POLITECHNIKA GDAŃSKA
WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI

mgr inż. Daniel Kowalak

DYNAMIKA NISKONAPIĘCIOWEGO ŁUKU AWARYJNEGO

Rozprawa doktorska

Promotor:
dr hab. inż. Roman Partyka

GDAŃSK 2013

Spis treści

Wykaz ważniejszych symboli i oznaczeń ... 3
Akronimy ... 12
Wielkości stałe ... 12
1. Wstęp ... 13
2. Oddziaływania elektrodynamiczne w układach szynowych ... 25
2.1. Wymagania norm dotyczące oddziaływań elektrodynamicznych w układach szynowych ... 25
2.2. Oddziaływania elektrodynamiczne w układach szynowych podczas zwarć metalicznych ... 28
2.3. Oddziaływania elektrodynamiczne w szynie środkowej z uwzględnieniem obecności łuku zwarciowego ... 34
2.4. Oddziaływania elektrodynamiczne występujące w szynie skrajnej z uwzględnieniem obecności łuku zwarciowego ... 46
2.5. Podsumowanie analizy oddziaływań elektrodynamicznych występujących w szynach podczas zwarcia łukowego ... 53
3. Teza i cel pracy ... 57
4. Ogólny opis modelu dynamiki łuku zwarciowego ... 60
4.1. Budowa modelu obliczeniowego łuku dwufazowego ... 61
4.2. Budowa modelu obliczeniowego łuku trójfazowego ... 69
5. Ogólny zarys badań dynamiki niskonapięciowego łuku awaryjnego ... 73
6. Badania prędkości dwufazowego łuku awaryjnego ... 77
6.1. Stanowisko probiercze ... 77
6.2. Pomiar prędkości łuku z wykorzystaniem czujników optycznych ... 78
6.3. Metodyka badań eksperymentalnych ... 81
6.4. Wyznaczenie parametrów opisujących model łuku zwarciowego ... 87
6.4.1. Składowa rezystancji łuku odniesiona do jednostki długości łuku ... 87
6.4.2. Składowa stała napięcia odniesiona do jednostki długości łuku ... 91
6.4.3. Stała czasowa łuku ... 95
6.4.4. Współczynnik poprawkowy uwzględniający wpływ prądu na zmianę promienia łuku ... 97
7. Wyniki obliczeń prędkości dwufazowego łuku awaryjnego ... 99
8. Badania prędkości trójfazowego łuku awaryjnego ... 107
8.1. Wpływ kąta fazowego napięcia w chwili powstania zwarcia łukowego na dynamikę ruchu kolumn łukowych ... 107
8.2. Budowa stanowiska probierczego i zakres badań dotyczących trójfazowego łuku awaryjnego ... 115
8.3. Metodyka eksperymentu i wyniki prób trójfazowych ... 117
8.4. Wyniki obliczeń parametrów trójfazowego łuku awaryjnego ... 121
9. Oddziaływania elektrodynamiczne w układach szynowych z uwzględnieniem wpływu rezystancji łuku 124
9.1. Współczynnik ograniczenia prądu zwarciowego i jego wpływ na wartości maksymalne elementarnych sił elektrodynamicznych ... 126
9.2. Wyniki obliczeń wartości maksymalnych sił elektrodynamicznych działających na szyny w trakcie zwarcia łukowego ... 130
9.3. Analiza naprężeń mechanicznych występujących w szynach w trakcie zwarcia łukowego ... 138
10. Podsumowanie ... 146
Literatura ... 150
Załącznik A: Wyznaczenie parametrów modelu zaciskowego łuku zwarciowego ... 158
Załącznik B: Struktura programów obliczeniowych ... 166
Załącznik C: Budowa układu pomiaru prędkości łuku ... 183
Załącznik D: Wyniki obliczeń parametrów opisujących model łuku zwarciowego ... 188
Załącznik E: Wyniki badań eksperymentalnych i obliczeń dynamiki dwufazowego łuku zwarciowego ... 193
Załącznik F: Wyniki badań eksperymentalnych i obliczeń prędkości przemieszczania się trójfazowego łuku zwarciowego ... 208

Wykaz ważniejszych symboli i oznaczeń

a - odstęp między osiami szyn

a_0 - odstęp pomiędzy wewnętrznymi krawędziami szyn

a_1, a_2 - odległość mierzona wzdłuż osi układu szynowego pomiędzy analizowanym punktem występowania elementarnej siły elektrodynamicznej, a kolumną łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2 oraz L2 i L3

$a_{1\max}$ - odległość a_1, przy której zmienna pomocnicza N_α osiąga wartość maksymalną $N_{\alpha\max}$

b - szerokość szyny

C_a - współczynniki oporu aerodynamicznego kolumny łukowej, a w przypadku trójfazowych zwarć łukowych – łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2

C_c - współczynnik oporu aerodynamicznego łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L2 i L3

d_a - średnica kolumny łukowej

$\mathrm{d}F$ - elementarna siła elektrodynamiczna

$\mathrm{d}F_{12}$, $\mathrm{d}F_{13}$ - elementarna siła elektrodynamiczna działająca na szynę skrajną (faza L1), która jest wynikiem wzajemnego oddziaływania prądu i_1 (faza L1) i odpowiednio prądu i_2 (faza L2) oraz i_3 (faza L3)

$\mathrm{d}F_{121}$, $\mathrm{d}F_{122}$ - elementarna siła elektrodynamiczna działająca na szynę skrajną L1 (faza L1), która jest wynikiem wzajemnego oddziaływania prądu płynącego w tej szynie i w szynie środkowej L2 (faza L2) na odcinku pomiędzy dwiema kolumnami łuku awaryjnego w przypadku, gdy punkt przyłożenia siły znajduje się pomiędzy kolumnami łukowymi trójfazowego zwarcia łukowego oraz poniżej kolumn łukowych trójfazowego zwarcia łukowego

$\mathrm{d}F_{1a}$, $\mathrm{d}F_{1c}$ - elementarna siła elektrodynamiczna działająca na szynę skrajną L1 (faza L1), która jest wynikiem wzajemnego oddziaływania prądu płynącego w tej szynie i prądu płynącego w kolumnie łukowej łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2 oraz L2 i L3

$\mathrm{d}F_{21}$, $\mathrm{d}F_{23}$ - elementarna siła elektrodynamiczna działająca na szynę środkową L2 (faza L2), będąca wynikiem wzajemnego oddziaływania prądu płynącego w tej szynie i odpowiednio prądu i_1 płynącego w szynie L1 (faza L1) oraz prądu i_3 płynącego w szynie L3 (faza L3)

$\mathrm{d}F_{2a}$, $\mathrm{d}F_{2c}$ - elementarna siła elektrodynamiczna działająca na szynę środkową L2 (faza L2), będąca wynikiem wzajemnego oddziaływania prądu płynącego w tej szynie i prądu płynącego w kolumnie łukowej łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2 oraz L2 i L3

dF_{A}, $\mathrm{d}F_B$ - elementarna siła elektrodynamiczna działająca na szynę skrajną i środkową podczas zwarć metalicznych

$\mathrm{d}F_{A1}$, $\mathrm{d}F_{B1}$ - elementarna siła elektrodynamiczna działająca na szynę skrajną L1 (faza L1) oraz środkową L2 (faza L2) w przypadku, gdy jedna z kolumn trójfazowego zwarcia łukowego znajduje się powyżej analizowanego punktu przyłożenia siły, a druga kolumna znajduje się poniżej

$\mathrm{d}F_{A1arc}$, $\mathrm{d}F_{B1arc}$ - elementarna siła elektrodynamiczna $\mathrm{d}F_{A1}$ obliczona dla przypadku,

		w którym uwzględniono wpływ rezystancji łuku na wartość prądu, wyrażony poprzez współczynnik k_{ogr} i działająca na szynę skrajną oraz środkową
dF_{A2}, dF_{B2}	-	elementarna siła elektrodynamiczna działająca na szynę skrajną L1 (faza L1) oraz środkową L2 (faza L2) w przypadku, gdy obie kolumny trójfazowego zwarcia łukowego znajdują się powyżej analizowanego punktu przyłożenia siły
dF_{Aarc}, dF_{Barc}	-	elementarna siła elektrodynamiczna występująca w trakcie zwarcia łukowego w punkcie $s_a - a_{1\max}$ i działająca na szynę skrajną oraz środkową
$dF_{A\max}$, $dF_{A\min}$	-	wartość maksymalna i minimalna elementarnej siły elektrodynamicznej działającej na szynę skrajną L1 (faza L1)
$dF_{Barc\max}$	-	wartość maksymalna elementarnej siły elektrodynamicznej działającej na szynę środkową L2 (faza L2) w trakcie zwarcia łukowego
$dF_{B\max}$, $dF_{B\min}$	-	wartość maksymalna i minimalna elementarnej siły elektrodynamicznej działającej na szynę środkową L2 (faza L2)
$dF_{\max}$	-	wartość maksymalna elementarnej siły elektrodynamicznej
e_1, e_2, e_3	-	napięcie fazowe faz: L1, L2, L3
E_a	-	energia zwarcia łukowego
f	-	częstotliwość napięcia zasilania
F_0	-	wypadkowa siła oporu aerodynamicznego działająca na łuk
F_{0A}, F_{0C}	-	wypadkowa siła oporu aerodynamicznego działająca na kolumnę łukową łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2 oraz L2 i L3
F_{Aa}, F_{Ab}, F_{Ac}	-	składowa elektrodynamicznej siły F_{DA} działającej na kolumnę łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2, która jest wynikiem oddziaływania na siebie prądu i_a płynącego w tej kolumnie łukowej oraz prądów płynących kolejno w szynach (fazach): L1, L2, L3
F_{ac}	-	wypadkowa siła elektrodynamiczna będąca wynikiem oddziaływania na siebie prądów płynących w kolumnach trójfazowego zwarcia łukowego
F_C	-	siła unoszenia konwekcyjnego (ciągu cieplnego)
F_{Ca}, F_{Cb}, F_{Cc}	-	składowa elektrodynamicznej siły F_{DC} działającej na kolumnę łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L2 i L3, która jest wynikiem oddziaływania na siebie prądu i_c płynącego w tej kolumnie łukowej oraz prądów płynących kolejno w szynach (fazach) L1, L2, L3
F_D	-	wypadkowa siła elektrodynamiczna działająca na łuk
F_{DA}, F_{DC}	-	wypadkowa siła elektrodynamiczna działająca na kolumnę łukową łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2 oraz L2 i L3
$F_{\max}$	-	maksymalna siła elektrodynamiczna występująca w szynie środkowej podczas przepływu prądu zwarciowego
g	-	średni odstęp geometryczny osi toru prądowego od łuku
g_a	-	przewodność chwilowa łuku zwarcia dwufazowego, a w przypadku trójfazowych zwarć łukowych – łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2
G_a	-	przewodność statyczna łuku
g_c	-	przewodność chwilowa łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L2 i L3

h	-	grubość szyny
h_{cz}	-	odległość czujników od „obserwowanej” powierzchni szyn
i	-	wartość chwilowa prądu
$i_{0a30\%}$	-	wartość chwilowa prądu łuku i_a odpowiadająca składowej stałej napięcia u_{0a} równej 30% $u_{0a\max}$, mieszczącej się w zakresie $0 \div u_{0a\max}$
$i_{0a50\%}$	-	wartość chwilowa prądu łuku i_a odpowiadająca składowej stałej napięcia u_{0a} równej $u_{0a\max} - 0{,}5(u_{0a\max} - u_1)$, mieszczącej się w zakresie $u_{0a\max} \div u_1$
$i_{0a90\%}$	-	wartość chwilowa prądu łuku i_a odpowiadająca składowej stałej napięcia u_{0a} równej 90% $u_{0a\max}$, mieszczącej się w zakresie $0 \div u_{0a\max}$
$i_{0\max}$	-	wartość chwilowa prądu łukowego i_a odpowiadająca wartości maksymalnej składowej napięcia łuku $u_{0a\max}$ odniesionej do jednostki długości łuku l_a
i_1, i_2, i_3	-	wartość chwilowa prądu płynącego kolejno w szynach (fazach): L1, L2, L3
I^2t_r	-	całka Joule’a przedłukowa elementu inicjującego zwarcie
I_a	-	wartość skuteczna prądu zwarcia łukowego dwufazowego, a w przypadku trójfazowych zwarć łukowych – łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2
i_a i_b, i_c	-	prądy zwarcia łukowego płynące kolejno w szynach (fazach): L1, L2, L3
i_{a_e}	-	eksperymentalnie wyznaczony prąd łuku zwarcia dwufazowego, a w przypadku trójfazowych zwarć łukowych – łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2
I_{a_e}	-	wyznaczona na podstawie wyników eksperymentalnych wartość skuteczna prądu łuku zwarcia dwufazowego, a w przypadku zwarć trójfazowych – łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2
I_a^2t, I_c^2t	-	obliczona całka Joule’a z przebiegu prądu i_a i i_c
$i_{a\max}$	-	wartość szczytowa z wartości bezwzględnej prądu łuku zwarcia dwufazowego i_a liczona w danym półokresie zmian prądu
I_b, I_c	-	wartość skuteczna prądu trójfazowego zwarcia łukowego płynącego w fazach (szynach) L2 i L3
I_{b_e}, I_{c_e}	-	wyznaczona na podstawie wyników eksperymentalnych wartość skuteczna prądu zwarcia łukowego płynącego w szynach (fazach) L2 i L3
i_{c_e}	-	eksperymentalnie wyznaczony prąd łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L2 i L3
I_k''	-	spodziewany prąd zwarciowy (wartość skuteczna)
I_{k_e}''	-	wyznaczony na podstawie wyników eksperymentalnych spodziewany prąd zwarciowy (wartość skuteczna)
i_m	-	wartość maksymalna prądu (wartość chwilowa)
I_n	-	prąd znamionowy ciągły transformatora
i_p	-	spodziewany prąd zwarciowy udarowy (wartość chwilowa)
i_z	-	wartość chwilowa prądu dwufazowego zwarcia metalicznego
i_{z_e}	-	wyznaczona na podstawie wyników eksperymentalnych wartość chwilowa prądu dwufazowego zwarcia metalicznego
i_{z1}, i_{z2}, i_{z3}	-	wartości chwilowe prądów trójfazowego zwarcia metalicznego płynących kolejno w szynach (fazach): L1, L2, L3

i_{z1_e}, i_{z2_e}, i_{z3_e}	-	wyznaczone na podstawie badań eksperymentalnych wartości chwilowe prądów trójfazowego zwarcia metalicznego płynących kolejno w szynach (fazach): L1, L2, L3
k	-	stała zależna od środowiska, w którym pali się łuk
k_{DN}	-	przekładnia dzielnika napięciowego
k_{ogr}	-	współczynnik ograniczenia prądu zwarciowego przez rezystancję łuku
k_{PP}	-	przekładnia przekładnika prądowego
k_T	-	liczba całkowita zaokrąglona w dół określająca krotność okresu napięcia zasilania T w stosunku do całkowitego czasu trwania zwarcia łukowego t_z.
K_{Ta}	-	współczynnik kierunkowy prostej będącej aproksymacją liniową przebiegu $T_a = f(\|i_a\|)$ w przedziale prądu $\|i_a\|$, mieszczącym się w zakresie $(0{,}2 \div 0{,}6)i_{a\max}$
K_{Ta_Al}, K_{Ta_Cu}	-	współczynnik K_{Ta} obliczony dla łuku palącego się na szynach aluminiowych i miedzianych
l	-	długość przęsła
l_a	-	długość łuku, a w przypadku trójfazowych zwarć łukowych łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2
l_c	-	długość łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L2 i L3
l_{cz}	-	odległość pomiędzy sąsiednimi czujnikami optycznymi układu UPP
L_Z	-	indukcyjność obwodu zwarciowego
m	-	współczynnik poprawkowy uwzględniający wpływ ciśnienia na zmianę promienia łuku
m_a	-	masa walca odzwierciedlającego kolumnę łukową, a w przypadku trójfazowych zwarć łukowych – łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2
M_A, M_B	-	momenty gnące działające w podporach układu szynowego
m_c	-	masa walca odzwierciedlającego kolumnę łukową łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L2 i L3
M_x	-	moment gnący działający na szynę w wybranym miejscu przęsła
$M_{x\max}$	-	maksymalna wartość momentu gnącego
n_a	-	współczynnik poprawkowy uwzględniający wpływ prądu na zmianę promienia łuku
n_{a_Al}, n_{a_Cu}	-	współczynnik poprawkowy uwzględniający wpływ prądu na zmianę promienia łuku i obliczony dla łuku palącego się na szynie aluminiowej oraz miedzianej
N_{A1}, N_{A2}	-	zmienna pomocnicza określająca położenie kolumny łukowej łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L2 i L3 w pierwszym i w drugim z analizowanych przypadków oddziaływań występujących w szynie skrajnej
N_{B1}, N_{B2}	-	zmienna pomocnicza określająca położenie kolumny łukowej łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L2 i L3 w pierwszym i w drugim z analizowanych przypadków oddziaływań występujących w szynie środkowej
$N_{B1\max}$, $N_{B1\min}$	-	wartość maksymalna i minimalna zmiennej pomocniczej N_{B1}
n_z	-	liczba punktów obliczeń w czasie trwania zwarcia t_z

N_α	-	zmienna pomocnicza określająca położenie kolumny łukowej łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2
$N_{\alpha\max}$, $N_{\alpha\min}$	-	wartość maksymalna i minimalna zmiennej pomocniczej N_α
p	-	moc chwilowa łuku awaryjnego
p_a, p_c	-	moc chwilowa łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2 oraz L2 i L3
q	-	współczynnik plastyczności materiału szyn zależny od kierunku działania siły
R_{0a}	-	wartość początkowa składowej rezystancji łuku odniesiona do jednostki długości łuku l_a
R_{0a_Al}, R_{0a_Cu}	-	wartość początkowa składowej rezystancji łuku R_{0a} obliczona dla łuku palącego się na szynach aluminiowych oraz miedzianych
R_{1a}	-	wartość ustalona składowej rezystancji łuku odniesiona do jednostki długości łuku l_a
R_{1a_Al}, R_{1a_Cu}	-	wartość ustalona składowej rezystancji łuku R_{1a} obliczona dla łuku palącego się na szynach aluminiowych oraz miedzianych
r_a	-	promień walca odzwierciedlającego kolumnę łukową, a w przypadku trójfazowych zwarć łukowych – łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2
R_A, R_B	-	wypadkowe siły reakcji występujące w podporach układu szynowego
R_b	-	rezystancja obciążenia uzwojenia wtórnego przekładnika prądowego
r_c	-	promień walca odzwierciedlający kolumnę łukową łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L2 i L3
$R_{p0,2}$	-	granica plastyczności materiału szyn wywołująca trwałe odkształcenie na poziomie 0,2%
R_{sa}, R_{sc}	-	składowa rezystancji łuku odniesiona do jednostki długości łuku l_a i l_c
R_Z	-	rezystancja obwodu zwarciowego
S_a	-	przekrój poprzeczny walca odzwierciedlającego kolumnę łukową
s_a, s_c	-	droga, jaką pokonuje kolumna łukowa łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2 oraz L2 i L3
S_n	-	moc znamionowa transformatora
S_{rel}	-	względna czułość widmowa fotodetektorów
T	-	okres zmian napięcia
T_{0a}	-	współczynnik określający miejsce przecięcia funkcji $T_a = f(\|i_a\|)$ z osią rzędnych, tj. dla $i_a = 0$ A
T_{0a_Al}, T_{0a_Cu}	-	współczynnik T_{0a} obliczony dla łuku palącego się na szynach aluminiowych i miedzianych
T_a	-	stała czasowa łuku, a w przypadku trójfazowych zwarć łukowych – łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2
T_c	-	stała czasowa łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L2 i L3
t_{end}	-	czas obliczeń
t_{start}	-	czas początkowy wyznaczania prędkości łuku uzyskany z wyników eksperymentalnych
T_W	-	temperatura wrzenia materiału

T_Z	-	stała czasowa obwodu zwarciowego
t_z	-	czas trwania zwarcia
U	-	wartość skuteczna napięcia zasilania (napięcie międzyfazowe)
u_0	-	wartość początkowa składowej stałej napięcia u_{0a} odniesiona do jednostki długości łuku l_a
u_{0_Al}, u_{0_Cu}	-	wartość początkowa składowej stałej napięcia u_0 obliczona dla łuku palącego się na szynach aluminiowych oraz miedzianych
u_{0a}, u_{0c}	-	składowa stała napięcia odniesiona do jednostki długości łuku l_a i l_c
$u_{0a\max}$	-	wartość maksymalna składowej stałej napięcia u_{0a} odniesiona do jednostki długości łuku l_a
u_1	-	wartość ustalona składowej stałej napięcia u_{0a} odniesiona do jednostki długości łuku l_a
u_{1_Al}, u_{1_Cu}	-	wartość ustalona składowej stałej napięcia u_1 obliczona dla łuku palącego się na szynach aluminiowych oraz miedzianych
u_a	-	napięcie łukowe zwarcia dwufazowego, a w przypadku trójfazowych zwarć łukowych – łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2
U_a	-	wartość skuteczna napięcia łuku zwarcia dwufazowego, a w przypadku trójfazowych zwarć łukowych łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2
u_{a_e}	-	eksperymentalnie wyznaczone napięcie łuku zwarcia dwufazowego, a w przypadku trójfazowych zwarć łukowych – napięcie łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2
U_{a_e}	-	wyznaczona na podstawie wyników eksperymentalnych wartość skuteczna napięcia łuku zwarcia dwufazowego, a w przypadku trójfazowych zwarć łukowych – napięcie łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2
u_c	-	napięcie łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L2 i L3
U_c	-	wartość skuteczna napięcia łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L2 i L3
u_{c_e}	-	eksperymentalnie wyznaczone napięcie łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L2 i L3
U_{c_e}	-	wartość skuteczna napięcia łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L2 i L3 wyznaczona na podstawie wyników eksperymentalnych
u_{imp}	-	sygnał napięciowy z układu UPP określający moment zadziałania czujników optycznych
U_{imp}	-	wartość referencyjna napięcia określająca moment zadziałania czujników optycznych
u_k	-	napięcie zwarcia transformatora
u_{kier}	-	sygnał napięciowy z układu UPP, którego wartość określa zmianę kierunku przemieszczania się łuku
U_{kier}	-	wartość referencyjna napięcia, którego wartość określa zmianę kierunku przemieszczania się łuku
v_a	-	prędkość chwilowa łuku zwarcia dwufazowego, a w przypadku trójfazowych zwarć łukowych – łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2

v_{a_e}	-	obliczona na podstawie wyników eksperymentalnych prędkość chwilowa łuku zwarcia dwufazowego, a w przypadku trójfazowych zwarć łukowych – łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2
$v_{a_e\mathrm{mean}}$	-	obliczona na podstawie wyników eksperymentalnych uśredniona prędkość łuku zwarcia dwufazowego, a w przypadku trójfazowych zwarć łukowych – łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2
$v_{a\mathrm{mean}}$	-	obliczona wartość średnia prędkości łuku zwarcia dwufazowego, a w przypadku trójfazowych zwarć łukowych – łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2
v_c	-	prędkość chwilowa łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L2 i L3
$v_{c\mathrm{mean}}$	-	obliczona wartość średnia prędkości łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L2 i L3
V_r	-	stosunek naprężenia lub siły w przypadku nieudanego samoczynnego ponownego załączania (SPZ) trójfazowego zwarcia do naprężenia lub siły bez SPZ
V_σ	-	współczynnik określający stosunek naprężenia dynamicznego do naprężenia statycznego w przewodzie fazowym
X_Z	-	reaktancja obwodu zwarciowego
Z_x	-	wskaźnik wytrzymałości przewodu na zginanie
α	-	różnica kątów pomiędzy kątem fazowym załączenia zwarcia Ψ_Z i kątem opóźnienia φ pomiędzy składową okresową prądu zwarciowego względem napięcia (faza prądu)
α_a	-	wartość kąta, którego funkcja trygonometryczna sinus odzwierciedla położenie łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2 na szynie L1
$\alpha_{a\max}$	-	wartość kąta α_a, przy której zmienna pomocnicza N_α osiąga wartość maksymalną $N_{\alpha\max}$
α_i	-	stała określająca szybkość ustalania się rezystancji łuku R_{sa} odniesionej do jednostki długości łuku l_a
α_{i_Al}, α_{i_Cu}	-	stała α_i, obliczona dla łuku palącego się na szynach aluminiowych i miedzianych
β	-	współczynnik poprawkowy służący do obliczania naprężeń w przewodzie fazowym
β_c	-	wartość kąta, którego funkcja trygonometryczna sinus odzwierciedla położenie łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2 na szynie L2
$\beta_{c\max}$	-	wartość kąta β_c, przy której zmienna pomocnicza N_{B1} osiąga wartość maksymalną
β_i	-	stała określająca szybkość stabilizowania się składowej stałej napięcia u_{0a} odniesionej do jednostki długości łuku l_a
β_{i_Al}, β_{i_Cu}	-	stała β_i obliczona dla łuku palącego się na szynach aluminiowych oraz miedzianych
γ	-	kąt detekcji łuku
γ_1, γ_2	-	wartości kątów, których funkcje trygonometryczne sinus odzwierciedlają granice kolumny łukowej łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L1 i L2 względem odległości a_1 tej kolumny od analizowanego punktu

		występowania elementarnej siły elektrodynamicznej
γ_i	-	stała określająca szybkość stabilizowania się składowej stałej napięcia u_{0a} odniesionej do jednostki długości łuku l_a.
γ_{i_Al}, γ_{i_Cu}	-	stała γ_i obliczona dla łuku palącego się na szynach aluminiowych oraz miedzianych
δ_1, δ_2	-	wartości kątów, których funkcje trygonometryczne sinus odzwierciedlają granice kolumny łukowej łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L2 i L3 względem odległości a_2 tej kolumny od analizowanego punktu występowania elementarnej siły elektrodynamicznej
$\Delta \mathrm{d}F$	-	względny przyrost lub zmniejszenie elektrodynamicznej siły elementarnej, obliczony z uwzględnieniem współczynnika ograniczenia prądu zwarciowego k_{ogr}
$\Delta \mathrm{d}F_{AB}$	-	względny przyrost lub zmniejszenie elektrodynamicznej siły elementarnej, działającej na szynę środkową w trakcie zwarcia łukowego
δ_i	-	błąd względny wyznaczony z wartości chwilowej prądu zwarcia metalicznego w okresie T (błąd całkowity prądu zwarcia metalicznego)
δi_a	-	błąd względny wyznaczony z wartości chwilowej prądu zwarcia łukowego w okresie T (błąd całkowity prądu zwarcia łukowego)
$\delta_{i\min}$	-	wartość minimalna błędu całkowitego prądu zwarcia metalicznego
Δl	-	odległość pomiędzy kolumnami łukowymi zwarcia trójfazowego
Δt	-	krok obliczeń
δu_a	-	błąd względny wyznaczony z wartości chwilowej napięcia łuku u_a w okresie T (błąd całkowity napięcia łuku)
δU_a	-	błąd względny napięcia łuku wyznaczony na podstawie obliczonej i wyznaczonej eksperymentalnie wartości skutecznej napięcia łuku
δv_a	-	błąd względny prędkości wyznaczony na podstawie obliczonej i wyznaczonej eksperymentalnie chwilowej prędkości łuku
$\delta v_{a\mathrm{mean}}$	-	błąd względny prędkości wyznaczony na podstawie obliczonej i wyznaczonej eksperymentalnie uśrednionej średniej prędkości łuku
$\delta v_{a\min}$	-	wartość minimalna błędu względnego prędkości łuku
$\Delta \sigma_1$	-	względny przyrost lub zmniejszenie naprężeń zginających występujących w trakcie zwarcia łukowego, odniesiony do naprężenia zginającego w przewodzie fazowym w trakcie zwarcia metalicznego
$\Delta \sigma_2$	-	względny przyrost lub zmniejszenie naprężeń zginających, występujących w trakcie zwarcia łukowego, odniesiony do wartości dopuszczalnych naprężeń
ε_c	-	wartość kąta, którego funkcja trygonometryczna sinus odzwierciedla położenie łuku palącego się pomiędzy szynami (fazami) L2 i L3 na szynie L3
η	-	lepkość dynamiczna gazu
κ	-	współczynnik udaru
λ_{max}	-	długość fali, przy której występuje maksymalna moc promieniowania
ρ_0	-	gęstość gazu, w którym przemieszcza się łuk
ρ_a	-	gęstość plazmy łuku zwarcia dwufazowego, a w przypadku trójfazowych zwarć łukowych łuku palącego się pomiędzy fazami (fazami) L1 i L2

ρ_c	-	gęstość plazmy łuku palącego się między szynami (fazami) L2 i L3
$\sigma_{arc\max}$	-	maksymalna wartość naprężenia zginającego w przewodzie występująca w trakcie trójfazowego zwarcia łukowego
σ_m	-	naprężenie zginające w przewodzie fazowym w trakcie trójfazowego zwarcia metalicznego
φ	-	kąt opóźnienia pomiędzy składową okresową prądu zwarciowego względem napięcia
Ψ_Z	-	kąt fazowy załączenia zwarcia (faza napięcia)
ω	-	pulsacja napięcia

Akronimy

UPP - układ pomiaru prędkości łuku awaryjnego
SPZ - samoczynne ponowne załączanie
PPE - sprzęt ochrony osobistej *(personal protective equipment)* [90]

Wielkości stałe

c_W - stała Viena ($c_W = 2{,}8978 \cdot 10^{-3}$ m·K)
p_0 - ciśnienie gazu otaczającego palący się łuk (ciśnienie normalne) ($p_0 = 101{,}325 \cdot 10^3$ Pa)
$R_{p0,2Cu}$ - granica plastyczności szyn miedzianych M1E wywołująca trwałe odkształcenie na poziomie 0,2% ($R_{p0,2} = 210$ N/mm^2)
$R_{p0,2Al}$ - granica plastyczności szyn aluminiowych A1 wywołująca trwałe odkształcenie na poziomie 0,2% ($R_{p0,2} = 120$ N/mm^2)
T_{WAl}, - temperatura wrzenia aluminium, przy ciśnieniu normalnym ($T_{WAl} = 2723$ K)
T_{WCu} - temperatura wrzenia miedzi, przy ciśnieniu normalnym ($T_{WCu} = 2811$ K)
μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m)

1. Wstęp

Obserwowany w ciągu ostatnich lat silny rozwój zapotrzebowania na energię elektryczną, jak również coraz bardziej różnorodne jej wykorzystanie, powoduje wzrost znaczenia niezawodności zasilania odbiorców oraz stwarza potrzebę ciągłego rozwoju infrastruktury systemu elektroenergetycznego. Zmusza to dostawców energii do ciągłego poprawienia jej jakości. Nieustanny wzrost liczby odbiorców energii elektrycznej wymaga ciągłej rozbudowy sieci elektroenergetycznej oraz prowadzi do wzmożonej eksploatacji istniejących już linii przesyłowych i urządzeń rozdzielczych. Stwarza to warunki do powstawania różnego rodzaju zdarzeń (awarii) w elementach systemu elektroenergetycznego.

Jednym z najpoważniejszych zakłóceń poprawnej pracy urządzeń energetyki zawodowej, mogących powodować długotrwałe przerwy w dostawie energii elektrycznej, są zwarcia. Przyczyny zwarć mogą być różnego pochodzenia, a ich prawdopodobieństwo występowania uwarunkowane jest różnorodnymi czynnikami, takimi jak warunki techniczne pracy samego systemu elektroenergetycznego oraz sposób i intensywność eksploatacji jego elementów.

Specyficzną odmianę zwarć stanowią zwarcia łukowe, w których palący się łuk określany jest mianem łuku zakłóceniowego, łuku awaryjnego lub łuku wewnętrznego. Stanowią one jedne z najpoważniejszych stanów awaryjnych, w jakich mogą znaleźć się urządzenia rozdzielcze, z uwagi na bezpośrednie zagrożenie zdrowia lub nawet życia osób znajdujących się w bezpośrednim sąsiedztwie awarii oraz znaczne straty materialne wywołane niszczącym działaniem łuku awaryjnego. Najczęściej do zwarć łukowych dochodzi w wyniku niewłaściwej eksploatacji urządzeń rozdzielczych, złych rozwiązań konstruktorskich czy warunków środowiskowych, w jakich rozdzielnice pracują. Jednakże większość przyczyn zwarć łukowych ściśle związana jest z niewłaściwą eksploatacją urządzeń rozdzielczych przez człowieka, a błędy ludzkie stanowią 60% wszystkich przyczyn wypadków [36, 80, 65, 71].

W zależności od przyczyn, rozwój zwarcia łukowego może mieć charakter złożony. Najczęściej dochodzi do zwarć jednofazowych, gdzie łuk awaryjny zapala się pomiędzy jedną z szyn fazowych i uziemioną dostępną częścią przewodzącą. Z uwagi na niewielkie odstępy pomiędzy szynami oddziaływania sił elektrodynamicznych powodują jego wydłużenie, przyczyniając się tym samym do rozwoju początkowego zwarcia

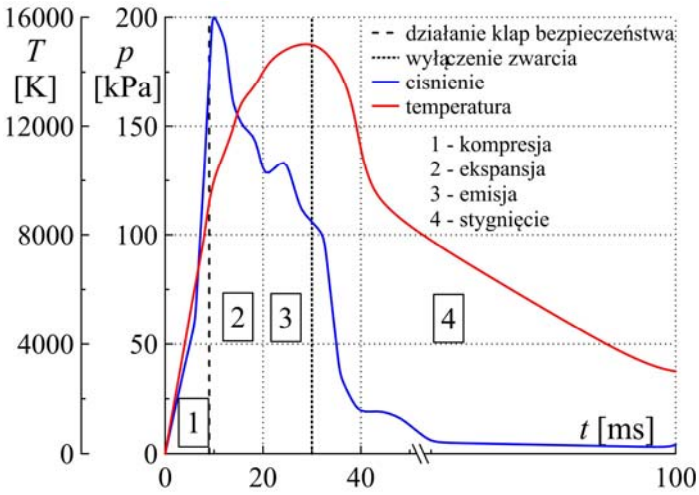
jednofazowego w wielkoprądowe zwarcie dwu lub trójfazowe. W trakcie zwarcia łukowego powstające oddziaływania elektrodynamiczne na palący się swobodnie łuk elektryczny powodują jego szybkie przemieszczanie się wzdłuż szyn w rozdzielnicy, aż do momentu napotkania przeszkody w postaci przegrody izolacyjnej, obudowy aparatury, izolatorów przepustowych, głowic kablowych czy końca układu szynowego.

Przemieszczanie się łuku wzdłuż szyn silnie zależy od sił elektrodynamicznych działających na poszczególne kolumny, a ich wartości wynikają z konstrukcji samego układu szynowego i wartości chwilowej prądu zwarciowego. W przypadku rozdzielnic niskiego napięcia na wartość prądu zwarciowego istotnie wpływa, oprócz parametrów obwodu zwarciowego, sama rezystancja łuku, która powoduje ograniczenie prądu zwarcia łukowego, w odniesieniu do wartości spodziewanego (obliczeniowego) prądu zwarciowego. W przypadku dużych odstępów pomiędzy wewnętrznymi krawędziami szyn ograniczenie prądu zwarciowego może być na tyle duże, że zwarcie trójfazowe często przekształca się w zwarcie dwu lub jednofazowe, w którym łuk zwarciowy niejednokrotnie ulega samoistnemu zgaszeniu w momencie naturalnego przejścia prądu przez zero [2, 43, 58, 61].

Wydzielona z łuku energia przekazywana jest do otoczenia w postaci ciepła, głównie poprzez przewodnictwo i w mniejszym stopniu poprzez konwekcję czy radiację, przyczyniając się do gwałtownego wzrostu temperatury i ciśnienia gazu wypełniającego przedział rozdzielnicy. Przykładowe zmiany ciśnienia i temperatury gazów w przedziale rozdzielnicy objętej zwarciem łukowym zamieszczono na rys. 1.1. Ograniczona przestrzeń rozdzielnicy, w której występuje zwarcie łukowe, dodatkowo potęguje efekty związane ze wzrostem ciśnienia i zwiększa rozmiar powstałych tam uszkodzeń zainstalowanych urządzeń i aparatury [47, 48]. Faza ta trwa w granicach od kilku do kilkunastu milisekund w zależności od konstrukcji, objętości przedziału rozdzielnicy, prądu zwarciowego i nosi nazwę fazy kompresji [19, 22].

W dalszym etapie po osiągnięciu maksymalnego ciśnienia, którego wartość zmienia się w granicach 120 ÷ 180 kPa, następuje rozszczelnienie rozdzielnicy polegające na otwarciu klap dekompresyjnych lub w przypadku konstrukcji rozdzielnicy niewyposażonej w klapy bezpieczeństwa – wygięcie ścian, drzwiczek pola rozdzielnicy lub wypadnięcie wzierników umożliwiających wzrokowe określenie stanu położenia styków umieszczonych wewnątrz przedziałów łączników niskonapięciowych. Poprzez powstałe szczeliny następuje wypływ ogrzanego gazu, co skutkuje obniżeniem ciśnienia w przedziale rozdzielnicy. Niekontrolowany i nagły wypływ gazów z przedziału

rozdzielnicy objętego zwarciem łukowym może stanowić poważne zagrożenie dla osób znajdujących się w jej pobliżu, jak również może być przyczyną powstania pożaru. Faza ta nosi nazwę fazy ekspansji i trwa, podobnie jak w przypadku fazy kompresji, od 5 do 15 ms [6, 19, 22]. Początkowy etap fazy ekspansji łuku awaryjnego przez powstałe szczeliny w konstrukcji rozdzielnicy ilustruje rys. 1.2.



Rys. 1.1. Przebieg zmian temperatury i ciśnienia gazu wewnątrz przedziału rozdzielnicy objętego zwarciem łukowym [31, 48, 80]

Rys. 1.2. Faza ekspansji łuku zwarciowego przy $I_k^{"}$ = 20 kA [48, 80]

W kolejnej fazie zwarcia łukowego, zwanej fazą emisji i trwającą do 100 ms, palący się łuk zwarciowy w dalszym ciągu ogrzewa otaczający go gaz, który wydostaje się poprzez powstałe w fazie kompresji szczeliny w konstrukcji obudowy rozdzielnicy.

Jeżeli w tym czasie nie nastąpi wyłączenie zasilania pola rozdzielnicy objętej działaniem łuku zwarciowego, ma miejsce kolejna faza zwana fazą termiczną, w której to termiczne działanie łuku awaryjnego na aparaturę, osprzęt czy elementy konstrukcji powoduje ich zniszczenie i intensywne wydzielanie się dużej ilości trujących gazów oraz sadzy. Dodatkowo intensywne oddziaływanie łuku na szyny przyczynia się do powstawania dużej ilości par metali, które mieszają się z produktami rozpadu materiałów wykorzystywanych przy produkcji wyposażenia rozdzielnicy. Dłuższy czas występowania zwarcia łukowego skutkuje wypaleniem wnętrza rozdzielnicy i przenoszeniem się łuku do sąsiednich przedziałów, powiększając tym rozmiar powstałych szkód [19, 22, 46, 48].

Po wyłączeniu zasilania pola rozdzielnicy objętego zwarciem łukowym występuje ostatnia faza, zwana fazą stygnięcia, w której to zachodzi stabilizacja zmian ciśnienia oraz spadek temperatury gazu i wyposażenia uszkodzonego przedziału. Stygnięcie rozdzielnicy

do temperatury umożliwiającej oględziny uszkodzeń, w zależności od objętości przedziałów, ilości i gabarytów wyposażenia może trwać od kilkunastu minut do kilku godzin. W tym czasie produkty wydzielające się w wyniku termicznego działania łuku awaryjnego, w połączeniu z wysoką temperaturą powietrza, przemieszczają się po przedziałach rozdzielnicy i tworzą na powierzchniach izolacji trwałe warstwy przewodzące, uniemożliwiające dalszą poprawną pracę rozdzielnicy [46, 48].

W Polsce statystyki zdarzeń dotyczących tego typu wypadków prowadzi Zakład Bezpieczeństwa Pracy Instytutu Energetyki. Według danych Instytutu Energetyki na 1000 osób zatrudnionych średnia częstość wypadków spowodowanych prądem z udziałem łuku elektrycznego wynosi 0,35 ÷ 0,45 [36]. Dla porównania w Niemczech statystyką tego typu zdarzeń zajmuje się BK-Ermittlungen u. Statistik, w którym można odnaleźć podobne wartości współczynników średniej częstości wypadków mieszczące się w przedziale 0,24 ÷ 0,3 [48, 80].

W przypadku średnionapięciowych elektroenergetycznych sieci rozdzielczych ilość zwarć łukowych, w których zostały poszkodowane osoby, niezmiennie od lat jest na poziomie około kilkunastu procent wszystkich zdarzeń. Natomiast w przypadku rozdzielczych sieci niskiego napięcia względna (procentowa) liczba wypadków jest na poziomie około 5% [48, 80]. Należy zaznaczyć, że przytaczane wartości dotyczą wyłącznie tej części zdarzeń, w których poszkodowani zostali ludzie. Analizowane przypadki zwarć łukowych miały miejsce głównie w obiektach energetyki zawodowej i przemysłowej. W Polsce co roku występuje kilkadziesiąt wypadków, z czego niestety kilka to wypadki śmiertelne.

Przywrócenie do ponownej eksploatacji rozdzielnic, w których doszło do zwarcia łukowego musi być poprzedzone oględzinami, a w razie konieczności remontem, wymianą przedziałów rozdzielnicy i znajdującego się w nich wyposażenia. Prowadzi się czynności mające określić przyczyny powstania zwarcia i oszacowanie skutków działania łuku po to, aby w dalszym etapie eksploatacji rozdzielnic zmniejszyć prawdopodobieństwo podobnego zdarzenia. Jednym ze sposobów oszacowania skutków zwarć łukowych jest określenie energii zwarcia łukowego i związanych z nią uszkodzeń rozdzielnicy.

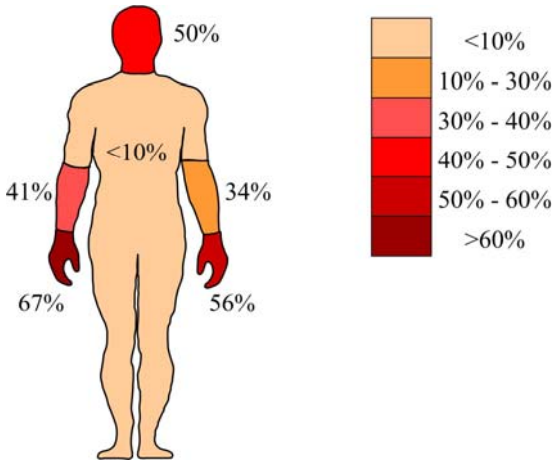
Wartością graniczną energii zwarcia łukowego, przy której powstałe uszkodzenia umożliwiają szybkie przywrócenie do eksploatacji uszkodzonych przedziałów rozdzielnicy, jest 100 kJ. Wraz ze wzrostem wydzielonej energii zwarcia łukowego wzrastają również powstałe uszkodzenia wyposażenia rozdzielnicy. Można wyodrębnić następujące wartości graniczne energii zwarcia łukowego i skutki, jakie wywołują [61]:

- $E_a \approx 170$ kJ – skutkuje pojawiającymi się śladami wypalenia szyn i izolatorów, uszkodzeniem termicznym przegród, napyleniem miedzią (przy szynach miedzianych), pogorszeniem stanu izolacji;
- $E_a \approx 250$ kJ – powoduje silne zniszczenia wewnątrz przedziałów, np.: wypalenie szyn oraz izolatorów, tworzenie się metalicznych powłok na elementach konstrukcji, izolatorach i urządzeniach;
- $E_a \approx 340$ kJ – sprawia przenikanie łuku między przedziałami rozdzielnicy, uszkodzenia konstrukcji wsporczych i znaczne pogorszenie stanu izolacji;
- $E_a > 700$ kJ – wywołuje całkowite zniszczenie przedziałów rozdzielnicy.

Powstałe uszkodzenia wewnątrz rozdzielnicy przyczyniają się do konieczności wyłączenia z eksploatacji i naprawy uszkodzonej aparatury rozdzielczej i długotrwałych przerw w dostawie energii elektrycznej, co z kolei przekłada się na koszty powiązane z przerwami w dostawie energii elektrycznej oraz koniecznością zakupu uszkodzonych urządzeń. Problem ten staje się bardzo istotny w tych gałęziach przemysłu, w których proces produkcyjny uzależniony jest od pewności dostaw energii elektrycznej, np.: przemysł petrochemiczny czy celulozowy lub tam, gdzie sprawność i niezawodność pracy systemu elektroenergetycznego może wpłynąć na bezpieczeństwo ludzi znajdujących się w obiektach np. statkach i platformach wiertniczych oraz kopalniach.

Innym skutkiem zwarć łukowych są obrażenia osób będących w bezpośrednim sąsiedztwie miejsca, w którym doszło do awarii. Obrażenia te głównie związane są z działaniem wydostających się gazów o wysokiej temperaturze – oparzenia, fali ciśnienia – uszkodzenie słuchu i promieniowania łuku – uszkodzenia wzroku. W przypadku termicznego działania łuku najbardziej narażone są nieosłonięte części ciała, gdzie statystycznie ponad połowa ich powierzchni ulega poparzeniom 2 i 3 stopnia. Stopień obrażeń powierzchni ciała objętej działaniem łuku zwarciowego ilustruje rys. 1.3.

Wykorzystanie coraz to nowszych materiałów stosowanych do budowy urządzeń, nowoczesnych i niezawodnych konstrukcji zainstalowanej aparatury, rozbudowanych systemów automatyki zabezpieczeniowej, czy rozwiązań ochrony przed nieprawidłową eksploatacją urządzeń nie spowoduje wyeliminowania możliwości wystąpienia zwarcia łukowego. Szczególne kryterium, które stawiane jest przy projektowaniu tego typu układów, to przede wszystkim bezpieczeństwo użytkowania urządzeń elektrycznych. Zapewnienie bezpieczeństwa osób przy eksploatacji urządzeń rozdzielczych i ochrona ich przed skutkami działania łuku zwarciowego realizowana jest w dwóch kierunkach.



Rys. 1.3. Stopień obrażeń na powierzchni ciała osoby objętej działaniem zwarcia łukowego [48, 80]

Rys. 1.4. Kombinezon łukoochronny oraz sprzęt ochronny wykorzystywany przez pracowników w trakcie czynności łączeniowych [27]

W pierwszej kolejności dąży się do zmniejszenia prawdopodobieństwa występowania zwarć łukowych. Jest to realizowane poprzez odpowiednie przygotowanie i szkolenie personelu zajmującego się eksploatacją elektroenergetycznych urządzeń rozdzielczych, jak również zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości konstrukcji rozdzielnic, w których dostępne części czynne przewodzące pokrywane są warstwami izolacyjnymi. Dodatkowo zainstalowaną aparaturę łączeniową wyposaża się w blokady mechaniczne uniemożliwiające przeprowadzenie niedozwolonych czynności łączeniowych, systemy blokad drzwi zapobiegających przed niezamierzonym wtargnięciem do części rozdzielnicy będącej pod napięciem. W rozdzielnicach średniego i wysokiego napięcia zmniejszenie prawdopodobieństwa występowania zwarć łukowych realizowane jest jeszcze poprzez stosowanie gazu izolacyjnego – sześciofluorku siarki (SF_6) o podwyższonym ciśnieniu. Wymagania dotyczące konstrukcji, zasad projektowania, obostrzeń i kryteriów, jakie muszą spełnić łukooodporne rozdzielnice zapewniające określony poziom ochrony przed skutkami działania łuku zwarciowego opisane są w dokumentach normalizacyjnych [85, 92, 96].

Drugi kierunek w zapewnieniu bezpieczeństwa personelu obsługującego rozdzielnice wiąże się z ograniczaniem skutków działania łuku awaryjnego zarówno w samej rozdzielnicy, jak również w jej otoczeniu. Ograniczenie skutków działania łuku awaryjnego realizowane jest poprzez zastosowanie wzmocnionej konstrukcji rozdzielnicy wytrzymującej gwałtowne zmiany temperatury i ciśnienia w początkowej fazie zwarcia

łukowego, klap i przedziałów dekompresyjnych umożliwiających wypływ w bezpiecznym kierunku gorących i zjonizowanych gazów [10, 19, 41, 61, 76].

Ponadto osoby zajmujące się eksploatacją rozdzielnic i przeprowadzające czynności łączeniowe wyposaża się w indywidualne środki ochrony przed skutkami cieplnymi działania łuku zwarciowego, tj.: hełm, okulary, rękawice, kombinezon łukoochronny (rys. 1.4) [27]. Podobnie, jak w przypadku rozdzielnic, sprzęt ochrony osobistej PPE musi spełniać sprecyzowane kryteria zapewniające określony stopień ochrony przed działaniem łuku zwarciowego. Weryfikacja tych kryteriów sprawdzana jest na podstawie określonych badań laboratoryjnych [18, 27, 31, 55, 80, 85, 86].

W celu ograniczenia energii zwarć łukowych i związanych z nią skutków działania łuku awaryjnego coraz popularniejsze staje się wykorzystywanie systemów eliminacji zwarć, których zasada działania opiera się na zminimalizowaniu czasu palenia się łuku. Systemy eliminacji zwarć łukowych wyposażone są w czujniki optyczne wykrywające promieniowanie łuku oraz przetworniki pomiarowe, za pomocą których rejestrowany jest spadek napięcia na szynach rozdzielczych lub wzrost prądów zwarciowych. Układy detekcji łuku, w zależności od mocy zwarciowych, mogą powodować bezzwłoczne wyłączenie zasilania [36, 65, 71, 76] lub, w przypadku dużych mocy zwarciowych, oddziaływać na szybkie zwierniki zwarciowe ograniczające czas palenia się łuku do kilku milisekund [25, 68, 69, 70, 80].

Zasada działania systemu eliminacji zwarć, wykorzystującego zwierniki, realizowana jest w dwóch etapach. Pierwszy etap to wykrycie i identyfikacja miejsca rozdzielnicy objętego działaniem łuku zwarciowego. Drugi etap działania polega na wywołaniu, w jak najkrótszym czasie, trójfazowego zwarcia metalicznego za pomocą zwiernika. Wówczas to następuje samoistne zgaszenie łuku awaryjnego poprzez zbocznikowanie go pomijalnie małą rezystancją. Równocześnie z wywołaniem zwarcia metalicznego realizowane jest bezzwłoczne wyłączenie zasilania rozdzielnicy lub, w przypadku wykorzystania wielu zwierników, przedziału rozdzielnicy czy sekcji szyn, w których doszło do zwarcia łukowego. Systemy eliminujące łuk awaryjny i wykorzystujące do tego celu zwierniki zwarciowe wykorzystywane są w rozdzielnicach średniego napięcia [25, 36, 38, 76] oraz niskiego napięcia [68, 70, 80].

W wielu ośrodkach naukowo-badawczych na całym świecie prowadzone są badania, które powiązane są z problematyką zwarć łukowych. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych służą przede wszystkim opracowywaniu nowych rozwiązań konstruktorskich rozdzielnic, sprzętu ochronnego czy systemów eliminacji zwarć

łukowych w taki sposób, aby do minimum zmniejszyć skutki działania łuku awaryjnego i jednocześnie poprawić bezpieczeństwo eksploatacji rozdzielnic. Pozyskane na etapie badań eksperymentalnych wyniki służą do udoskonalania zasad przeprowadzania badań konstruktorskich rozdzielnic i sprzętu ochrony osobistej, opracowywania zależności, wzorów, modeli matematycznych łuku umożliwiających oszacowanie prądu zwarcia łukowego, napięcia łuku i energii zwarcia łukowego. Ponadto wyniki badań eksperymentalnych stanowią cenne źródło informacji w przypadku opracowania modeli termodynamicznych, za pomocą których można obliczyć przyrosty ciśnienia i temperatury gazu w trakcie zwarcia łukowego w różnych konstrukcjach rozdzielnic. Dodatkowo wszystkie te działania mają na celu zmniejszenie nakładów finansowych przeznaczanych na kosztowne badania laboratoryjne, które w wielu przypadkach są badaniami niszczącymi. Publikowane wyniki prac naukowo-badawczych dotyczą tematyki obejmującej:

- badania zwarć łukowych w średnionapięciowych rozdzielnicach osłoniętych z izolacją powietrzną i SF_6 [7, 16, 43, 54, 61, 68, 73, 80], których wyniki badań i analiz dotyczą energii zwarć łukowych, zmian ciśnienia, temperatury i oddziaływań zmian ciśnienia gazu na konstrukcję rozdzielnic;
- badania zwarć łukowych w niskonapięciowych rozdzielnicach, w których prezentowane wyniki badań odnoszą się do energii niskonapięciowych zwarć łukowych [19, 20, 21, 22, 61, 73], analizy wyników pomiarów ciśnienia i temperatury w przedziałach rozdzielnic [9, 20, 22, 61, 68];
- modelowanie niskonapięciowych zwarć łukowych, gdzie na podstawie wyników badań eksperymentalnych zostały przedstawione: zależności empiryczne określające parametry charakteryzujące łuk zwarciowy, tj. prąd i napięcie łuku, wzory umożliwiające obliczanie energii zwarć i modele zaciskowe łuku zwarciowego [2, 32, 43, 44, 47, 57, 58, 61, 66, 85, 86]. Ponadto w pracach [5, 6, 43, 61] zaprezentowano opis modeli fizycznych (kanałowych) łuku zwarciowego, w których w oparciu o zjawiska termodynamiczne, hydrodynamiczne lub magnetohydrodynamiczne wyznaczono zmiany ciśnienia i temperatury gazu w rozdzielnicy objętej łukiem zwarciowym, lub w oparciu o wyniki zmian ww. parametrów analizowano naprężenia mechaniczne ścian, konstrukcji rozdzielnic;
- modelowanie łuku zakłóceniowego średniego napięcia [24, 33, 37, 43, 61, 73, 81, 82], obejmujące przykładowe zależności, modele zaciskowe umożliwiające obliczanie prądów zwarcia łukowego, napięcia, energii łuku, jak również modele

fizyczne umożliwiające, podobnie jak w przypadku układów niskonapięciowych, obliczanie przyrostów ciśnienia i temperatury gazu w przedziale rozdzielnicy objętym zwarciem łukowym [5, 7, 38, 43, 61];

- badania łukoodporności rozdzielnic [9, 19, 20, 22, 43, 73, 80], w których zaprezentowano wymagania, procedury przeprowadzania badań oraz wyniki prób łukoodporności konkretnych obiektów średniego i niskiego napięcia;
- bezpieczeństwo eksploatacji rozdzielnic, które realizowane jest przez odpowiednie badania sprzętu ochrony osobistej PPE pracowników narażonych na bezpośrednie działanie łuku zwarciowego [18, 26, 31, 55, 80, 85, 86];
- zwarcia łukowe w kablach średniego napięcia [39, 40, 42, 43, 80], gdzie zaprezentowano wyniki badań zwarć łukowych w mufach kablowych, elektroenergetycznych kablach na napięcia z przedziału $12 \div 28$ kV;
- eksploatację systemów ograniczania skutków zwarć łukowych w układach rozdzielczych niskiego napięcia [28, 80] i średniego napięcia [25, 28, 35, 36, 38, 65, 68, 71, 76];
- badania dotyczące udoskonalenia systemów ograniczania zwarć w zakresie technik skutecznego wykrywania zwarć [17, 68, 71] oraz rozwiązań konstruktorskich zwierników zwarciowych [38, 70, 80];
- rozwiązania konstruktorskie systemów ograniczających zwarcia łukowe, w których ograniczenie prądów i skutków łuku zwarciowego realizowane jest za pomocą: łączników hybrydowych i półprzewodnikowych [3, 14, 15, 28, 83, 84], bezpieczników [1, 51, 60] lub jednofazowego wyłączania niskonapięciowego trójfazowego zwarcia łukowego [61, 62, 64].

