześnie występuje duża wartość prądu zwarciovego, a bezpośrednio po przejściu prądu przez zero w tzw. strefie zapłonów termicznych (trwającej kilka - kilkanaście mikrosekund) także bardzo duża stromość napięcia powrotnego, związek między stromością wyłączanego di/dt prądu, graniczną wytrzymywaną stromością napięcia powrotnego du/dt oraz ciśnieniem w zbiorniku sprężania

²⁴ Wcześniej w połowie lat osiemdziesiątych konstruktorzy z Japonii opracowali zmodyfikowane komory gaszeniowe dla wyłączników samosprężnych; do najciekawszych można zaliczyć komorę gaszeniową wyposażoną w dwa zbiorniki; pierwszy zbiornik podczas ruchu styków zwiększał swoją objętość natomiast drugi zmniejszał swą objętość; zatem w pierwszym następowało obniżanie ciśnienia gazu, a w drugim sześćciofluorek siarki ulegał sprężaniu; w rezultacie w tej komorze gaszeniowej uzyskiwano dużą różnicę ciśnienia SF₆ między wlotem a wylotem dyszy; równie interesujące jest rozwiązanie konstrukcyjne tzw. komory hybrydowej, w której część sześćciofluorku siarki o wysokiej temperaturze odprowadzanego z obszaru kolumny łukowej przez dyszę pomocniczą jest ponownie kierowana do zbiornika sprężania, co powoduje znaczący przyrost ciśnienia gazu w tym obszarze; wyłącznik hybrydowy należy uznać za bezpośredniego poprzednika wyłącznika trzeciej generacji [113,199].

²⁵ Dla zakresu średnich napięć także opracowano komory gaszeniowe, w których jako czynnik gaszący łuk elektryczny wykorzystywany jest sześćciofluorek siarki. Jednakże komory te mają zdecydowanie inną budowę lub odmienną zasadę działania w porównaniu z wysokonapięciowymi komorami gaszeniowymi; na przykład w wyłącznikach SN stosowane są komory z łukiem wirującym, komory, w których przyrost ciśnienia powstaje wyłącznie na skutek wykorzystania zjawiska termoeekspansji i ablacji a ostatnio tzw. komory typu TEMP (termoeekspansja oraz pole magnetyczne). Wykorzystanie tych komór dla zakresu wysokich napięć byłoby jednak bardzo trudne (w praktyce nie zrealizowano żadnego wyłącznika WN, w którym wykorzystaloby jakąkolwiek wymienioną powyżej komorę gaszeniową). Podstawową przyczyną różnic w budowie komór gaszeniowych wysokonapięciowych i średnionapięciowych jest nawet kilkukrotnie wyższa stromość napięcia powrotnego występująca w rzeczywistych obwodach wysokonapięciowych.

w chwili przechodzenia prądu przez zero p (t_a), opisuje wzór w następującej postaci [22]:

$$\frac{du}{di} = C \cdot [p(t_a)^m] \cdot \left(\frac{di}{dt}\right)^{-n} \quad (1)$$

gdzie:

C, m, n - współczynniki zależne od rozwiązania konstrukcyjnego oraz od wymiarów elementów układu dyszowego i stykowego komory gaszeniowej.

Ilustracją graficzną powyższej zależności (1) są tzw. krzywe graniczne określone na podstawie licznych badań dla obszaru zapłonów termicznych [22] (pokazano je na rys.1). Krzywe te wyznaczone są dla konkretnego wyłącznika, a na ich podstawie możliwe jest dla tego wyłącznika określenie maksymalnej wartości prądu, wyłączalnego na przykład w warunkach zwarć pobliskich.

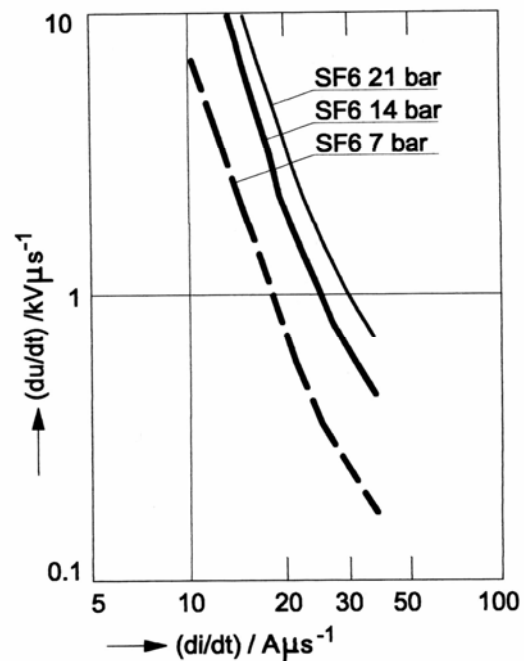
W wyłącznikach wysokonapięciowych z sześćciofluorkiem siarki istnieją dwa podstawowe mechanizmy powodujące przyrost ciśnienia gazu w komorze gaszeniowej:

- sprężanie gazu zawartego w obszarze między nieruchomym tłokiem a ruchomym cylindrem;
- zjawisko termoeekspansji.

Podczas wyłączania prądów zwarciovych wpływ na przyrost ciśnienia w komorze gaszeniowej ma także:

- ograniczanie powierzchni przepływu gazu zimnego w układzie dyszowym przez kolumnę łukową;
- parowanie materiałów dyszy głównej oraz specjalnie ukształtowanej osłony styku ruchomego opalnego.

Sprężanie gazu zawartego w obszarze między nieruchomym tłokiem a ruchomym cylindrem; (w tzw. zbiorniku



Rys.1. Przykład krzywych granicznych dla obszaru zapłonów termicznych [22].

sprężania) odbywa się kosztem pracy napędu a wartość przyrostu ciśnienia jest proporcjonalna do szybkości zmian objętości zbiornika sprężania [125,127,130]. W związku z tym uzyskanie dużego przyrostu ciśnienia (rzędu 1.0 -1.8 MPa) wymaga stosowania napędu o bardzo dużej energii, gdyż siła parcia sześćciofluorku siarki na pokrywę górna cylindra w takim przypadku jest podstawowym składnikiem sił oporowych obciążających napęd. Sprężanie gazu jest podstawowym mechanizmem generującym przyrost ciśnienia w komorze gaszeniowej wyłącznika samosprężnego.

W wyłączniku wysokonapięciowym wyłączaniu prądu zawsze towarzyszy powstanie wyładowania łukowego, który zapala się między stykami opalnymi. Łuk elektryczny palący się w sześćciofluorku siarki, w dwustrumieniowym układzie dyszowym charakteryzuje się bardzo wysoką temperaturą, wysoką przewodnością elektryczną oraz zwartą kolumną, której średnica jest proporcjonalna do chwilowej wartości prądu.

Podczas fazy silnoprądowej procesu wyłączania prądu przez wyłącznik z sześćciofluorkiem siarki głównym mechanizmem odprowadzania energii z kolumny łukowej jest konwekcja osiowa, przy czym ze względu na bardzo wysoką temperaturę plazmy łukowej istotną rolę w tym procesie odgrywa również promieniowanie. W związku z tym bilans mocy jednostki objętości łuku elektrycznego dla tej fazy procesu wyłączania prądu można opisać następującą zależnością [93,94]:

$$\sigma_A \cdot E^2 = W(p, T_A) + \rho_A \cdot w_A \cdot \frac{dh_A}{dz} \quad (2)$$

gdzie:

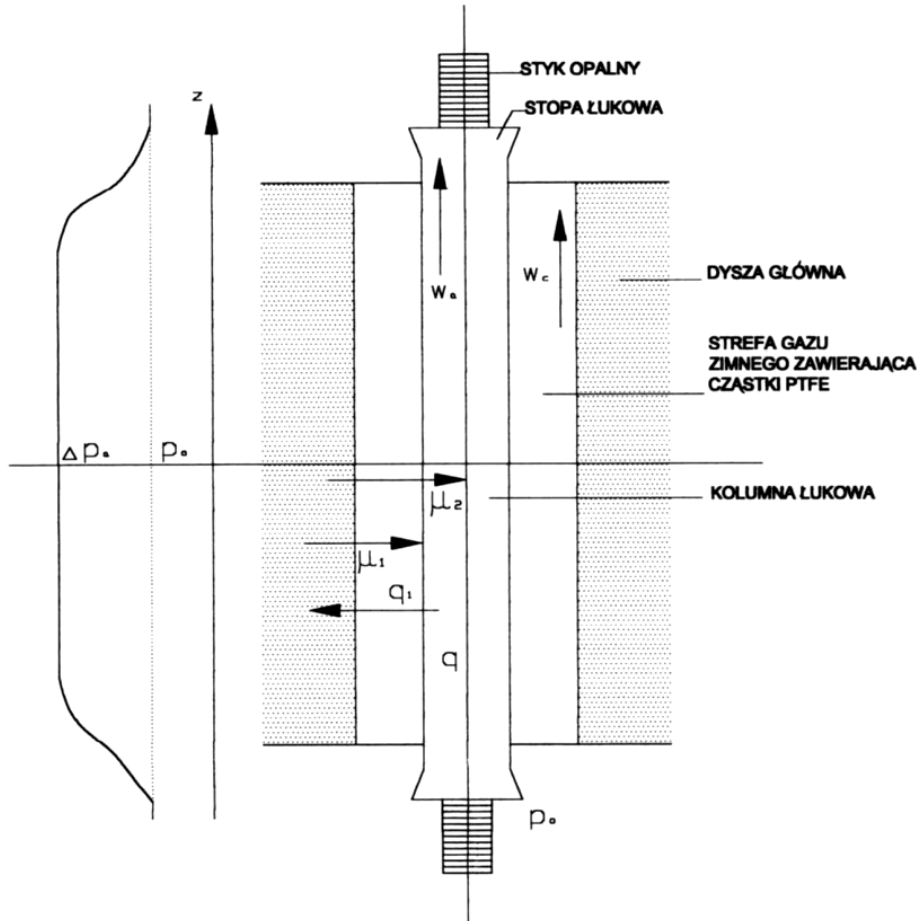
$h_A, \sigma_A, \rho_A, T_A$ - entalpia, przewodność elektryczna, gęstość, temperatura sześćciofluorku siarki w strefie kolumny łukowej

w_A - prędkości osiowa gazu w strefie kolumny łukowej;

$W(p, T_A)$ - moc promieniowania z jednostki objętości łuku (zależna od ciśnienia i temperatury kolumny łukowej) ;

E - gradient napięcia łuku.

Znaczna część energii odprowadzanej z łuku elektrycznego na drodze promieniowania jest pochłaniana przez ściany wewnętrznych otworów: izolacyjnej dyszy głównej oraz izolacyjnej styku ruchomego opalnego, czego efektem jest parowanie teflonu ze ścianek tych elementów. Schemat wymiany energii i masy między kolumną łukową otaczającą łuk mieszaniną par teflonu (PTFE) i zimnego sześćciofluorku siarki oraz ścianką wewnętrzną dyszy pokazany jest na rysunku 2.



Rys.2. Schemat wymiany energii i masy między kolumną łukową, otaczającą łuk mieszaniną par teflonu (PTFE) i zimnego sześćfluorku siarki oraz ścianką wewnętrzną dyszy.

w_A, w_C - prędkości osiowa SF_6 odpowiednio w: strefie kolumny łukowej, w strefie gazu zimnego ; Δp_a - lokalny przyrost ciśnienia wywołany zjawiskiem ablacji, q - energia wydzielająca się w kolumnie łukowej; q_1 - energia odprowadzana z łuku na drodze promieniowania powodująca parowanie materiału dyszy; μ_{1t}, μ_{2t} - natężenie par teflonu (na jednostkę długości łuku) odpowiednio: odprowadzanych ze ścianki dyszy, dostarczane do kolumny łukowej.

W artykule [145] autor niniejszego opracowania wyprowadził szacunkowy wzór określający lokalny przyrost ciśnienia gazu powstający w przekroju krytycznym dyszy głównej wywołany parowaniem materiału z jej ścianki wewnętrznej:

$$\Delta p_a = \frac{1}{h_t} \cdot g \cdot \frac{i^2}{\sigma_A \cdot A_A^2} \cdot \varphi(A) \cdot \lambda_c \cdot aA \cdot l_{kg} \quad (3)$$

przy czym

$$\varphi(A) = \frac{A_A}{A_{kg}} \quad (4)$$

gdzie:

- Δp_a - lokalny przyrost ciśnienia w obszarze przekroju krytycznego dyszy głównej spowodowany ablacją teflonu (PTFE)
- h_t - entalpia właściwa par teflonu;
- ϑ - współczynnik, odniesiony do jednostki długości łuku, określający relację między całkowitą mocą wydzielającą się w łuku, a mocą promieniowania powodującą parowanie materiału dyszy; zwykle przyjmuje się, iż $\vartheta = 0.32 \div 0.35$ [-]²⁶.
- i - prąd płynący przez kanał łukowy;
- A_A - powierzchnia przekroju kolumny łukowej.
- A_{kg} - powierzchnia przekroju krytycznym dyszy głównej.
- λ_c - stosunek prędkości dźwięku dla par teflonu i zjonizowanego sześćiofluorku siarki (autorzy pracy [155] szacują, że wartość współczynnika $\lambda = 0.22 \div 0.25$).
- a_A - prędkość dźwięku SF₆ w strefie kolumny łukowej.
- l_{kg} - długość przekroju krytycznego (gardzieli) dyszy głównej.

Oprócz zjawiska ablacji istnieje także drugi czynnik powodujący lokalny wzrost ciśnienia w obszarze przekroju krytycznego dyszy głównej. Czynnikiem tym jest tzw. ciśnienie elektrodynamiczne w łuku powstające wskutek zjawiska "pinch-effect" u²⁷ wywołanego przez wewnętrzne pole magnetyczne kanału łukowego powstałe przez skierowany przepływ ładunków. Wartość ciśnienia elektrodynamicznego można oszacować wykorzystując następującą zależność [134,145,155]:

$$\Delta p_m = \frac{\mu_0}{\pi^2} \cdot \left(\frac{i}{d_A} \right)^2 \quad (5)$$

gdzie:

- Δp_m - lokalny przyrost ciśnienia w obszarze przekroju krytycznego dyszy spowodowany zjawiskiem "pinch-effect" u²⁷;
- μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m])
- d_A - średnica kolumny łukowej.

²⁶ W pracach [79,93,94,160,179] wykazano, iż znaczna część energii promieniowanej z centralnych części rdzenia łukowego jest pochłaniana przez jego warstwy zewnętrzne.

²⁷ Zjawisko pinch-effectu jest nazywane w języku polskim skurczem magnetycznym lub przeżeniem magnetofluidodynamicznym.

W pracy [139] autor niniejszej rozprawy dokonał oceny metod służących obliczania powierzchni przekroju kolumny łukowej i na tej podstawie sformułował zależność opisującą średnicę łuku w przekroju krytycznym dyszy w następującej postaci:

$$d_A = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{(l_A)^{\frac{1}{4}}}{(\sigma_A \cdot h_A \cdot a_A \cdot \rho_A)^{\frac{1}{4}}} \cdot (i)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

gdzie:

l_A - długość wlotowej części dyszy;

Opierając się na wynikach prac [41,44,49,58,59,93,94,95] oraz [127-131] można założyć, iż temperatura w kolumnie łukowej wynosi około $T_A = 20000 \div 23000$ [K], natomiast wartość ciśnienia SF_6 w obszarze przekroju krytycznego dyszy podczas wyłączania prądów o wartości $I_s = 1 \div 20$ [kA] zawarta jest w granicach $p_k = 1.0 \div 1.2$ [MPa]. Dla takich wartości ciśnienia i temperatury SF_6 występujących w strefie kolumny łukowej, można przyjąć, iż wartości własności sześćciofluorku siarki wynoszą odpowiednio [18,19,37]:

- przewodności elektryczna około $\sigma_A = 105 \div 130 \cdot 10^2$ [1/Ωm];
- osiowa prędkość gazu $a_A = 3300 \div 3700$ [m/s];
- gęstość $\rho_A = 8.2 \div 7.0 \cdot 10^{-2}$ [kg/m³]²⁸;
- entalpia właściwa $h_A = 96 \div 125 \cdot 10^6$ [J/kg].

Dla tych wartości własności sześćciofluorku siarki, przyjmując ponadto, iż długość wlotowej części dyszy wynosi około $l_A = 0.05$ [m] obliczono wartość średnicy kolumny łukowej dla prądów z zakresu $I_s = 1 \div 20$ [kA], wyniki zestawiono w tabeli 2. W tabeli tej zestawiono także wartości lokalnego przyrostu ciśnienia sześćciofluorku siarki wywołane ablacją oraz zjawiskiem "pinch-effect" u" przyjmując dodatkowo, iż: długość gardzieli dyszy $l_{kg} = 0.04$ [m]; entalpia właściwa par teflonu $h_t = 12.0 \cdot 10^6$ [J/kg].

²⁸

Ze wzrostem temperatury plazmy łukowej następuje zmniejszenie gęstości sześćciofluorku siarki.

Tabela 2.

Wartości lokalnego przyrostu ciśnienia SF_6 w obszarze przekroju krytycznego dyszy głównej wywołane ablacją teflonu oraz zjawiskiem "pinch-effect" u" podczas wyłączania prądów z zakresu $I_s = 1 \div 20$ [kA]²⁹.

Prąd wartość skuteczna [kA]	1	2	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20
średnica łuku d_A [mm]	4.8	6.8	8.3	9.6	11.8	13.6	15.1	16.6	18.0	19.2	20.4 20.0*	21.5 20.0*
przyrost ciśnienia wywołany "pinch-effect" em"; Δp_m [MPa] średnica dyszy $d_d = 28$ [mm]	0.01	0.02	0.03	0.05	0.06	0.09	0.11	0.14	0.15	0.18	0.195 0.20**	0.225 0.25**
przyrost ciśnienia wywołany ablacją Δp_a [MPa] $d_d = 28$ [mm]	0.06	0.08	0.10	0.11	0.13	0.16	0.18	0.20	0.21	0.24	0.248	0.257
$d_d = 20$ [mm]	0.08	0.12	0.15	0.16	0.20	0.23	0.36	0.29	0.33	0.36	0.44	0.48
* w rzeczywistych wyłącznikach z trzeciej generacji średnica gardzieli dyszy głównej wynosi około 20 mm, a zatem w przypadku prądów o dużych wartościach także kolumna łukowa ograniczona przez ścianki otworu wewnętrznego tej dyszy ma taką samą średnicę.												
** obliczony przyrost ciśnienia wywołany "pinch-effect" em" Δp_m przy założeniu, iż kolumna łukowa jest ograniczona przez ścianki gardzieli dyszy głównej, której średnica wynosi 20 mm.												

Analizując wyniki obliczeń lokalnego przyrostu ciśnienia SF_6 zamieszczone w tabeli 2 można sformułować następujące wnioski :

- podczas wyłączania prądów roboczych z zakresu $1 \div 4$ [kA] przyrost ciśnienia SF_6 spowodowany zjawiskiem "pinch-effect" u" jest bardzo mały (nie przekracza 0.05 [MPa] w okolicach maksimum półfali prądu), zatem jego wpływ na przepływ sześćfluorku siarki może być całkowicie pominięty;
- dla tego zakresu prądów również przyrost ciśnienia spowodowany ablacją teflonu ma także bardzo małą wartość (około 0.1 [MPa] w pobliżu maksimum półfali prądu), więc i jego oddziaływanie na przepływ gazu w układzie dyszowym może zostać całkowicie pominięty;
- podczas wyłączania prądów zwarciovych o wartościach należących do przedziału $6 \div 20$ [kA] wartość przyrostu ciśnienia SF_6 spowodowany

zjawiskiem "pinch-effect" u" nieznacznie wzrasta, zwłaszcza w przypadku gdy rośnie gęstość prądu w kanale łukowym, którego średnica jest ograniczona przez ścianki dyszy - jednakże maksymalne przyrost ciśnienia w okolicach maksimum półfali prądu osiąga wartość około $0.20 \div 0.25$ [MPa];

- wartość przyrostu ciśnienia spowodowany ablacją teflonu jest uzależniony od dwóch czynników: wartości wyłączanego prądu i średnicy przekroju krytycznego dyszy; wraz ze wzrostem wyłączanego prądu zwiększa się energia odprowadzana z łuku na drodze promieniowania; natomiast zwiększenie średnicy przekroju krytycznego dyszy powoduje iż mniejsza część energii promieniowania powoduje ablacje materiału dyszy, ponieważ jest przejmowana przez otaczającą łuk warstwę gazu zimnego;
- w przypadku wyłączania prądów o wartościach rzędu $16 \div 20$ [kA] w dyszy, której średnica przekroju krytycznego wynosi około 20 [mm]³⁰ zdecydowanie rośnie ciśnienie spowodowane ablacją (w obszarze maksimum półfali prądu osiąga wartość dochodzącą do $0.36 \div 48$ [MPa]); stanowi to istotną przeszkodę dla przepływającej przez dyszę strugi gazu, sześćciofluorek siarki nie może bowiem rozprężyć się do ciśnienia krytycznego;
- zwiększenie oporów przepływu SF₆ należy uwzględnić przy obliczeniach natężenia przepływu wprowadzając współczynnik korygujący, którego wartość powinna być uzależniona od lokalnego przyrostu ciśnienia.

Podczas wyłączania bardzo dużych prądów zwarciovych o wartości z zakresu $20 \div 40$ [kA]³¹ zdecydowanie nasila się zjawisko ablacji, w związku ze zwiększaniem się energii wydzielającej się w łuku elektrycznym co powoduje także:

- wzrost intensywności promieniowania,
- zwiększenie średnicy kolumny łukowej; przy dużych chwilowych wartościach średnica może całkowicie wypełniać przekrój krytyczny dyszy, czego konsekwencją jest zdecydowany wzrost gęstości prądu w kanale łukowym.

W tabeli 3 zestawiono oszacowane wartości lokalnego przyrostu ciśnienia sześćciofluorku siarki w obszarze przekroju krytycznego dyszy głównej

³⁰ Taki wymiar przekroju krytycznego dyszy jest typowy dla wyłącznika trzeciej generacji.

³¹ Jest to zakres znamionowych prądów wyłączalnych wyłączników o napięciu znamionowym z przedziału $72 \div 172$ kV (w warunkach krajowych wyłączników na napięcie 123 kV).

wywołane ablacją teflonu oraz zjawiskiem "pinch-effect'u" podczas wyłączania dużych prądów zwarciovych z zakresu 22÷40 [kA]

Tabela 3.

Wartości lokalnego przyrostu ciśnienia sześćsiofluorku siarki w obszarze przekroju krytycznego dyszy głównej wywołane ablacją teflonu oraz zjawiskiem "pinch-effect'u" podczas wyłączania dużych prądów zwarciovych ³²

Prąd wartość skuteczna I_s [kA]		22	25	28	30	32	34	36	38	40
Średnica łuku d_A [mm]		22.5	24.0	25.4	26.4	27.4	27.6	28.8	29.5	30.5
przyrost ciśnienia wywołany "pinch-effect'em"; Δp_m [MPa]	Średnica dyszy $d_d=28$ [mm]	0.24	0.28	0.31	0.34	0.36	0.38	0.42*	0.49*	0.53*
	Średnica dyszy** $d_d=20$ [mm]	0.31	0.40	0.51	0.58	0.66	0.75	0.84	0.93	1.04
przyrost ciśnienia wywołany ablacją Δp_a [MPa]	Średnica dyszy $d_d=28$ [mm]	0.26	0.28	0.29	0.30	0.31	0.32	0.37***	0.41***	0.46***
	Średnica dyszy**** $d_d=20$ [mm]	0.53	0.64	0.78	0.89	1.03	1.12	1.29	1.49	1.60
* obliczony przyrost ciśnienia wywołany "pinch-effect'em" przy założeniu, iż łuk jest ograniczony przez ścianki gardzieli dyszy głównej o średnicy równej 28 [mm].										
** obliczony przyrost ciśnienia wywołany "pinch-effect'em" przy założeniu, iż łuk jest ograniczony przez ścianki gardzieli dyszy głównej o średnicy równej 20 [mm].										
*** obliczony przyrost ciśnienia wywołany ablacją przy założeniu, iż łuk jest ograniczony przez ścianki gardzieli dyszy głównej o średnicy równej 28 [mm].										
**** obliczony przyrost ciśnienia wywołany ablacją przy założeniu, iż łuk jest ograniczony przez ścianki gardzieli dyszy głównej o średnicy równej 20 [mm].										

Analizując wyniki obliczonego lokalnego przyrostu ciśnienia sześćsiofluorku siarki podczas wyłączania dużych prądów zwarciovych sformułowano następujące wnioski:

- przyrost ciśnienia wywołany zjawiskiem "pinch-effect'u" podczas wyłączania dużych prądów zwarciovych, w przypadku gdy średnica kolumny łukowej nie jest ograniczona przez ścianki dyszy a w związku z tym w kanale łukowym nie następuje gwałtowny wzrost gęstości prądu, nie osiąga dużych wartości; przykładowo: dla prądu o wartości 34 [kA] przyrost

- ciśnienia wywołany tym zjawiskiem wyniósł dla wartości szczytowej jedynie 0.38 [MPa]; można zatem w takich przypadkach wpływ tego przyrostu ciśnienia na przepływ gazu przez układ dyszowy całkowicie zaniedbać,
- zwiększenie gęstości prądu w kanale łukowym powoduje również wzrost wartości ciśnienia wytworzonego przez zjawisko "pinch-effect'u"; przykładowo dla prądu 34 [kA] ciśnienie to wynosi 0.75 [MPa], natomiast dla prądu 40 [kA] osiąga bardzo dużą wartość rzędu 1.0 [MPa];
 - lokalny przyrost ciśnienia wywołany zjawiskiem ablacji jest także uzależniony od relacji między średnicą kolumny łukowej oraz średnicą gardzieli dyszy; w związku z tym bardzo szybko wzrasta gdy wyłączane są prądy o dużych wartościach zwłaszcza gdy kanał łukowy całkowicie wypełnia przekrój krytyczny dyszy głównej;
 - dla dyszy głównej o średnicy przekroju krytycznego wynoszącego 28 [mm] lokalny przyrost ciśnienia wywołany ablacją dla prądów o wartościach 22÷34 [kA], dla których średnica kanału łukowego zawarta była w granicach 22.5÷27.6 [mm], wyniósł zaledwie 0.24÷0.38 [MPa], można zatem także i w tym przypadku, wpływ tego przyrostu ciśnienia na przepływ gazu przez układ dyszowy całkowicie zaniedbać, postępując identycznie gdy pominięto wpływ przyrostu ciśnienia wywołany przez zjawisko "pinch-effect'u" generowane w kanale łukowym, przez który płynął prąd o małej gęstości;
 - dla dyszy głównej o średnicy przekroju krytycznego wynoszącego 20 [mm] lokalny przyrost ciśnienia wywołany ablacją dla prądów o wartościach 22÷40 [kA], osiągnął bardzo duże wartości od 0.53 [MPa] do 1.6 [MPa]; ten duży przyrost ciśnienia SF₆ spowodowany był przez całkowite wypełnienie gardzieli dyszy przez kanał łukowy.

Wykorzystując wykonane powyżej obliczenia i sformułowane na ich podstawie wnioski opisano przebieg kolejnych etapów zjawiska termoeleksansji:

- gdy średnica kolumny łukowej jest mniejsza od średnicy przekroju krytycznego (tzw. gardzieli dyszy) energia z łuku jest odprowadzana na drodze konwekcji osiowej i promieniowania; część tej energii jest pochłaniana przez ścianki izolacyjnej dyszy głównej wykonanej z politetrafluoroetyleny; powoduje to parowanie materiału ścinek dyszy, czego następstwem jest wprowadzanie cząstek materiału izolacyjnego w obszar kolumny łukowej - zjawisko to nosi nazwę ablacji;
- intensywność ablacji nasila się w obszarze maksimum półfali prądu zwłaszcza w przypadku gdy kolumna łukowa całkowicie wypełni gardziel

dyszy głównej (czyli gdy powstanie tzw. zjawisko blokowania przepływu sześćsielfluorku siarki);

- przy dużych wartościach wyłączanego prądu podczas występowania zjawiska blokowania przepływu rośnie zdecydowanie gęstość prądu, ponieważ kolumna łukowa ograniczona przez ścianki dyszy nie może zwiększyć swojej średnicy; efektem tego procesu jest tzw. zjawisko pinch-effec'tu, któremu towarzyszy lokalny wzrost ciśnienia;
- lokalny wzrost ciśnienia występujący w okolicy przekroju krytycznego dyszy głównej jest bardzo silnie wzmocniony zjawiskiem ablacji;
- w rezultacie w przypadku wyłączania dużych prądów ciśnienie gazu w obszarze gardzieli dyszy jest zdecydowanie wyższe niż w zbiorniku sprężania; w związku z tym kierunek przepływu gazu ulega zmianie, płynie on bowiem od obszaru łukowego do zbiornika sprężania (przepływ ten nosi nazwę przepływu wstecznego);
- przepływ wsteczny transportuje część energii wydzielającej się w łuku do sześćsielfluorku siarki zawartego w zbiorniku sprężania, a w wyniku tego następuje bardzo znaczny i szybki wzrost ciśnienia gazu zawartego w tej objętości;
- kiedy chwilowa wartość prądu zaczyna się obniżać maleje gęstość prądu w łuku elektrycznym a następnie jego średnica, zmniejsza się intensywność ablacji, maleje a następnie zanika lokalny wzrost ciśnienia wywołujący przepływ wsteczny; gaz ponownie płynie ze zbiornika przez układ dyszowy;
- przepływ ten cechuje wysokie natężenie przepływu, gdyż gaz zawarty w zbiorniku sprężania ma bardzo wysokie ciśnienie; w związku z tym w obszarze zera prądu istnieją bardzo dobre warunki do odprowadzania energii z kolumny łukowej, a po przejściu prądu przez zero z kolumny połukowej, a także do odbudowy wytrzymałości przerwy międzystykowej;
- proces obejmujący blokowanie przepływu, ablację materiału dyszy, powstanie lokalnego przyrostu ciśnienia, przepływ wsteczny oraz transportowanie części energii wydzielającej się w łuku do sześćsielfluorku zawartego w zbiorniku sprężania nosi nazwę termoeekspansji.

Opierając się na wynikach prac [35,58,65,111,155,160,179] można przyjąć, iż maksymalna wartość ciśnienia SF₆ wywołana zjawiskiem termoeekspansji występuje w gardzieli dyszy głównej, a w związku z tym do gazu zawartego w górnym zbiorniku cylindra dostarczana jest jedynie energia wydzielająca się w tej części kolumny łukowej, która znajduje się we wlotowej części dyszy, pod warunkiem iż lokalne ciśnienie SF₆ w przekroju krytycznym dyszy jest wyższe niż ciśnienie gazu w zbiorniku sprężania.

2.2. Budowa wyłącznika trzeciej generacji

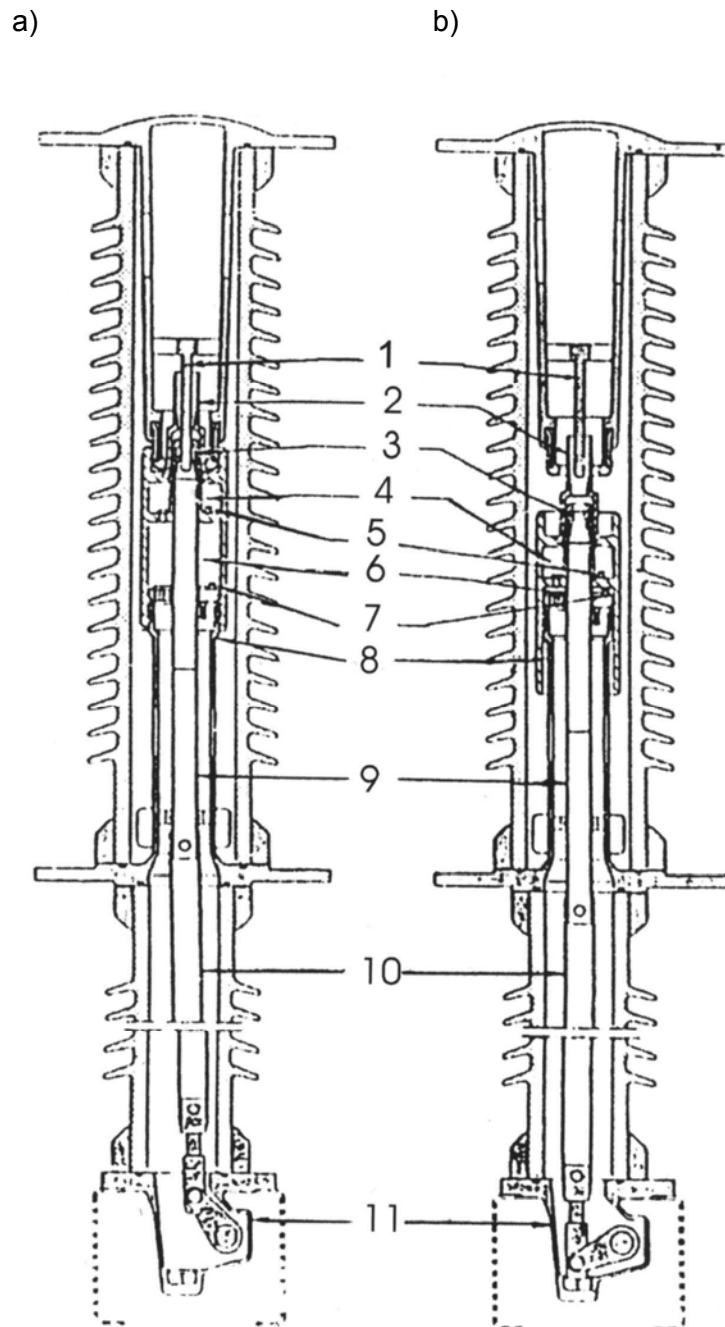
Wyłącznik wysokonapięciowy z SF₆ trzeciej generacji w wykonaniu napowietrznym zbudowane są z następujących podstawowych elementów:

- trzech niezależnych (zwykle identycznych) biegunów napełnionych sześćciofluorkiem siarki o ciśnieniu zawartym w granicach 0.45-0.65 MPa, z których każdy stanowi szczelny przedział gazowy (w praktyce oznacza to bardzo często, że biegun wyłącznika napełniony sześćciofluorkiem siarki do ciśnienia znamionowego po zainstalowaniu w stacji elektroenergetycznej, nie wymaga przez cały okres eksploatacji uzupełniania gazu);
- napędu, przy czym zwykle dla wyłączników na napięcie znamionowe 245 kV i wyższe każdy biegun jest wyposażony we własny siłownik, natomiast wszystkie trzy bieguny wyłącznika na napięcie 145 kV i niższe są napędzane przez jeden siłownik;
- szafki sterującej;
- instalacji gazowej;
- konstrukcji wsporczej.

W skład bieguna wysokonapięciowego wyłącznika z SF₆ wchodzi następujące główne podzespoły (podstawowe elementy bieguna wyłącznika na napięcie znamionowe 123 kV pokazano na rys.3):

- komora gaszeniowa³³, która w przypadku wyłączników stosowanych w europejskich sieciach elektroenergetycznych, znajduje się wewnątrz porcelanowego izolatora osłonowego, zamkniętego od góry metalową pokrywą wyposażoną w zacisk przyłączowy górny; zacisk przyłączowy dolny znajduje się na metalowej płycie umieszczonej między izolatorem osłonowym komory a izolatorem wsporczym (w sieciach amerykańskich i japońskich stosowane są wyłączniki o nazwie "dead tank circuit-breaker"), w których komora gaszeniowa jest umieszczona wewnątrz uziemionej metalowej obudowy wyposażonej w dwa izolatory przepustowe);
- izolator wsporczy (w wyłączniku na napięcie wyższe niż 145 kV stosowana jest większa liczba izolatorów wsporczych);

³³ Obecnie praktycznie zawsze bieguny klasyczne wyłączniki trzeciej generacji na napięcia znamionowe z zakresu 72.5 kV ÷ 145 kV są wyposażone w jednoprzerwowe komory gaszeniowe, w związku z tym rozważania prowadzone w niniejszej pracy będą poświęcone temu typowi wyłącznika (w punkcie 1.2 szczegółowo omówiono tendencje rozwojowe podstawowych typów wyłączników wysokiego napięcia z sześćciofluorkiem siarki).



Rys.3. Schemat budowy i działania wysokonapięciowego wyłącznika z SF₆ wykorzystującego zjawisko termoeekspansji – wyłącznik trzeciej generacji [129].

1 - styk stały opalny; 2 - dysza główna izolacyjna; 3 - styk ruchomy opalny; 4 - górny zbiornik cylindra o stałej objętości.; 5 - zawór cylindra; 6 - dolny zbiornik cylindra o zmiennej objętości; 7 - zawór tłoka; 8 - nieruchomy tłok; 9 - tuleja pośrednicząca - część wylotowa dyszy pomocniczej; 10 - izolacyjne cięgno napędowe; 11 - karter.

a) położenie zamknięcia; b) położenie otwarcia.

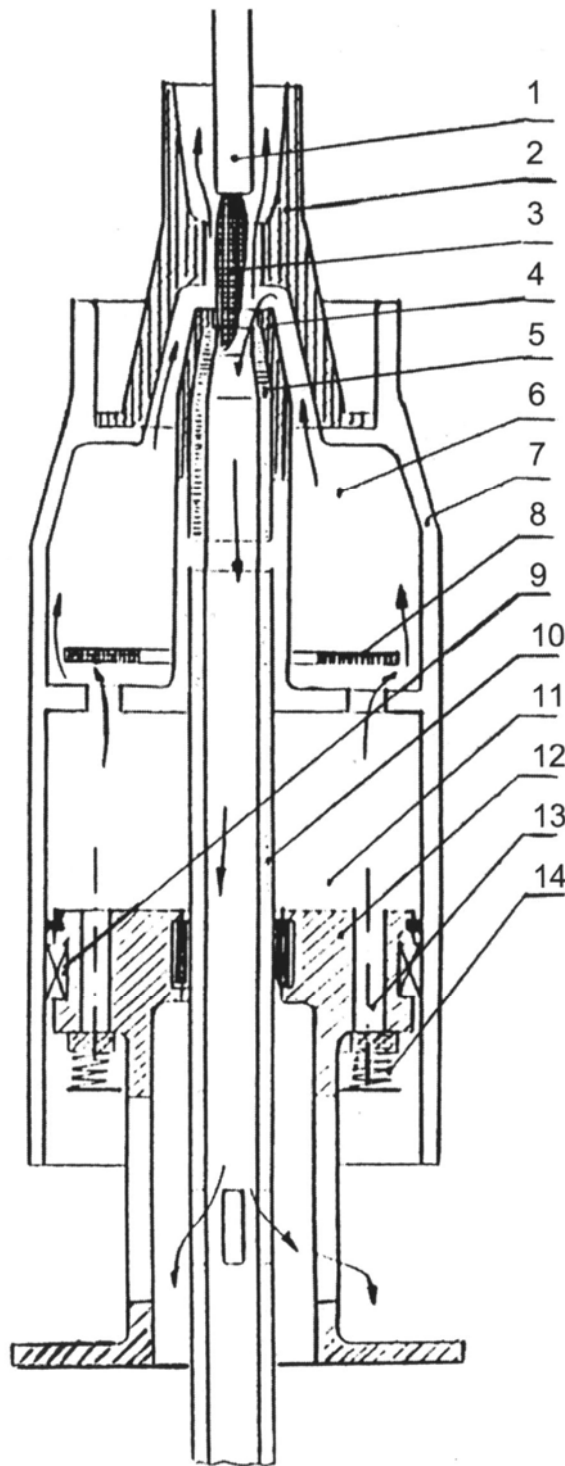
- ciągnio izolacyjne, umieszczone we wnętrzu izolatora wsporczego (izolatorów wsporczych), stanowiące połączenie mechaniczne między metalową tuleją sprzęgniętą ze stykiem ruchomym, a zespołem dźwigni znajdujących się w karterze;
- karter, zamykający od dołu biegun wyłącznika, wyposażony w uszczelniony wał (wykonujący ruch obrotowy) służący do sprzęgnięcia układu kinematycznego bieguna z siłownikiem napędu.

Podstawowymi elementami jednoprzerwowej komory gaszeniowej wyłącznika SF₆ są:

- tor prądowy, składający się z dwóch przyłączy, zestyku głównego, zestyku opalnego, zestyku ruchomego nierozłącznego,
- dwustrumieniowy układ dyszowy z izolacyjną dyszą główną i metalową dyszą pomocniczą, którą stanowi styk ruchomy opalny; jest on wyposażony w izolacyjną osłonę, która jest wykonana, jak wspomniano powyżej, z tego samego materiału co dysza główna;
zespół cylinder-tłok, czyli zbiornik sprężania, w którym sprężany jest gaz podczas ruchu styków a także "magazynowany" jest sześćfluorek siarki o wysokim ciśnieniu dopływający z obszaru kolumny łukowej na skutek zjawiska termoeekspansji; w przypadku wyłącznika trzeciej generacji, cylinder jest podzielony na dwie części – górną o stałej objętości oraz – dolną o objętości zmniejszającej się podczas ruchu styków; między oboma częściami cylindra znajduje się zawór (nazywany zaworem cylindra lub zaworem górnym) regulujący przepływ gazu między dolną i górną częścią objętości cylindra; natomiast nieruchomy tłok jest wyposażony w zawór, który otwiera się gdy ciśnienie sześćfluorku siarki w dolnej części cylindra wzrośnie ponad ściśle określoną wartość;
- sorbent - sito molekularne częściowo pochłaniające produkty rozkładu sześćfluorku siarki.

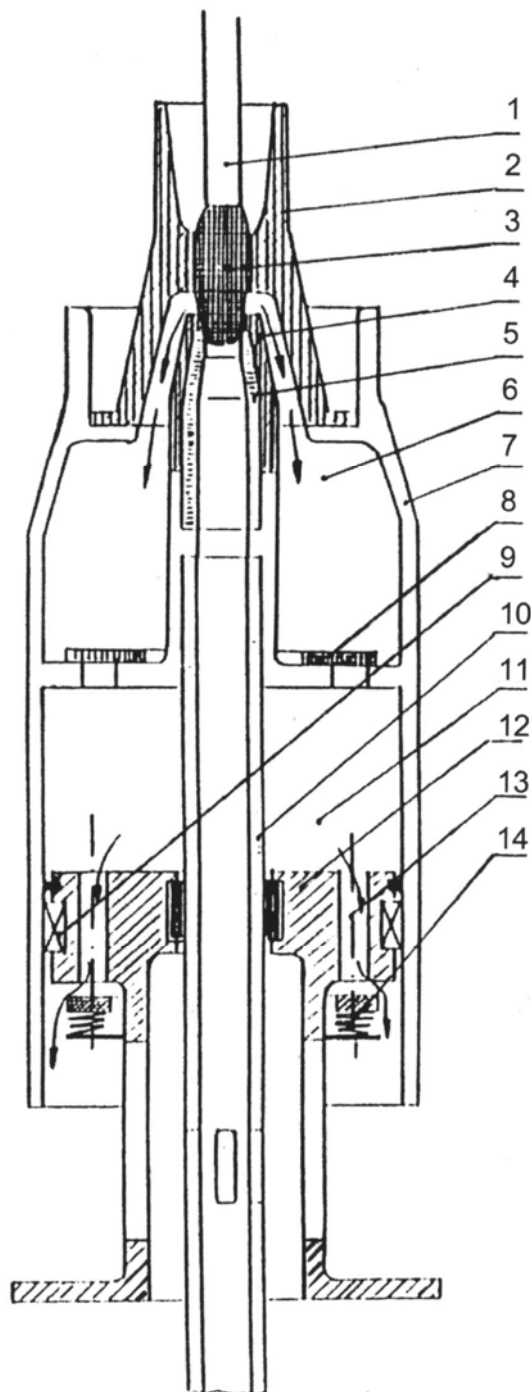
Działanie wyłącznika trzeciej generacji jest ściśle uzależnione od wartości wyłączanego prądu, ponieważ od chwilowej wartości prądu jest uzależniona średnica kolumny łukowej a od wartości tej wielkości fizycznej zależy czy podczas procesu wyłączania prądu wystąpi zjawisko termoeekspansji.

Generalnie podczas pracy każdego wyłącznika wysokonapięciowego w systemie elektroenergetycznym (gdy wyłącznik nie jest przeznaczony do specjalnych warunków łączeniowych np. do łączenia baterii kondensatorów lub dławików kompensacyjnych), można wyróżnić cztery charakterystyczne przypadki jego działania:



Rys.4. Schematyczny przekrój komory gaszeniowej wyłącznika trzeciej generacji. Wyłączanie prądu roboczego.

1 - styk stały opalny; 2 - dysza główna; 3 - łuk elektryczny; 4 - osłona izolacyjna styku ruchomego opalnego; 5 - styk ruchomy opalny; 6 - górny zbiornik cylindra; 7 - cylinder; 8 - zawór górny; 9 - zestaw ruchomy nierozłączny; 10 - ciągnio; 11 - dolny zbiornik cylindra; 12 - tłok; 13 - zawór dolny; 14 - sprężyna zaworu dolnego.



Rys.5. Schematyczny przekrój komory gaszeniowej wyłącznika trzeciej generacji. Wyłączanie dużego prądu zwarcowego.

1 - styk stały opalny; 2 - dysza główna; 3 - łuk elektryczny; 4 - osłona izolacyjna styku ruchomego opalnego; 5 - styk ruchomy opalny; 6 - górny zbiornik cylindra; 7 - cylinder; 8 - zawór górny; 9 - zespół ruchomy nierozłączny; 10 - ciągnio; 11 - dolny zbiornik cylindra; 12 - tłok; 13 - zawór dolny; 14 - sprężyna zaworu dolnego.