Prezentowane w ramach czasopism technicznych, materiałów konferencyjnych i projektów badawczych wyniki prac naukowo-badawczych obejmują szerokie spektrum problematyki i zjawisk towarzyszących zwarciom łukowym, co oznacza, że problem zwarć łukowych w systemach rozdzielczych jest ważny i aktualny. Prezentowane osiągnięcia w zakresie rozwiązań konstrukcyjnych rozdzielnic, systemów ograniczania skutków zwarć łukowych, czy wyników analiz zjawisk towarzyszących zwarciom łukowym bardzo często dotyczą wąskiego zakresu badań, jak również powiązane są z konkretnymi obiektami badań. W literaturze brakuje informacji dotyczących m.in.: szczegółowego opisu warunków przeprowadzanych eksperymentów, sposobów wyznaczenia określonych zależności empirycznych oraz zakresu ich przydatności. Często zawarte informacje są fragmentaryczne i odnoszą się np.: do zastosowanych na etapie tworzenia określonych

modeli obliczeniowych, założeń lub uproszczeń. Niekompletne informacje sprawiają, że odtworzenie wybranego modelu obliczeniowego lub warunków, w jakich wykonywano badania laboratoryjne jest kłopotliwe, a czasami wręcz niemożliwe. Pomimo to zawarte informacje mogą być przydatne w określeniu kierunków badań, udoskonalaniu modeli obliczeniowych oraz przy ogólnym stanie wiedzy dają pogląd na rozwój konkretnych rozwiązań i trendów w badaniach łuku awaryjnego.

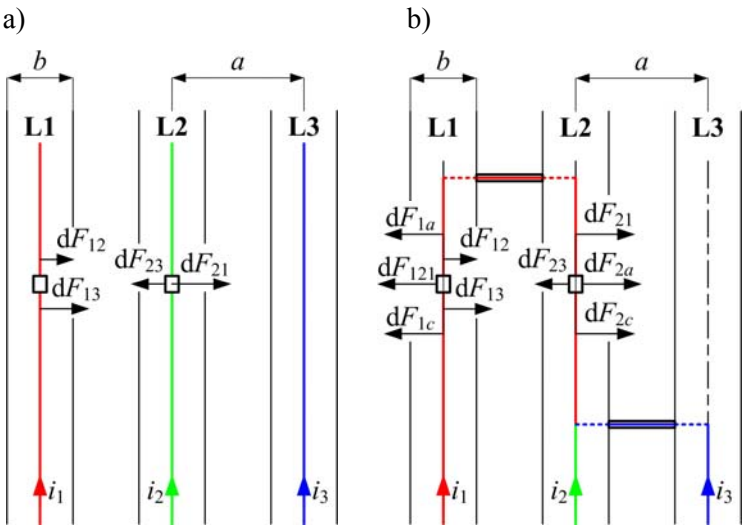
Ogólnie ujmując, prezentowana tematyka badawcza obejmuje swoim zakresem analizę zjawisk towarzyszących zwarciom łukowym w różnych etapach rozwoju łuku awaryjnego, tj.: przyrosty ciśnienia, temperatury gazu, oddziaływania termiczne łuku na wyposażenie rozdzielnicy oraz naprężenia mechaniczne konstrukcji rozdzielnic wywołane falą ciśnienia. Wyniki analiz pozwalają oszacować skutki działania łuku zwarciowego oraz umożliwiają zaproponowanie skutecznych rozwiązań konstrukcji rozdzielnic odpornych na działanie łuku awaryjnego. Ponadto w ciągu ostatnich lat można zauważyć wyraźne zainteresowanie nowymi rozwiązaniami sposobów ograniczania prądów zwarć łukowych, czy nowoczesnymi konstrukcjami coraz to bardziej rozbudowanych systemów ograniczających zwarcia łukowe.

Jednakże w literaturze brakuje istotnych informacji dotyczących zjawisk towarzyszących zwarciu łukowemu w każdej konstrukcji rozdzielnic, związanych z oddziaływaniem sił elektrodynamicznych w przewodach szynowych, powstałych od prądu płynącego w łuku zwarciowym i w szynach. Aktualnie obowiązujące dokumenty normalizacyjne [94, 96], czy prezentowane sposoby obliczania oddziaływań elektrodynamicznych w szynach rozdzielczych [4, 53, 67, 74], nie podają wytycznych określających wpływu przemieszczającego się wzdłuż układu szynowego łuku zwarciowego na wypadkowe siły elektrodynamiczne działające na przewody szynowe.

Wprawdzie w dostępnej literaturze można znaleźć informacje dotyczące wzrostu sił elektrodynamicznych występujących w przewodach szynowych w trakcie zwarcia łukowego, w średnionapięciowych systemach rozdzielczych [61, 63] oraz w układach szynowych rozdzielnic niskiego napięcia [59, 61]. Jednakże zawarte informacje dotyczą wybranego przypadku ułożenia łuku w układzie szynowym oraz nie uwzględniają wpływu zmieniającego się w czasie położenia kolumn łukowych trójfazowego zwarcia łukowego względem siebie, zmian szybkości przemieszczania się łuku po szynach wykonanych z różnych materiałów oraz wartości chwilowych prądów płynących w poszczególnych kolumnach łuku trójfazowego zwarcia łukowego i w przewodach szynowych.

Obowiązujące wytyczne dotyczące prawidłowego projektowania układów szynowych ze względu na obciążalność elektrodynamiczną obejmują analizę oddziaływań elektrodynamicznych występujących w prostoliniowych układach szynowych, w których płyną prądy zwarciowe. W tego typu układach określenie maksymalnych sił elektrodynamicznych działających na szyny oparte jest o wyznaczenie składowych sił, które działają na poszczególne szyny, i powstają od prądów płynących w poszczególnych fazach układu szynowego. Przykładowe składowe elementarnych sił elektrodynamicznych występujących w prostoliniowym, płaskim układzie szyn w trakcie zwarcia metalicznego przedstawiono na rys. 1.5a.

Nieuwzględnienie, na etapie projektowania układów szynowych, możliwości powstania zwarcia łukowego i jego wpływu na rozkład obciążenia elektrodynamicznego w szynach (rys. 1.5b) może przyczynić się do niekontrolowanego zniszczenia rozdzielnicy, wywołanego uszkodzeniem układu szynowego, pomimo że konstrukcja rozdzielnicy została zaprojektowana zgodnie z obowiązującymi wymaganiami. Przykład rozerwania układu szynowego i uszkodzenia niskonapięciowej rozdzielnicy w wyniku prób zwarć łukowych ilustruje rys. 1.6.



Rys. 1.5. Składowe elementarnych sił elektrodynamicznych działających na poszczególne szyny płaskiego układu szynowego podczas: a) zwarcia metalicznego, b) zwarcia łukowego

Rys. 1.6. Uszkodzenia układu szynowego po próbach zwarć łukowych w rozdzielnicy [80]

Wpływ łuku zwarciowego na siły elektrodynamiczne występujące w układach szynowych może być szczególnie widoczny w rozdzielnicach niskonapięciowych z uwagi na duże wartości prądów zwarciowych, jak również niewielkie odległości pomiędzy

szynami. Z drugiej strony ograniczenie prądów zwarciowych wywołanych rezystancją łuku sprawia, że problem ten może dotyczyć popularnie instalowanych i eksploatowanych dystrybucyjnych rozdzielnic średnich mocy zasilanych z transformatorów o mocy nieprzekraczającej 630 kVA, w których instalacja systemów ograniczających zwarcia łukowe jest nieopłacalna. Dodatkowo, w wielu przypadkach, konstrukcje tego typu rozdzielnic dostosowane są do prądów znamionowych nieprzekraczających kilkuset amperów, a wytrzymałość elektrodynamiczna szyn określona jest z niewielkim marginesem bezpieczeństwa.

Prezentowana praca jest ściśle powiązana z szeroko rozumianymi badaniami dotyczącymi analizy zjawisk towarzyszących zwarciom łukowym i dotyczy nieporuszanej w literaturze dynamiki przemieszczania się niskonapięciowego łuku awaryjnego oraz związanych z nią oddziaływań elektrodynamicznych występujących w niskonapięciowych układach szynowych podczas zwarć łukowych. Zamieszczone wyniki badań i analiz mogą stanowić cenne źródło informacji dotyczących oddziaływań sił elektrodynamicznych powstających od przemieszczającego się wzdłuż szyn łuku zwarciowego, wpływu rezystancji łuku na wartości prądów zwarciowych w układach rozdzielczych niskiego napięcia, jak również rozszerzają zakres wiedzy dotyczącej dynamiki przemieszczania się niskonapięciowego łuku awaryjnego. Ponadto rezultaty badań mogą być przydatne w rozważaniach związanych z wpływem łuku zwarciowego na narażenia mechaniczne, jakim poddawane są podczas zwarć układy szynowe, jak również w udoskonalaniu metod obliczeniowych, których celem jest analiza lokalnych zniszczeń wyposażenia rozdzielnicy wywołanych przez palący się łuk. Przeprowadzone badania i ich wyniki mogą przyczynić się do poprawienia bezpieczeństwa eksploatacji rozdzielnic niskiego napięcia oraz zmniejszenia nakładów finansowych na kosztowne badania laboratoryjne.

2. Oddziaływania elektrodynamiczne w układach szynowych

Przepływ prądu zwarciowego, oprócz adiabatycznego wzrostu temperatury toru prądowego, powoduje powstanie sił elektrodynamicznych występujących głównie pomiędzy torami prądowymi oraz torami prądowymi a konstrukcjami ferromagnetycznymi. Występujące siły przyczyniają się do powstania naprężeń mechanicznych w torach prądowych oraz w konstrukcjach wsporczych układów szynowych.

Ważnym elementem, występującym na etapie projektowania rozdzielnic, jest prawidłowa analiza oraz dobór zastosowanych układów szynowych pod względem oddziaływań elektrodynamicznych występujących podczas przepływu prądu zwarciowego. Wyznaczenie sił elektrodynamicznych lub momentów mechanicznych działających na konstrukcje wsporcze układów szynowych opiera się na wykorzystaniu prawa Biota-Savarta, siły Lorentza czy równań Maxwella. Przeprowadzenie dokładnej analizy analitycznej jest trudne ze względu na skomplikowane i rozbudowane zależności matematyczne. Zastosowanie takich wzorów w trakcie obliczeń inżynierskich jest czasochłonne i może powodować błędy, które przełożą się na nieprawidłowy dobór układu. W związku z tym, na etapie prac inżynierskich, zastosowanie mają uproszczone wzory empiryczne ze współczynnikami wyznaczonymi na podstawie badań laboratoryjnych. Jednak prawidłowy dobór układów szynowych zależy przede wszystkim od przyjętych założeń wyjściowych.

2.1. Wymagania norm dotyczące oddziaływań elektrodynamicznych w układach szynowych

Dobór układów szynowych pod względem odporności na działanie sił elektrodynamicznych skupia się na rozwiązaniu następujących problemów:

- obliczeniu sił elektrodynamicznych występujących w szynach lub w torach prądowych powstałych w wyniku przepływu prądu zwarciowego,
- wyznaczeniu naprężeń mechanicznych występujących w torach prądowych oraz określeniu minimalnych przekrojów torów prądowych, w których powstające naprężenia nie spowodują trwałych uszkodzeń mechanicznych,

- określeniu sił działających na podpory układów szynowych oraz prawidłowy dobór rodzaju i liczby zastosowanych wsporników tak, aby jednostkowe naprężenia działające na podpory nie spowodowały ich trwałego uszkodzenia.

Normy [88, 89, 91, 93, 94*] skupiają się na procedurach prawidłowego doboru układów szynowych, wykonanych z przewodów sztywnych oraz giętkich, pod względem wytrzymałości elektrodynamicznej. Istotnym parametrem, niezbędnym w dalszych obliczeniach wytrzymałości elektrodynamicznej układu szynowego są wartości sił, które działają na szyny przy określonym rodzaju zwarcia.

Oddziaływania elektrodynamiczne w układach szynowych nie występują w formie sił skupionych, lecz są w postaci równomiernego rozkładu elementarnych sił rozłożonych wzdłuż całej długości toru prądowego, w którym płynie prąd. Na wartość elementarnej siły elektrodynamicznej występującej w torze prądowym, oprócz wartości chwilowej prądu, wpływ ma odległość oraz wzajemne ułożenie szyn.

Zarówno w obwodach prądu stałego jak i prądu przemiennego, przebieg prądów zwarciowych ma charakter zmienny. W związku z tym, w obliczeniach oddziaływań elektrodynamicznych należy uwzględnić wpływ zmian wartości prądów w stanie przejściowym. Siły działające na tory prądowe zawierają składowe wynikające z występowania składowych nieokresowych prądów zwarciowych oraz składowych okresowych zależnych od częstotliwości napięcia źródła zasilającego obwód zwarciowy [4, 52].

Działające na układ szyn, jako układ sprężysty, elementarne siły elektrodynamiczne o charakterze pulsacyjnym (okresowym lub nieokresowym) powodują powstawanie drgań mechanicznych. Amplituda drgań zależy m.in. od: charakteru zmian elementarnej siły elektrodynamicznej w czasie, rozkładu obciążenia elektrodynamicznego wzdłuż szyny oraz budowy samego układu szyn (sposobu ułożenia, profilu i rodzaju materiału, z jakiego wykonany jest układ szynowy, ilości i rodzaju zamocowanych podpór). Najgroźniejsza sytuacja występuje w przypadku, gdy częstotliwość drgań własnych układu szynowego pokrywa się z częstotliwością zmian sił w nim występujących. Sytuacja ta prowadzi do powstania rezonansu, podczas którego gwałtownie wzrasta amplituda drgań, a tym samym i naprężenia w szynach. Przy projektowaniu układów szynowych prądu przemiennego zaleca się, aby częstotliwość drgań własnych nie pokrywała się z dwukrotną wartością częstotliwości sieci, w której dany układ ma pracować.

* norma aktualnie obowiązująca w chwili publikacji pracy

Efektem końcowym obliczeń wytrzymałości elektrodynamicznej układów szynowych jest wyznaczenie dopuszczalnych naprężeń mechanicznych występujących w szynach oraz sił działających na podpory. Na wartość naprężeń mechanicznych występujących w szynach wpływa m.in.: budowa samego układu szynowego, wartość i rozkład obciążenia elektrodynamicznego, czas wyłączania zwarć, czy stosowanie automatyki ponownego załączania SPZ. Obliczone dla danego układu szynowego wartości naprężeń mechanicznych nie powinny przekraczać dopuszczalnych wartości naprężeń powodujących trwałe odkształcenie (przewyższających granicę plastyczności). Natomiast w przypadku sił wypadkowych działających na podpory, obliczenia ich wartości są konieczne w celu wyznaczenia dopuszczalnych wartości sił łamiących. Wartości tych sił nie powinny przekraczać wartości dopuszczalnych przypisanych dla danego rodzaju izolatorów.

Wzajemne zależności pomiędzy szeregiem parametrów charakteryzujących układy szynowe oraz obwody elektryczne, w jakich one pracują, powodują, że analityczne obliczenie obciążalności elektrodynamicznej układów szynowych o określonej konstrukcji staje się skomplikowane. Stąd w obliczeniach inżynierskich wprowadzono wzory uproszczone, na podstawie których wyznaczane są potrzebne parametry. Powyższe uproszczenia polegają na następujących założeniach:

- siły elektrodynamiczne działające na szyny oblicza się tak samo, jak dla układu składającego się z prostoliniowych szyn ułożonych równolegle względem siebie,
- zakłada się jednolity rozkład obciążenia elektrodynamicznego wzdłuż szyn,
- przyjmuje się obciążenie statyczne (siły, naprężenia) układu szyn.

Jeżeli na tym etapie zostałaby zakończona analiza wytrzymałości elektrodynamicznej, to uzyskane wyniki obarczone byłyby dużym błędem wynikającym z nieuwzględnienia dynamiki zjawisk zachodzących w trakcie przepływu prądów zwarciowych w układach szynowych. W tym celu we wzorach uproszczonych wprowadzone zostały dodatkowe współczynniki, wyznaczane nieraz metodą graficzną z dostępnych charakterystyk, uwzględniające dynamiczny charakter zjawisk, elastyczność podpór, drgania własne szyn i konstrukcję układu szynowego, tj.: liczbę przęseł, sposób zamocowania podpór, profil i ilość szyn w jednej fazie, czas i rodzaj zwarcia, a także ilość cyklów samoczynnego ponownego załączania SPZ.

W przypadku zwarć łukowych obecność łuku zwarciowego w układzie szynowym powoduje zmianę rozkładu obciążenia elektrodynamicznego wzdłuż szyn. Tak więc

w dalszym etapie analizy narażenia elektrodynamiczne rozpatrywane będą poprzez wyznaczenie elementarnych sił elektrodynamicznych.

Parametrem wyjściowym do obliczeń narażeń elektrodynamicznych jest wyznaczenie maksymalnej siły elektrodynamicznej zwarcia trójfazowego działającej pomiędzy przewodami fazowymi. Zgodnie z obowiązującymi normami i literaturą wartość tej siły obliczona jest na podstawie zależności [52, 72, 74, 67, 88, 91, 93, 94]:

$$F_{\max} = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{\sqrt{3}}{2} i_p{}^2 \frac{l}{a}, \tag{2.1}$$

gdzie: μ_0 jest przenikalnością magnetyczną w próżni, i_p jest maksymalnym prądem udarowym występującym przy danym rodzaju zwarcia podanym w [A], a jest odstępem pomiędzy osiami szyn wyrażonym w [m], a l – długością przęsła wyrażoną w [m]. Współczynnik $\frac{\sqrt{3}}{2}$ dodawany jest do obliczeń sił występujących podczas zwarć trójfazowych.

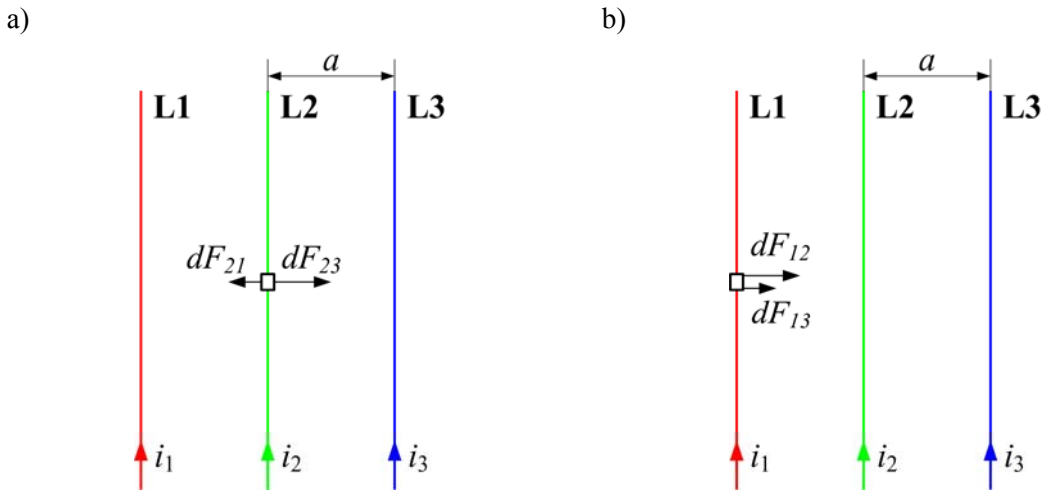
Zakładając równomierny rozkład obciążenia elektrodynamicznego wzdłuż szyn, pomijając współczynnik $\frac{\sqrt{3}}{2}$, wzór (2.1) można przekształcić do postaci:

$$\mathrm{d}F_{\max} = 2\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i_p^{\,2}}{a}\mathrm{d}l\,. \tag{2.2}$$

Zależność (2.2) odzwierciedla przypadek obliczenia elementarnej siły elektrodynamicznej w układzie składającym się z dwóch nieskończenie długich, nieskończenie cienkich i prostoliniowych przewodników, ułożonych równolegle względem siebie w odstępie a, w których cały płynący prąd i skupiony jest w jednej nitce prądowej znajdującej się w osi szyny. Jest to najprostszy przypadek, który w wielu sytuacjach odzwierciedla w zadowalającym stopniu rzeczywiste układy szynowe.

2.2. Oddziaływania elektrodynamiczne w układach szynowych podczas zwarć metalicznych

W trójfazowych układach szyn zbiorczych wypadkowa siła działająca na dowolną szynę składa się z dwóch składowych sił, powstających od prądów płynących w szynach sąsiednich i w analizowanej szynie. Przykładowy podział składowych sił działających na szynę środkową oraz skrajną przedstawiono na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Składowe sił działające na szynę: a) środkową, b) skrajną w nieskończenie długim prostoliniowym i płaskim układzie szyn

W przypadku szyny środkowej L2 na wypadkową wartość elementarnej siły elektrodynamicznej składają się dwie składowe sił (rys. 2.1a). Pierwsza składowa dF_{21} pochodzi od prądów płynących w szynie środkowej L2 i skrajnej L1 i określona jest wzorem:

$$\mathrm{d}F_{21} = -2\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} i_1 i_2 \,\mathrm{d}l\,. \tag{2.3}$$

Druga składowa dF_{23} powstaje od prądów płynących w szynach (fazach): środkowej L2 oraz skrajnej L3 i opisana jest zależnością:

$$\mathrm{d}F_{23} = 2\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} i_2 i_3 \,\mathrm{d}l\,. \tag{2.4}$$

W analizie oddziaływań elektrodynamicznych należy zwrócić szczególną uwagę na przebiegi prądów zwarciowych. Przy założeniu, że nie występuje w analizowanym układzie prąd doziemny, prąd fazy środkowej i_2 można zapisać w postaci:

$$i_2 = -\left(i_1 + i_3\right), \tag{2.5}$$

a suma składowych elementarnej siły elektrodynamicznej dF_B działającej na szynę środkową L2 wyraża się wzorem:

$$\mathrm{d}F_B = \mathrm{d}F_{21} + \mathrm{d}F_{23} = 2\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a}\left(i_1^{\,2} - i_3^{\,2}\right)\mathrm{d}l\,. \tag{2.6}$$

W skład wypadkowej elementarnej siły dF_A działającej na szynę skrajną L1 (rys. 2.1b) wchodzą dwie składowe sił powstających od prądów płynących w szynie skrajnej L1 i w szynach – środkowej L2 oraz skrajnej L3. Poszczególne składowe sił określone są wzorami:

$$\mathrm{d}F_{12} = 2\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} i_1 i_2 \,\mathrm{d}l\,, \tag{2.7}$$

$$\mathrm{d}F_{13} = 2\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{2a} i_1 i_3 \,\mathrm{d}l\,. \tag{2.8}$$

Po uwzględnieniu warunku (2.5) elementarna siła dF_A działająca na szynę skrajną L1 przyjmuje postać:

$$\mathrm{d}F_A = \mathrm{d}F_{12} + \mathrm{d}F_{13} = -2\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} i_1 \left(i_1 + \frac{1}{2} i_3 \right) \mathrm{d}l\,. \tag{2.9}$$

W przypadku szyny skrajnej L3, przy założeniu symetryczności prądów zwarciowych, kształt przebiegu siły wypadkowej jest taki sam, jak w przypadku szyny L1, z tą różnicą, że jest on przeciwnego znaku oraz przesunięty w czasie o 0,25T, gdzie T jest okresem zmian prądu.

W celu określenia maksymalnych wartości sił działających na poszczególne szyny należy rozpatrzyć następujące przypadki przepływu prądu zwarciowego zawierającego:

- tylko składowe okresowe we wszystkich fazach (stan ustalony zwarcia po zaniku składowych nieokresowych prądu),
- oprócz składowych okresowych również maksymalne składowe nieokresowe w poszczególnych prądach fazowych.

Wartości prądów zwarciowych i_1 i i_3 (przy założeniu zwarcia jednoczesnego) zostały określone na podstawie równań:

$$\begin{cases} i_1 = i_m \left[\sin\left(\omega t + \Psi_Z - \varphi - \frac{2}{3}\pi \right) - e^{-\frac{t}{T_Z}} \sin\left(\Psi_Z - \varphi - \frac{2}{3}\pi \right) \right] \\ i_3 = i_m \left[\sin\left(\omega t + \Psi_Z - \varphi + \frac{2}{3}\pi \right) - e^{-\frac{t}{T_Z}} \sin\left(\Psi_Z - \varphi + \frac{2}{3}\pi \right) \right] \end{cases}, \tag{2.10}$$

gdzie: i_m jest amplitudą prądu, Ψ_Z jest fazą napięcia, φ jest to kąt przesunięcia fazowego pomiędzy składową okresową prądu zwarciowego a napięcia, T_Z jest stałą czasową obwodu zwarciowego.

W przypadku stanu ustalonego zwarcia, w którym w skład przebiegu prądu zwarciowego wchodzą tylko składowe okresowe, zależność (2.10) przyjmie postać:

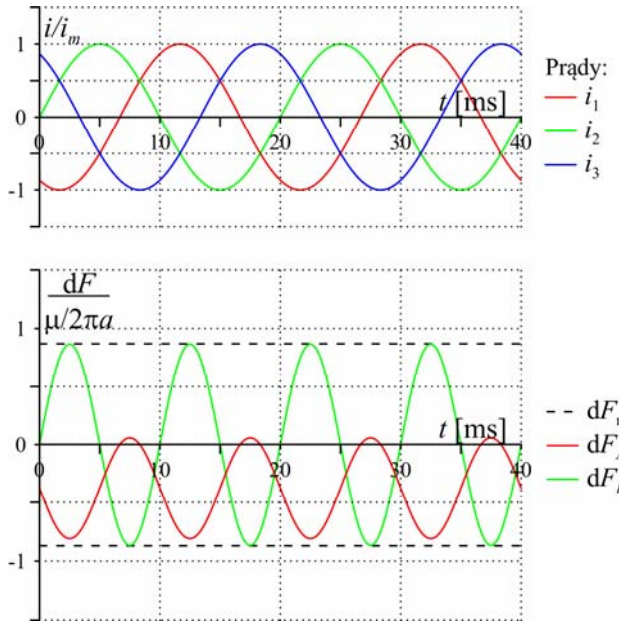
$$\begin{cases} i_1 = i_m \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi \right) \\ i_3 = i_m \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi \right) \end{cases}. \tag{2.11}$$

Tym samym wartości elementarnych sił działających na szynę środkową dF_B i skrajną dF_A zostały określone wzorami:

$$\mathrm{d}F_B = \sqrt{3}\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a}i_m{}^2 \sin(2\omega t)\,\mathrm{d}l, \tag{2.12}$$

$$\mathrm{d}F_A = -\frac{1}{2}\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a}i_m{}^2\left[\sqrt{3}\sin(2\omega t)+\frac{3}{2}\right]\mathrm{d}l. \tag{2.13}$$

Przykładowe przebiegi prądów i_1, i_2, i_3 i elementarnych sił dF_A, dF_B zamieszczono na rys. 2.2.



Rys. 2.2. Przebieg prądów i_1, i_2, i_3 i elementarnych sił działających na szynę środkową oraz skrajną podczas przepływu prądów bez składowych nieokresowych

Funkcja (2.12) osiąga ekstrema równe [4]:

$$\begin{cases} \mathrm{d}F_{B\min} \approx -2\dfrac{\mu_0}{4\pi}\dfrac{1}{a}i_m{}^2 0{,}866\,\mathrm{d}l \\ \mathrm{d}F_{B\max} \approx 2\dfrac{\mu_0}{4\pi}\dfrac{1}{a}i_m{}^2 0{,}866\,\mathrm{d}l \end{cases}, \tag{2.14}$$

Podobnie dla funkcji (2.13), ekstrema jej wynoszą odpowiednio [4]:

$$\begin{cases} \mathrm{d}F_{A\min} \approx -2\dfrac{\mu_0}{4\pi}\dfrac{1}{a}i_m{}^2 0{,}808\,\mathrm{d}l \\ \mathrm{d}F_{A\max} \approx 2\dfrac{\mu_0}{4\pi}\dfrac{1}{a}i_m{}^2 0{,}058\,\mathrm{d}l \end{cases}. \tag{2.15}$$

W przypadku uwzględnienia w zwarciu nietłumionych składowych nieokresowych prądów, zależność (2.10) można opisać za pomocą równań:

$$\begin{cases} i_1 = i_m\left[\sin\left(\omega t+\alpha-\dfrac{2}{3}\pi\right)-\sin\left(\alpha-\dfrac{2}{3}\pi\right)\right] \\ i_3 = i_m\left[\sin\left(\omega t+\alpha+\dfrac{2}{3}\pi\right)-\sin\left(\alpha+\dfrac{2}{3}\pi\right)\right] \end{cases}, \tag{2.16}$$

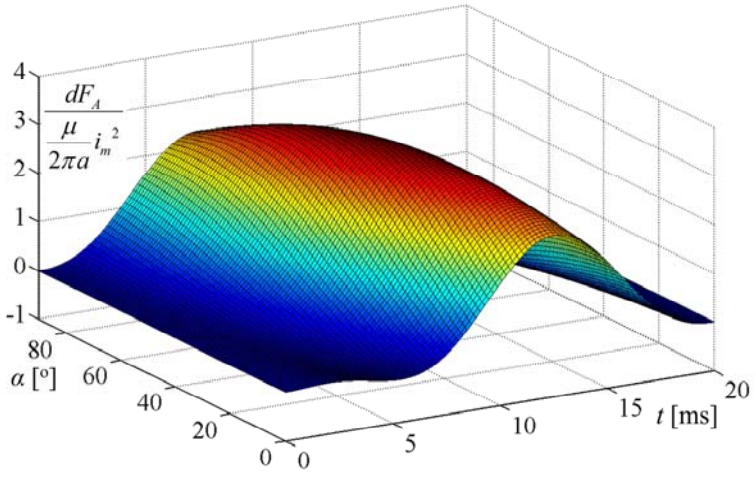
przy czym faza prądu wynosi $\alpha = \Psi_Z - \varphi$.

Tak więc elementarne siły działające na szynę skrajną dF_A i środkową dF_B można zapisać w postaci:

$$\mathrm{d}F_A = -\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{\mu_0}{4\pi a} i_m^{\,2} \left\{ -2\sin(\omega t + 2\alpha) + \sin(2\omega t + 2\alpha) + \right. \\ \left. + \sin(2\alpha) + \sqrt{3}\left[1 - \cos(\omega t)\right] \right\} \mathrm{d}l \,, \tag{2.17}$$

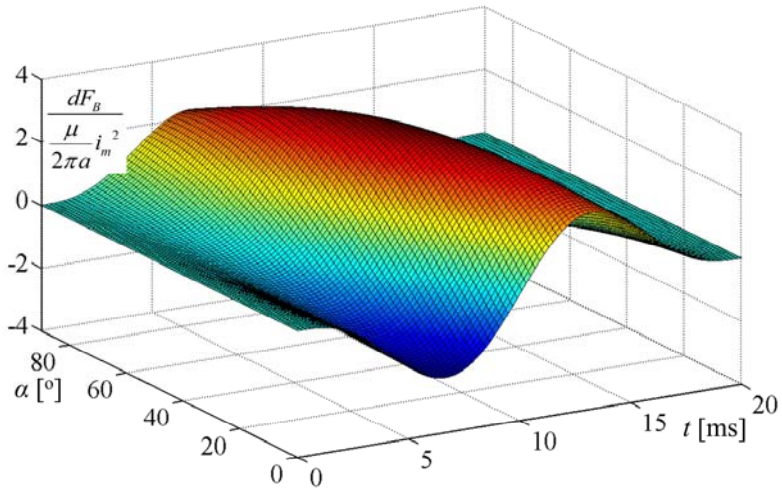
$$\mathrm{d}F_B = -\sqrt{3}\frac{\mu_0}{4\pi a} i_m^{\,2} \left[-2\sin(\omega t + 2\alpha) + \sin(2\omega t + 2\alpha) + \sin(2\alpha) \right] \mathrm{d}l \,. \tag{2.18}$$

Ekstremum sił występujących w tych przypadkach uzależnione jest od wartości kąta α i czasu t. Zależność elementarnej siły działającej w szynie skrajnej dF_A od kąta α i czasu t została przedstawiona na rys. 2.3.



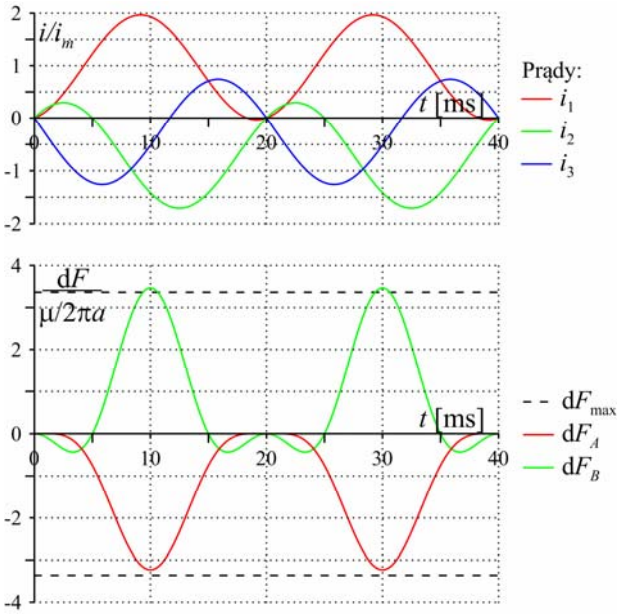
Rys. 2.3. Przebieg elementarnej siły elektrodynamicznej dF_A działającej na szynę skrajną od kąta α i czasu t

Na rys. 2.4 przedstawiono zależność elementarnej siły dF_B dla szyny środkowej od kąta α i czasu t.



Rys. 2.4. Przebieg elementarnej siły elektrodynamicznej dF_B działającej na szynę środkową od kąta α i czasu t

Elementarne siły dF_A i dF_B osiągają wartości ekstrymalne dla kąta $\alpha = \frac{\pi}{4}$. Przebiegi prądów i_1, i_2, i_3 oraz elementarnych sił dF_A, dF_B dla kąta $\alpha = \frac{\pi}{4}$ przedstawiono na rys. 2.5.



Rys. 2.5. Przebiegi prądów i_1, i_2, i_3 i elementarnych sił działających na szynę środkową oraz skrajną podczas przepływu prądów zawierających składowe okresowe i nieokresowe

Ekstrema dla elementarnych sił: skrajnej dF_A i środkowej dF_B określono zależnościami:

$$\begin{cases} \mathrm{d}F_{A\min} \approx -2\dfrac{\mu_0}{4\pi}\dfrac{1}{a} i_m^{\,2} \cdot \left(\dfrac{3}{2} + \sqrt{3}\right)\mathrm{d}l \\ \mathrm{d}F_{A\max} \approx 2\dfrac{\mu_0}{4\pi}\dfrac{1}{a} i_m^{\,2} \cdot \left(-\dfrac{3}{8} + \dfrac{7\sqrt{3}}{32}\right)\mathrm{d}l \end{cases}, \tag{2.19}$$

$$\begin{cases} \mathrm{d}F_{B\min} \approx -\dfrac{\sqrt{3}}{2}\dfrac{\mu_0}{4\pi}\dfrac{1}{a} i_m^{\,2}\,\mathrm{d}l \\ \mathrm{d}F_{B\max} \approx 4\sqrt{3}\dfrac{\mu_0}{4\pi}\dfrac{1}{a} i_m^{\,2}\,\mathrm{d}l \end{cases}. \tag{2.20}$$

O narażeniach występujących w układzie szynowym decydują maksymalne wartości bezwzględne sił. Tak więc odpowiednio dla szyny skrajnej i środkowej największe z możliwych elementarnych sił przy przepływie prądów zwarciowych ze składowymi nieokresowymi wyniosą [4]:

$$\begin{aligned} \left|dF_A\right|_{\max} &= 2\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} i_m^{\,2} \cdot 3{,}232\,\mathrm{d}l \\ \left|dF_B\right|_{\max} &= 2\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} i_m^{\,2} \cdot 3{,}464\,\mathrm{d}l \end{aligned}. \tag{2.21}$$

Należy zaznaczyć, że przedstawiona powyżej analiza dotyczy zwarć, w których składowe nieokresowe prądów nie zanikają. W przebiegach rzeczywistych prądów

zwarciowych następuje zanik w czasie składowej nieokresowej prądu i uzyskane maksymalne wartości sił działających na szynę skrajną oraz środkową będą niższe.

Wymagania norm dotyczące obliczeń oddziaływań elektrodynamicznych w układach szynowych uwzględniają tylko przypadek prostoliniowych szyn, ułożonych równolegle względem siebie, w których płyną prądy zwarciowe [88, 91, 93, 94]. Obliczenia te nie uwzględniają możliwości powstania łuku w układzie szynowym podczas zwarcia. Występujący łuk powoduje zmianę rozkładu obciążenia elektrodynamicznego wzdłuż układu szynowego, a tym samym może przyczynić się do powstania dodatkowych naprężeń i sił, które mogą powiększyć działanie wypadkowej siły elektrodynamicznej działającej na szynę oraz zwiększyć narażenia występujące w układzie szynowym podczas zwarcia łukowego.

2.3. Oddziaływania elektrodynamiczne w szynie środkowej z uwzględnieniem obecności łuku zwarciowego

Maksymalne wartości elementarnych sił elektrodynamicznych, działających na szyny podczas trójfazowych zwarć łukowych, zależeć będą od wzajemnego położenia dwóch kolumn łukowych palących się, w przypadku płaskiego układu szyn, pomiędzy szynami skrajnymi i środkową. Wzajemne usytuowanie kolumn łukowych względem siebie w danej chwili czasowej, w trakcie zwarcia łukowego, decyduje o rozpływie prądów w szynach doprowadzających prąd, a tym samym wpływa na wartości sił elektrodynamicznych działających zarówno na szyny, jak również na palący się łuk.

Analizując wartości maksymalne sił działających na szynę środkową, w przypadku obecności łuku, należy rozważyć 2 przypadki, w których:

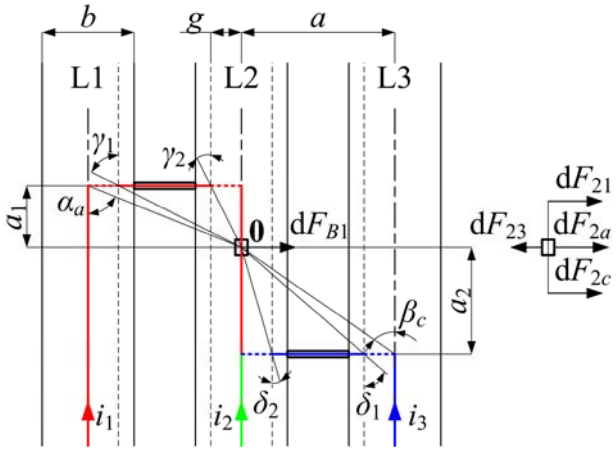
- analizowany punkt występowania elementarnej siły elektrodynamicznej znajduje się pomiędzy dwoma palącymi się łukami,
- analizowany punkt występowania elementarnej siły znajduje się w niewielkiej odległości poniżej palących się łuków.

W analizie wpływu położenia łuku na wartość elementarnej siły elektrodynamicznej działającej na szynę środkową zastosowano następujące założenia i uproszczenia:

- w obliczeniach uwzględniono wpływ wymiarów geometrycznych szyn na wartość elementarnej siły elektrodynamicznej poprzez wprowadzenie średniego odstępu geometrycznego pomiędzy łukiem a szyną,

- kolumnę łukową odzwierciedlono za pomocą prostoliniowego przewodnika (model prętowy) ułożonego pod kątem prostym do osi układu szynowego,
- długość kolumny łukowej została ograniczona odstępem pomiędzy wewnętrznymi krawędziami szyn,
- założono jednolity rozkład gęstości prądu zwarciowego w szynach,
- w obliczeniach pominięto wpływ zniekształcenia strug prądowych w miejscach styczności kolumny łukowej z szynami,
- we wstępnych założeniach pominięto wpływ rezystancji łuku na wartość chwilową prądu zwarciowego.

Na rys. 2.6 zamieszczono pierwszy przypadek, w którym analizowany punkt występowania elementarnej siły elektrodynamicznej dF_{B1} w szynie środkowej został oznaczony cyfrą 0 i znajduje się pomiędzy dwoma palącymi się łukami.



Rys. 2.6. Składowe sił działające na szynę środkową w przypadku, gdy analizowany punkt występowania elementarnej siły elektrodynamicznej znajdują się pomiędzy kolumnami łukowymi

W skład wypadkowej elementarnej siły elektrodynamicznej działającej na szynę środkową L2 w punkcie 0 wchodzą 4 składowe sił pochodzące od prądu i_1 płynącego w szynie L2 i prądów: i_1 płynącego w szynie L1, $i_a = i_1$ – płynącego w kolumnie łukowej znajdującej się pomiędzy szynami L1 i L2, $i_c = i_3$ – płynącego w kolumnie łukowej łuku palącego się pomiędzy szynami L2 i L3 i prądu i_3 płynącego w szynie L3. Zgodnie z oznaczeniami z rys. 2.6 składowe elementarnych sił działających na szynę środkową L2 określone są wzorami:

$$\mathrm{d}F_{21} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} i_1^2 \left(1+\cos\alpha_a\right)\mathrm{d}l\,, \tag{2.22}$$

$$\mathrm{d}F_{2a} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a_1} i_1^2 \left(\sin\gamma_1 - \sin\gamma_2\right)\mathrm{d}l\,, \tag{2.23}$$

$$\mathrm{d}F_{2c} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a_2} i_1 i_3 \left(\sin\delta_1 - \sin\delta_2\right)\mathrm{d}l\,, \tag{2.24}$$

$$\mathrm{d}F_{23} = -\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} i_1 i_3 \left(1-\cos\beta_c\right)\mathrm{d}l\,. \tag{2.25}$$

Zatem rozkład obciążenia elektrodynamicznego wzdłuż toru L2 wynosi:

$$\begin{aligned}\mathrm{d}F_{B1} &= \mathrm{d}F_{21} + \mathrm{d}F_{2a} + \mathrm{d}F_{2c} + \mathrm{d}F_{23} = \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} i_1 \left[i_1 \left(\cos\alpha_a + \frac{\sin\alpha_a}{\cos\alpha_a}\left(\sin\gamma_1 - \sin\gamma_2\right) + 1 \right) + \right. \\ &\left. + i_3 \left(\frac{\sin\beta_c}{\cos\beta_c}\left(\sin\delta_1 - \sin\delta_2\right) + \cos\beta_c - 1 \right) \right] \mathrm{d}l\end{aligned} \tag{2.26}$$

Wartość siły elementarnej dF_{B1}, wyznaczona zgodnie ze wzorem (2.26), zależy od wartości chwilowych prądów i_1 i i_3, położenia łuku względem punktu 0 oraz od długości kolumn łukowych ograniczonych odstępem pomiędzy osiami szyn a i szerokością szyn b. Położenie łuku względem punktu 0 określono za pomocą funkcji trygonometrycznej sinus dla kątów: α_a – dla łuku palącego się pomiędzy szynami L1 i L2, β_c – dla łuku znajdującego się pomiędzy szynami L2 i L3. Wpływ wymiarów szyn opisano funkcją sinus kątów: γ_1, γ_2 – dla łuku znajdującego się pomiędzy szynami L1 i L2, δ_1, δ_2 – dla łuku palącego się pomiędzy szynami L2 i L3. W celu uproszczenia zapisu wzoru (2.26) zmienne opisujące wpływ wymiarów szyn wyrażono funkcjami kątów α_a i β_c, określającymi położenie łuków względem punktu 0 za pomocą zależności:

$$\sin\gamma_1 = \frac{\left(a-g\right)\sin\alpha_a}{\sqrt{a^2 - g\sin^2\alpha_a\left(2a-g\right)}},\quad \sin\gamma_2 = \frac{g\sin\alpha_a}{\sqrt{a^2 - \sin^2\alpha_a\left(a^2-g^2\right)}}, \tag{2.27}$$

$$\sin\delta_1 = \frac{\left(a-g\right)\sin\beta_c}{\sqrt{a^2 - g\sin^2\beta_c\left(2a-g\right)}},\quad \sin\delta_2 = \frac{g\sin\beta_c}{\sqrt{a^2 - \sin^2\beta_c\left(a^2-g^2\right)}}, \tag{2.28}$$

w którym g jest średnim odstępem geometrycznym osi toru prądowego od łuku.

Dla szyn prostokątnych o wymiarach b i h średni odstęp geometryczny g określany jest wzorem [4, 50, 72]:

$$g = 0,2235\left(b+h\right). \tag{2.29}$$

Po wstawieniu powyższych równań do zależności (2.26), elementarną siłę elektrodynamiczną działającą na szynę L2 można opisać za pomocą wzoru:

$$\mathrm{d}F_{B1} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} i_1 \left(N_\alpha i_1 + N_{B1} i_3\right)\mathrm{d}l\,, \tag{2.30}$$

gdzie współczynniki pomocnicze wyrażone są równaniami:

$$N_{\alpha} = 1 + \cos\alpha_a + \frac{\sin\alpha_a}{\cos\alpha_a}\left[\frac{(a-g)\sin\alpha_a}{\sqrt{a^2 - g\sin^2\alpha_a(2a-g)}} - \frac{g\sin\alpha_a}{\sqrt{a^2 - \sin^2\alpha_a(a^2-g^2)}}\right], \quad (2.31)$$

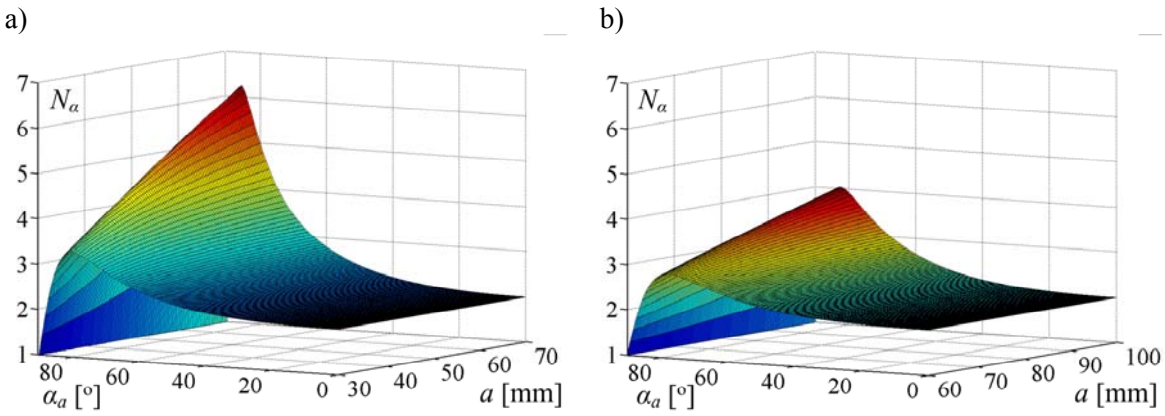
$$N_{B1} = -1 + \cos\beta_c + \frac{\sin\beta_c}{\cos\beta_c}\left[\frac{(a-g)\sin\beta_c}{\sqrt{a^2 - g\sin^2\beta_c(2a-g)}} - \frac{g\sin\beta_c}{\sqrt{a^2 - \sin^2\beta_c(a^2-g^2)}}\right]. \quad (2.32)$$

Parametrami wpływającymi na wartości współczynników N_{α}, N_{B1} są m.in.: odstęp a oraz wymiary szyn b i h. Większość rozdzielnic, m.in. zasilanych z transformatorów, których moc nie przekracza 630 kVA, wyposażona jest przeważnie w szyny o profilu prostokątnym 15x3, 20x5, 40x5 i 40x10 mm. W związku z tym bliższej analizie oddziaływań elektrodynamicznych poddano ww. przekroje szyn, ułożone dłuższą krawędzią równolegle do płaszczyzny podstawy.

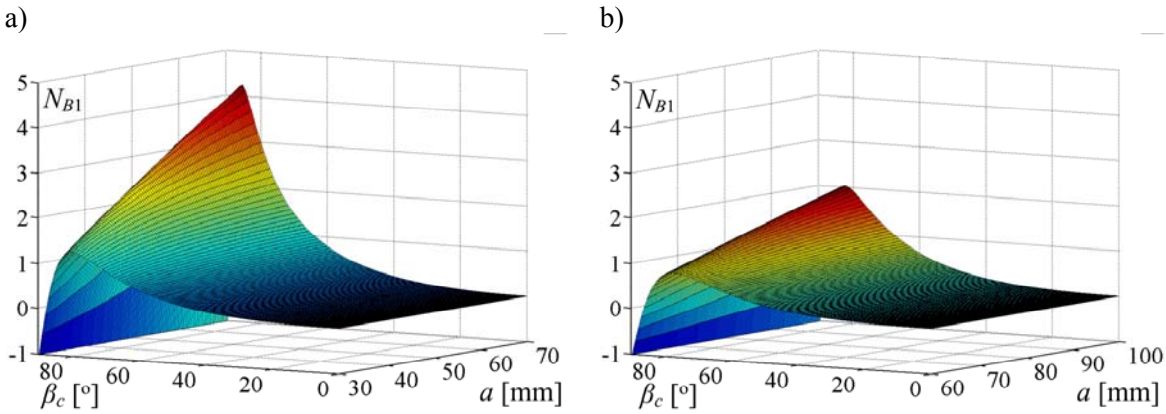
Na podstawie przeprowadzonych wstępnych badań autora oraz [43], dla odstępów pomiędzy wewnętrznymi krawędziami szyn a_0 wynoszących więcej niż 60 mm, niskonapięciowy łuk awaryjny ma charakter samogasnący. Na tej podstawie, dla analizowanych profili szynowych, tak dobrano odstęp a, aby odległość pomiędzy wewnętrznymi krawędziami szyn nie przekraczała 60 mm oraz nie była mniejsza niż podwójna wartość wymiaru szyny b dla szyn o wymiarach 15x3 i 20x5 mm. W przypadku szyn o wymiarach 40x5 i 40x10 mm minimalny odstęp a stanowi 1,5 wartości wymiaru szyny b.

Zakładając teoretycznie możliwość dowolnego położenia łuków względem punktu 0 w danej chwili czasowej t, w celu wyznaczenia ekstremum elementarnej siły elektrodynamicznej działającej na szynę środkową $\mathrm{d}F_{B1}$ przyjęto do obliczeń, że współczynniki N_{α}, N_{B1} nie zależą od czasu t, tylko od kątów: α_a – którego wartość odpowiada położeniu łuku znajdującego się pomiędzy szynami L1 i L2 względem analizowanego punktu przyłożenia elementarnej siły elektrodynamicznej, β_c – którego wartość odpowiada położeniu łuku palącego się pomiędzy szynami L2 i L3 względem analizowanego punktu 0 oraz od geometrii układu szynowego.

Na rys. 2.7 przedstawiono zależność współczynnika N_{α} od kąta α_a i odstępu a dla wybranych z analizy profili szyn. Na rys. 2.8 zamieszczono zależność współczynnika N_{B1} od kąta α_a i odstępu a dla wybranych profili szyn.



Rys. 2.7. Przykładowe zależności współczynnika N_α od kąta α_a i odstępu a dla szyn:
a) 15x3 mm, b) 40x5 mm

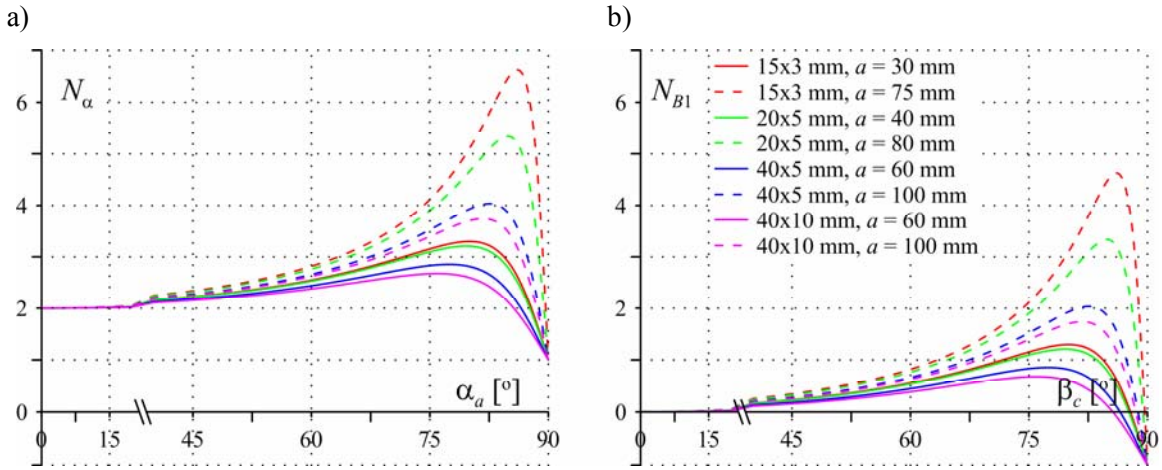


Rys. 2.8. Przykładowe zależności współczynnika N_{B1} od kąta β_c i odstępu a dla szyn:
a) 15x3 mm, b) 40x5 mm

Ekstremum funkcji (2.31) dla przyjętego zakresu zmiennych współczynnika N_α wynosi: $N_{\alpha\max}$ = 6,614, przy α_a = 86,4º, a = 75 mm dla szyn o wymiarach 15x3 mm i $N_{\alpha\max}$ = 4,035, przy α_a = 82,6º, a = 100 mm dla szyn o wymiarach 40x5 mm. W przypadku, gdy $\alpha_a \rightarrow$ 90º wartość współczynnika szybko maleje do $N_{\alpha\min}$ = 1 dla obydwu rodzajów szyn. W miarę zmniejszania wartości kąta α_a, a więc przy oddalaniu się łuku od punktu 0 (rys. 2.6) współczynnik N_α maleje do 2.

Ekstremum funkcji (2.32) dla danego zakresu zmiennych współczynnika N_{B1} wynosi: $N_{B1\max}$ = 4,614, przy β_c = 86,4º i a = 75 mm dla szyny 15x3 mm, $N_{B1\max}$ = 2,035, przy β_c = 82,6º i a = 100 mm dla szyny 40x5 mm oraz $N_{\alpha\min}$ = -1, przy $\beta_c \rightarrow$ 90º w obu przypadkach. Analogicznie, w porównaniu do współczynnika N_α, w miarę zmniejszania wartości kąta β_c współczynnik N_{B1} szybko maleje do 0 oraz w miarę zmniejszania odstępu a wartość maksymalna z przebiegu $N_{B1} = f(\beta_c, a)$ również przesuwa się w kierunku

malejącego kąta β_c. Przykładowe zależności współczynników N_α, N_{B1}, odpowiednio od kątów α_a i β_c, dla wybranych odstępów a przedstawiono na rys. 2.9.

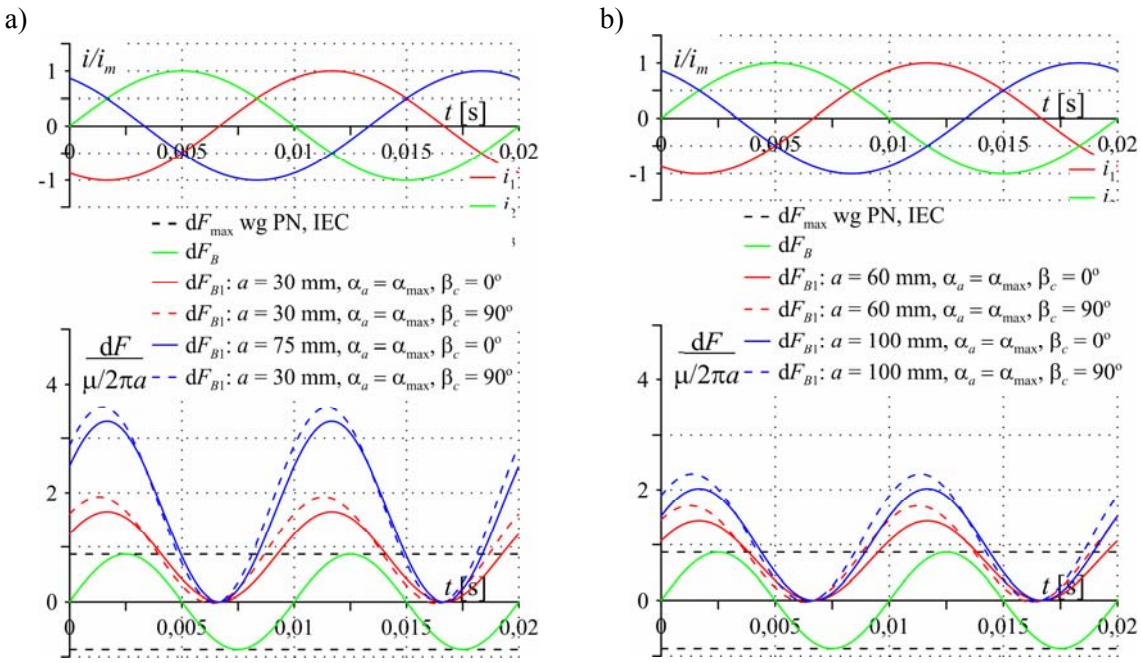


Rys. 2.9. Zależność zmiennych: a) N_α, b) N_{B1} dla wybranych odstępów a i różnych wymiarów szyn

W przypadku, w którym nie występują składowe nieokresowe prądów, wartość elementarnej siły elektrodynamicznej dF_{B1}, po podstawieniu zależności (2.11) do wzoru (2.30), opisana jest równaniem:

$$\mathrm{d}F_{B1} = \frac{\mu_0}{4\pi a} i_m^{\,2} \frac{1}{4}\left\{ N_\alpha \left[\sqrt{3}\sin\left(2\omega t\right) + \cos\left(2\omega t\right) + 2 \right] + N_{B1}\left[-\cos\left(2\omega t\right) - 1 \right] \right\} \mathrm{d}l \,. \quad (2.33)$$

Analizie zostaną poddane dwa przypadki, w których występuje wyraźne zwiększenie elementarnej siły dF_{B1}. Pierwszym przypadkiem jest sytuacja, w której funkcja (2.33) osiąga wartość maksymalną, tj. dla zmiennych $N_\alpha = N_{\alpha\max}$, $N_{B1} = N_{B1\min}$ i odpowiadających im wartości kątów: $\alpha_a = \alpha_{a\max}$, $\beta_c \rightarrow 90^\circ$. Natomiast drugi przypadek występuje, gdy $N_\alpha = N_{\alpha\max}$, $N_{B1} = 0$, tj. gdy: $\alpha_a = \alpha_{a\max}$ i $\beta_c \rightarrow 0^\circ$. Przykładowe przebiegi prądów i_1, i_2 i i_3 oraz obliczonych elementarnych sił występujących w analizowanych układach szyn ilustruje rys. 2.10. W tab. 2.1 przedstawiono zestawienie wyników obliczeń elementarnych sił działających na szynę środkową dla analizowanych układów szyn.



Rys. 2.10. Przebiegi prądów i_1, i_2, i_3 oraz siły elementarne dF_B i dF_{B1} występujące w wybranych przekrojach szyn o profilu: a) 15x3 mm, b) 40x5 mm, bez uwzględnienia składowych nieokresowych prądów zwarciowych

Tab. 2.1. Zestawienie wyników obliczeń elementarnych sił działających na szynę środkową (przypadek 1)

Lp	*b*x*h*	*a*	N_α	$\alpha_{a\max}$	N_{B1}	$\beta_{c\max}$	$\frac{\lvert dF_{B1}\rvert_{\max}}{\mu/2\pi a}$	$\frac{\lvert dF_{B1}\rvert_{\max}-\lvert dF_B\rvert_{\max}}{\lvert dF_B\rvert_{\max}}100$
	[mm x mm]	[mm]	-	[°]	-	[°]	[p.u.]	[%]
1	15x3	30	3,2978	80,1	0	0	1,6489	90
2					-1	90	1,9233	122
3		75	6,6281	86,0	0	0	3,3141	283
4					-1	90	3,5771	313
5	20x5	40	3,2093	84,9	0	0	1,6047	85
6					-1	90	1.8796	117
7		80	5,3366	77,4	0	0	2,6683	208
8					-1	90	2,9343	239
9	40x5	60	2,8548	77,4	0	0	1,427	65
10					-1	90	1,705	97
11		100	4,0351	82,6	0	0	2,018	133
12					-1	90	2,288	164
13	40x10	60	2,6764	75,9	0	0	1,3382	55
14					-1	90	1,6172	87
15		100	3,7401	81,7	0	0	1,8701	116
16					-1	90	2,1419	147

Zwiększenie elementarnej siły działającej na szynę środkową dF_{B1} uzależnione jest od dwóch sytuacji. Pierwsza z nich to taka, gdy jeden z łuków znajduje w odległości równej $a_{1\max} = a\mathrm{ctg}\alpha_{a\max}$ powyżej punktu 0, a drugi łuk znajduje się w dostatecznie dużej

odległości od punktu 0, tj. gdy $\beta_c \rightarrow 0^{\circ}$. Przypadek ten oznaczony jest nieparzystą liczbą porządkową w tab. 2.1. Elementarna siła w tym układzie jest wynikiem oddziaływania sił powstających od prądu i_1 zwarcia trójfazowego płynącego w pętli składającej się z szyny skrajnej i środkowej oraz łuku palącego się pomiędzy nimi i znajdującego się w niewielkiej odległości od punktu 0. Druga sytuacja występuje w momencie, gdy jeden z łuków znajduje się w odległości $a_{1\max}$ powyżej punktu 0, a drugi na wysokości punktu odniesienia, tj. gdy $\beta_c \rightarrow 90^{\circ}$. Przypadek ten został oznaczony parzystą liczbą porządkową w tab. 2.1. Obliczone wzmocnienie oddziaływań wynikających z obecności łuku dla danej konfiguracji układu jest największe. Należy jednak zaznaczyć, że warunkiem koniecznym zwiększenia elementarnych sił elektrodynamicznych działających na szynę środkową jest nie tylko wzajemne położenie łuków względem siebie i punktu 0, jak również odpowiednia wartość prądów płynących w szynach w danej chwili czasowej. W związku z tym trudno jest określić, czy tego typu sytuacja wystąpi bez konieczności przeprowadzenia dodatkowych badań.

W przypadku występowania składowych nieokresowych prądów, podstawiając zależność (2.16) do równania (2.30) otrzymamy wzór:

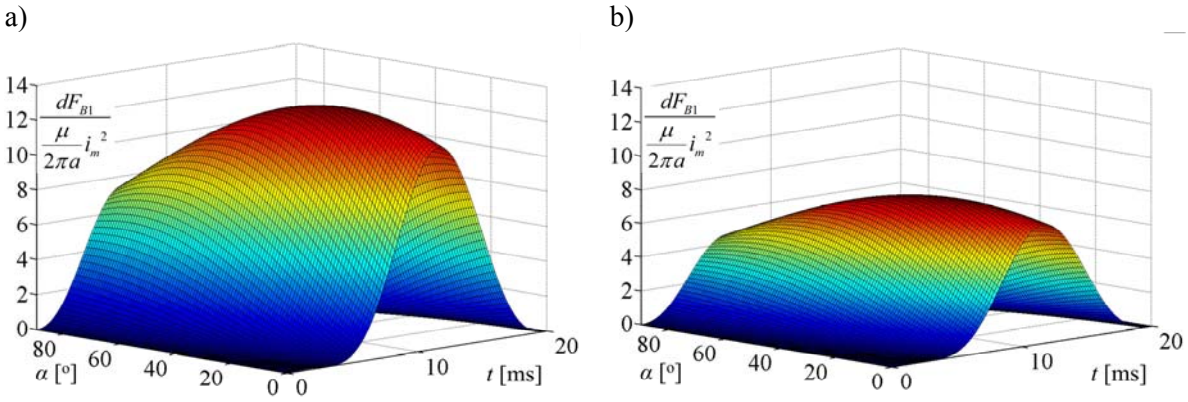
$$\begin{aligned} \mathrm{d}F_{B1} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} i_m{}^2 \frac{1}{2}\Bigg\{ N_\alpha \Bigg[-2\sin\left(\omega t + 2\alpha + \frac{\pi}{6}\right) + \sin\left(2\omega t + 2\alpha + \frac{\pi}{6}\right) - \\ -2\cos(\omega t) + \sin\left(2\alpha + \frac{\pi}{6}\right) + 2 \Bigg] + N_{B1}\Big[\cos(\omega t + 2\alpha) - \cos(2\omega t + 2\alpha) + . \\ + \cos(\omega t) - \cos(2\alpha) - 1\Big]\Bigg\} \mathrm{d}l \end{aligned} \qquad (2.34)$$

Ze względu na wzajemne oddziaływanie sił pochodzących od prądów płynących w kolumnach łukowych, elementarna siła elektrodynamiczna $\mathrm{d}F_{B1}$ zależy nie tylko od kąta α i czasu t, ale również od wzajemnego położenia łuków względem siebie i względem analizowanego punktu występowania elementarnej siły.

W układzie półpętli wytworzonej przez dwie szyny (skrajną L1 i środkową L2) i palący się pomiędzy nimi łuk, w której płynie prąd i_1, wartość współczynnika N_{B1} wynosi 0. Wówczas największa siła działająca na szynę środkową wystąpi przy kącie $\alpha = \pi/6$, a jej wartość będzie zależeć od współczynnika N_α.

W przypadku dwóch łuków znajdujących się w pobliżu punktu 0, tj. gdy $\alpha_a \approx \alpha_{a\max}$, $\beta_c \rightarrow 90^{\circ}$, na elementarną siłę $\mathrm{d}F_{B1}$ wpływ ma również siła pochodząca od prądu i_3 płynącego w łuku palącym się pomiędzy szynami L2 i L3 oraz od prądu i_3 płynącego w szynie L3. Wówczas, w porównaniu do nieskończenie długiego układu szyn (rys. 2.4), ulega zmniejszeniu wartość kąta α, a wartość maksymalna wypadkowej siły

zależy od współczynników N_α, N_{B1}. Przykładową zależność elementarnej siły dF_{B1} działającej na szynę środkową od kąta α i czasu t zamieszczono na rys. 2.11. Zestawienie wyników obliczeń elementarnych sił działających na szynę środkową, przy uwzględnieniu składowych nieokresowych prądów, przedstawiono w tab. 2.2.

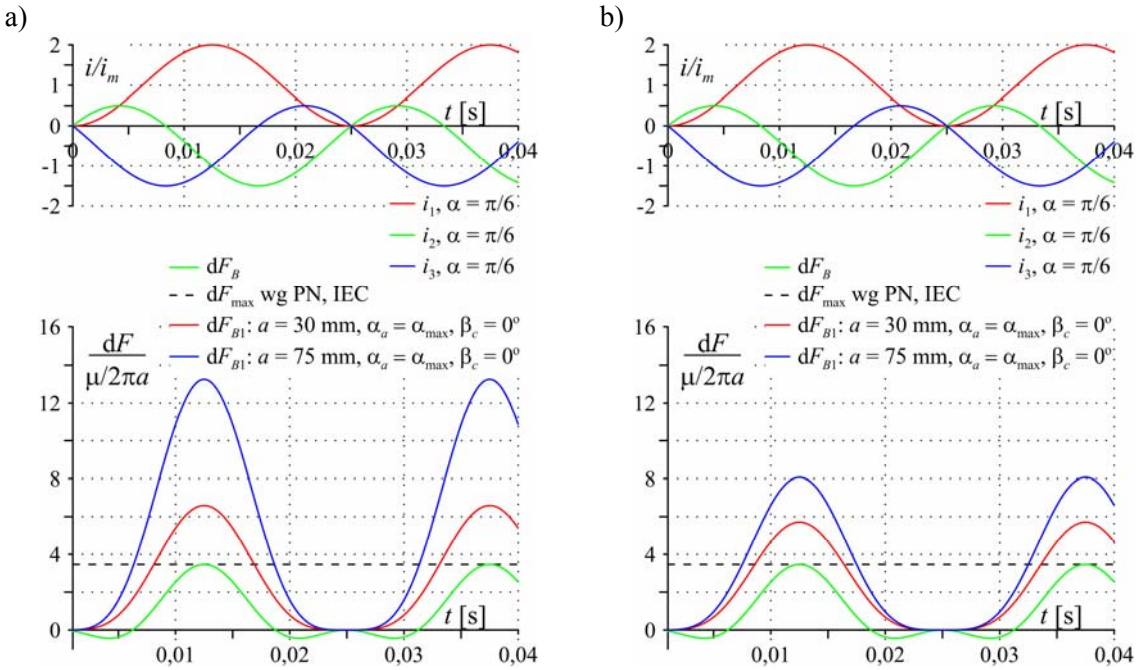


Rys. 2.11. Zależność elementarnej siły dF_{B1} działającej na szynę środkową od kąta α i czasu t dla szyn: a) 15x3 mm, a = 75 mm, b) 40x5 mm, a = 100 mm, w przypadku występowania składowych nieokresowych, nietłumionych prądów zwarciowych

Tab. 2.2. Zestawienie wyników obliczeń elementarnych sił działających na szynę środkową (przypadek 1) dla prądów zawierających składowe nieokresowe, nietłumione

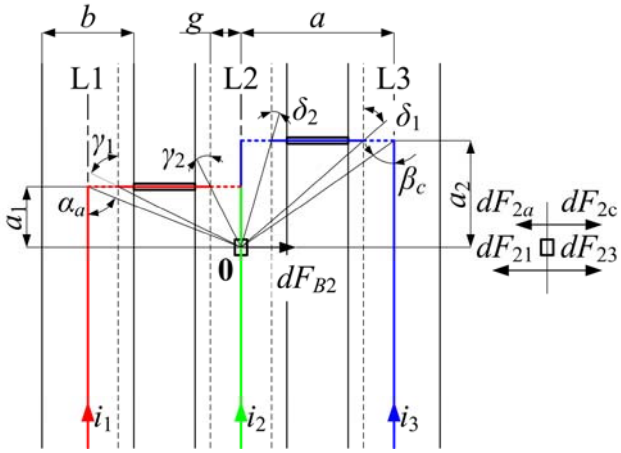
Lp	*b*x*h*	*a*	N_α	$\alpha_{a\max}$	N_{B1}	$\beta_{c\max}$	$\frac{\lvert dF_{B1}\rvert_{\max}}{\mu/2\pi a}$	$\frac{\lvert dF_{B1}\rvert_{\max}-\lvert dF_B\rvert_{\max}}{\lvert dF_B\rvert_{\max}}100$
	[mm x mm]	[mm]	-	[°]	-	[°]	[p.u.]	[%]
1	15x3	30	3,2978	80,1	0	0	6,5956	90
2					-1	90	7,6931	122
3		75	6,6281	86,0	0	0	13,256	283
4					-1	90	14,309	313
5	20x5	40	3,2093	84,9	0	0	6,4186	85
6					-1	90	7,5184	117
7		80	5,3366	77,4	0	0	10,673	208
8					-1	90	11,737	239
1	40x5	60	2,8548	77,4	0	0	5,7096	65
2					-1	90	6,8196	97
3		100	4,0351	82,6	0	0	8,0702	133
4					-1	90	9,1521	164
1	40x10	60	2,6764	75,9	0	0	5,3528	55
2					-1	90	6,4687	87
3		100	3,7401	81,7	0	0	7,4802	116
4					-1	90	8,5677	147

Przykładowe przebiegi ukazujące zwiększenie obciążenia elektrodynamicznego dF_{B1} w porównaniu do układu nieskończenie długich szyn zamieszczono na rys. 2.12.



Rys. 2.12. Siły elementarne dF_B i dF_{B1} działające na układ szynowy dla wybranych przekrojów szyn o profilu: a) 15x3 mm, b) 40x5 mm, z uwzględnieniem prądów zwarciowych zawierających składowe nieokresowe, nietłumione

Na rys. 2.13 zamieszczono drugi przypadek, w którym analizowany punkt występowania elementarnej siły elektrodynamicznej w szynie środkowej dF_{B2} znajduje się poniżej miejsca, w którym znajdują się kolumny łukowe trójfazowego zwarcia łukowego.



Rys. 2.13. Składowe sił działające na szynę środkową w przypadku, gdy kolumny łukowe znajdują się powyżej analizowanego punktu występowania elementarnej siły elektrodynamicznej

W tym przypadku składowe elementarnych sił elektrodynamicznych działających w punkcie 0 i pochodzących od prądów i_1, i_2, i_3 płynących w szynach L1, L2 i L2, L3 opisane są wzorami:

$$\mathrm{d}F_{21} = -\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} i_1 i_2 \left(1+\cos\alpha_a\right)\mathrm{d}l\,, \tag{2.35}$$

$$\mathrm{d}F_{23} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} i_2 i_3 \left(1+\cos\beta_c\right)\mathrm{d}l\,. \tag{2.36}$$

Składowe obciążenia elektrodynamicznego wynikające z obecności łuku palącego się pomiędzy szyną L1 i L2 oraz łuku znajdującego się między szynami L2 i L3 określono zależnościami:

$$\mathrm{d}F_{2a} = -\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a_1} i_1 i_2 \left(\sin\gamma_1 - \sin\gamma_2\right)\mathrm{d}l\,, \tag{2.37}$$

$$\mathrm{d}F_{2c} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a_2} i_2 i_3 \left(\sin\delta_1 - \sin\delta_2\right)\mathrm{d}l\,. \tag{2.38}$$

Elementarna siła dF_{B2}, w tym przypadku, przyjmuje postać:

$$\begin{aligned}\mathrm{d}F_{B2} &= \mathrm{d}F_{21} + \mathrm{d}F_{2a} + \mathrm{d}F_{2c} + \mathrm{d}F_{23} = \\ &= -\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} i_2 \left[i_1 \left(\cos\alpha_a + \frac{\sin\alpha_a}{\cos\alpha_a}\left(\sin\gamma_1 - \sin\gamma_2\right) + 1 \right) - \right. \\ &\left. - i_3 \left(\frac{\sin\beta_c}{\cos\beta_c}\left(\sin\delta_1 - \sin\delta_2\right) + \cos\beta_c + 1 \right) \right] \mathrm{d}l\end{aligned} \tag{2.39}$$

Wartość elementarnej siły elektrodynamicznej dF_{B2} działającej na szynę środkową zależy m.in. od długości kolumn łukowych ograniczonych odstępem pomiędzy osiami szyn a i szerokością szyny b, jak również od odległości łuków a_1, a_2 od punktu 0. W celu uproszczenia wzoru (2.39), analogicznie jak dla pierwszego przypadku, wprowadzono zmienne pomocnicze, gdzie współczynnik N_α określony jest wzorem (2.31), a N_{B2} opisany jest równaniem:

$$N_{B2} = 1 + \cos\beta_c + \frac{\sin\beta_c}{\cos\beta_c}\left[\frac{\left(a-g\right)\sin\beta_c}{\sqrt{a^2 - g\sin^2\beta_c\left(2a-g\right)}} - \frac{g\sin\beta_c}{\sqrt{a^2 - \sin^2\beta_c\left(a^2-g^2\right)}} \right]. \tag{2.40}$$

Po podstawieniu współczynników określonych równaniami (2.31) i (2.40) wzór (2.39) przyjmuje postać:

$$\mathrm{d}F_{B2} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a}\left(i_1 + i_3\right)\left(N_\alpha i_1 - N_{B2} i_3\right)\mathrm{d}l\,. \tag{2.41}$$

Granice zmian współczynników N_α, N_{B2} dla analizowanych przypadków układów szynowych są analogiczne, jak w przypadku współczynnika N_α (rys. 2.9a).

W przypadku przepływu prądu zwarciowego nie zawierającego składowych nieokresowych (2.11) w układzie określonym na rys. 2.13 elementarna siła dF_{B2} określona jest zależnością:

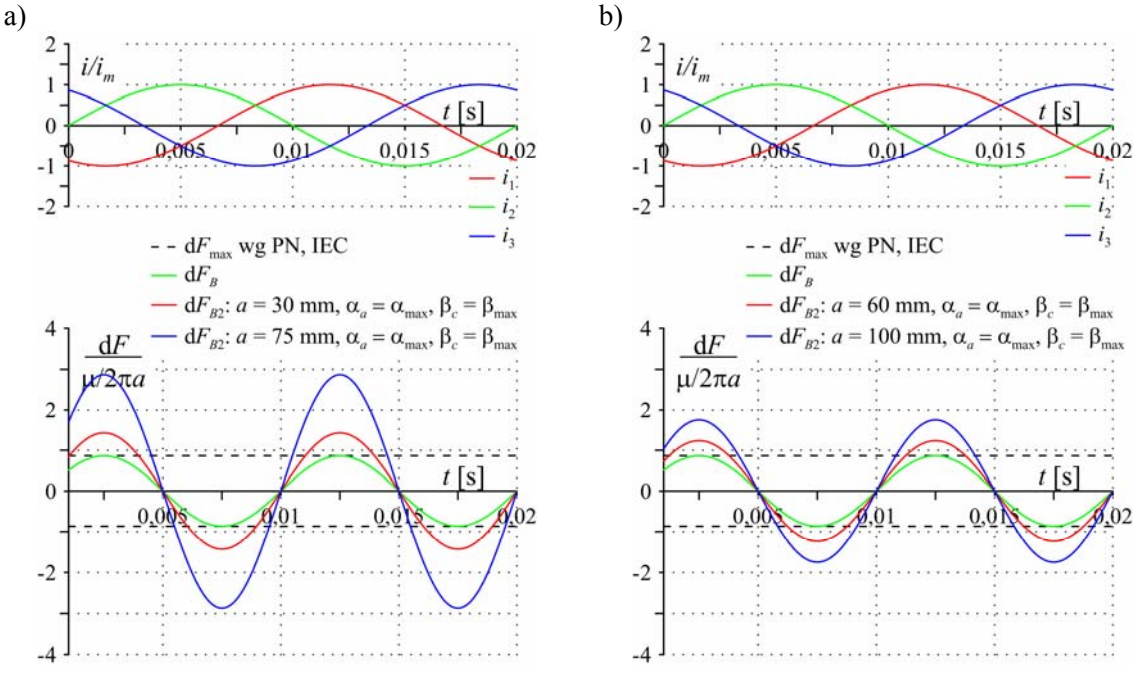
$$\begin{aligned}\mathrm{d}F_{B2} &= \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} {i_m}^2 \frac{1}{4}\left\{ N_\alpha \left[\sqrt{3}\sin\left(2\omega t\right) - \cos\left(2\omega t\right) + 1 \right] + \right. \\ &\left. + N_{B2}\left[\sqrt{3}\sin\left(2\omega t\right) + \cos\left(2\omega t\right) - 1 \right] \right\} \mathrm{d}l\end{aligned} \tag{2.42}$$

Funkcja (2.42) osiąga ekstremum dla współczynników wynoszących $N_\alpha = N_{B1}$, a więc dla $\alpha_a = \alpha_{a\max} = \beta_c = \beta_{c\max}$. Wyniki analizy przypadku, w którym punkt występowania elementarnej siły elektrodynamicznej 0 znajduje się poniżej kolumn łuku zwarcia łukowego zostały zamieszczone w tab. 2.3.

Tab. 2.3. Zestawienie wyników obliczeń obciążeń elektrodynamicznych działających na szynę środkową (przypadek 2)

Lp	*b*x*h*	*a*	$N_\alpha = N_{B1}$	$\alpha_{a\max} = \beta_{c\max}$	$\frac{\lvert dF_{B2}\rvert_{\max}}{\mu/2\pi a}$	$\frac{\lvert dF_{B2}\rvert_{\max} - \lvert dF_B\rvert_{\max}}{\lvert dF_B\rvert_{\max}} 100$
	[mm x mm]	[mm]	-	[°]	[p.u.]	[%]
1	15x3	30	3,2978	80,1	1,4280	64
2		75	6,6281	86,0	2,8701	231
3	20x5	40	3,2093	84,9	1,3897	60
4		80	5,3366	77,4	2,3108	167
5	40x5	60	2,8548	77,4	1,2361	43
6		100	4,0351	82,6	1,7472	102
7	40x10	60	2,6764	75,9	1,1589	34
8		100	3,7401	81,7	1,6195	87

Przebiegi prądów i_1, i_2, i_3 oraz elementarnych sił działających w wybranych przypadkach przekrojów szyn, określonych w tab. 2.3, zostały przedstawione na rys. 2.14.



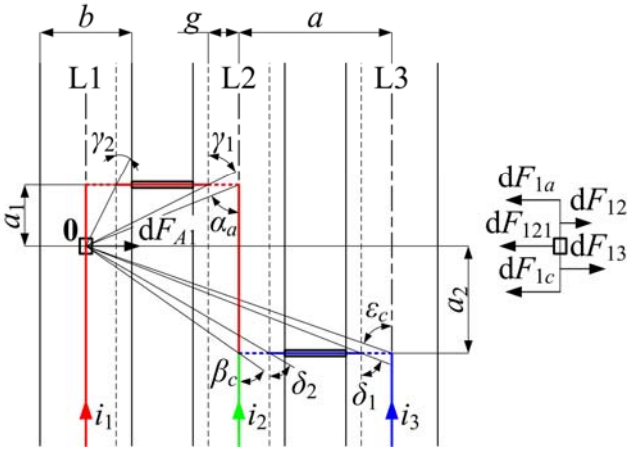
Rys. 2.14. Przebiegi prądów i_1, i_2, i_3 oraz sił elementarnych dF_B i dF_{B2} działających na układ szynowy dla wybranych przekrojów szyn o profilu: a) 15x3 mm, b) 40x5 mm, bez uwzględnienia składowych nieokresowych prądów

Porównując wyniki z tab. 2.1 i tab. 2.2 można zauważyć, że na względny wzrost elementarnej siły działającej na szynę środkową nie ma wpływu istnienie składowych nieokresowych, nietłumionych prądów zwarciowych. Zarówno w pierwszym, jak i w drugim przypadku, względy wzrost elementarnej siły działającej na szynę środkową jest taki sam. W związku z tym, w dalszej analizie uwzględniony będzie przypadek, w którym prądy zwarciowe zawierają tylko składowe okresowe.

2.4. Oddziaływania elektrodynamiczne występujące w szynie skrajnej z uwzględnieniem obecności łuku zwarciowego

Przy analizie oddziaływań elektrodynamicznych w szynie skrajnej płaskiego układu szynowego, podczas zwarć łukowych, należy rozpatrzyć dwa podstawowe przypadki. Przypadek pierwszy, w którym położenie analizowanego punktu występowania elementarnej siły elektrodynamicznej w szynie umiejscowione jest pomiędzy przemieszczającymi się kolumnami łukowymi trójfazowego zwarcia łukowego, został przedstawiony na rys. 2.15. Drugi przypadek dotyczy sytuacji, w której położenie analizowanego punktu występowania elementarnej siły elektrodynamicznej w skrajnej szynie umiejscowione jest poniżej obu kolumn łukowych zwarcia trójfazowego.

Zarówno w pierwszym, jak i w drugim przypadku w skład wypadkowej elementarnej siły elektrodynamicznej $\mathrm{d}F_{A1}$ działającej na szynę skrajną wchodzi 5 składowych sił. Trzy z nich ($\mathrm{d}F_{12}$, $\mathrm{d}F_{121}$, $\mathrm{d}F_{13}$) pochodzą od prądów płynących w poszczególnych torach prądowych układu szynowego.



Rys. 2.15. Składowe elementarnych sił działających na szynę skrajną w przypadku, gdy punkt podparcia 0 znajduje się pomiędzy dwiema kolumnami trójfazowego zwarcia łukowego

Odpowiednio dla pierwszego przypadku (rys. 2.15) składowe elementarnych sił zostały przedstawione za pomocą zależności:

$$\mathrm{d}F_{121} = -\frac{\mu}{4\pi a} i_1^2 \left(\cos\alpha_a + \cos\beta_c\right) \mathrm{d}l\,, \tag{2.43}$$

$$\mathrm{d}F_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} i_1 i_2 \left(1-\cos\beta_c\right)\mathrm{d}l\,, \tag{2.44}$$

$$\mathrm{d}F_{13} = \frac{\mu}{4\pi a}\frac{1}{2} i_1 i_3 \left(1-\cos\varepsilon_c\right)\mathrm{d}l\,, \tag{2.45}$$

gdzie: $\mathrm{d}F_{121}$ jest elementarną siłą elektrodynamiczną powstającą od prądu i_1 płynącego w analizowanej skrajnej szynie L1 oraz w szynie L2 na odcinku pomiędzy kolumnami łukowymi zwarcia trójfazowego, $\mathrm{d}F_{12}$ jest elementarną siłą pochodzącą od prądu i_1 w szynie L1 i prądu i_2 płynącego w szynie L2, $\mathrm{d}F_{13}$ jest elementarną siłą powstającą w wyniku przepływu prądu i_1 w szynie L1 i prądu i_3 w szynie L3.

Pozostałe dwie składowe elementarnych sił wynikają z obecności kolumn łukowych trójfazowego zwarcia łukowego w pobliżu punktu 0 w skrajnej szynie L1 (rys. 2.15) i opisane są wzorami:

$$\mathrm{d}F_{1a} = -\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a_1} i_1^{\,2} \left(\sin\gamma_1 - \sin\gamma_2\right)\mathrm{d}l\,, \tag{2.46}$$

$$\mathrm{d}F_{1c} = -\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a_2} i_1 i_3 \left(\sin\delta_1 - \sin\delta_2\right)\mathrm{d}l\,, \tag{2.47}$$

przy czym: $\mathrm{d}F_{1a}$ jest elementarną siłą powstającą od przepływu prądu i_1 w szynie L1 i kolumnie łukowej łuku palącego się pomiędzy szynami L1 i L2, $\mathrm{d}F_{1c}$ jest elementarną siłą elektrodynamiczną pochodzącą od prądów i_1 w szynie L1 i i_3 w kolumnie łukowej łuku znajdującego się pomiędzy szynami L2 oraz L3.

Zatem wypadkowa elementarna siła $\mathrm{d}F_{A1}$ przyjmuje postać:

$$\begin{aligned}
&\mathrm{d}F_{A1} = \mathrm{d}F_{12} + \mathrm{d}F_{121} + \mathrm{d}F_{1a} + \mathrm{d}F_{1c} + \mathrm{d}F_{13} = \\
&= -\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} i_1 \left[i_1 \left(\frac{\sin\alpha_a}{\cos\alpha_a}\left(\sin\gamma_1 - \sin\gamma_2\right) + \cos\alpha_a + 1 \right) + \right. \\
&\left. + i_3 \left(\frac{\sin\beta_c}{\cos\beta_c}\left(\sin\delta_1 - \sin\delta_2\right) - \cos\beta_c + \frac{1}{2}\cos\varepsilon_c + \frac{1}{2} \right) \right] \mathrm{d}l
\end{aligned} \tag{2.48}$$

W przypadku oddziaływań elektrodynamicznych występujących w szynie skrajnej L1 zmianie ulegają zależności funkcji trygonometrycznych kątów δ_1 oraz δ_2 ze wzorów (2.28) i wynoszą one:

$$\sin\delta_1 = \frac{\left(2a-g\right)\sin\beta_c}{\sqrt{a^2 + \sin^2\beta_c\left(3a^2 - 4ag + g^2\right)}}, \quad \sin\delta_2 = \frac{\left(a+g\right)\sin\beta_c}{\sqrt{a^2 + g\sin^2\beta_c\left(2a+g\right)}}. \tag{2.49}$$

Dodatkowo wprowadzono zależność w postaci funkcji sinus kąta ε_c, określającą położenie łuku palącego się pomiędzy szynami L2 i L3 na szynie L3 zgodnie ze wzorem:

$$\sin\varepsilon_c = \frac{\cos\beta_c}{\sqrt{1+3\sin^2\beta_c}}. \tag{2.50}$$

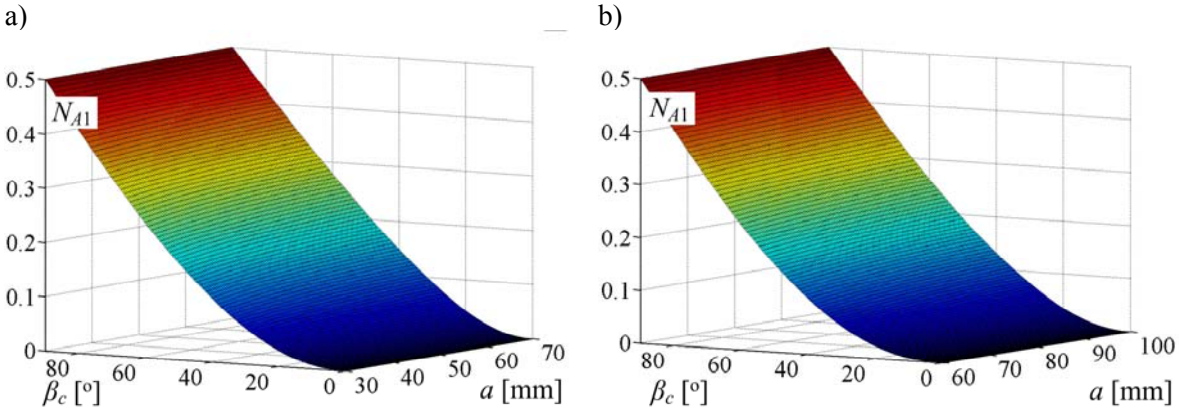
Stosując, podobne jak w przypadku analizy narażeń elektrodynamicznych w szynie środkowej uproszczenia, zależność (2.48) można zapisać w postaci:

$$\mathrm{d}F_{A1} = -\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} i_1 \left(N_\alpha i_1 + N_{A1} i_3\right)\mathrm{d}l\,, \tag{2.51}$$

w którym zmienna pomocnicza N_{A1} określona jest równaniem:

$$N_{A1} = \frac{1}{2} - \cos\beta_c + \frac{1}{2}\frac{\cos\beta_c}{\sqrt{3\sin^2\beta_c + 1}} + \frac{\sin\beta_c}{\cos\beta_c} \cdot \left[\frac{(2a-g)\sin\beta_c}{\sqrt{a^2+\sin^2\beta_c\left(3a^2-4ag+g^2\right)}} - \frac{(a+g)\sin\beta_c}{\sqrt{a^2+g\sin^2\beta_c\left(2a+g\right)}}\right]. \tag{2.52}$$

Analogicznie, jak w przypadku oddziaływań elektrodynamicznych w szynie środkowej, odpowiednio wartość współczynnika N_{A1} zależy przede wszystkim od położenia kolumny łukowej łuku palącego się pomiędzy szynami L2 i L3 i w mniejszym stopniu od wymiarów geometrycznych układu szynowego. Zależność współczynnika N_{A1} od kąta β_c oraz odstępu pomiędzy osiami szyn a dla wybranych przypadków profili szyn przedstawiono na rys. 2.16.



Rys. 2.16. Przykładowe zależności współczynnika N_{A1} od kąta β_c oraz odstępu a dla szyn o profilu: a) 15x3 mm, b) 40x5 mm

Granice zmian współczynnika N_{A1} mieszczą się w zakresie N_{A1} = 0 ÷ 0,5, odpowiednio dla kąta β_c zmieniającego się w granicach od 0 do $\frac{\pi}{2}$. Wymiary geometryczne układu szynowego nie wpływają na wartości graniczne zmiennej N_{A1}. Natomiast wartości pośrednie współczynnika N_{A1} zmieniają się w sposób praktycznie niezauważalny. Tak więc do dalszej analizy oddziaływań elektrodynamicznych zostaną

uwzględnione dwa skrajne przypadki położenia łuku palącego się pomiędzy szynami L2 i L3, tj. gdy $\beta_c = 0^\circ$ oraz $\beta_c \to 90^\circ$.

Przy założeniu przepływu prądów zawierających tylko składowe okresowe wypadkowa elementarna siła elektrodynamiczna $\mathrm{d}F_{A1}$ działająca na szynę skrajną L1 przyjmuje postać:

$$\mathrm{d}F_{A1} = -\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} i_m{}^2 \frac{1}{4}\Big\{ N_\alpha \Big[\sqrt{3}\sin(2\omega t) + \cos(2\omega t) + 2\Big] + \\ + N_{A1}\Big[-2\cos(2\omega t) - 1\Big]\Big\}\,\mathrm{d}l \tag{2.53}$$

Funkcja (2.53) osiąga ekstremum dla przypadku, w którym $N_\alpha = N_{\alpha\max}$, tj. przy kącie wynoszącym $\alpha_a = \alpha_{a\max}$ i $N_{A1} = 0$ i odpowiadającym temu współczynnikowi kącie $\beta_c = 0^\circ$. W tab. 2.4 zamieszczono zestawienie wyników obliczeń wartości elementarnych sił elektrodynamicznych działających na szynę skrajną dla analizowanych profili szyn.

Tab. 2.4. Zestawienie wyników obliczeń obciążeń elektrodynamicznych działających na szynę skrajną (przypadek 1)

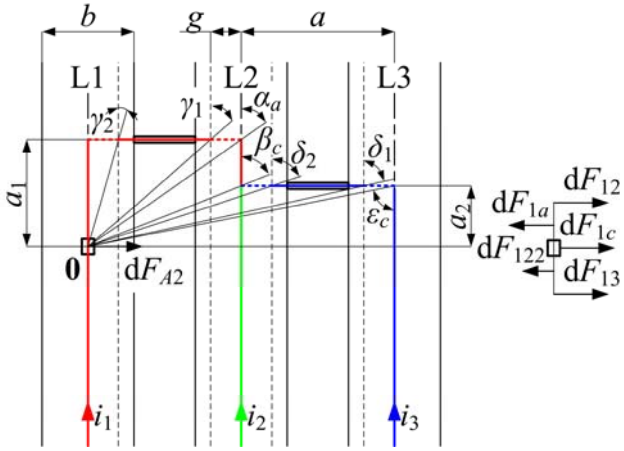
Lp	*b*x*h*	*a*	N_α	$\alpha_{a\max}$	N_{A1}	$\beta_{c\max}$	$\frac{\lvert dF_{A1}\rvert_{\max}}{\mu/2\pi a}$	$\frac{\lvert dF_{A1}\rvert_{\max} - \lvert dF_B\rvert_{\max}}{\lvert dF_B\rvert_{\max}} 100$
	[mm x mm]	[mm]	-	[°]	-	[°]	[p.u.]	[%]
1	15x3	35	3,2978	80,1	0	0	1,6489	90
2		75	6,6281	86,0			3,3140	283
3	20x5	40	3,2093	84,9	0	0	1,6046	85
4		80	5,3366	77,4			2,6683	208
3	40x5	60	2,8548	77,4	0	0	1,4274	65
4		100	4,0351	82,6			2,0175	133
3	40x10	60	2,6764	75,9	0	0	1,3382	55
4		100	3,7401	81,7			1,870	116

Przedstawione w tab. 2.4 wyniki obliczeń elementarnej siły elektrodynamicznej $\mathrm{d}F_{A1}$ działającej na szynę skrajną zostały odniesione do możliwie największej siły działającej w układzie szynowym, a więc do elementarnej siły $\mathrm{d}F_B$ działającej na szynę środkową. Uzyskane wyniki pokazują odzwierciedlenie pierwszego przypadku w szynie środkowej (rys. 2.6), gdzie jedna z kolumn łuku (w analizowanym przypadku palącego się pomiędzy szynami L1 i L2) znajduje się w odległości równej $a_{1\max} = a\mathrm{ctg}\alpha_{a\max}$ od punktu 0, a druga z kolumn łuku (w analizowanym przypadku palącego się pomiędzy szynami L2 i L3) znajduje się w dostatecznie dużej odległości, tj. gdy $a_2 \to \infty$ ($\beta_c \to 0^\circ$). Bliżej usytuowana względem punktu 0 kolumna łukowa tworzy wraz z układem szyn doprowadzających prąd półpętlę, w której ze względu na dostatecznie duże oddalenie drugiej kolumny łukowej jej wpływ na wypadkową siłę elementarną $\mathrm{d}F_{A1}$ jest pomijalnie mały. Uzyskane w tym

przypadku wartości maksymalne i przebieg siły elementarnej dF_{A1} są identyczne, jak w pierwszym przypadku w szynie środkowej z tą różnicą, że przeciwnego znaku.

W przypadku zmniejszania odległości a_2 następuje zmniejszenie wypadkowej siły elektrodynamicznej dF_{A1} w punkcie 0. Obniżenie wartości elementarnej siły elektrodynamicznej dF_{A1} wywołane jest poprzez wzrost składowych elementarnych sił dF_{12} i dF_{13}, których zwrot jest przeciwny do zwrotu elementarnej siły dF_{A1}.

W drugim z analizowanych przypadków, który dotyczy elementarnej siły elektrodynamicznej dF_{A2} działającej na szynę skrajną, analizowany punkt występowania elementarnej siły elektrodynamicznej 0 znajduje się bliżej, licząc od strony zasilania, od miejsca usytuowania dwóch kolumn łukowych. Składowe elementarnych sił działających na szynę skrajną w tym przypadku zostały przedstawione na rys. 2.17.



Rys. 2.17. Składowe elementarnych sił działających na szynę skrajną w przypadku, gdy punkt 0 znajduje się poniżej kolumn trójfazowego zwarcia łukowego

Zmiana położenia kolumn łukowych względem analizowanego punktu występowania elementarnej siły elektrodynamicznej powoduje zmianę rozpływu prądów i związanych z nimi sił elektrodynamicznych. Zgodnie z oznaczeniami przyjętymi na rys. 2.17 składowe elementarnych sił przyjmują postać:

$$\mathrm{d}F_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} i_1 i_2 \left(1+\cos\beta_c\right)\mathrm{d}l\,, \tag{2.54}$$

$$\mathrm{d}F_{13} = \frac{\mu}{4\pi a}\frac{1}{2} i_1 i_3 \left(1+\cos\varepsilon_c\right)\mathrm{d}l\,, \tag{2.55}$$

$$dF_{122} = -\frac{\mu}{4\pi a} i_1^{\,2} \left(\cos\alpha_a - \cos\beta_c\right)\mathrm{d}l\,. \tag{2.56}$$

Zależności (2.54) i (2.56) są słuszne tylko dla zakresu, w którym usytuowanie łuków (rys. 2.17) odpowiada sytuacji, gdy $a_1 \geq a_2$. W przypadku, gdy $a_1 < a_2$ w szynie środkowej, na odcinku pomiędzy kolumnami łukowymi, zmianie ulega wartość i kierunek płynącego prądu z i_1 na i_3, a co za tym idzie wzór (2.56) przyjmuje postać:

$$\mathrm{d}F_{122} = -\frac{\mu}{4\pi a} i_1 i_3 \left(\cos\beta_c - \cos\alpha_a\right)\mathrm{d}l\,. \tag{2.57}$$

Podobna zmiana zachodzi również we wzorze (2.54), który przy warunku $a_1 < a_2$ jest opisany równaniem:

$$\mathrm{d}F_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} i_1 i_2 \left(1+\cos\alpha_a\right)\mathrm{d}l\,. \tag{2.58}$$

Składowa elementarnej siły $\mathrm{d}F_{1a}$ nie ulega zmianie i jest opisana, podobnie jak w pierwszym przypadku szyny skrajnej, zależnością (2.46). Ze względu na zmianę położenia względem punktu 0 kolumny łukowej łuku palącego się pomiędzy szynami L2 i L3, składowa elementarnej siły $\mathrm{d}F_{1c}$, opisanej w pierwszym przypadku szyny skrajnej wzorem (2.47), zmienia znak na przeciwny.

Tak więc wypadkowa elementarna siła $\mathrm{d}F_{A2}$ działająca na szynę skrajną L1 przyjmuje postać:

$$\begin{aligned}
&\mathrm{d}F_{A2} = \mathrm{d}F_{12} + \mathrm{d}F_{122} + \mathrm{d}F_{1a} + \mathrm{d}F_{1c} + \mathrm{d}F_{13} = \\
&= -\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} i_1 \left[i_1 \left(\frac{\sin\alpha_a}{\cos\alpha_a}\left(\sin\gamma_1 - \sin\gamma_2\right) + \cos\alpha_a + 1 \right) + \right. \\
&\left. + i_3 \left(-\frac{\sin\beta_c}{\cos\beta_c}\left(\sin\delta_1 - \sin\delta_2\right) + \cos\beta_c - \frac{1}{2}\cos\varepsilon_c + \frac{1}{2} \right) \right] \cdot \mathrm{d}l
\end{aligned} \tag{2.59}$$

Postać równania (2.59) jest słuszna zarówno dla przypadku, gdy $a_1 \geq a_2$, jak również dla warunku $a_1 < a_2$.

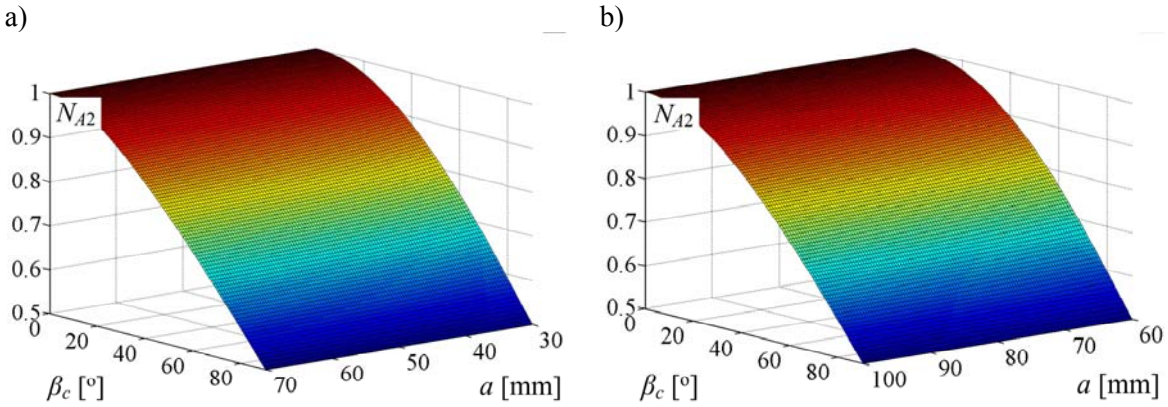
Po zastosowaniu, podobnie jak w powyższych przypadkach, współczynników N_α i N_{A2} zależność (2.59) zostaje opisana wzorem:

$$\mathrm{d}F_{A2} = -\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} i_1 \left(N_\alpha i_1 + N_{A2} i_3\right)\mathrm{d}l\,, \tag{2.60}$$

w którym współczynnik N_{A2} jest równy:

$$\begin{aligned}
N_{A2} &= \frac{1}{2} + \cos\beta_c - \frac{1}{2}\frac{\cos\beta_c}{\sqrt{3\sin^2\beta_c + 1}} - \frac{\sin\beta_c}{\cos\beta_c} \cdot \\
&\cdot \left[\frac{\left(2a - g\right)\sin\beta_c}{\sqrt{a^2 + \sin^2\beta_c\left(3a^2 - 4ag + g^2\right)}} - \frac{\left(a + g\right)\sin\beta_c}{\sqrt{a^2 + g\sin^2\beta_c\left(2a + g\right)}} \right].
\end{aligned} \tag{2.61}$$

Zmianę współczynnika N_{A2} w zależności od wartości kąta β_c oraz odstępu pomiędzy osiami szyn a dla wybranych wymiarów szyn o przekroju prostokątnym ilustruje rys. 2.18.



Rys. 2.18. Przykładowe zależności współczynnika N_{A2} w funkcji wartości kąta β_c odstępu a dla szyn o profilu: a) 15x3 mm, b) 40x5 mm

Po wprowadzeniu prądów zawierających tylko składowe okresowe wypadkowa elementarna siła elektrodynamiczna dF_{A2} działająca na szynę skrajną L1 przyjmuje postać:

$$\mathrm{d}F_{A2} = -\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} i_m{}^2 \frac{1}{4}\Big\{N_\alpha\Big[\sqrt{3}\sin(2\omega t)+\cos(2\omega t)+2\Big]+ \\ +N_{A2}\Big[-2\cos(2\omega t)-1\Big]\Big\}\mathrm{d}l \tag{2.62}$$

Podobnie, jak w ww. przypadkach, o wartości ekstremum zależności (2.62) decydują wartości współczynników N_α i N_{A2}. Współczynnik N_{A2} maleje wraz ze wzrostem kąta β_c w zakresie N_{A2} = 1 ÷ 0,5 i podobnie jak współczynnik N_{A1}, zmienia się w niewielkich granicach wraz ze zmianą wymiarów szyn oraz odstępu a. Rozpatrywana funkcja (2.62) osiąga ekstremum, gdy $N_\alpha = N_{\alpha\max}$ i N_{A2} = 0,5, co odpowiada wartościom kątów: $\alpha_a = \alpha_{a\max}$ oraz $\beta_c \rightarrow 90º$. W tab. 2.5 zamieszczono wyniki obliczeń elektrodynamicznej siły elementarnej dF_{A2} występującej w szynie skrajnej (przypadek 2) dla analizowanych wymiarów i odstępów pomiędzy osiami szyn a.

Tab. 2.5. Zestawienie wyników obliczeń obciążeń elektrodynamicznych działających na szynę skrajną (przypadek 2)

Lp	*b*x*h*	*a*	N_α	$\alpha_{a\max}$	N_{A2}	$\beta_{c\max}$	$\frac{\lvert dF_{A2}\rvert_{\max}}{\mu/2\pi a}$	$\frac{\lvert dF_{A2}\rvert_{\max}-\lvert dF_B\rvert_{\max}}{\lvert dF_B\rvert_{\max}}100$
	[mm x mm]	[mm]	-	[º]	-	[º]	[p.u.]	[%]
1	15x3	35	3,2978	80,1	0,5	90	1,5316	77
2		75	6,6281	86,0			3,1927	269
3	20x5	40	3,2093	84,9	0,5	90	1,4875	72
4		80	5,3366	77,4			2,5479	194
3	40x5	60	2,8548	77,4	0,5	90	1,3113	51
4		100	4,0351	82,6			1,8987	119
3	40x10	60	2,6764	75,9	0,5	90	1,2228	41
4		100	3,7401	81,7			1,7517	102

2.5. Podsumowanie analizy oddziaływań elektrodynamicznych występujących w szynach podczas zwarcia łukowego

Przeprowadzona w rozdziałach 2.3 i 2.4 analiza oddziaływań elektrodynamicznych występujących w układzie szynowym, w którym występuje palący się łuk wykazała, że w pewnych warunkach wzajemne położenie łuków względem siebie może powodować wzrost elementarnych sił elektrodynamicznych działających na szynę skrajną i środkową, w porównaniu do występujących oddziaływań elektrodynamicznych, w takim samym układzie szynowym i przy tej samej wartości prądu zwarciowego, ale bez obecności łuku zwarciowego, tzn. podczas zwarcia metalicznego.

Wzrost elementarnej siły elektrodynamicznej występującej w szynie środkowej lub skrajnej płaskiego układu szynowego podczas trójfazowego zwarcia łukowego uwarunkowany jest, oprócz wartości chwilowych prądów zwarciowych płynących w poszczególnych szynach i kolumnach łukowych, m.in.: geometrią układu szynowego, tj. wymiarami samych szyn b i h oraz odstępem pomiędzy osiami szyn a.

Z przeprowadzonej analizy można zauważyć, że wzrost elementarnej siły elektrodynamicznej jest tym większy im mniejsza jest suma wymiarów b i h szyny, przy zachowaniu stałego odstępu a. Dla przykładu przedstawiono wyniki obliczeń sił elementarnych dla szyn o wymiarach 40x5 mm i 40x10 mm dla tych samych odstępów a mieszczących się w granicach 60 ÷ 100 mm. Porównując oba profile szyn można zauważyć około 10%-owy wzrost maksymalnej elementarnej siły elektrodynamicznej dla szyn o mniejszych wymiarach, tj. 40x5 mm. W przypadku jeszcze mniejszych wymiarów szyn i stałego odstępu a, wzrost elementarnej siły elektrodynamicznej staje się jeszcze większy.

Wpływ wymiarów szyn b i h na wartość elementarnej siły elektrodynamicznej można powiązać ze sobą za pomocą średniego odstępu geometrycznego g, będącego funkcją wymiarów szyn b i h. Im mniejszą wartość przyjmuje średni odstęp geometryczny g przy stałym odstępie a, tym wartość maksymalnej elementarnej siły elektrodynamicznej działającej na szyny będzie większa.

Dodatkowo zmiana odstępu pomiędzy osiami szyn a, przy zachowaniu stałych wymiarów szyn b i h, powoduje wzrost maksymalnych wartości elementarnych sił elektrodynamicznych działających na szyny w trakcie zwarcia łukowego, w porównaniu do elementarnych sił elektrodynamicznych, które występują w takim samym układzie szynowym w trakcie zwarcia metalicznego. Przykładowo dla szyn o wymiarach 20x5 mm

dwukrotny wzrost odstępu pomiędzy osiami szyn a powoduje 2 ÷ 2,7-krotny wzrost wartości szczytowej elementarnej siły elektrodynamicznej.

Spośród wszystkich analizowanych przypadków wzrostu elementarnych sił elektrodynamicznych w szynie środkowej i skrajnej, wynikających ze wzajemnego położenia kolumn łuku zwarciowego, na uwagę zasługują dwa charakterystyczne.