- wyłączanie prądów pojemnościowych nieobciążonej linii napowietrznej; wartość prądu pojemnościowego nieobciążonej linii wysokiego napięcia jest bardzo mała i w zależności od napięcia źródła wynosi 20-50 A;
- wyłączanie prądów roboczych o wartości rzędu 0.8-4 kA; taka operacja łączeniowa odbywa się podczas pracy manewrowej wyłącznika związanej ze zmianami konfiguracji sieci elektro-energetycznej i łączeniem jej elementów (np. linii, szyn zbiorczych, transformatorów obciążonych itp.), dzięki temu możliwe jest wybranie aktualnie optymalnych schematów obwodów elektrycznych służących do przesyłu lub rozdziału energii;
- wyłączanie prądów zwarciovych z przedziału około $0.1-0.3 I_{ws}$ (I_{ws} – znamionowy prąd wyłączalny wyłącznika) czemu towarzyszy napięcie powrotne o dużej stromości;
- wyłączanie dużych prądów zwarciovych (powyżej $0.3 I_{ws}$) w przypadku wyłączania prądów zwarciovych powstałych w wyniku, zwarcia na zaciskach wyłącznika jak i zwarcia pobliskich (charakteryzujących się bardzo stromym przebiegiem napięcia powrotnego zwłaszcza w jego początkowej fazie); dla tego zakresu prądów zwarciovych (zwykle gdy wartość wyłączanego prądu przekracza $0.4-0.5 I_{ws}$) podstawowym czynnikiem wytwarzającym przyrost ciśnienia jest zjawisko termoeekspansji, któremu towarzyszy bardzo intensywnie przebiegające zjawisko ablacji; oba te zjawiska powodują bardzo szybki i duży przyrost ciśnienia sześćciofluorku siarki zawartego w górnej części cylindra.

W związku z występowaniem całkowicie odmiennych warunków w komorze gaszeniowej trzeciej generacji podczas wyłączania prądów roboczych i dużych prądów zwarciovych istnieją dwa charakterystyczne przypadki jej pracy. Pierwszy przypadek działania komory (pokazany na rys.4) występuje gdy wyłączane są prądy pojemnościowe i manewrowe oraz małe prądy zwarciove, gdy nie powstaje zjawisko termoeekspansji, ponieważ kanał łukowy jest znacznie mniejszy od przekroju krytycznego dyszy głównej. W tym przypadku praca wyłącznika III generacji jest zbliżona do wyłącznika samospężnego, a wzrost ciśnienia gazu w komorze gaszeniowej jest wywołany sprężaniem sześćciofluorku siarki w dolnym zbiorniku cylindra.

Drugi przypadek pracy komory (pokazany na rys.5) występuje gdy wyłączane są duże prądy zwarciove, gdy powstaje zjawisko termoeekspansji, a kanał łukowy całkowicie wypełnia przekrój krytycznego dyszy głównej i izolacyjnej osłony styku ruchomego opalnego.

3. OCENA WYNIKÓW BADAŃ WSPÓŁCZESNYCH WYSOKONAPIĘCIOWYCH WYŁĄCZNIKÓW Z SZEŚCIOFLUORKIEM SIARKI. GŁÓWNE UWARUNKOWANIA STOSOWANIA METODY SYMULUJĄCEJ. PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA

Podstawowym celem pracy jest zakończenie opracowania metody symulującej działanie wysokonapięciowego wyłącznika trzeciej generacji z sześćciofluorkiem siarki - SF_6 , w którym do wytworzenia przyrostu ciśnienia gazu w komorze gaszeniowej, koniecznego do wywołania przepływu SF_6 w układzie dyszowym, wykorzystywane jest oprócz pracy napędu także zjawisko termoeekspansji. W pracy zaprezentowane zostaną wyniki badań modelowej komory gaszeniowej III generacji jak również wybrane wyniki badań wyłączników rzeczywistych. Zostaną one poddane szczegółowej analizie. Na tej podstawie (przy uwzględnieniu sformułowanego układu równań opisujących pracę wszystkich podstawowych elementów wyłącznika uwzględniając współzależność zjawisk odbywających się w różnych jego częściach, a także wpływ łuku elektrycznego na warunki przepływu gazu w układzie dyszowym) określone zostaną główne uwarunkowania stosowania metody symulującej, i podstawowe założenia a następnie będzie opracowany szczegółowy schemat blokowy dla metody symulującej działanie wyłącznika trzeciej generacji podczas ruchu otwierania.

W pracy zaprezentowana nowoczesna metoda symulująca działanie wysokonapięciowych wyłączników najnowszej generacji we wszystkich występujących w eksploatacji warunkach pracy. W oparciu o wyniki badań laboratoryjnych modelu komory oraz rzeczywistego wyłącznika, wykorzystując również wyniki obliczeń symulujących określone będą czynniki decydujące o przebiegu procesu wyłączania prądu we wszystkich charakterystycznych przypadkach pracy wyłącznika w systemie elektroenergetycznym. Praca umożliwia sformułowanie licznych wniosków dotyczących działania wyłącznika, współpracy komory gaszeniowej i napędu, zjawisk termoeekspansji i ablacji. Praca ma także znaczenie techniczne, ponieważ poświęcona jest odwzorowaniu działania rzeczywistego wyłącznika, a w związku z tym jej wyniki mogą być wykorzystane w pracach konstruktorskich, optymalizacyjnych, czy podczas badań wyłączników. Wyniki będą mogły być wykorzystane (po adaptacji) do innych typów wyłączników z sześćciofluorkiem siarki, np. następnych generacji. Istotna jest także ocena wyników badań komory i zużycia elementów izolacyjnych, które podczas łączenia prądów ulegają zużyciu w związku z występowaniem zjawiska ablacji.

3.1. Ocena wyników badań modelowej komory gaszeniowej III generacji

Zgodnie z przyjętymi powyżej założeniami, formułując wzór opisujący energię dostarczaną z kolumny łukowej do gazu zawartego w górnym zbiorniku cylindra założono, że w przypadku gdy średnica kolumny łukowej jest mniejsza od średnicy przekroju krytycznego dyszy głównej to wówczas zjawisko termoeleksjacji nie występuje i wartość tej energii jest równa zero. W związku z tym energia dostarczana z łuku elektrycznego do gazu zawartego w górnym zbiorniku cylindra opisana jest następującym wzorem:

$$\frac{dQ}{dt} = f(A_A, A_{kg}) \cdot \xi \cdot \frac{l_{wg}(x) \cdot i^2}{A_A \cdot \sigma_A} \quad (7)$$

przy czym:

$$f(A_A, A_{kg}) = \begin{cases} 0 & \text{dla } A_A < A_{kg} \\ 1 & \text{dla } A_A = A_{kg} \end{cases} \quad (8)$$

gdzie:

- Q - energia wydzielająca się w kolumnie łukowej we wlotowej części dyszy głównej;
- $l_{wg}(x)$ - długość wlotowej części dyszy głównej;
- ξ - bezwymiarowy współczynnik określający część energii wydzielającej się w kolumnie łukowej we wlotowej części dyszy i dostarczanej do gazu zawartego w górnej części cylindra w wyniku zjawiska termoeleksjacji³⁴.
- A_A - powierzchnia przekroju kolumny łukowej;
- A_{kg} - powierzchnia przekroju krytycznego dyszy głównej;
- σ_A - przewodność elektryczna szesciofluorku siarki w obszarze kolumny łukowej;

Wartości współczynnika proporcjonalności ξ można jedynie wyznaczyć podczas badań laboratoryjnych. W związku z tym, a także dla wyjaśnienia przebiegu procesu wyłączania prądu przez komorę gaszeniową trzeciej generacji, w której wykorzystywane są bardzo silnie, uzależnionych od wartości wyłącza-

³⁴ Wartość tego współczynnika ξ jest uzależniona od budowy komory gaszeniowej i w związku z tym zwykle jest wyznaczana na drodze eksperymentalnej [11].

nego prądu, zjawiska termoeleksjacji przeprowadzono próby modelowe. Ich podstawowym celem było:

- określenie związku między wartością wyłączanego prądu a uzyskanym przyrostem ciśnienia sześćfluorku siarki w górnym zbiorniku sprężania;
- określenie stopnia zużycia materiałów izolacyjnych i stykowych w zależności od wartości wyłączanego prądu a także prądu sumarycznego;
- oszacowanie wartości współczynników stosowanych w obliczeniach symulujących (zwłaszcza współczynnika ξ wykorzystywanego w równaniu opisującym energię dostarczaną z kolumny łukowej do gazu).

Model komory nowej generacji przystosowany do przeprowadzenia badań został tak skonstruowany, że:

- odtworzono w nim wiernie układ dyszowy, kanały łączące wlot dyszy głównej z górnym zbiornikiem sprężania, górny zbiornik cylindra oraz zestyk opalny;
- nie zostały zmienione wymiary styku stałego opalnego, dyszy głównej, specjalnej osłony styku ruchomego opalnego oraz styku opalnego, co zapewnia odtworzenie warunków przepływu gazu przez układ dyszowy rzeczywistego wyłącznika wysokonapięciowego;
- elementy układu dyszowego i zestyku opalnego zostały wykonane z materiałów wykorzystywanych w rzeczywistych wyłącznikach (materiał izolacyjny teflon szary, styki W+Cu);
- jest przystosowany do wyłączania (lub przewodzenia gdy wyłączenie nie nastąpi) prądów z przedziału 0 - 31.5 kA, co odpowiada poziomowi znamionowego prądu zwarciovego wyłączalnego wyłącznika na napięcie 123 kV.

W porównaniu do komory gaszeniowej rzeczywistego wyłącznika w komorze modelowej wprowadzono trzy istotne zmiany:

- zmieniono funkcje styków zestyku opalnego - stykiem ruchomym jest styk palcowy; w rzeczywistym wyłączniku cylinder jest sprężnięty w sposób sztywny ze stykiem ruchomym i przemieszcza się z nim podczas wyłączania prądu; ruch cylindra uniemożliwi dokonywanie pomiarów ciśnienia, gdyż warunkiem poprawnej pracy czujników piezoelektrycznych, służących do pomiaru ciśnienia, jest konieczność ich zamontowania w częściach nieruchomych;
- zamknięto w sposób trwały górny zawór;
- zrezygnowano z odtworzenia dolnego zbiornika sprężania; te dwie ostatnie zmiany umożliwiły dokładne prześledzenie wpływu zjawiska termoeleksjacji na przyrost ciśnienia (rejestrowane podczas prób ciśnienie gazu jest wywołane tylko przez ten jeden czynnik).

W komorze modelowej, po wykonaniu badań: wytrzymałości i szczelności obudowy, mechanicznych oraz napięciowych (napięciami probierczymi odpowiadającymi zakresowi średnich napięć, gdyż przy takich napięciach wykonywano próby zwarciove), zostały przeprowadzone dwie serie prób wyłączenia prądów zwarciowych w układzie bezpośrednim:

- seria I - prąd wyłączalny z zakresu 3.5 - 10 kA (4 próby)
- seria II - prąd wyłączalny z zakresu 10 - 25 kA (6 prób).

Po każdej serii prób dokonano demontażu modelu komory modelowej wyłącznika w celu sprawdzenia stanu elementów układu gaszeniowego: dysz głównej oraz styków opalnych łącznie z izolacyjną osłoną styku ruchomego.

Podczas prób rejestrowano:

- prąd;
- napięcie;
- czas łukowy;
- drogę styku ruchomego;
- przyrost ciśnienia sześćfluorku siarki w górnym zbiorniku cylindra.

Wyniki prób są następujące:

- podczas wszystkich prób, za wyjątkiem próby przy najmniejszym prądzie gdy jego wartość wynosiła $i=3.5$ kA, nastąpiło wyłączenie prądu, a czas łukowy wynosił 14-19 ms;
- zużycie elementów układu gaszeniowego było nieznaczne, zwłaszcza po pierwszej serii prób, podczas której wyłączano prądy mniejsze od 10 kA, ślady obecności łuku elektrycznego wystąpiły jedynie na: powierzchni czołowej styku palcowego (w modelu pełni on rolę styku ruchomego opalnego), na powierzchni wewnętrznej (blisko powierzchni czołowej) styku wieńcowego opalnego (opalenia były rozłożone równomierne), dyszy głównej oraz specjalnej osłonie styku opalnego ruchomego;
- styk stały opalny miał niewielkie ślady opaleń na powierzchni czołowej, a na powierzchni bocznej jedynie ślady po zagłębieniu w styku ruchomym;
- styk ruchomy opalny (wieńcowy ale wykonany ze stopu o dużej sprężystości, w związku z czym nie stosowano dodatkowych sprężyn) miał ślady opaleń na powierzchni wewnętrznej blisko powierzchni czołowej, zachował sprężystość i wymiary;
- dysza główna w części wlotowej i wylotowej była w stanie nienaruszonym; w rejonie przekroju krytycznego stwierdzono niewielkie bardzo re-

gularne ślady parowania materiału, średnica dyszy praktycznie zachowała swój wymiar;

- specjalna osłona izolacyjna styku ruchomego opalnego powiększyła swoją średnicę wewnętrzną około o 1 mm, śladu ubytku materiału, bardzo regularnie rozłożone, wystąpiły także na całej powierzchni czołowej sięgając do powierzchni czołowej styku opalnego.

Podczas wszystkich prób zarejestrowano przyrost ciśnienia sześćciu fluorku siarki w górnym zbiorniku cylindra; wartość i przebieg tego ciśnienia był ściśle uzależniony od wartości wyłączanego prądu:

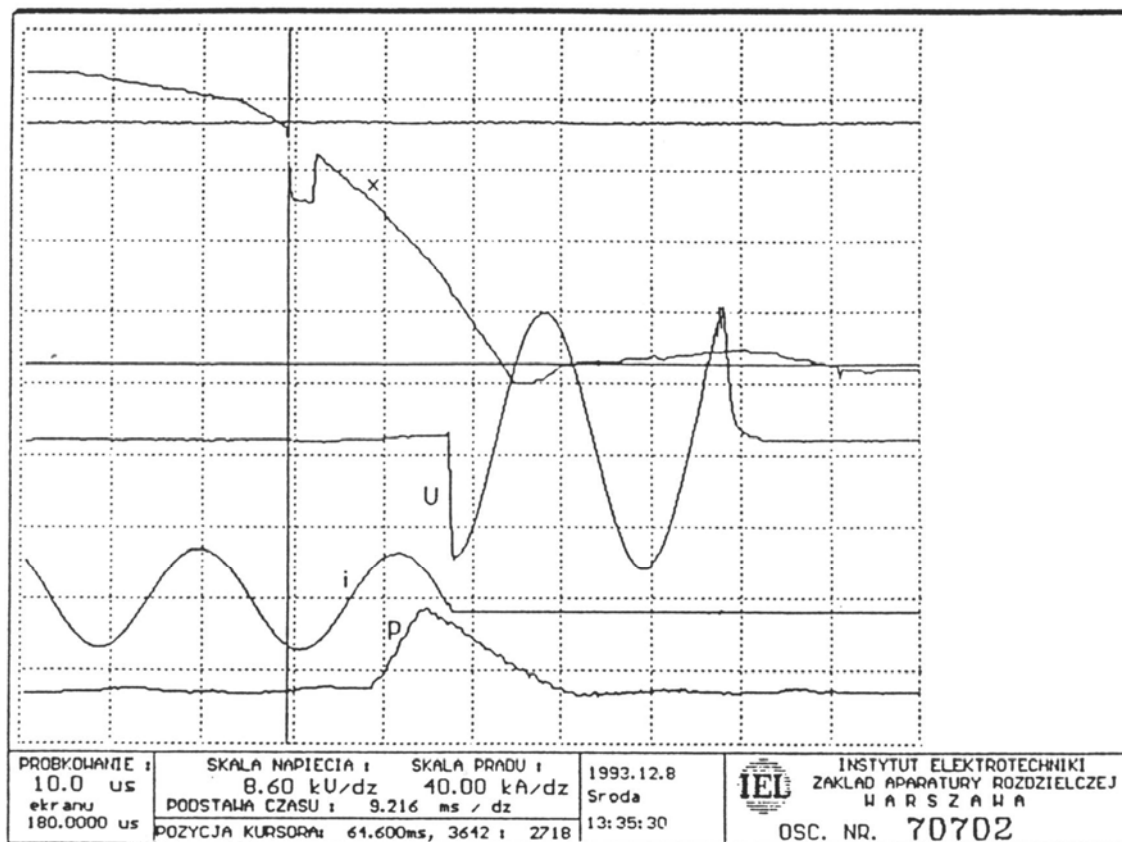
- dla prądów z zakresu 0 - 4 kA praktycznie nie wystąpił przyrost ciśnienia gazu;
- dla prądów z zakresu 5 - 11 kA zarejestrowano niewielki wzrastający stopniowo wraz z wartością prądu zwarcowego przyrost ciśnienia, przykładowo dla prądu $i = 6.2$ kA przyrost ten wyniósł około 0.16 MPa, natomiast dla prądu $i = 9$ kA około 0.38 MPa;
- dla prądów powyżej $i = 12$ kA zarejestrowano zdecydowany przyrost ciśnienia w górnym zbiorniku cylindra rosnący bardzo szybko przy zmianie wartości prądu zwarcowego:
 - dla prądu 12 kA przyrost ten wynosił około 0.5 MPa,
 - natomiast dla prądu $i = 21$ kA osiągnął wartość około 1.7 MPa.

Przykładowy oscylogram z prób zwarcowych, podczas których wyłączano prąd $i = 21$ kA pokazano na rysunku 6. Na rysunku 9 pokazano przykładowy oscylogram z prób wyłączania prądu zwarcowego $I = 21$ [kA] po czasie łukowym $t_a = 15$ [ms] wykonanych na tym specjalnym modelu komory gaszeniowej [33].

Podczas tych prób wyłączany prąd był silnie niesymetryczny, przy czym:

- pierwsza występująca po rozejściu się styków półfala prądu miała mniejszą wartość szczytową, niż druga po której nastąpiło wyłączenie prądu;
- stosunek kolejnych wartości szczytowych prądu podczas palenia się łuku elektrycznego wynosił około $\eta = 1.6$.

Zarejestrowany podczas prób przebieg ciśnienia SF_6 w zbiorniku sprężania pokazano na rysunku 6. Charakter zmian tego ciśnienia jest ściśle uza-

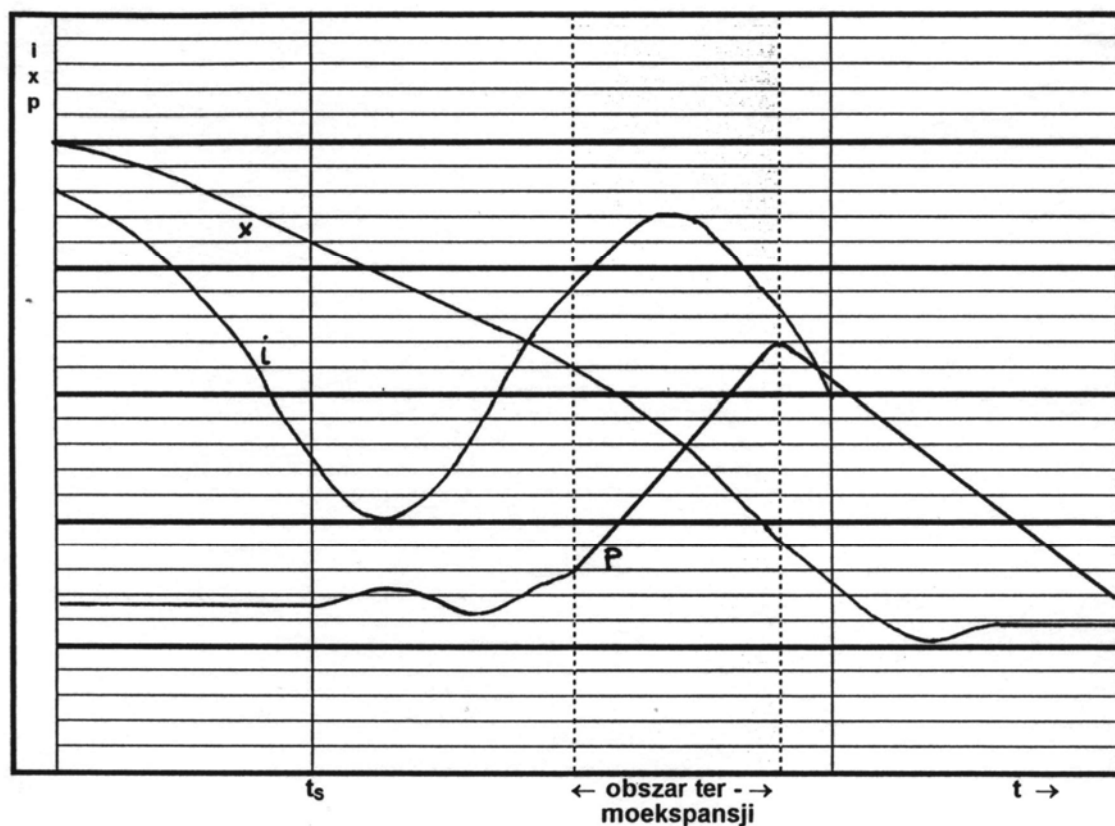


Rys.6. Oscylogram z prób wykonanych na modelu komory gaszeniowej nowej generacji.

Wartość prądu zwarciovego $i = 21$ kA, czas łukowy $T_a = 15$ ms.

x - droga styku ruchomego, U - napięcie, i - prąd, p - przyrost ciśnienia SF_6 w górnym zbiorniku cylindra.

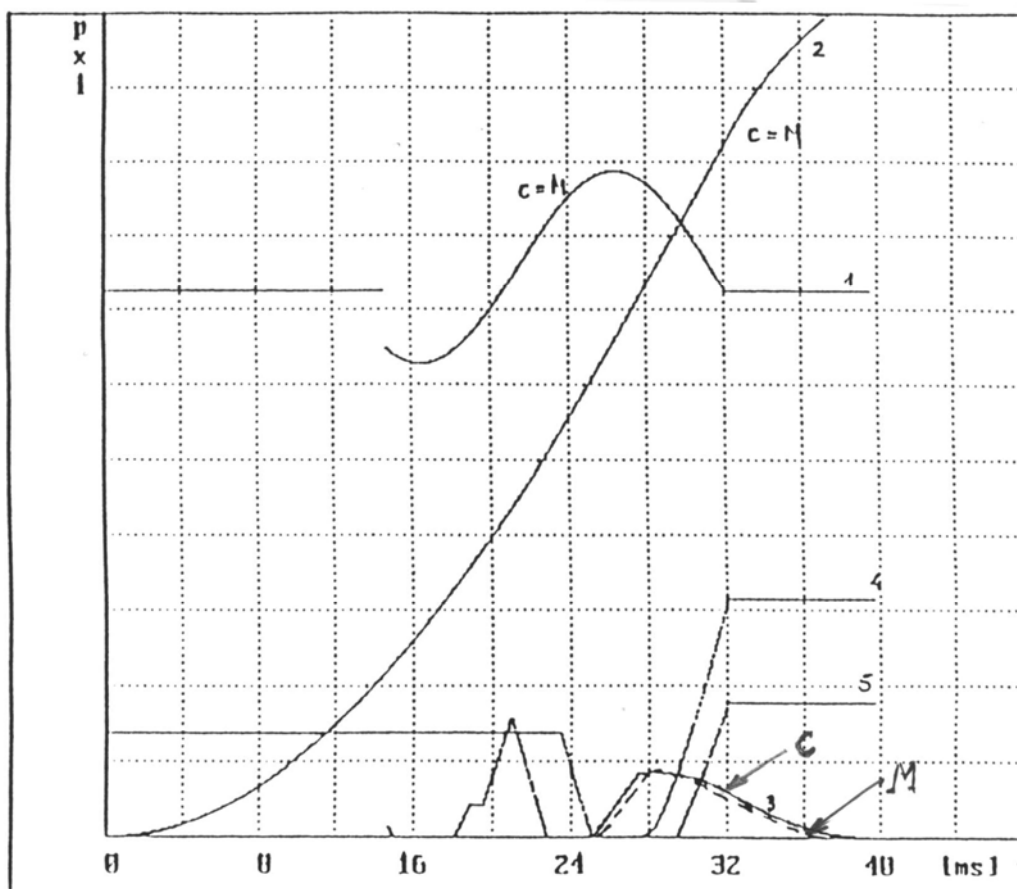
leżniony od opisanego powyżej kształtu wyłączanego prądu. Istotny wpływ na przebieg ciśnienia SF_6 miał fakt, iż podczas trwania pierwszej półfali prądu średnica kolumny łukowej miała mniejszą wartość od średnicy przekroju krytycznego dyszy, natomiast podczas drugiej półfali prądu kolumna łukowa całkowicie zablokowała przekrój krytyczny dyszy. W związku z tym (uwzględniając, że w modelowej komorze celowo nie odwzorowano sprężania gazu wywołanego pracą napędu) podczas pierwszej półfali prądu wystąpił jedynie niewielki przyrost ciśnienia wywołany zjawiskiem ablacji. Natomiast podczas drugiej półfali wystąpiło zjawisko termoeekspansji, czemu towarzyszył bardzo szybki wzrost ciśnienia sześćciofluorku siarki w zbiorniku sprężania, które osiągnęło wartość maksymalną $p_{1m} = 1.7$ [MPa]. Po obniżeniu się wartości chwilowej wartości wyłączanego prądu (z czym związane jest oczywiście zmniejszenie się średnicy kolumny łukowej) nastąpiło zaniknięcie zjawiska termoeekspansji, a następnie na skutek wypływu ze zbiornika sprężania sześćciofluorku siarki przez układ dyszowy zmniejszanie się wartości wygenerowanego ciśnienia gazu.



Rys.7. Zależność przyrostu ciśnienia sześćfluorku siarki od chwilowej wartości prądu podczas próby wyłączania prądu zwarcowego $i = 21$ kA przez specjalny model komory gaszeniowej trzeciej generacji.

Należy podkreślić, iż w momencie, w którym powstało zjawisko termoeekspansji wartość chwilowa wyłączanego prądu miała w przybliżeniu taką samą wartość jak w momencie gdy nastąpił zanik tego zjawiska. Oznacza to, że czynnikiem bezpośrednio decydującym o wystąpieniu zjawiska termoeekspansji jest relacja między wartością średnicy kolumny łukowej a wartością średnicy gardzieli dyszy.

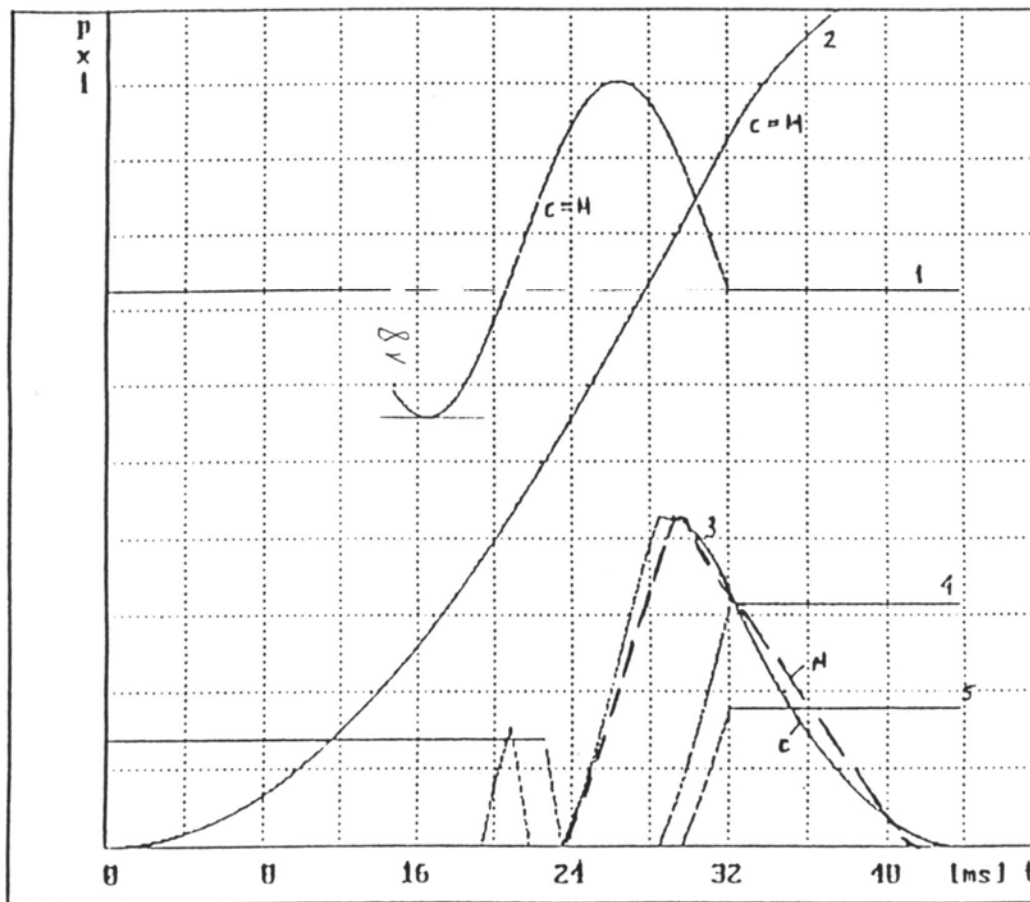
W celu zweryfikowania wartości pomiarów ciśnienia opracowano specjalny dodatkowy program komputerowy symulujący działanie modelu komory gaszeniowej nowej generacji. Program ten opracowano w oparciu o układ równań sformułowanych dla komory gaszeniowej rzeczywistego wyłącznika, dokonując jednak niezbędnych modyfikacji, gdyż istnieją bardzo istotne różnice w budowie tych obu komór (w modelowej komorze gaszeniowej nie ma układu sprężającego gaz podczas ruchu styków a jedynym źródłem przyrostu ciśnienia



Rys.8. Wyniki obliczeń symulujących działanie modelowej komory gaszeniowej nowej generacji podczas wyłączania prądu zwarcowego $i = 12$ kA.

1. prąd zwarcowy; 2. droga styku ruchomego; 3. ciśnienie SF_6 w górnym zbiorniku sprężania, C - przebieg obliczony, M - przebieg pomierzony 4. powierzchnia przepływu gazu przez dyszę główną; 5. powierzchnia przepływu gazu przez dyszę pomocniczą;

jest zjawisko termoexpansji). Zrezygnowano także w tym przypadku z rozwiązywania równania ruchu styku opalnego; do programu komputerowego wprowadzono przebieg drogi styków zarejestrowany podczas prób zwarcowych. W obliczeniach bardzo wiernie odtworzono także przebieg prądu zwarcowego płynącego przez komorę modelową podczas prób zwarcowych. W związku z tym przebiegi drogi styków i prądu zwarcowego podczas prób i obliczeń symulujących są praktycznie identyczne. Na rysunkach 7 i 8 pokazano wyniki obliczeń symulujących działanie komory modelowej. Na rysunkach tych także zaznaczono (linią przerywaną) pomierzone przebiegi ciśnienia sześćfluorku siarki w górnym zbiorniku sprężania.



Rys.9. Wyniki obliczeń symulujących działanie modelowej komory gaszeniowej nowej generacji podczas wyłączania prądu zwarcowego $i = 21$ kA.

1. prąd zwarcowy; 2. droga styku ruchomego; 3. ciśnienie SF_6 w górnym zbiorniku sprężania; C - przebieg obliczony; M - przebieg pomierzony; 4. powierzchnia przepływu gazu przez dyszę główną; 5. powierzchnia przepływu gazu przez dyszę pomocniczą;

Porównując wyniki badań i obliczeń symulujących modelowej komory gaszeniowej nowej generacji sformułowano następujące wnioski:

- w obliczeniach symulujących wykonanych dla współczynnika $\xi=0.6$ uzyskano identyczną jak w pomiarach maksymalną wartość przyrostu ciśnienia sześćfluorku siarki w górnym zbiorniku cylindra oraz bardzo zbliżony przebieg narastania ciśnienia podczas występowania zjawiska termoeleksji jak i jego zanikania po odblokowaniu przepływu gazu przez dyszę główną;
- przyrost ciśnienia rozpoczął się w chwili gdy powierzchnia przekroju kolumny łukowej stała się równa powierzchni przekroju krytycznego dyszy głównej, a zakończył w chwili gdy średnica łuku stała się ponownie mniejsza od średnicy gardzieli dyszy głównej;

- po zakończeniu występowania zjawiska termoeekspansji odbywa się wypływ gazu z górnego zbiornika cylindra co powoduje obniżanie się jego ciśnienia.
- wypływ ustaje po wyrównaniu się ciśnienia gazu.

3.2. Wnioski z badań zwarciowej zdolności łączenia wyłączników rzeczywistych

Badania zwarciowej zdolności łączenia wyłączników rzeczywistych (lub prototypów wykonywanych jednostkowo) stwarzają możliwość uzyskania wielu bardzo cennych informacji. Powyżej w rozdziale 3.1. omawiając kierunki prac badawczych dotyczących wyłączników stwierdzono, że bardzo trudno jest odwzorować w sposób wierny przebieg procesu wyłączania prądu w modelowej komorze gaszeniowej, gdyż bardzo wiele czynników wpływa na kolejne fazy tego procesu. Dotyczy to przede wszystkim wyłączników wysokonapięciowych gdzie bardzo istotne jest odwzorowanie napięcia powrotnego gdyż przebieg etapu odbudowy wytrzymałości przerwy międzystykowej (zarówno strefy zapłonów termicznych jak i strefy zapłonów dielektrycznych) decydują o pomyślnym wyłączeniu prądu.

Badania laboratoryjne wyłączania prądów roboczych i zwarciowych wykonuje się według ściśle określonej procedury, co praktycznie uniemożliwia zamontowania dodatkowych czujników pomiarowych wewnątrz komory gaszeniowej (na przykład służących do pomiaru ciśnienia sześćciofluorku siarki). W związku z tym ocenę zdolności łączeniowej wyłącznika dokonuje się na podstawie zarejestrowanych podczas prób przebiegów wielkości elektrycznych (np. prądów fazowych napięcia powrotnego) często także rejestruje się drogę styków ruchomych oraz na podstawie oględzin elementów komory gaszeniowej dokonywanych po wykonaniu ściśle określonej serii prób.

W niniejszym rozdziale zaprezentowane zostaną następujące wyniki badań:

- tablica zawierająca zestawienie wyników badań wysokonapięciowych wyłączników II generacji
- oscylogramy z prób średnionapięciowego prototypowego wyłącznika II generacji pokazujące wpływ zjawiska termoeekspansji na działanie wyłącznika;
- oględzin elementów komory gaszeniowej wysokonapięciowego wyłącznika III generacji dokonanych po serii zwarciowej zdolności łączeniowej tego wyłącznika.

Na tej podstawie sformułowane zostaną liczne wnioski dotyczące pracy w systemie elektroenergetycznym współczesnych wysokonapięciowych wyłączników z szesciofluorkiem siarki. Wnioski te zostaną wykorzystane przy:

- formułowaniu równań opisujących działanie poszczególnych elementów komory gaszeniowej i napędu wyłącznika;
- opracowywaniu szczegółowego schematu blokowy obliczeń metody symulującej działanie wyłącznika trzeciej generacji podczas ruchu otwierania przy uwzględnieniu oddziaływania wyłączanego prądu.

WYNIKI BADAŃ KOMORY GASZENIOWEJ II GENERACJI

LP	I	du/dt	P(0)	t _a [ms]														
				9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19				
-	KA	KV/μs	MPa															
1	25	1	0,5	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+				
2	25	2	0,5	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+				
3	25	2	0,6	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+				
4	31,5	1	0,6	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+				
5	31,5	2	0,6	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+				
7	0.9×31,5	Zp	0,6	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+				
8	0.75×31,5	Zp	0,6	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+				
9	0.6×31,5	zp	0,6	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+				

UWAGI:

Zp – zwarcie pobliskie stromość zgodnie z normą IEC 56

+ wyłączenie prądu

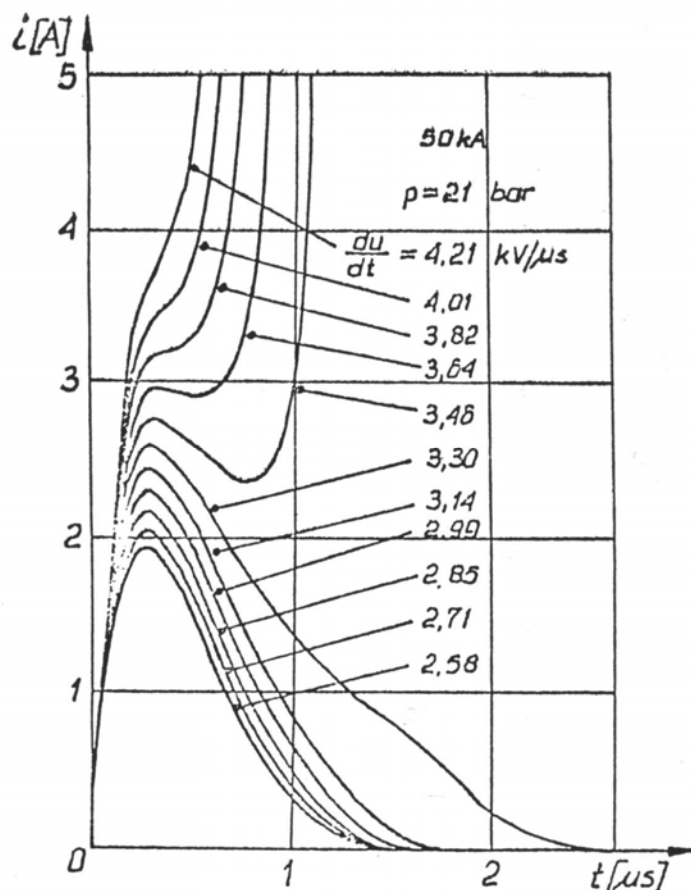
- brak wyłączenia prądu

Analizując wyniki prób zwarciovych wykonanych na komorze gaszeniowej II generacji potwierdzony zostały przez autora związek między stromością napięcia powrotnego, stromością wyłączanego prądu i ciśnienia sześciufluorku siarki w układzie dyszowym (bardzo dobrą ilustracją tej prawidłowości jest określony w pracy [145] .wpływ stromości napięcia powrotnego na przebieg napięcia powrotnego rys.10.)

Należy bowiem podkreślić, iż:

- wraz ze wzrostem czasu łukowego rośnie zdecydowanie ciśnienie spiętrzenia co jest spowodowane zarówno działaniem napędu jak i zjawiskiem termoeekspansji;
- wzrost wartości wyłączanego prądu stwarza konieczność wytworzenia wyższego przyrostu ciśnienia gazu;
- podobnie wzrost stromości napięcia powrotnego przy niezmięnionej wartości prądu także wymaga sprężenia gazu w cylindrze do wyższej wartości.

Podobna prawidłowość między wymienionymi wyżej trzema wielkościami istnieje także w wyłączniku III generacji; na podstawie badań wyłącznika samo-sprężnego można zatem wstępnie oszacować jaka będzie potrzebna wartość ciśnienia spiętrzenia w wyłączniku najnowszej generacji.



Rys.10. Wpływ stromości napięcia powrotnego na przebieg prądu połukowego.

3.3. Próby średnionapięciowego prototypowego wyłącznika II generacji pokazujące wpływ zjawiska termoeekspansji na działanie wyłącznika

Podczas wyłączania bardzo dużych prądów zwarciovych o wartości z zakresu 20÷40 [kA]³⁵ zdecydowanie nasila się zjawisko ablacji, w związku ze

³⁵

Jest to zakres znamionowych prądów wyłączalnych wyłączników o napięciu znamionowym z przedziału 72÷172 kV (w warunkach krajowych wyłączników na napięcie 123 kV) .

zwiększaniem się energii wydzielającej się w łuku elektrycznym co powoduje także:

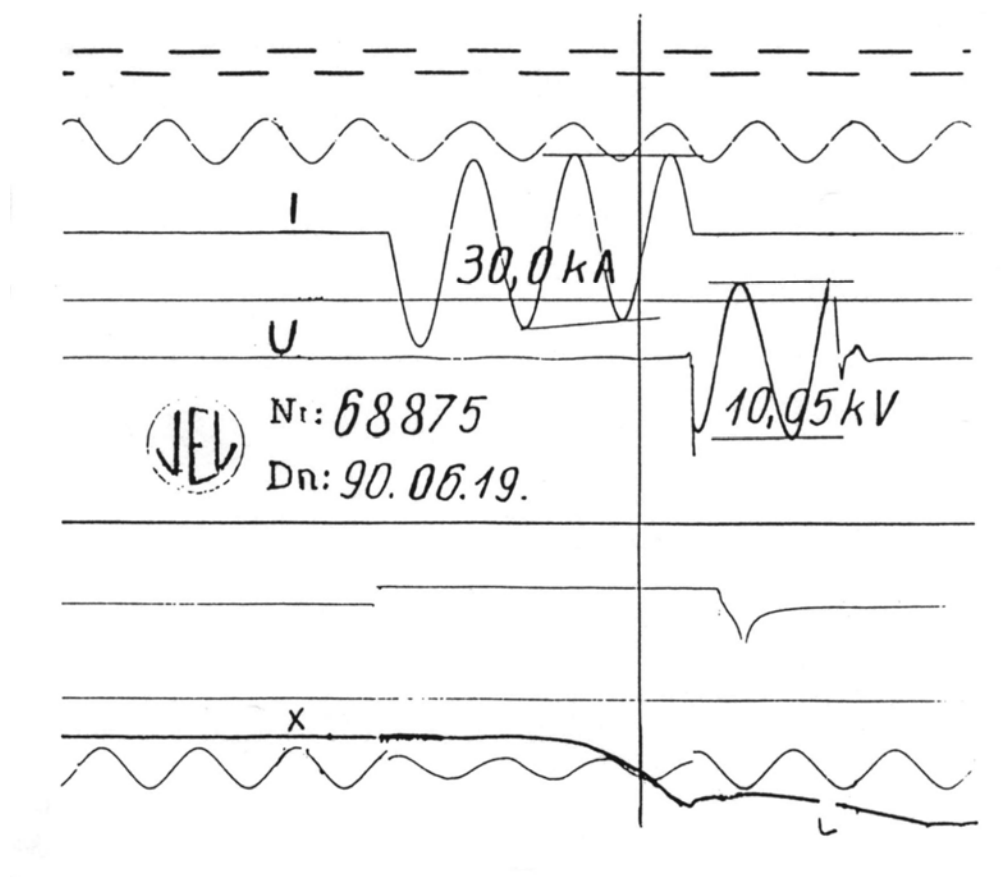
- wzrost intensywności promieniowania,
- zwiększenie średnicy kolumny łukowej; przy dużych chwilowych wartościach prądu średnica może całkowicie wypełniać przekrój krytyczny dyszy, czego konsekwencją jest zdecydowany wzrost gęstości prądu w kanale łukowym.

W rezultacie istotną rolę w procesie wyłączania prądu zaczyna odgrywać zjawisko termoeekspansji. Należy jednak bardzo mocno podkreślić, że ze względu na odmienną budowę komory gaszeniowej wyłącznika drugiej i trzeciej generacji inny jest wpływ tego zjawiska na działanie wyłącznika samosprężnego i najnowszego wyłącznika wyposażonego w cylinder złożony z dwóch komór i dwa zawory sterujące przepływem sześćciofluorku siarki w komorze gaszeniowej.

W wyłączniku trzeciej generacji, podczas wyłączania dużych prądów zwarciovych zjawisko termoeekspansji pełni decydującą rolę w procesie generowania ciśnienia w zbiorniku sprężania, a dzięki wyposażeniu komory gaszeniowej w dwa zawory służące do sterowania przepływem gazu, wytworzony duży przyrost ciśnienia sześćciofluorku siarki nie powoduje zwiększenia siły oporowej obciążającej napęd.

Natomiast w wyłączniku samosprężnym wytworzone przez zjawisko termoeekspansji wysokie ciśnienie SF_6 w zbiorniku sprężania wprawdzie powoduje zwiększenie natężenia przepływu gazu, ale równocześnie do wartości tego ciśnienia proporcjonalna jest siła parcia gazu na ruchomy cylinder. Siła ta stanowi podstawowy składnik siły oporowej obciążającej napęd, zatem jej nadmierny wzrost może spowodować zmniejszenie prędkości ruchu styków a w granicznym przypadku zmianę kierunku ich ruchu, co z kolei, gdy zostanie zdecydowanie zmniejszony odstęp międzystykowy, może doprowadzić do ponownego zapłonu łuku elektrycznego a nawet do nie wyłączenia prądu czego następstwem jest zawsze bardzo poważna awaria wyłącznika. Zmianę kierunku ruchu styku opalnego spowodowaną zbyt dużą wartością ciśnienia spiętrzenia zarejestrowano podczas prób zwarciovych samosprężnego średnionapięciowego wyłącznika prototypowego co pokazano na rysunku 11.

W związku z tym, aby zapobiec wytworzeniu się w zbiorniku sprężania nadmiernej wartości ciśnienia spiętrzenia sześćciofluorku siarki, w wyłącznikach samosprężnych średnica przekroju krytycznego dyszy głównej jest zawsze zdecydowanie większa w porównaniu do średnicy dyszy stosowanej w komorze gaszeniowej wyłącznika trzeciej generacji. W konsekwencji w wyłączniku drugiej generacji nawet w przypadku wyłączania bardzo dużych prądów zwarciovych kolumna łukowa całkowicie wypełnia gardziel dyszy jedynie wówczas gdy



Rys.11. Zmiana kierunku ruchu styków podczas wyłączania prądu zwarcowego.