Pierwszy przypadek, w którym osiągnięto maksymalną elementarną siłę elektrodynamiczną działającą w szynie środkowej, dotyczy ułożenia jednej z kolumn łukowych powyżej analizowanego punktu w odległości $a_1 = a_{1\max}$ i odpowiadającej jej wartości kąta $\alpha_a = \alpha_{a\max}$, a drugiej kolumny łukowej w odległości $a_2 \rightarrow 0$, tj. gdy kąt $\beta_c \rightarrow 90^o$. W analizowanym przedziale odstępów pomiędzy osiami szyn a widoczny jest około 4-krotny wzrost elementarnej siły elektrodynamicznej $dF_{B1,}$ w porównaniu do maksymalnej wartości elementarnej siły elektrodynamicznej dF_B występującej podczas zwarć metalicznych. Tak np. dla szyn o wymiarach 15x3 mm zauważono wzrost względnego przyrostu elementarnej siły elektrodynamicznej w granicach 122% ÷ 313% (tab. 2.1, tab. 2.2). Dla szyn 40x5 mm – odpowiednio elementarna siłę elektrodynamiczna wzrosła w granicach 197% ÷ 264% (tab. 2.1, tab. 2.2) elementarnej siły elektrodynamicznej $dF_{B\max}$.

Drugi charakterystyczny przypadek dotyczy zarówno szyny skrajnej jak i środkowej, w których jedna z kolumn trójfazowego zwarcia łukowego znajduje się w odległości $a_1 = a_{1\max}$ i odpowiadającej jej wartości kąta $\alpha_a = \alpha_{a\max}$, a druga z kolumn znajduje się poniżej analizowanego punktu występowania elementarnej siły elektrodynamicznej w dostatecznie dużej odległości a_2 tak, że odpowiadający jej kąt $\beta_c \rightarrow 0^o$. Wzajemne położenie kolumn łukowych trójfazowego zwarcia łukowego powoduje powstania półpętli składającej się z dwóch szyn oraz kolumny łukowej położonej bliżej analizowanego punktu 0 występowania elementarnej siły elektrodynamicznej (rys. 2.6 i rys. 2.15). W związku z tym, zarówno w szynie skrajnej jak i środkowej, występujące elementarne siły będą miały takie same wartości, z tą różnicą, że przeciwnego znaku. Sytuację tę można porównać do dwufazowego układu szynowego, w którym wpływ składowej siły pochodzącej od prądu płynącego w trzeciej szynie został pominięty. Dodatkowo obecność kolumny łukowej i przepływ trójfazowego prądu zwarciowego, który w większości układów rozdzielczych niskiego napięcia jest większy od prądu dwufazowego, powoduje wzrost elementarnej siły elektrodynamicznej, a tym samym i narażeń z nią związanych. Dla tego przypadku zauważono, że względny przyrost elementarnej siły elektrodynamicznej działającej na szyny zmienia się w zakresie 90% ÷ 283% dla szyn

o wymiarach 15x3 mm (tab. 2.1, tab. 2.2 i tab. 2.4). Przykładowo, dla szyn o wymiarach 40x5 mm wartości szczytowe elementarnych sił elektrodynamicznych dF_{B1} i dF_{A1} wzrosły w granicach 165% ÷ 233% wartości maksymalnej elementarnej siły dF_B (tab. 2.1, tab. 2.2 i tab. 2.4).

Należy jednak pamiętać, że w przypadku niskonapięciowych zwarć łukowych istnieje wyraźne ograniczenie prądu zwarciowego I_a, wywołane przez rezystancję łuku, w stosunku do spodziewanej wartości prądu $I_k^{"}$, jaki by płynął podczas zwarcia metalicznego. Dodatkowo sama rezystancja łuku powoduje zwiększenie współczynnika mocy cosφ obwodu oraz wzrost rezystancji całego obwodu zwarciowego R_Z. Wzrost stosunku wartości R_Z do X_Z skutkuje zmniejszeniem wartości współczynnika udaru κ, a tym samym i prądu udarowego i_p, który jest podstawowym parametrem niezbędnym do wyznaczenia maksymalnej wartości siły działającej w określonym układzie szynowym. W przedstawionej analizie założono, że warunki panujące w obwodzie, tj. spodziewany prąd zwarciowy $I_k^{"}$, współczynnik mocy cosφ, współczynnik udaru κ i wartość udarowa spodziewanego prądu zwarciowego i_p są takie same, jak w przypadku zwarcia metalicznego. W literaturze [2, 43, 49, 57, 58, 61] można znaleźć informacje dotyczące wpływu rezystancji łuku na wartość prądów zwarciowych. Najczęściej wpływ ten wyrażony jest za pomocą współczynnika ograniczenia prądu k_{ogr}, który opisano zależnością:

$$k_{ogr} = \frac{I_a}{I_k} . \tag{2.63}$$

Wartość współczynnika ograniczenia prądu zwarciowego k_{ogr} zależy od spodziewanego prądu zwarciowego $I_k^{"}$, odstępu pomiędzy osiami szyn a oraz rodzaju materiału, z którego wykonane są szyny i zmienia się w szerokim zakresie w granicach 0,2 ÷ 0,9. Mniejsza wartość współczynnika k_{ogr} dotyczy spodziewanych prądów zwarciowych $I_k^{"}$ sięgających 80 kA i odstępów a = 60 mm [2, 58, 61], a większa wartość określona jest dla prądów nieprzekraczających kilkunastu kA i odstępów pomiędzy wewnętrznymi krawędziami szyn a_0 wynoszących nie więcej niż 20 mm [49, 58].

Należy również zauważyć, że współczynnik ograniczenia prądu zwarciowego k_{ogr} jest funkcją wartości skutecznej prądu zwarciowego, a w przypadku oddziaływań elektrodynamicznych istotnym parametrem jest jego wartość chwilowa, a dokładniej wartość maksymalna prądu zwarciowego. Dodatkowo w niskonapięciowych zwarciach łukowych wpływ rezystancji łuku na ww. parametry jest tym większy, im większy jest odstęp pomiędzy osiami szyn a. W związku z tym istnieje potrzeba określenia,

w jakim stopniu oddziaływanie rezystancji łuku na wartość chwilową prądu zwarciowego wpływa na maksymalną wartość elementarnej siły elektrodynamicznej występującej w szynie podczas zwarcia łukowego.

Drugim istotnym parametrem wpływającym na wzrost elementarnej siły elektrodynamicznej działającej na szynę środkową lub skrajną jest wzajemne usytuowanie kolumn łukowych trójfazowego zwarcia łukowego, w danej chwili trwania zwarcia, względem analizowanego punktu występowania maksymalnej elementarnej siły elektrodynamicznej. Niezbędnym parametrem pozwalającym na wyznaczenie wzajemnego położenia kolumn łukowych trójfazowego zwarcia łukowego jest analiza ich prędkości przemieszczania się wzdłuż szyn w trakcie trwania zwarcia.

Stąd istnieje konieczność opracowania modelu dynamiki łuku służącego do obliczania poszczególnych prędkości kolumn łukowych trójfazowego niskonapięciowego zwarcia łukowego, który zostanie wykorzystany do dalszej analizy oddziaływań elektrodynamicznych występujących w układach szynowych w trakcie zwarcia łukowego. Opracowany model dynamiki łuku powinien uwzględniać m.in.: wpływ rezystancji łuku na wartości chwilowe prądów zwarciowych oraz wzajemne położenie kolumn łukowych na wartości sił elektrodynamicznych działających na te kolumny.

3. Teza i cel pracy

Głównym celem pracy było stwierdzenie słuszności następującej tezy:

Różne prędkości przemieszczania się każdej z dwóch kolumn łuku trójfazowego niskonapięciowego zwarcia łukowego w płaskim układzie szyn, a w związku z tym różne chwilowe usytuowanie ich pomiędzy szynami, powoduje zwiększenie elementarnej siły elektrodynamicznej działającej na szynę środkową.

Nierównomierny rozkład obciążenia elektrodynamicznego wzdłuż układu szynowego oraz lokalny wzrost elementarnych sił w pobliżu kolumn łukowych wywołany rozpływem prądów w układzie szynowym i powiązany z chwilowym położeniem przemieszczającego się łuku awaryjnego może powodować powstanie naprężeń mechanicznych w szynach, przekraczających naprężenia dopuszczalne. Lokalny wzrost naprężeń mechanicznych może przyczynić się do trwałego uszkodzenia układu szynowego pomimo zachowania w dopuszczalnych granicach wypadkowych sił działających na podpory szyn.

W celu wykazania prawdziwości postawionej tezy opracowano empiryczny model dynamiki niskonapięciowego łuku awaryjnego przemieszczającego się wzdłuż szyn ułożonych w jednej płaszczyźnie, oparty na Newtonowskim modelu dynamiki ruchu ciał. Do obliczeń prądu zwarcia łukowego wykorzystano zmodyfikowany przez autora „czarno-skrzynkowy" model wysokonapięciowego łuku zakłóceniowego Kizilcay'a [11, 24, 33, 37, 81]. Modyfikacja użytego modelu łuku zwarciowego polegała na przystosowaniu jego do analizy niskonapięciowych zwarć łukowych, poprzez opis współczynników charakteryzujących równanie łuku za pomocą zależności w sposób podobny, jak to zostało opracowane przez Grütza i Hochrainera [11, 78]. W oparciu o wyniki badań eksperymentalnych zostały zaproponowane zależności empiryczne opisujące parametry charakteryzujące model łuku.

Wykazanie słuszności tezy polegało na podzieleniu całego zadania na etapy składające się z analiz teoretycznych, opracowań procedur obliczeniowych oraz zależności empirycznych. Zakres prac obejmował m.in.:

- zaproponowanie układu pomiaru prędkości łuku i zależności umożliwiających obliczenie prędkości przemieszczającego się wzdłuż szyn łuku awaryjnego,

a tym samym wyznaczenie położenia kolumn łukowych względem miejsca zapłonu, uwzględniając przy tym wpływ rezystancji łuku na wartość chwilową prądu zwarciowego oraz wpływ wzajemnego oddziaływania prądów płynących w kolumnach łukowych w danej chwili czasowej na wartość siły elektrodynamicznej działającej na przemieszczający się łuk,

- budowę stanowiska laboratoryjnego oraz opracowanie i wdrożenie wybranego przez autora rozwiązania układu pomiaru prędkości łuku,
- wykonanie badań eksperymentalnych dwufazowego łuku awaryjnego, których celem było pozyskanie informacji niezbędnych do wyznaczenia parametrów opisujących użyty model łuku i uzależnienie tych parametrów od wielkości bezpośrednio charakteryzujących zwarcia, tj. od spodziewanych wartości prądu zwarciowego I_k'',
- przeprowadzenie obliczeń dotyczących prędkości łuku dwufazowego i porównanie uzyskanych wyników z wynikami badań eksperymentalnych,
- przekształcenie modelu łuku dwufazowego na trójfazowy oraz wykorzystanie zależności opisujących łuk dwufazowy w analizie prędkości trójfazowego łuku awaryjnego,
- weryfikację wyników obliczeń z wybranymi wynikami badań eksperymentalnych trójfazowego łuku awaryjnego,
- potwierdzenie postawionej tezy poprzez przeprowadzenie analizy oddziaływań elektrodynamicznych z uwzględnieniem wpływu zjawiska ograniczenia prądu zwarciowego wywołanego przez rezystancje łuku oraz usytuowania w określonej chwili czasowej kolumn łukowych na wartości elementarnych sił elektrodynamicznych działających na szyny.

Własne badania laboratoryjne zostały zrealizowane na rzeczywistym modelu układu szyn zbiorczych, w którym wykonywano zwarcia łukowe dwu- i trójfazowe. Badania łuku awaryjnego przeprowadzono w Laboratorium Wielkoprądowym Katedry Mechatroniki i Inżynierii Wysokich Napięć, Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. W tym celu zostało zbudowane stanowisko laboratoryjne składające się z układu szyn zbiorczych (miedzianych lub aluminiowych), ułożonych dłuższą krawędzią równolegle do płaszczyzny podstawy, pionowo, w jednej płaszczyźnie oraz opracowanego i skonstruowanego przez autora układu pomiaru prędkości łuku UPP. W układzie tym wykorzystano pomiar natężenia promieniowania podczerwonego w wybranych punktach za pomocą równomiernie rozmieszczonych wzdłuż szyn czujników optycznych.

Zakres badań eksperymentalnych uwarunkowany był możliwościami wielkoprądowego zespołu probierczego oraz zastosowanych przetworników pomiarowych i urządzeń rejestrujących. Przeprowadzono badania prędkości przemieszczającego się łuku awaryjnego na szynach aluminiowych i miedzianych przy spodziewanych wartościach prądów zwarciowych I_k'' mieszczących się w przedziale 2 ÷ 16 kA i odstępach pomiędzy wewnętrznymi krawędziami szyn zawierających się w zakresie 20 ÷ 60 mm. Przyjęty zakres badań eksperymentalnych odpowiada wartościom prądów zwarciowych spotykanych w układach rozdzielczych średnich mocy, w których układy szynowe zasilane są z transformatorów o znamionowej mocy nieprzekraczającej 630 kVA [80].

W dostępnej literaturze naukowej brakuje informacji dotyczących oddziaływania przemieszczającego się niskonapięciowego łuku na wartości sił elektrodynamicznych występujących w układach szynowych rozdzielnic, tak więc praca ta stanowi nowatorskie podejście do tego problemu. Wyniki przeprowadzonych badań i obliczeń mogą być przydatne do dalszej analizy dotyczącej narażeń elektrodynamicznych występujących w układach szynowych podczas zwarć łukowych. Opracowany model empiryczny dynamiki łuku oraz wyniki prac eksperymentalnych stanowią cenne źródło informacji pod względem praktycznym, a znalezione zależności mogą wytyczać kierunki dalszych badań dotyczących zjawisk występujących podczas zwarć łukowych. Zrealizowane badania oraz wyniki analiz mogą również przyczynić się do wspomożenia ewentualnych prac konstruktorskich, których celem jest zapewnienie bezpieczeństwa eksploatacji rozdzielnic niskiego napięcia oraz zmniejszenie ewentualnych skutków destrukcyjnego działania łuku awaryjnego.

4. Ogólny opis modelu dynamiki łuku zwarciowego

Celem analizy i obliczeń jest opracowanie modelu empirycznego ruchu niskonapięciowego łuku zwarciowego palącego się swobodnie w powietrzu o ciśnieniu atmosferycznym i przemieszczającego się wzdłuż szyn ułożonych w jednej płaszczyźnie. Obliczenia przeprowadzono w programie Matlab i oparto na modelu newtonowskim dynamiki ruchu ciał, w którym przy zadanych parametrach masy i sił wyznaczana jest prędkość ruchu łuku. Uwzględniono również zmodyfikowany zaciskowy model łuku zakłóceniowego oparty na założeniach Kizilcay'a, za pomocą którego określany jest wpływ chwilowej przewodności łuku na wartość chwilową prądu zwarciowego.

Model empiryczny umożliwia obliczenie prędkości chwilowej łuku dwu- i trójfazowego przemieszczającego się wzdłuż płaskiego układu szynowego składającego się z szyn o profilu prostokątnym ułożonych dłuższą krawędzią równolegle do płaszczyzny podstawy. Obliczona prędkość chwilowa łuku – w przypadku zwarć dwufazowych, lub dwóch łuków – w przypadku zwarć trójfazowych, uzależniona została m.in. od rodzaju materiału szyn (miedź lub aluminium), odstępu pomiędzy wewnętrznymi krawędziami szyn a_0, jak również od spodziewanego prądu zwarciowego I_k''.

Proces obliczeniowy został podzielony na dwa podstawowe etapy. W pierwszym etapie, na podstawie badań laboratoryjnych, zostały wyznaczone niezbędne zmienne pomocnicze umożliwiające m.in. obliczenie chwilowej przewodności łuku, a tym samym przy zadanych parametrach obwodu zwarciowego, wartości chwilowej prądu zwarciowego. Zmierzona prędkość chwilowa łuku przemieszczającego się wzdłuż szyn posłużyła do wyznaczenia zmiennej pomocniczej służącej do określenia wpływu sił oporu aerodynamicznego na prędkość łuku, jak również do wyznaczenia położenia kolumn łukowych w układzie szynowym w trakcie zwarcia.

Wyniki z badań laboratoryjnych łuku dwufazowego zostały wykorzystane do obliczeń prędkości łuku zwarcia trójfazowego, w których oprócz wpływu rezystancji chwilowej łuku na wartość prądu zwarciowego uwzględniono wzajemne oddziaływanie elektrodynamiczne łuków na siebie oraz położenie kolumn łukowych w układzie szynowym i jego wpływ na rozpływ prądów w poszczególnych szynach, a tym samym i sił elektrodynamicznych działających na szyny i na kolumny łukowe.

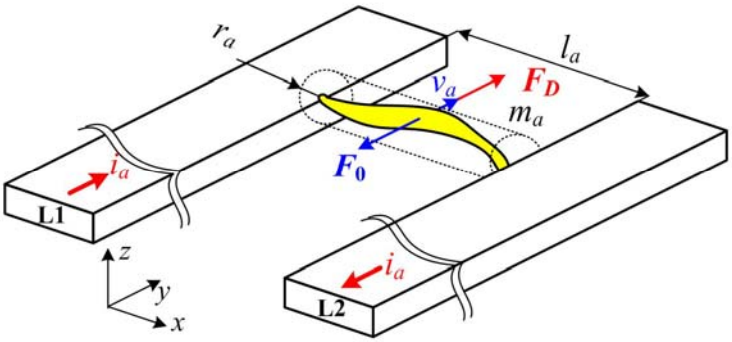
W obliczeniach prędkości przemieszczania się łuku zastosowano następujące uproszczenia:

- łuk zwarciowy palący się pomiędzy elektrodami (szynami) modelowany jest jako sztywny pręt w kształcie walca, którego oś symetrii jest prostopadła do krawędzi szyn,
- do obliczeń przyjęto stałą długość łuku l_a, ograniczoną odstępem pomiędzy wewnętrznymi krawędziami szyn,
- założono równomierny rozkład gęstości prądu w szynach,
- nie uwzględniono w obliczeniach zniekształcenia strug prądowych w szynie w okolicy stopy łuku,
- na kolumnę łukową działają dwie siły: siła elektrodynamiczna F_D oraz siła oporu aerodynamicznego F_0, które zastąpiono siłami wypadkowymi działającymi w kierunku równoległym do osi układu szynowego,
- założono, że ruch łuku odbywa się w układzie szynowym o nieskończonej długości,
- w obliczeniach nie uwzględniono oddziaływania siły ciągu cieplnego F_C, ze względu na jej znikomy wpływ, szczególnie w przypadku małych długości kolumn łukowych sięgających do 20 mm oraz prądów rzędu kilku kA [43, 72],
- łuk zwarciowy pali się pomiędzy szynami fazowymi układu, nie uwzględniono w obliczeniach przypadku, w którym łuk pali się pomiędzy szyną a obudową lub częścią uziemioną,
- w obliczeniach pominięto wpływ przemieszczającej się kolumny łukowej na zmiany gęstości, lepkości dynamicznej i ciśnienia gazu, w którym porusza się łuk.

4.1. Budowa modelu obliczeniowego łuku dwufazowego

Ze względu na prostszą analizę wzajemnych oddziaływań elektrodynamicznych układu szynowego na przemieszczający się łuk, jak również warunki układu, w którym się on pali, szerszej analizie poddano układ dwufazowy, w którym występuje jeden łuk. Na podstawie powyższych uproszczeń opracowano model dwufazowego łuku przemieszczającego się wzdłuż szyn.

W obliczeniach prędkości łuku zastosowano „model prętowy" łuku, w którym łuk jest odzwierciedlany w formie walca o promieniu r_a i długości l_a odpowiadającej odstępowi pomiędzy wewnętrznymi krawędziami szyn a_0. Oś symetrii walca jest prostopadła do osi układu szynowego. Widok modelu łuku przedstawiono na rys. 4.1.



Rys. 4.1. Model łuku oraz składowe sił działające na łuk palący się pomiędzy dwoma prostoliniowymi elektrodami (szynami) uwzględnione w obliczeniach prędkości łuku

Zgodnie z rys. 4.1 równanie ruchu dla łuku określono zależnością [45, 47, 72]:

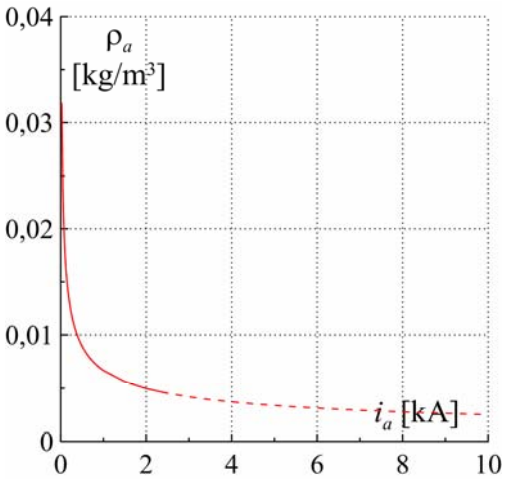
$$m_a \frac{\mathrm{d}v_a}{\mathrm{d}t} = F_D - F_0 , \tag{4.1}$$

gdzie: v_a jest prędkością chwilową łuku, m_a jest masą walca odzwierciedlającego kolumnę łukową.

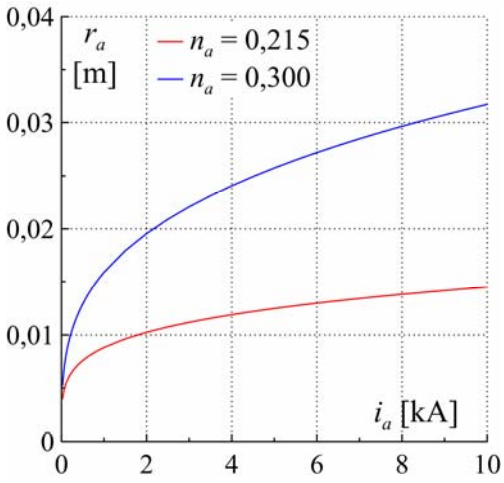
Wartość masy odzwierciedlającej kolumnę łukową m_a obliczono jako iloczyn gęstości plazmy ρ_a i objętości walca odzwierciedlającego kolumnę łukową ograniczonej odległością pomiędzy wewnętrznymi krawędziami szyn l_a oraz promieniem r_a, zgodnie ze wzorem:

$$m_a = \pi r_a^2 l_a \rho_a . \tag{4.2}$$

W obliczeniach wykorzystano zmianę gęstości plazmy ρ_a na podstawie [72]. Przebieg zmian $\rho_a = f(i_a)$ przedstawiono na rys. 4.2.



Rys. 4.2. Zależność gęstości plazmy ρ_a łuku w funkcji prądu i_a



Rys. 4.3. Zależność promienia walca r_a odzwierciedlającego kolumnę łukową w funkcji prądu i_a

Istotna zmiana gęstości plazmy występuje przy niewielkich prądach rzędu 100 ÷ 500 A. Przy prądach powyżej 2 kA ma miejsce niewielka zmiana gęstości plazmy [44, 47]. W obliczeniach dynamiki łuku wykorzystano, przedstawioną na rys. 4.2a linią przerywaną, zależność:

$$\rho_a = 0{,}1241 \cdot i_a^{-0{,}4233}. \tag{4.3}$$

Kolejnym parametrem koniecznym do wyznaczenia masy m_a jest promień walca odzwierciedlający kolumnę łukową r_a, który obliczany jest zgodnie ze wzorem:

$$r_a = 0{,}5 \cdot k \cdot \left(\frac{p_0}{101{,}325 \cdot 10^3} \right)^{-m} i_a^{\,n_a}, \tag{4.4}$$

gdzie: k jest stałą zależną od środowiska, w którym pali się łuk oraz od intensywności przepływu gazu chłodzącego np. dla powietrza $k \approx 0{,}4 \cdot 10^2$, p_0 jest ciśnieniem gazu, w którym przemiesza się łuk, m jest współczynnikiem poprawkowym uwzględniającym wpływ ciśnienia na zmianę promienia łuku (wyznaczanym metodami laboratoryjnymi), n_a jest współczynnikiem poprawkowym uwzględniającym wpływ prądu na zmianę promienia łuku (wyznaczanym metodami laboratoryjnymi). Współczynnik n_a został wyznaczony na podstawie badań laboratoryjnych prądu i prędkości. Wartość tego współczynnika w kolejnych badaniach została uzależniona od wartości spodziewanego prądu zwarciowego I_k''. Przykładową zmianę promienia r_a dla różnych wielkości współczynnika n_a przedstawiono na rys. 4.3.

Badania prędkości przemieszczającego się łuku przeprowadzone zostały w układzie szynowym, w którym nie znajdowały się żadne osłony lub obudowy zamknięte. W związku z tym do obliczeń przyjęto wartość współczynnika $m = 1$ oraz ciśnienie p_0 równe ciśnieniu normalnemu (1013,325 kPa) [29].

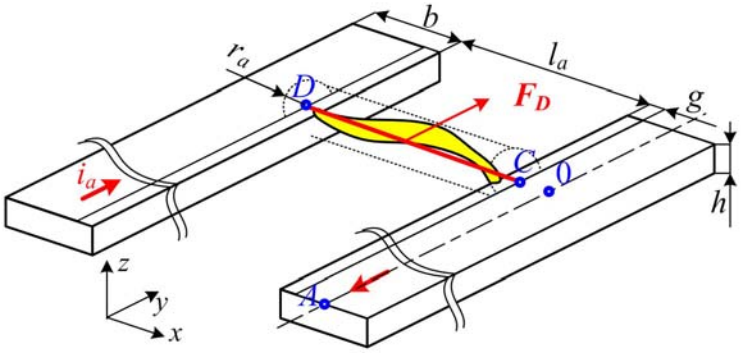
Zależność (4.4) jest modyfikacją wzoru określającego średnicę łuku łączeniowego, opisanego wzorem [12, 78]:

$$d_a = k i^{n_a} p_0^{\,-m}. \tag{4.5}$$

Wykorzystanie do obliczeń zależności (4.5) dotyczącej średnicy łuku łączeniowego można uzasadnić tym, że w trakcie badań wstępnych zauważono znaczne podobieństwa występujące pomiędzy łukiem awaryjnym i łukiem łączeniowym, w którym występuje chłodzenie w strumieniu chłodnego powietrza. W przypadku łuku awaryjnego mamy do czynienia z szybko przemieszczającym się łukiem w otoczeniu nieruchomego gazu. Sytuacja taka jest zbliżona do układu, w którym występuje nieruchomy łuk chłodzony strumieniem powietrza o temperaturze otoczenia. Istotną różnicą dzielącą oba przypadki są

zjawiska występujące przy stopach łuku. W łuku awaryjnym stopy łuku przemieszczają się wraz z kolumną łukową wzdłuż szyn. Natomiast w przypadku łuku łączeniowego droga przemieszczania się łuku jest znacznie mniejsza w porównaniu do drogi wędrówki łuku zwarciowego i ograniczona jest wymiarami styków.

Siły: elektrodynamiczna F_D i oporu aerodynamicznego F_0 zostały zastąpione siłami wypadkowymi działającymi w kierunku równoległym do osi układu szynowego. Wartość siły elektrodynamicznej F_D działającej na łuk została uzależniona od wartości chwilowej prądu i_a płynącego w torze prądowym ukształtowanym przez układ szynowy i założony kształt kolumny łukowej, odstępu pomiędzy osiami szyn i ich profilu. Wpływ profilu szyn został określony przez zastosowanie tzw. średniego odstępu geometrycznego osi toru prądowego od łuku g. Zastosowany odstęp geometryczny wynika z wpływu rozkładu strug prądowych w przekroju rzeczywistym szyn na wartość sił elektrodynamicznych [4, 50, 52], jak to przedstawiono na rys. 4.4.



Rys. 4.4. Siła elektrodynamiczna F_D działająca na kolumnę łukową

Wartość wypadkowej siły elektrodynamicznej F_D, działającej na kolumnę łukową, pochodzącej od prądu płynącego w jednej szynie obliczono zgodnie z równaniem [4, 50, 52]:

$$F_D = \frac{\mu_0}{4\pi} i_a^{\,2} \ln \frac{l_{0D}\left(y_1 + l_{AC}\right)}{g\left(y_1 + l_{AD}\right)}. \tag{4.6}$$

Zakładając, że ruch dwufazowego łuku awaryjnego odbywa się w nieskończenie długim układzie szynowym, sumaryczna siła elektrodynamiczna F_D działająca na łuk przyjmuje postać:

$$F_D = 2\frac{\mu_0}{4\pi} i_a^{\,2} \ln \frac{l_a + g}{g}. \tag{4.7}$$

Wartość średniego odstępu geometrycznego g można obliczyć z następujących zależności [4, 50, 52]:

- dla szyn o przekroju kołowym o promieniu r:

$$g = 0,779r\,, \tag{4.8}$$

- dla szyn o przekroju kwadratowym o boku b:

$$g = 0,446b\,, \tag{4.9}$$

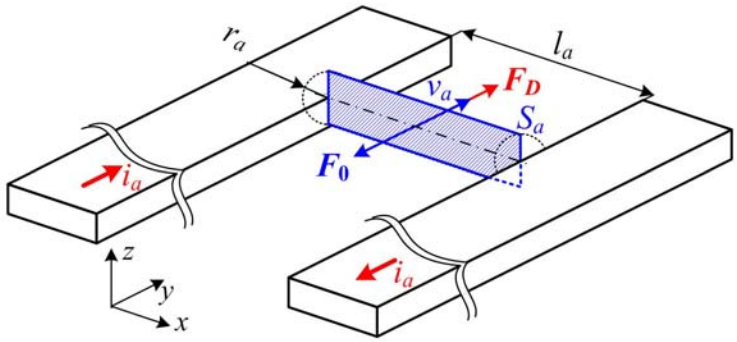
- dla szyn prostokątnych o wymiarach b i h:

$$g = 0,223\left(b+h\right). \tag{4.10}$$

Przeciwnie do kierunku ruchu łuku działa siła oporu aerodynamicznego F_0, która została opisana zależnością [30, 61, 72]:

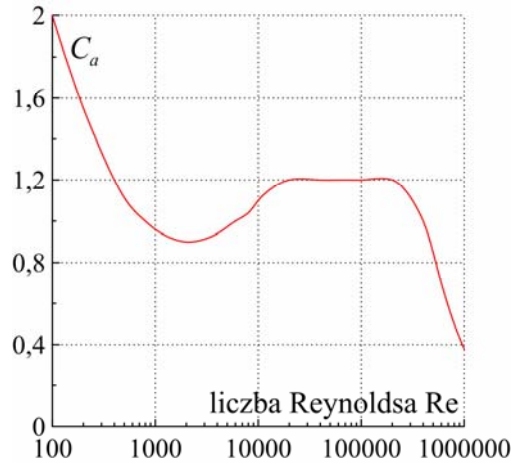
$$F_0 = 0,5 \cdot C_a \rho_0 S_a v_a{}^2\,, \tag{4.11}$$

gdzie: C_a jest współczynnikiem oporu aerodynamicznego, ρ_0 jest gęstością gazu, w którym przemieszcza się łuk, S_a jest polem rzutu walca odzwierciedlającego kolumnę łukową na płaszczyznę prostopadłą do osi szyn. Do obliczeń siły oporu aerodynamicznego przyjęto stałą wartość gęstości gazu ρ_0 = 1,293 kg/m^3 [12, 43, 72]. Czynniki wpływające na wartość siły oraz sposób wyznaczenia przekroju poprzecznego S_a ilustruje rys. 4.5.



Rys. 4.5. Siła oporu aerodynamicznego F_0 działająca na przemieszczającą się kolumnę łukową

Wartość współczynnika oporu aerodynamicznego C_a wyznaczana jest metodami doświadczalnymi. We wstępnych obliczeniach przyjęto stałą wartość współczynnika C_a, określaną jak dla ciał stałych o odpowiednich wymiarach geometrycznych. W przypadku wysokich temperatur gazu i dużych prędkości łuku wartość współczynnika C_a, wyznaczona metodami laboratoryjnymi, odbiega od wartości obliczonej zależnościami przypisanymi dla ciała stałego. Tak więc w obliczeniach dynamiki łuku wartość współczynnika oporu aerodynamicznego C_a została uzależniona od liczby Reynoldsa Re zgodnie z rys. 4.6.



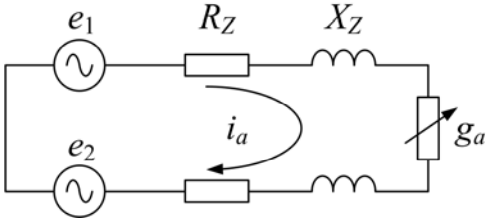
Rys. 4.6. Zależność współczynnika oporu aerodynamicznego C_a od liczby Reynoldsa Re [72]

Wartość liczby Reynoldsa obliczono na podstawie zależności [30, 72]:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho_0 v_a l_a}{\eta}, \tag{4.12}$$

przy czym η jest lepkością dynamiczną gazu (kg·m^{-1}·s^{-1}). Do obliczeń przyjęto stałą wartość lepkości dynamicznej gazu $\eta = 1{,}724 \cdot 10^{-3}$ g/(cm·s) [29].

W celu wyznaczenia wartości chwilowej siły elektrodynamicznej F_D działającej na kolumnę łukową konieczne jest określenie w danym kroku obliczeń wartości chwilowej prądu i_a. Wartość prądu i_a została obliczona metodą oczkową według schematu przedstawionego na rys. 4.7.



Rys. 4.7. Schemat użyty do obliczeń prądu i_a zwarcia dwufazowego

Dla danego obwodu (rys. 4.7) o parametrach R_Z, L_Z wartość chwilową prądu i_a obliczono z zależności:

$$\frac{\mathrm{d}i_a}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{2L_Z}\left[e_1 - e_2 - i_a\left(2R_Z + \frac{1}{g_a}\right)\right], \tag{4.13}$$

przy czym wartości sił elektromotorycznych e_1 i e_2 opisano układem równań:

$$\begin{cases} e_1(t) = \sqrt{2}U\sin\left(\omega t + \Psi_Z\right) \\ e_2(t) = \sqrt{2}U\sin\left(\omega t + \Psi_Z - \dfrac{2}{3}\pi\right) \end{cases}. \tag{4.14}$$

W przypadku niskonapięciowych zwarć łukowych na wartość prądu i_a istotny wpływ wywiera rezystancja łuku, powodując jego ograniczenie w porównaniu do prądu, jaki by płynął w takim samym obwodzie podczas zwarcia metalicznego. Wpływ rezystancji łuku

na wartość chwilową prądu i_a został uwzględniony przez wprowadzenie do obwodu, zmiennej w czasie, zależnej od wartości prądu i_a i długości łuku l_a, przewodności łuku g_a.

Do obliczeń przewodności łuku zwarciowego wykorzystano zmodyfikowany „model zaciskowy łuku zakłóceniowego Kizilca'ya". Ogólna postać równania łuku określona jest zależnością [11, 24, 37]:

$$\frac{dg_a}{dt} = \frac{1}{T_a\left(|i_a|\right)}\left[\frac{G_a\left(|i_a|\right)}{g_a} - 1\right], \tag{4.15}$$

gdzie: G_a jest przewodnością statyczną łuku, T_a stałą czasową łuku.

W celu uzyskania lepszego przybliżenia pomiędzy przebiegami obliczonymi i wyznaczonymi doświadczalnie, do modelu łuku zakłóceniowego Kizilcay'a wprowadzono własne zależności funkcyjne jego parametrów podobnie, jak to zostało opracowane przez Grütza i Hochrainera [11, 78]. Uzależnienie parametrów opisujących równanie (4.15) od wartości chwilowej prądu łukowego i_a zachowuje podstawową postać równań łuku Cassiego i Mayra. Zależność przewodności statycznej G_a oraz stałej czasowej T_a łuku od wartości bezwzględnej z wartości chwilowej prądu łuku i_a umożliwia połączenie ze sobą cech charakterystycznych dla zaciskowego modelu łuku Cassiego oraz modelu Mayra. W przypadku założeń wprowadzonych przez Cassiego jest to stała temperatura, gęstość prądu oraz gradient napięcia w kolumnie łukowej. Założenia te odpowiadają warunkom, jakie zachodzą w kolumnie łukowej w okresie prądowym. Natomiast w chwili przejścia prądu przez zero w obszarze kolumny łukowej następuje zmiana jej temperatury. Jednocześnie przekrój kolumny łuku nie ulega zmianie, co odpowiada założeniom wprowadzonym przez Mayra [11, 12, 78].

W dalszych obliczeniach przewodności łuku zależność (4.15) przekształcono do postaci, w której jest ona obliczana na podstawie równania [11, 24, 37]:

$$\frac{\mathrm{d}\, g_a}{\mathrm{d}\, t} = \frac{1}{T_a\left(|i_a|\right)}\left[G_a\left(|i_a|\right) - g_a\right], \tag{4.16}$$

gdzie: g_a jest zmienną w czasie przewodnością łuku, a przewodność statyczna G_a jest określona wzorem:

$$G_a\left(|i_a|\right) = \frac{|i_a|}{u_{sa}} = \frac{|i_a|}{\left(u_{0a} + R_{sa}|i_a|\right) l_a}, \tag{4.17}$$

przy czym: u_{0a} jest składową stałą napięcia odniesioną do jednostki długości łuku l_a (V/cm), R_{sa} jest składową rezystancji łuku odniesioną do jednostki długości łuku l_a (Ω/cm). Ogólne równanie opisujące model łuku zwarciowego przyjmuje postać [11, 37]:

$$\frac{\mathrm{d}\,g_a}{\mathrm{d}\,t} = \frac{1}{T_a}\left[\frac{|i_a|}{\left(u_{0a} - R_{sa}\,|i_a|\right) l_a} - g_a\right]. \tag{4.18}$$

Zgodnie ze wstępnymi założeniami, parametry T_a i G_a uzależniono od prądu i_a. Przeprowadzone badania laboratoryjne wykazały, że najlepsze odzwierciedlenie rzeczywistych przebiegów prądów i napięć łuku uzyskuje się poprzez wprowadzenie zmiennej przewodności statycznej G_a, a więc opisujących ją współczynników R_{sa}, u_{0a} oraz stałej czasowej łuku T_a, zależnych od wartości bezwzględnej z wartości chwilowej prądu i_a.

Zależność składowej rezystancji łuku R_{sa} odniesionej do jednostki długości łuku l_a od prądu i_a zostało przedstawione przebiegiem wykładniczym opisanym wzorem:

$$R_{sa} = R_{0a} e^{-\frac{|i_a|}{\alpha_i}} + R_{1a}, \tag{4.19}$$

w którym R_{1a} jest wartością ustaloną, a R_{0a} jest wartością początkową składowej rezystancji łuku odniesionej do jednostki długości l_a, α_i jest to stała określająca szybkość ustalania się składowej rezystancji łuku R_{sa} odniesionej do jednostki długości l_a.

Zmiana składowej stałej napięcia łuku u_{0a} odniesionej do jednostki długości łuku l_a została opisana, poprzez nałożenie na siebie dwóch przebiegów wykładniczych, równaniem:

$$u_{0a} = u_0 e^{-\frac{|i_a|}{\gamma_i}} + u_1 - \left(u_0 + u_1\right) e^{-\frac{|i_a|}{\beta_i}}, \tag{4.20}$$

przy czym: u_1 jest wartością ustaloną składowej stałej napięcia w okresie prądowym, u_0 jest wartością początkową składowej napięcia dla prądu i_a = 0 A, β_i i γ_i są stałymi określającymi szybkość stabilizowania się składowej stałej napięcia u_{0a} odniesionej do jednostki długości łuku l_a.

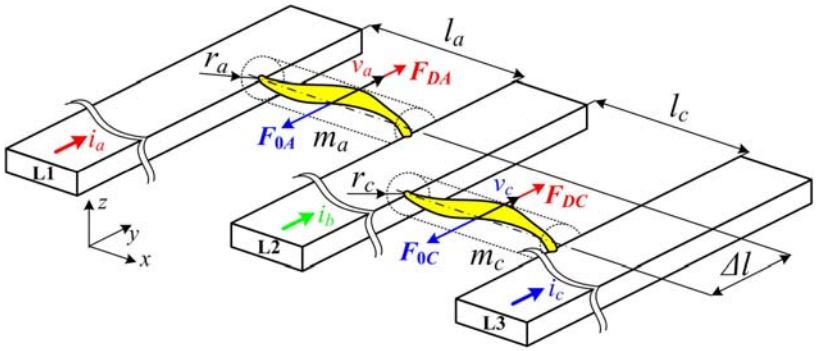
Zależność stałej czasowej łuku T_a od wartości bezwzględnej z wartości chwilowej prądu $|i_a|$ została aproksymowana funkcją potęgową określoną wzorem:

$$T_a = K_{Ta}\,|i_a|^{2,5} + T_{0a}. \tag{4.21}$$

Wartości parametrów charakteryzujących model łuku zwarciowego oraz zmiennych opisujących zależności (4.19), (4.20) i (4.21) wyznaczono na podstawie badań laboratoryjnych. Procedurę obliczania parametrów charakteryzujących użyty model łuku zwarciowego przedstawiono w Załączniku A.

4.2. Budowa modelu obliczeniowego łuku trójfazowego

Większość zwarć łukowych w systemach niskonapięciowych ma charakter zwarć trójfazowych. W układzie trójfazowym z szynami ułożonymi w jednej płaszczyźnie, podczas zwarcia z łukiem przemieszczającym się wzdłuż szyn, występują dwa łuki palące się pomiędzy szynami skrajnymi a środkową [61]. Rozkład sił działających na dwa łuki w układzie trójfazowym został przedstawiony na rys. 4.8.



Rys. 4.8. Składowe sił uwzględnione w obliczeniach prędkości łuku działające na trójfazowy łuk palący się w płaskim układzie szyn: v_a, v_c – odpowiednio prędkości łuków palących się pomiędzy szynami L1-L2 oraz L2-L3, F_{DA}, F_{DC} – siły elektrodynamiczne działające na kolumny łukowe, F_{0A}, F_{0C} – siły oporu aerodynamicznego, Δl – odległość pomiędzy kolumnami łukowymi [44, 47]

Równanie ruchu łuku (4.1) dla układu trójfazowego zostaje przekształcone do układu dwóch równań, w którym wartości prędkości każdego łuku obliczane są jako całki ogólne układu równań różniczkowych:

$$\begin{cases} m_a \dfrac{dv_a}{dt} = F_{DA} - F_{0A} \\ m_c \dfrac{dv_c}{dt} = F_{DC} - F_{0C} \end{cases}, \tag{4.22}$$

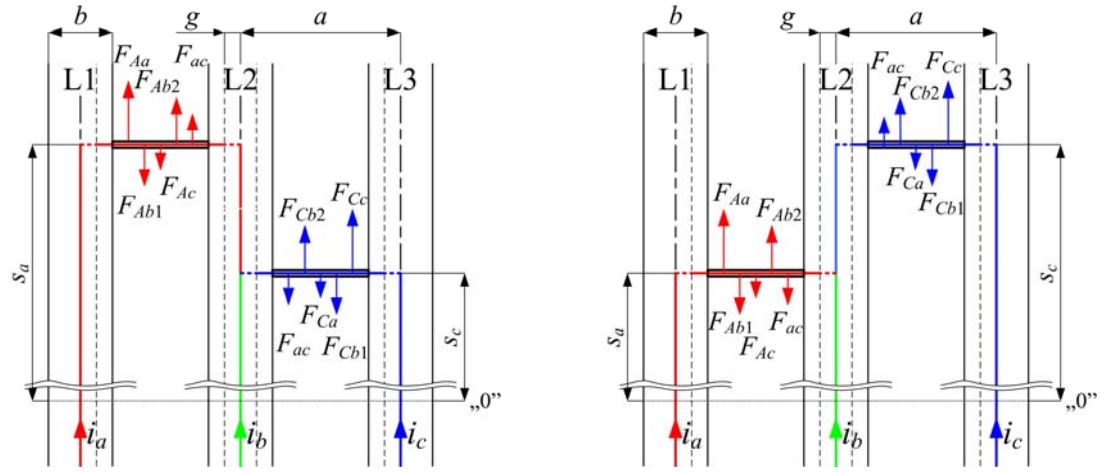
gdzie: m_a i m_c są to masy walców odzwierciedlających kolumny łukowe.

Wartości mas odzwierciedlających kolumny łukowe m_a i m_c zostały obliczone, podobnie jak w przypadku łuku dwufazowego, za pomocą zależności (4.2), (4.3) i (4.4) kolejno dla każdej kolumny łukowej.

W obliczeniach wypadkowej siły elektrodynamicznej działającej na kolumny łukowe zostały uwzględnione składowe sił pochodzące od prądów płynących w szynach i w kolumnach łukowych, jak również składowe sił powstające od prądów płynących w poszczególnych kolumnach łukowych. Należy jednak zaznaczyć, że składowe sił wchodzące w skład wypadkowej siły elektrodynamicznej oddziaływującej na jedną z dwóch kolumn łukowych zależą od wzajemnego położenia kolumn łukowych w danej

chwili czasowej. Można tutaj wyróżnić dwa przypadki: pierwszy, w którym przemieszczenie s_a (od miejsca zapłonu) łuku palącego się między szynami L1 i L2 jest większe od przemieszczenia (drogi) s_c łuku palącego się pomiędzy szynami L2 i L3, tj. $s_a \geq s_c$ oraz drugi, w którym istnieje sytuacja odwrotna, tzn. $s_a < s_c$. Omawiane przypadki zaprezentowano na rys. 4.9.

a) b)



Rys. 4.9. Siły działające na kolumny łukowe trójfazowego zwarcia łukowego w przypadku, gdy: a) $s_a \geq s_c$, b) $s_a < s_c$, „0” – miejsce zapłonu łuku

Zarówno w jednym, jak i w drugim przypadku równanie (4.7) przyjmuje postać:

$$\begin{cases} F_{DA} = F_{Aa} + F_{Ab} + F_{Ac} + F_{ac} \\ F_{DC} = F_{Ca} + F_{Cb} + F_{Cc} - F_{ac} \end{cases}, \tag{4.23}$$

gdzie siły: F_{Aa}, F_{Ab} i F_{Ac} są składowymi elektrodynamicznej siły F_{DA} działającej na kolumnę łuku palącego się pomiędzy szynami L1 i L2 i pochodzą od prądu i_a płynącego w tej kolumnie łukowej oraz prądów płynących kolejno w szynach L1, L2 i L3; F_{Ca}, F_{Cb} i F_{Cc} są składowymi elektrodynamicznej siły F_{DC} działającej na kolumnę łuku palącego się pomiędzy szynami L2 i L3 i pochodzą od prądu i_c płynącego w tej kolumnie łukowej oraz prądów płynących kolejno w szynach L1, L2 i L3; F_{ac} jest siłą elektrodynamiczną powstającą od prądów płynących w kolumnach łukowych.

Wartość siły F_{ac} jest opisana wzorem [4, 72]:

$$F_{ac} = \frac{\mu}{4\pi} i_a i_c \frac{\left(\Delta l + \sqrt{l_a^2 + \frac{1}{4}\Delta l^2} + \sqrt{l_c^2 + \frac{1}{4}\Delta l^2} \right) - \left(\sqrt{l_a^2 + \Delta l^2} + \sqrt{l_c^2 + \Delta l^2} \right)}{\Delta l}, \tag{4.24}$$

przy czym Δl jest odległością pomiędzy kolumnami łukowymi obliczoną na podstawie równania:

$$\Delta l = s_a - s_c, \tag{4.25}$$

gdzie:

$$s_a = \int_0^t v_a \,\mathrm{d}t\,, \tag{4.26}$$

$$s_c = \int_0^t v_c \,\mathrm{d}t\,. \tag{4.27}$$

Przy założeniu, że $l_a = l_c$ wzór (4.24) upraszcza się do postaci:

$$F_{ac} = \frac{\mu}{4\pi} i_a i_c \frac{\left(\Delta l + 2\sqrt{{l_a}^2 + \frac{1}{4}\Delta l^2}\right) - 2\sqrt{{l_a}^2 + \Delta l^2}}{\Delta l}. \tag{4.28}$$

Siły F_{Aa}, F_{Ab} i F_{Ac}, przy założeniu $s_a \geq s_c$, opisane są zależnościami:

$$F_{Aa} = \frac{\mu_0}{4\pi} {i_a}^2 \ln\frac{l_a + g}{g}\,, \tag{4.29}$$

$$F_{Ab} = F_{Ab1} + F_{Ab2} = \frac{\mu_0}{4\pi} i_a \left\{ \left(-i_b\right)\left[\ln\frac{l_a + g}{g} - \ln\left(N_1 \frac{l_a + g}{g} \right)\right] + i_a \ln\left[N_1 \frac{l_a + g}{g} \right]\right\}, \tag{4.30}$$

$$F_{Ac} = \frac{\mu_0}{4\pi} i_a \left(-i_c\right)\left\{ \ln\frac{l_a + g + a}{g + a} - \ln\left[N_2 \frac{l_a + g + a}{g + a} \right]\right\}. \tag{4.31}$$

Przy czym współczynniki pomocnicze N_1 i N_2 przedstawione są wzorami:

$$N_1 = \frac{\Delta l + \sqrt{\Delta l^2 + g^2}}{\Delta l + \sqrt{\Delta l^2 + \left(l_a + g\right)^2}}\,, \tag{4.32}$$

$$N_2 = \frac{\Delta l + \sqrt{\Delta l^2 + \left(g + a\right)^2}}{\Delta l + \sqrt{\Delta l^2 + \left(l_a + g + a\right)^2}}\,. \tag{4.33}$$

Odpowiednio siły F_{Ca}, F_{Cb} i F_{Cc} działające na kolumnę łukową łuku palącego się pomiędzy szynami L2 i L3, dla przypadku $s_a \geq s_c$, są określone zależnościami:

$$F_{Ca} = \frac{\mu_0}{4\pi}\left(-i_a\right) i_c \left\{ \ln\frac{l_a + g + a}{g + a} + \ln\left[N_2 \frac{l_a + g + a}{g + a} \right]\right\}, \tag{4.34}$$

$$F_{Cb} = F_{Cb1} + F_{Cb2} = \frac{\mu_0}{4\pi} i_c \left\{ \left(-i_b\right) \ln\frac{l_a + g}{g} + i_a \ln\left[N_1 \frac{l_a + g}{g} \right]\right\}, \tag{4.35}$$

$$F_{Cc} = \frac{\mu_0}{4\pi} {i_c}^2 \ln\frac{l_a + g}{g}\,. \tag{4.36}$$

W przypadku, gdy $s_a < s_c$ zależności (4.30), (4.31), (4.34) i (4.35) przyjmują postać:

$$F_{Ab} = F_{Ab1} + F_{Ab2} = \frac{\mu_0}{4\pi} i_a \left\{ \left(-i_b\right) \ln\frac{l_a + g}{g} + i_c \ln\left[N_1 \frac{l_a + g}{g} \right]\right\}, \tag{4.37}$$

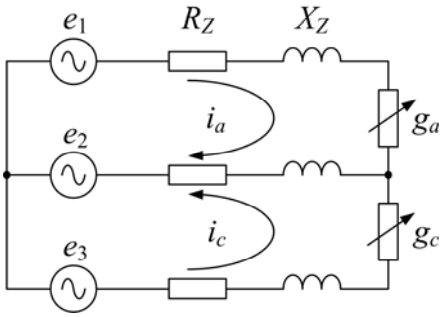
$$F_{Ac} = \frac{\mu_0}{4\pi} i_a \left(-i_c\right) \left\{ \ln \frac{l_a + g + a}{g + a} + \ln \left[N_2 \frac{l_a + g + a}{g + a} \right] \right\}, \tag{4.38}$$

$$F_{Ca} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(-i_a\right) i_c \left\{ \ln \frac{l_a + g + a}{g + a} - \ln \left[N_2 \frac{l_a + g + a}{g + a} \right] \right\}, \tag{4.39}$$

$$F_{Cb} = F_{Cb1} + F_{Cb2} = \frac{\mu_0}{4\pi} i_c \left\{ \left(-i_b\right) \left[\ln \frac{l_a + g}{g} - \ln \left(N_1 \frac{l_a + g}{g} \right) \right] + i_c \ln \left[N_1 \frac{l_a + g}{g} \right] \right\}. \tag{4.40}$$

Sposób wyznaczenia wypadkowych sił oporu aerodynamicznego F_{0A} i F_{0C} jest identyczny, jak w przypadku łuku dwufazowego, a więc wartości F_{0A} i F_{0C} zostały obliczone na podstawie zależności (4.11) kolejno dla każdej kolumny łukowej.

Wartości chwilowe prądów i_a i i_c płynących w poszczególnych kolumnach łukowych trójfazowego zwarcia łukowego obliczono metodą oczkową według rys. 4.10.



Rys. 4.10. Schemat użyty do obliczeń prądów i_a i i_c trójfazowego zwarcia łukowego

Zgodnie z rys. 4.10 obliczenie wartości chwilowych prądów i_a i i_c sprowadza się do rozwiązania układu równań:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}\, i_a}{\mathrm{d}\, t} = \dfrac{1}{3L_Z} \left[2e_1 - e_2 - e_3 - i_a \left(3R_Z + \dfrac{2}{g_a} \right) + \dfrac{i_c}{g_c} \right] \\ \dfrac{\mathrm{d}\, i_c}{dt} = \dfrac{1}{3L_Z} \left[2e_3 - e_2 - e_1 - i_c \left(3R_Z + \dfrac{2}{g_c} \right) + \dfrac{i_a}{g_a} \right] \\ \dfrac{\mathrm{d}\, g_a}{\mathrm{d}\, t} = \dfrac{1}{T_a} \left[\dfrac{\left| i_a \right|}{\left(u_{0a} - R_{sa} \left| i_a \right| \right) l_a} - g_a \right] \\ \dfrac{\mathrm{d}\, g_c}{\mathrm{d}\, t} = \dfrac{1}{T_c} \left[\dfrac{\left| i_c \right|}{\left(u_{0c} - R_{sc} \left| i_c \right| \right) l_c} - g_c \right] \end{cases}, \tag{4.41}$$

w którym napięcia e_1, e_2 i e_3 opisane są zależnościami:

$$\begin{cases} e_1(t) = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \psi_Z) \\ e_2(t) = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \psi_Z - \dfrac{2}{3}\pi) \\ e_3(t) = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \psi_Z + \dfrac{2}{3}\pi) \end{cases}. \tag{4.42}$$

5. Ogólny zarys badań dynamiki niskonapięciowego łuku awaryjnego

Wstępna analiza teoretyczna dotycząca oddziaływań elektrodynamicznych występujących w trakcie trójfazowego niskonapięciowego zwarcia łukowego w prostoliniowym układzie szyn ułożonych w jednej płaszczyźnie wykazała wzrost elementarnych sił elektrodynamicznych działających na szyny w porównaniu do sił, jakie by wystąpiły w takim samym układzie szynowym w trakcie zwarcia metalicznego. Siły elektrodynamiczne działające na szyny i związane z nimi naprężenia zależą od geometrii układu szynowego, wartości chwilowych prądów zwarciowych płynących w poszczególnych fazach układu szynowego oraz od wzajemnego położenia kolumn łukowych trójfazowego zwarcia łukowego. W niskonapięciowych układach rozdzielczych na wartość prądu zwarcia łukowego istotny wpływ ma rezystancja łuku, która powoduje jego ograniczenie, w porównaniu do wartości prądu płynącego w trakcie zwarcia metalicznego. W celu określenia wpływu rezystancji łuku zwarciowego na wartości chwilowe prądów zwarciowych, dynamiki przemieszczania się łuku awaryjnego wzdłuż płaskiego, prostoliniowego układu szyn, jak również w celu wyznaczenia wzajemnego położenia kolumn łukowych, konieczne było przeprowadzenie badań laboratoryjnych prędkości łuku.

Niskonapięciowe układy rozdzielcze są bardzo zróżnicowane pod względem budowy. W typowych konstrukcjach układów szyn zbiorczych bardzo często stosuje się zmianę sposobu ułożenia układu szynowego, jak i samych szyn fazowych względem siebie. Ponadto wzdłuż ułożonego układu szynowego mogą występować w niewielkiej odległości od szyn metalowe konstrukcje wsporcze bądź obudowy aparatury, odpływy szynowe w polach liniowych, przegrody izolacyjne, mosty szynowe ułożone prostopadle do osi układu szynowego oraz aparatura łączeniowa i pomiarowa.

Stabilne palenie się łuku w trakcie niskonapięciowych zwarć łukowych występuje przy niewielkich odstępach, nieprzekraczających 60 mm, pomiędzy wewnętrznymi krawędziami szyn. W wielu konstrukcjach rozdzielnic odstępy pomiędzy szynami fazowymi a konstrukcją uziemioną, np. obudową rozdzielnicy, są znacznie większe niż pomiędzy samymi szynami fazowymi. Zwiększona odległość pomiędzy konstrukcjami uziemionymi a szynami fazowymi może spowodować niestabilne palenie się łuku.

W trakcie zwarcia rzeczywiście istnieje prawdopodobieństwo przeskoku łuku na części uziemione. Stan ten nie trwa długo, gdyż w momencie przejścia prądu przez zero następuje jego zgaszenie, a ponowny zapłon powstaje już pomiędzy szynami fazowymi [43]. Występowanie przegród lub warstw izolacyjnych na szynach powoduje spowolnienie lub nawet miejscowe zatrzymanie łuku na przeszkodzie. Silne oddziaływanie cieplne łuku na materiały izolacyjne zmienia warunki, w jakich się pali. Wywołana przez cieplne oddziaływanie łuku piroliza materiałów organicznych powoduje wytworzenie dużej ilości gazów, które dodatkowo chłodzą kolumnę łukową i mogą przyczynić się do zgaszenia łuku przy przejściu prądu przez zero, jak również do jego ponownego zapłonu w innej części układu szynowego.

Przeprowadzenie szczegółowych badań dotyczących wpływu poszczególnych czynników na prędkość chwilową łuku wiązałoby się ze sporym nakładem czasu i kosztów, i byłoby utrudnione ze względu na niekiedy losowy wpływ niektórych czynników na uzyskiwane wyniki. Dokładniejsza analiza wymagałaby przeprowadzenia bardzo dużej ilości prób. Stąd też w badaniach dynamiki łuku postanowiono wprowadzić uproszczenia eliminujące wpływ niektórych czynników, takich jak: konstrukcji ferromagnetycznych, sposobu ułożenia szyn, obecności części uziemionych lub warstw i przegród izolacyjnych. Takie podejście ułatwia jednoznaczną analizę teoretyczną dynamiki prędkości i zachowania się łuku w wybranej konfiguracji układu szynowego.

Postanowiono skupić się na przypadku prostoliniowego układu szyn zbiorczych, obejmującego najczęściej stosowane rozwiązania niskonapięciowych układów szynowych pod względem materiału, z jakiego wykonywane są układy szynowe, jak również ich profilu i odstępu pomiędzy osiami szyn. Cały cykl badań laboratoryjnych został podzielony na dwie części.

Pierwsza część obejmuje badania prędkości łuku występującego podczas zwarcia dwufazowego, gdzie występuje jeden łuk palący się pomiędzy szynami fazowymi układu. Szczegółowe badania prędkości łuku w takiej konfiguracji układu, ze względu na jego prostotę budowy, umożliwiają wyznaczenie prędkości łuku zależnej od materiału, po jakim porusza się łuk, w zależności od wartości prądów probierczych oraz odstępów pomiędzy osiami szyn. Przeprowadzone rejestracje przebiegów prądu i napięcia umożliwiają wyznaczenie współczynników do zaproponowanego modelu matematycznego. Wyniki pomiarów są niezbędne do obliczeń ze względu na brak w literaturze szczegółowych informacji dotyczących parametrów opisujących wpływ rezystancji łuku zwarciowego

na wartość chwilową prądu zwarciowego, jak również czynników decydujących o chwilowej prędkości przemieszczania się łuku awaryjnego wzdłuż szyn.

Drugi etap dotyczy badań prędkości trójfazowego łuku zwarciowego w prostoliniowym układzie szyn zbiorczych. Uzyskane wyniki prób trójfazowych posłużyły do weryfikacji założeń upraszczających, sprawdzenia procedur obliczeniowych i uzyskanych wyników obliczeń, jak również w celu wprowadzenia ewentualnych poprawek do użytego modelu obliczeniowego.

Analizę prędkości dwufazowego niskonapięciowego łuku awaryjnego poruszającego się wzdłuż szyn przeprowadzono dla układu, w którym spodziewany prąd zwarciowy $I_k^{"}$ mieścił się w przedziale 2 ÷ 10 kA, przy odstępie pomiędzy osiami szyn a = 60 mm oraz 2 ÷ 16 kA, przy odstępie pomiędzy osiami szyn mieszczącym się zakresie 80 ÷ 100 mm. Górna granica zakresu prób dla najmniejszego z analizowanych odstępów a podyktowana była ograniczoną wytrzymałością elektrodynamiczną samego układu szynowego. W przypadku trójfazowego łuku awaryjnego badania prędkości przeprowadzono przy prądach zwarciowych $I_k^{"}$ z zakresu 2 ÷ 10 kA i odstępach a wynoszących 60 ÷ 80 mm.

Wartości analizowanych prądów zwarciowych odpowiadają wartościom prądów spotykanych w rozdzielnicach średniej mocy, w których układy szynowe zasilane są z transformatorów, których moc nie przekracza 630 kVA. Typowe wartości spotykanych prądów zwarciowych w układach rozdzielczych niskiego napięcia zasilanych z transformatorów o określonej mocy znamionowej S_n i napięciu zwarcia u_k, zostały zamieszczone w tab. 5.1. Pogrubioną czcionką zaznaczono te wartości prądów znamionowych i zwarciowych, którym odpowiada założony przedział badań laboratoryjnych.

Tab. 5.1. Spodziewane prądy zwarciowe w niskonapięciowych układach rozdzielczych zasilanych z transformatorów [80]

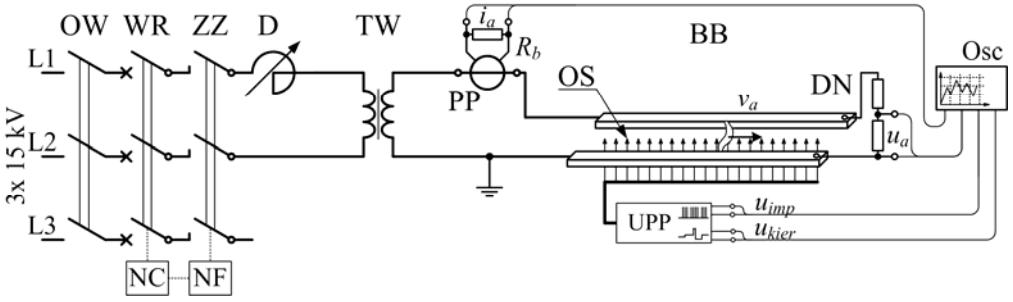
Moc znamionowa transformatora S_n [kVA]	Prąd znamionowy I_n [A]	Spodziewany prąd zwarciowy $I_k^{"}$ [kA]	
		u_k = 4%	u_k = 6%
160	**230**	**5,8**	**3,8**
250	**361**	**9,0**	**6,0**
400	**577**	**14,4**	**9,6**
630	**909**	22,7	**15,2**
1000	1443	36,1	24,1
1250	1804	45,1	30,1
2000	2887	72,2	48,1
2500	3608	90,2	60,1
3200	4619	115,5	77,0

Badania prędkości dwufazowego niskonapięciowego łuku zwarciowego przeprowadzono w układzie prostoliniowych szyn wykonanych z miedzi typu M1E lub aluminium typu A1 o profilu prostokątnym i wymiarach 40x5 mm. W przypadku badań trójfazowego niskonapięciowego łuku awaryjnego wykorzystano układ prostoliniowych szyn zbudowany tylko z szyn aluminiowych o profilu prostokątnym i wymiarach 40x5 mm. Szyny w badaniach łuku dwufazowego i trójfazowego ułożone są pionowo, w jednej płaszczyźnie, dłuższą krawędzią równolegle do płaszczyzny podstawy. Pionowe ułożenie szyn w analizowanym zakresie odstępów a, w porównaniu do ułożenia poziomego, nie wpływa znacząco na wyniki pomiarów. Potwierdziły to wyniki badań wstępnych.

6. Badania prędkości dwufazowego łuku awaryjnego

6.1. Stanowisko probiercze

Badania prędkości dwufazowego niskonapięciowego łuku zwarciowego przeprowadzono w układzie, którego schemat zamieszczono na rys. 6.1. Stanowisko probiercze składa się z części wielkoprądowej, w skład której wchodzi aparatura łączeniowa: odłącznik OW, wyłącznik roboczy WR i załącznik zwarciowy ZZ. Oprócz tego w układzie znajduje się dławik D służący do regulacji spodziewanego prądu zwarciowego, transformator wielkoprądowy TW i badany układ szynowy BB.



Rys. 6.1. Schemat układu do badań prędkości łuku dwufazowego zwarcia łukowego: OW – odłącznik, WR – wyłącznik, ZZ – załącznik zwarciowy, D – dławik, TW – transformator wielkoprądowy, PP – przekładnik prądowy, R_b – bocznik pomiarowy, BB – układ szynowy, DN – dzielnik napięcia, NF – nastawnik fazowy, NC – nastawnik czasowy, OS – czujniki optyczne, UPP – układ pomiaru prędkości łuku, Osc – oscyloskop

Układ szynowy BB stanowiska laboratoryjnego składa się z dwóch wymiennych szyn o profilu prostokątnym 40x5 mm i długości 2 m, ułożonych w jednej płaszczyźnie i pionowo, dłuższą krawędzią równolegle do płaszczyzny układu. Wybór długości szyn zbiorczych podyktowany został m.in. ilością zastosowanych czujników pomiarowych i odstępem miedzy nimi, zapewniającym zadowalający pomiar prędkości. Zasilanie ułożonego pionowo układu szyn zostało doprowadzone od dołu. Na rys. 13.5a w Załączniku C zamieszczono widok stanowiska probierczego do badań prędkości dwufazowego łuku awaryjnego.

W skład części pomiarowej stanowiska probierczego wchodzi układ pomiaru prądu i_{a_e} oraz napięcia u_{a_e}, jak również układ pomiaru prędkości v_{a_e} przemieszczającego się łuku UPP. Do pomiaru prądu zwarciowego zastosowano przekładnik prądowy PP o przekładni k_{PP} = 2000/5 A/A, w którym obciążenie strony wtórnej stanowił bocznik

pomiarowy o wartości R_b = 0,1 Ω. Do pomiaru napięcia wykorzystano dzielnik napięciowy DN o przekładni k_{DN} = 333 V/V. Pomiar napięcia realizowano na końcu układu szynowego w celu ograniczenia wpływu dodatkowego spadku napięcia występującego na rezystancji szyn, spowodowanego przepływem prądu zwarciowego. Sygnały z przetworników pomiarowych oraz z układu pomiarowego UPP podawane były poprzez optoizolator na wejścia poszczególnych kanałów oscyloskopu Osc. Rejestrację przebiegów: prądu i_{a_e}, napięcia u_{a_e} oraz sygnałów pomiarowych u_{imp} i u_{kier} przeprowadzono za pomocą oscyloskopu typu TDS 5034B firmy Tektronix z użyciem optoizolatora typy A6907 firmy Tektronix. Zastosowany w stanowisku probierczym nastawnik czasowy NC służy do nastawienia określonego czasu trwania próby zwarciowej. Natomiast wykorzystany w badaniach nastawnik NF zapewnia ustawienie kąta fazowego załączania zwarcia Ψ_Z, a tym samym umożliwia kształtowanie niesymetrii prądu zwarciowego.

6.2. Pomiar prędkości łuku z wykorzystaniem czujników optycznych

Najczęstszym sposobem rejestracji przemieszczającego się łuku jest fotografia szybka. Wydawałoby się, że dzięki tej metodzie uzyskujemy najbardziej wyczerpujące informacje na temat zachowania się łuku. Jednak ze względu na brak widocznej granicy kolumny łukowej i dyskretny pomiar prędkości łuku, polegającej na analizie kolejnych klatek, uzyskiwane wyniki nie zawsze są zadowalające. Poprzez widoczną granicę kolumny łukowej rozumie się określoną średnicę kolumny łukowej, która jest definiowana obszarem jonizacji termicznej. Ponadto otrzymanie odpowiedniej liczby danych wymaga zastosowania bardzo szybkich kamer, a obróbka uzyskanych informacji bywa czasochłonna.

Spośród wielu sposobów oceny prędkości łuku wykorzystano pomiar zmian natężenia promieniowania w zakresie podczerwieni w wybranych punktach za pomocą czujników optycznych. Metodę tę wybrano ze względu na szereg zalet, do których możemy zaliczyć m.in.: separację galwaniczną obwodu pomiarowego od obwodu wielkoprądowego, ograniczenie wpływu zakłóceń elektromagnetycznych, niski koszt budowy układu, czujników, jak i układów elektronicznych obsługujących czujniki oraz łatwa możliwość rozbudowy całego systemu pomiarowego.

Obserwacja kolumny łukowej na podstawie intensywności promieniowania za pomocą prostych czujników (fotodetektorów) jest mało dokładna, a niekiedy wręcz niemożliwa, co utrudnia jednoznaczną ocenę jej położenia. Oznacza to, że szerokość

kolumny ocenionej różnymi sposobami zależy od własności zastosowanych czujników i metod pomiarowych. Stąd istnieje konieczność określenia tej części łuku (stopy łuku czy kolumny łukowej), która powinna być obserwowana, oraz miejsca, w którym powinien nastąpić moment detekcji łuku przez czujnik.

Sposób umieszczenia czujników w stosunku do powierzchni szyn decyduje o tym, jaka część łuku może być obserwowana, np. stopy łuku lub punkt kolumny w wybranej odległości od powierzchni szyny. Określenie granicy oraz szerokości świecącego obszaru kolumny łukowej lub strefy przyelektrodowej jest ściśle związana z charakterystykami częstotliwościowymi zastosowanych fotodetektorów, gdyż długość fali emitowanego przez łuk promieniowania zależy przede wszystkim od temperatury analizowanego obszaru. W celu obserwacji zmian prędkości stref przyelektrodowych należałoby więc dobrać czujniki, których widmo promieniowania ograniczone jest w wąskim zakresie częstotliwości, a maksimum czułości znajduje się w obszarze głębokiej podczerwieni. Strefa ta wynika z temperatury stopy łuku, zależnej od temperatury parowania materiału, z którego wykonane są szyny. W przypadku obserwacji kolumny łukowej należałoby dobrać fotodetektory wrażliwe na promieniowanie w zakresie ultrafioletu, gdyż można w ten sposób zawęzić rozpoznawaną szerokość łuku.

Przeprowadzone wstępne badania wykazały, że najlepszy obraz położenia łuku uzyskano w przestrzeni przyelektrodowej, przy wykorzystaniu czujników wykazujących maksimum emisyjności w zakresie podczerwieni. Optymalne położenie czujników względem powierzchni szyn uzasadnić można tym, że w przypadku obserwacji strefy świecącej łuku w pobliżu stopy łuku zawierającej w swojej przestrzeni dużo par metali i promieniowania emitowanego przez skokowo przemieszczającą się stopę łuku, uzyskuje się jednoznaczny sygnał pomiarowy określający położenie łuku. Amplituda otrzymanego sygnału, poza mocą promieniowania, uzależniona jest również od długości fali. Uzasadnić to można wykorzystując prawo przesunięć Viena określone zależnością [4, 30]:

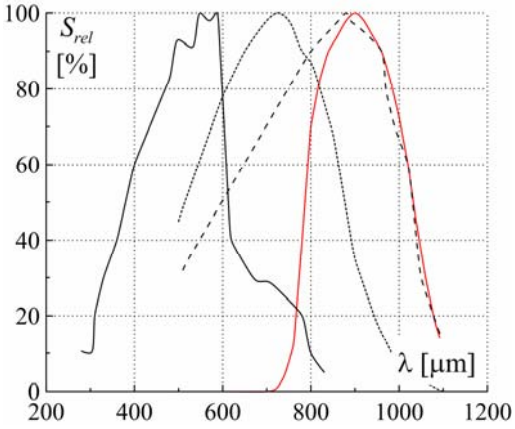
$$\lambda_{\max} = \frac{c_W}{T_W}, \tag{6.1}$$

gdzie: c_W – stała Viena równa $2{,}8978 \cdot 10^{-3}$ m·K, T_W – temperatura wrzenia materiału, z którego wykonane są elektrody.

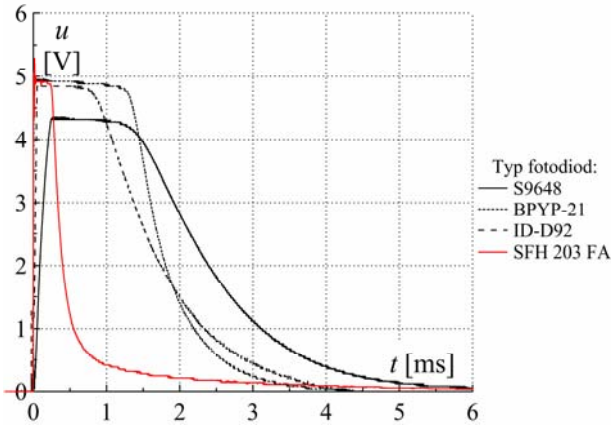
Dla szyn miedzianych o temperaturze wrzenia T_{WCu} = 2811 K [43] długość fali, przy której występuje maksymalna moc promieniowania, jest równa λ_{max} = 1,031 μm. W przypadku szyn aluminiowych temperatura wrzenia wynosi T_{WAl} = 2723 K [43], a obliczona długość fali λ_{max} = 1,064 μm. Jednak ze względu na silne utlenianie aluminium

w wysokiej temperaturze, do obliczeń długości fali [43], przy której następuje maksimum mocy promieniowania z szyn aluminiowych, najlepiej uwzględnić temperaturę wrzenia tlenku glinu Al_2O_3 wynoszącą 3250 K. Wówczas obliczona długość fali promieniowania wynosi λ_{max} = 0,892 μm. Na tej podstawie w badaniach wykorzystano fotodetektor, charakteryzujący się maksymalną względną czułością widmową w zakresie 0,9 – 1,1 μm.

W celu wyboru odpowiedniego fotodetektora do układu pomiaru prędkości łuku, analizie poddano cztery rodzaje detektorów, o różnych charakterystykach widmowych przedstawionych na rys. 6.2.



Rys. 6.2. Charakterystyki widmowe użytych fotodetektorów: S_{rel} – względna czułość widmowa



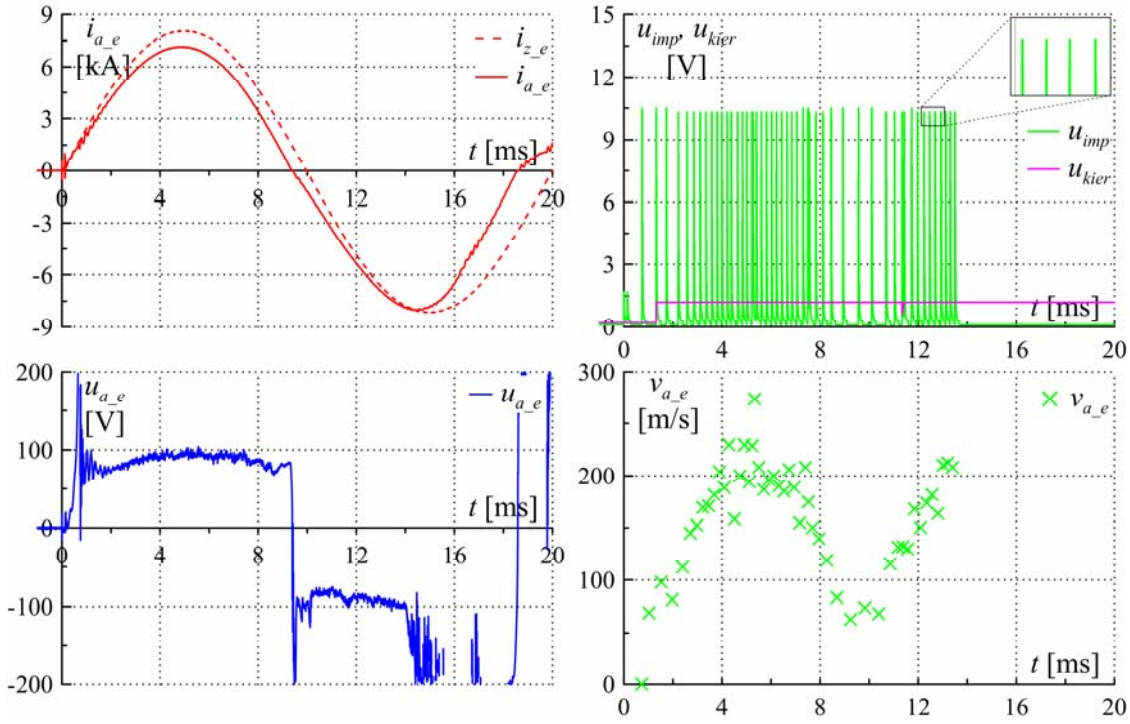
Rys. 6.3. Uzyskany sygnał pochodzący od promieniowania przemieszczającego się łuku

Badania przemieszczającej się kolumny łukowej za pomocą detektorów o różnych charakterystykach widmowych (rys. 6.2) pokazują, że maksimum temperatury i związany z nią szeroki zakres intensywności promieniowania, znajduje się na czole łuku, co ilustruje rys. 6.3. Stąd wynika, że moment detekcji powinien być realizowany w chwili pojawienia się czoła łuku nad daną sondą. Uzasadnić to można tym, że, w przeciwieństwie do łuku stacjonarnego, rozkład temperatury w przekroju poprzecznym poruszającego się łuku nie jest centryczny. Maksimum intensywności promieniowania przesuwa się w kierunku ruchu, ponieważ siły elektrodynamiczne działające na elektrony powodują ich przemieszczanie. W części tylnej znajduje się chłodniejsza strefa rozciągnięta na większym obszarze [49]. Budowę oraz zasadę działania układu pomiaru prędkości chwilowej łuku UPP przedstawiono w Załączniku C.

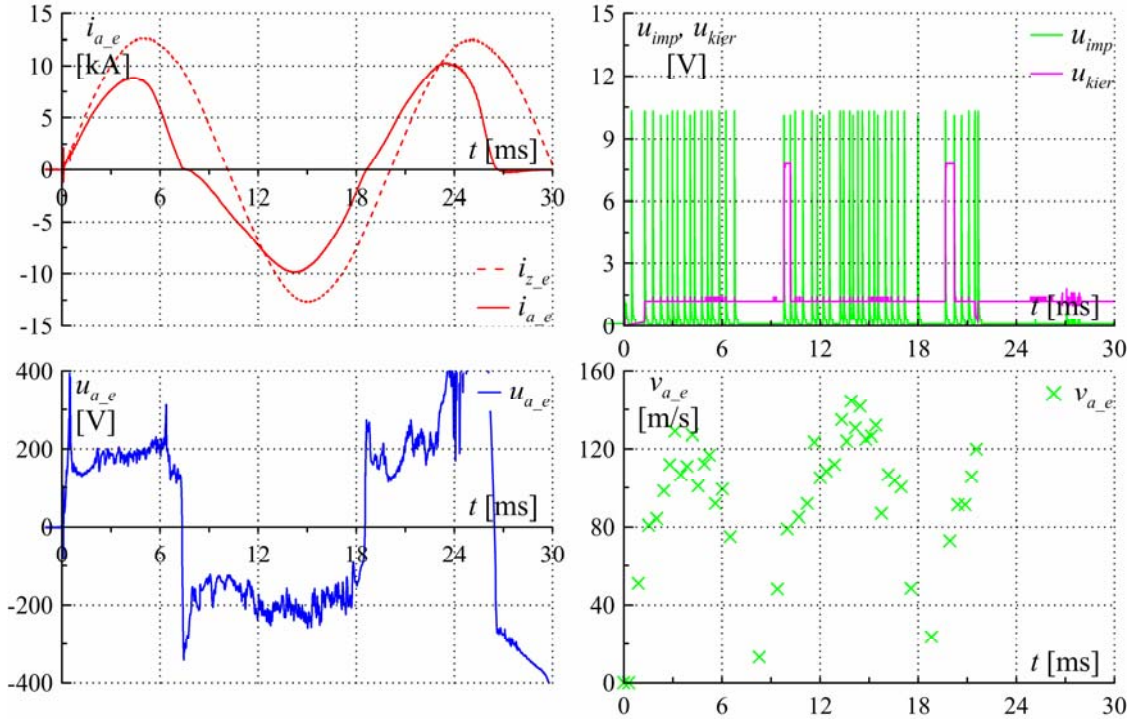
6.3. Metodyka badań eksperymentalnych

W skład każdej próby zwarcia łukowego wchodziły następujące czynności: próba kalibracyjna i próby zwarcia łukowego. Celem próby kalibracyjnej było określenie takich parametrów zespołu probierczego, przy których uzyskiwano zadany kształt i wartość spodziewanego prądu zwarciowego $I_k^{"}$. Próbę tę realizowano poprzez wykonanie zwarcia metalicznego na końcu układu szynowego, przy zadanej wartości dławika wielkoprądowego D, nastawie odpowiedniego kąta załączenia Ψ_Z załącznika zwarciowego ZZ i czasie próby t_z. Dobierano tak kąt załączenia Ψ_Z załącznika zwarciowego ZZ, aby wpływ składowej nieokresowej na całkowity przebieg prądu zwarciowego był jak najmniejszy. Wybór takiego rozwiązania umożliwia łatwiejszy oraz szybszy pomiar wartości skutecznej składowej okresowej prądu zwarciowego $I_k^{"}$ oraz pozwala na skrócenie czasu próby t_z. Dobór odpowiedniego kąta załączenia obwodu Ψ_Z załącznikiem zwarciowym ZZ uzasadniony jest tym, że występowanie oraz udział składowej nieokresowej prądu zwarciowego w całkowitym przebiegu prądu zależy od parametrów obwodu probierczego R_Z i X_Z, fazy napięcia zasilającego stanowisko probiercze i napięcia referencyjnego mierzonego przez nastawnik fazowy NF. Wzajemna relacja pomiędzy wartościami rezystancji R_Z i reaktancji X_Z obwodu zwarciowego decyduje o wartości kąta opóźnienia pomiędzy składową okresową prądu zwarciowego a napięciem. Zakładając, że przebieg napięcia zasilania układu probierczego i napięcia referencyjnego są w fazie, udział składowej nieokresowej w całkowitym przebiegu prądu maleje, gdy $\Psi_Z - \varphi \rightarrow 0^{\circ}$.

Inicjowanie zwarcia łukowego przeprowadzono, przy zadanych parametrach obwodu probierczego, za pomocą cienkiego drucika o średnicy 0,3 mm umieszczonego na początku układu szynowego nad pierwszym czujnikiem pomiarowym układu pomiaru prędkości UPP. W trakcie próby z łukiem wędrującym realizowana była rejestracja przebiegów prądu i_{a_e}, napięcia u_{a_e} oraz sygnałów pomiarowych u_{imp} i u_{kier} z układu UPP. Dla zadanych parametrów układu probierczego przeprowadzono po 6 prób łukowych, w których łuk stabilnie się palił i przemieszczał wzdłuż całego odcinka pomiarowego. Przykładowe rejestracje przebiegów z prób prądu zwarciowego i_{z_e}, prądu zwarcia łukowego i_{a_e}, napięcia łuku u_{a_e}, sygnałów z układu pomiaru prędkości UPP u_{imp} i u_{kier} oraz obliczonej na ich podstawie prędkości przemieszczania się łuku v_{a_e} zamieszczono na rys. 6.4 i rys. 6.5.



Rys. 6.4. Przebiegi: prądu i_{a_e}, napięcia łuku u_{a_e}, rejestrowanych sygnałów u_{imp} i u_{kier} z układu UPP i obliczonej na ich podstawie prędkości v_{a_e} przemieszczania się łuku; szyny P 40x5 mm, a = 60 mm, U = 400 V, $I_{k_e}^{"}$ = 5,75 kA, I_{a_e} = 5,04 kA, U_{a_e} = 99,6 V, v_{a_emean} = 122,5 m/s



Rys. 6.5. Przebiegi: prądu i_{a_e}, napięcia łuku u_{a_e}, rejestrowanych sygnałów u_{imp} i u_{kier} z układu UPP i obliczonej na ich podstawie prędkości v_{a_e} przemieszczania się łuku; szyny P 40x5 mm, a = 80 mm, U = 400 V, $I_{k_e}^{"}$ = 8,84 kA, I_{a_e} = 6,1 kA, U_{a_e} = 185,7V, v_{a_emean} = 81,6 m/s, brak aktywowania czujników nr 16, 40

Procedura wyznaczenia, na podstawie uzyskanych wyników pomiarów, prędkości przemieszczania się łuku zwarciowego została szerzej przedstawiona w Załączniku B. Prędkość łuku została obliczona zgodnie ze wzorem (12.14). Dodatkowo na rys. 6.5 przedstawiono przypadek, w którym w trakcie próby dwa czujniki układu pomiarowego prędkości UPP nie wykryły przemieszczającego się łuku. Sytuacja taka miała miejsce w pobliżu zera prądu, a więc w momencie, w którym następuje zwolnienie łuku oraz zmniejszenie intensywności promieniowania. Wynik obliczeń prędkości w miejscach niezadziałania czujników został skorygowany, a wartość prędkości w tych punktach obliczono zgodnie z zależnością (12.15).

Przeprowadzone badania niskonapięciowego dwufazowego łuku awaryjnego palącego się w modelu szyn zbiorczych i pozyskane na tym etapie wyniki badań posłużyły do opracowania zależności empirycznych opisujących parametry wykorzystanego modelu dynamiki łuku. W skład zmiennych, wyznaczonych na drodze doświadczeń, wchodzi współczynnik poprawkowy n_a uwzględniający wpływ prądu na zmianę promienia łuku oraz parametry opisujące wykorzystany w obliczeniach model łuku zwarciowego, tj.: składowa rezystancji łuku R_{sa} odniesiona do jednostki długości łuku l_a, składowa stała napięcia łuku u_{0a} odniesiona do jednostki długości l_a i stała czasowa łuku T_a. Sposób wyznaczenia i opis parametrów modelu łuku zakłóceniowego został przedstawiony w Załączniku A. Procedurę obliczenia współczynnika poprawkowego n_a uwzględniającego wpływ prądu na zmianę promienia łuku r_a zamieszczono w Załączniku B.

Proces wyznaczenia zależności empirycznych parametrów opisujących model dynamiki łuku został podzielony na dwie części. W pierwszym etapie wyznaczono parametry charakteryzujące zaproponowany model dynamiki łuku z wyników każdej próby łukowej spełniającej kryterium, w którym łuk stabilnie palił się na szynach i przemieszczał wzdłuż całego odcinka pomiarowego. Kryterium to można było zweryfikować poprzez analizę przebiegu napięcia łuku oraz weryfikację zadziałania ostatniego czujnika w układzie pomiaru prędkości UPP. Analiza przebiegu napięcia łuku u_a polegała na określeniu gradientu napięcia w chwili, gdy w układzie płynął prąd łukowy i_a. Przy dojściu łuku do końca układu szynowego następował wzrost jego długości, któremu towarzyszył znaczący wzrost napięcia łuku u_a, w czasie, gdy $|i_a| >> 0$. W wyniku wzrostu napięcia u_a następowało ograniczenie wartości prądu i_a i zgaszenie łuku przy przejściu prądu przez zero. Przypadki, w których łuk samoczynnie gasł przed osiągnięciem końca odcinka pomiarowego nie były brane pod uwagę w dalszej analizie.

Wyniki prób laboratoryjnych przedstawiono razem z wynikami obliczeń w rozdziale 7 i w Załączniku E.

Drugi etap wyznaczenia zależności empirycznych polegał na uśrednieniu, obliczonych na podstawie wyników prób łukowych, wielkości, tj.: prądu łukowego I_a, napięcia łuku U_a, prędkości łuku $v_{a\text{mean}}$ i parametrów: składowej rezystancji łuku R_{sa} odniesionej do jednostki długości l_a, składowej stałej napięcia u_{0a} odniesionej do jednostki długości l_a, stałej czasowej łuku T_a i współczynnika poprawkowego n_a uwzględniającego wpływ prądu na zmianę promienia walca odzwierciedlającego kolumnę łukową r_a. Wielkości te przypisywane były dla zadanego i wyznaczonego na etapie kalibracji spodziewanego prądu zwarciowego I_{k_e}'', który płynął w układzie szynowym o odstępie a. Następnie na podstawie uśrednionych wartości ww. zmiennych zaproponowano ich aproksymację funkcją liniową lub potęgową. Uzyskane zależności zostały wyprowadzone oddzielnie dla szyn miedzianych i aluminiowych, a obliczone za ich pomocą wartości uzależniono od wartości spodziewanego prądu zwarciowego I_{k_e}'' i odstępu pomiędzy wewnętrznymi krawędziami szyn a_0, który według przyjętych założeń jest równy długości łuku l_a.

W tab. 6.1 przedstawiono uśrednione wyniki prób łukowych dla szyn miedzianych o profilu 40x5 mm. Dla szyn aluminiowych o tym samym profilu wyniki badań zamieszczono w tab. 6.2. Oprócz wyników pomiarów, w tabelach zamieszczono obliczenia odchylenia standartowego σ mierzonych wielkości oraz współczynnika ufności Δ wyrażonego w jednostkach wielkości mierzonej. Współczynnik ufności Δ został podany dla poziomu ufności wynoszącego 95%.

Tab. 6.1. Wyniki pomiarów: prądów I_{k_e}'', I_{a_e}, napięcia łuku U_{a_e}, średniej prędkości $v_{a_e\text{mean}}$ dwufazowego łuku awaryjnego przemieszczającego się po szynach typu P 40x5 mm

Lp	a_0	I_{k_e}''	I_{a_e}	σ_{Ia}	Δ_{Ia}	U_{a_e}	σ_{Ua}	Δ_{Ua}	$v_{a_e\text{mean}}$	σ_{Va}	Δ_{Va}
	[mm]	[kA]	[kA]	[A]		[V]			[m/s]		
1	20	2,145	2,058	33	32	87,5	3,1	3,0	68,6	1,1	1,1
2		5,748	4,852	42	33	96,3	2,4	1,9	129,1	2,7	2,2
3		8,669	6,547	280	224	97,3	5,6	4,5	161,7	4,7	3,8
4		12,65	10,40	1491	1687	115,0	2,3	2,6	222,6	5,8	6,6
5	40	2,019	1,766	136	109	175,9	24,2	19,3	41,4	4,2	3,4
6		5,731	4,234	506	443	225,6	35,3	30,9	82,1	0,9	0,8
7		9,491	6,866	1187	1163	227,7	40,2	39,4	112,7	12,3	12,0
8		15,23	10,45	890	712	196,3	23,0	18,4	163,1	5,7	4,5
9	60	2,242	1,697	84	73,4	204,2	13,9	12,2	30,6	4,2	3,7
10		6,271	4,328	416	364,3	225,9	12,3	10,8	51,9	5,6	4,9
11		10,53	5,726	697	965,7	262,3	19,4	26,8	64,7	17,4	24,1
12		14,84	9,740	676	764,7	245,4	5,0	5,6	105,9	8,2	9,3

Tab. 6.2. Wyniki pomiarów: prądów $I_{k_e}^{"}$, I_{a_e}, napięcia łuku U_{a_e}, średniej prędkości $v_{a_e\mathrm{mean}}$ dwufazowego łuku awaryjnego przemieszczającego się po szynach typu AP 40x5 mm

Lp	a_0	$I_{k_e}^{"}$	I_{a_e}	σ_{Ia}	Δ_{Ia}	U_{a_e}	σ_{Ua}	Δ_{Ua}	$v_{a_e\mathrm{mean}}$	σ_{Va}	Δ_{Va}
	[mm]	[kA]	[kA]	[A]		[V]			[m/s]		
1	20	2,159	1,977	45	35	102,7	9,2	7,3	49,2	20,6	16,5
2		5,854	5,349	97	77	100,6	5,5	4,4	118,5	3,0	2,4
3		8,802	7,084	148	118	107,4	3,1	2,5	137,7	4,5	3,6
4		12,57	10,04	923	738	119,8	4,5	3,6	180,6	17,4	14,0
5	40	1,843	1,638	47	41	149,0	9,8	8,6	28,7	3,3	2,9
6		5,215	4,292	226	181	166,5	9,5	7,6	69,1	3,2	2,6
7		8,838	6,833	729	583	185,9	4,9	3,9	95,7	4,9	3,9
8		12,61	9,027	232	185	204,7	16,2	13,0	124,8	2,8	2,2
9	60	2,245	1,903	89	87	183,9	21,0	20,5	33,7	0,9	0,9
10		6,209	4,075	538	471	216,4	21,7	19,0	57,9	6,6	5,8
11		10,49	6,390	725	1005	270,4	33,1	45,9	69,7	0,4	0,6
12		14,72	8,864	647	733	269,0	6,0	6,8	83,7	3,9	4,4

Przedstawione w tab. 6.1 i tab. 6.2 wyniki badań pokazują wzrost wartości odchyleń σ w funkcji zwiększania się wartości prądu zwarciowego $I_{k_e}^{"}$ oraz odstępu pomiędzy wewnętrznymi krawędziami szyn a_0. Duże rozrzuty wyników przy niewielkich odstępach a_0 i prądach $I_{k_e}^{"}$, sięgających górnej granicy analizowanego przedziału, wynikają z dużych prędkości v_{a_e} przemieszczającego się łuku w stosunku do długości układu szynowego. Przy prędkościach $v_{a_e\mathrm{mean}}$ przekraczających 100 m/s łuk przemieszczał się od początku do końca układu szynowego w czasie mniejszym od pełnego okresu T napięcia zasilającego stanowisko laboratoryjne. Stąd w tych przypadkach wartości skuteczne prądu łuku I_{a_e}, napięcia U_{a_e}, prędkości $v_{a_e\mathrm{mean}}$ obliczane były dla niepełnego okresu T zmian prądu. Natomiast w przypadku zwiększenia odstępu a_0 wzrost odchyleń mierzonych wielkości można uzasadnić wzrostem siły ciągu cieplnego i związanych z nią oddziaływań turbulentnych, które powodują wyginanie łuku.

Również w miarę wzrostu odstępu a_0 zwiększała się liczba prób, w których łuk samoczynnie gasł przy przejściu prądu przez zero przed osiągnięciem końca odcinka pomiarowego, co stanowiło dodatkowy problem w trakcie przeprowadzania badań.

W związku z tym dobrze byłoby określić granice stabilności palenia się łuku, tzn. wartości prądów zwarciowych i odstępy pomiędzy szynami, w których niskonapięciowy łuk zwarciowy stabilnie się przemieszcza. Tego typu analiza nie została przeprowadzona, ze względu na ograniczone możliwości samego stanowiska laboratoryjnego, tj. z powodu małej długości układu szynowego w stosunku do uzyskiwanych prędkości przy określonych prądach probierczych, sposobu zasilania

i niezależnych od prowadzącego badania zmian napięcia w elektroenergetycznej sieci zasilającej, jak również z powodu ograniczonych możliwości zaplecza technicznego.

Analiza taka prawdopodobnie wymagałaby przeprowadzenia odpowiednio dużej ilości prób zwarciowych w zbliżonych do siebie warunkach, tzn. przy odpowiedniej długości szyn w stosunku do uzyskiwanych prędkości i przy takim samym stanie powierzchni szyn. Przy dużej ilości prób stan powierzchni szyn znacznie uległby erozji, co przypuszczalnie powodowałoby stabilniejsze palenie się łuku. Natomiast nie byłoby to zgodne ze stanem faktycznym, gdyż ze względu na sporadyczne występowanie zwarć łukowych w układach rzeczywistych rozdzielnic palący się na szynach łuk nie przemieszcza się po powierzchniach szyn zniszczonych wielokrotnymi próbami.

Zapewnienie dla każdej próby łukowej zbliżonych warunków palenia się łuku wymagałoby zabiegów technologicznych polegających na odpowiednim przygotowaniu powierzchni szyn, np. polerowaniu lub wytrawianiu szyn, co skutkowałoby zwiększeniem nakładów finansowych na badania i wydłużeniem czasu badań.

Należy jednak zaznaczyć, że w badaniach wstępnych przeprowadzono szacunkową analizę wpływu staniu powierzchni na wyniki pomiarów prędkości w próbach łukowych. Przy założonej liczbie prób łukowych uzyskane różnice wyników nie wykazywały określonego trendu zmian przekraczających odchyłki z każdej z prób. Stąd można uznać, że w danym zakresie badań stan powierzchni szyn ma znikomy wpływ na uzyskiwane wyniki, szczególnie na wyznaczoną prędkość łuku za pomocą opisanej w rozdziale 6.2 metody pomiarowej.

Pomimo ograniczonego zakresu badań eksperymentalnych można postawić stwierdzenie, że sama budowa modelu szyn rozdzielczych i założony zakres badań w stopniu zadowalającym odzwierciedlają rzeczywiste układy szyn rozdzielczych stosowanych w rozdzielnicach średnich mocy, a uzyskane wyniki eksperymentalnych badań niskonapięciowego łuku dwufazowego przemieszczającego się wzdłuż szyn stanowią istotny materiał służący dalszej analizie wyznaczenia parametrów opisujących użyty model dynamiki łuku.

6.4. Wyznaczenie parametrów opisujących model łuku zwarciowego

6.4.1. Składowa rezystancji łuku odniesiona do jednostki długości łuku

Jednym z podstawowych parametrów opisujących zaciskowy model łuku zakłóceniowego Kizilcay'a (zależność (4.18)) jest składowa rezystancji łuku R_{sa} odniesiona do jednostki długości l_a.

W celu lepszego odzwierciedlenia wyników laboratoryjnych zaproponowano przedstawienie składowej rezystancji łuku R_{sa} w funkcji wartości chwilowej prądu łukowego i_a za pomocą zależności (4.19), w której to przebieg zależności $R_{sa} = f(i_a)$ charakteryzują trzy parametry: wartość początkowa składowej rezystancji łuku R_{0a} odniesiona do jednostki długości łuku l_a, wartość ustalona składowej rezystancji łuku R_{1a} odniesiona do jednostki długości łuku l_a oraz stała α_i określająca szybkość ustalania się składowej rezystancji R_{sa}.

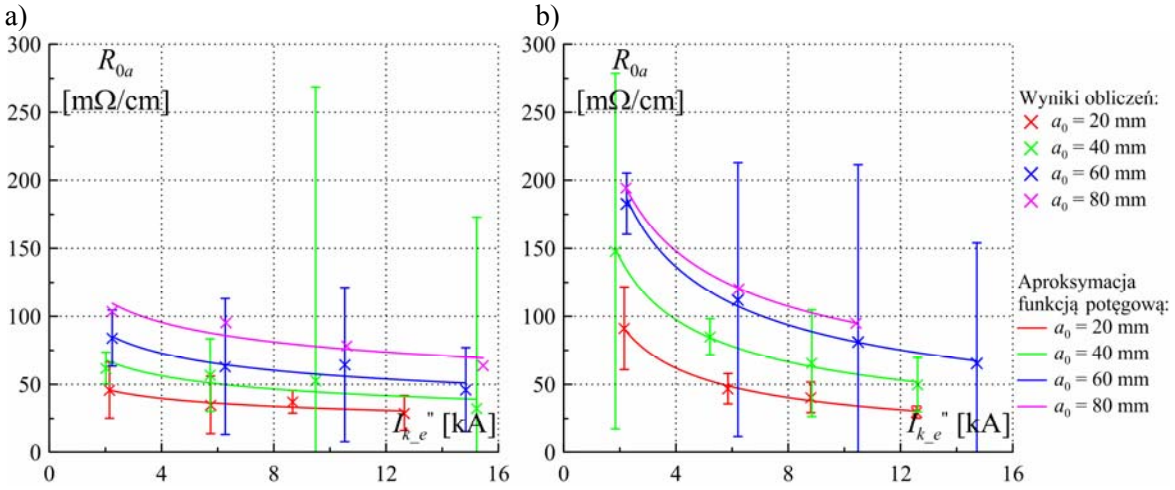
Ze względu na praktyczną możliwość wykorzystania modelu łuku zaciskowego parametry opisujące składową rezystancji R_{sa} zostały uzależnione od podstawowych wielkości, znanych z budowy układu szynowego, oraz obliczeń zwarciowych, tj. od rodzaju materiału szyn, odstępu pomiędzy wewnętrznymi krawędziami szyn a_0, który zgodnie ze wstępnymi założeniami był równy długości łuku l_a i od spodziewanej wartości prądu zwarciowego I_k''.

Uzyskane na podstawie badań laboratoryjnych wyniki obliczeń parametrów opisujących zależność (4.19) zamieszczono w tab. 14.1 i tab. 14.2 w Załączniku D. Podobnie, jak w przypadku wyników wartości prądów zwarciowych, napięć i prędkości łuku, dla każdego z parametrów obliczono odchylenie standartowe σ mierzonych wielkości oraz współczynnik ufności Δ wyrażony w jednostkach wielkości mierzonej.

Proces wyznaczenia zależności empirycznych parametrów opisujących składową rezystancji $R_{sa} = f(i_a)$ został podzielony na dwa etapy.

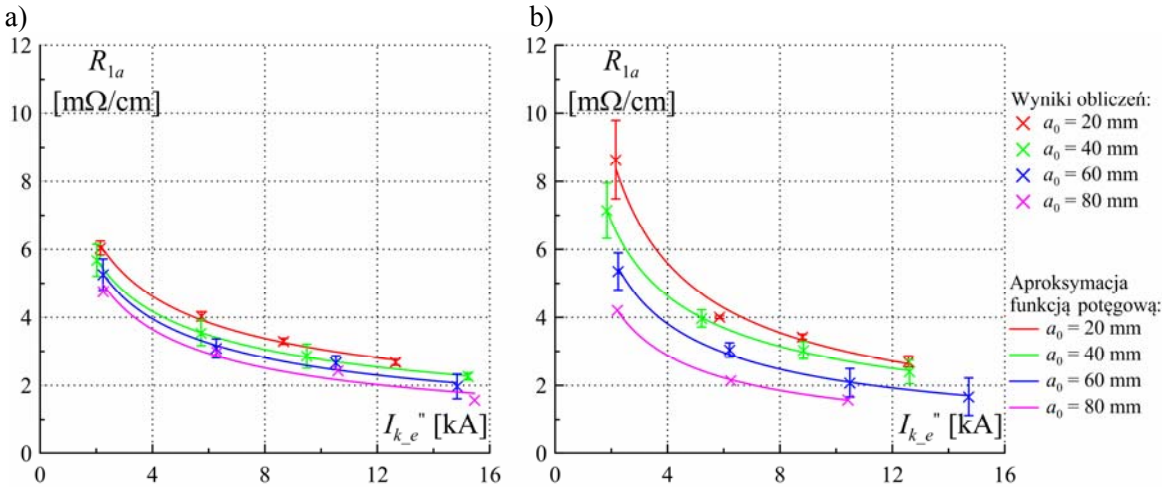
W pierwszym etapie uzyskane wyniki obliczeń poszczególnych parametrów, tj.: R_{0a}, R_{1a}, α_i, zostały uzależnione od spodziewanej wartości prądu zwarciowego I_k''. Dla każdego z parametrów zaproponowano aproksymację funkcją potęgową lub wielomianową pierwszego stopnia. Zakres badań laboratoryjnych obejmował badania prędkości łuku dla układów szynowych o różnych odstępach pomiędzy wewnętrznymi krawędziami szyn a_0, tj.: 20, 40, 60 mm i odpowiadającym im odstępach a, wynoszących odpowiednio: 60, 80, 100 mm. Dodatkowo przedstawiono uśrednione wyniki obliczeń parametrów dla łuku palącego się w układzie, w którym odstęp a_0 wynosi 80 mm.

Przedstawione wyniki prób dla odstępu $a_0 = 80$ mm mają charakter poglądowy ze względu na zbyt duże rozbieżności uzyskanych wyników. Graficzna interpretacja wyników obliczeń i aproksymacji wartości początkowej składowej rezystancji łuku R_{0a} w zależności od spodziewanej wartości prądu zwarciowego I_{k_e}'' dla różnych odstępów a_0 zamieszczono na rys. 6.6.



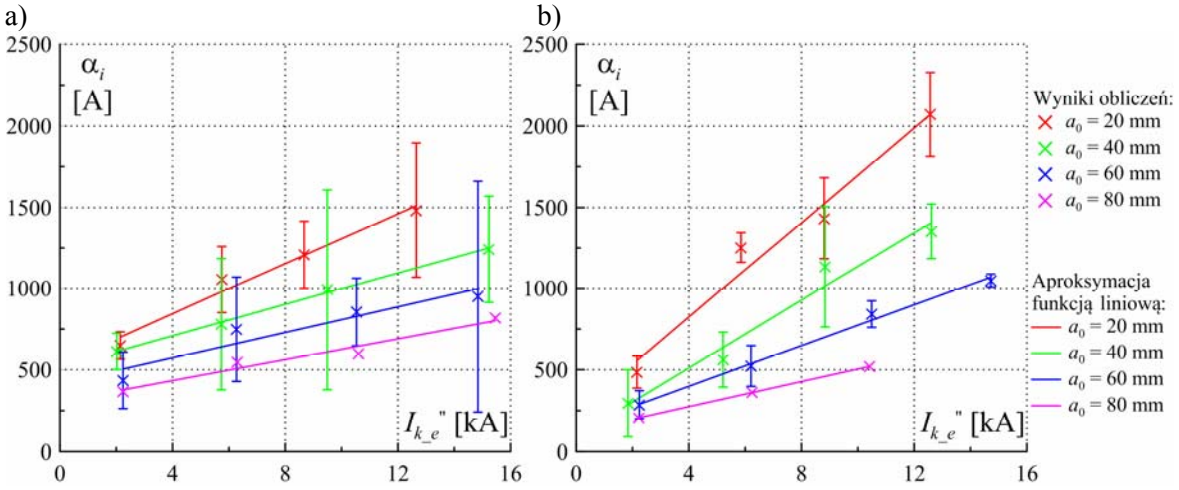
Rys. 6.6. Zależność wartości początkowej składowej rezystancji łuku R_{0a} odniesionej do jednostki długości łuku l_a od spodziewanego prądu zwarciowego I_{k_e}'' dla szyn: a) miedzianych, b) aluminiowych

Na rys. 6.7 przedstawiono wyniki obliczeń i aproksymacji funkcją potęgową wartości ustalonej składowej R_{1a} w zależności od spodziewanej wartości prądu zwarciowego I_{k_e}''.



Rys. 6.7. Zależność wartości ustalonej składowej rezystancji łuku R_{1a} odniesionej do jednostki długości łuku l_a od spodziewanego prądu zwarciowego I_{k_e}'' dla szyn: a) miedzianych, b) aluminiowych

Rys. 6.8 ilustruje wyniki obliczeń i aproksymacji funkcją liniową stałej α_i określającej szybkość stabilizowania się składowej rezystancji łuku R_{sa} w zależności od spodziewanego prądu zwarciowego I_{k_e}''.



Rys. 6.8. Zależność stałej α_i określającej szybkość ustalania się składowej rezystancji łuku R_{sa} odniesionej do jednostki długości łuku l_a od spodziewanego prądu zwarciowego I_{k_e}'' dla szyn: a) miedzianych, b) aluminiowych

Drugi etap wyznaczenia zależności empirycznych polegał na obliczeniu każdego z dwóch współczynników, tj. w przypadku funkcji wielomianowej pierwszego stopnia, współczynnika kierunkowego prostej i wyrazu wolnego, a w przypadku funkcji potęgowej – współczynnika wielomianu i wykładnika potęgi opisujących funkcje aproksymujące R_{0a}, R_{1a}, α_i, $= f(I_k'')$. Następnie każdy ze współczynników uzależniono od odstępu pomiędzy wewnętrznymi krawędziami szyn a_0 oraz zaproponowano dla nich zależność aproksymującą funkcją potęgową, wielomianową pierwszego stopnia lub stałą (podobnie jak w przypadku zmiennych R_{0a}, R_{1a}, α_i). Funkcja stała została przypisana dla tych parametrów, w których występowała duża rozbieżność wyników i brak określonego trendu zmian. Wyraz wolny funkcji stałej został obliczony jako wartość średnia ze wszystkich punktów.

Wzory empiryczne określające zmianę poszczególnych parametrów, tj.: R_{0a}, R_{1a}, α_i w zależności od spodziewanego prądu zwarciowego I_k'' oraz odstępu a_0, otrzymano poprzez zestawienie ze sobą, wyznaczonych z pierwszego i drugiego etapu, funkcji aproksymujących poszczególne współczynniki. Wyniki analizy obejmującej wyznaczenie zależności empirycznych dotyczących parametrów opisujących składową rezystancji łuku $R_{sa} = f(i_a)$ przedstawiono w tab. 6.3.