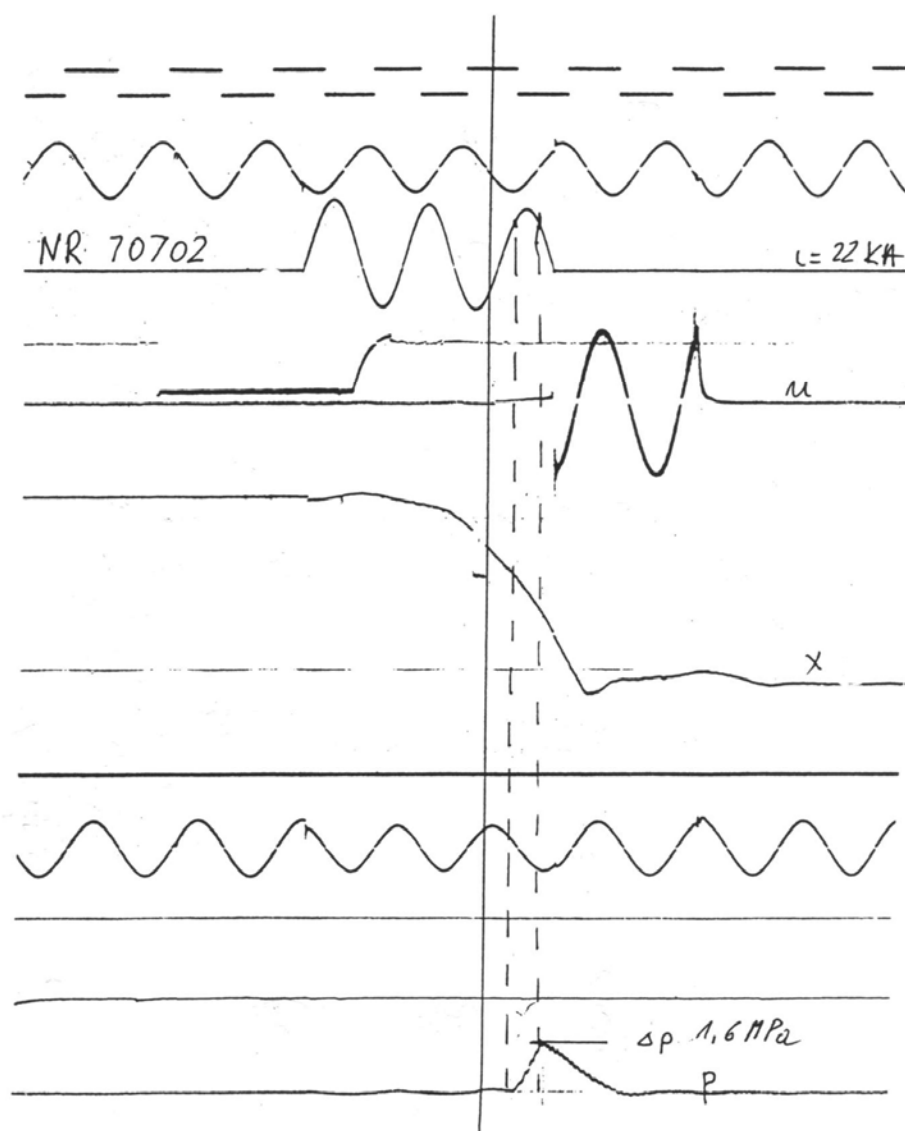
wartość chwilowa prądu jest zbliżona do wartości maksymalnej czego następstwem jest:

- istotne zmniejszenie intensywność ablacji ³⁶;

³⁶

W wyłącznikach samosprężnych starszych typów, produkowanych na przełomie lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych nie stosowano wypełniaczy w materiale dyszy głównej i osłonie styku opalnego ruchomego, a zatem intensywna ablacja prowadziła do znacznych zmian wymiarów tych elementów układu gaszeniowego (często powstawały także głębokie wżery w dyszy głównej w okolicach jej przekroju krytycznego). Powodowało to modyfikację warunków przepływu gazu przez układ dyszowy praktycznie po każdym wyłączeniu dużego prądu zwarcowego, a więc także zmiany w procesie odbierania energii z łuku elektrycznego. Ablacja powodowała zatem szybkie zużycie dyszy głównej i innych elementów wykonanych z materiału izolacyjnego co bardzo znacząco wpływało także na istotne zmniejszenie trwałości łączeniową wyłącznika. W celu przeciwdziałania temu niepożądanemu wpływowi łuku elektrycznego na przebieg procesu wyłączania prądu elementy układu dyszowego wymiarowano w ten sposób aby zjawisko termoeekspansji w rzeczywistych wyłącznikach nie występowało. Podstawową rolę w procesie generowania ciśnienia spiętrzenia SF_6 w wyłączniku drugiej generacji pełnił napęd wyłącznika wyposażony w siłownik o bardzo dużej energii. W związku z tym w wyłącznikach samosprężnych możliwe było nadanie bardzo dużej prędkości elementom ruchomym komory gaszeniowej, dzięki czemu uzyskiwano dynamiczne zmniejszanie objętości zbiornika sprężania czego bezpośrednim rezultatem był bardzo szybki wzrost ciśnienia gazu [30, 31, 32].

- ograniczenie występowania zjawiska termoelekspansji jedynie do przypadków wyłączania prądów o wartościach zbliżonych do znamionowego prądu wyłączalnego wyłącznika;
- zdecydowane skrócenie czasu, w którym powstaje zjawisko termoelekspansji; zjawisko to bowiem rozpoczyna się zwykle w chwili poprzedzającej maksimum prądu zaledwie o 1÷2 milisekundy i także po takim czasie licząc od wartości maksymalnej prądu zanika, zatem czas jego trwania wynosi około 2÷4 milisekundy.; takie warunki istniały przy wyłączaniu prądu $i = 22 \text{ kA}$ zarejestrowanym na oscylogramie pokazanym na rys.12.



Rys.12. Skrócenie czasu trwania zjawiska termoelekspansji.

3.4. Oględziny elementów komory gaszeniowej rzeczywistego wysokonapięciowego wyłącznika III generacji dokonanych po serii zwarciowej zdolności łączeniowej tego wyłącznika

Na rzeczywistym wyłączniku produkcji krajowej przeprowadzono próby zwarciowe w układzie syntetycznym. Biegun A wyłączył sumaryczny prąd $I = 580 \text{ kA}$, natomiast dwa pozostałe $I = 126 \text{ kA}$.

Analizując wyniki oględzin można stwierdzić, że:

- nastąpiła znaczna degradacja elementów układu dyszowego i stykowego;
- możliwa jest jednak dalsza prawidłowa praca wyłącznika;
- erozja styków dyszy głównej i izolacyjnej osłony styku ruchomego opalnego zdecydowanie wzrasta wraz z liczbą łączeń;
- najbardziej zużytym elementem jest izolacyjna osłona styku ruchomego, ale nie powoduje to nieprawidłowości w przepływie gazu w dolnej partii bieguna, bowiem przekrój krytyczny dyszy pomocniczej: – styku opalnego nieznacznie tylko zmienił swoją powierzchnię krytyczną; natomiast odparowany PTFE z osłony izolacyjnej przyczynił się do lokalnego wzmocnienia ablacji i powstania dużego nadciśnienia w okolicach przekroju krytycznego dyszy głównej (główny bowiem ubytek teflonu powstał na powierzchni czołowej osłony);
- dysza główna o wydłużonym przekroju krytycznym (rzędu 2,5-3 cm) uległa erozji jedynie na wlocie do swej wydłużonej gardzieli, a zatem także w tym przypadku nie uległy istotnej zmianie warunki przepływu tym razem w kierunku górnych części bieguna.
- Pozostałe podzespoły bieguna znajdują się w bardzo dobrym stanie.

Generalnie można powiedzieć, iż wyłącznik odznacza się dużą trwałością łączeniową i w związku z tym może być eksploatowany przez wiele lat w systemie elektroenergetycznym.

3.5. Uwarunkowania stosowania metody symulacji działania wyłącznika III generacji

W oparciu o bardzo szczegółową analizę procesów fizycznych odbywających się w komorze gaszeniowej w trakcie procesu wyłączania prądu,

uwzględniając wyniki badań laboratoryjnych specjalnego modelu komory gaszeniowej trzeciej generacji, w której do wytworzenia przyrostu ciśnienia sześćciofluorku siarki wykorzystywane jest zjawisko termoeekspansji, sformułowano układ równań opisujących działanie poszczególnych elementów wyłącznika. Na tej podstawie opracowano schemat blokowy obliczeń a następnie program komputerowy. Wykonano obliczenia dla wielu różnych wartości danych początkowych.

Opracowana obliczeniowa metoda symulacyjna jest przystosowana do oceny działania całego wyłącznika dla różnych wariantów wymiarów jego elementów podczas wyłączania prądów roboczych zwarciovych i przeciążeniowych - można zatem powiedzieć iż jest typową uniwersalną metodą narzędziową.

Założenia do metody.

Uwzględnienie podstawowych współzależności występujących podczas działania wyłącznika wysokonapięciowego z SF₆ jest możliwe pod warunkiem ograniczenia liczby założeń upraszczających. W niektórych obliczeniach, prowadzonych na przykład w celu określenia wpływu podstawowych mechanizmów odprowadzania energii z kolumny łukowej (np. konwekcji, promieniowania, przewodności) na jej temperaturę i przewodność elektryczną, zakłada się stałą wartość ciśnienia spiętrzenia [15, 21, 29, 30]. Jest to w takim przypadku uzasadnione z trzech powodów:

- wartość ciśnienia we wlocie układu dyszowego można określić na podstawie badań lub obliczeń symulujących;
- obliczenia tego typu prowadzone są z reguły dla bardzo krótkiego przedziału czasu i w związku z tym można założyć, iż parametry sześćciofluorku siarki we wlocie dyszy głównej mają wartości quasiustalone;
- do określenia parametrów gazu w strefie łukowej wykorzystywane są równania: zachowania energii, zachowania pędu, zachowania masy - są to równania różniczkowe cząstkowe, których rozwiązanie wymaga dokładnego określenia warunków brzegowych i początkowych.

Jednakże, w przypadku obliczeń wykonywanych dla dłuższych przedziałów czasowych i mających na celu określenie parametrów sześćciofluorku siarki w całej komorze gaszeniowej takie założenie prowadziłoby do całkowicie błędnych wyników.

W poprzednich rozdziałach niniejszego opracowania wykazano, iż działanie wyłącznika nowej generacji z sześćciofluorkiem siarki jest ściśle uzależnio-

ne od działania poszczególnych elementów komory gaszeniowej, a także od wymiarów układu dyszowego i obu styków opalnych. Decydujące znaczenie ma praca obu zaworów, bowiem w przypadku gdyby:

- zawór górny sterujący przepływem gazu między oboma częściami cylindra nie działałby w założony sposób, to ciśnienie gazu wytworzone podczas występowania zjawiska termoeekspansji osiągałoby zdecydowanie mniejszą wartość, co miałoby wpływ na przebieg procesu gaszenia łuku oraz odbudowy wytrzymałości dielektrycznej przerwy międzystykowej;
- zawór dolny nie otwierał się przy założonej wartości ciśnienia SF₆, to siła parcia wzrastała, by bardzo szybko do takich wartości, przy których następowałoby zdecydowane obniżenie prędkości ruchu styku ruchomego opalnego i wszystkich związanych z nim elementów komory.

Podobnie gdyby wymiar średnicy przekroju krytycznego dyszy głównej był za duży to wówczas nie wystąpiłoby zjawisko termoeekspansji i wyłącznik działałby jak klasyczny wyłącznik samosprężny.

W związku z tym należy stwierdzić, iż obliczenia symulujące działanie wyłącznika nowej generacji należy prowadzić dla ściśle określonego rozwiązania konstrukcyjnego komory gaszeniowej. Istotne jest zwłaszcza przyjęcie realnych wymiarów zaworów, układu dyszowego i stykowego (zbliżonych do wymiarów tych elementów w rzeczywistym wyłączniku). Nie wyklucza to oczywiście możliwości prowadzenia obliczeń dla wielu zestawów danych początkowych, pod warunkiem jednak, że ocena działania wyłącznika będzie dokonywana zarówno w oparciu o uzyskane przebiegi wielkości elektrycznych (prądu, czasu łukowego), termodynamicznych (ciśnienia, gęstości masy gazu w obu zbiornikach) jak także mechanicznych (drogi i prędkości styku ruchomego oraz powierzchni obu zaworów).

Mając powyższe na uwadze postanowiono sformułować układ równań opisujący działanie wszystkich elementów komory gaszeniowej, układu kinematycznego oraz napędu. Założeń upraszczających nie da się jednak uniknąć przy formułowaniu równań opisujących:

- natężenie przepływu sześćciofluorku siarki przez układ dyszowy,
- średnicę łuku w przekroju krytycznym dyszy głównej i pomocniczej,
- energię doprowadzaną z kolumny łukowej do sześćciofluorku siarki zawartego w górnym zbiorniku cylindra,
- własności sześćciofluorku siarki (gęstość, przewodność elektryczną, entalpię właściwą).

Podczas działania komory gaszeniowej nowej generacji występują następujące przypadki przepływu sześćciofluorku siarki przez układ dyszowy:

- wypływ przez nieszczelności (powierzchnia między boczną ścianką gardzieli dyszy głównej i stykiem stałym opalnym) podczas etapu wstępnego sprężania; natężenie przepływu gazu jest wówczas stosunkowo małe (także ze względu na występującą wówczas jeszcze niewielką różnicę ciśnienia); może zostać określone w prosty sposób, celowe jest jednak przyjęcie współczynnika korekcyjnego ze względu na istnienie warstwy przyściennej;
- wypływ jednokierunkowy przez specjalnie ukształtowaną osłonę izolacyjną styku ruchomego opalnego a następnie przez dyszę pomocniczą (styk opalny) podczas etapu przejściowego, w tym przypadku przepływ gazu w układzie dyszowym odbywa się przez dwie strefy: kolumnę łukową i warstwę gazu zimnego otaczającą łuk elektryczny; powierzchnia obu tych stref jest uzależniona od wymiarów konstrukcyjnych: osłony izolacyjnej, styku ruchomego opalnego oraz styku opalnego stałego, ale także od odległości międzystykowej oraz oczywiście od chwilowej wartości prądu; natężenie przepływu w każdej z tych dwu stref jest iloczynem powierzchni przepływu, gęstości i prędkości gazu; w pracy [107] (opierając się na powszechnie przyjmowanych założeniach dotyczących związku pomiędzy prędkością przepływu gazu a liczbą Macha np.[2, 25, 28, 43, 44, 51, 79]) wykazano, że natężenie przepływu w strefie łukowej jest około dwudziestokrotne mniejsze niż w strefie gazu zimnego; w związku z tym postanowiono w obliczeniach mających na celu określenie parametrów termodynamicznych SF_6 zwartego w obu komorach cylindra, pomijać przepływ sześćciofluorku siarki przez strefę łukową, zakładając, że praktycznie cały wypływ gazu ze zbiornika sprężania odbywa się przez strefę gazu zimnego; obliczenie natężenia przepływu wymaga zatem dokładnego określenia powierzchni przepływu, która jest ściśle uzależniona od zmian chwilowej wartości prądu oraz od wartości odległości międzystykowej;
- wypływ dwukierunkowy przez dyszę główną i pomocniczą podczas wszystkich następnych etapów działania komory (przy założeniu jednak, że nie występuje zjawisko termoeleksansji); w tym przypadku natężenie przepływu obliczane jest jako suma dwóch składników: natężenia przepływu w dyszy głównej oraz w dyszy pomocniczej, przy czym uwzględnia się jedynie przepływ przez strefy gazu zimnego występujące w obu tych dyszach;
- zmiana kierunku przepływu podczas zjawiska termoeleksansji; w tym przypadku przyjmuje się, że natężenie przepływu jest równe zero; ze względu na istnienie zjawiska ablacji to założenie nie jest do końca uzasadnione - powinno bowiem zostać oszacowane natężenie przepływu

wstecznego, w wyniku którego część odparowanego materiału ze ścianek dyszy głównej i osłony styku ruchomego opalnego jest transportowane do górnego zbiornika cylindra; opis matematyczny tego zjawiska jest jednak bardzo trudny, natomiast wyniki eksperymentów pokazują, iż masa odparowanego materiału jest bardzo niewielka, rzędu ułamków miligrama [11,33,47,66], w związku z tym postanowiono ją zaniedbać.

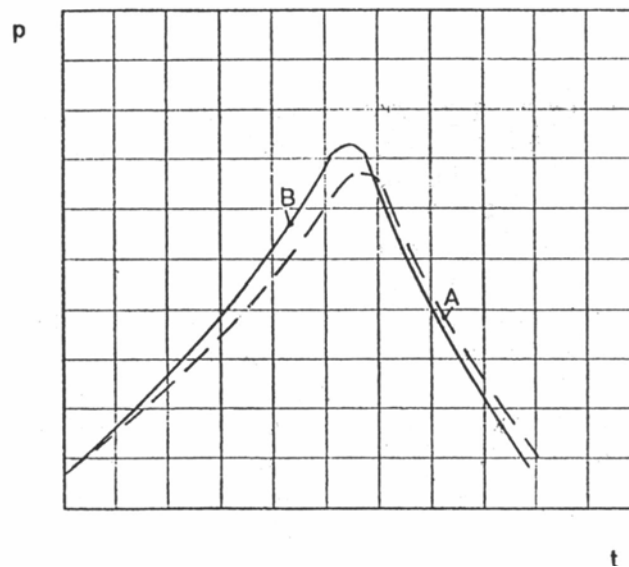
Obliczenie średnicy kolumny łukowej jest zagadnieniem szczególnie ważnym ale jednocześnie bardzo trudnym. Zagadnieniu temu poświęcono wiele prac [np.:12, 16, 17, 19, 25, 28, 43, 58, 72, 80]. Podstawowy problem wynika z następujących faktów:

- podstawą do wyprowadzenia zależności opisujących chwilową wartość średnicy łukowej jest równanie bilansu energii (lub bilansu mocy) kolumny łukowej; ma ono w swojej pierwotnej wersji złożoną postać - jest bowiem równaniem różniczkowym zawierającym wiele składników, każdy z nich opisuje inny mechanizm odprowadzania energii z łuku (np.: konwekcje osiową, przewodnictwo promieniowe, promieniowanie itp.), prawie każdy z tych składników zawiera współczynniki, których wartości są zależne od własności sześćciufluorku siarki, te z kolei są funkcjami ciśnienia i temperatury;
- rozwiązanie równania bilansu energii łuku elektrycznego wymaga, jak wykazano to w poprzednim rozdziale, bardzo precyzyjnego określenia warunków początkowych i brzegowych, a przede wszystkim stosowania bardzo złożonych metod numerycznych, co praktycznie uniemożliwia wykonywanie obliczeń mających na celu wyznaczenie innych wielkości niż parametry termodynamiczne gazu w obu istniejących strefach przepływu w dyszy głównej.

Zagadnienie to autor przeanalizował bardzo dokładnie w swoim artykule [139] opierając się na swoich wieloletnich badaniach oraz na wielu publikacjach autorów z różnych ośrodków naukowo-badawczych. Na podstawie tej analizy sformułowano następujące wnioski:

- wszystkie zaprezentowane metody obliczeniowe zostały wyprowadzone przy zastosowaniu założeń upraszczających; podstawowe założenie, przyjęte przez wszystkich autorów, dotyczy sposobu odprowadzania energii z kolumny łukowej; powszechnie zakłada się bowiem, iż podczas etapu silnoprądowego dominującym mechanizmem wymiany energii między plazmą łukową a zimnym gazem jest konwekcja osiowa,
- założenie powyższe jest w pełni uzasadnione bowiem ze względu na panującą podczas etapu silnoprądowego w kolumnie łukowej temperaturę, udział innych mechanizmów za wyjątkiem promieniowania może

być pominięty; energię odprowadzaną na drodze promieniowania, w odniesieniu do całej energii wydzielającej się w kanale łukowym można oszacować, na zaledwie kilkanaście procent mimo tak wysokiej temperatury, bowiem energia promieniowana ze środkowej części łuku jest absorbowana w znacznym stopniu przez warstwy zewnętrzne (dlatego w metodzie J.J.Lowkego i H.C.Ludwika przyjmuje się wartość bezwymiarowego współczynnika jako $f = 0 \div 0.2$) (rys.13);



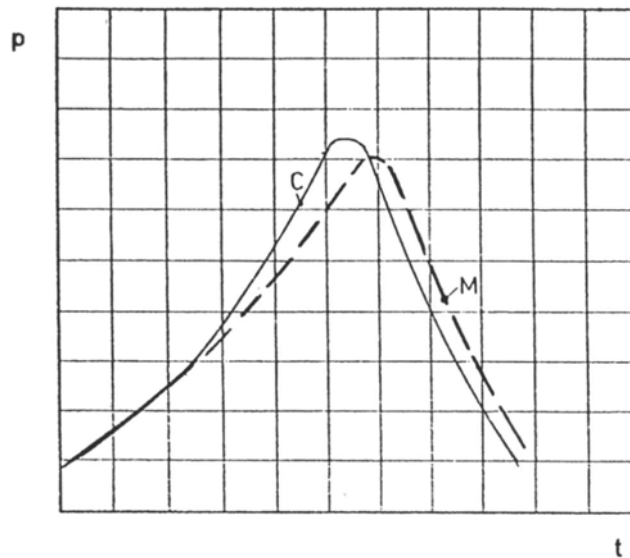
Rys.13. Porównanie obliczonych przebiegów ciśnienia sześćciofluorku siarki w zbiorniku sprężania komory gaszeniowej wyłącznika samosprężnego przy zastosowaniu do wyznaczania średnicy łuku w przekroju krytycznym dyszy dwóch różnych metod:
 A - metoda S.Tominagi [24]; $E = 70$ [V/cm]; B - metoda J.J.Lowkego i H.C.Ludwika. [20]; $f = 0.2$

- w przypadku prowadzenia obliczeń symulujących działanie wyłącznika podczas całego ruchu otwierania, a ponadto gdy uwzględnia się zjawiska fizyczne towarzyszące procesowi wyłączania prądu, uzasadnione jest wyprowadzenie zależności opisującej średnicę kolumny łukowej w dyszy jedynie dla etapu silnoprądowego; w okolicach zera prądu mechanizm odprowadzania energii z kolumny łukowej, a po przejściu prądu przez wartość zerową z kanału połukowego, jest wprawdzie całkowicie odmienny w porównaniu z etapem silnoprądowym, ale czas trwania tych zjawisk jest tak krótki, że ich wpływ na parametry termodynamiczne gazu w komorze gaszeniowej czy na wartości sił działających na części ruchome wyłącznika może być całkowicie pominięty; należy jednak bardzo mocno

podkreślić, że w przypadku wykonywania obliczeń mających na celu określenie parametrów termodynamicznych w dyszy wyłącznika dla obszaru zera prądu dla opisanego bilansu energetycznego kolumny łukowej należy sformułować zupełnie inną zależność uwzględniając takie mechanizmy odprowadzania energii jak przewodnictwo promieniowe czy zjawisko lokalnej turbulencji; w takim przypadku obliczenia symulujące służą jedynie do bardzo dokładnego określenia danych początkowych;

- analizując wyniki obliczeń można stwierdzić, iż założenie stałej temperatury plazmy łukowej w niewielkim stopniu zmienia wyniki obliczeń, natomiast nie uwzględnienie zmian ciśnienia gazu w dyszy wyłącznika może prowadzić do istotnych błędów; w związku z tym celowe jest wykorzystywanie w obliczeniach wzorów aproksymujących opisujących zależność gęstości, entalpii właściwej czy przewodności sześćfluorku siarki od ciśnienia, sformułowane przy założeniu stałej temperatury w kolumnie łukowej (np.: zależności opublikowane w pracy Z.Gajica [27])
- różnice między wynikami obliczeń średnicy kolumny łukowej wykonanych przy zastosowaniu trzech różnych metod nie przekroczyły 15%; wykazano także, że obliczone przy wykorzystaniu dwóch różnych metod określania średnicy łuku wartości ciśnienia spiętrzenia różnią się między sobą zaledwie o 5%; można zatem powiedzieć, iż metoda określania średnicy kolumny łukowej nie ma decydującego wpływu na dokładność obliczeń symulujących działanie wyłącznika; należy jednak podkreślić, że układ równań opisujących pracę poszczególnych części komory gaszeniowej, układu kinematycznego i napędu składa się z ponad sześćdziesięciu zależności, w związku z tym przy formułowaniu każdego wzoru konieczne jest uwzględnienie wszystkich czynników mających wpływ na prawidłowość opisu poszczególnych zjawiska fizycznego towarzyszącego procesowi wyłączania prądu, a równocześnie przeanalizowanie wpływu przyjętych założeń na dokładność wyników obliczeń;
- po dokładnym porównaniu wszystkich omówionych powyżej metod, można powiedzieć, iż najbardziej dogodną do zastosowania w obliczeniach symulacyjnych jest metoda opracowana przez H.Schotzau i F.Knoeu-buha; została ona sformułowana w oparciu o w pełni uzasadnione założenia upraszczające, w związku z tym, uzyskano niezbyt skomplikowaną zależność, w której wykorzystywane są współczynniki uzależnione jedynie od ciśnienia gazu (możliwe jest zatem wykorzystanie wzorów aproksymujących), a równocześnie zastosowanie tego wzoru gwarantuje, że wyniki obliczeń parametrów termodynamicznych sześćfluorku siarki są obarczone niedużym błędem; należy także przypomnieć, iż zbliżone metody stosowane są w pracach [22, 25];

- celowa jest weryfikacja zastosowanej do obliczeń symulujących metody wyznaczania średnicy łukowej za pomocą badań; szczególnie przydatne jest porównanie przebiegów ciśnienia sześćciofluorku siarki w zbiorniku sprężania wyznaczonych za pomocą obliczeń i zarejestrowanych podczas prób zdolności łączeniowej wyłącznika (patrz rys.14).



Rys.14. Porównanie obliczonych przebiegów ciśnienia sześćciofluorku siarki w zbiorniku sprężania komory gaszeniowej wyłącznika samosprężnego z przebiegami zarejestrowanymi podczas prób modelu wyłącznika ($I_w=31.5$ [kA]).

M - przebieg pomierzony, C - przebieg obliczony.

Podczas występowania zjawiska termoeekspansji część energii wydzielającej się w kolumnie łukowej jest transportowana do sześćciofluorku siarki zawartego w górnej części zbiornika sprężania. Wartość tej energii można określić w prosty sposób przyjmując jednakże następujące uproszczenia:

- energia z kolumny jest dostarczana do gazu zawartego w zbiorniku sprężania jedynie wówczas gdy kolumna łukowa całkowicie wypełnia przekrój krytyczny dyszy głównej;
- źródłem energii dostarczanej do gazu zawartego w zbiorniku sprężania jest ta część kolumny łukowej, która jest zawarta między stykiem ruchomym opalnym a przekrojem krytyczny dyszy głównej;
- część energii wydzielającej się tym obszarze przekazywana jest na drodze promieniowania i przewodnictwa do ścianek dyszy, specjalnej osłony styku ruchomego opalnego, styków opalnych i nie jest dostarczana do gazu; w związku z tym do równania opisującego energię dostarczaną

z kolumny łukowej do sześćciofluorku siarki zawartego w zbiorniku sprężania wprowadzono bezwymiarowy współczynnik $\xi < 1$; wartość tego współczynnika powinna być określona na drodze eksperymentalnej.

We wzorach służących do określenia średnicy łukowej oraz energii dostarczanej z kolumny łukowej do gazu występują: gęstość, przewodność elektryczna oraz entalpia właściwa sześćciofluorku siarki. Wartości tych własności gazu są silnie uzależnione zarówno od temperatury jak i od ciśnienia. Przyjmując założenie o stałości temperatury w kolumnie łukowej można wykorzystać wzory aproksymujące sformułowane w literaturze. W niniejszej pracy postanowiono skorzystać z zależności wyprowadzonych w pracy [26], której autorzy bardzo wnikliwie przeanalizowali to zagadnienie.

Po przeanalizowaniu warunków przepływu gazu przez dyszę główną podczas występowania zjawiska ablacji określono następującą zależność opisującą bezwymiarowy współczynnik oporu przepływu SF_6 :

$$\mu_{pg} = \begin{cases} 0.95 & \text{dla } d_A = 0 \\ 0.95 - f(\Delta p_a) & \text{dla } d_A \in \langle 0, d_d \rangle \\ 0 & \text{dla } d_A = d_d \end{cases}$$

gdzie:

d_d - średnica przekroju krytycznego dyszy.

Na podstawie badań laboratoryjnych przy jednoczesnym uwzględnieniu obliczeń symulujących [34] stwierdzono, iż dla wyłącznika trzeciej generacji wartość funkcji $f(\Delta p_a)$ jest uzależniona od wartości chwilowej prądu; dla prądów o wartościach chwilowych rzędu $i = 1 \div 4$ [kA] jej wartość można szacować na około $0.05 \div 0.15$, natomiast dla prądów z zakresu $6 \div 14$ [kA] wartość tę można określić jako $0.2 \div 0.45$; dla wyższych prądów chwilowych wartość tej funkcji jeszcze bardziej się zwiększa co powoduje, iż współczynnik oporu przepływu ma wartość bliską zero.

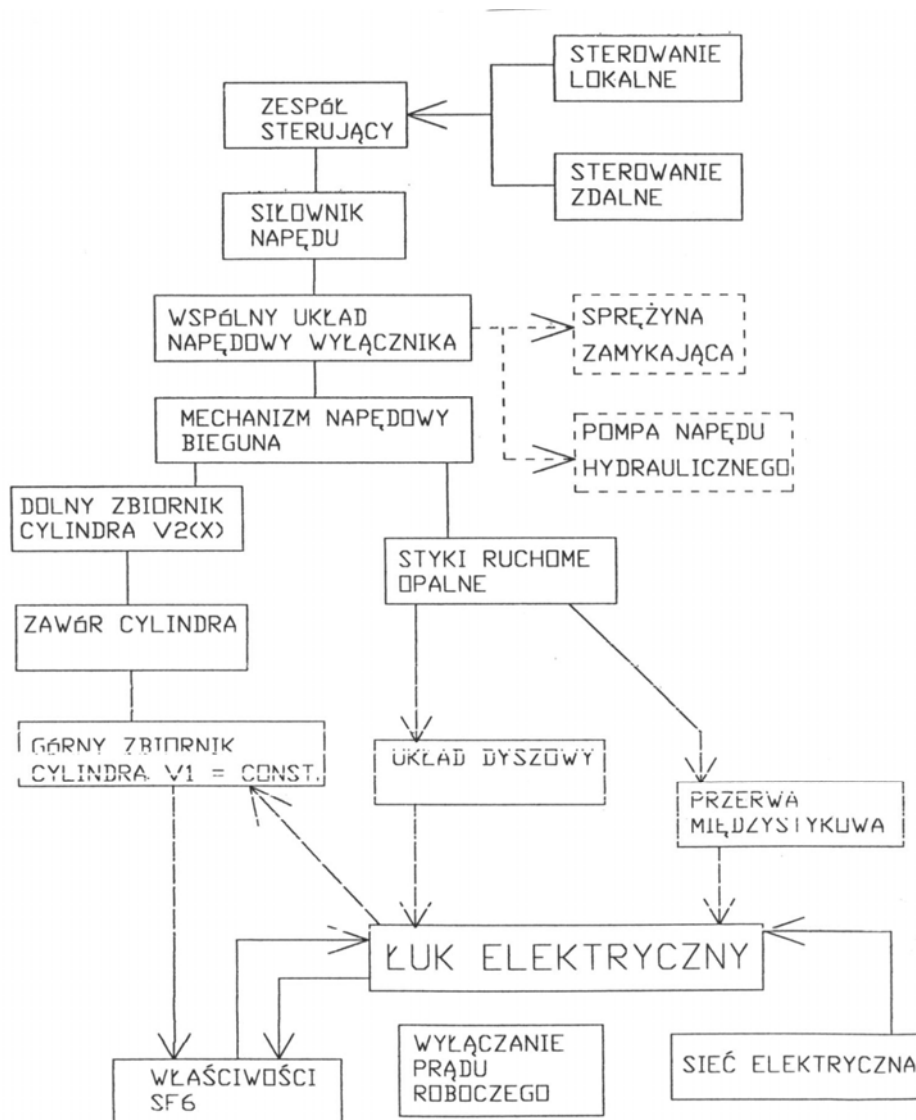
3.5. Określenie współzależności zjawisk odbywających się w podzespołach komory gaszeniowej i napędu

Podczas ruchu otwierania działanie elementów komory gaszeniowej jest uzależnione od wartości wyłączanego prądu, to z kolei ma wpływ na pracę

innych podzespołów wyłącznika znajdujących się zarówno w biegunie wyłącznika jak i w napędzie.

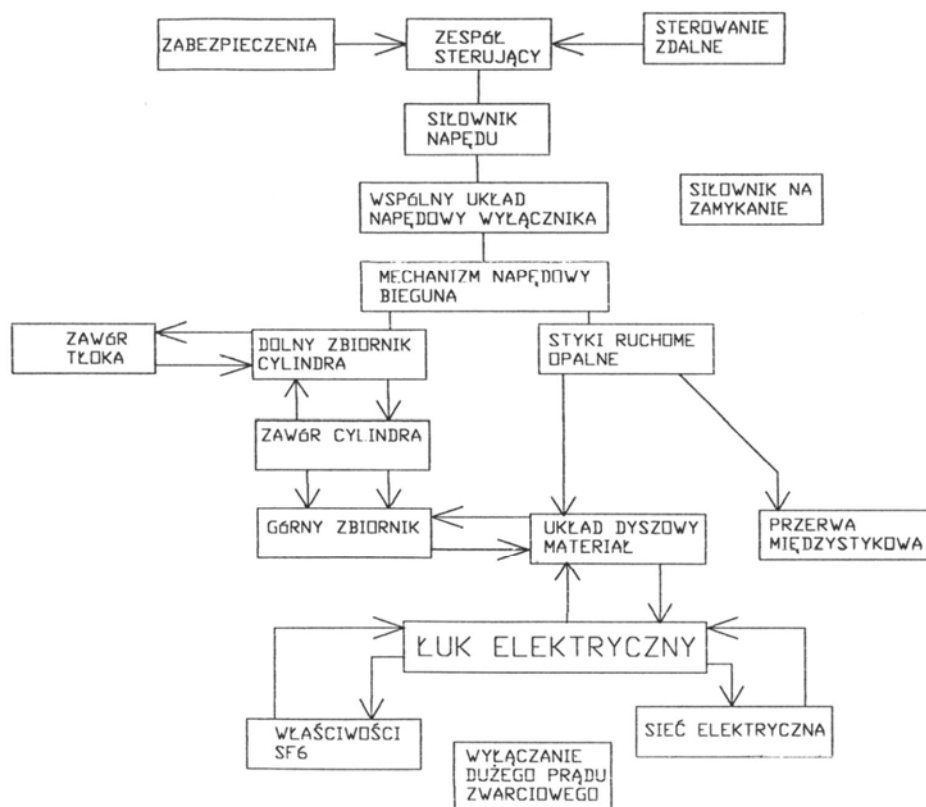
Na rysunkach 15 oraz 16 przedstawiono uproszczone schematy współdziałania podstawowych elementów wyłącznika a także współzależności zjawisk odbywających się w komorze gaszeniowej i napędzie podczas wyłączania odpowiednio:

- prądu roboczego;
- prądu zwarciovego o wartości zbliżonej do znamionowego zwarciovego prądu wyłączalnego.



Rys.15. Schemat współdziałania podstawowych elementów wyłącznika podczas wyłączania prądu roboczego.

Współzależności te zostały uwzględnione przy budowaniu uniwersalnego schematu obliczeniowego wykorzystywanego w metodzie symulującej działanie wyłącznika IIII generacji z SF₆.



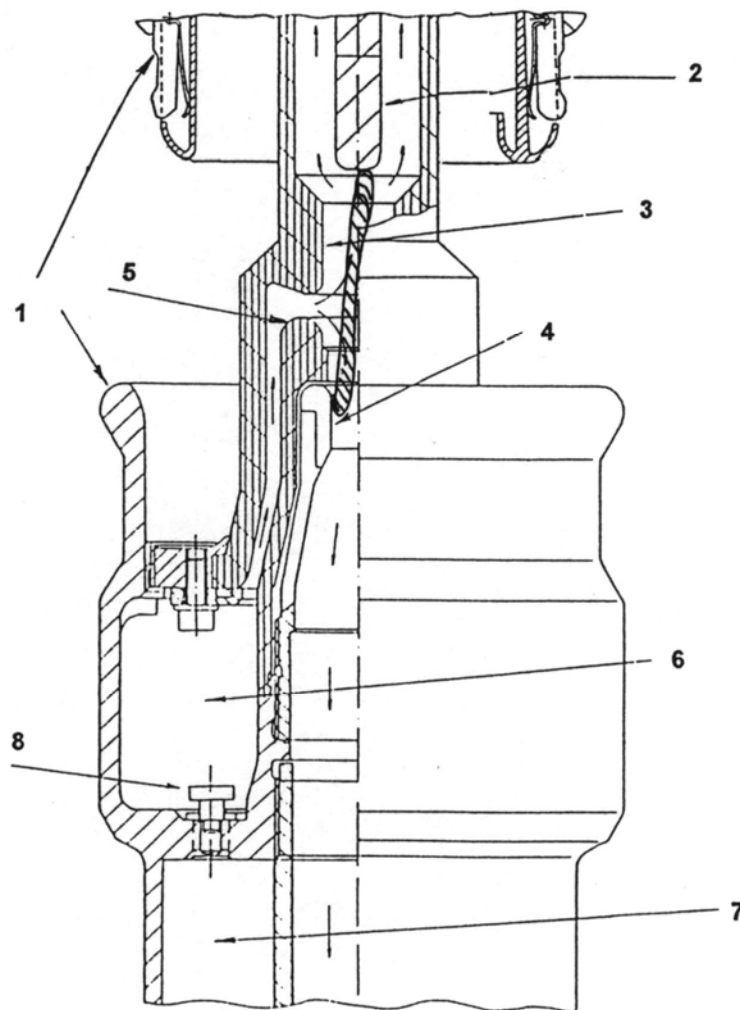
Rys.16. Schemat współdziałania podstawowych elementów wyłącznika podczas wyłączania dużych prądów zwarciovych.

3.6. Ocena wpływu łuku elektrycznego na warunki przepływu gazu w układzie dyszowym

Jak wiadomo układ dyszowy komory gaszeniowej współczesnego wyłącznika z sześćfluorkiem siarki jest obecnie praktycznie zawsze układem dwustrumieniowym - składa się z dyszy głównej (wykonanej praktycznie zawsze z domieszkowanego PTFE) oraz dyszy pomocniczej, którą stanowi zestyk ruchomy opalny osłonięty tuleją izolacyjną (wykonaną z tego samego materiału co dysza główna).

Dwustrumieniowy układ dyszowy rzeczywistego wyłącznika produkcji krajowej pokazano na rysunkach 17, 18 oraz 19³⁷ podczas wyłączania odpowiednio:

- prądu roboczego (czyli zbliżonego do znamionowego prądu ciągłego a więc o wartości należącej do przedziału $I_n = 1.25 \text{ kA} \div 4 \text{ kA}$), (rys.17);

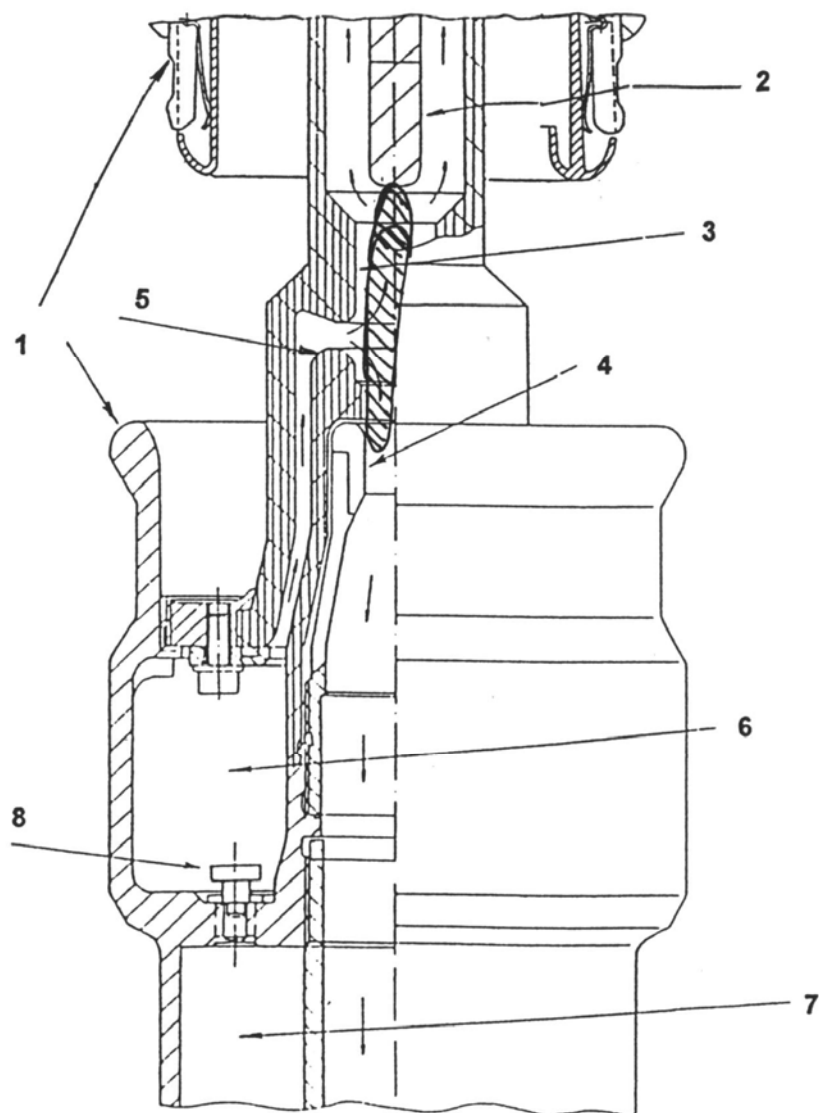


Rys.17. Układ dyszowy i stykowy wyłącznika trzeciej generacji produkcji krajowej podczas wyłączania prądu roboczego:

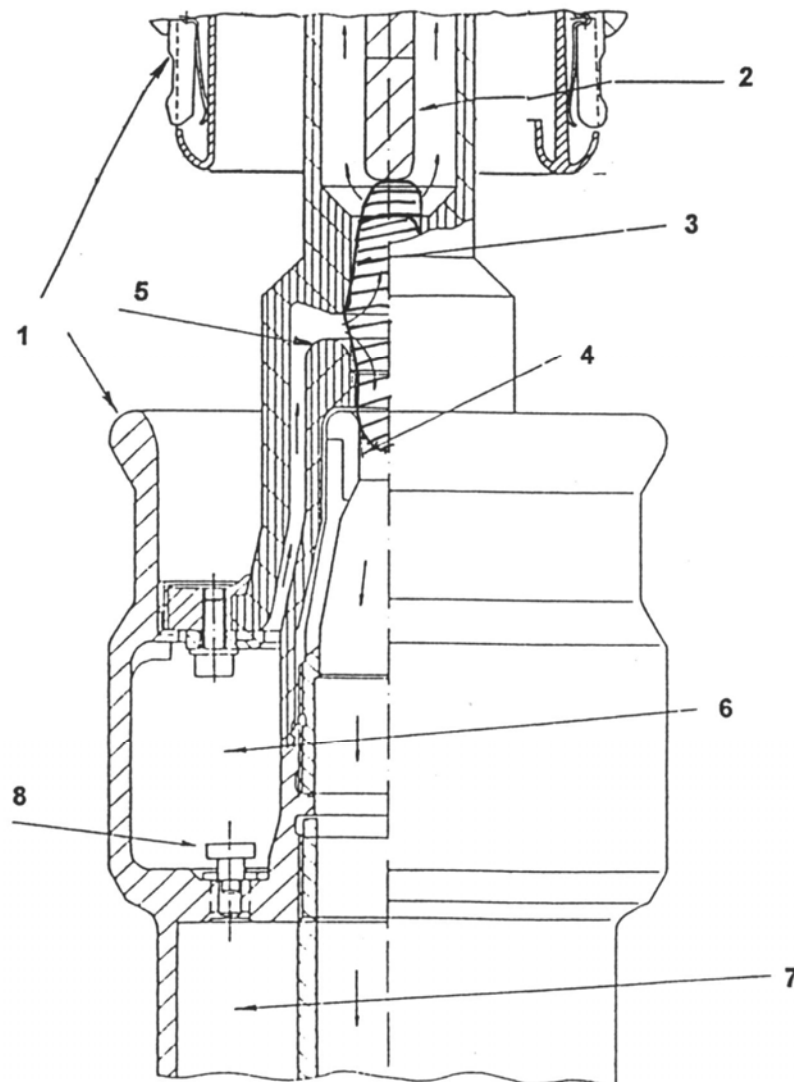
1 - zestaw główny, 2 - styk stały opalny, 3 - izolacyjna dysza główna, 4 - styk ruchomy opalny; 5 - izolacyjna osłona styku ruchomego opalnego, 6 - górny zbiornik cylindra o stałej objętości, 7 - dolny zbiornik cylindra o zmiennej objętości, 8 - zawór cylindra.

³⁷ Rysunki 17, 18, 19 sporządzano na podstawie oględzin elementów komór gaszeniowych rzeczywistych wyłączników oraz specjalnego modelu komory gaszeniowej III generacji. Wykonanych w trakcie i po zakończeniu serii prób zdolności łączeniowej prądów z zakresu $2 \div 31.5 \text{ kA}$. (Proszę porównać ze zdjęciami zamieszczonym w rozdziale 3).