Tab. 6.3. Wyniki analizy obejmującej wyznaczenie zależności empirycznych opisujących składową rezystancji łuku $R_{sa} = f(i_a)$

Materiał szyn:	miedź		aluminium	
Parametr:	Wartość początkowa składowej rezystancji łuku $\boldsymbol{R_{0a} = f(I_k'', a)}$			
f. aproksymująca $R_{0a} = f(I_k'')$	$R_{0a} = A_0 I_k''^{B_0}$			
a_0	A_0	B_0	A_0	B_0
[mm]	$\left[\frac{\Omega}{\mathrm{A}\cdot\mathrm{cm}}\right]$	[-]	$\left[\frac{\Omega}{\mathrm{A}\cdot\mathrm{cm}}\right]$	[-]
20	0,257	-0,227	10,24	-0,616
40	0,536	-0,272	8,925	-0,5442
60	0,689	-0,271	8,340	-0,499
80	0,678	-0,236	7,007	-0,463
f. aproksymująca $A_0 = f(a_0)$, $B_0 = f(a_0)$	$7,08a + 0,186$	$-0,2515$	$-51,42a + 11,2$	$2,521a - 0,657$
$R_{0a_\mathrm{Cu}} = \left(7,08a_0 + 0,186\right) I_k''^{-0,252}$ (6.2)				
$R_{0a_\mathrm{Al}} = \left(-51,42a_0 + 11,2\right) I_k''^{\left(2,521a_0 - 0,657\right)}$ (6.3)				
Parametr:	Wartość ustalona składowej rezystancji łuku $\boldsymbol{R_{1a} = f(I_k'', a_0)}$			
f. aproksymująca $R_{1a} = f(I_k'')$	$R_{1a} = A_1 I_k''^{B_1}$			
a_0	A_1	B_1	A_1	B_1
[mm]	$\left[\frac{\Omega}{\mathrm{A}\cdot\mathrm{cm}}\right]$	[-]	$\left[\frac{\Omega}{\mathrm{A}\cdot\mathrm{cm}}\right]$	[-]
20	0,195	-0,451	1,262	-0,653
40	0,176	-0,451	0,454	-0,552
60	0,233	-0,492	0,627	-0,615
80	0,305	-0,534	0,561	-0,636
f. aproksymująca $A_1 = f(a_0)$, $B_1 = f(a_0)$	$1,935a_0 + 0,1305$	$-1,45a_0 - 0,4095$	$0,123a_0^{-0,543}$	$-0,614$
$R_{1a_\mathrm{Cu}} = (1,935a_0 + 0,131) I_k''^{(-1,45a_0 - 0,41)}$ (6.4)				
$R_{1a_\mathrm{Al}} = 0,123a_0^{-0,543} I_k''^{-0,614}$ (6.5)				
Parametr:	Stała $\boldsymbol{\alpha_i = f(I_k'', a_0)}$ określająca szybkość ustalania się składowej rezystancji łuku R_{sa}			
f. aproksymująca $\alpha_i = f(I_k'')$	$\alpha_i = A_i I_k'' + B_i$			
a_0	A_i	B_i	A_i	B_i
[mm]	[-]	[A]	[-]	[A]
20	$77,336\cdot10^{-3}$	535,1	$143,62\cdot10^{-3}$	249,8
40	$48,236\cdot10^{-3}$	514,6	$101,70\cdot10^{-3}$	99,77
60	$38,940\cdot10^{-3}$	417,5	$61,174\cdot10^{-3}$	152,7
80	$31,798\cdot10^{-3}$	307,0	$38,298\cdot10^{-3}$	121,2
f. aproksymująca $A_i = f(a_0)$, $B_i = f(a_0)$	$6,435\cdot10^{-3}a_0^{-0,633}$	$-3907a_0 + 639$	$4,230\cdot10^{-3}a_0^{-0,929}$	$-1664a + 240$
$\alpha_{i_\mathrm{Cu}} = \left(6,435\cdot10^{-3}a_0^{-0,633}\right) I_k'' - 3907a_0 + 639$ (6.6)				
$\alpha_{i_\mathrm{Al}} = \left(4,230\cdot10^{-3}a_0^{-0,929}\right) I_k'' - 1664a_0 + 240$ (6.7)				

6.4.2. Składowa stała napięcia odniesiona do jednostki długości łuku

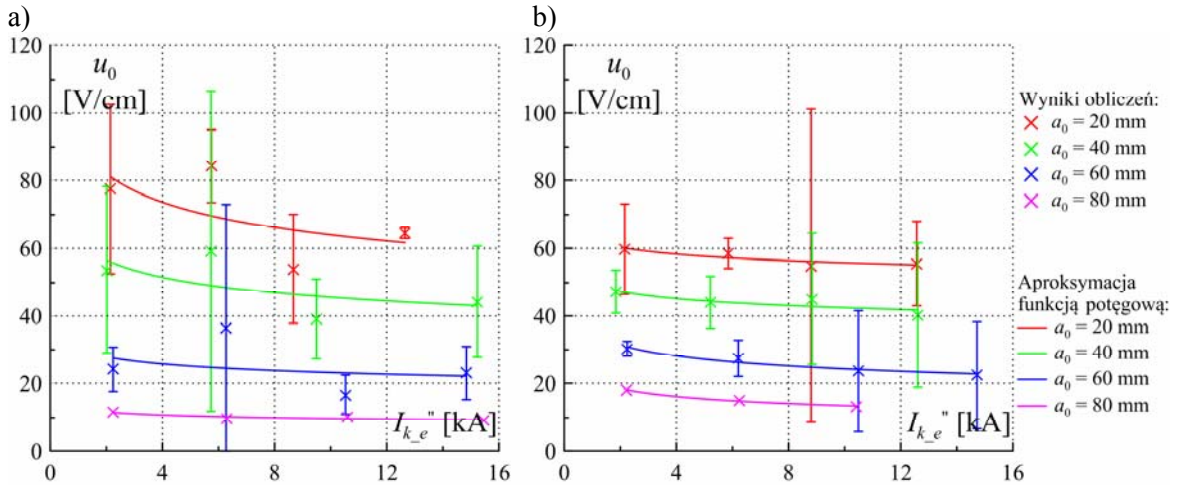
Kolejnym z parametrów opisujących zaciskowy model łuku zakłóceniowego Kizilcay'a, (zależność (4.18)) jest składowa stała napięcia u_{0a} odniesiona do jednostki długości l_a.

Podobnie, jak w przypadku składowej rezystancji łuku R_{sa}, również składowa stała napięcia u_{0a} odniesiona do jednostki długości łuku l_a została uzależniona od wartości chwilowej prądu łukowego i_a zgodnie ze wzorem (4.20). Składową stałą napięcia u_{0a} charakteryzują następujące parametry: wartość początkowa składowej stałej napięcia u_0 odniesiona do jednostki długości łuku l_a, wartość ustalona składowej stałej napięcia u_1 odniesiona do jednostki długości łuku l_a i stałe β_i, γ_i opisujące szybkość stabilizowania się składowej stałej napięcia u_{0a}.

Wyniki obliczeń wartości początkowej u_0 oraz ustalonej u_1 składowej stałej napięcia zostały zamieszczone odpowiednio: dla szyn miedzianych – w tab. 14.3, dla szyn aluminiowych – w tab. 14.4 w Załączniku D. Dla każdego z parametrów obliczono odchylenie standartowe σ mierzonych wielkości oraz współczynnik ufności Δ wyrażony w jednostkach wielkości mierzonej. Wyniki obliczeń stałych β_i i γ_i opisujących szybkość stabilizowania się składowej stałej napięcia u_0 przedstawiono w tab. 14.5 dla szyn miedzianych i w tab. 14.6 dla szyn aluminiowych w Załączniku D.

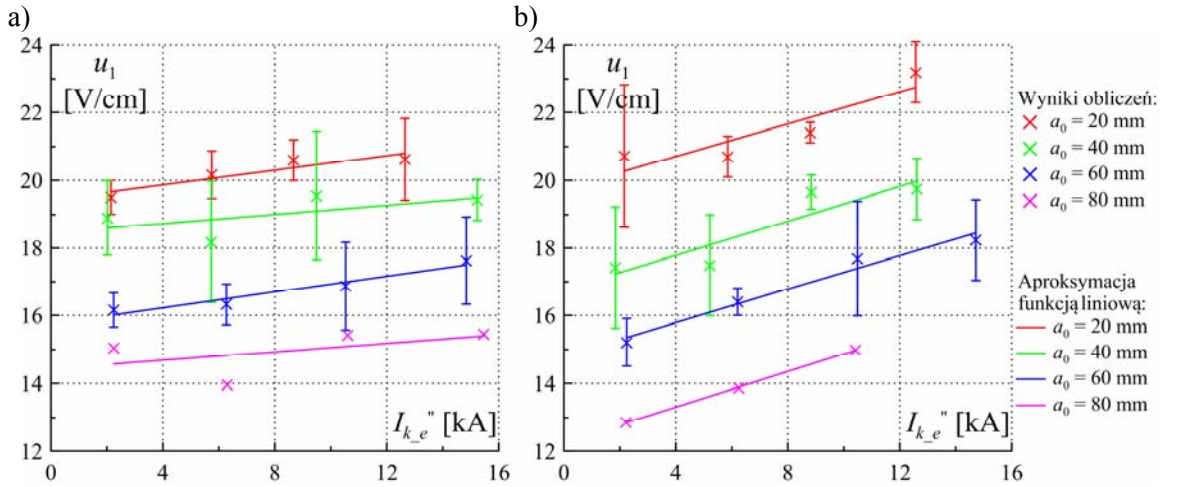
Sposób uzależnienia współczynników opisujących zależność (4.20) od spodziewanego prądu zwarciowego I_k'' i odstępu a_0 oraz sama procedura wyznaczenia wzorów empirycznych jest taka sama, jak w przypadku składowej rezystancji łuku R_{sa} odniesionej do jednostki długości łuku l_a i została ona szerzej opisana w rozdziale 6.4.1.

Na rys. 6.9 przedstawiono wyniki obliczeń i aproksymacji funkcją potęgową wartości początkowej u_0 składowej stałej napięcia u_{0a} w zależności od spodziewanej wartości prądu zwarciowego I_{k_e}''.



Rys. 6.9. Wartość początkowa u_0 składowej stałej napięcia u_{0a} odniesionej do jednostki długości łuku l_a w zależności od spodziewanego prądu zwarciowego I_{k_e}" dla szyn:
a) miedzianych, b) aluminiowych

Rys. 6.10 przedstawia wyniki obliczeń i aproksymacji funkcją liniową wartości ustalonej u_1 składowej stałej napięcia u_{0a} w zależności od spodziewanej wartości prądu zwarciowego I_{k_e}".



Rys. 6.10. Wartość ustalona składowej stałej napięcia u_1 odniesionej do jednostki długości łuku l_a w zależności od spodziewanego prądu zwarciowego I_{k_e}" dla szyn:
a) miedzianych, b) aluminiowych

Wyniki analizy obejmującej wyznaczenie zależności empirycznych dotyczących wartości początkowej u_0 i ustalonej u_1 składowej stałej napięcia u_{0a} przedstawiono w tab. 6.4.

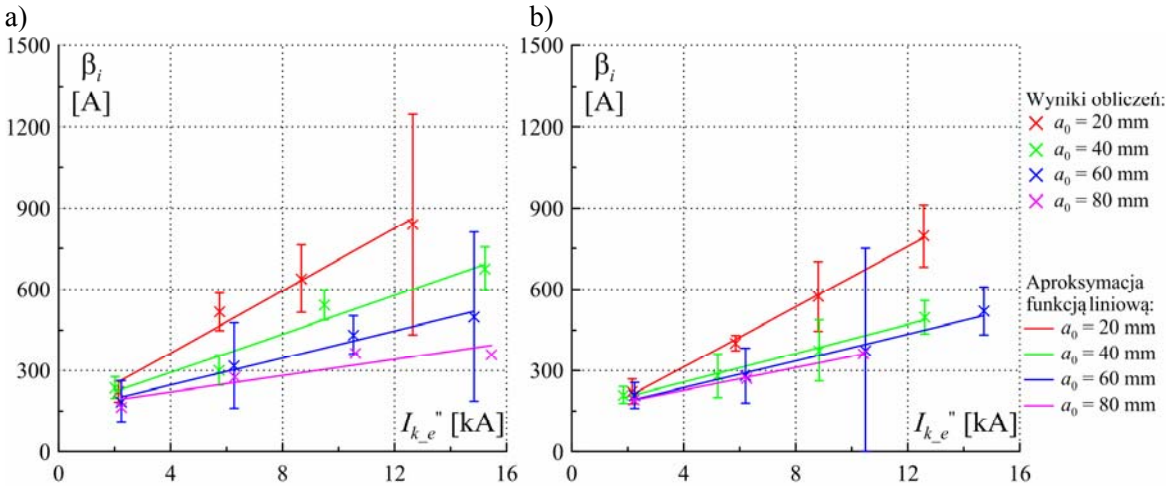
Tab. 6.4. Wyniki analizy obejmującej wyznaczenie zależności empirycznych dotyczących wartości początkowej u_0 i ustalonej u_1 składowej stałej napięcia u_{0a}

Materiał szyn:	miedź		aluminium	
Parametr:	Wartość początkowa składowej stałej napięcia $\boldsymbol{u_0 = f(I_k'', a_0)}$			
f. aproksymująca $u_0 = f(I_k'')$	$u_0 = C_0 I_k''^{D_0}$			
a_0	C_0	D_0	C_0	D_0
[mm]	$\left[\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}\cdot\mathrm{cm}}\right]$	[-]	$\left[\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}\cdot\mathrm{cm}}\right]$	[-]
20	265,8	-0,1548	86,76	-0,0479
40	156,3	-0,1337	78,38	-0,0664
60	65,62	-0,1131	106,2	-0,1602
80	27,21	-0,1115	81,91	-0,1951
f. aproksymująca $C_0 = f(a_0)$, $D_0 = f(a_0)$	$-4032a_0 + 330$	$0,753a_0 - 0,166$	88,31	$-2,677a + 0,016$
$u_{0_Cu} = (-4032a_0 + 330) I_k''^{(0,753a_0 - 0,166)}$ (6.8)				
$u_{0_Al} = 88,31 I_k''^{(-2,677a_0 + 0,016)}$ (6.9)				
Parametr:	Wartość ustalona składowej stałej napięcia $\boldsymbol{u_1 = f(I_k'', a_0)}$			
f. aproksymująca $u_1 = f(I_k'')$	$u_1 = C_1 I_k'' + D_1$			
a_0	C_1	D_1	C_1	D_1
[mm]	$\left[\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}\cdot\mathrm{cm}}\right]$	$\left[\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{cm}}\right]$	$\left[\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}\cdot\mathrm{cm}}\right]$	$\left[\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{cm}}\right]$
20	$108,25\cdot10^{-6}$	19,43	$238,07\cdot10^{-6}$	19,76
40	$67,404\cdot10^{-6}$	18,47	$254,79\cdot10^{-6}$	16,76
60	$117,99\cdot10^{-6}$	15,75	$248,12\cdot10^{-6}$	14,80
80	$62,740\cdot10^{-6}$	14,43	$260,00\cdot10^{-6}$	12,27
f. aproksymująca $C_1 = f(a_0)$, $D_1 = f(a_0)$	$89,096\cdot10^{-6}$	$-88,6a_0 + 21$	$250,025\cdot10^{-6}$	$-122,2a_0 + 22$
$u_{1_Cu} = 89,096\cdot10^{-6} I_k'' - 88,6a_0 + 21$ (6.10)				
$u_{1_Al} = 250,25\cdot10^{-6} I_k'' - 122a_0 + 22$ (6.11)				

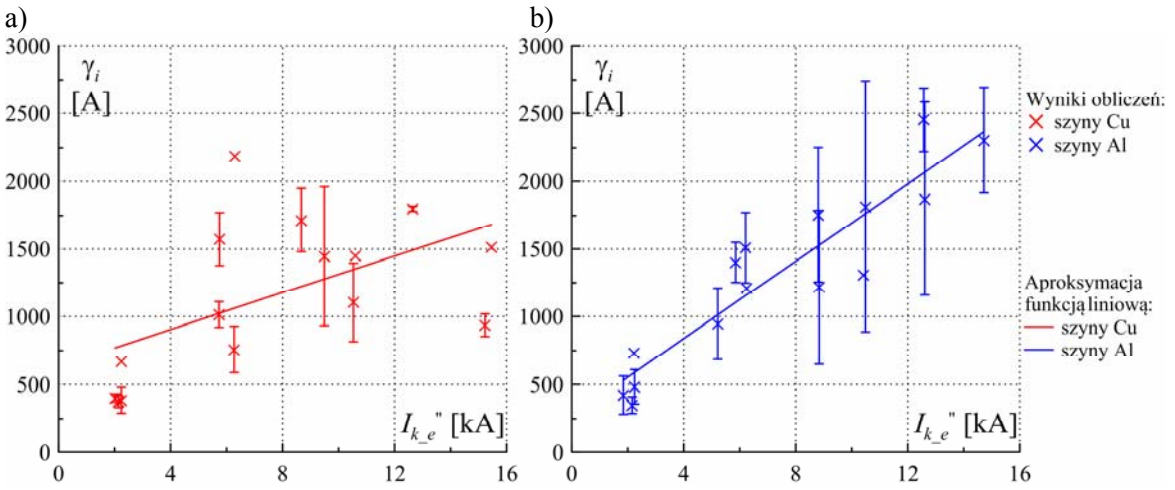
Zależność przedstawiającą zależność współczynnika β_i stabilizowania się składowej stałej napięcia u_{0a} od spodziewanej wartości prądu zwarciowego I_{k_e}'' dla różnych odstępów szyn oraz jego aproksymację funkcją liniową zamieszczono na rys. 6.11.

W przypadku stałej γ_i wyniki obliczeń nie wykazały zgodnego trendu zmian w zależności od spodziewanego prądu zwarciowego I_{k_e}'' dla różnych odstępów a_0. W związku z tym w wyprowadzonym wzorze empirycznym nie uwzględniono wpływu odstępu a_0 na wartość współczynnika γ_i, tylko stałą γ_i uzależniono od spodziewanego prądu zwarciowego I_k''. Wyniki obliczeń współczynnika γ_i w zależności od spodziewanego prądu

zwarciowego $I_{k_e}^{"}$ dla różnych materiałów, z których wykonane są szyny zaprezentowano na rys. 6.12.



Rys. 6.11. Zależność stałej β_i określającej szybkość stabilizowania się składowej stałej napięcia u_{0a} odniesionej do jednostki długości łuku l_a od spodziewanego prądu zwarciowego $I_{k_e}^{"}$ dla szyn: a) miedzianych, b) aluminiowych



Rys. 6.12. Zależność stałej γ_i określającej szybkość stabilizowania się składowej stałej napięcia u_{0a} odniesionej do jednostki długości łuku l_a od spodziewanego prądu zwarciowego $I_{k_e}^{"}$ dla szyn: a) miedzianych, b) aluminiowych

W tab. 6.5 zamieszczono wyniki analizy dotyczącej wyznaczenia wzorów empirycznych dla stałych $\beta_i = f(I_k^{"}, a)$ i $\gamma_i = f(I_k^{"})$ dla szyn miedzianych i aluminiowych.

Tab. 6.5. Wyniki analizy obejmującej wyznaczenie zależności empirycznych dotyczących stałych β_i i γ_i określających szybkość stabilizowania się składowej stałej napięcia u_{0a} odniesionej do jednostki długości l_a

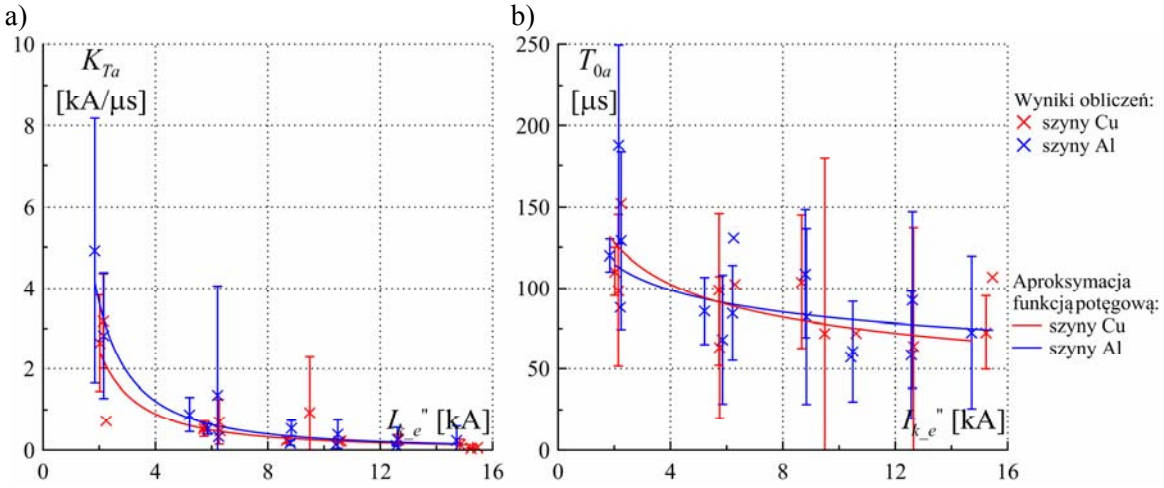
Materiał szyn:	miedź		aluminium	
Parametr:	Stała $\boldsymbol{\beta_i = f(I_k'', a_0)}$ określająca szybkość stabilizowania się składowej stałej napięcia u_{0a}			
f. aproksymująca $\beta_i = f(I_k'')$	$\beta_i = C_i I_k'' + D_i$			
a_0	C_i	D_i	C_i	D_i
[mm]	[-]	[A]	[-]	[A]
20	$57{,}52\cdot10^{-3}$	135,3	$54{,}7010^{-3}$	94,87
40	$35{,}54\cdot10^{-3}$	150,2	$26{,}00\cdot10^{-3}$	152,3
60	$24{,}96\cdot10^{-3}$	146,9	$24{,}33\cdot10^{-3}$	138,8
80	$14{,}93\cdot10^{-3}$	161,9	$20{,}91\cdot10^{-3}$	144,0
f. aproksymująca $C_i = f(a_0)$, $D_i = f(a_0)$	$1{,}651\cdot10^{-3}\,a_0^{-0{,}925}$	148,57	$3{,}473\cdot10^{-3}\,a_0^{-0{,}629}$	132,49
$\beta_{i_\mathrm{Cu}} = 1{,}651\cdot10^{-3}\,a_0^{-0{,}925} I_k'' + 149$ (6.12)				
$\beta_{i_\mathrm{Al}} = 3{,}473\cdot10^{-3}\,a_0^{-0{,}629} I_k'' + 132$ (6.13)				
Parametr:	Stała $\boldsymbol{\gamma_i = f(I_k'')}$ określająca szybkość stabilizowania się składowej stałej napięcia u_{0a}			
$\gamma_{i_\mathrm{Cu}} = 67{,}991\cdot10^{-3} I_k'' + 633$ (6.14)				
$\gamma_{i_\mathrm{Al}} = 142{,}73\cdot10^{-3} I_k'' + 268$ (6.15)				

6.4.3. Stała czasowa łuku

Ostatnim z parametrów, charakteryzującym wykorzystany w obliczeniach zaciskowy model łuku zwarciowego, jest stała czasowa łuku T_a. W modelu obliczeniowym przyjęto, podobnie jak w przypadku pozostałych parametrów, uzależnienie stałej czasowej od wartości chwilowej prądu zwarcia łukowego i_a za pomocą funkcji potęgowej opisanej wzorem (4.21). Zależność tę, oprócz wartości chwilowej prądu zwarcia łukowego i_a, charakteryzują następujące parametry: współczynnik wielomianu K_{Ta}, wyraz wolny T_{0a} oraz wykładnik potęgi. Badania eksperymentalne wykazały, że zadowalające odzwierciedlenie wyników obliczeń stałej czasowej T_a w funkcji prądu łukowego i_a uzyskano przyjmując do obliczeń stałą wartość wykładnika potęgi równą 2,5. Wyniki obliczeń parametrów opisujących zależność (4.21) zamieszczone odpowiednio: dla szyn miedzianych – w tab. 14.7, dla szyn aluminiowych – w tab. 14.8 w Załączniku D.

Sposób wyznaczenia zależności empirycznych współczynnika wielomianu i wyrazu wolnego zależności $T_a = f(i_a)$ jest identyczny, jak w przypadku pozostałych wielkości charakteryzujących użyty model łuku. Ze względu na duże rozbieżności uzyskiwanych

wyników oraz brak określonego i zgodnego trendu zmian dla różnych odstępów a_0 zaproponowano uzależnione współczynników K_{Ta} i T_{0a} tylko od wartości spodziewanego prądu zwarciowego I_k''. Interpretację graficzną uzyskanych wyników współczynnika wielomianu K_{Ta} i wyrazu wolnego T_{0a} od spodziewanego prądu zwarciowego I_{k_e}'' zamieszczono na rys. 6.13.



Rys. 6.13. Zależność: a) współczynnika wielomianu K_{Ta}, b) wyrazu wolnego T_{0a} stałej czasowej łuku $T_a = f(i_a)$ od spodziewanego prądu zwarciowego I_{k_e}''

W tab. 6.6 przedstawiono zaproponowane wzory empiryczne dla poszczególnych współczynników opisujących zależność $T_a = f(i_a)$ uwzględniające rodzaj materiału, z którego wykonany jest układ szynowy.

Tab. 6.6. Wzory empiryczne opisujące współczynniki K_{Ta} i T_{0a} w funkcji spodziewanej wartości prądu zwarciowego I_k''

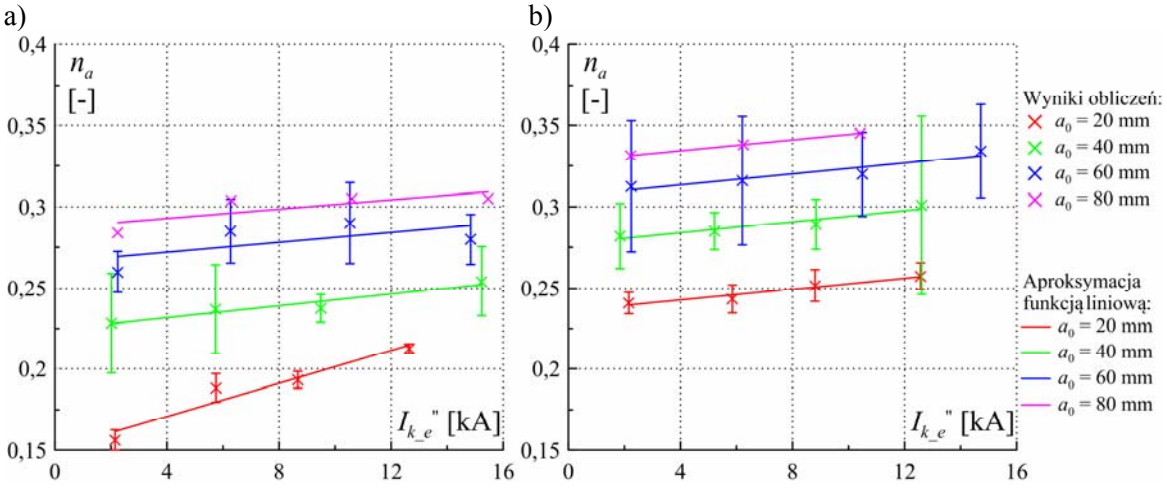
Materiał szyn:	aluminium	miedź
Parametr:	Współczynnik wielomianu $\boldsymbol{K_{Ta} = f(I_k'')}$	
	$K_{Ta_Cu} = 703,9 \cdot 10^{-9} I_k''^{(-1,609)}$ (6.16)	
	$K_{Ta_Al} = 18,67 \cdot 10^{-6} I_k''^{(-1,954)}$ (6.17)	
Parametr:	Wyraz wolny $\boldsymbol{T_{0a} = f(I_k'')}$	
	$T_{0a_Cu} = 1,429 \cdot 10^{-3} I_k''^{(-0,318)}$ (6.18)	
	$T_{0a_Al} = 1,097 \cdot 10^{-3} I_k''^{(-0,295)}$ (6.19)	

6.4.4. Współczynnik poprawkowy uwzględniający wpływ prądu na zmianę promienia łuku

Współczynnik poprawkowy n_a, wykorzystywany w modelu dynamiki łuku niskonapięciowego w zależności (4.4), wprowadzono w celu otrzymania zgodności uzyskanych wyników obliczeń prędkości przemieszczania się łuku z wynikami badań eksperymentalnych. Decyzja o umiejscowieniu wprowadzonego współczynnika korekcyjnego n_a w modelu obliczeniowym została podyktowana przede wszystkim uproszczeniami zastosowanymi w poszczególnych częściach składowych modelu obliczeniowego.

Podobnie jak w przypadku parametrów opisujących użyty model łuku zwarciowego, wartość współczynnika n_a została uzależniona od spodziewanego prądu zwarciowego I_k'', odstępu a_0 i rodzaju materiału, z którego wykonano układ szynowy. Procedura wyznaczenia współczynnika poprawkowego n_a szerzej została opisana w Załączniku B. W tab. 14.9 w Załączniku D zawarto uśrednione wyniki obliczeń współczynnika poprawkowego n_a, uzyskane na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

Graficzną interpretację zmian współczynnika poprawkowego n_a w funkcji spodziewanego prądu zwarciowego I_{k_e}'' dla badanych układów szynowych zamieszczono na rys. 6.14.



Rys. 6.14. Zależność współczynnika poprawkowego n_a od spodziewanej wartości prądu zwarciowego I_{k_e}'' dla łuku palącego się na szynach: a) miedzianych, b) aluminiowych

Wyniki analizy obejmującej wyznaczenie zależności empirycznych dotyczących współczynnika poprawkowego n_a zamieszczono w tab. 6.7.

Tab. 6.7. Wyniki analizy obejmującej wyznaczenie zależności empirycznych dotyczących współczynnika poprawkowego n_a

Materiał szyn:	miedź		aluminium	
Parametr:	Współczynnik poprawkowy $\boldsymbol{n_a = f(I_k'', a_0)}$ uwzględniającym wpływ prądu na zmianę promienia łuku			
f. aproksymująca $n_a = f(I_k'')$	$n_a = C_a I_k'' + D_a$			
a_0	C_a	D_a	C_a	D_a
[mm]	[A^{-1}]	[-]	$\left[\frac{V}{A \cdot cm}\right]$	[-]
20	$5{,}080 \cdot 10^{-6}$	0,151	$1{,}672 \cdot 10^{-6}$	0,236
40	$1{,}843 \cdot 10^{-6}$	0,224	$1{,}668 \cdot 10^{-6}$	0,277
60	$1{,}507 \cdot 10^{-6}$	0,226	$1{,}643 \cdot 10^{-6}$	0,307
80	$1{,}398 \cdot 10^{-6}$	0,287	$1{,}682 \cdot 10^{-6}$	0,328
f. aproksymująca $C_a = f(a_0)$, $D_a = f(a_0)$	$2{,}457 \cdot 10^{-6}$	$0{,}819 a_0^{0{,}427}$	$1{,}673 \cdot 10^{-6}$	$0{,}599 a_0^{0{,}239}$
$n_{a_Cu} = 2{,}457 \cdot 10^{-6} I_k'' + 0{,}819 a_0^{0{,}427}$ (6.20)				
$n_{a_Al} = 2{,}457 \cdot 10^{-6} I_k'' + 0{,}559 a_0^{0{,}239}$ (6.21)				

7. Wyniki obliczeń prędkości dwufazowego łuku awaryjnego

Badania eksperymentalne niskonapięciowego dwufazowego zwarcia łukowego, w którym łuk awaryjny przemieszcza się wzdłuż szyn, miały na celu pozyskanie danych niezbędnych do opracowania empirycznego modelu dynamiki niskonapięciowego łuku zwarciowego. Uzyskanie informacji, takich jak prąd łuku i_a i napięcie łuku u_a, posłużyło do wyznaczenia parametrów charakteryzujących użyty w modelu obliczeniowym zaciskowy model łuku zwarciowego. Ponadto pomiar prędkości chwilowej v_a przemieszczającego się łuku, przy określonych wartościach prądów zwarciowych, stanowi cenną informację dotyczącą zachowania się łuku w trakcie zwarcia łukowego. Wyniki prędkości przemieszczającego się wzdłuż szyn łuku awaryjnego umożliwiły obliczenie parametru n_a opisującego dynamikę łuku. Dzięki tym danym wyznaczono zależności empiryczne, niezbędne w opracowaniu modeli obliczeniowych.

Sam proces wykorzystania wyników badań eksperymentalnych w modelu obliczeniowym podzielony został na kilka etapów. W pierwszym etapie zrealizowano wyznaczenie parametrów, takich jak stała czasowa łuku T_a, składowa stała napięcia u_{0a} odniesiona do jednostki długości łuku l_a, czy składowa rezystancji łuku R_{sa} odniesiona do jednostki długości łuku l_a, charakteryzujących użyty model łuku, oraz ich uzależnienie od wartości chwilowej prądu i_a.

W kolejnym kroku pozyskano dane dotyczące warunków przeprowadzanych eksperymentów, np. parametrów napięcia zasilającego czy samego obwodu zwarciowego, i odwzorowano je w modelu obliczeniowym. W dalszej części, na podstawie prób łukowych i dostępnych już na tym etapie informacji dotyczących samego układu jak i modelu łuku, wyznaczono zmienną n_a niezbędną do obliczenia prędkości łuku, jak również zweryfikowano przydatność użytego modelu łuku. W końcowym etapie opracowano zależności empiryczne wielkości opisujących użyty model obliczeniowy. Wybrane wyniki badań eksperymentalnych oraz obliczeń z założonego zakresu badań dwufazowych zwarć łukowych zamieszczono w Załączniku E.

Każdy etap tworzenia modelu obliczeniowego wiąże się z upraszczaniem niektórych wielkości fizycznych. Wprowadzone aproksymacje funkcjami matematycznymi wielkości fizycznych wprowadzają dodatkowe błędy obliczeniowe, które powinny być zweryfikowane przed dalszym wykorzystaniem modelu obliczeniowego, a więc w przypadku analizy trójfazowych zwarć łukowych.

Weryfikacja przydatności użytego modelu dynamiki niskonapięciowego łuku awaryjnego przemieszczającego się wzdłuż szyn polega na analizie porównawczej uzyskanych wyników obliczeń z wynikami badań eksperymentalnych. Głównym kryterium, jakie zostało postawione w przypadku wykorzystania modelu dynamiki niskonapięciowego łuku zwarciowego w zwarciach łukowych trójfazowych, jest odzwierciedlenie w obliczeniach, z wystarczającą dokładnością, prądu zwarcia łukowego, ponieważ to on istotnie wpływa na wartości elementarnych sił elektrodynamicznych występujących w układzie szynowym. W dalszym etapie zwrócono uwagę na prędkość łuku przemieszczającego się wzdłuż szyn, gdyż to ona jest istotna z punktu widzenia położenia kolumn łukowych, a co za tym idzie i rozpływu prądów w szynach. Następnie analizie poddano wyniki napięć łukowych.

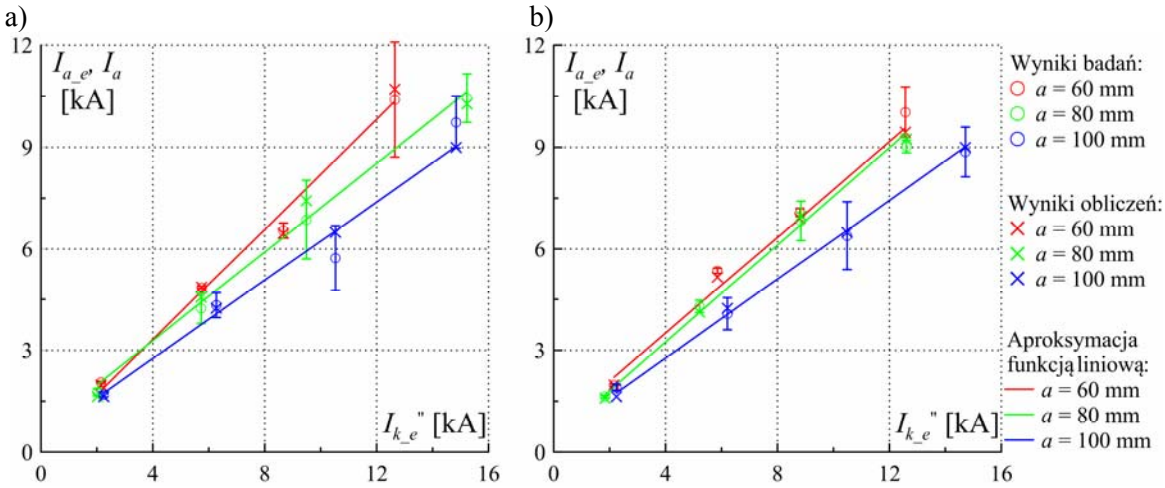
Przeprowadzając analizę porównawczą pomiędzy uzyskanymi wynikami badań eksperymentalnych i obliczeń, należy zwrócić uwagę na specyficzny i złożony charakter badanego zjawiska. Na wynik badań eksperymentalnych wpływ ma szereg czynników powiązanych, ogólnie ujmując, z samą budową układu szynowego, ośrodkiem, w którym łuk się pali i przemieszcza, parametrami obwodu zwarciowego, czy z samą metodą pomiarową. Wpływ wielu czynników ma charakter przypadkowy i jest bardzo trudny do przewidzenia. Również wzajemne powiązania pomiędzy poszczególnymi czynnikami, np. stanem powierzchni szyn układu szynowego a stabilnością palenia się łuku i uzyskiwaną prędkością przemieszczania się, mogą istotnie wpływać na wynik badań. Sprawia to, że próby zwarć łukowych są w pewnym rodzaju niepowtarzalne, charakteryzujące się dużą rozbieżnością uzyskiwanych wyników. Uwzględnienie, choć w części, tych czynników wiązałoby się z koniecznością wykonania bardzo dużej ilości badań, budową nowych stanowisk badawczych oraz koniecznością użycia różnorodnej aparatury pomiarowej, co związane jest z długim czasem badań i odpowiednimi nakładami finansowymi. Uzyskane błędy pomiędzy wynikami badań eksperymentalnych i obliczeń zależą również od zastosowanych uproszczeń w modelu obliczeniowym, budowy stanowiska probierczego i metody pomiarowej prędkości łuku.

Podstawowym parametrem wykorzystanym w analizie porównawczej pomiędzy wynikami eksperymentalnymi i wynikami obliczeń prądów dwufazowego zwarcia łukowego jest błąd całkowity prądowy δi_a, wykorzystywany w określaniu dokładności transformacji przekładników prądowych zabezpieczeniowych [8]. Wartość błędu całkowitego δi_a wyznaczana jest za pomocą zależności opisanej w Załączniku B wzorem (12.18). Zastosowanie do analizy np. błędu bezwzględnego lub względnego wielkości

mierzonej wyznaczanej na podstawie wartości skutecznej prądu nie ujawniłoby różnic pomiędzy wynikami obliczeń i pomiarów wywołanych przez rezystancję łuku. Zmieniająca się nieliniowo rezystancja łuku powoduje odkształcenie przebiegu prądu zwarciowego oraz może wprowadzić przesunięcie fazowe pomiędzy analizowanymi wielkościami, przy zachowaniu tych samych wartości skutecznych. Zastosowanie błędu całkowitego pozwala wykryć te różnice, gdyż na jego wartość wpływa nie tylko sama wartość skuteczna, ale i chwilowa prądu zwarciowego.

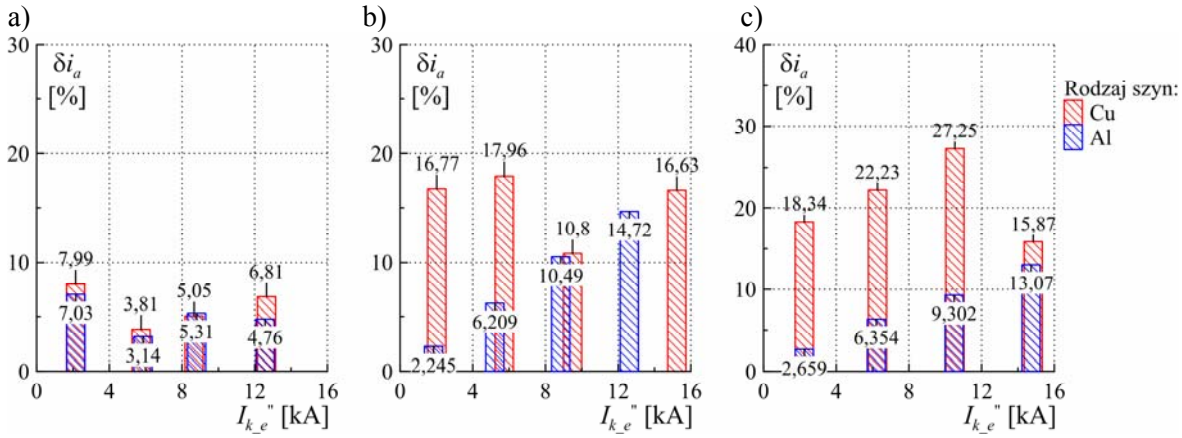
Analizie porównawczej poddano nie tylko prądy łukowe, ale również i prądy zwarć metalicznych. W przypadku zwarć metalicznych uzyskane różnice pomiędzy wynikami pomiarów i obliczeń mieszczą się w granicach kilku procent błędu całkowitego. Przykładowa największa uzyskana wartość błędu całkowitego otrzymanego z analizy jest na poziomie 3%, porównywalnym z dokładnością układów pomiarowych w laboratoriach naukowo-dydaktycznych. Tak więc do dalszej analizy uzyskanych wyników, jako wartość odniesienia, można przyjąć dowolną, tj. zmierzoną lub obliczoną wartość spodziewanego prądu zwarciowego I_k''. Stąd, jako wielkość odniesienia, przyjęto wyniki eksperymentalne.

Kolejną analizowaną wielkością był prąd łukowy i_a. Graficzną interpretację uzyskanych wyników badań eksperymentalnych i obliczeń prądów łukowych dwufazowego zwarcia łukowego w funkcji spodziewanej wartości prądu zwarciowego zamieszczono na rys. 7.1.



Rys. 7.1. Wyniki pomiarów i obliczeń prądu dwufazowego zwarcia łukowego (I_{a_e}, I_a) w zależności od wartości prądu zwarciowego I_{k_e}'' dla łuku palącego się na szynach o wymiarach 40x5 mm: a) miedzianych, b) aluminiowych

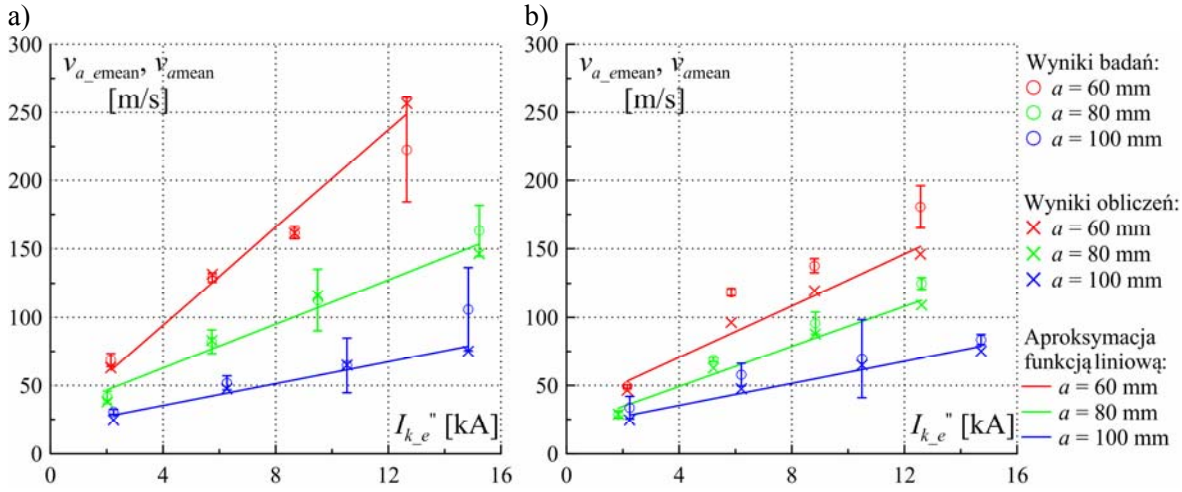
Zestawienie uzyskanych błędów całkowitych obliczeń, pomiędzy wynikami eksperymentalnymi dwufazowych prądów zwarcia łukowego, a wynikami obliczeń dla łuku zwarciowego palącego się na szynach o profilu 40x5 mm ilustruje rys. 7.2.



Rys. 7.2. Błąd całkowity δi_a liczony dla prądu dwufazowego zwarcia łukowego płynącego w układzie szyn prostokątnych o wymiarach 40x5 mm, w których odstęp pomiędzy osiami szyn a wynosi: a) 60 mm, b) 80 mm, c) 100 mm

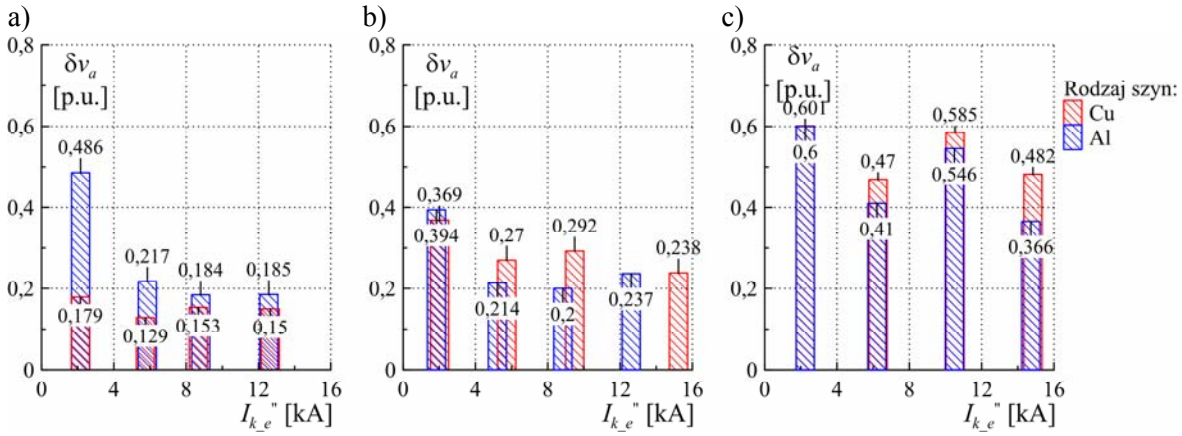
Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że wartości błędów pomiędzy analizowanymi wielkościami zmieniają się w funkcji spodziewanej wartości prądu zwarciowego I_k'' i odstępu a. W miarę wzrostu odstępu a następuje wzrost wartości błędu δi_a, od wartości z poziomu około 10%, dla a = 60 mm, do około 30%, dla odstępu a = 100 mm.

Kolejną wielkością, która była wyznaczana na etapie badań eksperymentalnych jak również obliczeń, jest prędkość przemieszczającego się wzdłuż układu szynowego łuku zwarciowego. Wyniki prędkości średniej uzyskane podczas badań i obliczeń dla badanych układów szynowych przedstawiono na rys. 7.3.



Rys. 7.3. Wyniki pomiarów i obliczeń średniej prędkości łuku dwufazowego zwarcia łukowego (v_{a_emean}, v_{amean}) w funkcji spodziewanej wartości prądu zwarciowego I_{k_e}'' dla łuku palącego się na szynach: a) miedzianych, b) aluminiowych o profilu 40x5 mm

Do analizy porównawczej pomiędzy wynikami pomiarów i obliczeń prędkości przemieszczającego się wzdłuż szyn łuku awaryjnego zastosowano dwa rodzaje błędów pomiarowych wykorzystywanych na różnym etapie obliczeń i odnoszącym się do różnych mierzonych wielkości. Z uwagi na nieciągłość pomiarów prędkości przemieszczania się łuku do analizy prędkości chwilowej v_a wykorzystano średnią wartość błędu względnego prędkości chwilowej opisanego wzorem (12.17) w Załączniku B. Procedura obliczenia tego błędu opierała się na uśrednieniu wyników błędów liczonych dla każdego punktu pomiarowego mierzonego w określonej chwili czasowej i odpowiadającego im wyniku obliczeń. Błąd ten wykorzystywany był na etapie wyznaczenia współczynnika poprawkowego n_a i późniejszej weryfikacji użytego modelu łuku zakłóceniowego. Wyniki uzyskanego na tym etapie błędu δv_a dla łuku przemieszczającego się w badanych układach szyn zamieszczono na rys. 7.4. Przedstawione wyniki błędów zostały wyrażone w jednostkach względnych, w których wielkością bazową była uzyskana wartość średnia prędkości łuku $v_{a_e\text{mean}}$.



Rys. 7.4. Błąd δv_a liczony dla prędkości łuku dwufazowego zwarcia łukowego przemieszczającego się w układzie szyn prostokątnych o wymiarach 40x5 mm, w których odstęp pomiędzy osiami szyn a wynosi: a) 60 mm, b) 80 mm, c) 100 mm

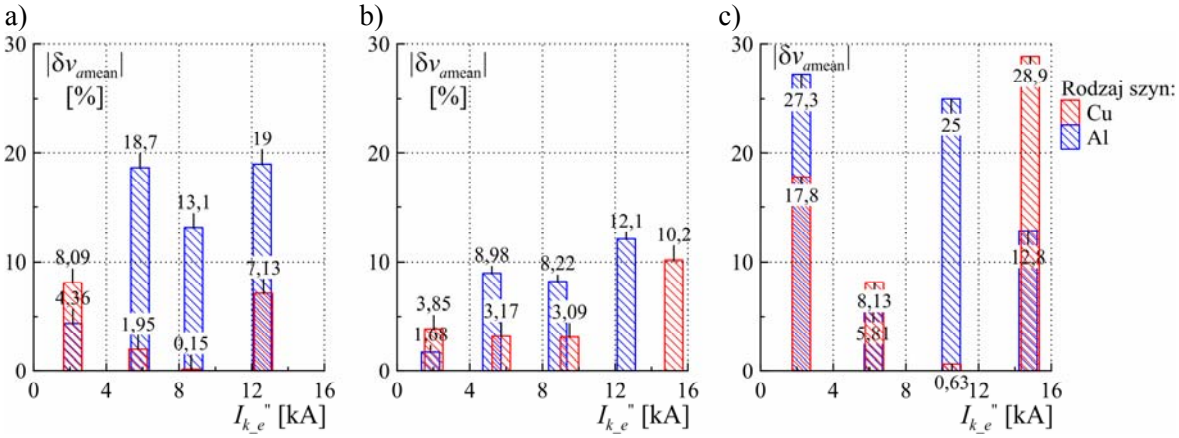
Z przedstawionych wyników widać, podobnie jak w przypadku prądu, wyraźne zwiększenie średniej wartości błędu względnego δv_a wraz ze wzrostem odstępu a badanych układów szynowych. Wzrost odstępu pomiędzy osiami szyn a wpływa na siły elektrodynamiczne działające na łuk, jednocześnie zmniejszając ich wpływ w sumarycznym rachunku sił. Wzrost odstępu a, a tym samym wzrost długość samego łuku, pociąga za sobą wzrost oddziaływań turbulentnych, które przyczyniają się do dodatkowych rozrzutów wyników prędkości chwilowej. Wartości błędów δv_a wzrastają proporcjonalnie w przedziale 0,2 ÷ 0,6 p.u. w miarę wzrostu odstępu a.

Na uwagę zasługują również próby z zakresu najmniejszych z badanych prądów probierczych, w każdym z analizowanych układów i odstępów a. Na wartość uzyskiwanego błędu δv_a wpływa istotnie w tych przypadkach użyta metoda pomiarowa. Uzyskiwane przy niewielkich prądach małe prędkości łuku powodują, że przemieszczający się łuk pokonuje w danym półokresie zmian prądu niewielki odcinek szyn, którego długość jest kilkakrotnie większa od odstępu pomiędzy czujnikami pomiarowymi. Niewielki dystans, jaki pokonuje łuk w analizowanym przedziale czasu, przyczynia się do znaczącego zmniejszenia liczby punktów pomiarowych, przypadających na jeden półokres zmian prądu, co ma wpływ na uzyskiwane wyniki prędkości.

W przypadku prędkości średniej $v_{a\text{mean}}$ przemieszczającego się łuku parametrem odzwierciedlającym różnice pomiędzy wynikami pomiarów i obliczeń prędkości jest błąd względny opisany zależnością:

$$\delta v_{a\text{mean}} = 100\% \frac{v_{a_e\text{mean}} - v_{a\text{mean}}}{v_{a_e\text{mean}}}. \tag{7.1}$$

Graficzny obraz zmian błędu względnego wyznaczonego na podstawie uzyskanych wyników pomiarów i obliczeń prędkości średniej $v_{a\text{mean}}$ dla łuku przemieszczającego się w badanych układach szyn przedstawiono na rys. 7.5.

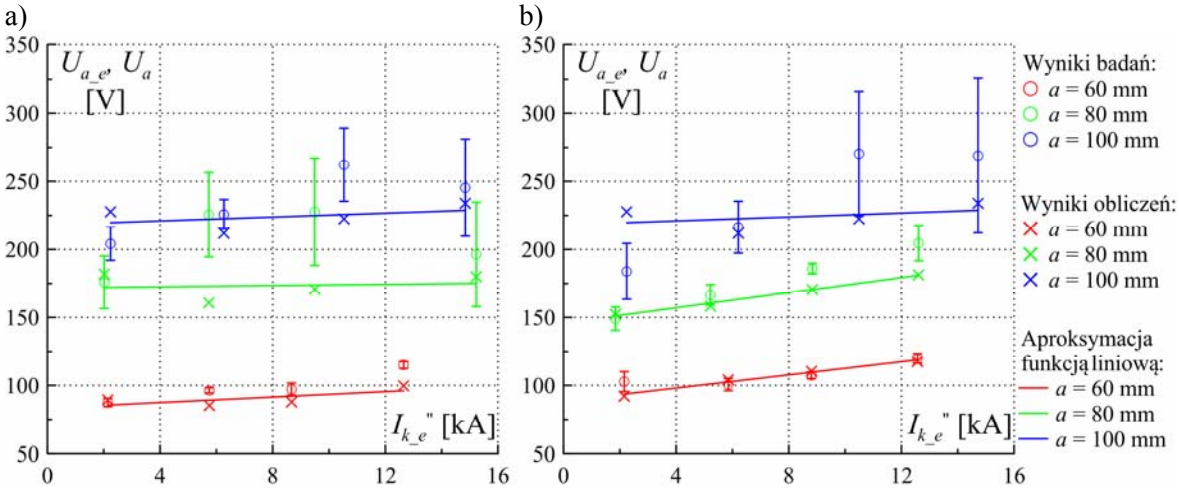


Rys. 7.5. Błąd $\delta v_{a\text{mean}}$ liczony dla prędkości łuku dwufazowego zwarcia łukowego przemieszczającego się w układzie szyn prostokątnych o wymiarach 40x5 mm, w których odstęp pomiędzy osiami szyn a wynosi: a) 60 mm, b) 80 mm, c) 100 mm

Wyniki błędów prędkości średniej $\delta v_{a\text{mean}}$ są ściśle powiązane z wynikami błędów δv_a, uzyskiwanych na drodze porównania prędkości chwilowych v_{a_e} i v_a. Uzyskany błąd pomiarowy $\delta v_{a\text{mean}}$ zmienia się w przedziale kilkunastu procent dla odstępów a z zakresu 60 ÷ 80 mm dla każdego z analizowanych układów szynowych. W przypadku największej

wartości odstępu a wynoszącego 100 mm, następuje wyraźny wzrost błędu $\delta v_{a\text{mean}}$, ale jego wartość nie przekracza 30%, co można uznać za satysfakcjonujący wynik.