- prądu zwarcowego o wartości równej w przybliżeniu 30% znamionowego prądu wyłączalnego (czyli w rzeczywistości $0,3 \times 31,5 \text{ kA} = 9,5 \text{ kA}$), (rys.18);
- prądu zwarcowego o wartości równej w przybliżeniu 100% znamionowego prądu wyłączalnego (czyli w rzeczywistości 31,5 kA), (rys.19).



Rys.18. Układ dyszowy i stykowy wyłącznika trzeciej generacji produkcji krajowej podczas wyłączania prądu zwarcowego o wartości wynoszącej około 30% znamionowego zwarcowego prądu wyłączalnego



Rys.19. Układ dyszowy i stykowy wyłącznika trzeciej generacji produkcji krajowej pod-czas wyłączenia prądu zwarcowego o wartości wynoszącej około 30% znamionowego zwarcowego prądu wyłączalnego.

Analizując wymienione powyżej rysunki można stwierdzić, iż oddziaływanie łuku elektrycznego na przepływ sześćiofluorku siarki przez układ dyszowy dla każdego przypadku wyłączenia prądu jest inny:

- w pierwszym przypadku średnica kanału łukowego w porównaniu ze średnicą przekroju krytycznego zarówno dyszy głównej jak i pomocniczej jest zdecydowanie mniejsza, a zatem, łuk elektryczny powoduje zmniejszenie powierzchni przekroju strugi gazu zimnego;

- w drugim przypadku, następuje już znaczące ograniczenie powierzchni przepływu strugi gazu zimnego, przez kanał łukowy co powoduje istotne zmniejszenie natężenie wypływu gazu z tzw. zbiornika sprężania, gdyż wydatek masowy dla strefy kolumny łukowej jest wielokrotnie mniejszy w porównaniu ze strefą gazu zimnego; można także uznać, iż znacząco wzrasta ablacja co ma wpływ na powstanie dodatkowe przyrostu ciśnienia spiętrzenia;
- w trzecim przypadku, w okolicach maksimum półfali prądu następuje całkowite zablokowanie przepływu gazu zimnego przez kolumnę łukową; towarzyszą temu następujące zjawiska:
 - ablacja (parowanie) materiału dyszy i izolacyjnej osłony styku ruchomego opalnego, na skutek pochłaniania przez ich ścianki wewnętrzne energii odprowadzanej z kanału łukowego na drodze promieniowania,
 - mieszanie się cząstek PTFE z plazmą łukową co w nieznacznym stopniu zmienia jej własności fizyczne
 - dodatkowe ograniczanie powierzchni przepływu gazu (zwiększające się wraz ze wzrostem intensywności ablacji, która jest proporcjonalna do chwilowej wartości prądu) przed wystąpieniem maksimum półfali prądu i całkowitym zablokowaniem przekroju krytycznego dyszy
 - lokalny wzrost ciśnienia gazu wywołany ablacją i wzmocniony zjawiskiem „pinch effectu”;
 - przepływ wsteczny doprowadzający do zbiornika sprężania część energii wydzielającej się w kanale łukowym we wlotowej części dyszy.

Ponadto należy podkreślić, iż podczas każdego wyłączenia prądu, oczywiście proporcjonalnie do wartości wyłączanego prądu ulegają erozji elementy układu stykowego i dyszowego; jest to bardzo istotne dla rzeczywistego wyłącznika gdyż po każdym wyłączeniu prądu ulegają warunki przepływu gazu oraz zmniejszona zostaje trwałość łączeniowa.

Intensywna ablacja modyfikuje przepływ gazu w dyszy głównej.

3.7. Szczegółowy schemat blokowy obliczeń metody symulującej działanie wyłącznika trzeciej generacji podczas ruchu otwierania przy uwzględnieniu oddziaływania wyłączanego prądu

Poniżej został umieszczony uniwersalny schemat blokowy obliczeń stosowanych w metodzie symulującej działanie wyłącznika III generacji z SF₆.

Schemat obliczeniowy został tak opracowany, że możliwe jest wykonanie obliczeń:

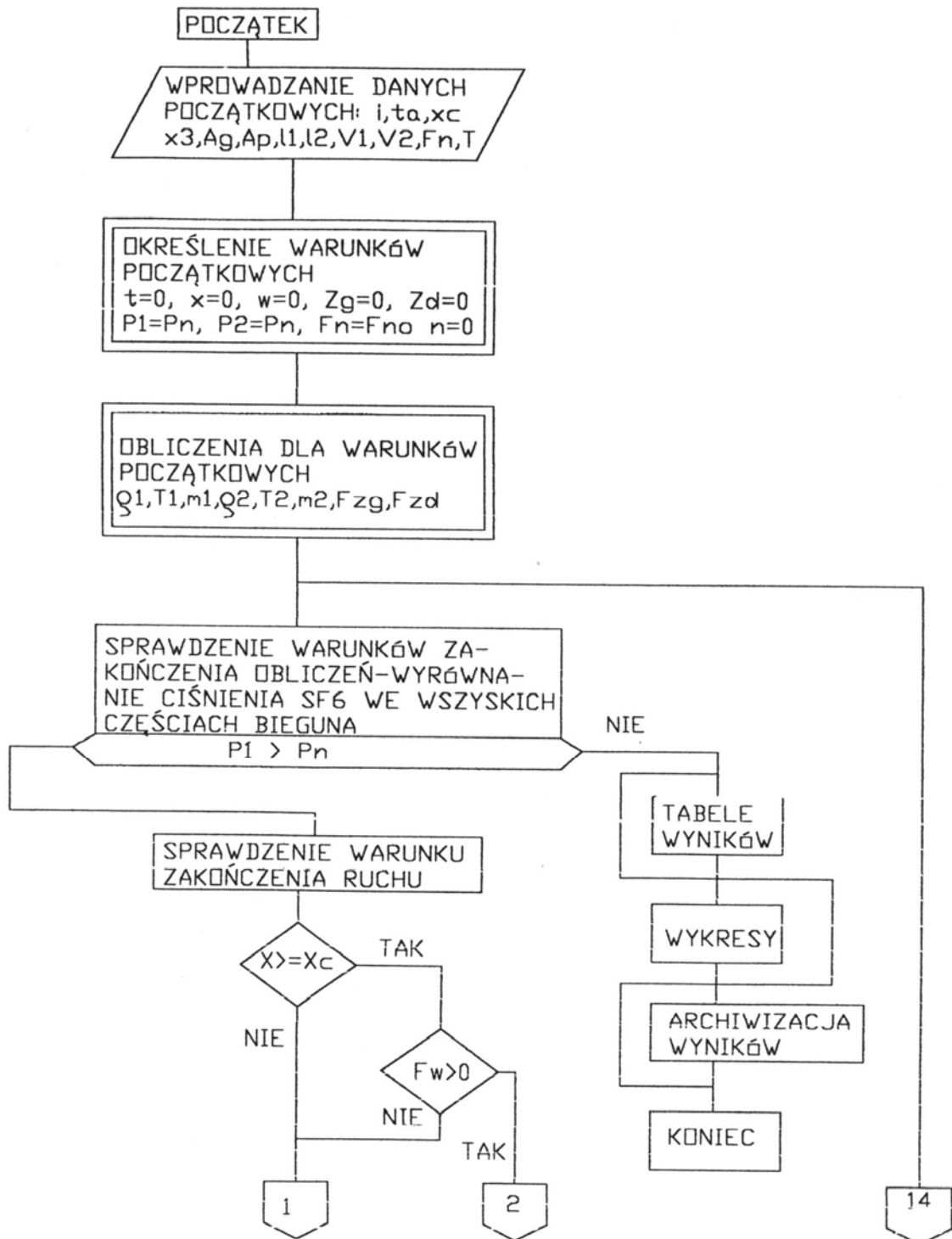
- dla warunków bezprądowych, dla różnych wartości wyłączanego prądu (od prądów roboczych rzędu 1-4 kA do prądów zwarciovych rzędu 31,5- 40 kA) a także współczynnika asymetrii;
- odwzorowujących zjawiska termoeekspansji i ablacji;
- dla różnych wartości wymiarów elementów komory gaszeniowej (zwłaszcza części układu dyszowego i stykowego);
- przy zmieniających się charakterystykach napędu (tzn. energii i przebiegu siły napędowej)
- przy różnych wartościach ciśnienia roboczego.

Możliwe jest także odwzorowanie nieprawidłowej pracy komory gaszeniowej; na przykład nieprawidłowego działania zaworów.

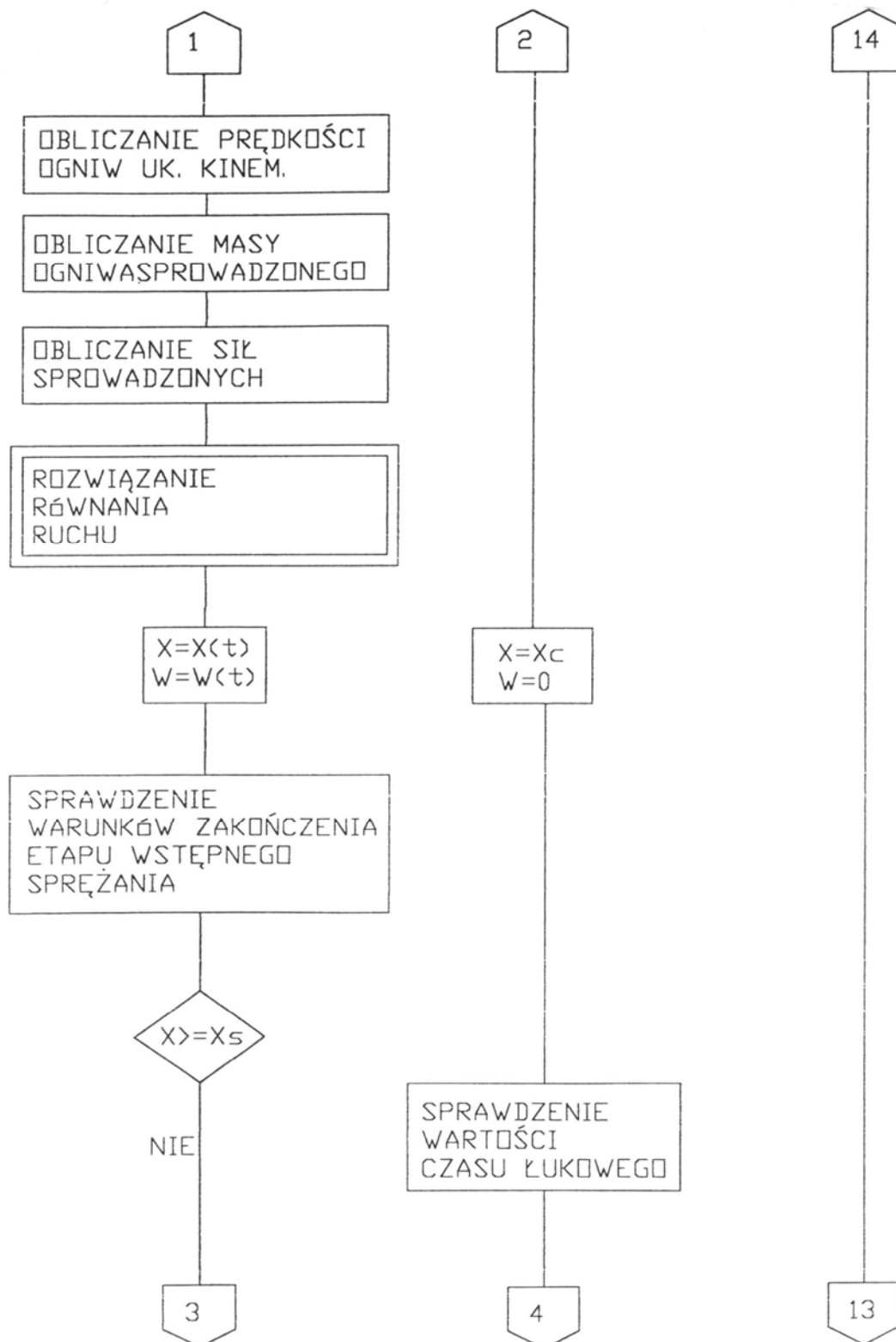
Obliczenia symulujące działanie wyłącznika trzeciej generacji podczas ruchu otwierania przy uwzględnieniu obecności łuku elektrycznego polegają na rozwiązaniu sformułowanego powyżej układu równań oczywiście przy uwzględnieniu wszystkich istniejących współzależności między działaniem poszczególnych części komory gaszeniowej i napędu. Rozwiązanie tego układu jest możliwe jedynie przy wykorzystaniu maszyny cyfrowej i odbywa się według zamieszczonego poniżej schematu obliczeń, przy czym należy zaznaczyć iż obliczenia rozpoczynają się w chwili rozpoczęcia ruchu przez styk ruchomy opalny (tzw. ogniwo sprowadzone) a kończą w chwili ponownego wyrównania się ciśnienia sześćiofluorku siarki we wszystkich częściach bieguna wyłącznika.

Zmienną niezależną jest oczywiście czas i w jego funkcji obliczane są wszystkie wielkości charakteryzujące pracę wyłącznika:

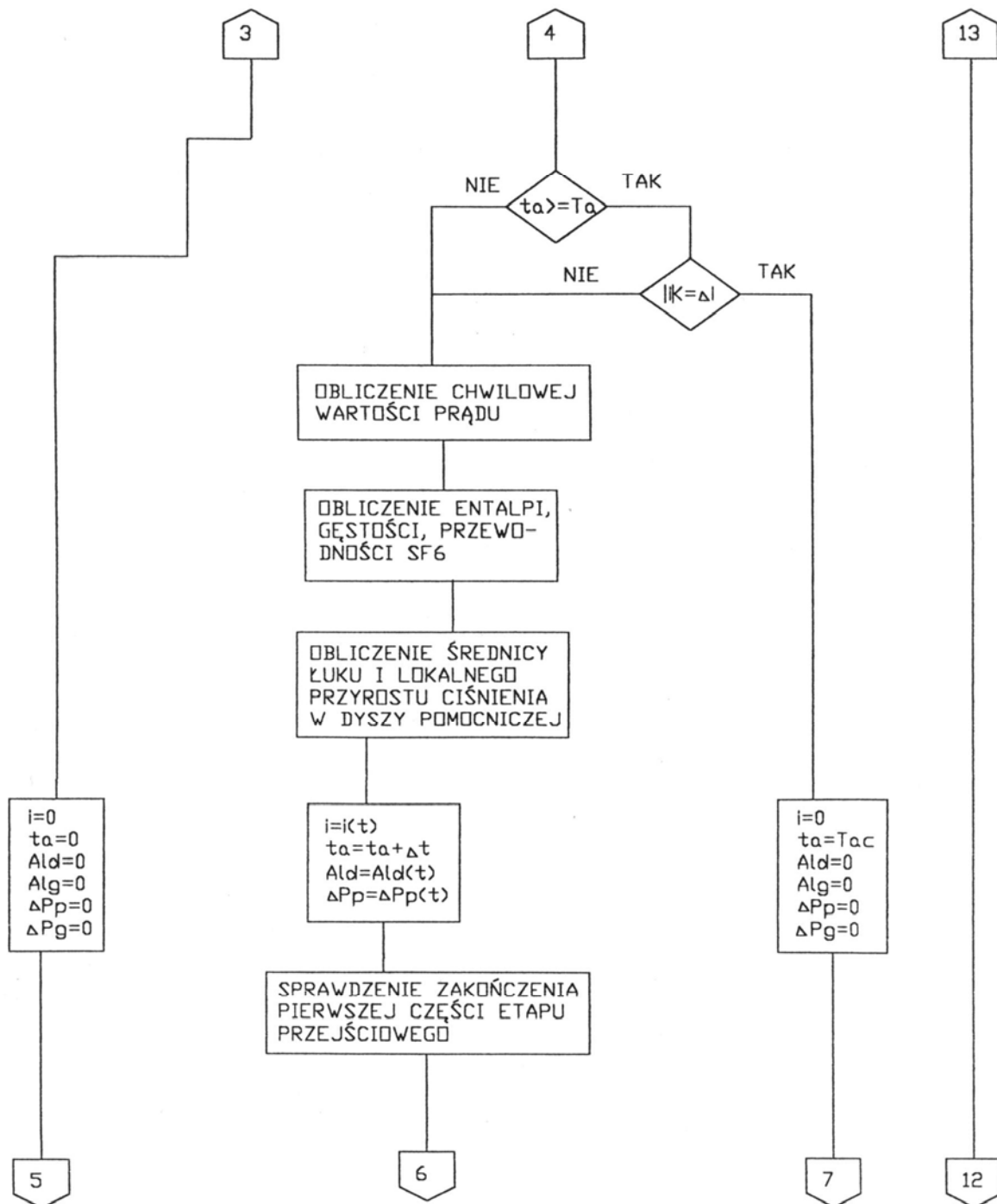
- prąd elektryczny, entalpia, gęstość, przewodność plazmy łukowej, średnica kolumny łukowej;
- wielkości termodynamiczne sześćiofluorku siarki w obu częściach cylindra; natężenie przepływu gazu w dyszy głównej i pomocniczej;
- wielkości mechaniczne opisujące prace obu zaworów i całego wyłącznika.



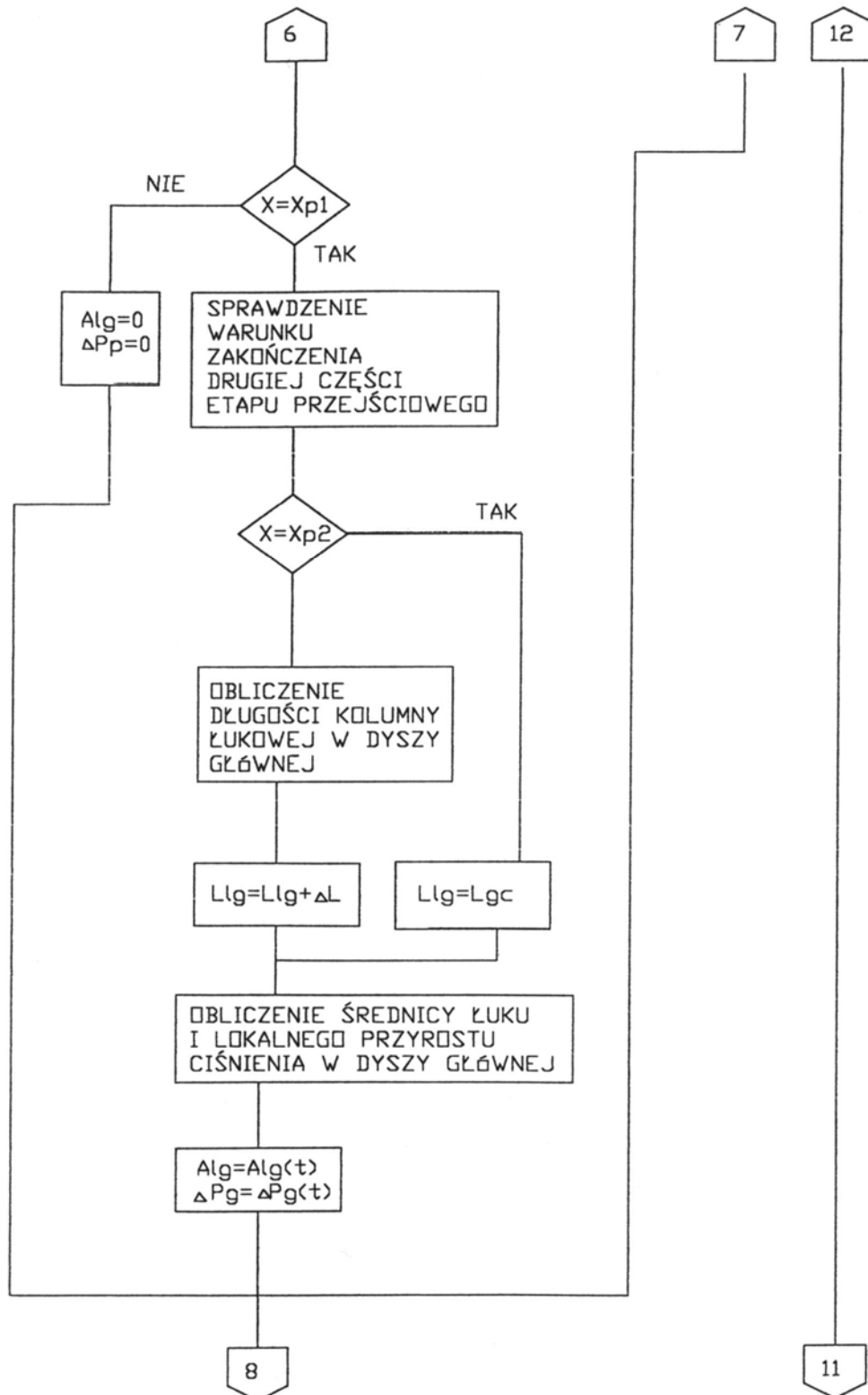
Rys.20. Schemat blokowy obliczeń stosowanych w metodzie symulacyjnej.



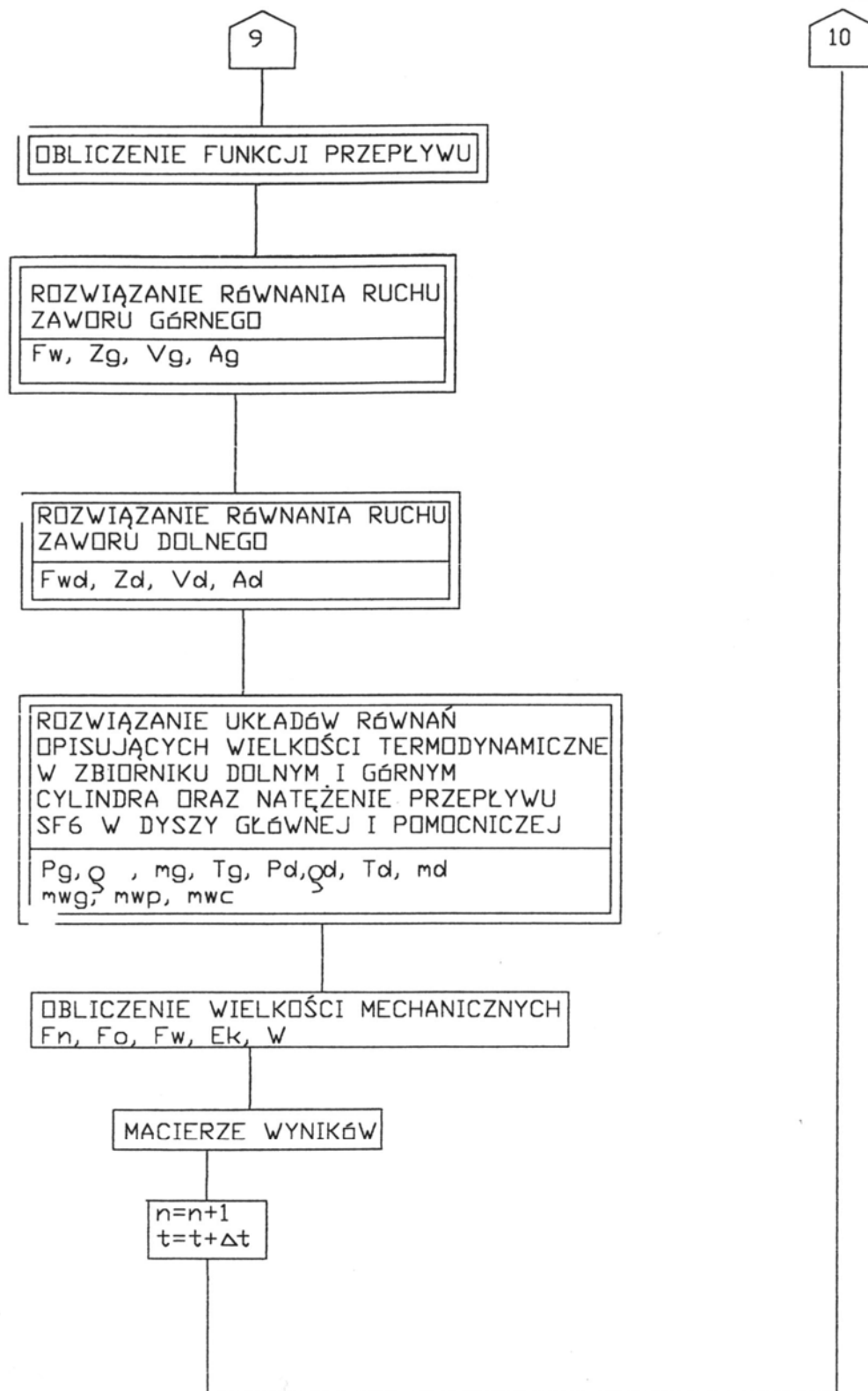
Rys.21. Ciąg dalszy schematu obliczeń stosowanych w metodzie symulacyjnej.



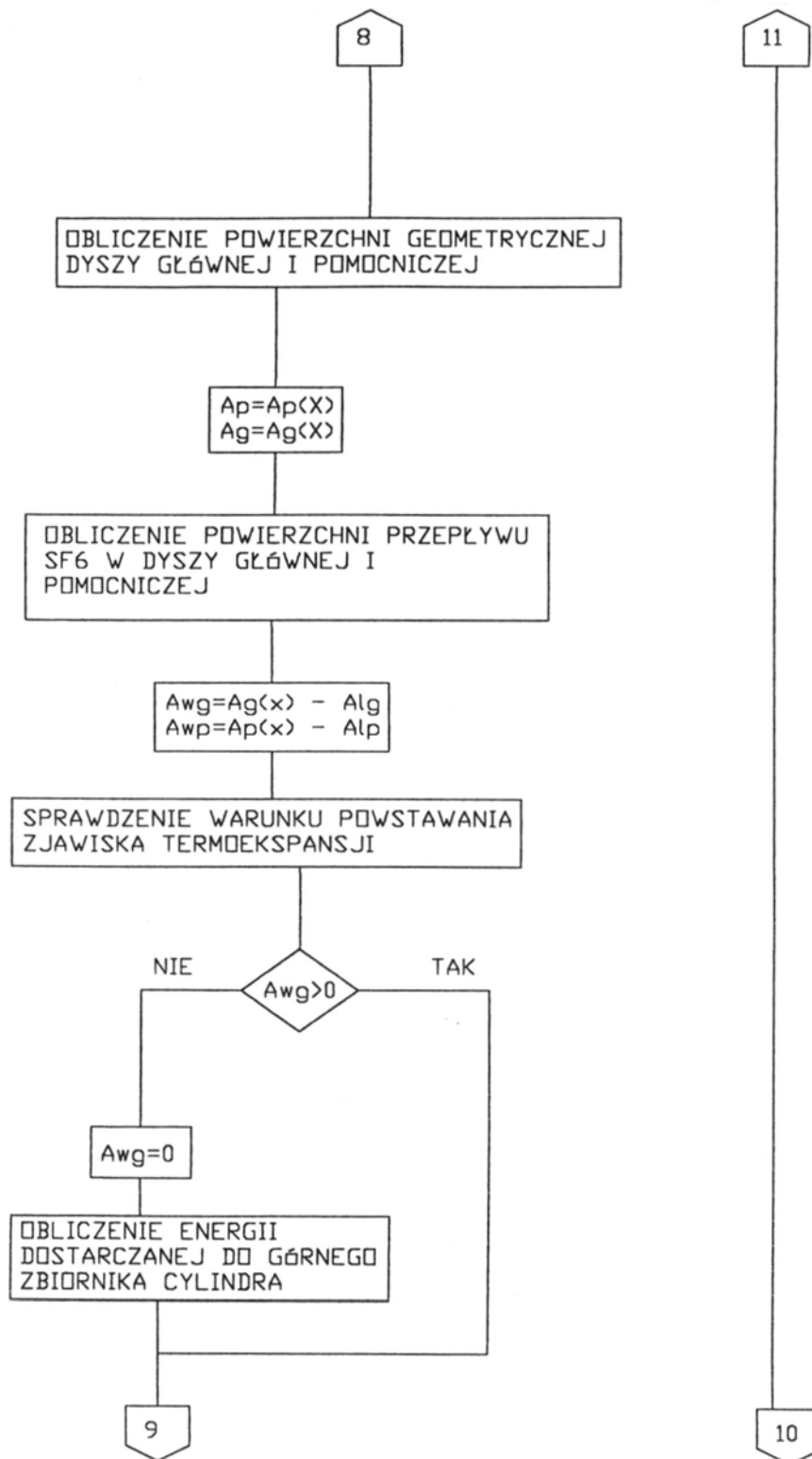
Rys.22. Ciąg dalszy schematu obliczeń stosowanych w metodzie symulacyjnej.



Rys.23. Ciąg dalszy schematu obliczeń stosowanych w metodzie symulacyjnej.



Rys.24. Ciąg dalszy schematu blokowego obliczeń stosowanych w metodzie symulacyjnej.



Rys.25. Ciąg dalszy schematu blokowego obliczeń stosowanych w metodzie symulacyjnej.

4.3 Układ równań

Układ równań, wykorzystywany w obliczeniach symulujących działanie wysokonapięciowego wyłącznika z sześćciofluorkiem siarki nowej generacji w charakterystycznych przypadkach jego pracy łączeniowej w systemie elektroenergetycznym, dla kolejnych etapów działania jego komory gaszeniowej i napędu (przy uwzględnieniu oddziaływania wyłączanego prądu na przepływ gazu przez układ dyszowy), obejmuje zależności opisujące:

I. Charakterystyki ruchu styku ruchomego opalnego - tak zwanego ogniwa sprowadzonego

Drogę i prędkość styku ruchomego opalnego, który w niniejszej pracy, zgodnie z metodą sformułowaną w monografii [86], został przyjęty jako tzw. ogniwo sprowadzone, opisuje układ równań różniczkowych liniowych pierwszego stopnia w następującej postaci:

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = \frac{\sum F_{nw}(x,t) - \sum F_r(x,t)}{M_{Sk}(x)} \\ \frac{dx}{dt} = v_x \end{cases} \quad (4.1)$$

gdzie:

- $\sum F_{nw}(x,t)$ - suma sił napędowych;
- $\sum F_r(x,t)$ - suma sił oporowych;
- v_x, x - prędkość i droga styku ruchomego opalnego;
- t - czas;
- $M_{Sk}(x)$ - masa części ruchomych (tzw. masa sprowadzona, zależna od położenia styku ruchomego³⁸);

³⁸ W Załączniku Z2 podano przykład wyznaczania masy sprowadzonej dla rzeczywistego wyłącznika, w którym trzy sprężyny otwierające są umieszczone w karterze każdego bieguna.

Sumy sił napędowych i oporowych opisują zależności w postaci:

$$\begin{cases} \sum F_{nw}(x,t) = F_N(x) \cdot f_1(x) + G \\ \sum F_r(x,t) = F_P + T_s(x) + T + A(x) \cdot f_2(x) \end{cases} \quad (4.2)$$

gdzie:

$F_N(x)$	- suma sił sprężyn otwierających;
G	- siła ciężkości części ruchomych wyłącznika (sprowadzone do styku ruchomego)
F_P	- siła parcia gazu na dolną część cylindra,
$T_s(x), T$	- siła tarcia zestyków, siła tarcia połączeń suwliwych
$A(x)$	- siła oporowa amortyzatora olejowego
$f_1(x), f_2(x)$	- funkcje określające wartość stosunku prędkości ogniwa układu kinematycznego w miejscu przyłożenia siły oporowej lub napędowej do prędkości styku ruchomego obranego jako ogniwo sprowadzone ³⁹

przy czym:

$$F_N(x) = \frac{(F_{2N} - F_{1N})}{x_c} + F_{1N} \quad (4.3)$$

$$T_s(x) = \begin{cases} T_{2Z} + T_{1Z} & \text{dla } x \in (0, x_s) \\ T_{2Z} & \text{dla } x \in (x_s, x_c) \end{cases} \quad (4.4)$$

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{dla } x \in (0, x_a) \\ \lambda \cdot V_a^2 & \text{dla } x \in (x_a, x_c) \end{cases} \quad (4.5)$$

$$F_P = B \cdot [p_2(x,t) - p_N] \quad (4.6)$$

$$G = M_k \cdot g \quad (4.7)$$

gdzie:

T_{1Z}, T_{2Z}	- siła tarcia zestyku opalnego i głównego, siła tarcia styku ruchomego nierozłącznego;
------------------	--

³⁹

Metoda wyznaczania funkcji $f_1(x)$ oraz $f_2(x)$ określona jest w Załączniku Z2.

v_a	- prędkość tłoka amortyzatora olejowego;
λ	- współczynnik tłumienia amortyzatora olejowego;
x_s, x_a	- droga styku ruchomego: do punktu utarty styczności, do początku strefy amortyzacji;
x_c	- całkowita droga styku ruchomego opalnego;
B	- powierzchnia tłoka dolnego zbiornika sprężania;
p_2, p_1	- ciśnienie SF ₆ w: dolnym, górnym zbiorniku sprężania;
p_N	- ciśnienie SF ₆ w biegunie wyłącznika;
F_{2N}, F_{1N}	- końcowa, początkowa wartość sumy sił sprężyn otwierających;
g	- przyspieszenie ziemskie.

II. Prąd obwodu elektrycznego, w którym następuje wyłączenie płynący przez kanał łukowy:

Na podstawie nawet najbardziej złożonych obliczeń symulujących nie jest możliwe określenie czy nastąpiło wyłączenie prądu przez komorę gaszeniową [20,21,30], można natomiast odwzorować wpływ wartości i współczynnika asymetrii wyłączanego prądu a także czasu łukowego na działanie wyłącznika. W związku z tym formułując równanie opisujące chwilową wartość prądu płynącego przez kolumnę łukową należy uwzględnić, że:

- chwilowa wartość wyłączanego prądu do momentu, w którym następuje otwarcie zestyku opalnego ma wartość równą zero, ponieważ prąd jest wówczas przewodzony przez tor prądowy;
- wyłączenie prądu następuje w pierwszym jego przejściu przez wartość zerową występującą po upływie założonego czasu łukowego;
- wartość składowej nieokresowej prądu jest zależna od czasu własnego wyłącznika.

Chwilowa wartość prądu jest zatem równa zero w następujących przypadkach:

$$\begin{cases} i = 0 & \Leftrightarrow & x < x_s \\ i = 0 & \Leftrightarrow & t_a = (t - t_s) > T_a \end{cases} \quad (4.8)$$

gdzie:

- i - chwilowa wartość prądu;
- t_a - bieżąca wartość czasu łukowego;
- T_a - założona wartość czasu łukowego
- t_s - czas do chwili utraty styczności przez zestyk opalny;

Chwilowa wartość prądu zwarciovego niesymetrycznego opisana jest wzorem:

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \{\sin[\omega(tp + t) + \psi - \varphi] - e^{-t/T_d} \cdot \sin(\psi - \varphi)\} \quad (4.9)$$

gdzie:

- t_p - czas własny wyłącznika;
- ψ - faza napięcia w chwili załączania prądu;
- φ - kąt opóźnienia składowej okresowej prądu względem napięcia;
- T_d - stała czasowa zanikania składowej nieokresowej prądu

przy czym:

$$\begin{cases} \varphi = \arctg(X / R) \\ T = \text{tg}(\varphi / \omega) \end{cases} \quad (4.10)$$

gdzie:

- X, R - reaktancja i rezystancja obwodu elektrycznego;
- ω - pulsacja prądu.

III. Parametry sześćciofluorku siarki zawartego w zbiorniku dolnym:

Równanie, sformułowane w oparciu o prawo zachowania energii, opisujące bilans energetyczny sześćciofluorku siarki zawartego w zbiorniku dolnym cylindra komory gaszeniowej opisuje następująca zależność:

$$dQ_2 = dU_2 + dL_2 \quad (4.11)$$

gdzie:

- dQ_2 - ciepło wymieniane z otoczeniem na skutek dopływu lub wypływu SF_6 do lub ze zbiornika dolnego cylindra;
 dU_2 - energia wewnętrzna SF_6 zawartego w zbiorniku dolnym;
 dL_2 - praca zewnętrzna;

Uwzględniając, że:

$$\begin{cases} dQ_2 = h_2 \cdot dm_2 \\ U_2 = u_2 \cdot m_2 \\ dL_2 = p_2 \cdot dV_2 \\ V_2 = B \cdot (l_2 - x) \\ dV_2 = -B \cdot dx \end{cases} \quad (4.12)$$

gdzie:

- h_2, u_2 - odpowiednio entalpia właściwa, energia wewnętrzna właściwa SF_6 zawartego w dolnym zbiorniku cylindra;
 m_2 - masa SF_6 zawartego w zbiorniku dolnym;
 V_2, l_2 - odpowiednio objętość, początkowa długość zbiornika dolnego.

Otrzymano:

$$h_2 \cdot dm_2 = du_2 \cdot m_2 + dm_2 \cdot u_2 + p_2 \cdot dV_2 \quad (4.13)$$

Entalpia właściwa oraz energia wewnętrzna właściwa wewnętrzna określone są następującymi wzorami:

$$\begin{cases} h_2 = c_p \cdot T_2 \\ u_2 = c_v \cdot T_2 \end{cases} \quad (4.14)$$

gdzie:

- c_V, c_P - odpowiednio ciepło właściwe SF_6 przy stałej objętości, stałym ciśnieniu
 T_2 - temperatura SF_6 zawartego w dolnym zbiorniku cylindra.

Wstawiając wzory (4.14) do (4.13) otrzymano:

$$c_p \cdot T_2 \cdot dm_2 = c_v \cdot (dT_2 \cdot m_2 + dm_2 \cdot T_2) + p_2 \cdot dV_2 \quad (4.15)$$

a uwzględniając że:

$$\begin{cases} c_v = \frac{R_G}{k-1} \\ c_p = \frac{k \cdot R_G}{k-1} \end{cases} \quad (4.16)$$

gdzie: R_G - stała gazowa SF_6

$$\frac{k \cdot R_G}{k-1} \cdot T_2 \cdot dm_2 = \frac{R_G}{k-1} \cdot (m_2 \cdot dT_2 + T_2 \cdot dm_2) + p_2 \cdot dV_2 \quad (4.17)$$

Równanie stanu gazu w postaci różniczkowej dla sześćciofluorku siarki zawartego w dolnym zbiorniku cylindra opisane jest wzorem:

$$m_2 \cdot dT_2 + T_2 \cdot dm_2 = \frac{1}{R_G} \cdot (p_2 \cdot dV_2 + V_2 \cdot dp_2) \quad (4.18)$$

Wstawiając ten wzór do równania (4.17) otrzymano:

$$\frac{k \cdot R_G}{k-1} \cdot T_2 \cdot dm_2 = \frac{R_G}{k-1} \cdot \frac{1}{R_G} \cdot (p_2 \cdot dV_2 + V_2 \cdot dp_2) + p_2 \cdot dV_2 \quad (4.19)$$

a po prostych przekształceniach:

$$k \cdot R_G \cdot T_2 \cdot dm_2 = V_2 \cdot dp_2 + k \cdot p_2 \cdot dV_2 \quad (4.20)$$

Przekształcając dalej:

$$dp_2 = -p_2 \cdot \frac{dV_2}{V_2} \cdot k + \frac{k \cdot R_G \cdot T_2}{V_2} \cdot dm_2 \quad (4.21)$$

a uwzględniając ponadto, że:

$$T_2 = \frac{p_2}{R_G \cdot \rho_2} \quad (4.22)$$

gdzie:

ρ_2 - gęstość SF₆ w zbiorniku dolnym cylindra.

uzyskano:

$$dp_2 = -p_2 \cdot \frac{dV_2}{V_2} \cdot k + \frac{k \cdot p_2}{\rho_2 \cdot V_2} dm_2 \quad (4.23)$$

Zgodnie z prawem zachowania masy można napisać, iż:

$$dm_2 = m_{w2} \cdot dt \quad (4.24)$$

gdzie:

m_{w2} - suma całkowitego natężenie wypływu SF₆ ze zbiornika dolnego cylindra oraz dopływu SF₆ do tego zbiornika;

Wstawiając równanie (4.24) do (4.23) otrzymano:

$$\frac{dp_2}{dt} = -p_2 \cdot k \cdot \frac{1}{V_2} \cdot \frac{dV_2}{dt} + \frac{k \cdot p_2}{V_2 \cdot \rho_2} \cdot m_{w2} \quad (4.25)$$

a po wykorzystaniu dwóch ostatnich wzorów z układu (4.12) ostatecznie uzyskano następującą zależność:

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{k \cdot p_2}{l - x} \left(v_x + \frac{m_{w2}}{B \cdot \rho_2} \right) \quad (4.26)$$

Gęstość SF₆ w dolnym zbiorniku cylindra jest zdefiniowana za pomocą następującego wzoru:

$$\rho_2 = \frac{m_2}{V_2} \quad (4.27)$$

a po zróżniczkowaniu względem czasu:

$$\frac{d\rho_2}{dt} = \frac{1}{V_2^2} \cdot \left(V_2 \cdot \frac{dm_2}{dt} - m_2 \cdot \frac{dV_2}{dt} \right) \quad (4.28)$$

Wstawiając do ostatniej zależności wzory (4.24), (4.27) i ostatni wzór z układu (412) otrzymano:

$$\frac{d\rho_2}{dt} = \frac{1}{V_2^2} \cdot \left(V_2 \cdot m_{w2} - V_2 \cdot \rho_2 \cdot B \cdot \frac{dx}{dt} \right) \quad (4.29)$$

a po prostych przekształceniach:

$$\frac{d\rho_2}{dt} = \frac{1}{l_2 - x} \cdot \left(-v_x \cdot \rho_2 + \frac{m_{w2}}{B} \right) \quad (4.30)$$

Całkowite natężenie przepływu SF₆ (czyli dopływu i odpływu gazu) w zbiorniku dolnym określa następująca zależność:

$$m_{w2} = m_{dg} - m_{gd} - m_{nd} \quad (4.31)$$

gdzie:

- m_{dg} - natężenie wypływu SF₆ ze zbiornika górnego do zbiornika dolnego cylindra;
- m_{gd} - natężenie wypływu SF₆ ze zbiornika dolnego do zbiornika górnego cylindra;
- m_{nd} - natężenie wypływu SF₆ ze zbiornika dolnego do bieguna wyłącznika.

Natężenie przepływu określa ogólny wzór w następującej postaci:

$$m_w = A \cdot f_n \cdot \sqrt{p_s \cdot \rho_s} \quad (4.32)$$

gdzie:

- A - powierzchnia przepływu sześćfluorku siarki;
- f_n - funkcja natężenia przepływu;
- p_s, ρ_s - parametry spiętrzenia sześćfluorku siarki; odpowiednio ciśnienie, gęstość.

Uwzględniając powyższy wzór równanie (4.31) przekształci się do następującej postaci:

$$m_{w2} = f_{dg} \cdot A_g \cdot \sqrt{p_1 \cdot \rho_1} - f_{gd} \cdot A_g \cdot \sqrt{p_2 \cdot \rho_2} - f_{nd} \cdot A_d \cdot \sqrt{p_2 \cdot \rho_2} \quad (4.33)$$

gdzie:

- | | |
|--------------------------|---|
| f_{dg}, f_{gd}, f_{nd} | - funkcje natężenia przepływu SF ₆ odpowiednio: ze zbiornika górnego do dolnego, ze zbiornika dolnego do górnego przez zawór cylindra; ze zbiornika dolnego do bieguny wyłącznika przez zawór tłoka; |
| A_g, A_d | - powierzchnia przepływu gazu odpowiednio przez zawór górny, dolny. |

Wzory opisujące powierzchnię przepływu gazu przez zawór górny i zawór dolny oraz funkcje przepływu zostały wyprowadzone w Załączniku Z1 do niniejszego opracowania; przedstawiają je następujące układy równań:

- powierzchnię przepływu gazu przez zawór górny:

$$A_g = \begin{cases} z_g \cdot Y_g & \text{dla } A_g < A_{go} \\ A_{go} & \text{dla } A_g \geq A_{go} \end{cases} \quad (4.34)$$

przy czym:

$$\begin{cases} \frac{dv_g}{dt} = \frac{\Sigma F_g(x,t)}{M_{zg}} \\ \frac{dz_g}{dt} = v_g \end{cases} \quad (4.35)$$

gdzie:

- | | |
|-------------------|--|
| A_{go} | - całkowita powierzchnia otworu zaworu cylindra; |
| Y_g | - obwód otworu zaworu cylindra; |
| z_g | - droga pokrywy zaworu cylindra; |
| v_g | - prędkość pokrywy zaworu cylindra; |
| $\Sigma F_g(x,t)$ | - suma sił działających na pokrywę zaworu cylindra ⁴⁰ |
| M_{zg} | - masa pokrywy zaworu cylindra; |

⁴⁰ Wzór opisujący sumę sił działających na pokrywę zaworu cylindra został wyprowadzony w Załączniku Z1 do niniejszego opracowania.

- powierzchnię przepływu gazu przez zawór dolny:

$$A_d = \begin{cases} z_d \cdot Y_d & \text{dla } A_d < A_{do} \\ A_{do} & \text{dla } A_d \geq A_{do} \end{cases} \quad (4.36)$$

przy czym:

$$\begin{cases} \frac{dv_d}{dt} = \frac{\Sigma F_d(x,t)}{M_{zd}} \\ \frac{dz_d}{dt} = v_d \end{cases} \quad (4.37)$$

gdzie:

A_{do}	- całkowita powierzchnia otworu zaworu tłoka;
Y_d	- obwód otworu zaworu tłoka
z_d	- droga pokrywy zaworu tłoka;
v_g	- prędkość pokrywy zaworu tłoka;
$\Sigma F_d(x,t)$	- suma sił działających na pokrywę zaworu tłoka ⁴¹ ;
M_{zd}	- masa pokrywy zaworu tłoka;

- funkcje natężenia przepływu:

$$\begin{cases} f_{dg} = f_p\left(\frac{p_1}{p_2}\right) \cdot \mu_{dg} \cdot K_{21} \\ f_{gd} = f_p\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \cdot \mu_{gd} \cdot K_{12} \\ f_{dn} = f_p\left(\frac{p_N}{p_2}\right) \cdot \mu_{dn} \cdot K_{n2} \end{cases} \quad (4.38)$$

gdzie:

$f_p(p_1/p_2)$, $f_p(p_2/p_1)$, $f_p(p_N/p_2)$ - funkcje przepływu SF_6 zależne od relacji między ciśnieniem spiętrzenia a przeciwcisnieniem⁴²;

⁴¹ Wzór opisujący sumę sił działających na pokrywę zaworu tłoka został także wyprowadzony w Załączniku Z1 do niniejszego opracowania.

⁴² Wzór w postaci ogólnej opisujący funkcję przepływu sześciofluorku siarki został określony w Załączniku Z1 do niniejszego opracowania.

- $\mu_{dg}, \mu_{gd}, \mu_{dn}$ - współczynniki oporu przepływu sześćfluorku siarki
 ($\mu_{dg} = 0.6, \mu_{gd} = 0.8, \mu_{dn} = 0.8$);
- $K_{12}, K_{21}, K_{N2},$ - współczynniki kierunku przepływu zależne od relacji
 między ciśnieniem spiętrzenia a przeciwcisnieniem;

przy czym współczynnik kierunku przepływu SF_6 - K_{ps} opisuje ogólny wzór w następującej postaci:

$$K_{ps} = \begin{cases} 1 & \text{dla } p_s > p_p \\ 0 & \text{dla } p_p > p_s \end{cases} \quad (4.39)$$

gdzie:

- p_p - przeciwcisnienie (ciśnienie w zbiorniku, do którego odbywa się wypływ gazu).

Ostatecznie układ równań służący do wyznaczenia ciśnienia, gęstości, masy oraz natężenia przepływu sześćfluorku siarki zawartego w zbiorniku dolnym cylindra obejmuje następujące zależności opisujące:

- parametry termodynamiczne SF_6 - poniższy układ (4.40);

$$\begin{cases} \frac{dp_2}{dt} = \frac{k \cdot p_2}{l - x} \left(v_x + \frac{m_{w2}}{B \cdot \rho_2} \right) \\ \frac{d\rho_2}{dt} = \frac{1}{l_2 - x} \cdot \left(-v_x \cdot \rho_2 + \frac{m_{w2}}{B} \right) \\ \frac{dm_2}{dt} = m_{w2} \cdot dt \\ m_{w2} = f_{dg} \cdot A_g \cdot \sqrt{p_1 \cdot \rho_1} - f_{gd} \cdot A_g \cdot \sqrt{p_2 \cdot \rho_2} \\ \quad - f_{nd} \cdot A_d \cdot \sqrt{p_2 \cdot \rho_2} \end{cases} \quad (4.40)$$

- powierzchnię przepływu gazu przez zawór górny - zależności (4.34), (4.35);
- powierzchnię przepływu gazu przez zawór dolny - zależności (4.36), (4.37);
- funkcje natężenia przepływu i współczynniki kierunku przepływu – zależności (4.38), (4.39).

IV. Parametry sześćciofluorku siarki zawartego w zbiorniku górnym:

Bilans energetyczny dla sześćciofluorku zawartego w zbiorniku górnym cylindra komory gaszeniowej opisuje następujące równanie:

$$dQ_1 + dQ = dU_1 + dL_1 \quad (4.41)$$

gdzie:

- dQ_1 - ciepło wymieniane z otoczeniem na skutek dopływu lub wypływu SF_6 do lub ze zbiornika górnego cylindra;
- dQ - ciepło doprowadzane z łuku elektrycznego na skutek zjawiska termoeekspansji;
- dU_1 - energia wewnętrzna SF_6 zawartego w zbiorniku górnym;
- dL_1 - praca zewnętrzna

Uwzględniając, że:

$$\begin{cases} dQ_1 = h_1 \cdot dm_1 \\ U_1 = u_1 \cdot m_1 \\ dL_1 = p_1 \cdot dV_1 \\ V_1 = \text{const} \\ dV_1 = 0 \end{cases} \quad (4.42)$$

gdzie:

- h_1, u_1 - odpowiednio entalpia właściwa, energia wewnętrzna właściwa SF_6 zawartego w górnym zbiorniku cylindra;
- m_1 - masa SF_6 zawartego w górnym zbiorniku cylindra;
- V_1 - stała objętość zbiornika górnego cylindra.

Otrzymano:

$$h_1 \cdot dm_1 + dQ = du_1 \cdot m_1 + dm_1 \cdot u_1 \quad (4.43)$$

Entalpia właściwa oraz energia wewnętrzna właściwa wewnętrzna określone są następującymi wzorami:

$$\begin{cases} h_1 = c_p \cdot T_1 \\ u_1 = c_v \cdot T_1 \end{cases} \quad (4.44)$$

gdzie:

T_1 - temperatura SF_6 zawartego w górnym zbiorniku cylindra.

Wstawiając wzór (4.44) do zależności (4.43) otrzymano:

$$c_p \cdot T_1 \cdot dm_1 + dQ = c_v \cdot (dT_1 \cdot m_1 + dm_1 \cdot T_1) \quad (4.45)$$

a uwzględniając wzór (4.16):

$$\frac{k \cdot R_G}{k - 1} \cdot T_1 \cdot dm_1 + dQ = \frac{R_G}{k - 1} \cdot (m_1 \cdot dT_1 + T_1 \cdot dm_1) \quad (4.46)$$

Równanie stanu gazu w postaci różniczkowej dla sześćciofluorku siarki zawartego w górnym zbiorniku cylindra opisane jest wzorem:

$$m_1 \cdot dT_1 + T_1 \cdot dm_1 = \frac{1}{R_G} \cdot V_1 \cdot dp_1 \quad (4.47)$$

Wstawiając ten wzór do równania (4.46) otrzymano:

$$\frac{k \cdot R_G}{k - 1} \cdot T_1 \cdot dm_1 + dQ = \frac{R_G}{k - 1} \cdot \frac{1}{R_G} \cdot V_1 \cdot dp_1 \quad (4.48)$$

a po prostych przekształceniach:

$$k \cdot R_G \cdot T_1 \cdot dm_1 + (k - 1) \cdot dQ = V_1 \cdot dp_1 \quad (4.49)$$

Przekształcając dalej:

$$dp_1 = \frac{(k - 1)}{V_1} \cdot dQ + \frac{k \cdot R_G \cdot T_1}{V_1} \cdot dm_1 \quad (4.50)$$

Uwzględniając ponadto, że temperatura sześćsiofluorku siarki zawartego w górnym zbiorniku cylindra opisana jest następującym wzorem:

$$T_1 = \frac{p_1}{R \cdot \rho_1} \quad (4.51)$$

gdzie:

ρ_1 - gęstość SF_6 zawartego w górnym zbiorniku cylindra;

otrzymano:

$$dp_1 = \frac{(k-1)}{V_1} \cdot dQ + \frac{k \cdot p_1}{\rho_1 \cdot V_1} dm_1 \quad (4.52)$$

Zgodnie z prawem zachowania masy można napisać, iż:

$$dm_1 = m_{w1} \cdot dt \quad (4.53)$$

gdzie:

m_{w1} - suma całkowitego natężenie wypływu SF_6 z górnej części cylindra oraz natężenia dopływu SF_6 do górnej części cylindra.

Wstawiając równanie (4.53) do wzoru (4.52) otrzymano:

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{(k-1)}{V_1} \cdot \frac{dQ}{dt} + \frac{k \cdot p_1}{V_1 \cdot \rho_1} \cdot m_{w1} \quad (4.54)$$

Gęstość SF_6 zawartego w górnym zbiorniku opisuje następujący wzór:

$$\rho_1 = \frac{m_1}{V_1} \quad (4.55)$$

a po zróżniczkowaniu względem czasu i uwzględnieniu ponadto, iż objętość górnej części cylindra ma stałą wartość V_1 czyli jej pochodna jest równa zero $dV_1=0$:

$$\frac{d\rho_1}{dt} = \frac{1}{V_1} \cdot \frac{dm_1}{dt} \quad (4.56)$$

a wykorzystując wzór (4.55) otrzymano ostatecznie:

$$\frac{d\rho_1}{dt} = \frac{1}{V_1} \cdot m_{w1} \quad (4.57)$$

Całkowite natężenie przepływu SF₆ w zbiorniku górnym (czyli napływu i wypływu gazu) opisuje następujące równanie

$$m_{w1} = -m_{dg} + m_{gd} - m_{ng} - m_{np} \quad (4.58)$$

gdzie:

- m_{dg} - natężenie wypływu SF₆ ze zbiornika górnego do zbiornika dolnego cylindra;
- m_{gd} - natężenie napływu SF₆ ze zbiornika dolnego do zbiornika górnego cylindra;
- m_{ng} - natężenie wypływu SF₆ ze zbiornika górnego do bieguna wyłącznika przez dyszę główną;
- m_{np} - natężenie wypływu SF₆ ze zbiornika górnego do bieguna wyłącznika przez dyszę pomocniczą;

Uwzględniając zależność (4.32) opisującą ogólne równanie przepływu otrzymano:

$$m_{w1} = -f_{dg} \cdot A_g \cdot \sqrt{p_1 \cdot \rho_1} + f_{gd} \cdot A_g \cdot \sqrt{p_2 \cdot \rho_2} + (f_{ng} \cdot A_{gg} - f_{np} \cdot A_{gp}) \cdot \sqrt{p_1 \cdot \rho_1} \quad (4.59)$$

gdzie:

- $f_{dg}, f_{gd}, f_{ng}, f_{np}$ - funkcje natężenia przepływu SF₆ odpowiednio: ze zbiornika górnego do dolnego, ze zbiornika dolnego do górnego, ze zbiornika górnego przez dyszę główną do bieguna wyłącznika, ze zbiornika górnego przez dyszę pomocniczą do bieguna wyłącznika;
- A_{gg}, A_{gp} - powierzchnia przepływu sześćciofluorku siarki odpowiednio: przez dyszę główną, dyszę pomocniczą.

Funkcje natężenia przepływu SF₆ ze zbiornika górnego do dolnego cylindra oraz ze zbiornika dolnego do górnego cylindra opisują dwa pierwsze

wzoru z układu (4.38), natomiast funkcje natężenia przepływu sześćciofluorku siarki przez dyszę główną oraz dyszę pomocniczą opisują następujące zależności :

$$\begin{cases} f_{ng} = f_p \left(\frac{p^N}{p_1} \right) \cdot \mu_{ng} \cdot K_{n1} \\ f_{np} = f_p \left(\frac{p^N}{p_1} \right) \cdot \mu_{np} \cdot K_{n1} \end{cases} \quad (4.60)$$

dzie:

- $f_p(p_N/p_1)$ - funkcja przepływu SF_6 zależne od relacji między ciśnieniem spiętrzenia a przeciwcisnieniem
- μ_{ng}, μ_{np} - współczynniki oporu przepływu sześćciofluorku siarki przez dyszę główną i dyszę pomocniczą ($\mu_{ng} = 0.9 \div 0.95$, $\mu_{np} = 0.55 \div 0.6$);
- K_{N1} - współczynnik kierunku przepływu zależne od relacji między ciśnieniem spiętrzenia a przeciwcisnieniem - wzór (4.39);

Jeśli równanie (4.47) stanu gazu dla sześćciofluorku siarki zawartego w górnej części cylindra pomnożyć obustronnie przez czynnik $(1/dt \cdot m_1)$ to otrzymamy następującą zależność:

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{V_1}{m_1 \cdot R_G} \cdot \frac{dp_1}{dt} - \frac{T_1}{m_1} \cdot \frac{dm_1}{dt} \quad (4.61)$$

a uwzględniając, iż $(\rho_1 \cdot R_G = p_1 T_1)$ oraz zależność $m_1 = \rho_1 V_1$ uzyskano:

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{T_1}{p_1} \cdot \frac{dp_1}{dt} - \frac{T_1}{\rho_1 \cdot V_1} \cdot \frac{dm_1}{dt} \quad (4.62)$$

Wstawiając do wzoru (4.61) równanie (4.54) otrzymano:

$$\frac{dT_1}{dt} = T_1 \cdot \left[\frac{1}{p_1} \left(\frac{(k-1)}{V_1} \cdot dQ + \frac{k \cdot p_1}{\rho_1 \cdot V_1} dm_1 \right) - \frac{1}{\rho_1 \cdot V_1} \cdot \frac{dm_1}{dt} \right] \quad (4.63)$$

a dokonując prostych przekształceń:

$$\frac{dT_1}{dt} = T_1 \cdot \left[\frac{(k-1)}{p_1 \cdot V_1} \cdot \frac{dQ}{dt} + \frac{k}{V_1 \cdot \rho_1} \frac{dm_1}{dt} - \frac{1}{\rho_1 \cdot V_1} \cdot \frac{dm_1}{dt} \right] \quad (4.64)$$

przekształcając dalej otrzymano ostatecznie:

$$\frac{dT_1}{dt} = T_1 \cdot \frac{(k-1)}{V_1} \left[\frac{1}{p_1} \cdot \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{\rho_1} \frac{dm_1}{dt} \right] \quad (4.65)$$

Ostatecznie układ równań służący do wyznaczenia ciśnienia, gęstości, masy, temperatury oraz natężenie przepływu sześćfluorku siarki zawartego w zbiorniku górnym cylindra⁴³ obejmuje następujące zależności opisujące:

- parametry termodynamiczne SF₆ - poniższy układ (4.66)

$$\begin{cases} \frac{dp_1}{dt} = \frac{(k-1)}{V_1^2} \cdot \frac{dQ}{dt} + \frac{k \cdot p_1}{V_1 \cdot \rho_1} \cdot m_{w1} \\ \frac{dm_1}{dt} = m_{w1} \\ \frac{d\rho_1}{dt} = \frac{1}{V_1} \cdot m_{w1} \\ \frac{dT_1}{dt} = T_1 \cdot \frac{(k-1)}{V_1} \left[\frac{1}{p_1} \cdot \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{\rho_1} \frac{dm_1}{dt} \right] \\ m_{w1} = -f_{dg} \cdot A_g \cdot \sqrt{p_1 \cdot \rho_1} + f_{gd} \cdot A_g \cdot \sqrt{p_2 \cdot \rho_2} + \\ \quad - (f_{ng} \cdot A_{gg} - f_{np} \cdot A_{gp}) \cdot \sqrt{p_1 \cdot \rho_1} \end{cases} \quad (4.66)$$

- powierzchnię przepływu gazu przez zawór górny - zależności (4.34), (4.35);
- funkcje natężenia przepływu i współczynnik kierunku przepływu - zależności (4.60) i (4.37).

V. Powierzchnię przepływu SF₆ przez układ dyszowy:

Formułując wzory opisujące powierzchnię przepływu sześćfluorku siarki przez układ dyszowy wyłącznika oparto się na wynikach analizy przeprowa-

⁴³

Dla zbiornika górnego, w przeciwieństwie do zbiornika dolnego celowo jest obliczyć temperaturę gazu, bowiem na skutek zjawiska termoeekspansji może ona znacznie zwiększyć swoją wartość.

dzanej w powyższym punkcie 4.2, w którym przedstawione zostały główne uwarunkowania stosowania metody symulacyjnej. Uwzględniono zatem, że:

- gaz wypływający z górnej części zbiornika sprężania dzieli się na dwie strugi płynące odpowiednio przez dyszę główną i dyszę pomocniczą;
- powierzchnia przepływu gazu w obu tych dyszach jest uzależniona od etapu działania komory gaszeniowej oraz fazy procesu wyłączania prądu;
- w przypadku, gdy w dyszy znajduje się kolumna łukowa, to powierzchnia przepływu gazu, zgodnie z wcześniej przyjętymi uproszczeniami, jest równa różnicy między przekrojem dyszy a powierzchnią przekroju kolumny łukowej.

W związku z tym równania opisujące powierzchnię przepływu przez dyszę główną i pomocniczą mają następującą postać:

$$A_{gg} = \begin{cases} A_N & \text{dla } x < x_p \\ A_G(x, t) - A_{AG}(x, t) & \text{dla } A_G(x) < A_{AG}(x, t) \\ 0 & \text{dla } A_G(x) = A_{AG}(x, t) \end{cases} \quad (4.67)$$

$$A_{gp} = \begin{cases} 0 & \text{dla } x < x_s \\ A_D(x, t) - A_{AD}(x, t) & \text{dla } A_D(x, t) < A_{AD}(x, t) \\ 0 & \text{dla } A_D(x, t) = A_{AD}(x, t) \end{cases} \quad (4.68)$$

gdzie:

- | | |
|------------------------------|---|
| $A_G(x, t), A_{AG}(x, t)$ | - powierzchnia przekroju odpowiednio: dyszy głównej pomocniczej (tzw. powierzchnia geometryczna uzależniona od wymiarów otworu wewnętrznego dyszy zmieniająca się w funkcji drogi styku ruchomego); |
| $A_{AG}(x, t), A_{AD}(x, t)$ | - powierzchnia przekroju kolumny łukowej odpowiednio w przekroju krytycznym dyszy głównej, pomocniczej; |
| A_N | - powierzchnia nieszczelności w dyszy głównej; |
| x_p | - droga styku ruchomego do zakończenia etapu przejściowego. |

VI. Powierzchnia przekroju kolumny łukowej oraz własności SF₆:

Ogólny wzór opisujący średnice kolumny łukowej w przekroju krytycznym dyszy głównej opisuje zależność (6). Analogiczne wzór można sformułować dla dyszy pomocniczej

$$AA = \left(\frac{l_u}{\rho(p) \cdot h(p) \cdot \sigma(p) \cdot u} \right)^{1/2} \cdot i(t) \quad (4.69)$$

Gęstość, przewodność entalpia właściwa SF₆ w kolumnie łukowej oraz prędkość przepływu gazu w przekroju krytycznym dyszy głównej są określone następującymi wzorami aproksymacyjnymi:

$$\sigma(p) = (315.7553 - 16.744 \cdot p_k) \cdot 10^6 \quad (4.70)$$

$$h(p) = [-2355.627 - 0.975 \cdot p_k + 105.4 \cdot \ln(p_k)] \quad (4.71)$$

$$\rho(p) = \frac{1}{(46.6634 \cdot 10^6 \cdot e^{-11 \cdot p_k})} \quad (4.72)$$

gdzie:

p_k - ciśnienie w przekroju krytycznym dyszy głównej i pomocniczej;

VII Równania opisujące energię doprowadzoną z kolumny łukowej do gazu zawartego w górnym zbiorniku sprężania.

Zgodnie z przyjętymi powyżej założeniami, formułując wzór opisujący energię dostarczaną z kolumny łukowej do gazu zawartego w górnym zbiorniku cylindra założono, że w przypadku gdy średnica kolumny łukowej jest mniejsza

od średnicy przekroju krytycznego dyszy głównej to wówczas zjawisko termoeleksansji nie występuje i wartość tej energii jest równa zero. W związku z tym energia dostarczana z łuku elektrycznego do gazu zawartego w górnym zbiorniku cylindra opisana jest następującym wzorem:

$$\frac{dQ}{dt} = f(A_A, A_{kg}) \cdot \xi \cdot \frac{l_{wg}(x) \cdot i^2}{A_A \cdot \sigma_A} \quad (4.73)$$

przy czym:

$$f(A_A, A_{kg}) = \begin{cases} 0 & \text{dla } A_A < A_{kg} \\ 1 & \text{dla } A_A = A_{kg} \end{cases} \quad (4.74)$$

gdzie:

- Q - energia wydzielająca się w kolumnie łukowej we wlotowej części dyszy;
- $l_{wg}(x)$ - długość wlotowej części dyszy;
- ξ - bezwymiarowy współczynnik określający część energii wydzielającej się w kolumnie łukowej we wlotowej części dyszy dostarczanej do gazu zawartego w górnej części cylindra w wyniku zjawiska termoeleksansji ⁴⁴.

11. PODSUMOWANIE

Podsumowując przeprowadzoną w poprzednich rozdziałach analizę działania wyłącznika trzeciej generacji, przy uwzględnieniu zjawiska ablacji, podczas charakterystycznych przypadków pracy łączeniowej wyłącznika w systemie elektroenergetycznym można sformułować następujące wnioski:

1. Działanie wyłącznika wysokonapięciowego z sześćciofluorkiem siarki nowej generacji jest całkowicie odmienne w porównaniu do pracy dotychczas powszechnie stosowanych wyłączników samosprężnych; przyczyną tego faktu jest budowa komory gaszeniowej, w której zastosowano cylinder podzielony na dwie części oraz dwa zawory. W wyłącznikach samo-

⁴⁴ Wartość tego współczynnika ξ jest uzależniona od budowy komory gaszeniowej i w związku tym zwykle jest wyznaczana na drodze eksperymentalnej [11].

sprężnych zjawisko termoeekspansji połączone ze zjawiskiem ablacji także występowało ale w takiej konstrukcji komory gaszeniowej oprócz pożądanego przyrostu ciśnienia powodowało także bardzo duży wzrost siły oporowej, a zatem powstawała konieczność stosowania napędów o bardzo dużej energii i w związku z tym w ogniwach układu kinematycznego występowały wysokie naprężenia mechaniczne co z kolei stwarzało konieczność stosowania cięgien napędowych o dużych przekrojach i masach.

2. Istnieje kilka różnych charakterystycznych przypadków działania wyłącznika nowej generacji, podczas których całkowicie odmiennie przebiega proces gaszenia łuku elektrycznego. Proces wyłączania prądu jest inny niż w komorze samosprężnej, ponieważ działanie komory gaszeniowej jest bardziej złożone, ze względu na budowę oraz bezpośrednio oddziaływanie wartości wyłączanego prądu (także czasu łukowego) na działanie elementów komory.
3. Podczas wyłączania prądów roboczych, gdy wyłączane jest obciążenie lub dokonywane są przełączenia mające na celu zmianę konfiguracji sieci elektro-energetycznej, gdy wyłączane są prądy o wartościach zbliżonych do znamionowego prądu ciągłego wyłącznika (czyli z zakresu 1000-4000 A), wyłącznik nowej generacji działa jak klasyczny wyłącznik samosprężny; istnieje jednak jedna bardzo istotna różnica spowodowana budową komory gaszeniowej; podczas wyłączania małych prądów rzędu 1000-4000A gdy średnica kolumny łukowej jest zdecydowanie mniejsza od średnicy przekroju krytycznego dyszy głównej i gdy w związku z tym nie występuje znaczące ograniczenie powierzchni przepływu gazu przez układ dyszowy ani także zjawisko termoeekspansji, gdy zatem jedynym źródłem przyrostu ciśnienia sześćciofluorku siarki jest praca napędu, osiągane są zdecydowanie niższe wartości ciśnienia spiętrzenia, przyczyną tego są dwa następujące fakty:
 - górna część cylindra ma stałą objętość o wartości nieznacznie mniejszej od wartości objętości zbiornika dolnego, a zatem nie możliwe jest uzyskanie wysokiego stopnia sprężenia gazu,
 - prędkość styków ruchomych, a w związku z tym także szybkość zmian objętości zbiornika sprężania są mniejsze niż w klasycznym wyłączniku samosprężnym;

należy jednak podkreślić, że uzyskany przyrost ciśnienia jest wystarczający do wyłączenia prądów roboczych.

4. Podczas wyłączania prądów zwarciovych z zakresu około 0.1-0.4 znamionowego zwarciovego prądu wyłączalnego wyłącznik nowej generacji działa także jak klasyczny wyłącznik samosprężny, istotne różnice między tym przypadkiem działania wyłącznika a wyłączaniem prądu roboczego wynikają ze zmiany warunków przepływu gazu przez układ dyszowy, w tym przypadku bowiem gdy wyłączane są prądy rzędu 4000-15000 A kolumna łukowa znacząco ogranicza powierzchnię przepływu gazu przez dyszę główną i pomocniczą (przy większych wartościach prądu powyżej około 10000 A następuje całkowite zablokowanie przepływu sześćiofluorku siarki przez dyszę pomocniczą) a także występuje intensywne parowanie - ablacja materiału z wewnętrznych ścianek dyszy głównej oraz specjalnie ukształtowanej izolacyjnej osłony styku ruchomego opalnego wykonanych z politetra-fluoroetyleny (PTFE) domieszkowanego związkami nieorganicznymi (głównie grafitem oraz tlenkiem aluminium); oba te czynniki powodują znaczący przyrost ciśnienia spiętrzenia, wartość przyrostu ciśnienia jest zatem zdecydowanie większy niż w przypadku wyłączania prądów roboczych.
5. Podczas wyłączania dużych prądów zwarciovych o wartościach przekraczających 15000 A, występuje zjawisko termoeleksansji, które całkowicie zmienia przebieg procesu wyłączania prądu; część energii wydzielającej się w kolumnie łukowej przekazywana jest do gazu zawartego w górnej części cylindra, właśnie ta energia stanowi główne źródło przyrostu ciśnienia spiętrzenia, który dla największych prądów rzędu 25000-31500 A osiąga wartość większą niż 2.0 MPa; dodatkowo na skutek działania zaworu cylindra a także zablokowania przepływu przez układ dyszowy gaz o tak wysokim ciśnieniu jest "magazynowany" w zbiorniku sprężania przez znaczną część półfali prądu i w związku z tym w okolicach zera prądu wywoływany jest w układzie dyszowym przepływ sześćiofluorku siarki o bardzo dużym natężeniu, co powoduje bardzo intensywne chłodzenie kolumny łukowej.
6. Wyłączanie prądu przez wysokonapięciowy wyłącznik z sześćiofluorkiem siarki trzeciej generacji jest złożonym procesem, odbywającym się w kolejnych etapach, którym towarzyszą różnorodne i wzajemnie powiązane zjawiska fizyczne. Przebieg jednej fazy wyłączania może mieć istotny wpływ na kolejną fazę zwłaszcza w przypadku gdy wystąpi zjawisko termoeleksansji, któremu towarzyszy intensywna ablacja materiałów izolacyjnych dyszy głównej i osłony izolacyjnej styku ruchomego opalnego.
7. Intensywność ablacji materiałów izolacyjnych jest uzależniona od kształtu a przede wszystkim od wartości prądu wyłączanego przez wyłącznik oraz

od kształtów i wymiarów układów stykowego i dyszowego komory gaszeniowej wyłącznika.

8. Ablacja materiałów izolacyjnych powoduje znaczący lokalny wzrost ciśnienia gazu, który jest jedną z przyczyn powstania przepływu wstecznego; przepływ wsteczny umożliwia dostarczenia części energii wydzielającej się w łuku do komory gaszeniowej co zapoczątkowuje zjawisko termoeekspansji.
9. Ablacja materiałów występuje także przy mniejszych wartościach wyłączanego prądu (dotyczy to zwłaszcza specjalnej osłony styku ruchomego opalnego); w tym przypadku nie następuje całkowite zablokowanie przepływu gazu ale jedynie ograniczenie powierzchni jego przepływu, także nieznaczny lokalny wzrost ciśnienia, a w związku z tym ulega zmniejszeniu natężenie przepływu gazu czyli ostatecznie, zgodnie z prawem zachowania energii, wzrost ciśnienia sześćiofluorku siarki zawartego w zbiorniku sprężania.
10. Ablacja ma największy wpływ na proces wyłączania prądu w przypadku wyłączania dużych prądów przekraczających 40% znamionowego prądu wyłączalnego wyłącznika. Należy jednak podkreślić iż wpływ zjawiska ablacji i połączonego z nim nierozzerwalnie zjawiska termoeekspansji na przebieg procesu wyłączanego prądu może odbywać się odmiennie w różnych komorach gaszeniowych ze względu na różnice w konstrukcji elementów komory ich wymiarach oraz zastosowanych materiałach.
11. Wyłącznik trzeciej generacji dzięki bardzo dobrym własnościom dielektrycznym gazu oraz możliwości uzyskania bardzo równomiernego rozkładu pola elektrycznego a także laminarnego przepływu bez obszarów o lokalnym obniżeniu wartości gęstości sześćiofluorku siarki jest wyłącznikiem o bardzo niskim prawdopodobieństwie wystąpienia ponownego zapłonu, co jest szczególnie istotne przy łączeniu nieobciążonych linii długich i baterii kondensatorów.
12. Niski stopień sprężenia gazu podczas łączenia prądów o małej wartości, oraz zwarta i stabilna kolumna łukowa cechująca się niskim i praktycznie stałym napięciem łuku, powodują iż podczas wyłączania obwodów indukcyjnych nie występuje zjawisko zrywania prądu, które jest przyczyną bardzo groźnych, dla izolacji urządzeń elektroenergetycznych, przepięć.
13. Budowa komory gaszeniowej powoduje, że wysokonapięciowy wyłącznik z sześćiofluorkiem siarki "przystosowuje się" do warunków pracy: w związku z tym może być on wyposażony w napęd o znacznie mniejszej energii niż napędy wyłączników samosprężnych; można powiedzieć iż praktycznie cała

energia napędu wykorzystywana jest do nadania energii kinetycznej częścią ruchomym wyłącznika, natomiast zbiornik sprężania pełni rolę amortyzatora; powyższy fakt umożliwia stosowanie w wyłączniku nowej generacji prostych w konstrukcji, sprawdzonych w wieloletniej eksploatacji zasobnikowych napędów sprężynowych, co ma wpływ na poprawę niezawodności działania wyłącznika; należy podkreślić również, iż dzięki zastosowaniu dwóch zaworów działanie mechaniczne wyłącznika jest praktycznie niezależne od wartości wyłączanego prądu, a w związku z tym w ogniwach układu kinematycznego występują naprężenia o jednakowych wartościach, a także praktycznie nie zmienia się przebieg drogi i prędkości styku ruchomego, co ułatwia amortyzację i w związku z tym można uzyskać bardzo dużą trwałość mechaniczną.

14. Podstawowy wpływ na prawidłowe działanie wyłącznika ma wzajemne dopasowanie funkcjonowania jego wszystkich podzespołów, zmiana wymiary jednego elementu pociąga za sobą konieczność dopasowania wielu pozostałych; w związku z tym proces optymalizacji komory gaszeniowej musi obejmować wszystkie jej elementy (bowiem na przebieg procesu wyłączania prądu istotny wpływ mają wymiary układu dyszowego, stykowego, cylindra zwłaszcza zbiornika górnego oraz działanie obu zaworów powierzchni ich otworów a także czas działania); do tego celu wyjątkowo przydatne są zatem obliczeniowe metody symulujące działanie wyłącznika we wszystkich jego charakterystycznych przypadkach pracy;
15. Istnieją obecnie dwie różne metody obliczeniowe symulujące działanie wyłącznika trzeciej generacji, w których uwzględnia się wpływ ablacji na proces wyłączania prądu:
 - obliczenia służące do wyznaczenia parametrów przepływu sześćciofluorku siarki przez układ dyszowy komory gaszeniowej, podczas których wyznaczany jest rozkład parametrów sześćciofluorku siarki w układzie dyszowym wyłącznika przy uwzględnieniu obecności łuku elektrycznego⁴⁵,
 - obliczenia symulujące działanie wyłącznika podczas wyłączania prądów roboczych i zwarciovych, podczas których wyznaczane są wielkości termodynamiczne sześćciofluorku w komorze gaszeniowej oraz wielkości mechaniczne opisujące ruch styku ruchomego oraz działanie napędu, wpływ ablacji uwzględnia się obliczając lokalny wzrost ciśnienia w przekroju krytycznym dyszy głównej oraz w otworze

⁴⁵ Wykonanie obliczeń mających na celu wyznaczenie parametrów przepływu sześćciofluorku siarki w układzie dyszowym praktycznie jest możliwe jedynie wówczas jeśli zostanie zakupiony komputerowy program komercyjny służący do rozwiązywania równań dynamiki gazów.

wewnętrznym osłony styku ruchomego opalnego a następnie określa się zmianę warunków przepływu gazu, czego konsekwencją jest zmniejszenie natężenia wypływu sześćciofluorku siarki ze zbiornika sprężania.

16. Metoda obliczeniowa symulująca działanie wyłącznika nowej generacji zaprezentowana w niniejszym opracowaniu okazała się poprawnie sformułowana o czym świadczą wyniki obliczeń jak również rezultaty eksperymentów.
17. Dokładność tej metody zależy od dwóch czynników:
 - precyzyjnego opisu poszczególnych zjawisk fizycznych oraz działania poszczególnych elementów komory gaszeniowej i napędu - powinna być zatem ściśle związana z konkretnym rozwiązaniem konstrukcyjnym wyłącznika .
 - wyznaczenia w badaniach laboratoryjnych niezbędnych współczynników zwłaszcza związanych z zależnościami opisującymi łuk elektryczny (np. średnicę, energię dostarczaną do gazu).
18. Metoda symulacyjna prezentowana w niniejszej pracy okazała się szczególnie przydatna do określania czynników decydujących o przebiegu procesu wyłączania prądu w wyłączniku nowej generacji, którego działanie jest bardzo złożone. W związku z tym stosowanie metody symulacyjnej umożliwia znaczne ograniczenie liczby badań laboratoryjnych, które są bardzo złożone i kosztowne zwłaszcza jeśli dotyczą rzeczywistych wyłączników.
19. Metoda symulacyjna (zwłaszcza gdy w badaniach modelowych określono współczynniki równań opisujących łuk elektryczny) jest bardzo przydatna w pracach mających na celu optymalizację wyłącznika.
20. Metoda symulacyjna umożliwia odwzorowanie stanów awaryjnych wyłącznika np.:
 - nie wyłączenie prądu;
 - pracę przy zbyt małej energii napędu;
 - wyłączanie prądu przy niskiej wartości ciśnienia.
21. Wykorzystując metodę symulacyjną sformułowano następujące wnioski dotyczące roli jaką pełni napęd w wyłączniku nowej generacji:
 - w wyłączniku nowej generacji w przeciwieństwie do wyłącznika samosprężnego decydującym czynnikiem o przyroście ciśnienia w komorze gaszeniowej jest zjawisko samogeneracji wywołane przez termoeekspansję i ablację materiału izolacyjnego a nie sprężanie gazu wywołane pracą napędu;
 - napęd odgrywa istotną rolę w procesie wytwarzania ciśnienia, gdy wyłączane są prądy o mniejszej wartości (pojemnościowe, indukcyjne robocze i małe prądy zwarciove) gdyż wówczas termoeekspansja nie

występuje; jednakże i w tym przypadku ze względu na budowę komory gaszeniowej, w której znajduje się zbiornik o stałej objętość, przyrost ciśnienia wywołany pracą napędu ma mniejszą wartość, a przebieg jest mniej stromy w porównaniu do wyłącznika samosprężnego;

- zdecydowane zwiększenie energii napędu nie wpływa znacząco na wzrost ciśnienia SF₆ ze względu na budowę cylindra podzielonego na dwie części i wyposażonego w dwa zawory;
- zastosowanie w tłoku zaworu dolnego powoduje zdecydowanie obniżenie siły oporowej (proporcjonalnej do siły parcia sześćciufluorku siarki na powierzchnię tłoka) obciążającej napęd, wzrasta ona bowiem do pewnej wartości wraz z wartością wyłączanego prądu, ale po przekroczeniu przez prąd wartości około 12-16 kA pozostaje praktycznie bez zmian co jest oczywiście związane z pracą zaworów; w związku z tym:
 - o w wyłączniku nowej generacji w porównaniu do wyłącznika samosprężnego napęd ma zdecydowanie mniejszą energię, co powoduje bardzo istotne zmniejszenie sił występujących we wszystkich ogniwach układu kinematycznego, co umożliwia zmniejszenie ich przekrojów a tym samym mas i w związku z tym możliwa jest poprawa niezawodności wyłącznika;
 - o oddziaływanie między komorą i napędem w wyłączniku nowej generacji jest zdecydowanie mniejsze niż w wyłączniku samosprężnym, w związku z tym w przypadku optymalizacji wyłącznika konieczne jest bardzo staranne dobranie wymiarów komory gaszeniowej;
 - o przebieg siły oporowej, który nie różni się zdecydowanie podczas pracy wyłącznika w różnych warunkach łączeniowych, ułatwia dobranie amortyzatorów, co ma także bardzo istotny wpływ na trwałość i niezawodność wyłącznika.

(jeśli podczas wyłączania prądu, niezależnie od jego wartości i kształtu a także wartości czasu łukowego, komora gaszeniowa w jednakowy sposób oddziałuje na układ napędowy, to wówczas zdecydowanie łatwiej można dobrać odpowiednie amortyzatory, które w ostatniej fazie ruchu styku ruchomego pochłaniają nadmiar energii nagromadzonej w siłowniku napędu - ma to bardzo duży wpływ na poprawę trwałości mechanicznej wyłącznika a tym samym na jego niezawodność): trwałości łączeniowej i mechanicznej, niezawodności, odporności na wpływy środowiska, braku wpływu na środowisko; łatwiej i ograniczonej do minimum obsługi, możliwości pracy w zdalnie

sterowanych automatycznych systemach, możliwości stosowania monitoringu. Użytkownicy wyłączników zwracają także uwagę na rodzaj oraz rozwiązanie konstrukcyjne napędu. Związane to jest z wynikami międzynarodowych ankiet poświęconych określeniu przyczyn powstawania uszkodzeń wyłączników, z których wynika, iż zmniejszenie energii napędu i uproszczenie jego budowy ma podstawowy wpływ na podniesienie niezawodności i wydłużenie czasu eksploatacji wyłącznika.

LITERATURA

1. Aeschbach B. i inni: Diagnostic tools and computer simulations for the development of SF₆ circuit-breakers. CIGRE Session Paryż 1984, 13-02.
2. Airey D.R.: Simple convection-loss dominated model for optically thick SF₆ arcs. Proceedings of IEE Vol 125, Nr 8, 1978, str. 770-5.
3. Arita H. i inni: Interruption ability of a self-extinguishing type gas circuit-breaker. IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 5, Nr 3, 1989, str. 1362-69.
4. Ali S.M.G. i inni: High power short studies on a commercial 420 kV 60 kA puffer circuit-breaker. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-104, Nr 2, 1985, str. 459-66.
5. Barrault M. i inni: The auto-expansion circuit-breaking principle at high voltage - A new approach to weight reduction and reliability. CIGRE Session Paryż 1990, 13-302.
6. Beier H.: The new Siemens F circuit-breaker H 912. Siemens Review. Vol. XXXVI 1969. Special Issue: Siemens High-voltage SF₆ Circuit-breakers.
7. Bernard G. i inni: An SF₆ autoexpansion breaker: the correlation between magnetic arc control and critical current. IEEE Transaction on Power Delivery Vol. 5, Nr 1, 1990, str. 195-200.
8. Bitsch R.: Prüfung des Schaltvermögens das Siemens BK Shalter für 123 bis 170 kV. Siemens Z. Jg 551, Nr 4, 1977, str. 269-72.
9. Blatter J. i inni: Arc modelling application to high voltage circuit-breaker development. CIGRE Session Paryż 1994, 13-102.
10. Blower B.W.: Factors in the design of sulphur-hexafluoride switchgear for distribution system. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-103, Nr 9, 1984, str. 2753-61.
11. Brand K.P. i inni: Dielectric recovery of an axially blown SF₆ arcs after current zero. Part III: Comparison of experiment and theory. IEEE Transactions on Plasma Science Vol. PS-10, Nr 3, 1982, str. 162-72.
12. Campbell L.C.: Nozzle pressure ratio effects in SF₆ interrupters. Third International Symposium. Switching Arc Phenomena Łódź 1987.

13. Campbell L.C., Dallachy F.: Determination of interrupter performance with the oneself nozzle clogging. IEE Nr 182, 1979, str. 60-3.
14. Campbell L.C.: Nozzle clogging and its effect on the current zero region. Fourth International Symposium. Switching Arc Phenomena Łódź 1981, str. 189-94.
15. Claessens M. i inni: Progress in modelling of circuit-breaker arcs considering gas flow interaction. CIGRE Session Paryż 1994, 13-108.
16. Claessens M. i inni: Progress in circuit-breaker modelling with respect to ablation controlled arcs, pressure build-up and performance limit. CIGRE Session Paryż 1994, 13-112.
17. Chan S.K. i inni: Integral methods of analysing electric arcs: III. Shape-factor correlation for low radiation and laminar flow. Journal Physics D. Appl. Phys. Vol. 9, 1976, str. 1085-89.
18. Chervy B., Raid H. i Glezeis A.: Calculation of the interruption capability of SF_6 / CF_4 and SF_6 / C_2F_6 mixtures - Part I: Plasma Properties. IEEE Transaction on Plasma Science, Vol. 24, 1996, str. 210-217.
19. Chervy B., Gonzales J.J. i Glezeis A. : Calculation of the interruption capability of SF_6 / CF_4 and SF_6 / C_2F_6 mixtures - Part II: Arc Decay Modeling, IEEE Transaction on Plasma Science, Vol. 24, 1996, str. 198-206.
20. Christophorou L.G. i Van Brunt R.J: SF_6 / N_2 mixtures, basic and HV properties. IEEE Transaction Dielectrics Electrical Insulating, Vol. 2, 1995, str. 952-1003.
21. Christophorou L.G., Olthoff J.K., Green D.S.: Gases for electrical insulation and interruption: possible present and future alternative to pure SF_6 , USA National Institute of Standards and Technology, 1997.
22. CIGRE WG 13-01: Practical application of arc physics in circuit breakers. Survey of calculation method and application guide. Electra Nr 118, 1989, str. 65-79.
23. CIGRE WG 13-01: Applications of black box modelling to circuit-breakers. Electra Nr 149, 1993, str. 57-68.
24. CIGRE WG 13-04: Capacitive current switching - state of the art. Electra Nr 155, 1994.
25. CIGRE TF 13.00.1: Controlled Switching - A state of the art - Survey. Part I - Electra Nr 163 str. 65-97, 1995, Part II Electra Nr 164, 1996, str. 39-62.
26. CIGRE WG 23.10: SF_6 and the global atmosphere. Electra Nr 164, 1996, str. 121 -132.
27. CIGRE WG 13-04: Line -Charging Current Switching of HV Lines. Stresses and Testing. (Part 1 and 2). Technical Brochure, Paryż 1996.
28. CIGRE Task Force 23.10.01: SF_6 Recycling guide. Re-use of SF_6 gas in electrical power equipment final disposal. Electra, NR 173, 1997, str. 43-70.
29. CIGRE CE/SC 13 CC-03: Transient recovery voltage in medium volage networks. Technical Brochure, Ref: 134, Paryż, 1998.
30. CIGRE CE/SC 13/GT WG01: State of art of circuit-breaker modeling. Technical Brochure, Ref: 135, Paryż 1998.
31. Ciok Z.: Wymiana energii z łuku przez konwekcje z uwzględnieniem turbulencji. VII Sympozium Podstaw Teorii Wyładowań Elektrycznych w Gazach. Warszawa 1983, str. 115-28.
32. Ciok Z.: Przepływy gazów i cieczy w aparatach elektrycznych. W.P.W. Warszawa 1983.
33. Ciok Z.: Similarity criteria for model and real quenching chamber. IX Symposium on Electrical Discharges in Gases. Kazimierz Dolny 1985, str. 211-19.
34. Ciok Z.: Modele matematyczne łuku łączeniowego. PWN Warszawa 1987.

35. Ciok Z., Jankowicz S., Poniecki W.: Modelling and Investigation of Interaction Between Arc Energy and Operating Mechanism of GBC. CIGRE Session Paryż 1994, 13-106.
36. Cividjian G.A.: Arc energy conservation equation. Seventh International Conference. Switching Arc Phenomena Łódź 1993, str. 14-18.
37. Coweley M.D.: Integral methods of electric arcs: I. Formulation. Journal Physics D. Appl. Phys. Vol. 7, 1974, str. 2218-31.
38. Coweley M.D., Chan S.K.: Integral methods of electric arcs: II. Examples. Journal Physics D. Appl. Phys. Vol. 7, 1974, str. 2232-45.
39. Damstra G.C.: Special report for group 13 (Switching Equipment). CIGRE Session Paryż 1994, 13-00.
40. Damstra G.C., Janssen A.L.J.: 1994 CIGRE Session. General Report Group 13 Switching equipment. Electra Nr 158, 1995, str. 27-33.
41. Drebenstedt H., Rauschenbach W.: A simple model for the investigation of the thermodynamic process taking place in SF₆ puffer circuit-breaker. Fifth International Symposium. Switching Arc Phenomena Łódź 1985, str. 278-81.
42. Drebenstedt H. i inni: Support of development of high-voltage circuit-breakers by a mathematical breaker model. CIGRE Session Paryż 1986, 13-02.
43. Duforenet D.: 35 years of SF₆ high voltage power circuit-breakers. Gec Alsthom T&D Review Nr 1 1994, str. 4-14.
44. Edels H.: Properties of high pressure ultra high current arc. Eleventh international conference on phenomena in ionised gases. Praha 1973, str. 9-60.
45. Egorov V.G. i inni: Modelling of SF₆ puffer interrupters. CIGRE Session Paryż 1994, 13-105.
46. El-Akkari, Tuma D.T.: Simulations of transient and zero current behaviour of arcs stabilised by forced convection. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS - 96, Nr 6, 1977, str. 1784-8.
47. Elliker A. i inni: Recent evolution of SF₆ circuit-breakers and the impact on driving mechanism technology. CIGRE Session Paryż 1990, 13-303.
48. Euzhi W.: Interrupting characteristics analysis of puffer type circuit-breaker. Seventh International Conference. Switching Arc Phenomena Łódź 1993, str. 134-8.
49. Fang M.: Mathematical modelling of basic processes in axially-blown switching arcs. Sbornik Vysokeho Ucení Technického v Brne. Rocnik 1992, str. 65-90.
50. Frie W.: Berechnung der Gaszusammensetzung und der Materialfunktionen von SF₆. Zeitschrift für Physik Nr 201, 1967, str. 269-94.
51. Frind G., Rich J.: Recovery speed of axial flow gas blast interrupter, dependence on pressure and di/dt for air and SF₆. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-93, Nr 6, 1974, str. 1675-84.
52. Frind G. i inni: Current zero phenomena in orifice type gas blast interrupter. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-99, Nr 1, 1980, str. 268-78.
53. Frost L.S., Liebermann R.W.: Composition and transport properties and their use in a simplified enthalpy flow model. Proceedings of the IEEE Vol-59, Nr 4, 1971, str. 474-84.
54. Gajic Z.: Development and application of the mathematical model of switching arc driving mechanism interaction in SF₆ circuit-breakers. I Part: Modelling switching arc and SF₆ gas state. Energoinvest Technics-Science-Engineering Vol. 20, Nr 3, 1989.
55. Z. Gajic: Experience with puffer interrupter having full self - compensation of resulting gas pressure force generated by the electrical arc. CIGRE Session Paryż 1998, 13-103.