Pomiar i wierne odzwierciedlenie napięcia łuku, z w punktu analizowania dynamiki łuku, nie były priorytetem. Jednakże w przypadku analizowania skutków zwarć łukowych napięcie łuku ma istotne znaczenie. Uzyskane wyniki pomiarów i obliczeń napięcia łuku U_a dla różnych odstępów a w układzie zbudowanym z szyn prostokątnych o wymiarach 40x5 mm zamieszczono na rys. 7.6.

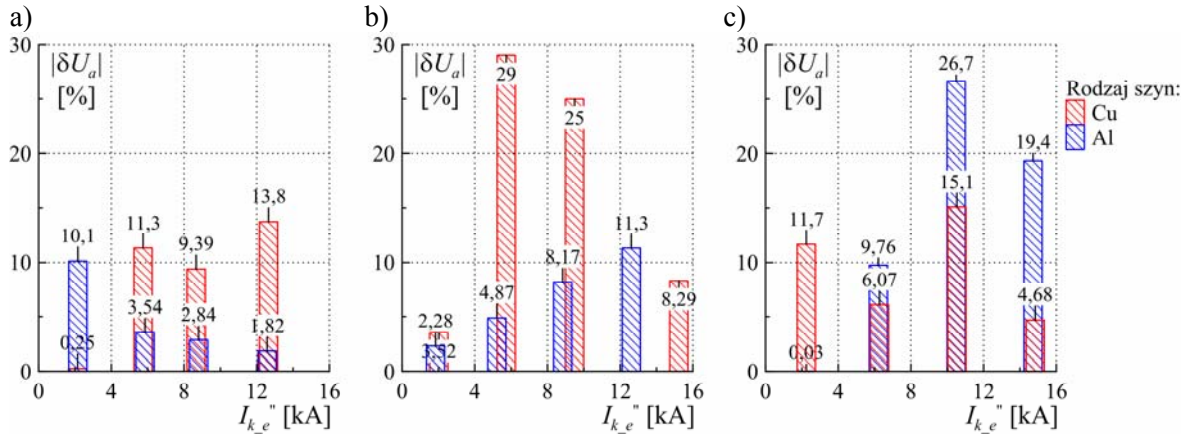


Rys. 7.6. Wyniki pomiarów i obliczeń napięcia łuku dwufazowego zwarcia łukowego (U_{a_e}, U_a) w funkcji spodziewanej wartości prądu zwarciowego I_{k_e}" dla łuku palącego się na szynach: a) miedzianych, b) aluminiowych o profilu 40x5 mm

Uzyskane różnice pomiędzy wynikami badań eksperymentalnych oraz obliczeń wyrażone zostały poprzez błąd względny δU_a określony wzorem:

$$\delta U_a = 100\% \frac{U_{a_e} - U_a}{U_{a_e}}. \tag{7.2}$$

Wyniki błędów napięcia dla badanych układów szynowych przedstawiono na rys. 7.7. W przypadku analizowanego zakresu prądów zwarciowych oraz układów szynowych, w których wykonywano próby zwarciowe, uzyskane błędy dla większości badanych układów utrzymują się na poziomie kilkunastu procent. W niektórych przypadkach widoczny jest wzrost błędu δU_a, jednakże jego wartość, podobnie jak w przypadku prędkości $v_{a\text{mean}}$, nie przekracza 30%.



Rys. 7.7. Błąd δu_a liczony dla napięcia łuku dwufazowego zwarcia łukowego w układzie szyn prostokątnych o wymiarach 40x5 mm, w których odstęp pomiędzy osiami szyn a wynosi: a) 60 mm, b) 80 mm, c) 100 mm

Można uznać, że głównym powodem różnic występujących pomiędzy mierzonymi wielkościami i wynikami obliczeń są wspomniane wcześniej zastosowane uproszczenia, zarówno na samym początkowym etapie tworzenia modelu, jak również w jego końcowej części. Jednakże poziom tych błędów w większości analizowanych przypadków obliczeń nie przekracza rozbieżności uzyskiwanych wyników w trakcie prób łukowych. Na tym etapie można uznać, że uzyskane wyniki obliczeń, a tym samym zastosowany model obliczeniowy, oraz przyjęte założenia i uproszczenia niektórych wielkości, z wystarczającą dokładnością odzwierciedlają wielkości rzeczywiste mierzonych prądów, napięć i prędkości przemieszczania się niskonapięciowego dwufazowego łuku awaryjnego.

8. Badania prędkości trójfazowego łuku awaryjnego

Jak wynika z doświadczeń eksploatacyjnych, najczęstszą przyczyną powstawania trójfazowych zwarć łukowych są zwarcia dwufazowe lub jednofazowe. Z uwagi na niewielkie odstępy międzyfazowe i doziemne, zwarcia niesymetryczne w krótkim czasie przechodzą w zwarcia łukowe trójfazowe, z dwoma lub trzema łukami. Często zwarcia te obejmują również metalową uziemioną konstrukcję rozdzielnicy.

Występujące, w zależności od miejsca powstania zwarcia, w tym układzie siły elektrodynamiczne sprawiają, że kolumny trójfazowego zwarcia łukowego zaczynają się przemieszczać wzdłuż szyn. Wypadkowy zwrot sił elektrodynamicznych działających na łuk sprawia, że łuk przemieszcza się z określoną prędkością od miejsca zasilania w kierunku odbiorów elektrycznych. Przemieszczanie się łuku trwa do momentu napotkania na swojej drodze przeszkody w postaci np. obudowy aparatury, przegrody, osłon izolacyjnych lub końca układu szynowego [43].

Wartości i zwroty powstających sił elektrodynamicznych działających na kolumny łukowe trójfazowego zwarcia łukowego zależą m.in. od: wartości chwilowych prądów płynących w szynach i kolumnach łukowych, geometrii układu szynowego, jak również wzajemnego położenia kolumn łukowych w chwili zapłonu łuku. O wartościach chwilowych prądów zwarciowych płynących w poszczególnych kolumnach łuku awaryjnego i w szynach układu decydują parametry obwodu zwarciowego, kąt fazowy napięcia Ψ_Z w chwili powstania zwarcia oraz sama rezystancja łuku, ograniczająca prądy zwarciowe. Wszystkie te parametry sprawiają, że wartości chwilowe prądów fazowych płynących w szynach są różne, co powoduje nierównomierne przemieszczanie się kolumn łukowych. To z kolei przyczynia się do powiększenia obszaru objętego działaniem łuku, co skutkuje zwiększeniem szkód wywołanych przez zwarcie łukowe.

8.1. Wpływ kąta fazowego napięcia w chwili powstania zwarcia łukowego na dynamikę ruchu kolumn łukowych

Istotnym parametrem wpływającym na sposób przemieszczania się poszczególnych kolumn łukowych trójfazowego zwarcia łukowego, a tym samym na uzyskiwane prędkości łuku, jest kąt fazowy napięcia Ψ_Z w chwili powstania zwarcia. Kąt ten, przy określonych parametrach obwodu zwarciowego, decyduje o wartościach chwilowych prądów

płynących w poszczególnych fazach, a tym samym o wartościach i zwrotach sił elektrodynamicznych działających na kolumny łukowe łuku zwarciowego.

W początkowej fazie powstania zwarcia trójfazowego, przy założeniu jednakowego początkowego położenia kolumn łukowych, w zależności od zwrotów i wartości sił elektrodynamicznych kolumny łukowe mogą przemieścić się w przeciwnych kierunkach lub podążać obok siebie wzdłuż układu szynowego do momentu, w którym jeden z łuków, przemieszczając się z większą prędkością, pokona większy dystans, licząc od miejsca zapłonu. W momencie zwiększenia odległości pomiędzy łukami dochodzi do sytuacji, w której na jedną z kolumn łuku palącego się np. pomiędzy szynami L1 i L2, oraz oddalonego od łuku palącego się pomiędzy szynami L2 i L3, działa większa siła elektrodynamiczna. Sytuacja ta jest podobna do zwarcia dwufazowego, w którym kolumna łuku wraz z szynami tworzą pętlę dążącą do zwiększenia swoich wymiarów. Prąd płynący przez szyny i kolumnę łukową jest taki sam. Na łuk palący się pomiędzy szynami L2 i L3, który jest oddalony od łuku palącego się pomiędzy szynami L1 i L2, działa siła elektrodynamiczna, której zwrot jest przeciwny do zwrotu siły działającej na łuk palący się pomiędzy szynami L1 i L2. Sytuacja taka zachodzi w momencie, gdy prąd i_c fazy L3 jest przeciwnego znaku w stosunku do prądów faz L1 i L2, tj. i_a i i_b. Wówczas prędkości przemieszczania się obu kolumn łukowych będą różne i zwroty przeciwne.

Charakter zmian wypadkowej siły elektrodynamicznej działającej na kolumnę łukową poruszającą się wolniej wynika ze wzajemnego oddziaływania sił pochodzących od prądów i_a, i_b i i_c płynących w szynach doprowadzających i prądu łukowego i_c oraz prądu i_a płynącego w szynie środkowej i skrajnej (skierowanych w przeciwnych kierunkach), licząc od miejsca zapłonu. Znaczącą wartość wypadkowej siły elektrodynamicznej działającej na kolumnę łukową łuku poruszającego się wolniej stanowi składowa siły pochodząca od prądu łuku i_c oraz prądów płynących w szynie środkowej L2, tj. prądu i_b na odcinku od zasilania do kolumny łukowej przemieszczającej się wolniej, oraz prądu i_a na odcinku pomiędzy kolumnami łukowymi. Możliwe ułożenia kolumn łukowych względem siebie oraz składowe sił elektrodynamicznych występujących przy danym położeniu łuków przedstawiono na rys. 4.9 w rozdziale 4.2.

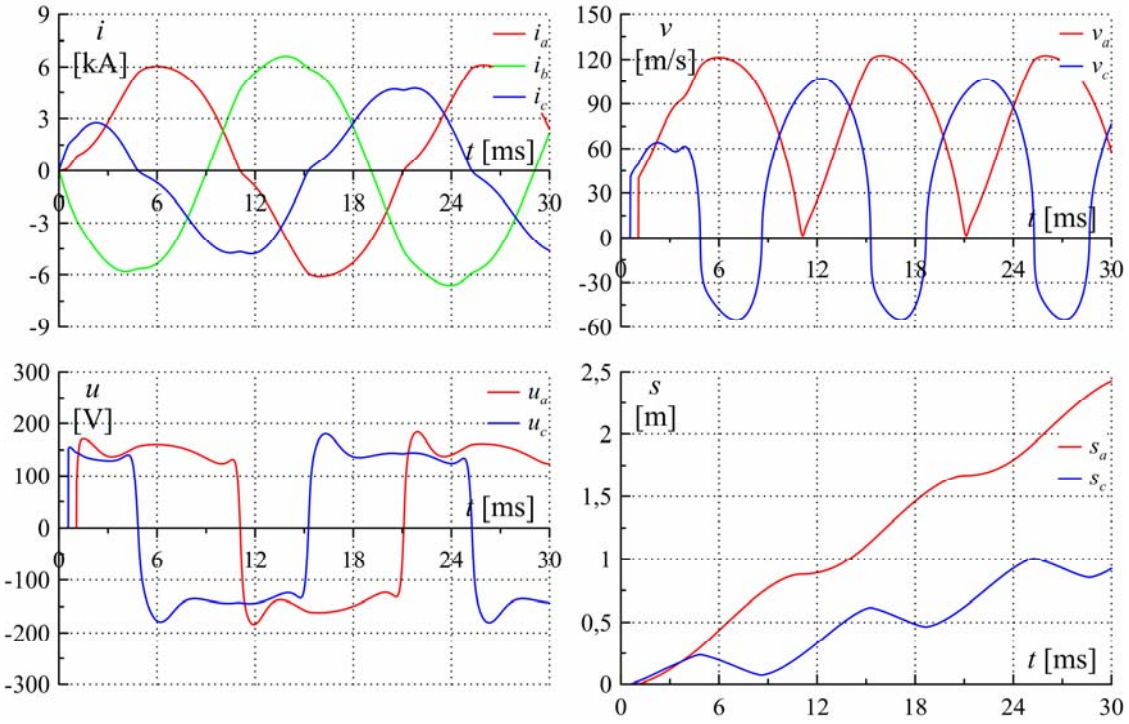
Przy niewielkich odległościach Δl pomiędzy kolumnami łukowymi może dochodzić do wzajemnego oddziaływania elektrodynamicznego sił pochodzących od prądów łukowych płynących w łuku. Powstająca składowa siły elektrodynamicznej powoduje, w zależności od kierunków przepływu prądów łukowych, wzajemne przyciąganie lub odpychanie kolumn. Może to powodować dodatkowe ich przyspieszenie

lub spowolnienie. Oddziaływanie to jednak szybko maleje wraz ze wzrostem odległości pomiędzy kolumnami Δl.

W zależności od wartości prądów fazowych, a tym samym sił elektrodynamicznych działających na poszczególne kolumny łukowe zwarcia łukowego, może dojść do zmniejszenia dystansu Δl pomiędzy kolumnami łukowymi. Do takiej sytuacji dochodzi w chwili, gdy siła elektrodynamiczna działająca na łuk poruszający się szybciej, np. łuk palący się pomiędzy szynami L2 i L3, a tym samym prędkość v_c maleje do zera w wyniku przejścia prądu i_c przez zero. Działająca w tym momencie na kolumnę łukową łuku palącego się pomiędzy szynami L1 i L2, znajdującą się bliżej miejsca powstania zwarcia, siła elektrodynamiczna pochodząca od prądu $i_a = -i_b$, powoduje zbliżenie się kolumn do siebie. Zmniejszenie dystansu pomiędzy kolumnami łukowymi, przy jednoczesnym wzroście prądu i_c, może prowadzić do wzrostu oddziaływań elektrodynamicznych sił pochodzących od prądów płynących w kolumnach łukowych, które powodują przyspieszenie łuku znajdującego się w większej odległości od miejsca zapłonu (łuku palącego się pomiędzy szynami L2 i L3) i spowolnienie kolumny łukowej znajdującej się w mniejszej odległości od miejsca zapłonu (łuku palącego się pomiędzy szynami L1 i L2).

Istnieją też sytuacje, w których następuje zmiana wzajemnego usytuowania kolumn łukowych względem miejsca powstania zwarcia. Jest to spowodowane zmianą prędkości przemieszczania się obu kolumn. W tym przypadku zmianie ulega również rozpływ prądów w szynach oraz zwroty sił elektrodynamicznych działających na poszczególne kolumny łukowe, powodując dodatkowe przyspieszenie kolumny łukowej, która wyprzedza i spowolnienie wyprzedzanej kolumny łukowej. Warunek zmiany wzajemnego położenia kolumn łukowych jest ściśle zależny od wartości chwilowych prądów fazowych płynących w poszczególnych szynach w danej chwili czasowej.

Reasumując, wszystkie te sytuacje można sprowadzić do dwóch podstawowych przypadków. Pierwszy przypadek to taki, w którym jedna z kolumn łukowych wyraźne wyprzedza drugą i przemieszcza się z większą prędkością w jednym kierunku. Natomiast druga kolumna, znajdująca się bliżej miejsca zapłonu przemieszcza się wolniej, a zwrot prędkości zmienia się w czasie (przebieg prędkości zawiera wartości ujemne). Przykładowe obliczenia, obrazujące pierwszy z analizowanych przypadków, przebiegów prądów i_a, i_b i i_c trójfazowego zwarcia łukowego, napięć łukowych u_a i u_c, prędkości kolumn łukowych v_a i v_c oraz dróg s_a i s_c, jakie one pokonują od miejsca zapłonu, przedstawia rys. 8.1.

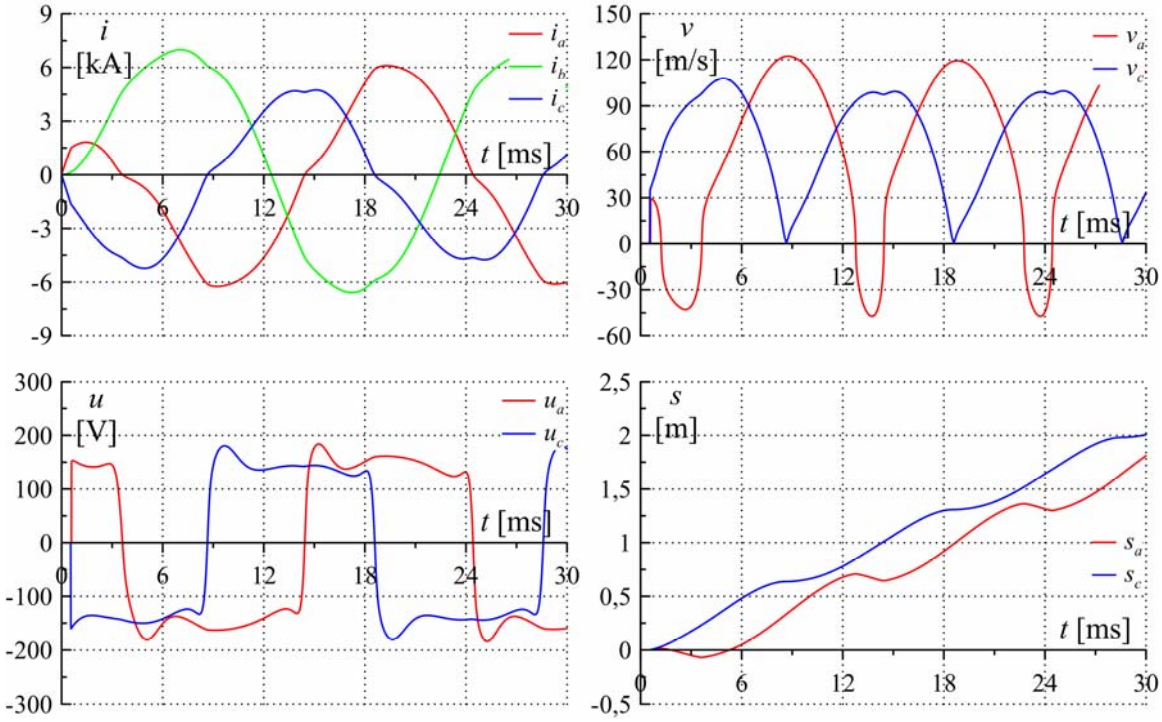


Rys. 8.1. Przebiegi: prądów fazowych i_a, i_b, i_c; napięć łukowych u_a, u_c; prędkości kolumn v_a, v_c oraz dróg s_a, s_c, jakie pokonują kolumny łukowe trójfazowego zwarcia łukowego; szyny P 40x5 mm, a = 80 mm, $I_k^{"}$ = 6 kA, U = 400 V, Ψ_Z = 0º, I_a = 4,21 kA, I_b = 4,83 kA, I_c = 3,38 kA, U_a = 148 V, U_c = 141 V, $v_{a\text{mean}}$ = 80 m/s, $v_{c\text{mean}}$ = 34 m/s

W przypadku trójfazowych niskonapięciowych zwarć łukowych w wyniku wpływu rezystancji poszczególnych kolumn łukowych pojawia się niesymetria prądów zwarciowych. Przy założeniu kolejności faz, w których siły elektromotoryczne zasilające układ szyn opisane są wzorem (4.42), identycznych parametrów R_Z, L_Z w poszczególnych fazach, prąd fazy trzeciej (wartość skuteczna) I_c jest mniejszy o około 20% ÷ 40% od prądów płynących w pozostałych fazach, tj. I_a i I_b i to ten prąd płynie w kolumnie łukowej poruszającej się wolniej. Należy zaznaczyć, że w przypadku odwrócenia kolejności faz napięcia zasilającego również zmianie ulegają wartości skuteczne prądów fazowych, tj.: prąd I_a będzie mniejszy od prądów I_b i I_c.

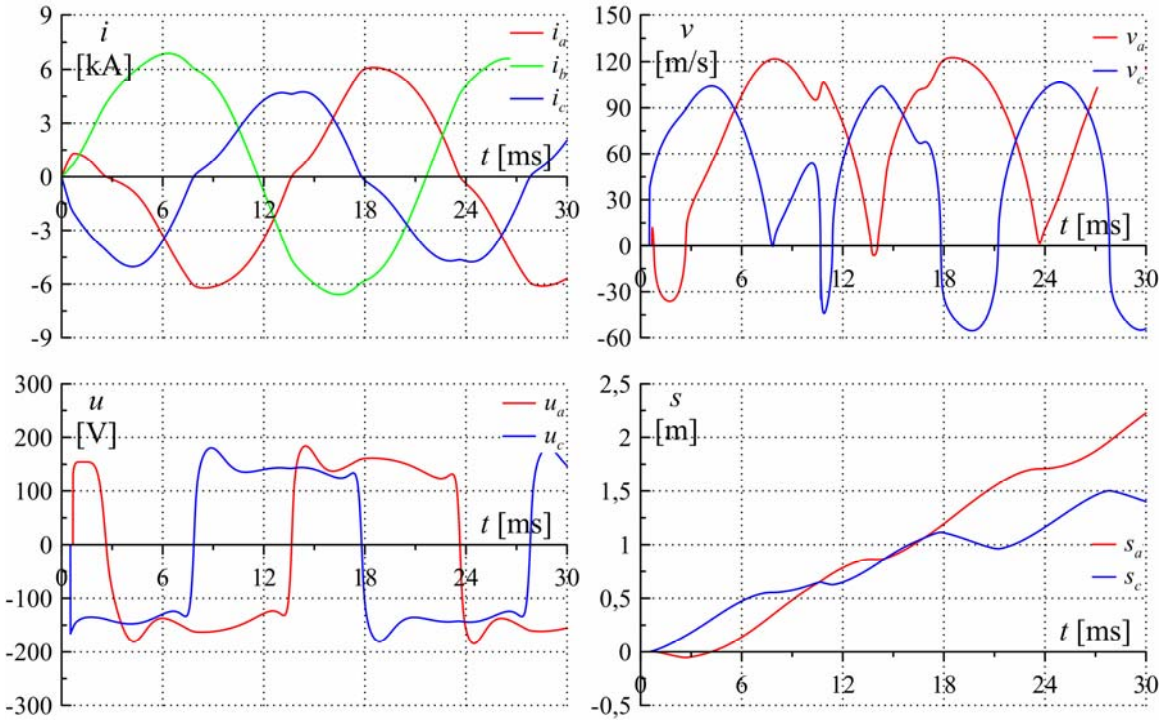
Drugi przypadek to taki, w którym prędkości oraz pokonane drogi przez kolumny łukowe są do siebie zbliżone, a kolumna łukowa, w której płynie mniejszy prąd I_c porusza się jako pierwsza. Analizując przebiegi prędkości chwilowych, a tym samym i przebiegi wypadkowych sił elektrodynamicznych działających na poszczególne kolumny łukowe, w tym przypadku mamy do czynienia z sytuacja odwrotną, w porównaniu do przypadku pierwszego. Przykład ten zobrazowano na rys. 8.2. Wyniki symulacji przedstawionej

na rys. 8.2 wykonano dla takich samych parametrów układu szynowego i obwodu zwarciowego co na rys. 8.1, ale przy innym kącie fazowym Ψ_Z.



Rys. 8.2. Przebiegi: prądów fazowych i_a, i_b, i_c; napięć łukowych u_a, u_c; prędkości kolumn v_a, v_c oraz dróg s_a, s_c, jakie pokonują kolumny łukowe trójfazowego zwarcia łukowego; szyny P 40x5 mm, a = 80 mm, $I_k^{"}$ = 6 kA, U = 400 V, Ψ_Z = 120º, I_a = 4,21 kA, I_b = 4,83 kA, I_c = 3,38 kA, U_a = 148 V, U_c = 141 V, v_{amean} = 63 m/s, v_{cmean} = 67 m/s

W tym przypadku może występować wzajemne oddziaływanie sił elektrodynamicznych pochodzących od prądów płynących w kolumnach łukowych na siebie, a powstająca siła elektrodynamiczna będzie odpychać od siebie kolumny. Jednakże, aby doszło do znaczącego wzajemnego oddziaływania między poszczególnymi kolumnami łukowymi, w którym bezwzględna wartość składowej siły elektrodynamicznej osiąga co najmniej 30% wartości wypadkowej siły elektrodynamicznej działającej na kolumny łukowe, odległość Δl mierzona wzdłuż osi układu szynowego nie powinna przekraczać długości łuku l_a. Najczęściej jednak z sytuacją zbliżenia się kolumn łukowych do siebie można spotkać się w momencie, gdy prędkość ruchu jednej z kolumn zmniejsza się. Jest to związane z momentem przejścia prądu przez zero. Z reguły taka sytuacja kończy się wzajemnym wyprzedzaniem kolumn łukowych, a końcowy rezultat (przypadek 1 lub 2) zależy od wartości prądów płynących w poszczególnych fazach. Przypadek wzajemnego wyprzedzania się kolumn łukowych przedstawiono na rys. 8.3.



Rys. 8.3. Przebiegi: prądów fazowych i_a, i_b, i_c; napięć łukowych u_a, u_c; prędkości kolumn v_a, v_c oraz dróg s_a, s_c, jakie pokonują kolumny łukowe trójfazowego zwarcia łukowego; szyny P 40x5 mm, a = 80 mm, $I_k^{"}$ = 6 kA, U = 400 V, Ψ_Z = 134º, I_a = 4,21 kA, I_b = 4,83 kA, I_c = 3,38 kA, U_a = 148 V, U_c = 141 V, $v_{a\text{mean}}$ = 76 m/s, $v_{c\text{mean}}$ = 44 m/s

Prędkość przemieszczania się łuku, a w związku z tym położenie poszczególnych kolumn łukowych trójfazowego zwarcia łukowego, nie jest stała. Uzyskiwane prędkości łuku, przy tych samych parametrach układu szynowego i obwodu zwarciowego, zależą przede wszystkim od kąta fazowego powstania zwarcia Ψ_Z, gdyż to on decyduje o wartościach prądów płynących w poszczególnych fazach, a tym samym o oddziaływaniach elektrodynamicznych występujących w szynach w czasie zwarcia łukowego.

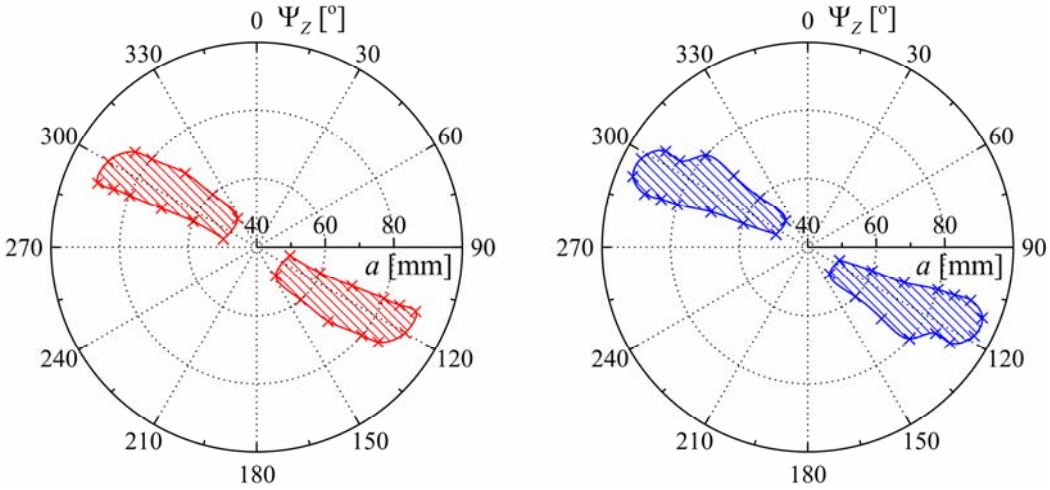
Analizując wpływ kąta fazowego napięcia Ψ_Z w chwili powstania zwarcia na charakter zmian prędkości poszczególnych kolumn łukowych, a tym samym na drogę, jakie one przebędą, można wyodrębnić dwa podstawowe przypadki. Pierwsza sytuacja to taka, gdzie średnia prędkość poszczególnych kolumn łukowych spełnia warunek $v_{a\text{mean}} > v_{c\text{mean}}$. W drugim przypadku natomiast średnia prędkość kolumny łukowej $v_{c\text{mean}}$ łuku palącego się pomiędzy szynami L2 i L3 jest większa od prędkości $v_{a\text{mean}}$ łuku palącego się pomiędzy szynami L1 i L2. Analizę wpływu kąta fazowego załączenia

zwarcia Ψ_Z na dynamikę trójfazowego zwarcia łukowego przeprowadzono przy założeniach:

- łuk zwarciowy przemieszcza się w układzie szyn o profilu 40x5 mm wykonanych z miedzi lub aluminium,
- obliczenia wykonano dla różnych odstępów a i przy spodziewanym prądzie zwarciowym wynoszącym $I_k^{"} = 6$ kA oraz współczynniku mocy $\cos\varphi = 0{,}65$,
- przebiegi napięć zasilających obwód zwarciowy opisano zależnością (4.42),
- obliczenia przeprowadzono z dokładnością do dwóch stopni kątowych kąta Ψ_Z i odstępach a zmieniających się co 10 mm w przedziale od 50 ÷ 100 mm, w wybranych punktach – co 5 mm,
- założono stałą długość układu szynowego wynoszącą 2 m, którą pokonuje przemieszczający się łuk. Na tym dystansie analizowane było położenie kolumn łukowych i charakter zmian prędkości v_a i v_c.

Wyniki analizy przedstawiono na rys. 8.4. Obszar zakreskowany odpowiada przypadkowi drugiemu, w którym prędkość $v_{c\text{mean}}$ kolumny łukowej łuku palącego się pomiędzy szynami L2 i L3 jest większa od prędkości $v_{a\text{mean}}$ kolumny łukowej łuku palącego się pomiędzy szynami L1 i L2.

a) b)



Rys. 8.4. Wpływ kąta fazowego załączenia zwarcia Ψ_Z na dynamikę ruchu kolumn łukowych w układzie wykonanym z szyn: a) miedzianych, b) aluminiowych i różnych odstępach a, przy spodziewanym prądzie zwarciowym $I_k^{"} = 6$ kA i współczynniku mocy $\cos\varphi = 0{,}65$

Zakres kątów fazowych Ψ_Z, w których prędkość łuku spełnia nierówność: $v_{c\text{mean}} > v_{a\text{mean}}$, jest symetryczny względem prostej poprowadzonej wzdłuż kątów fazowych Ψ_Z wynoszących 30º, 210º i zmienia się w przedziale kilkunastu stopni kątowych

dla odstępów a z zakresu 50 ÷ 60 mm. W miarę wzrostu odstępu a zakres ten maleje do kilku stopni kątowych. Środek obszaru kątów fazowych Ψ_Z znajduje się w okolicy kąta fazowego Ψ_Z = 120º lub 300º, co odpowiada przypadkowi, w którym w szynie środkowej L2 występuje prąd udarowy. W pozostałym zakresie kątów fazowych Ψ_Z i odstępów a dla analizowanych układów szyn, przy zadanych parametrach, prędkość łuku $v_{a\text{mean}}$ palącego się pomiędzy szynami L1 i L2 jest większa od prędkości łuku $v_{c\text{mean}}$ palącego się pomiędzy szynami L2 i L3.

Wraz ze wzrostem odstępów a, w wyniku wpływu rezystancji łuku na wartość prądów płynących w poszczególnych fazach, może dochodzić do sytuacji omówionej w pierwszym przypadku, gdzie niezależnie od kąta fazowego Ψ_Z prędkość $v_{a\text{mean}} > v_{c\text{mean}}$ lub może dojść do przeobrażenia się zwarcia trójfazowego w zwarcie dwufazowe. Dla szyn aluminiowych i odstępów a z przedziału 95 ÷ 120 mm wyniki obliczeń wskazują, że w każdym przypadku prędkość $v_{a\text{mean}} > v_{c\text{mean}}$. Powyżej tego zakresu łuk trójfazowy przeobraża się w łuk dwufazowy lub całkowicie gaśnie przy naturalnym przejściu prądu przez zero. W przypadku układów wykonanych z szyn miedzianych spełnienie warunku: $v_{a\text{mean}} < v_{c\text{mean}}$, określone jest dla odstępów a < 80 mm. Dla większych odstępów a, przy kątach fazowych Ψ_Z, przy których warunek $v_{a\text{mean}} < v_{c\text{mean}}$ był spełniony, zwarcie trójfazowe zmienia się w zwarcie dwufazowe.

Niewielka zmiana współczynnika mocy obwodu zwarciowego, przy jednoczesnym zachowaniu spodziewanej wartości prądu zwarciowego I_k'', powoduje zmiany przedziałów kątów Ψ_Z, przy których spełniony jest warunek $v_{a\text{mean}} < v_{c\text{mean}}$. Wraz ze zmniejszeniem współczynnika mocy cosφ wzrasta przedział kątów Ψ_Z, przy czym wzrost ten jest widoczny poprzez zwiększenie tylko górnej granicy przedziałów kątów Ψ_Z w zakresie większych kątów, np. dla przypadku szyn aluminiowych, w których odstęp a = 80 mm, przy spodziewanym prądzie zwarciowym I_k'' = 6 kA i cosφ = 0,65 zakres kątów Ψ_Z, przy którym $v_{a\text{mean}} < v_{c\text{mean}}$, jest z przedziału 108º ÷ 112º, lub 288º ÷ 292º. Zmiana współczynnika cosφ do wartości 0,4, przy jednoczesnym zachowaniu pozostałych parametrów, pociąga za sobą rozszerzenie zakresów kąta fazowego Ψ_Z do przedziału 108º ÷ 122º i 288º ÷ 302º.

Podobna sytuacja występuje w przypadku zmiany wartości spodziewanego prądu zwarciowego I_k''. Wraz ze wzrostem spodziewanego prądu zwarciowego I_k'' wzrasta przedział kątów Ψ_Z. Przykładowa zmiana spodziewanego prądu zwarciowego I_k'' do wartości 8 kA, przy zachowaniu początkowych pozostałych parametrów, powoduje zwiększenie przedziału kątów Ψ_Z do zakresu 108º ÷ 130º i 288º ÷ 310º.

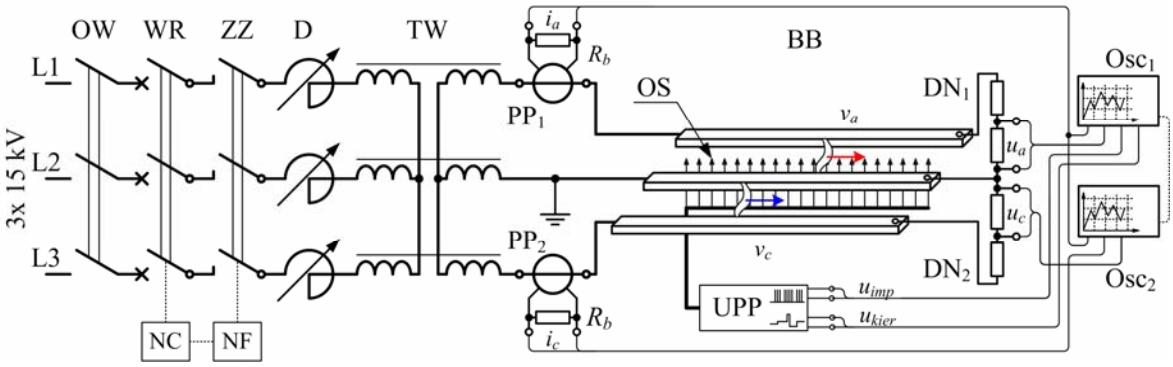
Pokazana analiza wskazuje, że istotnym parametrem wpływającym na dynamikę ruchu łuku awaryjnego, przy określonych parametrach układu szynowego i obwodu zwarciowego, a tym samym na uzyskiwane prędkości i drogi, jakie przemierzają poszczególne kolumny łuku, jest kąt fazowy załączenia zwarcia Ψ_Z. Z przedstawionych wyników można zauważyć, że w znacznym przedziale kątów fazowych Ψ_Z mamy do czynienia z sytuacją określoną, jako przypadek pierwszy, w którym jedna z kolumn łukowych wyraźnie zaczyna wyprzedzać drugą kolumnę licząc od chwili powstania zwarcia łukowego. Usytuowanie kolumn łukowych w tym przypadku wpływa również na rozkład sił elektrodynamicznych działających na szyny, powodując powstanie pętli pomiędzy szynami doprowadzającymi prąd do kolumny łukowej poruszającej się szybciej. Powoduje to powstanie zarówno w szynie skrajnej jak i środkowej takich samych sił elektrodynamicznych, skierowanych w przeciwnych kierunkach. Sytuację tę można porównać do wcześniej już wspomnianego w rozdziale 2.5 odpowiednika dwufazowego układu szynowego, w którym wpływ składowej siły elektrodynamicznej, wynikającej z oddziaływania prądu trzeciej szyny jest pominięty. Przepływ prądu zwarcia trójfazowego w takim układzie kolumn łukowych powoduje wzrost oddziaływań elektrodynamicznych działających m.in. na szynę środkową.

Przedstawiony złożony charakter zmian dynamiki niskonapięciowego łuku awaryjnego pokazuje konieczność weryfikacji modelu obliczeniowego dynamiki niskonapięciowego łuku awaryjnego za pomocą prób laboratoryjnych, przeprowadzanych w rzeczywistym modelu szyn zbiorczych. Zakres badań laboratoryjnych powinien obejmować wpływ zmian spodziewanej wartości prądu zwarciowego $I_k^{"}$ i odstępów a, dla wybranego układu szynowego, z jednoczesnym uwzględnieniem wpływu kąta załączenia zwarcia Ψ_Z na przebiegi i wartości prędkości łuku, a tym samym na możliwe jego położenie. Tego typu badania pozwolą sprawdzić poprawność postawionych założeń, jak również zweryfikować przydatność modelu obliczeniowego do analizy oddziaływań elektrodynamicznych występujących w szynach podczas trójfazowych zwarć łukowych.

8.2. Budowa stanowiska probierczego i zakres badań dotyczących trójfazowego łuku awaryjnego

Do badań dynamiki trójfazowego łuku awaryjnego wybrano układ składający się trzech szyn typu AP 40x5 mm, ułożonych w jednej płaszczyźnie, szerszą krawędzią równolegle do układu szyn. Zakres badań prędkości trójfazowego łuku awaryjnego

obejmował odstępy a z przedziału 60 ÷ 80 mm, przy spodziewanych wartościach prądów zwarciowych I_k'' z zakresu 2 ÷ 10 kA. Schemat stanowiska probierczego do badań prędkości trójfazowego niskonapięciowego łuku awaryjnego ilustruje rys. 8.5.



Rys. 8.5. Schemat stanowiska probierczego do badań prędkości trójfazowego łuku zwarciowego: OW – odłącznik, WR – wyłącznik, ZZ – załącznik zwarciowy, D – dławik, TW – transformator wielkoprądowy, PP_1, PP_2 – przekładnik prądowy, R_b – bocznik pomiarowy, BB – układ szynowy, DN_1, DN_2 – dzielnik napięcia, NF – nastawnik fazowy, NC – nastawnik czasowy, OS – czujniki optyczne, UPP – układ pomiaru prędkości łuku, Osc_1, Osc_2 – oscyloskop

Trójfazowy wielkoprądowy zespół probierczy, do którego podłączono stanowisko probiercze, zasilano z sieci o napięciu znamionowym 15 kV. Konstrukcja stanowiska oraz wyposażenie aparaturowe było identyczne, jak w przypadku prób dwufazowych. Widok stanowiska probierczego, w którym przeprowadzono próby trójfazowe został przedstawiony na rys. 13.5b w Załączniku C.

W skład części pomiarowej stanowiska probierczego wchodzi układ pomiaru prądów i_{a_e} i i_{c_e} płynących w szynach skrajnych, napięć międzyfazowych u_{a_e} i u_{c_e}, mierzonych pomiędzy szynami skrajnymi a środkową i układ pomiaru prędkości v_{a_e} przemieszczającej się kolumny łukowej łuku palącego się pomiędzy szynami L1 i L2. Czujniki układu pomiaru prędkości UPP skierowane były w obszar przyelektrodowy łuku. Sposób ułożenia czujników i odstępy pomiędzy nimi były takie same, jak w przypadku prób dwufazowych. W ten sposób realizowano pomiar prędkości chwilowej jednej z dwóch kolumn łukowych trójfazowego łuku awaryjnego.

Wybór „obserwowanej" kolumny łukowej można uzasadnić tym, że dla znacznej większości kątów fazowych załączenia zwarcia Ψ_Z prędkość $v_{a\text{mean}} > v_{c\text{mean}}$. Ponadto w przypadku dojścia łuku do końca układu szynowego następuje jego zgaszenie i trójfazowe zwarcie łukowe zmienia się w zwarcie dwufazowe, co powoduje zmianę

wartości prądów. W przypadku pomiaru prędkości kolumny łukowej, która poruszałaby się wolniej w trakcie próby, dochodziłoby do zmian warunków przeprowadzania prób. Na przykład następowałoby przedwczesne zgaszenie łuku poruszającego się szybciej oraz zmiana rozpływu prądów w szynach, a tym samym zmieniałyby się wartości i zwroty sił elektrodynamicznych działających na kolumny łukowe. Oczywiście w pewnym przedziale kątów Ψ_Z spełniony jest warunek $v_{a\text{mean}} < v_{c\text{mean}}$. Wtedy ze względu na podobne odległości, jakie pokonują poszczególne kolumny łukowe, zgaszenie ich na końcu układu szynowego jest prawie jednoczesne i nie wpływa znacząco na warunki przeprowadzanych badań.

Do pomiarów prądów i napięć łukowych zastosowano identyczne przetworniki pomiarowe, jak w przypadku badań łuku dwufazowego. Sygnały z przetworników pomiarowych oraz z układu pomiarowego UPP były podawane poprzez optoizolator na wejścia poszczególnych kanałów oscyloskopu. Z uwagi na liczbę rejestrowanych przebiegów prądów, napięć i sygnałów pomiarowych z układu UPP, próby przeprowadzono za pomocą dwóch zsynchronizowanych ze sobą oscyloskopów typu TDS 5034B firmy Tektronix oraz optoizolatorów typy A6907 firmy Tektronix.

8.3. Metodyka eksperymentu i wyniki prób trójfazowych

Podobnie, jak w przypadku badań prędkości łuku dwufazowego, próby z trójfazowym łukiem wędrującym wzdłuż szyn składały się z próby kalibracyjnej oraz próby zwarcia łukowego.

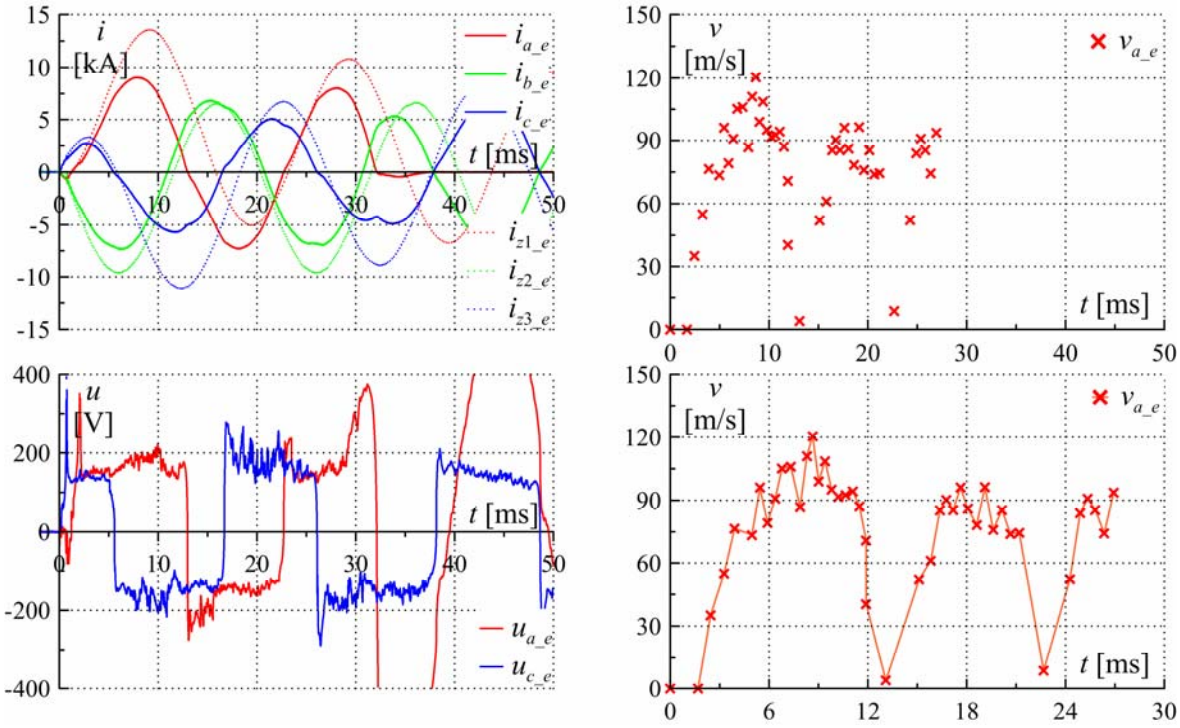
Celem próby kalibracyjnej, podobnie jak w przypadku badań dwufazowych, było określenie takich parametrów obwodu zwarciowego, przy których uzyskiwano zadany kształt i wartość spodziewanego prądu zwarciowego I_k''. W odróżnieniu od prób dwufazowych, podczas kalibracji układu, dobierano tak kąt załączenia Ψ_Z załącznika zwarciowego ZZ, aby uzyskać, w jednym przypadku największą wartość chwilową prądu w skrajnej fazie L1, a w drugim przypadku – największą wartość chwilową prądu zwarciowego w fazie środkowej L2. Podział prób kalibracyjnych dla zadanej wartości spodziewanego prądu zwarciowego I_k'' podyktowany został koniecznością weryfikacji występowania przeciwnie zorientowanych prędkości chwilowych kolumn łukowych trójfazowego łuku awaryjnego. W trakcie prób trójfazowych kąt fazowy załączenia zwarcia Ψ_Z był odniesiony do napięcia fazowego fazy L1. Próbę kalibracyjną, podczas której dokonywano rejestracji przebiegów prądu i_{z1_e} i i_{z3_e}, realizowano poprzez

wykonanie zwarcia metalicznego na końcu układu szynowego. Na podstawie zarejestrowanych przebiegów obliczono spodziewaną wartość prądu zwarciowego $I_k^{"}$.

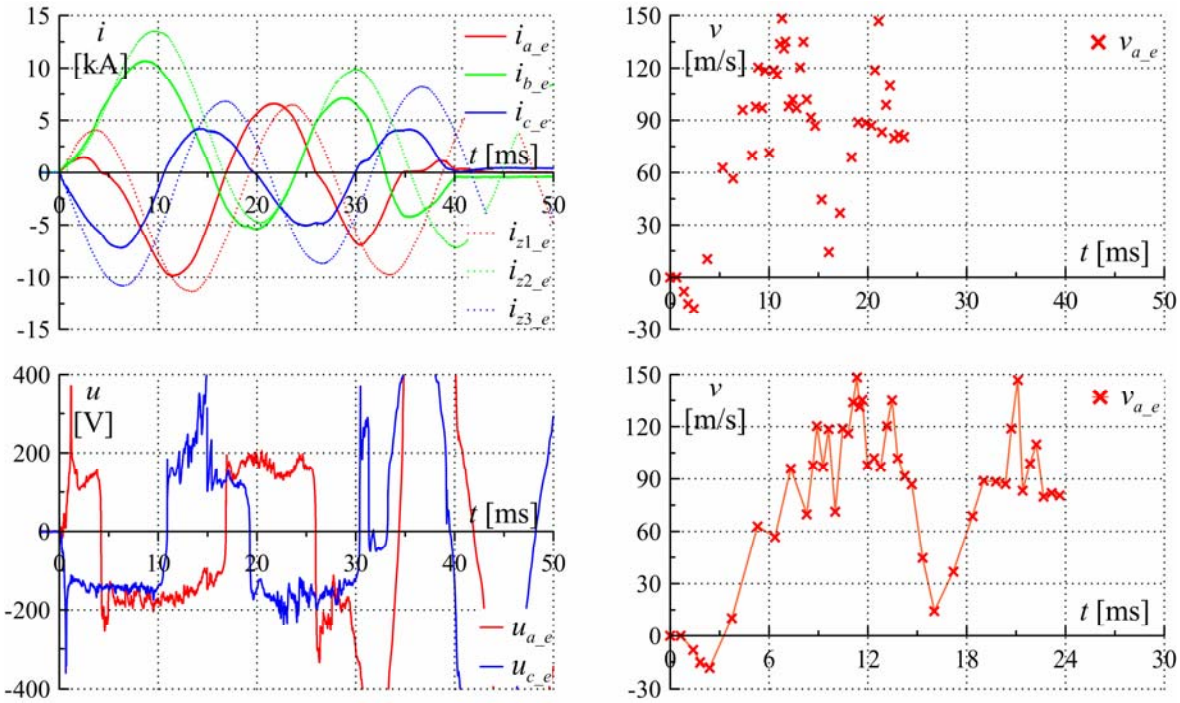
Trójfazowe próby łukowe, podobnie jak w przypadku badań łuku dwufazowego, polegały na zainicjowaniu zwarcia łukowego, przy zadanych parametrach obwodu probierczego, za pomocą cienkiego drutu miedzianego zwierającego trzy szyny na jednej wysokości. W zależności od kąta fazowego załączenia zwarcia Ψ_Z, zwarcie łukowe wywoływane było nad 1. lub 6. czujnikiem optycznym układu pomiaru prędkości UPP. Umieszczenie drucika inicjującego zwarcie nad 6. czujnikiem umożliwiało rejestrację prędkości kolumny łukowej przemieszczającej się w kierunku zasilania w początkowym etapie zwarcia łukowego. W trakcie próby łukowej dokonywano rejestracji prądów łukowych i_{a_e} i i_{c_e}, napięć łukowych u_{a_e} i u_{c_e} oraz prędkości chwilowej v_{a_e} kolumny łukowej łuku palącego się pomiędzy fazami L1 i L2. Na podstawie rejestracji wartości chwilowych prądu zwarcia łukowego obliczano prąd i_{b_e} w fazie L2 zgodnie ze wzorem (2.5) oraz wartości skuteczne prądów zwarcia łukowego I_{a_e}, I_{b_e} i I_{c_e}. Na podstawie rejestracji napięć u_{a_e} i u_{c_e} wyznaczano wartości napięć łukowych U_{a_e} i U_{c_e}.

Dla zadanych wartości prądów zwarciowych $I_k^{"}$ przeprowadzono po 6 prób łukowych, w których dwa łuki stabilnie się paliły i co najmniej jedna z kolumn trójfazowego zwarcia łukowego przemieszczała się wzdłuż całego odcinka pomiarowego.

Przykładowe rejestracje przebiegów prądów, napięć i prędkości trójfazowego łuku awaryjnego, przy tej samej wartości spodziewanego prądu zwarciowego $I_k^{"} \approx 6$ kA i przy różnych kątach fazowych załączenia zwarcia zamieszczono na rys. 8.6 – dla kąta $\Psi_Z = 0^{\circ}$, a na rys. 8.7 – dla kąta $\Psi_Z = 115^{\circ}$. Wyniki prób laboratoryjnych w analizowanym zakresie prądów zwarciowych $I_k^{"}$ oraz odstępów a zaprezentowano razem z wynikami obliczeń w rozdziale 8.4 i w Załączniku F.



Rys. 8.6. Przebiegi: prądów, napięć i prędkości trójfazowego zwarcia łukowego; szyny Al40x5 mm, a = 80 mm, U = 400 V, $I_{k_e}^{"}$ = 5,994 kA, I_{a_e} = 5,747 kA, I_{b_e} = 5,158 kA, I_{c_e} = 3,29 kA, U_{a_e} = 167 V, U_{c_e} = 167 V, v_{a_emean} = 50,8 m/s, Ψ_Z = 0º



Rys. 8.7. Przebiegi: prądów, napięć i prędkości trójfazowego zwarcia łukowego; szyny Al40x5 mm, a = 80 mm, U = 400 V, $I_{k_e}^{"}$ = 5,934 kA, I_{a_e} = 5,266 kA, I_{b_e} = 6,482 kA, I_{c_e} = 4,148 kA, U_{a_e} = 158 V, U_{c_e} = 162 V, v_{a_emean} = 69,9 m/s, Ψ_Z = 115º

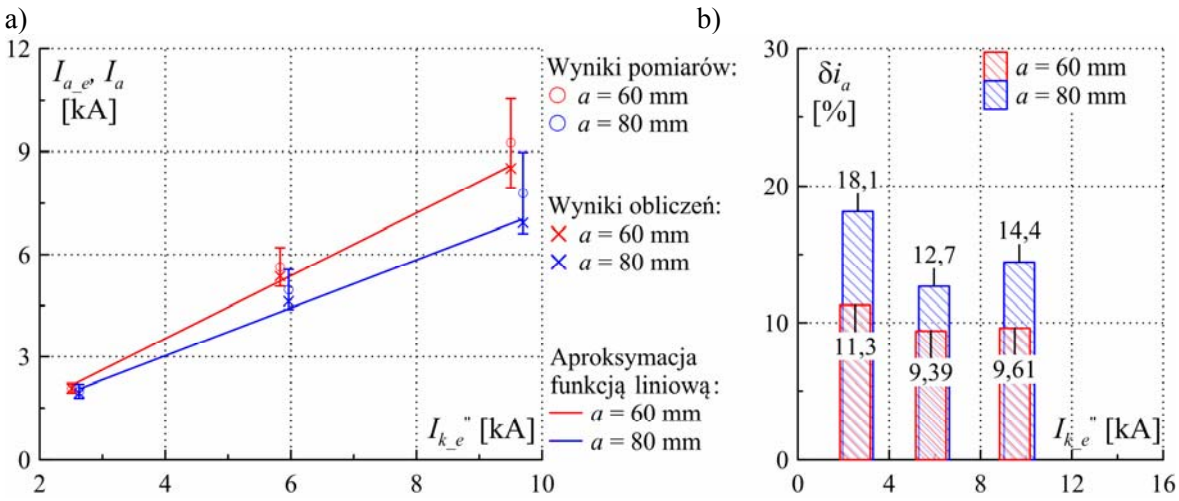
Przedstawione na rys. 8.6 i rys. 8.7 przebiegi prądów i napięć łukowych zmierzone dla tych samym parametrów obwodu zwarciowego, lecz różnego kąta załączenia zwarcia Ψ_Z, wstępnie potwierdzają wyniki analizy dynamiki łuku, którą przeprowadzono w rozdziale 8.1. Z uwagi na brak informacji dotyczącej prędkości przemieszczania się kolumny łuku palącego się pomiędzy szynami L2 i L3, analizę prędkości przemieszczania się dwóch kolumn trójfazowego zwarcia łukowego przeprowadzono w oparciu o wyniki pomiarów prądów i napięć łukowych.