56. Gleizes A., Razafinimanana M. i Vacquie S.: Temperature variation in an SF_6/N_2 mixture arc plasma. *Revue Phys. Appl.*, Vol. 22, 1987, str. 1411-1417.
57. Guilloux C. i inni: Study Committee 13 Colloquium in Florianopolis (Brazil) September 1995. *Electra*, Nr 170, luty 1997, str. 7- 16.
58. Habdanek V., Knobloch H.: Procedure for the optimisation of SF_6 circuit-breakers. *ETEP* Vol. 2, Nr 5, 1992, str. 315-20.
59. Haginomori E. i inni: Recent progress in SF_6 gas circuit breaker technique. *Toshiba Review* Nr 117, 1978, str. 13-20.
60. Herman W. i inni: Wechselwirkung zwischen dem Schaltlichtbogen und der Stromung gas-formiger Löschmittel. *Brown Boveri Mitt.* Nr 4, 1974r, str. 130-34.
61. Herman W. i inni: Investigation on physical phenomena around current zero in HV gas blast breakers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. PAS-95, Nr 4, 1976, str. 1165-76.
62. Hermann W., Ragaller K.: Theoretical description of the current interruption in HV gas blast breakers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. PAS- 96, Nr 5, 1977, str. 1546-55.
63. Hertz W. i inni: Investigation of properties of SF_6 as an quenching medium. *Proceedings of the IEEE* Vol. 59 Nr 4, 1971, str. 485-92.
64. Hrabovsky M.: Theoretical model of processes influencing arc voltage in SF_6 puffer circuit-breakers. *Sixth International Conference Switching Arc Phenomena Łódź 1989*, str. 104-8.
65. Hofbauer W., Stechbarth J: Strategic tools-application for development of a 300 kV/50 kA GIS self-blast circuit-breaker. *CIGRE Session Paryż 1994*, 13-110.
66. Holmorgen H.V., Martin R.D.: Real gas equations for use in a SF_6 puffer interrupter analytical model. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. PAS-100, Nr 12, 1981, str. 4876-84.
67. Ibrahim E.Z.: The ablation dominated polymethylmethacrylate arc. *Journal Physics D. Appl. Phys.* Nr 13, 1980, str. 2045-65.
68. Ikeda H. i inni: Development of large-capacity, SF_6 gas interruption chamber and its application to GIS. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. PAS-103, Nr 10, 1984, str. 3038-43.
69. Ikeda H. i inni: Analyses of axial energy distribution in decaying arc of SF_6 gas circuit-breaker. *IEEE Transaction on Plasma Science* Vol. PS-14, Nr 4, 1986, str. 395-401.
70. Ishikawa M. i inni: Numerical study of delayed-zero-current interruption phenomena using transient analysis model for an arc in SF_6 flow (circuit-breakers). *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. PAS-103, Nr 12, 1984, str. 3561-68.
71. Jakob T. i inni: Selbstblasung, ein neues wirtschaftliches Schaltprinzip für SF_6 -Schalter. *Elektrizitätsverwertung Jg.* 52 Nr1/2, 1978, str. 10-11.
72. Jankowicz S., Sibilski H.: Metody gaszenia łuku we współczesnych wyłącznikach wysokiego napięcia z SF_6 . *Przegląd Elektrotechniczny* Nr 4, 1989, str 106-9.
73. Jankowicz S., Poniecki W.: Ocena współczesnych wyłączników średniego i wysokiego napięcia eksploatowanych w systemach energetycznych. Ocena przyszłych tendencji rozwojowych. *DT IEL/NAR 5600/97*.
74. Janssen A. i inni: Final report of the second enquiry on high voltage circuit-breakers failures and defects in service. Working Group 13.06. Technical Brochure. *CIGRE Paryż 1994*.

75. Janssen A.: 1996 CIGRE Session - General Report Group 13 (Switching Equipment). Electra Nr 170, 1997, str. 39 -42
76. Jones C.J. i inni: Recent development in theoretical modelling and monitoring techniques for high voltage circuit-breakers. CIGRE Session Paryż 1994, 13-109.
77. Jones G. R. i inni: Radiatively induced nozzle ablation in high-power circuit interrupters. IEEE Transactions on Plasma Science Vol. PS-14, Nr 4, 1986, str. 413-22.
78. Kieliszek A. i inni: Experimental investigation and numerical simulation of arcing phenomena in an SF₆ autopuffer circuit-breaker. Seventh International Conference. Switching Arc Phenomena Łódź 1993, str. 117-20.
79. Kirchesch P., Niemeyer L. : Arc behaviour in an ablation nozzle. Fifth International Symposium. Switching Arc Phenomena Łódź 1985, str. 39-43.
80. Knothe S.: Rozdzielnice wysokonapięciowe izolowane. WNT Warszawa 1976.
81. Kotulski Z, Poniecki W., Tucholski P.: Hybrydowa komora gaszeniowa z SF₆. DT IEL/NAR 5361/91.
82. Kotulski Z., Krzewiński A., Poniecki W., Tucholski P.: Analiza i badanie procesu wyłączania prądu przez komorę gaszeniową nowej generacji wyłącznika z SF₆. Model komory gaszeniowej. Badania w układzie modelowym. DT IEL/NAR 5408/92.
83. Kotulski Z., Poniecki W.: Badanie odporności materiałów izolacyjnych i stykowych w modelu komory gaszeniowej z SF₆ nowej generacji oraz rozpoznanie możliwości pomiaru ciśnienia gazu w komorze gaszeniowej. DT IEL/NAR 5440/93.
84. Knobloch H., Habedank U., Schramm H.: Durch neue Entwicklungs-verfahren zu leistungsfähigeren Hochspannungs-Schaltgeräten. Elektrizitätswirtschaft Jg 22, Nr 7, 1993, str. 324-330.
85. Kobayashi A. i inni: Measurement of voltage distribution phenomena in SF₆ single pressure circuit-breaker. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-97, Nr 4, 1978, str. 1304-1312.
86. Kogelschatz U. i inni: Optical measuring techniques as a diagnostic aid in circuit-breaker development. Brown Boveri Review Vol. 61, Nr 11, 1974, str. 488-93.
87. Kolaszewski A.: Badania optyczne obszaru łuku łączeniowego w powietrzu i SF₆. VII Sympozium Podstaw Teorii Wyładowań Elektrycznych w Gazach. Warszawa 1983 r.
88. Kovita P. Lowke J.J.: Theoretical predictions of ablation-stabilised arcs confined in cylindrical tubes. Journal Physics D. Appl. Phys. Nr 17, 1984, str. 1197-212.
89. Krenicky A. i inni: Recent investigations on arc in SF₆ gas blast breakers and application of the results to development of HV switchgear. World Electrotechnical Congress Moskwa 1977. Section 2 paper 74.
90. Kuromito A.: Factors affecting the arc interruption of SF₆ puffer type breakers. Proceedings of the Eight International Conference on Gas Discharges and Their Applications 1985, str. 61-4.
91. Kuwahara K. i inni: New approach to analysis of arc interruption capability by simulation employed in the development of SF₆ GCB series with high capacity interrupter. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-102, Nr 7, 1983, str. 2262-8.
92. Kuwahara K. i inni: Investigation of dielectric recovery characteristics of hot SF₆ gas after current interruption for developing new 300 kV and 550 kV gas circuit-breakers. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS 103, Nr 6, 1984, str. 1371-6
93. Lowke J.J., Ludwik H.C.: A simple model for high-current arcs stabilised by forced convection. Journal of Applied Physics Vol. 46, Nr 8, 1975, str. 3352-60.

94. Lowke J.J., Lee H.E.: A numerical study of two-dimensional circuit-breaker arc during current interruption. Proceedings of the Eight International Conference on Gas Discharges and Their Applications 1985, str. 54-6.
95. Lowke J.J.: Progress in arc theory. Sbornik Vysokeho Uceni Technickeho v Brne. Rocnik 1992, str. 11-30.
96. Louis S., Carl L.: Physical and thermodynamical properties of sulphur hexafluoride. Solid State Technology Nr 1, 1975, str. 35-8.
97. Mears W.H. i inni: Physical properties coefficients of sulphur hexafluoride. The Journal of Physical Chemistry Vol. 73, Nr 7, 1969, str. 2254-61.
98. Maksymiuk J.: Mechaniczna teoria łączników elektrycznych. WNT Warszawa 1967.
99. Maksymiuk J.: Aktualne problemy budowy i eksploatacji wyłączników wysokonapięciowych. Przegląd Elektrotechniczny Nr 3, 1998, str. 57- 63.
100. Meier R. i inni: Investigation of nozzle materials in SF₆ circuit breaker. IEEE Transaction on Plasma Science Vol. PS-14, 1986, str. 390-7.
101. Mitchell R.R. i inni: Transient two-dimensional calculations of properties of forced convection stabilised electric arc. IEEE Transactions on Plasma Science Vol. PS-13, Nr 4, 1985, str. 207-20.
102. Möller K. : Performance characteristics of SF₆ - Switchgear. CIGRE Study Committee 13 Tutorial. Florianopolis , Brazil, September, 1995.
103. Muller L.: Modelling of an ablation controlled arc. Journal of Applied Physics Vol. 26, 1993, str. 1253-58.
104. Muller L.: Ablation controlled arcs in nozzles of polymeric insulating materials. Seventh International Conference. Switching Arc Phenomena Łódź 1993, str. 126-30.
105. Muller W.: Single-phase and three phase encapsulation of SF₆ metalclad switchgear from 123 to 765 kV. Simens Review, Vol. 63, Nr 4, 1976, str. 212-8.
106. Nakanishi K. i inni: Small current interruption phenomena and recent progress of gas circuit-breakers. CIGRE Session Paryż 1988, 13-06.
107. Nakano S. i inni: Development of high-power puffer type gas circuit-breaker. Hitachi Review Nr 11, 1973, str. 444-51.
108. Nakanishi K. i inni: Analysis and application of interrupting arc and hot gas flow in SF₆ gas circuit-breaker. CIGRE Session Paryż 1994, 13-104.
109. Niemeyer L.: Evaporation dominated high current arcs in narrow channels. IEEE Transaction on Power Apparatus and System Vol. PAS-97, Nr 3, 1978, str. 950-8.
110. Nakamichi Y. i inni: Analysis of Electrical arc in AC-circuits. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol PAS-102, Nr 2, 1982, str. 581-92.
111. Natsui K. i inni : Nozzle clogging phenomena in puffer type gas circuit-breaker. Third International Symposium. Switching Arc Phenomena Łódź 1977, str. 172-6.
112. Natsui K. i inni: Experimental approach to one cycle puffer type SF₆ gas circuit-breaker. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-99, Nr 5, 1980, str. 923-30.
113. Natsui K. i inni : Interrupting characteristics of puffer and suction type SF₆ gas interrupter especially in thermal breakdown region. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-103, Nr 4, 1984, str. 803-10.
114. Nishikawa H.i inni: Arc extinction performance of SF₆ gas blast interrupter. IEEE Transac-tions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-95, Nr 6, 1976, str. 1123-34.

115. Noeske H.O.: Investigation of dynamic nozzle parameters for various nozzle geometry's and test conditions of an experimental half-size SF₆ puffer breaker. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-99, Nr 7, 1980.
116. Nowicki J.: Przepływ SF₆ w komorze gaszeniowej wyłącznika wysokiego napięcia w warunkach łuku o małej energii. Rozprawa Doktorska. Politechnika Warszawska, Instytut Wielkich Mocy I Wysokich Napięć 1996.
117. Okamoto M. i inni: Computer simulation of phenomena associated with hot gas in puffer type gas circuit-breakers. IEEE Transactions on Power Delivery Vol-6, Nr 2, 1991, str. 833-9.
118. Ozaki Y. i inni: Gas pressure of puffer-type breaker during current interruption. IEE Nr 182, 1979, str. 63-67.
119. Pasteau J.: CIGRE Session 1994. Discussion meeting summaries. Group 13 Switching equipment. Electra Nr 156, 1994, str. 31-3.
120. Pasteau J.: CIGRE Session 1996. Discussion meeting summaries. Group 13 Switching equipment. Electra Nr 168, 1996, str. 59.
121. Perkins J.P., Frost L.S.: Effect of nozzle parameters on SF₆ arc interruption. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-92, Nr 3, 1973, str. 961-70.
122. Piechocki A., Poniecki W.: Analiza procesu wyłączania prądów zwarciovych wyłącznikiem samosprężnym z SF₆ wyposażonym w napęd pneumatyczny na podstawie obliczeń. DT IEL/ NAR Nr 5104/87.
123. Piechocki A., Poniecki W.: Krajowe prace konstrukcyjne i badawcze w dziedzinie wysokonapięciowych wyłączników z SF₆. Wiadomości Elektrotechniczne Nr 7-8, 1988, str. 125-7.
124. Piechocki A., Poniecki W.: Influence of the drive on the switching-off process in the self-compressing SF₆ circuit-breaker. Sixth International Conference. Switching Arc Phenomena Łódź 1989, str. 148-57.
125. Piechocki A., Poniecki W.: Metody obliczania parametrów gazu w zbiorniku sprężania wyłącznika samosprężnego z SF₆. Przegląd Elektrotechniczny Nr 4, 1989, str. 109-14.
126. Poniecki W.: Oddziaływanie napędu na proces wyłączania prądu przez samosprężny wyłącznik z sześćfluorkiem siarki przy uwzględnieniu zmienności parametrów komory gaszeniowej. Praca doktorska IEL, 1986.
127. Poniecki W.: Simulation method of computation of the puffer-SF₆ circuit-breaker operation. XII Symposium on Electrical Discharges in Gases Pasym 1989, str. 261-74.
128. Poniecki W.: Analiza wyników prób modeli wyłączników średniego napięcia z SF₆. DT IEL/ NAR Nr 5300/90.
129. Poniecki W.: Przegląd wyłącznika EDF SV2-1 po próbach zwarciovych. DT IEL/NAR Nr 5351/91
130. Poniecki W., Tucholski P.: Calculation method simulating operation of the SF₆ self-compression circuit-breaker. Electromagnetic Phenomena and Computational Techniques. ELSEVIER 1992 r.
131. Poniecki W.: Analiza i badania wyłączania prądu przez komorę gaszeniową nowej generacji wyłącznika z SF₆. Opracowanie metody obliczeniowej symulującej działanie komory gaszeniowej nowej generacji. DT IEL/NAR Nr 5401/92.
132. Poniecki W.: Badanie wpływu parametrów łączeniowych oraz wybranych parametrów konstrukcyjnych na działanie komory gaszeniowej nowej generacji wyłącznika wysokonapięciowego w oparciu o obliczenia symulujące. DT NAR/IEL Nr 5435/93.

133. Poniecki W.: Określenie czynników decydujących o przebiegu procesu gaszenia łuku za pomocą zjawiska termoeekspansji w wysokonapięciowych wyłącznikach z SF₆. DT IEL/NAR 4580/94.
134. W. Poniecki: Wpływ ablacji na proces wyłączania prądu w sześćiofluorku siarki. DT IEL/NAR 5533 /95.
135. Poniecki W.: Ocena stanu technicznego wyłączników eksploatowanych w sieciach przesyłowych wysokich napięć. Badania diagnostyczne dla doskonalenia eksploatacji sieci elektroenergetycznej. Seminarium naukowo-techniczne Zakopane 1995 r.
136. Poniecki W.: Nowoczesne wysokonapięciowe wyłączniki z sześćiofluorkiem siarki. Przegląd Elektrotechniczny Nr 10, 1995, str. 253-60.
137. Poniecki W.: Obliczeniowa metoda symulacji wpływu zjawiska ablacji na działanie wyłącznika nowej generacji z sześćiofluorkiem siarki. DT IEL/NAR 5555/96.
138. Poniecki W.: Niezawodność wyłączników wysokonapięciowych eksploatowanych w systemie elektroenergetycznym. Przegląd Elektrotechniczny Nr 11, 1996, str. 289-93.
139. Poniecki W.: Metoda obliczania średnicy kolumny łukowej w dyszy wysokonapięciowego wyłącznika z sześćiofluorkiem siarki. Prace Instytutu Elektrotechniki Nr 193, 1997, str. 53-83.
140. Poniecki W.: Analiza działania wyłącznika WN nowej generacji z sześćiofluorkiem siarki w różnych warunkach pracy za pomocą obliczeń symulacyjnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Elektryka Zeszyt 44 Wyładowania elektryczne w gazach i próżni, str. 193-200, 1997.
141. Poniecki W.: Określenie przebiegu gaszenia łuku elektrycznego w atmosferze sześćiofluorku siarki w oparciu o wyniki badań i obliczeń wyłączników prototypowych oraz na podstawie krytycznej analizy literatury światowej. DT IEL/NAR 5603/796.
142. Poniecki W.: Określenie czynników decydujących o przebiegu łączenia prądów pojemnościowych przez wyłączniki wysokonapięciowe. DT IEL/NAR 5605/97.
143. Poniecki W.: Extinguish of the electrical arc in SF₆, Eight International Conference Switching Arc Phenomena Łódź 1997 (materiały pokonferencyjne)
144. Poniecki W., Jankowicz St.: High-voltage circuit-breakers. Actual state and tendency of development, Eight International Conference Switching Arc Phenomena Łódź 1997 (materiały pokonferencyjne)
145. Poniecki W.: Przepływ gazu przez dyszę wysokonapięciowego wyłącznika z sześćiofluorkiem siarki. Prace Instytutu Elektrotechniki Nr 199, 1998, str. 5-54.
146. Poniecki W.: Określenie narażeń wyłączników wysokiego napięcia pracujących w warunkach specjalnych. DT IEL/NAR Nr 5649/98.
147. Poniecki W.: Ocena możliwości wykorzystania nowych czynników do gaszenia łuku elektrycznego w wyłącznikach wysokonapięciowych. DT IEL/NAR Nr 5650/98.
148. Poniecki W.: Stan obecny i kierunki rozwojowe aparatury wysokiego napięcia. Seminarium Izby Gospodarczej Energetyki i Ochrony Środowiska podczas Międzynarodowych Targów Energetyki ENEX 98 Kielce.
149. Ragaller K. i inni: Dielectric recovery of an axially blown SF₆ arcs after current zero. Part II: Theoretical investigations. IEEE Transactions on Plasma Science Vol. PS-10, Nr 3, 1982, str. 154-61.
150. Ragaller K. i inni: Calculation methods for the arc quenching system of gas circuit-breakers. CIGRE Session Paryż 1984, 13-03.
151. Rahal A. i inni: Pressure transients in a self-blown circuit breakers. Proceedings of the Eight International Conference on Gas Discharges and Their Applications 1985, str. 95-98.

152. Rappanage A.: Hochspannungs-Leistungsschalter type ELF für Freiluftaufsteilen. Brown Boveri Mitt. Nr 4 1978, str. 212-18.
153. Reggio M. i inni: Computer aided tools in gas circuit breaker design. IEEE Transaction on Power Delivery Vol. 5, Nr 1, 1990, str. 163-76.
154. Ruchti C.B.: Material function for the vapour system SF₆ - PTFE. Fifth International Symposium Switching Arc Phenomena Łódź 1985, str. 34-8.
155. Ruchti C.B., Niemeyer L.: Ablation controlled arcs. IEEE Transaction on Plasma Science Vol. PS-14, Nr 14, 1986, str. 425-34.
156. Sasao H. i inni: Mixing process of arced gas with cold gas in the cylinder of circuit-breaker. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-101, Nr 9, 1982, str. 1115-21.
157. Schade E., Ragaller K.: Dielectric recovery of an axially blown SF₆ arcs after current zero. Part I: Experimental investigations. IEEE Transactions on Plasma Science Vol. PS-10, Nr 3, 1982, str. 141-53.
158. Schiemann A.: 3rd-generation SF₆ circuit-breaker. AEG Technical paper 1990.
159. Schotzau H.J. i inni: Dielectric phase in a SF₆ model breaker. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-104, Nr 11, 1985, str. 1897-94.
160. Schotzau H.J., Kneubuhl F.K.: Physics and techniques of SF₆ -Arc plasmas in circuit breakers. VDI Verlag Düsseldorf 1989.
161. Schram H.H.: Editorial of chairman of study committee 13. Electra Nr 138, 1991, str. 11-13.
162. Slamecka E.: SF₆ - Hochspannungs-Leistungsschalter Stand der Technik. ETZ Bd 101, 1980, Heft 2 str. 80-4.
163. R. Smeets i inni: Progress towards "digital testing", a novel additional tool to investigate the performance of HV circuit-breakers for the benefit of utility, manufacturer and standardization body. CIGRE Session Paryż 1998, 13-107.
164. Stephanides H.V. i inni: Modern methods for the reduction of the operating energy for SF₆ circuits-breakers. CIGRE Session Paryż 1986, 13-12.
165. Stelzer H.: Hochspannungs - Freiluftschalter typ ELF für mittleres Schaltvermögen. Brown Boveri Mitt. Bd 64, H5, 1977, str. 252-61.
166. Suzuki K. i inni: Investigation of interruption performance of newly developed 300 kV 3-phase in one tank type GCB. IEEE Transaction on Power Delivery Vol. 4, Nr 1, 1989, str. 362-70.
167. Swanson B.E., Roidt R.M.: Boundary Layer Analysis of an SF₆ circuit-breaker arc. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-90, Nr 3, 1971, str. 1086-93.
168. Swanson B.E., Roidt R.M.: Thermal analysis of an SF₆ circuit-breaker arc. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-91, Nr 2, 1972, str. 381-9.
169. Swanson B. W.: Nozzle arc interruption in supersonic flow. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS -96, Nr 5, 1977, str. 1697-05.
170. Шеглов Л.В.: Применение расчетных методов при разработке автокомпрессионных газовых выключателей. Электротехника Nr 9, 1990, str. 12-17.
171. Tanabe T. i inni: Computer aided study of current zero behaviour of SF₆ arcs. Proceedings of the Eight International Conference on Gas Discharges and Their Applications 1985, str 65-68.
172. Tanabe T. i inni: Simulation of the SF₆ arc behaviour by a cylindrical arc model. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-104, Nr 7, 1985, str. 1903-9.

173. Thiel H.G.: Modelling of pressure build-up and temperature distribution in SF₆ circuit-breaker. Sixth International Conference. Switching Arc Phenomena Łódź 1989, str. 109-13.
174. Thiel H.G.: The physical principles of the new generation of SF₆ circuit-breakers. Sbornik Vysokeho Ucení Technického v Brně. Rocnik 1992, str. 31-62.
175. Toda H. i inni: On the boundary between thermal and dielectric failure region in SF₆ gas model interrupter. Fourth International Symposium. Switching Arc Phenomena Łódź 1981, str. 176-9.
176. Teodorovic i inni: Laser Doppler measurements of globular concentrations and flow perturbations in a model gas blast interrupter. Proceedings of The Eight International Conference on Gas Discharges and Their Applications 1985, str. 19-22.
177. Topham D. R.: Some considerations of high-current electric arcs in nozzle flows. Journal Physics D. Appl. Phys. Vol. 11, 1978, str. 1133-47.
178. Tonkonogov E. i inni: Effect of downstream parameters on SF₆ arc interruption. Seventh International Conference. Switching Arc Phenomena Łódź 1993, str. 131-3.
179. Tominaga S. i inni: Estimation and performance of SLF interrupting ability of puffer type gas circuit breaker. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS- 98, Nr 1, 1979, str. 261-7.
180. Tominaga S. i inni: Investigation on gas flow of puffer type gas circuit-breaker based on observation of arc and pressure measurement. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-99, Nr 6, 1980, str. 2040-8.
181. Tsukushi M. i inni: Application of theoretical calculation for puffer pressure rise of gas mixtures in puffer type gas blast circuit-breaker. Seventh International Conference. Switching Phenomena Łódź 1993, str. 112-6.
182. Tuma D.T., Lowke J.J.: Prediction and properties of arcs stabilised by forced convection. Journal of Applied Physics Vol. 46, Nr 8, 1975, str. 3361-7.
183. Tuma D.T.: A comparison of the behaviour of SF₆ and N₂ blast arcs around current zero. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-99, Nr 6, 1980, str. 2129-36.
184. Ueda Y. i inni: Development of 7.5-63 kA advanced puffer gas circuit-breaker. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-101, Nr 9, 1982, str. 1504-9.
185. Ueda Y. i inni: Investigation on the reliability of large interrupting capacity SF₆ gas circuit-breaker with few breaks. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol PAS-104, Nr 1, 1985, str. 143-9.
186. Ushio T. inni: SLF interruption by gas circuit-breaker without puffer action. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-100, Nr 11, 1981, str. 1801-8.
187. Van der Sluis L. i inni: The modelling of circuit-breakers arcs, application in design and testing of switchgear. CIGRE Session Paryż 1994, 13-111.
188. Vavra Z.: Theory and experiment in the research of the function of the SF₆ extinction chamber with self-flow generation. Sixth International Conference Switching Arc Phenomena Łódź 1989, str. 153-6.
189. Volcker O: Progress report of study committee 13 (Switching Equipment) for 1993. Electra Nr 154, 1994, str. 21-27.
190. Volcker O: Progress report of study committee 13 (Switching Equipment) for 1995. Electra Nr 166, 1996, str. 20-41.
191. Volcker O: Progress report of study committee 13 (Switching Equipment) for 1997. Electra Nr 178, 1998, str. 23-32.

192. Wan-Ping H., Qi-Ping W.: Behaviour and effect of arc clogging in a puffer breaker with SF₆/N₂ mixtures. Seventh International Conference. Switching Phenomena Łódź 1993, str. 112-6.
193. Welly J.D.: Mass flow and radiation diffusion in radial blown SF₆ arcs. Siemens Forschungs und Entwicklungberichte. Berlin Bd. 14, Nr 6, 1985, str. 313-6.
194. Wenyan G. i inni: The pressure calculation during its storage in arc chamber with self-energy quenching arc. Seventh International Conference. Switching Arc Phenomena Łódź 1993, str. 103-6.
195. Wenyan G. i inni: The evaluation of energy transfer in pressure storage in SF₆ self-energy quenching arc chamber. Seventh International Conference. Switching Arc Phenomena Łódź 1993, str. 108-11.
196. Widl W., Hofbauer W.: Der Lichtbogen wird berechnenbar Anwendung moderner Berechnungsmethoden in der Entwicklung von Hochspannungs Leistungsschalter. Elektrotechnik und Informationstechnik 107, Jg, 1990, H.2.
197. Widemayer E.: Siemens -BK -Schalter 3AS1 für 123 bis 170 kV. Siemens Z. Jg 51, H4, 1977r., str. 266- 269.
198. Yanabu S. i inni: Factor influencing the interrupting ability of SF₆ puffer breaker and development of 300 kV -50 kA one break circuit breaker. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS -101, Nr 6, 1982, str. 1511-18
199. Yanabu S. i inni: Development of novel hybrid puffer interrupting chamber for SF₆ gas circuit-breaker. Utilisation self-pressure rise phenomena by arc. IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 4, Nr 1, 1989, str. 355-61.
200. Yeckley R. N., Cromer C.F.: New SF₆ EKV circuit-breakers for 550 kV and 765 kV. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-89, Nr 8, 1970, str. 2015-21.
201. Yoshioka Y. i inni: A method and applications of theoretical calculations for on-load pressure rise in puffer type gas circuit-breaker. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-98, Nr 3, 1979, str. 731-7.
202. Yoshioka Y., Nakagawa Y.: Investigation of interrupting performance of puffer type gas blast circuit-breaker under various nozzle conditions. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-99, Nr 6, 1980, str. 2086-93
203. Zdanowicz L., Kolaszewski A.: Charakterystyki czasowe rozkładów temperatury łuku elektrycznego w powietrzu i SF₆. VII Sympozjum Podstaw Teorii Wyładowań Elektrycznych w Gazach. Warszawa 1983.
204. Zedler H. D. i inni: Prüfung von SF₆ - Leistungsschaltern bei extremer Spannungsbelastung. Elektrie Nr 12, 1990, str. 475-80.
205. Zhang J.F.: The dynamic behaviour of nozzle arcs. IEEE Transactions on Plasma Science Vol. PS-14, Nr 4, 1986, str. 350-56.
206. Zhangqi W. i inni: Computer simulation and tests on pressure and temperature of arcing in SF₆ - SBCB. Seventh International Conference. Switching Arc Phenomena Łódź 1993, str. 139-41.
207. Zükler K.: Untersuchungen zum dynamischen Verhalten von Schalter Lichtbogen. ETZ Bd 99, 1978, str. 546-8.
208. PN-89/E-06105/01 Wyłączniki wysokonapięciowe prądu przemiennego. Dane znamionowe; PN-90/E-06105/03 Wyłączniki wysokonapięciowe prądu przemiennego. Badania wyrobu, dobór, zamawianie, instalowanie. PN-91/E-06105/02 Wyłączniki wysokonapięciowe prądu przemiennego. Badania typu.
209. IEC Publication 56 (wydanie 1987) High-voltage alternating current circuit-breakers.

210. IEC Publication 1233 (wydanie 1994) High-voltage alternating current circuit-breakers. Inductive loading switching.
211. IEC Publication 1233 (wydanie 1994) High-voltage switchgear and controlgear - Use and handling of sulphur hexafluoride (SF_6) in high-voltage switchgear and controlgear.
212. PN-2000/E-06115: Wysokonapięciowa aparatura rozdzielcza i sterownicza - Użytkowanie i postępowanie z sześćciofluorkiem siarki (SF_6) w wysokonapięciowej aparaturze rozdzielczej

Rękopis dostarczono, dnia 6.06.2002 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Henryk Sibilski

FLOW OF GAS THROUGH A NOZZLE OF HIGH-VOLTAGE SULPHUR HEXAFLUORIDE CIRCUIT-BREAKER

Wojciech PONIECKI

SUMMARY: *The main aim of this dissertation is formulation of the simulation method of the operating of the sulphur hexafluoride - SF_6 , high-voltage circuit-breaker during process of breaking current using as an example third generation circuit-breaker. In this type of circuit-breakers, the pressure build-up process depends on work of operating mechanism as well as from thermoexpansion phenomenon. The increase of sulphur hexafluoride pressure is necessary to create the flow of gas throughout nozzle system. In this study a main directions of circuit-breakers investigation as well calculation methods which are used during construction and tests of circuit-breakers have been presented. A design and a principle of quenching chamber and operating mechanism of third generation circuit-breaker has been described and also the successive stages of the current interruption process in sulphur hexafluoride atmosphere when for extinguishing of electrical arc the double-stream nozzle system is used. The thermo-expansion phenomena and influence an ablation of insulating materials on this process has been presented. The study includes results of tests of special model of third generation quenching chamber and chosen results of the laboratory tests carried out on the real circuit-breakers. On this base the set of equations describing the operation of the main elements of circuit-breaker was established taking into account the interaction between the process in particular parts of circuit-breaker. Particular attention was drawn to the affection of the electrical arc on the flow of gas throughout the nozzle system as well as on transient of thermodynamics quantities in quenching chamber. The method of solution the set of these equations have been worked out and the calculations were carried out for various values of the breaking currents, the arcing time, dimension of quenching chamber and the drive energy. The results of these calculations are transients of moving contact characteristics, areas of gas flow throughout both valves, thermodynamics quantities of SF_6 in quenching chamber and also mechanical quantities on which depends operation of drive. Moreover collaboration of main parts of circuit breaker have been estimated. The verification of calculation has been achieved on the base of results of tests of third generation quenching chamber special model. For constriction of this special model were used the elements of real circuit-breaker (e.g. a main insulating nozzle, the arcing contacts, a insulating shield of moving contact and cylinder). Basing on results of laboratory test of special model of quenching chamber and real circuit-breakers and also taking into account results of simulation method the main factors influencing the process of breaking current in the third generation circuit breaker during all characteristic cases of its operation in power energetic system has been determined. Many conclusion concerning: operation of circuit-breaker, interaction between quenching chamber and a drive, thermoexpansion and ablation phenomenon as well as the particular stages of current interruption process in third generation sulphur hexafluoride circuit-breaker has been formulated.*

ZAŁĄCZNIK

Z1. PRZEPŁYW SZECIOFLUORKU SIARKI W KOMORZE GASZENIOWEJ WYŁĄCZNIKA TRZECIEJ GENERACJI

W komorze gaszeniowej wysokonapięciowego wyłącznika trzeciej generacji z sześćciofluorkiem siarki, podczas ruchu otwierania, przy uwzględnieniu obecności łuku elektrycznego powstającego zawsze podczas wyłączania prądu, występują następujące charakterystyczne przypadki przepływu gazu:

- przez zawór cylindra: z dolnego zbiornika cylindra (po otwarciu zaworu) do górnej części cylindra lub z górnego zbiornika cylindra (w przypadku powstania zjawiska termoeekspansji, które wywołuje duży przyrost ciśnienia SF_6 , przed ponownym zamknięciem zaworu^{Z1}) do dolnej części cylindra;
- przez zawór tłoka z dolnego zbiornika cylindra (po otwarciu zaworu^{Z2}) do bieguna wyłącznika;
- z górnego zbiornika cylindra przez dyszę główną i dyszę pomocniczą do bieguna wyłącznika, pod warunkiem iż nie występuje zjawisko blokowania przepływu (zostało ono szczegółowo przeanalizowane w punkcie Z1.3.3 głównej części niniejszej pracy) .

W dwóch pierwszych wymienionych powyżej przypadkach ani łuk elektryczny ani zjawisko ablacji nie ma bezpośredniego wpływu na przepływ gazu, natomiast jest on uzależniony od działania zaworów, różniących się istotnie budową. Wypływ gazu z górnego zbiornika cylindra przez dwustrumieniowy układ dyszowy, do chwili w której następuje przerwanie przepływu prądu, odbywa się w obecności łuku elektrycznego, a gdy wyłączany prąd ma dużą wartość przepływ SF_6 jest uzależniony zarówno od intensywności ablacji materiałów izolacyjnych, z których wykonane są dysza główna i specjalna osłona izolacyjna styku ruchomego opalnego jak i od średnicy kolumny łukowej. W związku z tym

^{Z1} Przepływ gazu przez zawór cylindra w tym kierunku trwa bardzo krótko, ponieważ przyrost ciśnienia sześćciofluorku siarki w górnym przedziale cylindra wywołany zjawiskiem termoeekspansji jest bardzo szybki, a zatem zawór po kilku milisekundach (zwykle 2÷3) zamyka się; nie można jednak tego przepływu pominąć, gdyż ze względu na dużą wartość ciśnienia gazu jego natężenie osiąga znaczne wartości, co w istotny sposób wpływa na zmianę parametrów SF_6 w obu częściach cylindra.

^{Z2} W przypadku gdy wyłączany prąd ma małą wartość i nie istnieją warunki do powstania zjawiska termoeekspansji, zawór tłoka pozostaje zamknięty podczas całego ruchu otwierania wyłącznika.

wszystkie trzy wymienione powyżej przypadki przepływu sześćciofluorku siarki zostaną rozpatrzone oddzielnie.

Wielkością charakterystyczną dla każdego przepływu gazu jest tak zwany krytyczny stosunek ciśnienia, dla sześćciofluorku siarki jest on opisany następującym wzorem [32,34,145]^{Z3}:

$$E_k = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)} \quad (Z1.1)$$

gdzie:

- E_k - krytyczny stosunek ciśnienia SF_6 ;
- k - wykładnik izentropy SF_6

Natężenia przepływu sześćciofluorku siarki jest bezpośrednio zależne od wartości stosunku ciśnienia SF_6 w obszarze, z którego gaz wypływa do ciśnienia SF_6 w obszarze, do którego gaz napływa. Jeśli ten stosunek jest mniejszy od krytycznego stosunku ciśnienia to przepływ nosi nazwę nadkrytycznego, natomiast gdy jest większy to nosi nazwę podkrytycznego. W wyłączniku wysokonapięciowym z sześćciofluorkiem siarki przepływ gazu odbywa się przy zmieniającej się wartości stosunku ciśnienia gazu, a w związku z tym, dla każdego z trzech wymienionych powyżej przypadków, następuje zmiana charakteru przepływu gazu (z podkrytycznego na nadkrytyczny lub odwrotnie^{Z4}). Funkcję natężenia przepływu sześćciofluorku siarki przy uwzględnieniu charakteru przepływu gazu opisuje następujący wzór:

$$f_p \left(\frac{p_p}{p_s} \right) = \begin{cases} W_N & \text{dla } E_p \in (0, E_k) \\ W_p \cdot F(E_p) & \text{dla } E_p \in (E_k, 1) \end{cases} \quad (Z1.2)$$

przy czym:

$$W_N = \left(\frac{2k}{k-1} \right)^{1/2} \quad (Z1.3)$$

$$W_p = \left[\frac{2k}{(k+1)} \right]^{(k+1)/2 \cdot (k-1)} \cdot k^{1/2} \quad (Z1.4)$$

$$E_p = \frac{p_p}{p_s} \quad (Z1.5)$$

^{Z3} W przytoczonych publikacjach podano podstawowe monografie dotycząca mechaniki gazów.

^{Z4} Podczas wyłączania dużych prądów gdy powstaje zjawisko termoexpansji przepływ przez zawór cylindra może nawet kilkukrotnie zmieniać swój charakter.

$$F(E_p) = E_p^{2/k} - E_p^{k/(k+1)} \quad (Z1.6)$$

gdzie:

W_N, W_P	- współczynnik przepływu: nadkrytycznego, podkrytycznego
p_P	- ciśnienie SF ₆ w zbiorniku, do którego następuje napływ gazu (tzw. przeciwcisnienie);
p_S	- ciśnienie SF ₆ w zbiorniku, z którego następuje wypływ gazu (tzw. ciśnienie spiętrzenia);
E_P	- stosunek przeciwcisnienia do ciśnienia spiętrzenia SF ₆ ;
$F(E_P)$	- funkcja przepływu podkrytycznego.

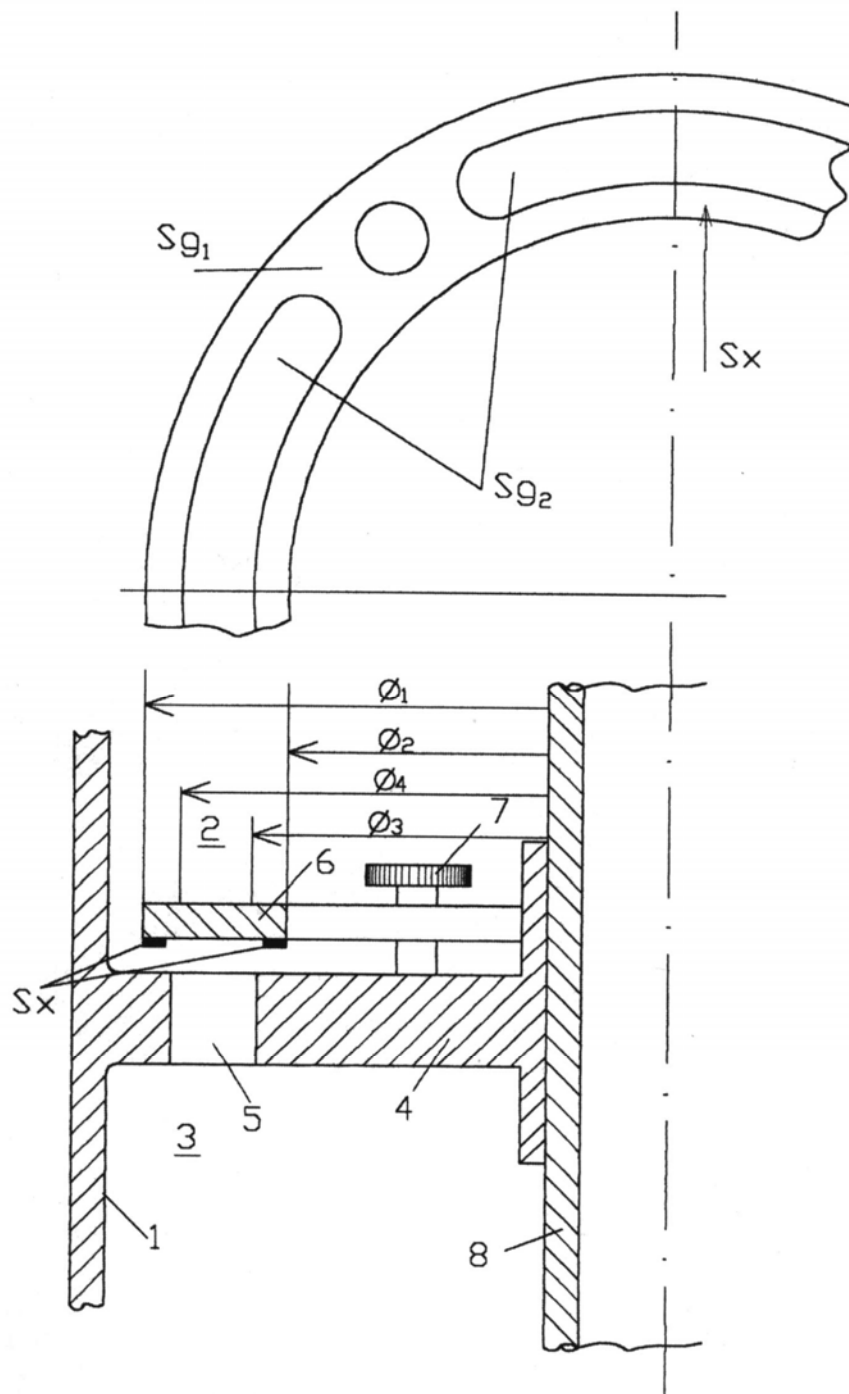
Z.1.1. Przepływ SF₆ przez zawór cylindra

Natężenie przepływu sześćfluorku siarki przez zawór cylindra jest zależne od:

- stosunku ciśnienia gazu w obu zbiornikach cylindra;
- powierzchni przekroju otworu zaworu;
- kształtu otworu zaworu cylindra, relacji między długością i przekrojem tego otworu oraz stanu jego powierzchni bocznej, gdyż czynniki te istotnie wpływają na powstanie oporów w przepływie gazu (w związku z tym w obliczeniach mających na celu wyznaczenie wartości natężenia przepływu gazu zjawisko to uwzględnia się wprowadzając bezwymiarowy współczynnik oporu przepływu [32,34,145]);
- wartości wielkości termodynamicznych SF₆ w zbiorniku o wyższym ciśnieniu (czyli od tzw. parametrów spiętrzenia).

Zawór cylindra (zwany także zaworem górnym) jest zamontowany w ścianie dzielącej ruchomy cylinder na dwie części: górną, o stałej objętości i dolną o objętości zmniejszającej się podczas ruchu styków. Zawór steruje przepływem gazu między dolnym a górnym zbiornikiem cylindra. Budowa zaworu, pokazana w sposób schematyczny na rysunku Z1.1, jest bardzo prosta, zawór składa bowiem z trzech części: otworu w ścianie dzielącej cylinder, pokrywy zaworu, którą stanowi lekki, bardzo gładki metalowy krążek oraz ogranicznika ruchu pokrywy zaworu.

Działanie zaworu jest uzależnione od wartości wyłączanego prądu. W przypadku gdy wyłączany jest prąd roboczy lub mały prąd zwarciový i nie powstaje zjawisko termoeekspansji zawór jest zamknięty tylko w początkowym



Rys.Z1.1. Schemat budowy zaworu cylindra.

1. cylinder, 2. górny zbiornik cylindra, 3. dolny zbiornik cylindra, 4. ścianka dzieląca cylinder na dwie części, 5. otwór zaworu; 6. pokrywa zaworu, 7. ogranicznik ruchu pokrywy zaworu, 8. tuleja prądowa.

S_{g1} , S_{g2} – powierzchnia górna, dolna pokrywy zaworu, S_x – powierzchnia dodatkowa pokrywy zaworu ($S_x + S_{g2} = S_{g1}$).

etapie ruchu styków; w chwili gdy ciśnienie w dolnym zbiorniku cylindra wzrośnie (na skutek sprężania wywołanego pracą napędu) do takiej wartości, iż siła parcia na dolną powierzchnię pokrywy zaworu przekroczy sumę siły ciężkości i siły parcia sześćfluorku siarki na górną powierzchnię pokrywy zawór otwiera się i pozostaje otwarty do momentu, w którym ciśnienie SF_6 w obu zbiornikach cylindra ponownie się wyrówna, co w praktyce trwa znacznie dłużej niż całkowity ruch styku ruchomego.

Natomiast gdy wyłączany jest duży prąd zwarciaowy i powstaje zjawisko termoeekspansji działanie zaworu odbywa się w czterech etapach. Początkowo S_{g1} , S_{g2} - powierzchnia górna, dolna pokrywy zaworu, S_x - powierzchnia dodatkowa pokrywy zaworu. ($S_x + S_{g2} = S_{g1}$), zawór działa tak samo jak w przypadku wyłączania prądów roboczych, ale pozostaje otwarty tylko do momentu, w którym ciśnienie gazu zawartego w górnym zbiorniku wzrośnie na skutek działania zjawiska termoeekspansji. Czas do zamknięcia zaworu jest zależny od wartości wyłączanego prądu - wraz ze wzrostem wartości wyłączanego prądu czas do zamknięcia zaworu skraca się.

Po zaniku zjawiska termoeekspansji, co związane jest ze zmniejszeniem się chwilowej wartości prądu, następuje wypływ gazu przez układ dyszowy czego konsekwencją jest obniżenie ciśnienia sześćfluorku siarki w górnym zbiorniku cylindra i powtórne otwarcie zaworu. Po wyłączeniu prądu i wyrównaniu się wartości ciśnienia gazu w obu częściach cylindra zawór się zamyka.

Układ równań opisujących siły działające na ruchomy cylinder oraz pokrywę zaworu górnego, przy uwzględnieniu, iż obie te części komory gaszeniowej poruszają się z jednakowym przyspieszeniem (jest to warunek poprawności działania zaworu górnego), ma następującą postać:

$$\begin{cases} \sum F_g(x, t) - N = M_{zg} \cdot a \\ \sum \Sigma F_{sp} + N = M_{sk} \cdot a \end{cases} \quad (Z1.7)$$

gdzie:

- ΣF_g - suma sił działających na pokrywę zaworu (siły parcia SF_6 i siła ciężkości);
- ΣF_{sp} - wypadkowa siła działająca na ruchomy cylinder komory gaszeniowej;
- N - siła nacisku pokrywy zaworu na ściankę cylindra;
- M_{zg} - masa pokrywy zaworu górnego;
- M_{sk} - masa części ruchomych wyłącznika;
- a - przyspieszenie cylindra (kierunek i zwrot przyspieszenia zgodny z kierunkiem i zwrotem siły wypadkowej działającej na cylinder)

Po prostych przekształceniach układu równań (Z1.7) otrzymano zależność opisującą siłę nacisku N:

$$N = \frac{\sum F_g - \frac{M_{zg}}{M_k} \cdot \sum F_{sp}}{\frac{M_{zg}}{M_k} + 1} \quad (Z1.8)$$

Uwzględniając jednakże, iż w rzeczywistym wyłączniku stosunek masy pokrywy zaworu do masy części ruchomych jest wielokrotnie mniejszy od jedności (np.: $M_{zg} / M_{sk} = 0.0005$), można przyjąć iż siła nacisku N jest równa $\sum F_g$ czyli sumie sił działających na pokrywę zaworu. Oznacza to, że ruch elementów komory jedynie w bardzo niewielkim stopniu wpływa na działanie zaworu, w związku z tym zostanie w dalszych rozważaniach pominięty.

W położeniu zamknięcia pokrywa zaworu ściśle przylega do ścianki dolnej górnego zbiornika cylindra i w związku z tym na jej część zwaną powierzchnią dodatkową (pokazaną na rysunku Z1.1) nie działa żadna siła parcia gazu. W chwili gdy zawór zaczyna się otwierać pod całą powierzchnią dolną zaworu napływa gaz ze zbiornika dolnego, przy czym można z dużą dokładnością założyć, iż ciśnienie sześćsiuforku siarki znajdującego się pod powierzchnią dodatkową pokrywy ma wartość pośrednią między wartością ciśnienia gazu w dolnym i górnym zbiorniku cylindra ^{Z5}.

Formułując układ równań opisujący działanie zaworu górnego należy także pamiętać, iż w związku ze stosowaniem ogranicznika ruchu pokrywy zaworu mimo, że na tę pokrywę działa niezrównoważona siła a jej prędkość jest równa zero, co opisuje zamieszczona poniżej zależność:

$$\begin{cases} v_g = 0 \Leftrightarrow (\sum F_g \leq 0) \cap (z_g = 0) \\ v_g = 0 \Leftrightarrow (\sum F_g \geq 0) \cap (z_g = z_{gc}) \end{cases} \quad (Z1.9)$$

gdzie:

- v_g - prędkość pokrywy zaworu tłoka;
- z_g - droga pokrywy zaworu tłoka;
- z_{gc} - całkowita droga pokrywy zaworu tłoka.

^{Z5}

Ze względu na kształt kanału, przez który odbywa się przepływ gazu między zbiornikami cylindra wyjątkowo trudno jest określić w sposób bardzo dokładny wartość ciśnienia sześćsiuforku siarki działającą na powierzchnię dodatkową zaworu. W związku z tym wykonano obliczenia dla kilku wartości ciśnienia SF₆, zwartych w granicach między ciśnieniem w górnym i dolnym zbiornikiem. Zmiana tej wartości miała niewielki wpływ na przebiegi charakterystyk ruchu pokrywy zaworu oraz na wartości wielkości termodynamicznych gazu zawartego w cylindrze komory gaszeniowej. Należy bowiem przypomnieć, iż ruch pokrywy zaworu trwa zaledwie 3÷4 ms, a po upływie tego czasu przyjmuje ona położenie ustalone i w związku z tym dalszy przepływ gazu odbywa się przez otwór o ustalonej powierzchni przekroju.

Prędkość i drogę pokrywy zaworu cylindra (czyli tzw. charakterystyki ruchu), gdy prędkość jest różna od zera, można opisać następującym układem równań:

$$\begin{cases} \frac{dv_g}{dt} = \frac{\sum F_g}{M_{zg}} \\ \frac{dz_g}{dt} = v_g \end{cases} \quad (Z1.10)$$

Natomiast powierzchnię kanału, przez który odbywa się przepływ sześćciofluorku siarki ze zbiornika dolnego do górnego (lub z górnego do dolnego) opisuje zależność:

$$\begin{cases} A_g = z_g \cdot Y_g & \text{dla } A_g < A_{go} \\ A_g = A_{go} & \text{dla } A_g \geq A_{go} \end{cases} \quad (Z1.11)$$

gdzie:

- A_g - powierzchnia przepływu sześćciofluorku siarki przez zawór cylindra;
- Y_g - obwód otworu zaworu cylindra;
- A_{go} - powierzchnia otworu zaworu cylindra.

Wypadkową siłę działającą na pokrywę zaworu określa wzór:

$$\sum F_g = -F_{g1} - G_g + F_{g2} + F_{gx} \quad (Z1.12)$$

gdzie:

- F_{g1} - siła parcia SF_6 działająca na powierzchnię górną pokrywy zaworu cylindra;
- F_{gx} - siła parcia SF_6 działająca na dodatkową powierzchnię dolną pokrywy zaworu cylindra;
- G_g - siła ciężkości pokrywy zaworu cylindra;
- F_{g2} - siła parcia SF_6 działająca na dolną powierzchnię pokrywy zaworu cylindra;

przy czym poszczególne czynniki równania (Z1.12) opisują następujące wzory:

$$G_g = M_{zg} \cdot g \quad (Z1.13)$$

$$F_{g1}=p_1 \cdot S_{g1} \quad (Z1.14)$$

$$F_{gx}=S_{gx}(z_g) \cdot p_{sg}(p_1;p_2) \quad (Z1.15)$$

$$F_{g2}=S_{g2} \cdot p_2 \quad (Z1.16)$$

gdzie:

- g - przyspieszenie ziemskie;
- S_{g1} - powierzchnia górna pokrywy zaworu cylindra;
- S_{gx} - dodatkowa powierzchnia dolna pokrywy zaworu cylindra;
- p_{sg} - ciśnienie działające na dodatkową powierzchnię dolną pokrywy zaworu cylindra
- S_{g2} - powierzchnia dolna pokrywy cylindra

Dolną dodatkową powierzchnię pokrywy zaworu, na którą siła parcia sześćciofluorku siarki zaczyna działać dopiero po rozpoczęciu ruchu przez tę pokrywę, uwzględniając ponadto, że w początkowej fazie otwierania zaworu istnieją bardzo duże opory przepływu gazu, można opisać następującym przybliżonym wzorem:

$$S_{gx} = \begin{cases} 0 & \text{dla } z_g=0 \\ S_v \cdot z_g & \text{dla } z_g \in \langle 0, 0.05 \cdot z_{gc} \rangle \\ S_{gx} & \text{dla } z_g \in \langle 0.05 \cdot z_{gc}, z_{gc} \rangle \end{cases} \quad (Z1.17)$$

przy czym przyjęto, iż współczynnik S_v określający szybkość zwiększania się dodatkowej dolnej powierzchni pokrywy zaworu w początkowej fazie jej ruchu (dla założonego bardzo krótkiego początkowego fragmentu drogi pokrywy^{Z6}):

$$S_v = \frac{S_{gx}}{0.05 \cdot z_{gc}} \quad (Z1.18)$$

Natężenie przepływu gazu jest opisane następującym wzorem w postaci ogólnej [32,145]:

^{Z6} Założono, iż początkowy fragment drogi pokrywy zawarty jest w przedziale $[0, 0.05 \cdot z_{gc}]$, a zatem w rzeczywistości długość jego wynosi poniżej 1mm.

$$m_w = f\left(\frac{p_p}{p_s}\right) \cdot A \cdot \mu_p \cdot \sqrt{p_s \cdot \rho_s} \quad (\text{Z1.19})$$

gdzie:

- A - przekrój kanału przepływu;
- μ_p - bezwymiarowy współczynnik oporu przepływu SF₆;
- ρ_s - gęstość SF₆ w zbiorniku, z którego następuje wypływ gazu.

Bezwymiarowy współczynnik przepływu w tym przypadku, gdy w trakcie ruchu otwierania wyłącznika może nastąpić nawet kilkukrotnie zmiana kierunku przepływu gazu przez zawór cylindra, opisuje następująca zależność:

$$\begin{cases} \mu_p = 0 & \text{dla } p_s \leq p_p \\ \mu_p = \mu_p & \text{dla } p_s > p_p \end{cases} \quad (\text{Z1.20})$$

Ostatecznie zatem natężenie przepływu sześćciuorku siarki przez zawór cylindra, uwzględniając iż przepływ SF₆ przez ten zawór może odbywać się w dwóch kierunkach (w zależności od relacji między ciśnieniem gazu w dolnym i górnym zbiorniku cylindra) a ponadto biorąc pod uwagę, iż kształt kanału dla przepływu gazu, co pokazano na rysunku Z1.1, dla każdego z obu kierunków ma odmienny kształt, opisują dwa zamieszczone wzory:

- natężenie przepływu sześćciuorku siarki przez zawór górny, ze zbiornika górnego do dolnego określa zależność:

$$m_{dg} = f\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \cdot A_g \cdot \mu_{dg} \cdot \sqrt{p_1 \cdot \rho_1} \quad \text{Z1.21})$$

- natomiast natężenie przepływu sześćciuorku siarki przez zawór górny ale w odwrotnym kierunku czyli z dolnego do górnego opisuje wzór:

$$m_{gd} = f\left(\frac{p_1}{p_2}\right) \cdot A_g \cdot \mu_{gd} \cdot \sqrt{p_2 \cdot \rho_2} \quad (\text{Z1.22})$$

gdzie:

- m_{gd}, m_{dg} - natężenie przepływu SF₆ z: dolnego zbiornika cylindra; górnego zbiornika cylindra.

Wartość bezwymiarowego współczynnika oporu przepływu SF_6 dla pierwszego przypadku można przyjąć jako $\mu_{dg} = 0.6$, a dla przepływu SF_6 w odwrotnym kierunku $\mu_{gd} = 0.8$.

Z.1.2. Przepływ SF_6 przez zawór tłoka

Natężenie przepływu sześćfluorku siarki przez zawór tłoka jest zależne od:

- stosunku ciśnienia SF_6 w zbiorniku dolnym cylindra i w biegunie wyłącznika;
- powierzchni przekroju otworu zaworu tłoka;
- relacji między długością i przekrojem tego otworu oraz stanu jego powierzchni bocznej; gdyż czynniki te (podobnie jak w przypadku zaworu cylindra) istotnie wpływają na powstanie oporów w przepływie gazu (w związku z tym także i dla tego zaworu w obliczeniach mających na celu wyznaczenie wartości natężenia przepływu SF_6 zjawisko to uwzględnia się wprowadzając bezwymiarowy współczynnik oporu przepływu [32,34, 145]);
- wartości wielkości termodynamicznych SF_6 w dolnym zbiorniku cylindra.

W nieruchomym tłoku komory gaszeniowej wyłącznika nowej generacji zamontowany jest zawór pełniący bardzo istotną rolę polegającą na ograniczaniu wartości ciśnienia sześćfluorku siarki znajdującego się w dolnej części zbiornika sprężania. Podczas ruchu otwierania dolna część cylindra zmniejsza swoją objętość (cylinder jest sprężnięty w sposób sztywny ze stykiem ruchomym), a w związku z tym w dolnej jego części następuje sprężanie gazu. Do wartości ciśnienia SF_6 zawartego w tym zbiorniku jest wprost proporcjonalna siła parcia gazu działająca na cylinder komory gaszeniowej. Ta siła parcia stanowi główną siłę oporową obciążającą napęd wyłącznika. Nadmierny wzrost ciśnienia sześćfluorku siarki mógłby doprowadzić do zdecydowanego zwiększenia wartości tej siły czego konsekwencją mogło by być zmniejszenie prędkości ruchu styków a w skrajnym przypadku nawet ich zatrzymanie.

Podczas wyłączania dużych prądów zwarciovych, gdy występuje zjawisko termoeekspansji, zawór cylindra (zamontowany między górną a dolną częścią cylindra) zamyka się, a zatem w tym kierunku nie jest możliwy wypływ gazu z dolnego zbiornika cylindra. W związku z tym w takim przypadku aby nie dopuścić do nadmiernego wzrostu ciśnienia gazu w dolnym zbiorniku zawór tłoka powinien otwierać się przy ściśle określonej wartości ciśnienia SF_6 , a ponadto powierzchnia jego otworu powinna być tak dobrana aby ciśnienie gazu nie wzrastało ponad tę wartość podczas całego ruchu otwierania. Spełnienie

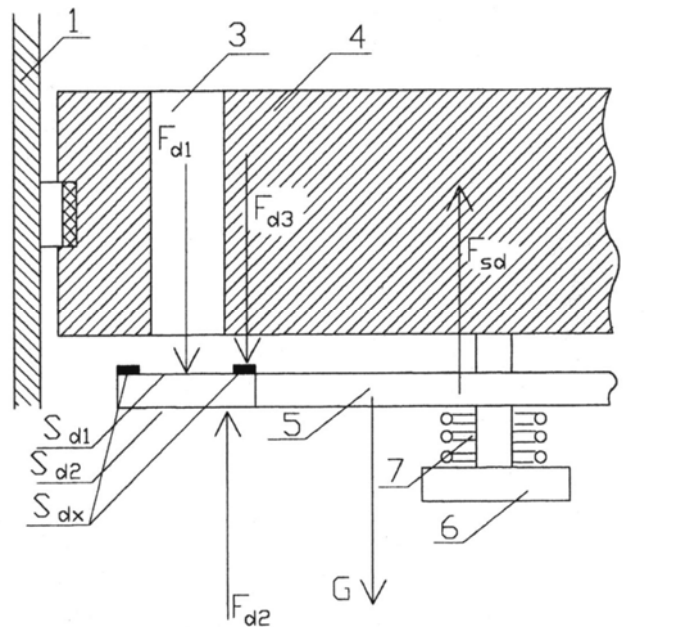
tych warunków gwarantuje, że podczas wszystkich operacji łączeniowych wykonywanych przez wyłącznik oporowa siła parcia sześćfluorku siarki na cylinder nigdy nie przekroczy założonej wartości.

Budowa zaworu tłoka (schemat pokazany jest na rysunku Z1.2) jest także prosta, składa się on z czterech części: otworu w tłoku, pokrywy zaworu, sprężyny dociskowej oraz ogranicznika ruchu pokrywy. Ruch pokrywy zaworu jest ograniczony, a więc w jej skrajnych położeniach pomimo, iż działa na nią nie zrównoważona siła jej prędkość jest równa zero, co opisuje zamieszczona poniżej zależność:

$$\begin{cases} v_d=0 \Leftrightarrow (\sum F_d \leq 0) \cap (z_d=0) \\ v_d=0 \Leftrightarrow (\sum F_d \geq 0) \cap (z_d=z_{dc}) \end{cases} \quad (Z1.23)$$

gdzie:

- v_d - prędkość pokrywy zaworu tłoka;
- $\sum F_d$ - wypadkowa siła działająca na pokrywę zaworu tłoka;
- z_d - droga pokrywy zaworu tłoka;
- z_{dc} - całkowita droga pokrywy zaworu tłoka.



Rys.Z1.2. Schemat budowy zaworu tłoka.

1. ruchomy cylinder; 2. uszczelka; 3. otwór w tłoku; 4. nieruchomy tłok; 5. pokrywa zaworu; 6. ogranicznik ruchu zaworu; 7. sprężyna zaworu;

F_{d1} - siła parcia SF_6 działająca na powierzchnię górną pokrywę; F_{d3} - siła parcia SF_6 działająca na dodatkową powierzchnię górną pokrywę; G_d - siła ciężkości pokrywę; F_{d2} - siła parcia SF_6 działająca na dolną powierzchnię pokrywę; F_{sd} - siła sprężyny; S_{d1} , S_{d2} - powierzchnia górną, dolną pokrywę zaworu, S_x - powierzchnia dodatkowa pokrywę zaworu. ($S_{dx} + S_{d2} = S_{d1}$).

Prędkość i drogę pokrywy zaworu tłoka, gdy prędkość jest różna od zera, można opisać następującym układem równań:

$$\begin{cases} \frac{dv_d}{dt} = \frac{\sum F_d}{M_{zd}} \\ \frac{dz_d}{dt} = v_d \end{cases} \quad (Z1.24)$$

gdzie:

M_{zd} - masa pokrywy zaworu tłoka;

natomiast powierzchnię wypływu sześćciofluorku siarki ze zbiornika dolnego do bieguna opisuje zależność:

$$\begin{cases} A_d = z_d \cdot Y_d & \text{dla } A_d < A_{do} \\ A_d = A_{do} & \text{dla } A_d \geq A_{do} \end{cases} \quad (Z1.25)$$

gdzie:

A_d - powierzchnia wypływu sześćciofluorku siarki ze zbiornika dolnego cylindra do bieguna;

Y_d - obwód otworu zaworu tłoka .

A_{do} - powierzchnia otworu zaworu tłoka

Wypadkową siłę działającą na pokrywę zaworu tłoka określa wzór:

$$F_d = F_{d1} + F_{d3} + G_d - F_{d2} - F_{sd} \quad (Z1.26)$$

gdzie:

F_{d1} - siła parcia SF_6 działająca na powierzchnię górną pokrywy zaworu tłoka;

F_{d3} - siła parcia SF_6 działająca na dodatkową powierzchnię górną pokrywy zaworu tłoka;

G_d - siła ciężkości pokrywy zaworu tłoka;

F_{d2} - siła parcia SF_6 działająca na dolną powierzchnię pokrywy zaworu tłoka;

F_{sd} - siła sprężyny działająca na powierzchnię dolną pokrywy zaworu tłoka;

przy czym poszczególne czynniki równania (Z1.25) opisują następujące wzory:

$$G_d = M_{zd} \cdot g \quad (Z1.27)$$

$$F_{d1} = p_2 \cdot S_{d1} \quad (Z1.28)$$

$$F_{d3} = S_{dx}(z_d) \cdot p_{sd}(p_2, p_N) \quad (Z1.29)$$

$$F_{d2} = S_{d2} \cdot p_N \quad (Z1.30)$$

$$F_{sd} = a_{sd} \cdot z_d + F_{so} \quad (Z1.31)$$

$$S_{dx} = \begin{cases} 0 & \text{dla } z_d = 0 \\ S_{v1} \cdot z_d & \text{dla } z_d \in (0, 0.05 \cdot z_{dc}) \\ S_{dx} & \text{dla } z_d \in (0.05 \cdot z_{dc}, z_{dc}) \end{cases} \quad (Z1.32)$$

$$S_{v1} = \frac{S_{dx}}{0.05 \cdot z_{dc}} \quad (Z1.33)$$

gdzie

- | | |
|------------------|---|
| S_{d1} | - powierzchnia górna pokrywy zaworu tłoka; |
| S_{dx} | - dodatkowa powierzchnia górna pokrywy zaworu tłoka; |
| p_{sd} | - ciśnienie działające na dodatkową powierzchnię górną pokrywy zaworu tłoka; |
| S_{d2} | - powierzchnia dolna pokrywy zaworu tłoka; |
| a_{sd}, F_{so} | - stała, siła początkowa sprężyny zaworu tłoka; |
| S_{v1} | - współczynnik określający szybkości zwiększania się dodatkowej powierzchni pokrywy zaworu tłoka. |

Górna dodatkowa powierzchnia pokrywy zaworu, gdy zawór tłoka znajduje się w położeniu zamknięcia, ściśle przylega do powierzchni tłoka, ponieważ na pokrywę zaworu działa siła sprężyny. Można zatem przyjąć, że w przypadku gdy zawór tłoka jest zamknięty na powierzchnię tę nie działa żadna siła parcia gazu. Dopiero w chwili gdy zawór zaczyna się otwierać na tę powierzchnię napływa struga gazu wywierając ciśnienie, powstaje dodatkowa siła parcia, która działa tak długo dopóki zawór nie znajdzie się ponownie w położeniu zamknięcia. Należy jednak zaznaczyć, iż w początkowej fazie ruchu pokrywy wypływ gazu z dolnego zbiornika cylindra jest utrudniony ze względu na kształt kanału, przez który ten wypływ się odbywa, natomiast ciśnienie SF_6 wywierające siłę parcia na dodatkową powierzchnię górną pokrywy zaworu tłoka ma war-

tość pośrednią między ciśnieniem gazu w dolnym zbiorniku cylindra i ciśnieniem gazu w biegunie wyłącznika. W związku z tym, podobnie jak w przypadku zaworu cylindra, przyjęto iż:

- powierzchnia dodatkowa pokrywy zaworu w początkowej fazie ruchu zwiększa swoją wartość stopniowo co opisuje powyższy wzór (Z1.33),
- ciśnienie sześćsiofluorku siarki działające na tę powierzchnię ma wartość pośrednią między wartością ciśnienia SF_6 w dolnym zbiorniku cylindra a wartością ciśnienia SF_6 w biegunie wyłącznika – wzór (Z1.29)²⁷.

Ostatecznie zatem natężenie przepływu sześćsiofluorku siarki przez zawór tłoka, uwzględniając iż przepływ SF_6 przez ten zawór może odbywać się w jednym kierunku (co wynika z budowy zaworu i z relacji między wartością ciśnienia gazu w dolnym zbiorniku cylindra i w biegunie ²⁸) opisuje zamieszczony poniżej wzór:

$$m_{nd} = f\left(\frac{p^N}{p^2}\right) \cdot A_d \cdot \mu_{dn} \cdot \sqrt{p^2 \cdot \rho^2} \quad (Z1.34)$$

gdzie:

- μ_{dn} - bezwymiarowy współczynnik oporu przepływu SF_6 z dolnego zbiornika cylindra do bieguna, uwzględniając kształt przewodu jego wartość można szacować jako $\mu_{dn} = 0.8$.

Z.1.3. Przepływ SF_6 przez układ dyszowy

Z.1.3.1. Wprowadzenie

Niniejszy rozdział załącznika został poświęcony przeanalizowaniu warunków przepływu sześćsiofluorku siarki w układzie dyszowym komory gaszeniowej podczas procesu wyłączania prądu, o różnych wartościach, w kolejnych fazach tego procesu oraz określeniu metody wyznaczania podstawowych wiel-

²⁷ Podobnie jak w przypadku zaworu cylindra wykonano obliczenia symulujące dla różnych wartości ciśnienia SF_6 (z przedziału $[p_2, p_N]$) działających na powierzchnię dodatkową jego pokrywy. Nie stwierdzono istotnych różnic w przebiegach obliczonych charakterystyk ruchu pokrywy i wielkości termodynamicznych sześćsiofluorku siarki. Czas przestawiania zaworu tłoka z położenia zamknięcia w położenie otwarcia jest bowiem także bardzo krótki i można go oszacować na 2÷3ms.

²⁸ Podczas normalnej pracy wyłącznika ciśnienie sześćsiofluorku siarki w biegunie ma zawsze wartość niższą od ciśnienia tego gazu w cylindrze; sytuacje awaryjne prowadzące do wzrostu ciśnienia SF_6 występują bardzo rzadko i kończą się poważną awarią wyłącznika[74].

kości fizycznych charakteryzujących ten przepływ gazu ^{Z9}. Zależności opisujące parametry gazu w układzie dyszowym podczas kolejnych etapów działania wyłącznika w trakcie procesu wyłączania prądu stanowią jeden z zasadniczych układów równań wykorzystywanych w metodach symulujących działanie wyłącznika podczas wypełniania przez niego różnorodnych funkcji łączeniowych w systemie elektroenergetycznym. Określenie parametrów gazu w układzie dyszowym, a zwłaszcza natężenia przepływu gazu, umożliwia bowiem wyznaczenie wielkości termodynamicznych SF₆ w tzw. zbiorniku sprężania stanowiących podstawowe parametry służące do oceny działania komory gaszeniowej a często także do określenia wymagań odnośnie napędu wyłącznika. Wynika stąd zatem, że do poprawnego sformułowania metody symulacyjnej niezbędne jest wnikliwe przeanalizowanie zjawisk fizycznych odbywających się w dyszy wyłącznika podczas wyłączania prądów o różnych wartościach.

Z1.3.2. Czynniki decydujące o przepływie sześćciofluorku siarki przez układ dyszowy komory gaszeniowej.

We współczesnych wyłącznikach z sześćciofluorkiem siarki najnowszej, trzeciej generacji, wykorzystujących zjawisko termoeekspansji, we wszystkich punktach bieguna będącego w położeniu zamknięcia ciśnienie gazu jest jednokowe. Dopiero po rozpoczęciu ruchu przez styk ruchomy, spowodowany przez działanie napędu, generowany jest przyrost ciśnienia SF₆ w zbiorniku sprężania wywołujący przepływ sześćciofluorku siarki w komorze gaszeniowej. W pierwszym etapie działania komory gaszeniowej, zwanym etapem wstępnego sprężania, wzrost ciśnienia sześćciofluorku siarki odbywa się na skutek zmniejszania się objętości dolnego zbiornika cylindra kosztem pracy napędu wyłącznika. Wypływ gazu ze zbiornika sprężania jest niemożliwy ponieważ przekroje krytyczne dyszy głównej oraz dyszy pomocniczej są zablokowane przez styk stały opalny. W dyszy głównej istnieje wprawdzie niewielka nieszczelność, między ścianką wewnętrznego otworu tej dyszy a boczną ścianą styku opalnego stałego, ale można szacować ją zaledwie na około 8÷10% przekroju krytycznego tej dyszy.

^{Z9} Biorąc pod uwagę fakt, że zjawiska związane z przepływem sześćciofluorku siarki przez dwustrumieniowy układ dyszowy są złożone i zmieniają się w kolejnych fazach procesu wyłączania prądu zagadnienie to zostało szczegółowo przeanalizowane w następujących pracach autora [133,134,137,145] (wykorzystano w nich inne istotne publikacje dotyczące tego problemu np. [4,10,17,18,32,36,37,46,54,58,65,79,85,93,94,95,155]). Opierając się na wynikach tych prac autora w niniejszej rozprawie zostaną przytoczone jedynie najważniejsze sformułowane wnioski i wyprowadzone zależności opisujące charakterystyczne parametry przepływu SF₆.

W wyłączniku trzeciej generacji podczas trwania tego etapu następuje otwarcie zaworu cylindra, a następnie przepływ gazu z dolnej części cylindra do jego górnego zbiornika o stałej objętości, czego konsekwencją jest praktyczne wyrównanie ciśnienia SF_6 w obu zbiornikach. Wówczas następuje także zmniejszenie szybkości narastania ciśnienia spiętrzenia co jest spowodowane zdecydowanym zwiększeniem się całkowitej objętości cylindra mającego górny zbiornik o stałej objętości.

W następnym etapie działania komory, zwanym etapem przejściowym (porównaj z rysunkiem 3^{Z10}), którego początkiem jest otwarcie zestyku opalnego (w chwili tej następuje także zapłon łuku elektrycznego), rozpoczyna się przepływ gazu przez dyszę pomocniczą, którą stanowi wewnętrzny otwór styku ruchomego opalnego oraz połączona z nim długa tuleja pośrednicząca. Przepływ gazu przez tę dyszę ma istotne znaczenie dla przebiegu procesu wyłączania prądu, co szczegółowo wyjaśniono w punkcie 2.1 głównej części pracy. Należy zaznaczyć że procesy fizyczne towarzyszące przepływowi SF_6 przez część wylotową dyszy pomocniczej, której zasadniczą część stanowi wewnętrzny otwór bardzo długiej tulei pośredniczącej o praktycznie stałej powierzchni przekroju (porównaj rysunek 3^{Z10}), nie mają już istotnego wpływu na przebieg procesu odbierania energii z kolumny łukowej, ponieważ jak powiedziano to wyżej stopa łukowa jest umieszczona w bezpośrednim sąsiedztwie wlotu dyszy, co zostało stwierdzone w licznych badaniach wyłączników prototypowych, także przez autora rozprawy (porównaj z fotografiami zamieszczonymi w 3 rozdziale głównej części pracy) [13,35,92,93,95,123,128,129].

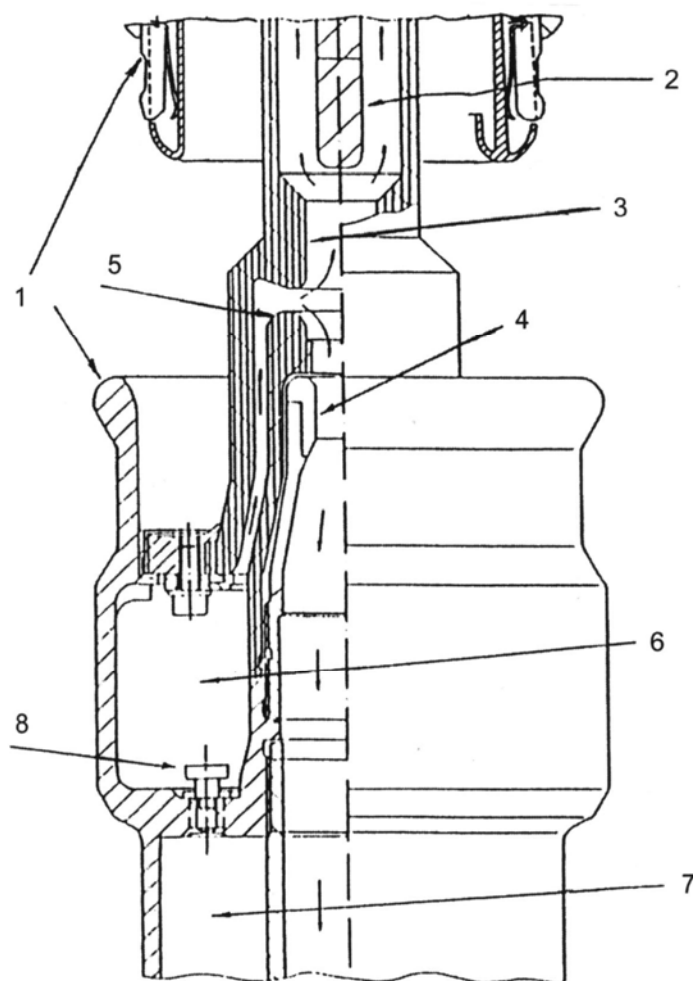
Natężenie przepływu gazu przez dyszę pomocniczą (przy założeniu, iż traktujemy ją jako dyszę rozbieżną - co ze względu na jej kształt i całkowitą długość jest w pełni uzasadnione) jest uzależnione od: jej powierzchni przekroju wlotowego, który jest równocześnie przekrojem krytycznym (czyli najmniejszym), relacji między wartością ciśnienia SF_6 we wlocie dyszy pomocniczej a wartością ciśnienia tego gazu w dolnej części bieguna oraz od parametrów spiętrzenia gazu. Prędkość przepływu gazu w części wylotowej dyszy pomocniczej, której długość może dochodzić do przeszło 600 mm (przy średnicy wewnętrznej wynoszącej 35÷45 mm) ulega istotnemu zmniejszeniu. W tej części dyszy pomocniczej powstaje także warstwa przyścienna na skutek działania sił tarcia. Można zatem przyjąć [32,145], że przepływ gazu w dolny obszar bieguna wyłącznika ma charakter poddźwiękowy. W związku z takim charakterem przepływu, istnieniem warstwy przyściennej oraz znaczną długością części wylotowej dyszy następuje zmniejszenie natężenia przepływu sześćofluorku siarki,

Z10

Rysunek jest zamieszczony w punkcie 2.1 głównej części pracy.

konieczne jest zatem przyjęcie współczynnika korygującego wartość natężenia przepływu^{Z11}.

Kolejnym, jednocześnie najdłuższym etapem działania komory gaszeniowej wyłącznika wysokonapięciowego z sześćciofluorkiem siarki jest etap wypływu dwukierunkowego. Sześćciofluorek siarki wypływa wówczas ze zbiornika sprężania do górnego obszaru bieguna przez dyszę główną, natomiast w jego dolną część przez dyszę pomocniczą. Etap ten rozpoczyna się w chwili całkowi-



Rys Z.1.3 Układy dyszowy i stykowy wyłącznika trzeciej generacji produkcji krajowej.

1. zestaw główny; 2. styk stały opalny; 3. izolacyjna dysza główna; 4. styk ruchomy opalny; 5. izolacyjna osłona styku opalnego ruchomego; 6. górny zbiornik cylindra o stałej objętości; 7. dolny zbiornik cylindra o zmiennej objętości; 8. zawór cylindra.

^{Z11} Współczynnik ten nosi nazwę bezwymiarowego współczynnika oporów przepływu gazu a jego wartość dla przepływu gazu przez dyszę pomocniczą można oszacować jako $\mu_{pn} = 0.6 \div 0.65$, [32, 145].

tego odblokowania przekroju krytycznego dyszy głównej ^{Z12} i trwa praktycznie do końca działania komory gaszeniowej, czyli znacznie dłużej niż ruch styków. Wcześniej także, w przypadku normalnej pracy wyłącznika, zawsze następuje wyłączenie prądu. Podczas tego etapu działania komory gaszeniowej bardzo istotną rolę pełni izolacyjna dysza główna co szczegółowo przeanalizowano w punkcie 2.2 głównej części pracy. Z analizy tej wynika generalny wniosek, że podczas wszystkich faz procesu wyłączania prądu zjawiska fizyczne odbywające się w dyszy głównej mają bardzo duży wpływ na działanie wyłącznika. Istotne jest więc opracowanie metody umożliwiającej wyznaczenie parametrów przepływu sześćciufluorku siarki przez tę dyszę. Należy przypomnieć iż przebieg zjawisk fizycznych występujących w komorze gaszeniowej podczas etapu wpływu dwukierunkowego bardzo silnie zależy od wartości i kształtu wyłączanego prądu, a ponadto w przypadku wyłączania dużych prądów zwarciovych większych od około $0.55 \div 0.65 \times I_{ws}$ (gdzie I_{ws} - znamionowy symetryczny wyłączalny prąd wyłącznika), przebieg tego etapu jest bardzo silnie uzależniony od zjawisk termoexpansji i ablacji materiałów izolacyjnych elementów układu dyszowego komory gaszeniowej. W rozdziale 2 głównej części pracy wykazano, iż można wyróżnić następujące charakterystyczne przypadki pracy wyłącznika trzeciej generacji (podczas każdego z tych przypadków odmienny przebieg ma etap wpływu dwukierunkowego):

- wyłączanie prądów roboczych - obciążenia, prądów pojemnościowych, prądów indukcyjnych;
- wyłączanie prądów zwarciovych;
- wyłączanie prądów zwarciovych o wartości zbliżonej do znamionowego prądu wyłączalnego wyłącznika (większych od około $0.55 \div 0.65 \times I_{ws}$).

Należy także bardzo mocno podkreślić, że na przepływ sześćciufluorku siarki przez układ dysz bardzo duży wpływ mają procesy falowe. Cechą charakterystyczną wyłącznika z sześćciufluorkiem siarki jest ciągła zmiana wartości ciśnienia spiętrzenia podczas przestawiania wyłącznika ze stanu zamknięcia w położenie otwarcia. Po rozpoczęciu ruchu przez styk ruchomy ciśnienie SF_6 zawartego w zbiorniku sprężania zaczyna narastać i w praktyce, gdy jest prawidłowo dobrany przebieg siły napędu do sił oporowych występujących w komorze gaszeniowej, ciśnienie spiętrzenia zaczyna dopiero zmniejszać swoją wartość gdy styk znajdzie się w strefie działania amortyzatorów. Zdecydowane obniżenie wartości tego ciśnienia następuje gdy spełnione są dwa warunki:

- styk zakończy swój ruch i znajduje się w położeniu całkowitego otwarcia;

^{Z12}

W rzeczywistych wyłącznikach - porównaj z rysunkiem Z.1.3 - zwykle przekrój krytyczny dyszy głównej (zwany także gardzielą) ma kształt wydłużonego cylindra o stałej powierzchni przekroju, którego długość wynosi około 30÷35 mm.

- nastąpiło prawidłowe wyłączenie prądu.

Wówczas po upływie kilku milisekund ciśnienie w sześćciofluorku siarki w zbiorniku sprężania osiągnie wartość równą ciśnieniu SF₆ w biegunie co oznacza, iż kończą się wszystkie procesy przepływu gazu w komorze gaszeniowej.

W związku z takim charakterem zmian ciśnienia spiętrzenia SF₆ zmienia się także ciśnienie tego gazu we wlocie dyszy głównej a także w jej przekroju wylotowym. Natomiast czynnikiem decydującym o powstaniu i charakterze zjawisk falowych w układzie dyszowym komory gaszeniowej jest relacja między wartością ciśnienia sześćciofluorku siarki w biegunie wyłącznika a wartością ciśnienia tego gazu w przekroju wylotowym dyszy.

Opierając się na pracach [32, 34, 126, 145] można stwierdzić, że zjawiska falowe w przepływie przez dyszę zbieżno-rozbieżną, za jaką powszechnie uważana jest dysza główna, nie powstają jedynie w jednym przypadku, gdy ciśnienie SF₆ w przekroju wylotowym dyszy jest równe ciśnieniu SF₆ występującym bezpośrednio za wylotem tej dyszy czyli gdy:

$$p_{wyl} = p_0 \quad (Z.1.35)$$

gdzie:

- p_{wyl} - ciśnienie SF₆ w przekroju wylotowym dyszy głównej;
- p_0 - ciśnienie SF₆ w biegunie wyłącznika.

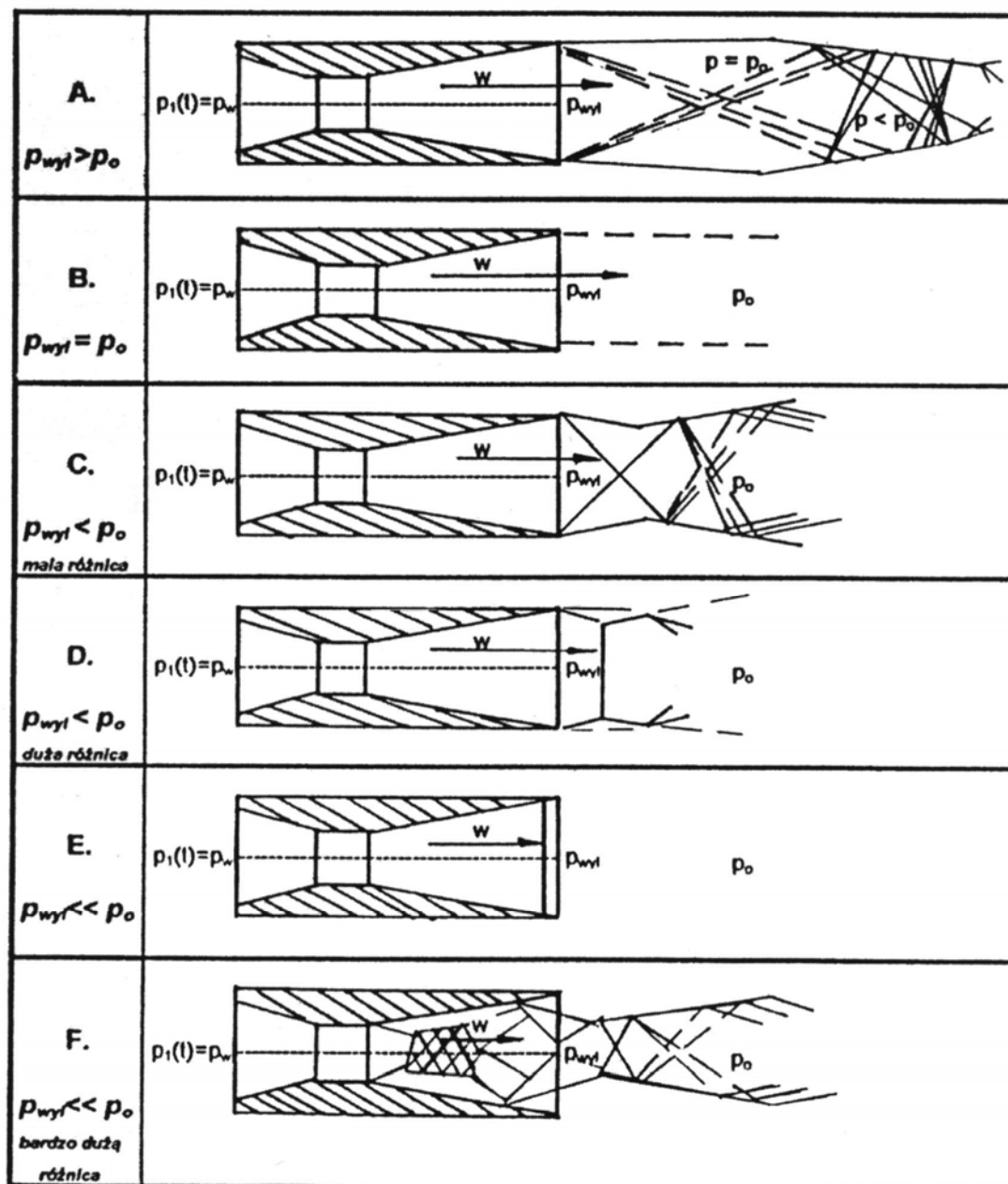
Natomiast gdy powyższy warunek (Z.1.35) nie jest spełniony powstają procesy falowe (porównaj z rysunkiem Z.1.4), przy czym ich charakter jest zależny od relacji między ciśnieniem p_{wyl} a ciśnieniem p_0 . Można wyodrębnić następujące charakterystyczne przypadki:

- $p_{wyl} > p_0$ - we wnętrzu dyszy przepływ gazu jest laminarny, natomiast za wylotem dyszy tworzą się fale rozrzedzeniowe; (rys.5a);
- $p_{wyl} < p_0$ - we wnętrzu dyszy przepływ gazu jest laminarny, natomiast za wylotem dyszy tworzą się: - gdy różnica między wartością ciśnienia jest mała - skośne fale uderzeniowe, natomiast gdy różnica jest znaczna - skośne fale uderzeniowe z odbiciem (rys.5c, d);
- $p_{wyl} \ll p_0$ - gdy różnica między wartością ciśnienia jest bardzo duża - we wnętrzu dyszy przepływ gazu jest nadal laminarny, natomiast w wylocie dyszy tworzy się prostopadła fala uderzeniowa; przy dalszym zmniejszaniu się wartości ciśnienia gazu w wylocie dyszy prostopadła fala uderzeniowa przesuwana się do wnętrza dyszy ^{Z13}; w granicznym

^{Z13}

W przypadku gdy w części wylotowej dyszy głównej powstaje prostopadła fala uderzeniowa to wówczas za jej czołem następuje skokowa zmiana parametrów przepływu sześćciofluorku siarki: zdecydowany wzrost ciśnienia gazu oraz gwałtowne obniżenie prędkości gazu.

przypadku czoło fali tworzy się w przekroju krytycznym dyszy; wówczas zanika przepływ naddźwiękowy w dyszy a w jej części wylotowej następuje stopniowy wzrost ciśnienia czemu towarzyszy zmniejszenie się prędkości przepływającego gazu (rys.5e,f).



Rys.Z.1.4. Zjawiska falowe w zbieżno-rozbieżnej dyszy w zależności od relacji między wartością ciśnienia gazu w przekroju wylotowym dyszy a wartością ciśnienia gazu za wylotem dyszy [32].

W pracach [122,125] autor niniejszej rozprawy dokonał szczegółowej analizy zjawisk falowych powstających w układzie dyszowym wysokonapięciowego wyłącznika z SF₆ podczas procesu wyłączania prądu i na tej podstawie sformułowano następujące wnioski:

- warunkiem uniknięcia powstania zjawisk falowych we wnętrzu dyszy głównej jest wytworzenie odpowiednio dużej wartości ciśnienia SF₆ we wlocie dyszy; na podstawie analizy wymiarów komory gaszeniowej wyłącznika można stwierdzić, iż w chwili zakończenia etapu wstępnego sprężania (zakładając, że wypływ gazu przez układ dyszowy w tym etapie praktycznie nie istnieje) ciśnienie w zbiorniku sprężania może osiągnąć wartość wynosząca około $1.5 \times p_0$, a w kolejnych etapach działania komory gaszeniowej następuje dalszy wzrost tego ciśnienia; wykorzystując równania na prawo zachowania masy oraz prawo zachowania energii przeprowadzono szacunkowe obliczenia, na podstawie których stwierdzono, iż procesy falowe we wnętrzu dyszy głównej zanikają gdy wartość ciśnienia we wlocie dyszy osiągnie $1.7 \div 1.8 \times p_0$; wynika to stąd, iż procesy falowe w części wylotowej dyszy głównej powstają jedynie na początku etapu wypływu dwukierunkowego^{Z14};
- na wartość ciśnienia SF₆ w przekroju wylotowym dyszy głównej istotny wpływ ma także kształt jej części rozbieżnej (zwłaszcza kąt rozwarcia); w dyszy o dużym kącie rozwarcia następuje bowiem szybkie rozprężanie gazu co powoduje bardzo znaczne obniżenie wartości jego ciśnienia (poniżej wartości jaką ma sześćciofluorek siarki w biegunie); w związku z tym w rzeczywistych wyłącznikach (porównaj rysunek Z.1.3) stosowana jest zwykle dysza główna o bardzo małym kącie rozwarcia (często kąt ten jest równy zero); ponadto styk stały opalny jest wprowadzony do wnętrza rozbieżnej części dyszy a zatem obszar, w którym najczęściej powstają procesy falowe jest znacznie oddalony od przerwy międzystykowej;
- zjawiska falowe powstają także w części wylotowej dyszy pomocniczej ale nie mają one dużego wpływu na proces gaszenia łuku elektrycznego, ponieważ powodują zmniejszenie prędkości przepływu gazu w strefie daleko położonej od kanału łukowego (natomiast wpływ zjawisk falowych na ograniczenie natężenia przepływu SF₆ uwzględnia się przez wprowadzenie bezwymiarowego współczynnika oporu przepływu).

Z14

Nie oznacza to oczywiście, że przepływ gazu w całym biegunie jest laminarny, gdyż w dalszym ciągu tworzą się fale w obszarze położonym za wylotem dyszy głównej.

Z1.3.3. Przepływ sześćfluorku siarki przez układ dyszowy podczas wyłączania prądów roboczych

Prądy robocze wyłącznika w porównaniu do jego znamionowego prądu wyłączalnego, mają zdecydowanie mniejszą wartość - maksymalne prądy obciążenia występujące w krajowym systemie elektroenergetycznym osiągają wartość rzędu 3150÷4000 [A], natomiast prądy indukcyjne i pojemnościowe wynoszą od kilkudziesięciu do kilkuset amperów. W związku z tym średnica kolumny łukowej jest zdecydowanie mniejsza od średnicy przekroju krytycznego dyszy, a zatem istnieją dwie strefy przepływu gazu zarówno w dyszy głównej jak i pomocniczej [17,34,41,49, 89,94,143,180]:

- strefa łukowa, gdzie zjonizowany gaz osiąga temperaturę rzędu 20000÷23000 [K], gęstość około $7.0 \div 8.2 \cdot 10^{-2}$ [kg/m³] - co jest w znaczącym stopniu zależne od ciśnienia gazu oraz osiowej prędkości w przekroju krytycznym dyszy głównej 3300 ÷ 3700 [m/s];
- otaczająca kanał łukowy strefa gazu zimnego, o temperaturze 300 [K], gęstości rzędu 6.16 [kg/m³] i osiowej prędkości w przekroju krytycznym dyszy głównej około 200 [m/s] [50,53,54,96,97].

W przypadku gdy wyłączane są prądy robocze zjawisko termoeekspansji nie występuje a ablacja materiału, z dwóch wykonanych z materiału izolacyjnego elementów układu dyszowego (dyszy głównej i specjalnej osłony styku ruchomego) jest znikoma, ze względu zarówno na niewielką energię łuku jak i na znaczną odległość kanału łukowego od wewnętrznych ścianek dyszy głównej oraz osłony styku. Zatem w tym przypadku formułując zależności opisujące przepływ SF₆ przez układ dyszowy można pominąć wpływ zarówno zjawiska termoeekspansji jak i ablacji a w związku z tym natężenie wypływu sześćfluorku siarki z cylindra, zgodnie z prawem zachowania masy opisane, jest zależnością:

$$m_{w1} = m_{gc} + m_{gA} + m_{pc} + m_{pA} \quad (Z1.36)$$

gdzie:

- | | |
|------------------|---|
| m_{w1} | - całkowite natężenie wypływu SF ₆ ze zbiornika sprężania; |
| m_{gc}, m_{pc} | - natężenie przepływu SF ₆ przez strefę gazu zimnego w dyszy głównej; pomocniczej; |
| m_{gA}, m_{pA} | - natężenie przepływu SF ₆ przez kolumnę łukowa w dyszy głównej; pomocniczej. |

Natężenie przepływu SF_6 - m_w można opisać następującym ogólnym wzorem:

$$m_w = A \cdot \rho \cdot w \quad (\text{Z1.37})$$

gdzie:

- A - powierzchnia kanału, przez który odbywa się przepływ SF_6 ;
- ρ - gęstość SF_6 w strefie przepływu;
- w - osiowa prędkość SF_6 w strefie przepływu.

Analizując warunki przepływu gazu w przekrojach krytycznych obu stosowanych w komorze gaszeniowej dysz stwierdzono, że ze względu na bardzo niską wartość gęstości sześćfluorku siarki w strefie łukowej (np.: $\rho_A = 8.2 \cdot 10^{-2} \text{ [kg/m}^3\text{]}$ przy $T_A = 20000 \text{ [K]}$) natężenie przepływu przez obszar kolumny łukowej jest wielokrotnie mniejsze od natężenia przepływu gazu przez strefę gazu zimnego ^{Z15}. W związku z tym postanowiono w obliczeniach mających na celu określenie natężenia wypływu gazu ze zbiornika sprężania pominąć przepływ gazu przez strefę kolumny łukowej; a w związku z tym równanie (Z.1.36) przekształca się do następującej postaci:

$$m_{w1} = m_{gc} + m_{pc} \quad (\text{Z1.38})$$

Po szczegółowym przeanalizowaniu zjawisk odbywających się w układzie dyszowym podczas fazy silnoprądowej procesu wyłączania prądu można sformułować następujące założenia upraszczające ^{Z16}:

- przepływ w dyszy przez strefę gazu zimnego ma charakter izotermiczny; jest bowiem mało prawdopodobne aby gaz płynący w sąsiedztwie łuku elektrycznego, wewnątrz którego istnieje bardzo wysoka temperatura ulegał chłodzeniu na skutek rozprężania;
- temperatura plazmy rdzenia łuku elektrycznego jest stała, gdyż łuk palący się w sześćfluorku siarki ma zwarty rdzeń o stosunkowo małej średnicy a dysocjacja gazu rozpoczyna się już przy bardzo niskiej temperaturze;

^{Z15} Jeśli założyć, iż powierzchnia przekroju kolumny łukowej i powierzchnia przepływu gazu w strefie gazu zimnego są jednakowe to natężenie przepływu w kolumnie łukowej (mimo zasadniczej różnicy pomiędzy prędkościami gazu w obu strefach - prędkość SF_6 w kolumnie łukowej wynosi około $w_A = 3300 \text{ [m/s]}$ natomiast strefie gazu zimnego jest rzędu $w_c = 200 \text{ [m/s]}$) stanowi zaledwie 5% natężenia przepływu sześćfluorku siarki przez strefę gazu zimnego

^{Z16} W pracach poświęconym analizie zjawisk w układzie dyszowym wyłącznika z SF_6 podczas wyłączania prądów o dużych wartościach przyjmowanie są bardzo często podobne uproszczenia np.: [2,4,12,17,38,41,46,54,64,89,91,93,94,111,160,167,177].

- przepływ gazu w kierunku promieniowym jest wielokrotnie mniejszy od przepływu w kierunku osiowym; co jest związane z konstrukcją układu dyszewnego między wlotem i wylotem dyszy głównej istnieje bowiem bardzo duża różnica ciśnienia SF_6 co wymusza bardzo silny osiowy przepływ gazu; należy zaznaczyć, iż przyjęcie powyższego uproszczenia jest równoznaczne z założeniem, iż ciśnienie sześćciofluorku siarki w obu strefach przepływu istniejących w dyszy ma w kolejnych przekrojach (prostopadłych do osi dyszy) tę samą wartość;
- przepływ sześćciofluorku siarki we wnętrzu dyszy głównej, podczas najdłuższego etapu działania komory gaszeniowej czyli wypływu dwukierunkowego, jest procesem quasi ustalonym (a zatem $\partial[f(t)] / \partial t = 0$); przyjmując rzeczywiste wymiary układu gaszeniowego można bowiem oszacować, że procesy falowe wywołane pojawiającej się w dyszy kolumny łukowej zanikają po czasie rzędu $50\mu\text{s}$.

Po przyjęciu powyższych założeń możliwe jest określenie rozkładu parametrów termodynamicznych sześćciofluorku siarki wzdłuż osi dyszy na podstawie analizy przepływu SF_6 w strefie gazu zimnego. Wykorzystując prawo ciągłości przepływu, prawo zachowania pędu oraz postać różniczkową prawa gazu doskonałego dla przepływu izotermicznego w artykule [145] autor wyprowadził wzory opisujące:

- rozkład liczby Macha wzdłuż osi dyszy głównej:

$$\frac{A_k}{A_{wg}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\right) = M \cdot \exp\left(-\frac{M^2}{2}\right) \quad (\text{Z1.39})$$

- rozkład ciśnienia sześćciofluorku siarki wzdłuż osi dyszy głównej:

$$\exp\left(-\frac{M^2(z)}{2}\right) = \frac{p(z)}{p_w} \quad (\text{Z1.40})$$

- ciśnienie SF_6 w przekroju krytycznym dyszy^{Z17}, (uwzględniając, że wówczas liczba Macha jest równa jedności $M = 1$):

$$p_{kt} = 0.606 \times p_w \quad (\text{Z1.41})$$

^{Z17} W przypadku gdy zostanie przyjęte założenie, iż przepływ w dyszy głównej ma charakter izentropowy, to ciśnienie SF_6 w przekroju krytycznym dyszy głównej wynosi $p_{kz} = 0.59 \times p_w$ (przyjmując, że wartość wykładnika izentropii dla SF_6 jest zawarta w granicach $k = 1.08 \div 1.09$) [50, 53, 54, 96, 97]. Widać zatem, iż założenie określonego charakteru przepływu nie ma decydującego wpływu na parametry gazu w dyszy.

- całkowite natężenie wypływu SF_6 - m_w , ze zbiornika sprężania przez dyszę główną i pomocniczą:

$$m_w = f\left(\frac{p^N}{p_1}\right) \cdot \sqrt{p_1 \cdot \rho_1} \cdot (\mu_{gn} \cdot A_{wg} + \mu_{pn} \cdot A_{wp}) \quad (\text{Z1.42})$$

gdzie:

A_k	- powierzchnia przepływu gazu w przekroju krytycznym dyszy;
A_{wg}, A_{wp}	- powierzchnia przepływu gazu w strefie gazu zimnego, odpowiednio w dyszy głównej, dyszy pomocniczej
M	- liczba Macha;
Z	- odległość od początku dyszy;
$p(z)$	- rozkład ciśnienie wzdłuż osi dyszy;
p_w	- ciśnienie we wlocie dyszy
p_{kt}, p_{kt}	- ciśnienie w przekroju krytycznym dyszy dla przepływu odpowiednio izotermicznego, izentropowego;
p_1, ρ_1	- ciśnienie, gęstość SF_6 , w górnym zbiorniku cylindra;
μ_{gn}, μ_{pn}	- bezwymiarowy współczynnik oporu przepływu SF_6 ; odpowiednio przez dyszę główną, pomocniczą.

Należy przypomnieć (mówiono już o tym w punkcie 1.2 głównej części pracy), iż obecnie istnieją metody obliczeniowe umożliwiające określenie w dwustrumieniowym układzie dyszowym komory gaszeniowej bardzo dokładnego rozkładu wielkości termodynamicznych gazu np.: ciśnienia, gęstości, prędkości [15,16,30,65,108,116]. Konieczne jest jednak w takim przypadku rozwiązanie układu równań różniczkowych cząstkowych opisujących prawo zachowania energii, prawo zachowania ciągłości przepływu oraz prawo zachowania pędu (zwykle wykorzystywane są w tym celu komercyjne programy komputerowe) i bardzo precyzyjne określenie warunków brzegowych, które jak wiadomo podczas całego ruchu otwierania stale ulegają zmianie. Należy bardzo silnie podkreślić, że w przypadku prowadzenia obliczeń symulujących działanie całego wyłącznika (komory, gaszeniowej, napędu, układu kinematycznego) byłoby jednakże bardzo trudno wykorzystywać powyższe równania dynamiki gazów do wyznaczenia natężenia wypływu sześćfluorku siarki ze zbiornika cylindra. Z drugiej jednak strony należy zaznaczyć, iż dzięki prowadzeniu takich obliczeń można zoptymalizować kształt wszystkich kanałów (oczywiście łącznie z obiema dyszami) przez które odbywa się przepływ gazu. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie przepływu laminarnego bez zawirowań, zjawisk falowych, obszarów nieciągłości czy miejsc gdzie w sposób gwałtowny obniża się wartość gęstości gazu, a wszystkie wymienione tu zjawiska mogą w sposób bardzo znaczący wpływać na obniżenie wytrzymałości dielektrycznej przerwy międzystykowej.

Z1.3.4. Przepływ sześćciofluorku siarki przez układ dyszowy podczas wyłączania prądów zwarciovych.

Podczas fazy silnoprądowej procesu wyłączania prądu przez wyłącznik z sześćciofluorkiem siarki głównym mechanizmem odprowadzania energii z kolumny łukowej jest konwekcja osiowa, przy czym ze względu na bardzo wysoką temperaturę plazmy łukowej istotną rolę w tym procesie odgrywa również promieniowanie. Znaczna część energii odprowadzanej z łuku elektrycznego na drodze promieniowania jest pochłaniana przez ściany wewnętrznych otworów: izolacyjnej dyszy głównej oraz izolacyjnej styku ruchomego opalnego, czego efektem jest parowanie teflonu ze ścianek tych elementów.

W artykule [145] autor niniejszego opracowania wykorzystując równanie opisujące bilans moc odprowadzanej z jednostki długości łuku wyprowadził przybliżoną zależność opisującą lokalny wzrost ciśnienia w obszarze przekroju krytycznego dyszy głównej wywołany ablacją politetrafluoroetyleny PTFE popularnie nazywany teflonem - materiału z wewnętrznej ścianki tej dyszy. Wartość tego przyrostu ciśnienia opisuje następująca zależność:

$$\Delta p_a = \frac{1}{h_t} \cdot g \cdot \frac{i^2}{\sigma_A \cdot A_A^2} \cdot \varphi(A) \cdot \lambda \cdot a_A \cdot l_{kg} \quad (Z1.42)$$

przy czym:

$$W_t = g \cdot \frac{i^2}{\sigma_A \cdot A_A} \quad (42)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{B_m \cdot T_t}{m_t}} \cdot \sqrt{\frac{m_A}{B_m \cdot T_A}} \quad (49)$$

$$\varphi(A) = \frac{A_A}{A_{kg}} \quad (44)$$

gdzie:

- ρ_t - gęstość par teflonu;
- w_t - osiowa prędkość par teflonu ;
- A_{kg} - powierzchnia przekroju krytycznym dyszy głównej.

gdzie:

- B_m - uniwersalna stała gazowa;

- m_t - średnia masa cząsteczki par teflonu;
 m_A - średnia masa cząsteczki SF_6 w strefie łukowej⁴⁶;
 T_t - średnia temperatura par teflonu;

gdzie:

- ϑ - współczynnik, odniesiony do jednostki długości łuku, określający relację między całkowitą mocą wydzielającą się w łuku, a mocą promieniowania powodującą parowanie materiału dyszy; zwykle przyjmuje się, iż $\vartheta = 0.32 \div 0.35 [-]$ ⁴⁷.

gdzie:

- Δp_a - lokalny przyrost ciśnienia w obszarze przekroju krytycznego dyszy głównej spowodowany ablacją teflonu (PTFE)
 λ - stosunek prędkości dźwięku dla par teflonu i zjonizowanego sześćiofluorku siarki.
 a_A - prędkość dźwięku SF_6 w strefie kolumny łukowej.
 ρ_t - gęstość par teflonu;
 w_t - osiowa prędkość par teflonu ;
 A_{kg} - powierzchnia przekroju krytycznym dyszy głównej.
 l_{kg} - długość przekroju krytycznego (gardzieli) dyszy głównej.
 B_m - uniwersalna stała gazowa;
 m_t - średnia masa cząsteczki par teflonu;
 m_A - średnia masa cząsteczki SF_6 w strefie łukowej⁴⁸;
 T_t - średnia temperatura par teflonu;

Oprócz zjawiska ablacji istnieje także drugi czynnik powodujący lokalny wzrost ciśnienia w obszarze przekroju krytycznego dyszy głównej. Czynnikiem tym jest tzw. ciśnienie elektrodynamiczne w łuku powstające wskutek zjawiska "pinch-effect'u"⁴⁹ wywołanego przez wewnętrzne pole magnetyczne kanału łukowego powstałe przez skierowany przepływ ładunków. Wartość ciśnienia elektrodynamicznego można oszacować wykorzystując następującą zależność [25,40]:

$$\Delta p_m = \frac{\mu_0}{\pi^2} \cdot \left(\frac{i}{d_A} \right)^2 \quad (51)$$

⁴⁶ Na podstawie danych zawartych w pracy [34] można oszacować, iż $m_A = 10 m_o$, natomiast $m_t = 36 m_o$, gdzie m_o - średnia masa atomowa ($m_o = 1.67 \cdot 10^{-27}$ [kg]).

⁴⁷ W pracach [24,27,28,34] wykazano, iż znaczna część energii promieniowanej z centralnych części rdzenia łukowego jest pochłaniana przez jego warstwy zewnętrzne.

⁴⁸ Na podstawie danych zawartych w pracy [34] można oszacować, iż $m_A = 10 m_o$, natomiast $m_t = 36 m_o$, gdzie m_o - średnia masa atomowa ($m_o = 1.67 \cdot 10^{-27}$ [kg]).

⁴⁹ Zjawisko pinch-effectu jest nazywane w języku polskim skurczem magnetycznym lub przewężeniem magnetofluidodynamicznym.

gdzie:

- Δp_m - lokalny przyrost ciśnienia w obszarze przekroju krytycznego dyszy spowodowany zjawiskiem "pinch-effect" u";
- μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m])
- d_A - średnica kolumny łukowej.

W pracy [37] wyprowadzono zależność opisującą średnicę kolumny łukowej w przekroju krytycznym dyszy w następującej postaci:

$$d_A = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{(l_A)^{\frac{1}{4}}}{(\sigma_A \cdot h_A \cdot a_A \cdot \rho_A)^{\frac{1}{4}}} \cdot (i)^{\frac{1}{2}} \quad (52)$$

gdzie:

- l_A - długość wlotowej części dyszy;

Opierając się na wynikach prac [15,17,20,21,27,28] oraz [30÷35] można założyć, iż temperatura w kolumnie łukowej wynosi około $T_A = 20000 \div 23000$ [K], natomiast wartość ciśnienia SF_6 w obszarze przekroju krytycznego dyszy podczas wyłączania prądów o wartości $I_s = 1 \div 20$ [kA] zawarta jest w granicach $p_k = 1.0 \div 1.2$ [MPa]. Dla takich wartości ciśnienia i temperatury SF_6 występujących w strefie kolumny łukowej, można przyjąć, iż wartości własności sześćciofluorku siarki wynoszą odpowiednio [18,19,37]:

- przewodności elektryczna około $\sigma_A = 105 \div 130 \cdot 10^2$ [1/Ωm];
- osiowa prędkość gazu $a_A = 3300 \div 3700$ [m/s];
- gęstość $\rho_A = 8.2 \div 7.0 \cdot 10^{-2}$ [kg/m³]⁵⁰;
- entalpia właściwa $h_A = 96 \div 125 \cdot 10^6$ [J/kg].

⁵⁰

Ze wzrostem temperatury plazmy łukowej następuje zmniejszenie gęstości sześćciofluorku siarki.

Tabela 1.

Wartości lokalnego przyrostu ciśnienia SF_6 w obszarze przekroju krytycznego dyszy głównej wywołane ablacją teflonu oraz zjawiskiem "pinch-effect" u" podczas wyłączania prądów z zakresu $I_s = 1 \div 20$ [kA]⁵¹.

Prąd wartość Skuteczna [kA]	1	2	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20
średnica łuku d_A [mm]	4.8	6.8	8.3	9.6	11.8	13.6	15.1	16.6	18.0	19.2	20.4 20.0*	21.5 20.0*
przyrost ciśnienia wywołany "pinch-effect" em"; Δp_m [MPa] średnica dyszy $d_d = 28$ [mm]	0.01	0.02	0.03	0.05	0.06	0.09	0.11	0.14	0.15	0.18	0.195 0.20**	0.225 0.25**
przyrost ciśnienia wywołany ablacją Δp_a [MPa] $d_d = 28$ [mm]	0.06	0.08	0.10	0.11	0.13	0.16	0.18	0.20	0.21	0.24	0.248	0.257
$d_d = 20$ [mm]	0.08	0.12	0.15	0.16	0.20	0.23	0.36	0.29	0.33	0.36	0.44	0.48
* w rzeczywistych wyłącznikach z trzeciej generacji średnica gardzieli dyszy głównej wynosi około 20 mm, a zatem w przypadku prądów o dużych wartościach także kolumna łukowa ograniczona przez ścianki otworu wewnętrznego tej dyszy ma taką samą średnicę.												
** obliczony przyrost ciśnienia wywołany "pinch-effect" em" Δp_m przy założeniu, iż kolumna łukowa jest ograniczona przez ścianki gardzieli dyszy głównej, której średnica wynosi 20 mm.												

Dla tych wartości własności sześćfluorku siarki, przyjmując ponadto, iż długość wlotowej części dyszy wynosi około $l_A = 0.05$ [m] obliczono wartość średnicy kolumny łukowej dla prądów z zakresu $I_s = 1 \div 20$ [kA], wyniki zestawiono w tabelicy 1. W tabelicy tej zestawiono także wartości lokalnego przyrostu ciśnienia sześćfluorku siarki wywołane ablacją oraz zjawiskiem "pinch-effect" u" przyjmując dodatkowo, iż :

- długość gardzieli dyszy $l_{kg} = 0.04$ [m];
- entalpia właściwa par teflonu $h_t = 12.0 \cdot 10^6$ [J/kg].

Analizując wyniki obliczeń lokalnego przyrostu ciśnienia SF_6 zamieszczone w tabelicy 1 można sformułować następujące wnioski :

- podczas wyłączania prądów roboczych z zakresu $1 \div 4$ [kA] przyrost ciśnienia SF_6 spowodowany zjawiskiem "pinch-effect" u" jest bardzo mały (nie przekracza 0.05 [MPa] w okolicach maksimum półfali prądu), za-

51

Obliczenia wykonano dla wartości szczytowych prądów.

- tem jego wpływ na przepływ szesciofluorku siarki może być całkowicie pominięty;
- dla tego zakresu prądów również przyrost ciśnienia spowodowany ablacją teflonu ma także bardzo małą wartość (około 0.1 [MPa] w pobliżu maksimum półfali prądu), więc i jego oddziaływanie na przepływ gazu w układzie dyszowym może zostać całkowicie pominięty;
 - podczas wyłączania prądów zwarciovych o wartościach należących do przedziału 6÷20 [kA] wartość przyrostu ciśnienia SF₆ spowodowany zjawiskiem "pinch-effect'u" nieznacznie wzrasta, zwłaszcza w przypadku gdy rośnie gęstość prądu w kanale łukowym, którego średnica jest ograniczona przez ścianki dyszy - jednakże maksymalne przyrost ciśnienia w okolicach maksimum półfali prądu osiąga wartość około 0.20 ÷ 0.25 [MPa];
 - wartość przyrostu ciśnienia spowodowany ablacją teflonu jest uzależniony od dwóch czynników: wartości wyłączanego prądu i średnicy przekroju krytycznego dyszy; wraz ze wzrostem wyłączanego prądu zwiększa się energia odprowadzana z łuku na drodze promieniowania; natomiast zmniejszenie średnicy przekroju krytycznego dyszy powoduje iż mniejsza część energii promieniowania powoduje ablację materiału dyszy, ponieważ jest przejmowana przez otaczającą łuk warstwę gazu zimnego;
 - w przypadku wyłączania prądów o wartościach rzędu 16÷20 [kA] w dyszy, której średnica przekroju krytycznego wynosi około 20 [mm]⁵² zdecydowanie rośnie ciśnienie spowodowane ablacją (w obszarze maksimum półfali prądu osiąga wartość dochodzącą do 0.36÷48 [MPa]); stanowi to istotną przeszkodę dla przepływającej przez dyszę strugi gazu, sześćciofluorek siarki nie może bowiem rozprężyć się do ciśnienia krytycznego;
 - zwiększenie oporów przepływu SF₆ należy uwzględnić przy obliczeniach natężenia przepływu wprowadzając współczynnik korygujący, którego wartość powinna być uzależniona od lokalnego przyrostu ciśnienia;
 - po przeanalizowaniu warunków przepływu gazu przez dyszę główną podczas występowania zjawiska ablacji określono następującą zależność opisującą bezwymiarowy współczynnik oporu przepływu SF₆:

52

Taki wymiar przekroju krytycznego dyszy jest typowy dla wyłącznika trzeciej generacji.

$$\mu_{pg} = \begin{cases} 0.95 & \text{dla } d_A = 0 \\ 0.95 - f(\Delta p_a) & \text{dla } d_A \in \langle 0, d_d \rangle \\ 0 & \text{dla } d_A = d_d \end{cases} \quad (53)$$

gdzie:

d_d - średnica przekroju krytycznego dyszy.

- na podstawie badań laboratoryjnych przy jednoczesnym uwzględnieniu obliczeń symulujących [34] stwierdzono, iż dla wyłącznika trzeciej generacji wartość funkcji $f(\Delta p_a)$ jest uzależniona od wartości chwilowej prądu; dla prądów o wartościach chwilowych rzędu $i = 1 \div 4$ [kA] jej wartość można szacować na około $0.05 \div 0.15$, natomiast dla prądów z zakresu $6 \div 14$ [kA] wartość tę można określić jako $0.2 \div 0.45$; dla wyższych prądów chwilowych wartość tej funkcji jeszcze bardziej się zwiększa co powoduje, iż współczynnik oporu przepływu ma wartość bliską zero.

Z1.3.5. Przepływ SF6 przez układ dyszowy podczas wyłączania prądów zwarciovych przy uwzględnieniu zjawiska termoexpansji

Podczas wyłączania bardzo dużych prądów zwarciovych o wartości z zakresu $20 \div 40$ [kA]^{Z22} zdecydowanie nasila się zjawisko ablacji, w związku ze zwiększaniem się energii wydzielającej się w łuku elektrycznym co powoduje także:

- wzrost intensywności promieniowania,
- zwiększenie średnicy kolumny łukowej; przy dużych chwilowych wartościach kolumna łukowa może całkowicie wypełniać przekrój krytyczny dyszy, czego konsekwencją jest zdecydowany wzrost gęstości prądu w kanale łukowym.

W rezultacie istotną rolę w procesie wyłączania prądu zaczyna odgrywać zjawisko termoexpansji. W wyłączniku trzeciej generacji, podczas wyłączania dużych prądów zwarciovych zjawisko termoexpansji pełni decydującą rolę w procesie generowania ciśnienia w zbiorniku sprężania, a dzięki wyposażeniu komory gaszeniowej w dwa zawory służące do sterowania przepływem gazu,

^{Z22}

Jest to zakres znamionowych prądów wyłączalnych wyłączników o napięciu znamionowym z przedziału $72 \div 172$ kV (w warunkach krajowych wyłączników na napięcie 123 kV)

wytworzony duży przyrost ciśnienia sześćfluorku siarki nie powoduje zwiększenia siły oporowej obciążającej napęd.

W rozdziale 3 głównej części pracy omówiono wyniki badań specjalnego modelu komory gaszeniowej przystosowanej do analizowania zjawiska generowania ciśnienia sześćfluorku siarki. Należy podkreślić że podczas prowadzenia eksperymentów stwierdzono, iż w momencie, w którym powstało zjawisko termoeekspansji wartość chwilowa wyłączanego prądu miała w przybliżeniu taką samą wartość jak w momencie gdy nastąpił zanik tego zjawiska. Oznacza to, że czynnikiem bezpośrednio decydującym o wystąpieniu zjawiska termoeekspansji jest relacja między wartością średnicy kolumny łukowej a wartością średnicy gardzieli dyszy.

Opierając się na wynikach prac [15,16,35,58,103] można przyjąć, iż maksymalna wartość ciśnienia SF_6 wywołana zjawiskiem termoeekspansji występuje w gardzieli dyszy głównej, a w związku z tym do gazu zawartego w górnym zbiorniku cylindra dostarczana jest jedynie energia wydzielająca się w tej części kolumny łukowej, która znajduje się we wlotowej części dyszy, pod warunkiem iż lokalne ciśnienie SF_6 w przekroju krytycznym dyszy jest wyższe niż ciśnienie gazu w zbiorniku sprężania.

W tablicy 2 zestawiono oszacowane wartości lokalnego przyrostu ciśnienia sześćfluorku siarki w obszarze przekroju krytycznego dyszy głównej wywołane ablacją teflonu oraz zjawiskiem "pinch-effect'u" podczas wyłączania dużych prądów zwarciovych z zakresu 22÷40 [kA]

Analizując obliczony lokalny przyrost ciśnienia sześćfluorku siarki można sformułować następujące wnioski:

- przyrost ciśnienia wywołany zjawiskiem "pinch-effect'u" podczas wyłączania dużych prądów zwarciovych, w przypadku gdy średnica kolumny łukowej nie jest ograniczona przez ścianki dyszy a w związku z tym w kanale łukowym nie następuje gwałtowny wzrost gęstości prądu, nie osiąga dużych wartości; przykładowo: dla prądu o wartości 34 [kA] przyrost ciśnienia wywołany tym zjawiskiem wyniósł dla wartości szczytowej jedynie 0.38 [Mpa]; można zatem w takich przypadkach wpływ tego przyrostu ciśnienia na przepływ gazu przez układ dyszowy całkowicie zaniedbać,
- zwiększenie gęstości prądu w kanale łukowym powoduje również wzrost wartości ciśnienia wytworzonego przez zjawisko "pinch-effect'u"; przykładowo dla prądu 34 [kA] ciśnienie to wynosi 0.75 [MPa], natomiast dla prądu 40 [kA] osiąga bardzo dużą wartość rzędu 1.0 [Mpa];

Tablica 2.

Wartości lokalnego przyrostu ciśnienia sześćfluorku siarki w obszarze przekroju krytycznego dyszy głównej wywołane ablacją teflonu oraz zjawiskiem "pinch-effect'u" podczas wyłączania dużych prądów zwarciovych ^{Z23}

Prąd wartość skuteczna I_s [kA]		22	25	28	30	32	34	36	38	40
średnica łuku d_A [mm]		22.5	24.0	25.4	26.4	27.4	27.6	28.8	29.5	30.5
przyrost ciśnienia wywołany "pinch-effect' em"; Δp_m [MPa]	średnica dyszy $d_d=28$ [mm]	0.24	0.28	0.31	0.34	0.36	0.38	0.42*	0.49*	0.53*
	średnica dyszy** $d_d=20$ [mm]	0.31	0.40	0.51	0.58	0.66	0.75	0.84	0.93	1.04
przyrost ciśnienia wywołany ablacją Δp_a [MPa]	średnica dyszy $d_d=28$ [mm]	0.26	0.28	0.29	0.30	0.31	0.32	0.37***	0.41***	0.46***
	średnica dyszy**** $d_d=20$ [mm]	0.53	0.64	0.78	0.89	1.03	1.12	1.29	1.49	1.60
* obliczony przyrost ciśnienia wywołany "pinch-effect' em" przy założeniu, iż łuk jest ograniczony przez ścianki gardzieli dyszy głównej o średnicy równej 28 [mm].										
** obliczony przyrost ciśnienia wywołany "pinch-effect' em" przy założeniu, iż łuk jest ograniczony przez ścianki gardzieli dyszy głównej o średnicy równej 20 [mm].										
*** obliczony przyrost ciśnienia wywołany ablacją przy założeniu, iż łuk jest ograniczony przez ścianki gardzieli dyszy głównej o średnicy równej 28 [mm].										
**** obliczony przyrost ciśnienia wywołany ablacją przy założeniu, iż łuk jest ograniczony przez ścianki gardzieli dyszy głównej o średnicy równej 20 [mm].										

- lokalny przyrost ciśnienia wywołany zjawiskiem ablacji jest także uzależniony od relacji między średnicą kolumny łukowej oraz średnicą gardzieli dyszy; w związku z tym bardzo szybko wzrasta gdy wyłączane są prądy o dużych wartościach zwłaszcza gdy kanał łukowy całkowicie wypełnia przekrój krytyczny dyszy głównej;
- dla dyszy głównej o średnicy przekroju krytycznego wynoszącego 28 [mm] lokalny przyrost ciśnienia wywołany ablacją dla prądów o wartościach 22÷34 [kA], dla których średnica kanału łukowego zawarta była w granicach 22.5÷27.6 [mm], wyniósł zaledwie 0.24÷0.38 [MPa], można zatem także i w tym przypadku, wpływ tego przyrostu ciśnienia na przepływ gazu przez układ dyszowy całkowicie zaniedbać, postępując identycznie gdy pominięto wpływ przyrostu ciśnienia wywołany przez

- zjawisko "pinch-effect'u" generowane w kanale łukowym , przez który płynął prąd o małej gęstości;
- dla dyszy głównej o średnicy przekroju krytycznego wynoszącego 20 [mm] lokalny przyrost ciśnienia wywołany ablacją dla prądów o wartościach 22÷40 [kA], osiągnął bardzo duże wartości od 0.53 [MPa] do 1.6 [MPa]; ten duży przyrost ciśnienia SF₆ spowodowany był przez całkowite wypełnienie gardzieli dyszy przez kanał łukowy.

Znaczna część energii odprowadzanej z łuku elektrycznego na drodze promieniowania jest pochłaniana przez ściany wewnętrznych otworów: izolacyjnej dyszy głównej oraz izolacyjnej styku ruchomego opalnego, czego efektem jest parowanie teflonu ze ścianek tych elementów. Schemat wymiany energii i masy między kolumną łukową otaczającą łuk mieszaniną par teflonu (PTFE) i zimnego sześćfluorku siarki oraz ścianką wewnętrzną dyszy pokazany jest na rys.2.

Dla obszaru dyszy głównej natężenie parowania teflonu można opisać następującą zależnością:

$$W_t = h_t \cdot \mu_{1t} \quad (40)$$

gdzie:

- W_t - moc odprowadzana z jednostki długości łuku na drodze promieniowania powodująca parowanie materiału dyszy.
 h_t - entalpia właściwa par teflonu;
 μ_{1t} - natężenie par teflonu (na jednostkę długości łuku) odprowadzanych ze ścianki dyszy;

Prawo Ohm'a dla kanału łukowego można opisać następującą zależnością:

$$E = \frac{i}{\sigma_A \cdot A_A} \quad (41)$$

gdzie:

- i - prąd płynący przez kanał łukowy;
 A_A - powierzchnia przekroju kolumny łukowej.

Relację między mocą wydzielającą się w jednostce długości łuku a mocą odprowadzoną z tego obszaru na drodze promieniowania i następnie powodującą parowanie materiału dyszy określa zależność:

Ablacja materiału z wewnętrznej ścianki dyszy głównej powoduje lokalny wzrost ciśnienia w obszarze jej przekroju krytycznego. Wartość tego ciśnienia można określić na podstawie przybliżonego wzoru wyprowadzonego w sposób podany poniżej.

Wykorzystując ogólny wzór opisujący natężenie przepływu gazu (3) oraz zakładając, iż przepływu par teflonu odbywa się zarówno przez strefę gazu zimnego jak i przez obszar łuku można sformułować następującą zależność :

$$\mu_{1t} \cdot \phi(A) = A_A \cdot \rho_t \cdot w_t \quad (43)$$

Równanie zachowania pędu dla par teflonu w strefie łukowej ma następującą postać:

$$dp = \rho_t \cdot w_t \cdot dw_t \quad (45)$$

Wstawiając do ostatniego równania wzór (43) otrzymano:

$$dp = \frac{1}{A_A} \cdot \mu_{1t} \cdot \phi(A) \cdot dw_t \quad (46)$$

Po wykorzystaniu wzorów (40) i (42) otrzymano następujące równanie:

$$\mu_{1t} = \frac{1}{h_t} \cdot \mathcal{G} \cdot \frac{i^2}{\sigma_A \cdot A_A} \cdot l_{kg} \quad (47)$$

gdzie:

l_{kg} - długość przekroju krytycznego (gardzieli) dyszy głównej.

Wstawiając ostatnią zależność do wzoru (46) uzyskano:

$$dp = \frac{1}{h_t} \cdot \mathcal{G} \cdot \frac{i^2}{\sigma_A \cdot A_A^2} \cdot \phi(A) \cdot dw_t \cdot l_{kg} \quad (48)$$

W poprzednim rozdziale wykazano, że w okolicach przekroju krytycznego dyszy przepływ sześćiofluorku siarki odbywa się z prędkością dźwięku ($M = 1$

oraz $w_A = a_A$). Natomiast w pracy [40] wykazano, że stosunek prędkości dźwięku dla par teflonu i zjonizowanego sześćfluorku siarki określony jest następującym wzorem:

$$\lambda = \sqrt{\frac{B_m T_t}{m_t}} \cdot \sqrt{\frac{m_A}{B_m T_A}} \quad (49)$$

Autorzy pracy [40] szacują, że wartość współczynnika $\lambda = 0.22 \div 0.25$. Uwzględniając zależność (49) po prostych przekształceniach otrzymano szacunkowy wzór określający lokalny przyrost ciśnienia gazu powstający w przekroju krytycznym dyszy głównej wywołany parowaniem materiału z jej ścianki wewnętrznej:

$$\Delta p_a = \frac{1}{h_t} \cdot g \cdot \frac{i^2}{\sigma_A \cdot A_A^2} \cdot \varphi(A) \cdot \lambda \cdot a_A \cdot l_{kg} \quad (50)$$

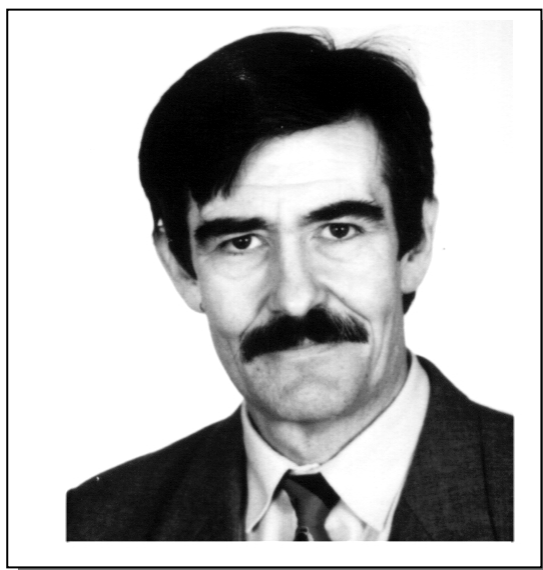
gdzie:

- Δp_a - lokalny przyrost ciśnienia w obszarze przekroju krytycznego dyszy głównej spowodowany ablacją teflonu (PTFE)
- λ - stosunek prędkości dźwięku dla par teflonu i zjonizowanego sześćfluorku siarki.
- A_A - prędkość dźwięku SF_6 w strefie kolumny łukowej.

Dr inż. WOJCIECH PONIECKI

- Kierownik Zakładu Wysokich
Napięć i Aparatury Rozdzielczej
Instytutu Elektrotechniki.

Po długiej i ciężkiej, trwającej ponad sześć lat chorobie zmarł w dniu 28 lutego 2002 r. w wieku 52 lat, nasz kolega i przyjaciel dr inż. Wojciech Poniecki, którego całe życie zawodowe związane było z Instytutem Elektrotechniki.



Urodził się w 1949 roku w Kielcach. Studia ukończył w 1973 roku na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej z dyplomem magistra inżyniera elektryka o specjalności – aparatura rozdzielcza. W tym samym roku rozpoczął pracę zawodową w Zakładzie Aparatury Rozdzielczej Instytutu Elektrotechniki. Zespół, w którym pracował podjął się, nowatorskiej w tamtym czasie pracy, mającej na celu opracowanie projektu i wykonanie pierwszego w kraju prototypu rozdzielnicy wysokiego napięcia izolowanej gazem SF₆. W wyniku badań naukowych i prac projektowo-konstruktorskich zespołu, w którym odgrywał wiodącą rolę, powstała rozdzielnica na napięcie 123 kV wdrożona na kilka lat do eksploatacji w sieci krajowej.

Dr Poniecki specjalizował się w głównie w zagadnieniach dotyczących wyłączników wysokiego napięcia. Opracował oryginalną metodę matematycznej analizy procesów zachodzących podczas gaszenia łuku w wyłącznikach autopneumatycznych. Powyższa problematyka była przedmiotem jego pracy doktorskiej, którą obronił z wyróżnieniem w 1983 roku. Tytuł pracy brzmiał „Oddziaływanie napędu na proces wyłączania prądu przez samoprężny wyłącznik z SF₆ przy uwzględnieniu zmienności parametrów komory gaszeniowej”.

W dalszej działalności naukowej kontynuował prace dotyczące problematyki gaszenia łuku elektrycznego w wyłącznikach najnowszej generacji izolowanych gazem SF₆. Opracował nową metodę obliczania procesów gazodynamicznych zachodzących w wyłącznikach tego typu na najwyższe napięcia podczas wyłączania przez nie prądów zwarciovych z uwzględnieniem oddziaływania łuku i wpływu termoexpansji. Wyniki swoich prac publikował wielokrotnie w prasie technicznej zarówno zagranicznej jak i krajowej. Na wyróżnienie zasługują jego publikacje zgłaszane na międzynarodowe konferencje CIGRE.

Powyższa tematyka była przedmiotem jego pracy habilitacyjnej, której nie zdążył obronić.

Dr inż. Wojciech Poniecki był członkiem CIGRE, reprezentując Polskę w latach 1993-99 w Komitecie Studiów Nr 13 - Aparatura Łączeniowa, jako stały członek „Study Committe”.

W uznaniu zasług w dziedzinie rozwoju metod obliczeniowych uzyskał tytuł „Distinguished member of CIGRE” przyznany przez Prezydenta i Sekretarza Generalnego tej organizacji.

W latach 1995...1999 był członkiem XII kadencji Rady Naukowej Instytutu oraz przez dwie kadencje przewodniczącym Rady Załogi IEI. Z ramienia Rady Naukowej pełnił funkcję członka Komisji Dyscyplinarnej Instytutu.

Był członkiem Stowarzyszenia Elektryków Polskich, redaktorem Przeglądu Elektrycznego oraz członkiem Komisji Normalizacyjnej ds. Aparatury Łączeniowej Wysokiego Napięcia.

Za swe zasługi wielokrotnie wyróżniany, nagradzany i odznaczany.

W konkursach na najlepszą pracę Instytutu Elektrotechniki uzyskał kolejno następujące nagrody, w:

- 1981 r. – pierwszą i trzecią nagrodę zespołową;
- 1982 r. – pierwszą nagrodę zespołową,
- 1986 r. – pierwszą nagrodę zespołową;
- 1993 r. – drugą nagrodę indywidualną;
- 1999 r. – pierwszą nagrodę indywidualną.

W konkursach NOT Mistrz Techniki uzyskał: w latach 1979, 1980 – drugą nagrodę zespołową.

W 1978 roku odznaczony został Brązowym Krzyżem Zasługi.

W wieku 52 lat, w pełni sił twórczych, nieuleczalna choroba, wyrwała go przedwcześnie z naszego grona, nie pozwalając mu na dokończenie wielu zaawansowanych prac naukowych. Żegnamy go z bólem ale i wiarą, że zapoczątkowane przez niego prace staną się podwaliną pod dalsze dokonania w rozwijanej przez niego dziedzinie elektrotechniki. Pozostanie w naszej pamięci jako serdeczny kolega i wspaniały człowiek.

Nad jego mogiłą mowę pożegnalną, bardzo dobrze charakteryzującą osobę zmarłego, wygłosił dyrektor Instytutu Elektrotechniki dr inż. Stefan Paradowski

*„Doświadczyłem, już teraz rozumiem
Tylko miłość jest sensem istnienia
We wspólnocie braterskiej znajduję
wszystko to, co jest łaską zbawienia.*

Doktor Wojciech Poniecki był Kierownikiem Zakładu Wysokich Napięć i Aparatury Rozdzielczej – jest to największy zakład naukowo-badawczy Instytutu Elektrotechniki.

Z racji pełnionych funkcji - Jego i mojej - do naszych obowiązków należały częste spotkania na których w szczerych i rzeczowych dyskusjach wypracowaliśmy wspólne stanowisko dotyczące spraw bieżących oraz strategii nie tylko zakładu ale i całego Instytutu. Rozmowy z doktorem Wojciechem Ponieckim były dla mnie zawsze bardzo ważne ponieważ jego widzenie spraw instytutu i osąd czynników zewnętrznych mających wpływ na losy instytutu były rzeczowe wyważone i bardzo trafne.

Doktor Poniecki był człowiekiem o wielkiej wiedzy i mądrości, a przy tym mimo Jego twierdzenia, że jest pragmatykiem, w ocenianiu pracowników kierował się sercem.

Na każde spotkanie radowałem się i szedłem z ochotą. Dzisiaj jest to nasze ostatnie spotkanie, ale na to spotkanie szedłem z bólem w sercu i z żalem – już nie będziemy mieli spotkań i rozmów o rozwoju Instytutu.

Wielki dorobek naukowy dra Wojciecha Ponieckiego wzbogaci majątek osiągnięć naszego Instytutu. A dla nas pracowników Instytutu Wojciech Poniecki pozostanie w pamięci jako wspólny przyjaciel kolega, na którego zawsze można było liczyć.

Wydaje się stosowne aby przytoczyć fragment wiersza ks. Jana Twardowskiego:

*„Odszedł, a w duszy mojej się stało pusto i ciemno
Jakby ktoś lampę sponad brewiarza chował przede mną”.*