W przypadku kąta fazowego $\Psi_Z = 0^o$ (rys. 8.6) kolumna łukowa łuku palącego się pomiędzy szynami L1 oraz L2 przemieszcza się szybciej od drugiej kolumny łukowej i jako pierwsza dociera do końca układu szynowego, gdzie jej długość ulega zwiększeniu w wyniku ciągłego oddziaływania na nią siły elektrodynamicznej. Zwiększenie długości kolumny łukowej łuku palącego się pomiędzy szynami L1 i L2 na końcu układu szynowego widoczne jest poprzez wyraźny wzrost napięcia łuku u_{a_e} w porównaniu do napięcia łuku u_{c_e}, które jest na ustalonej wartości (w 29. ms trwania zwarcia). W efekcie następuje sprowadzenie prądu i_a do zera i przeistoczenia się zwarcia trójfazowego w zwarcie dwufazowe z łukiem palącym się pomiędzy szynami L2 i L3, które trwa do momentu dojścia drugiej kolumny łukowej do końca układu szynowego. Dowodzi to nierównomiernego ruchu kolumn łukowych i szybszego poruszania się wzdłuż szyn kolumny łukowej łuku palącego się pomiędzy szynami L1 i L2. Sytuacja ta jest odzwierciedleniem omówionego w rozdziale 8.1 pierwszego przypadku przemieszczania się łuku zwarciowego wzdłuż szyn.

W przypadku kąta fazowego $\Psi_Z = 115^o$ (rys. 8.7) wzrost napięć łukowych u_{a_e} i u_{c_e} wywołanych zwiększającą się długością kolumn łukowych, które dotarły do końca układu szynowego, występuje prawie jednocześnie (w 30. ms zwarcia). Wzrost długości obu kolumn łukowych i związanych z nimi rezystancji łuku powoduje, że prądy i_{a_e}, i_{b_e} oraz i_{c_e} osiągają wartość 0 oraz następuje zgaszenie łuku zwarcia trójfazowego (w 40. ms trwania zwarcia). Sytuacja ta ponownie potwierdza wyniki wcześniejszej analizy i jest odzwierciedleniem omówionego w rozdziale 8.1 przypadku drugiego, w którym obie kolumny przemieszczają się z podobną prędkością i mogą się nawzajem wyprzedzać. Wyniki badań eksperymentalnych prędkości trójfazowego łuku zwarciowego palącego się na szynach aluminiowych zamieszczono w tab. 16.1 i w tab. 16.2 w Załączniku F.

8.4. Wyniki obliczeń parametrów trójfazowego łuku awaryjnego

Obliczenia prądów, napięć łukowych oraz prędkości przemieszczania się trójfazowego łuku zwarciowego mają na celu weryfikację poprawności postawionych założeń, zastosowanych uproszczeń oraz przedstawionego w rozdziale 4.2 modelu obliczeniowego, w którym wykorzystano, wyprowadzone na podstawie badań dynamiki łuku dwufazowego, zależności empiryczne opisane wzorami: (6.2), ..., (6.21). Sprawdzenie poprawności zastosowanych metod obliczeniowych opierało się na analizie uzyskanych błędów wynikających z różnicy pomiędzy zmierzonymi, a obliczonymi wartościami prądów, napięć i prędkości dla zadanych parametrów obwodu probierczego. Analiza uzyskanych błędów obliczeń obejmuje zakres badań laboratoryjnych. Podobnie, jak w przypadku zwarć dwufazowych, w pierwszej kolejności zwrócono uwagę na podobieństwa uzyskanych wyników obliczeń prądów zwarciowych, prędkości przemieszczającego się łuku i napięć łukowych z wynikami prób laboratoryjnych. Na rys. 8.8 zamieszczono uśrednione wyniki prądów zwarciowych oraz uzyskanych błędów δi_a.

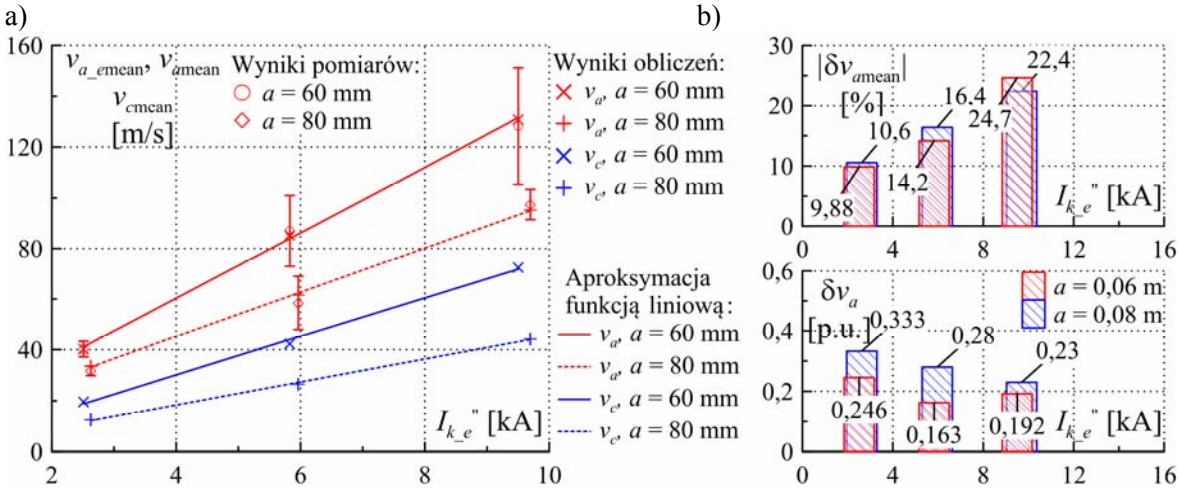


Rys. 8.8. Uśrednione wyniki pomiarów i obliczeń: a) prądów fazowych trójfazowego zwarcia łukowego (I_{a_e}, I_a) i b) błędu δi_a w funkcji spodziewanej wartości prądu zwarciowego I_{k_e}" dla łuku palącego się w układzie szyn AP 40x5 mm

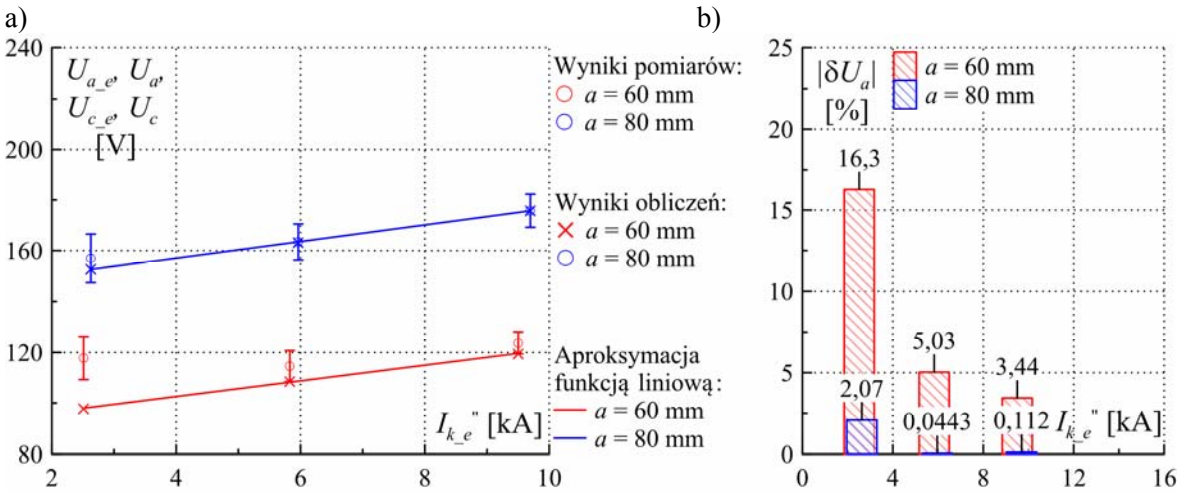
Uzyskane różnice w wynikach obliczeń prądów zwarcia łukowego i wynikach prób laboratoryjnych nie przekroczyły 20%, podobnie jak w przypadku prób dwufazowych z jednym łukiem wędrującym wzdłuż szyn.

W przypadku wyników obliczeń i pomiarów prędkości łuku trójfazowego parametrami określającymi dokładność zastosowanego modelu obliczeniowego, tak samo

jak w przypadku łuku dwufazowego, był błąd względny $\delta v_{a\text{mean}}$ oraz średnia wartość błędu względnego δv_a odniesiona do wartości średniej prędkości łuku $v_{a\text{mean}}$. Wyniki pomiarów prędkości jednej z kolumn łuku trójfazowego oraz wyniki obliczeń prędkości wraz z uzyskanymi błędami obliczeń przedstawiono na rys. 8.9. Na rys. 8.10 przedstawiono natomiast uśrednione wyniki obliczeń i pomiarów napięć łukowych.



Rys. 8.9. Wyniki pomiarów i obliczeń: a) średniej prędkości łuku trójfazowego zwarcia łukowego ($v_{a_e\text{mean}}$, $v_{a\text{mean}}$, $v_{c\text{mean}}$) i b) błędów δv_a, $\delta v_{a\text{mean}}$ w funkcji spodziewanej wartości prądu zwarciowego I_{k_e}" dla łuku palącego się w układzie szyn AP 40x5 mm



Rys. 8.10. Wyniki pomiarów i obliczeń: a) napięcia łuku trójfazowego zwarcia łukowego (U_{a_e}, U_{c_e}, U_a, U_c) i b) średniej wartości błędu δu_a w funkcji spodziewanej wartości prądu zwarciowego I_{k_e}" dla łuku palącego się w układzie szyn AP 40x5 mm

Uzyskane wyniki błędów prędkości δv_a i $\delta v_{a\text{mean}}$ przemieszczającego się łuku dla badanego zakresu odstępów pomiędzy osiami szyn a i prądów zwarciowych I_k" są zbliżone do uzyskanych błędów w przypadku prób dwufazowych i nie przekraczają one

wartości 25%, w przypadku $\delta v_{a\text{mean}}$, oraz 0,35 p.u. w przypadku błędu δv_a. Trend zmian wartości poszczególnych błędów w funkcji zmian spodziewanej wartości prądu zwarciowego I_k'' jest podobny, jak w badaniach dwufazowych, a większe wartości błędów przy mniejszych prądach zwarciowych wynikają ze wspomnianej w rozdziale 7 niedoskonałości metody pomiarowej.

W przypadku wyników obliczeń napięcia łuku U_a uzyskane błędy obliczeń δU_a, podobnie jak w przypadku analizy wyników badań i obliczeń dwufazowego łuku zwarciowego, nie przekraczają 30% w analizowanym zakresie prób.

9. Oddziaływania elektrodynamiczne w układach szynowych z uwzględnieniem wpływu rezystancji łuku

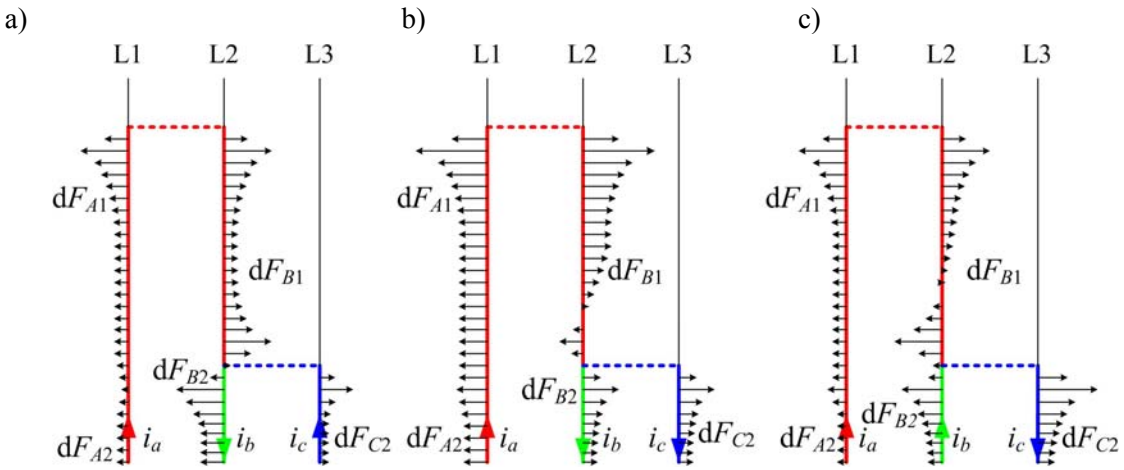
Wzajemne oddziaływania elektrodynamiczne sił pochodzących od prądów zwarciowych płynących w poszczególnych torach prądowych układu szynowego powodują wzrost naprężeń mechanicznych w szynach, jak również przyczyniają się do powstania sił działających na podpory układu szynowego. W przypadku zwarć metalicznych w prostoliniowym układzie szynowym powstające siły elektrodynamiczne są rozłożone w postaci sił elementarnych występujących wzdłuż całej długości toru prądowego, w którym płynie prąd. Natomiast w przypadku zwarć łukowych przemieszczający się łuk zwarciowy, a dokładniej ujmując, wzajemne oddziaływanie sił wywołanych prądami płynącymi w szynach i w poszczególnych kolumnach łukowych trójfazowego łuku awaryjnego, powoduje zakłócenie jednolitego rozkładu sił elementarnych w szynach.

Przeprowadzona w rozdziale 2 analiza oddziaływań elektrodynamicznych w szynie skrajnej i środkowej trójfazowego płaskiego układu szyn wykazała wzrost elementarnych sił elektrodynamicznych przy założeniu, że prądy zwarcia łukowego są równe prądom zwarcia metalicznego. Uzyskane wartości maksymalne elementarnych sił elektrodynamicznych zależą m.in. od wartości chwilowych prądów płynących w poszczególnych fazach, geometrii układu szynowego, jak również od wzajemnego położenia kolumn łukowych względem siebie. Należy jednak zaznaczyć, że wprowadzone uproszczenie, polegające na pominięciu wpływu rezystancji łuku na wartość prądów zwarciowych, miało na celu wykazanie potencjalnych sytuacji, w których może dochodzić do zwiększenia elementarnych sił elektrodynamicznych w szynach.

W przypadku zwarć łukowych wzajemne położenie kolumn łukowych względem siebie, jak również wartości prądów, mogą mieć wpływ na zwiększenie elementarnych sił elektrodynamicznych działających na szyny. Prądy płynące w poszczególnych fazach i kolumnach łukowych zależą nie tylko od parametrów obwodu zwarciowego, ale również od rezystancji łuku.

Parametrem wpływającym na wzajemne położenie dwóch kolumn łukowych trójfazowego zwarcia łukowego w chwili, w której w dowolnej fazie płynie prąd udarowy, a tym samym występują największe siły elektrodynamiczne, jest faza powstania zwarcia,

co wykazano w rozdziale 8.1. Dla większości wartości kątów fazowych Ψ_Z siły elektrodynamiczne działające na kolumny łukowe powodują, że kolumny przemieszczają się nierównomiernie i jedna z kolumn porusza się szybciej. Większa prędkość przemieszczania się jednej z kolumn łukowych powoduje, że w miarę upływu czasu zwiększa się odległość pomiędzy kolumnami łukowymi. Tak więc wzajemne położenie kolumn łukowych łuku zwarciowego i związany z nim rozpływ prądów w szynach można sprowadzić do pierwszego przypadku omówionego w rozdziale 2.3 i 2.4, w którym to kolumna łuku przemieszczającego się szybciej tworzy, wraz z dwiema szynami wiodącymi prąd, zwiększającą swoje rozmiary pętlę. Wykazano, że w tym układzie występują siły elektrodynamiczne, których charakter zmian jest identyczny, jak w przypadku układu dwufazowego, z tą różnicą, że w szynach płynie prąd zwarcia trójfazowego. Dodatkowo, w okolicy palącego się łuku, występuje jednakowy wzrost elementarnych sił elektrodynamicznych zarówno w szynie skrajnej, jak i w środkowej. Przykładowy rozkład obciążenia elektrodynamicznego wzdłuż układu szynowego dla omawianej sytuacji w różnych chwilach trwania dodatniej półfali prądu w fazie L1 zamieszczono na rys. 9.1.



Rys. 9.1. Rozkład obciążenia elektrodynamicznego wzdłuż układu szynowego dla przypadku, w którym jedna z kolumn łuku przemieszcza się z większa prędkością w czasie trwania dodatniej półfali prądu płynącego w fazie L1 w chwilach, gdy: a) $i_a = i_c$, b) $i_a = i_p$ i $-i_b = -i_c$, c) $i_a = i_b$

Nie należy jednak pominąć faktu, iż w wąskim zakresie kątów fazowych załączenia zwarcia Ψ_Z może wystąpić sytuacja, w której obie kolumny łukowe przemieszczają się z podobną prędkością lub nawzajem się wyprzedzają. Również tutaj stwierdzono możliwość wzmocnienia elementarnych sił elektrodynamicznych, jak to zostało opisane w drugim przypadku w rozdziale 2.3 i 2.4. Przeprowadzone obliczenia wykazały,

że płynące prądy w poszczególnych fazach nie osiągają takich wartości, aby powstające siły elektrodynamiczne i ich wzajemne oddziaływanie na siebie mogło spowodować znaczący wzrost elementarnych sił elektrodynamicznych, w porównaniu do sił występujących w sytuacji, gdy w układzie szynowym płyną prądy zwarcia metalicznego. Podobna sytuacja występuje przy wzajemnym wyprzedzaniu się kolumn łukowych. W większości przypadków wartość prądu płynącego w wyprzedzanej kolumnie łukowej jest bliska zeru, a tym samym wzmocnienie elementarnej siły elektrodynamicznej jest ograniczone. Sytuację taką ilustruje rys. 8.3.

Stąd też dalsza analiza oddziaływań elektrodynamicznych zostanie ograniczona do najbardziej prawdopodobnego przypadku, w którym jedna z kolumn łukowych przemieszcza się z większą prędkością i tworzy z szynami doprowadzającymi prąd układ półpętli, a więc do pierwszego przypadku omówionego w rozdziale 2.3 i 2.4.

Drugim istotnym czynnikiem wpływającym na wartości sił występujących w szynach jest wartość chwilowa prądu. W analizowanym przypadku największe siły występują w momencie pojawienia się największej spodziewanej wartości prądu w fazie L1. Jednakże ze względu na rezystancję łuku wartość prądu łukowego nie osiągnie spodziewanej wartości szczytowej i_p, jaka występowałaby w tym samym układzie szynowym w trakcie zwarcia metalicznego.

9.1. Współczynnik ograniczenia prądu zwarciowego i jego wpływ na wartości maksymalne elementarnych sił elektrodynamicznych

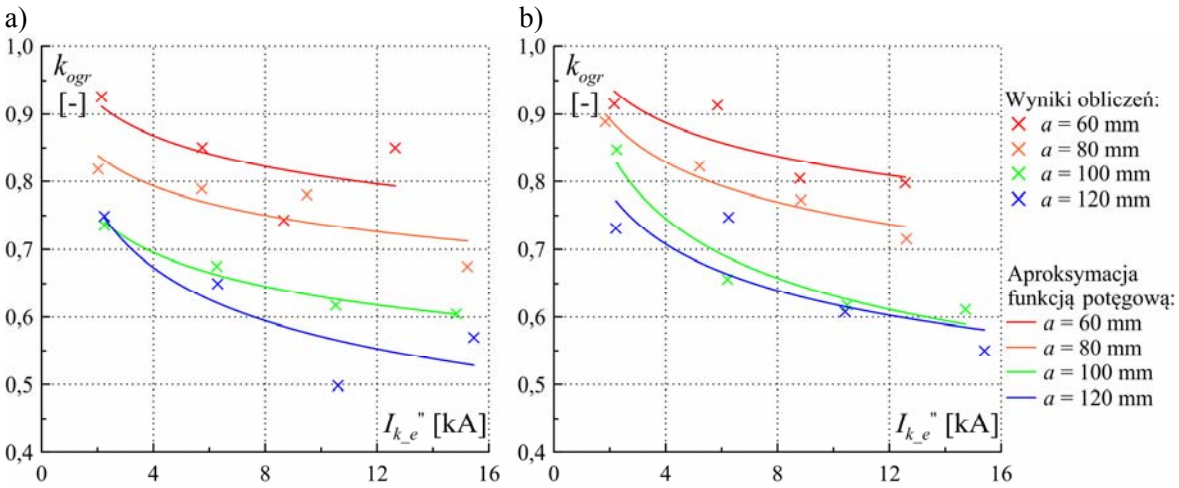
Podstawowym parametrem określającym wpływ rezystancji łuku na wartość prądu zwarcia łukowego jest współczynnik ograniczenia prądu zwarciowego k_{ogr} definiowany zależnością (2.63). Opisany jest on jako stosunek wartości skutecznej prądu zwarcia łukowego I_a do spodziewanej wartości prądu zwarcia metalicznego I_k''. W przypadku uproszczonej analizy można założyć, że wartość maksymalna prądu zwarcia łukowego zmienia się proporcjonalnie do jego wartości skutecznej. Tak więc maksymalna wartość prądu łukowego, przy którym wystąpią maksymalne siły, będzie proporcjonalna do iloczynu współczynnika ograniczenia prądu zwarciowego k_{ogr} i spodziewanej wartości szczytowej prądu i_p. Stąd też siła elementarna działająca na szynę środkową fazy L2, opisana zależnością (2.30), po uwzględnieniu współczynnika ograniczenia prądu zwarciowego k_{ogr} wynosi:

$$\mathrm{d}F_{B1arc} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} N_\alpha k_{ogr}{}^2 i_p{}^2 \,\mathrm{d}l\,. \tag{9.1}$$

Natomiast siła działająca na szynę skrajną L1, po uwzględnieniu współczynnika ograniczenia prądu zwarciowego k_{ogr} we wzorze (2.51), przyjmuje postać:

$$\mathrm{d}F_{A1arc} = -\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{a} N_\alpha k_{ogr}{}^2 i_p{}^2 \,\mathrm{d}l\,, \tag{9.2}$$

Wartości współczynnika ograniczenia prądu zwarciowego k_{ogr} dla analizowanych wartości spodziewanych prądów zwarciowych I_k'' i odstępów a w układach szynowych, zbudowanych z szyn miedzianych i aluminiowych, przedstawiono na rys. 9.2.



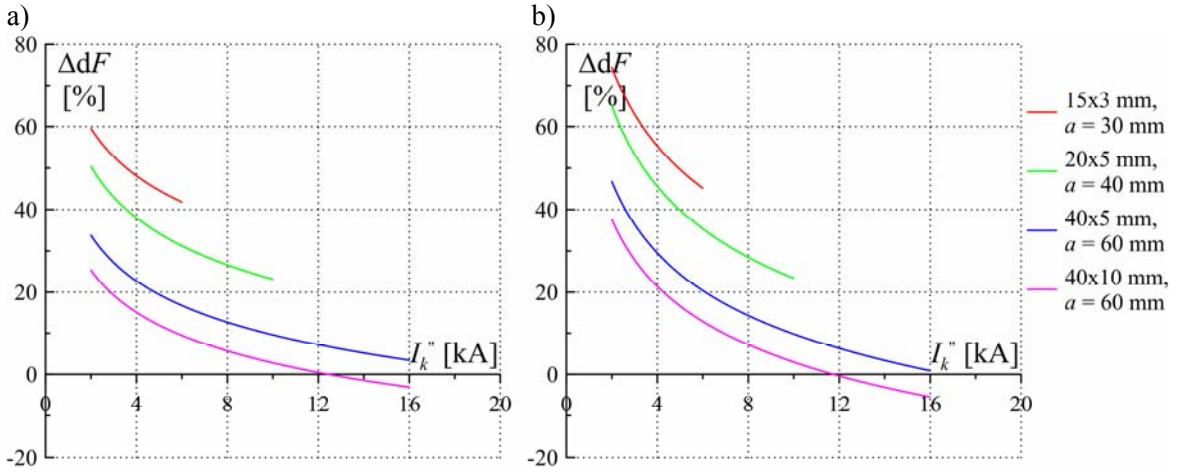
Rys. 9.2. Zależność współczynnika ograniczenia prądu zwarciowego k_{ogr} od spodziewanego prądu zwarciowego I_{k_e}'' dla szyn o profilu 40x5 mm wykonanych z: a) miedzi, b) aluminium

Wartości współczynnika ograniczenia prądu zwarciowego k_{ogr} wyznaczono na podstawie wyników badań laboratoryjnych dwufazowych zwarć łukowych przy prądach symetrycznych (bez udziału składowej nieokresowej).

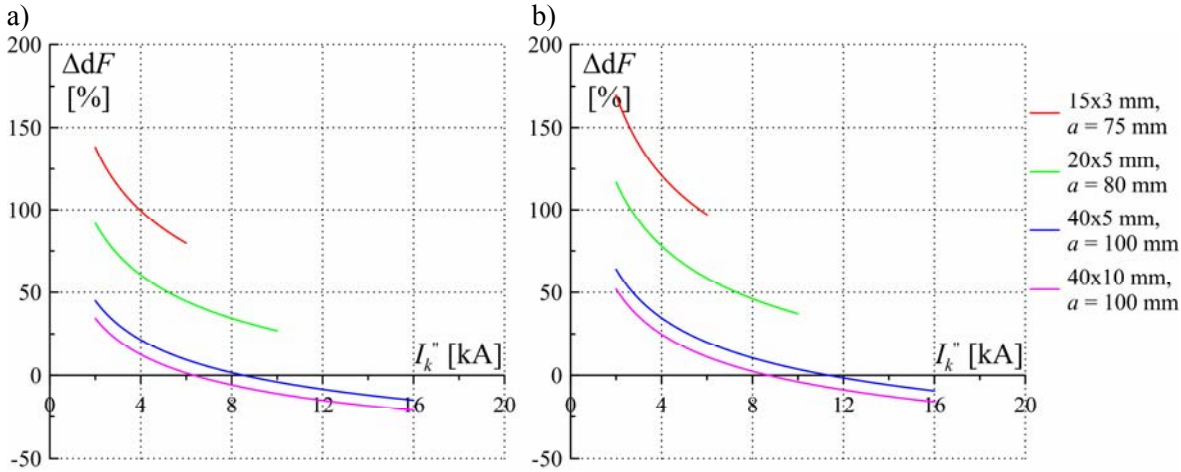
Istotnym parametrem wpływającym na wartość współczynnika k_{ogr} jest sama długość łuku zwarciowego ograniczona odstępem pomiędzy wewnętrznymi krawędziami szyn a_0. Stąd też do analizy różnych profili szyn wykorzystano wyniki obliczeń współczynnika k_{ogr} dla łuku palącego się na szynach o wymiarach 40x5 mm. Z uwagi na identyczne wartości elementarnych sił elektrodynamicznych działających na szynę środkową L2 i skrajną L1 w analizowanym układzie półpętli wytworzonej przez palący się łuk oraz szyny doprowadzające prąd, wyznaczono względny przyrost elektrodynamicznej siły elementarnej $\Delta\mathrm{d}F$ uwzględniający współczynnik ograniczenia prądu zwarciowego k_{ogr}, który opisano zależnością:

$$\Delta \mathrm{d}F = \frac{\mathrm{d}F_{B1arc} - \mathrm{d}F_{B\max}}{\mathrm{d}F_{B\max}} 100\% . \tag{9.3}$$

Zmiany przyrostu elementarnej siły elektrodynamicznej $\Delta \mathrm{d}F$ działającej na szynę środkową lub skrajną, z jednoczesnym uwzględnieniem wpływu współczynnika ograniczenia prądu zwarciowego k_{ogr} w funkcji spodziewanej wartości prądu zwarciowego $I_k^{"}$ zamieszczono na rys. 9.3 i rys. 9.4.



Rys. 9.3. Zależność względnego przyrostu lub zmniejszenia elementarnej siły elektrodynamicznej $\Delta \mathrm{d}F$ działającej na szynę środkową lub skrajną od prądu $I_k^{"}$ dla szyn o profilu prostokątnym: a) miedzianych, b) aluminiowych i minimalnych analizowanych odstępów a



Rys. 9.4. Zależność względnego przyrostu lub zmniejszenia elementarnej siły elektrodynamicznej $\Delta \mathrm{d}F$ działającej na szynę środkową lub skrajną od prądu $I_k^{"}$ dla szyn o profilu prostokątnym: a) miedzianych, b) aluminiowych i maksymalnych analizowanych odstępów a

Do analizy wybrano takie same przekroje szyn i odstępy a, jakie użyto w analizie w rozdziale 2.3 i przedstawiono tab. 2.1 oraz w rozdziale 2.4 w tab. 2.4.

Uwzględnienie współczynnika ograniczenia prądu zwarciowego k_{ogr} w obliczeniach względnego przyrostu elementarnej siły elektrodynamicznej ΔF spowodowało zmniejszenie wartości szczytowych prądów, a tym samym wartości maksymalnych sił elementarnych $\mathrm{d}F_{B1arc}$ i $\mathrm{d}F_{A1arc}$ w porównaniu do przypadku, w którym pominięto oddziaływanie rezystancji łuku na wartość prądu zwarciowego.

Wartości maksymalne sił elementarnych $\mathrm{d}F_{B1arc}$ i $\mathrm{d}F_{A1arc}$ działających na szyny z jednej strony wzrastają w miarę zmniejszenia wymiarów b i h szyn oraz wzrostu odstępu a. Z drugiej strony natomiast ze wzrostem odstępu a następuje zmniejszenie współczynnika k_{ogr}, nawet do takiego stopnia, że przyrost elektrodynamicznej siły elementarnej $\Delta \mathrm{d}F$ jest ujemny. Oznacza to, że wartości elementarnych sił elektrodynamicznych $\mathrm{d}F_{B1arc}$ i $\mathrm{d}F_{A1arc}$ nie przekroczą maksymalnej wartości siły $\mathrm{d}F_{B\max}$, jaka wystąpi w trakcie zwarcia metalicznego.

Również w miarę wzrostu spodziewanej wartości prądu zwarciowego I_k'' następuje zwiększenie stopnia ograniczenia prądu zwarciowego, a tym samym i elementarnych sił. Oznacza to, że w przypadku spodziewanych wartości prądów zwarciowych I_k'' mieszczących się w górnym zakresie analizowanych wielkości, wzrost elementarnych sił jest niewielki i nie powinien spowodować przekroczenia dopuszczalnych naprężeń gnących w szynach. Sytuacja ta dotyczy analizowanych szyn o wymiarach 40x5 mm i 40x10 mm. Przy analizowanych spodziewanych prądach zwarciowych I_k'' wytrzymałość elektrodynamiczna układu szynowego zbudowanego z szyn o podanych wymiarach w większości przypadków określona jest z dużym zapasem. Tak więc szanse przekroczenia dopuszczalnych wartości naprężeń mechanicznych, czy wypadkowych sił elektrodynamicznych, w tych przypadkach są znikome.

Inaczej wygląda sytuacja w przypadku układów szynowych wykonanych z szyn o wymiarach np. 15x3 mm i 20x5 mm. Większość układów szynowych zbudowanych z tego rodzaju szyn charakteryzuje się niewielkim marginesem bezpieczeństwa, jeśli chodzi o wartości dopuszczalnych naprężeń mechanicznych i wypadkowych sił elektrodynamicznych działających na podpory. Szczególnie dotyczy to układów, w których odstęp a jest porównywalny z wymiarem b szyny. Tego typu układy szynowe występują w rozdzielnicach, w których spodziewane prądy zwarciowe są stosunkowo niewielkie, rzędu od 6 kA do 10 kA. Wszystko uwarunkowane jest również od doboru długości przęsła układu szynowego. Jednakże, ze względu na niewielkie ograniczenie prądu zwarciowego, wzmocnienie elementarnych sił elektrodynamicznych $\mathrm{d}F_{B1arc}$ i $\mathrm{d}F_{A1arc}$

w trakcie zwarcia łukowego jest znaczące. Stąd przekroczenie dopuszczalnych wartości naprężeń mechanicznych czy wypadkowych sił elektrodynamicznych, działających na podpory, wywołane przemieszczającym się łukiem awaryjnym jest prawdopodobne.

9.2. Wyniki obliczeń wartości maksymalnych sił elektrodynamicznych działających na szyny w trakcie zwarcia łukowego

Wprowadzenie współczynnika ograniczenia prądu k_{ogr} do obliczeń maksymalnych wartości elektrodynamicznych sił elementarnych działających na szyny zakłada proporcjonalną zmianę wartości maksymalnej prądu zwarciowego w stosunku do jego wartości skutecznej. Sama rezystancja łuku zwarciowego dodatkowo powoduje zmniejszenie współczynnika udaru κ, a tym samym przyczynia się do tego, że wartość maksymalna prądu zwarcia łukowego w porównaniu do spodziewanej wartości szczytowej i_p będzie maleć w większym stopniu, niż by to wynikało ze współczynnika k_{ogr}.

Dodatkowo należy zaznaczyć, że w trakcie trójfazowego zwarcia łukowego w płaskim układzie szyn występują dwie kolumny łukowe i związane z nimi rezystancje nie zmieniają się jednakowo, co prowadzi do odkształcenia przebiegów prądów fazowych i zmiany ich wzajemnego przesunięcia fazowego. Wpływ poszczególnych rezystancji kolumn łukowych na prądy fazowe zwarcia łukowego wyraźnie widoczny jest dla układów, w których odstęp pomiędzy wewnętrznymi krawędziami a_0 szyn przekracza 40 mm. Przy większych odstępach a_0 może dochodzić do zgaszenia jednego z łuków i przeobrażenia się trójfazowego zwarcia łukowego w zwarcie dwufazowe. Stąd istnieje konieczność przeprowadzenia dokładniejszej analizy oddziaływań elektrodynamicznych występujących w układach szynowych, w której do obliczeń wartości chwilowych prądów zwarciowych oraz położenia poszczególnych kolumn łukowych względem siebie wykorzystany zostanie zaproponowany model obliczeniowy dynamiki niskonapięciowego łuku awaryjnego.

Obliczenia maksymalnych wartości elementarnych sił elektrodynamicznych działających na szynę skrajną i środkową płaskiego układu szyn przeprowadzono dla wybranych szyn wykonanych z miedzi i aluminium o profilu prostokątnym. Odstęp a dostosowano tak do wymiarów szyn, aby odległość pomiędzy wewnętrznymi krawędziami szyn a_0 mieściła się w zakresie 10 ÷ 80 mm. Zakres spodziewanych prądów zwarciowych $I_k^{"}$ dostosowano do zakresu badanych i wykorzystanych w modelu obliczeniowym prądów

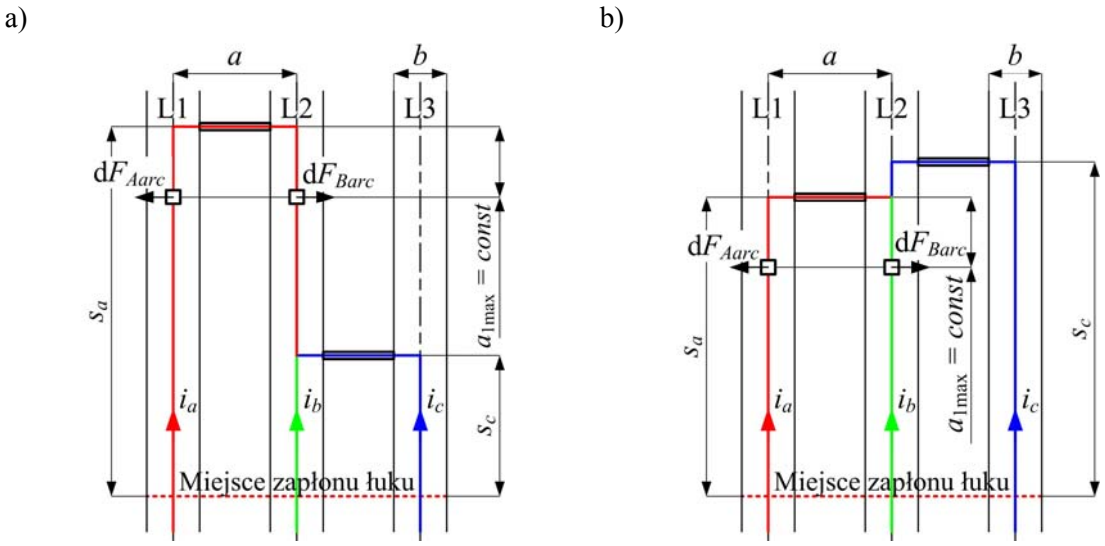
zwarciowych, przy czym współczynniki mocy obwodu zwarciowego cosφ dobrano zgodnie z literaturą [13] i [95]. Wybrane wartości analizowanych spodziewanych prądów zwarciowych $I_k^{"}$ i współczynników mocy obwodu zwarciowego cosφ zamieszczono w tab. 9.1.

Tab. 9.1. Zakres analizowanych spodziewanych prądów zwarciowych i współczynników mocy obwodu zwarciowego [13]

Lp	Spotykane możliwe wartości spodziewanych prądów zwarciowych $I_k^{"}$ i współczynników mocy cosφ			Wybrane do analizy parametry zwarciowe	
	$I_k^{"}$	cosφ_{min}	cosφ_{max}	$I_k^{"}$	cosφ
	[kA]	[-]	[-]	[kA]	[-]
1	0,5	0,95	1,00	-	-
2	$0,5 < I_k^{"} \leq 1,5$	0,93	0,98	-	-
3	$1,5 < I_k^{"} \leq 3$	0,85	0,9	2	0,85
4	$3 < I_k^{"} \leq 4,5$	0,75	0,8	4	0,75
5	$4,5 < I_k^{"} \leq 6$	0,65	0,7	6	0,65
6	$6 < I_k^{"} \leq 10$	0,45	0,5	8, 10	0,45
7	$10 < I_k^{"} \leq 25$	0,20	0,25	12, 16	0,20

Analiza składała się z trzech etapów. W pierwszym etapie obliczono wartość maksymalną elementarnej siły elektrodynamicznej d$F_{B\max}$ działającej na szynę środkową L2, jaka wystąpi w analizowanym układzie szynowym przy określonych parametrach obwodu zwarciowego, przy zwarciu trójfazowym metalicznym.

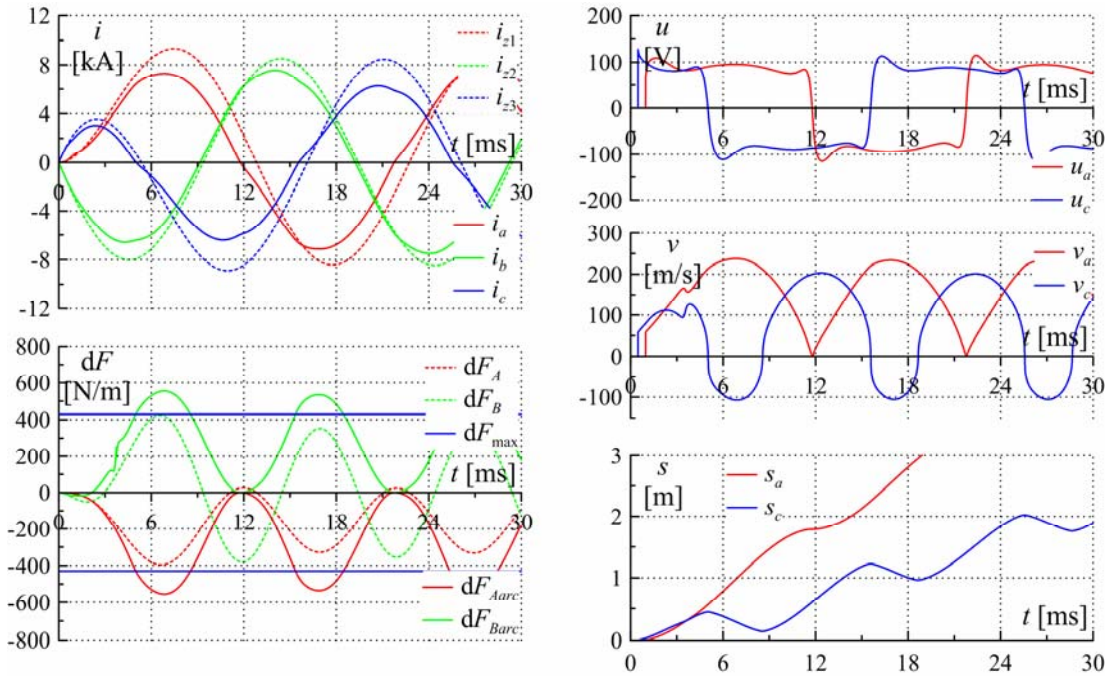
Drugi etap obliczeń polegał na wyznaczeniu elementarnych sił elektrodynamicznych dF_{Barc} i dF_{Aarc} występujących w trakcie zwarcia łukowego. Elementarne siły elektrodynamiczne dF_{Barc} i dF_{Aarc} obliczono w odległości $a_{1\max}$ od miejsca usytuowania kolumny łukowej łuku palącego się pomiędzy szynami L1 i L2. Z uwagi na przemieszczanie się kolumn łukowych analizowany punkt występowania elementarnych sił elektrodynamicznych dF_{Barc}, dF_{Aarc} znajduje się poniżej i w stałej odległości od miejsca usytuowania ww. kolumny łukowej. Położenie analizowanego punktu występowania elementarnych sił elektrodynamicznych względem przemieszczających się kolumn zwarcia łukowego przedstawiono na rys. 9.5. Zmienia się ono tak samo, jak zmienia się droga s_a pokonywana przez łuk palący się pomiędzy szynami L1 oraz L2, i wynosi $s_a - a_{1\max}$.



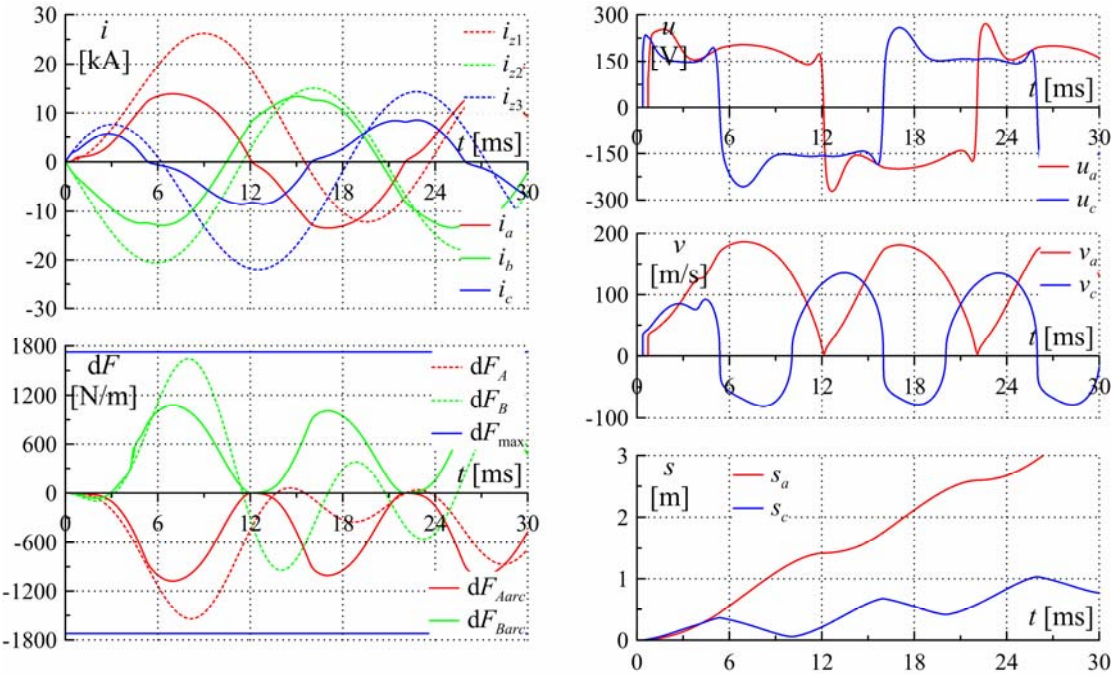
Rys. 9.5. Położenie punktów występowania maksymalnych wartości jednostkowej siły elektrodynamicznej działającej na szynę skrajną dF_{Aarc} i środkową dF_{Barc} w przypadku:
a) gdy jedna z kolumn łukowych trójfazowego zwarcia łukowego porusza się z większa prędkością,
b) obie kolumny łukowe poruszają się z podobną prędkością

Obliczenia prądów zwarciowych zwarcia metalicznego i prądów zwarcia łukowego wykonano dla jednej wartości kąta załączenia zwarcia Ψ_Z = 0º. Wybór kąta załączenia zwarcia Ψ_Z, który jest mierzony względem napięcia fazowego fazy L1, podyktowany jest z jednej strony wystąpieniem prądu udarowego zwarcia metalicznego i_p w fazie skrajnej L1, a tym samym największych sił elektrodynamicznych działających na szyny. Z drugiej strony, przy tej wartości kąta załączenia zwarcia Ψ_Z, występuje przypadek ułożenia dwóch kolumn łukowych, z których jedna przemieszcza się szybciej i tworzy z układem szynowym analizowany układ półpętli.

Przypadek, w którym występuje zwiększenie elementarnych sił elektrodynamicznych dF_{Barc} i dF_{Aarc}, w porównaniu do elementarnych sił dF_B i dF_A oraz elementarnej siły elektrodynamicznej dF_{max}, wyliczonej na podstawie obowiązujących norm, zamieszczono na rys. 9.6. Ilustrację graficzną pokazującą przypadek ograniczenia prądu zwarciowego przez rezystancję łuku i tym samym elementarnych sił elektrodynamicznych dF_{Barc} i dF_{Aarc}, w stosunku do elementarnych sił dF_B, dF_A i dF_{max}, przedstawia rys. 9.7.



Rys. 9.6. Przebiegi prądów zwarciowych, wartości elementarnych sił elektrodynamicznych, napięć, prędkości i dróg kolumn trójfazowego łuku zwarciowego; szyny P 15x3 mm, a = 35 mm, $I_k^{"}$ = 6 kA, cosφ = 0,65, Ψ_Z = 0º, I_a = 5,05 kA, I_b = 5,40 kA, I_c = 4,41 kA, U_a = 88 V, U_c = 86 V, $v_{a\text{mean}}$ = 157 m/s, $v_{c\text{mean}}$ = 67 m/s



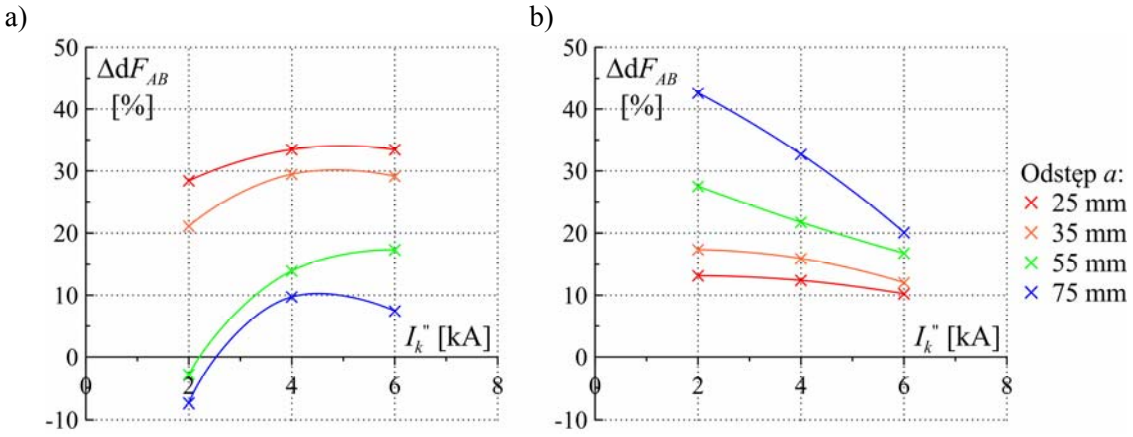
Rys. 9.7. Przebiegi prądów zwarciowych, wartości elementarnych sił elektrodynamicznych, napięć, prędkości i dróg kolumn trójfazowego łuku zwarciowego; szyny AP 30x3 mm, a = 70 mm, $I_k^{"}$ = 12 kA, cosφ = 0,2, Ψ_Z = 0º, I_a = 9,40 kA, I_b = 9,92 kA, I_c = 5,96 kA, U_a = 187 V, U_c = 176 V, $v_{a\text{mean}}$ = 120 m/s, $v_{c\text{mean}}$ = 28 m/s

Trzeci etap obliczeń polegał na wyznaczeniu względnych przyrostów siły elementarnej $\Delta \mathrm{d}F_{AB}$, występujących w szynie skrajnej i środkowej, w analizowanym przypadku półpętli, zgodnie z zależnością:

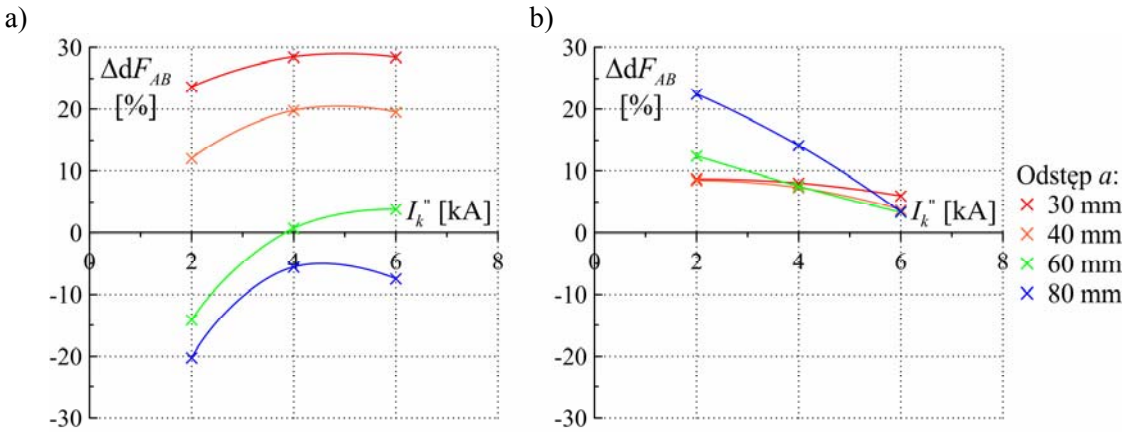
$$\Delta \mathrm{d}F_{AB} = \frac{\left|\mathrm{d}F_{Barc\max}\right| - \left|\mathrm{d}F_{B\max}\right|}{\left|\mathrm{d}F_{B\max}\right|} 100\%, \tag{9.4}$$

przy czym $\mathrm{d}F_{Barc\max}$ jest maksymalną wartością elementarnej siły elektrodynamicznej działającej na szynę środkową w trakcie zwarcia łukowego.

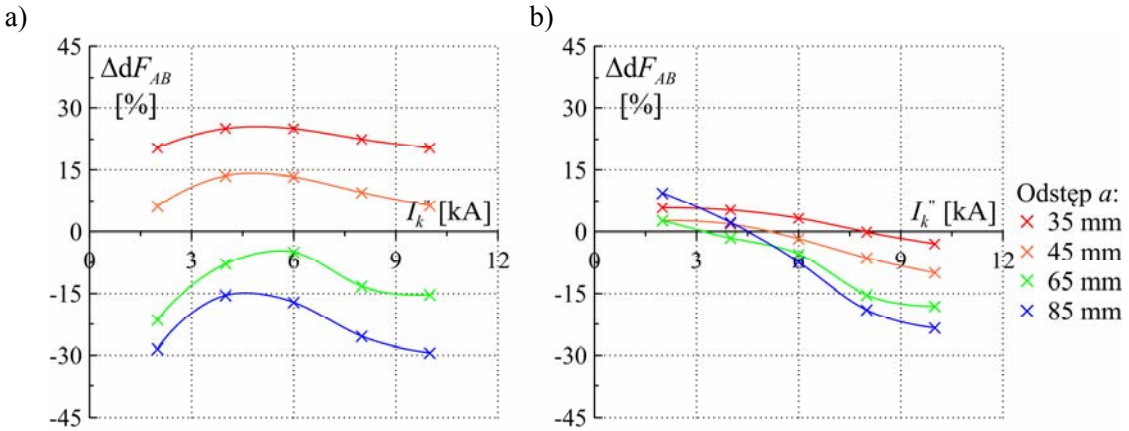
Do analizy porównawczej wartości maksymalnych elementarnej siły elektrodynamicznej działającej na szynę środkową w trakcie zwarcia łukowego $\mathrm{d}F_{Barc\max}$ i elementarnej siły elektrodynamicznej występującej w trakcie zwarcia metalicznego $\mathrm{d}F_{B\max}$ wykorzystano wybrane układy szynowe zbudowane z szyn prostokątnych. Analizowane przekroje poprzeczne szyn odpowiadają prądom znamionowym rozdzielnic zasilanych z transformatorów, których moc znamionowa nie przekracza 630 kVA. Uzyskiwane przy tych mocach transformatorów spodziewane wartości prądów zwarciowych I_k'' pokrywają się z zakresem badanych prądów zwarciowych. Ilustracja graficzna przedstawiająca przyrosty elementarnej siły elektrodynamicznej $\Delta \mathrm{d}F_{AB}$ w funkcji spodziewanej wartości prądu zwarciowego I_k'', dla różnych odstępów a dla szyn o wymiarach 15x3 mm, jest zamieszczona na rys. 9.8. Dla szyn o wymiarach: 20x3 mm wyniki analizy przedstawia rys. 9.9, 25x3 mm – rys. 9.10, 30x3 mm – rys. 9.11, 40x5 mm – rys. 9.12.



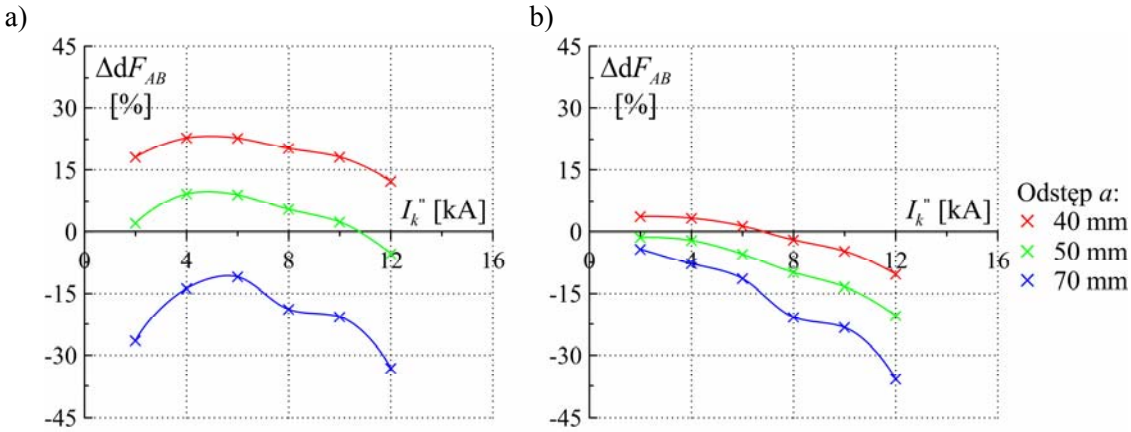
Rys. 9.8. Zależność względnego przyrostu lub zmniejszenia maksymalnej elementarnej siły elektrodynamicznej $\Delta \mathrm{d}F_{AB}$ od spodziewanej wartości prądu zwarciowego I_k'' w układach szynowych wykonanych z: a) miedzi, b) aluminium, o wymiarach 15x3 mm i różnych odstępach a



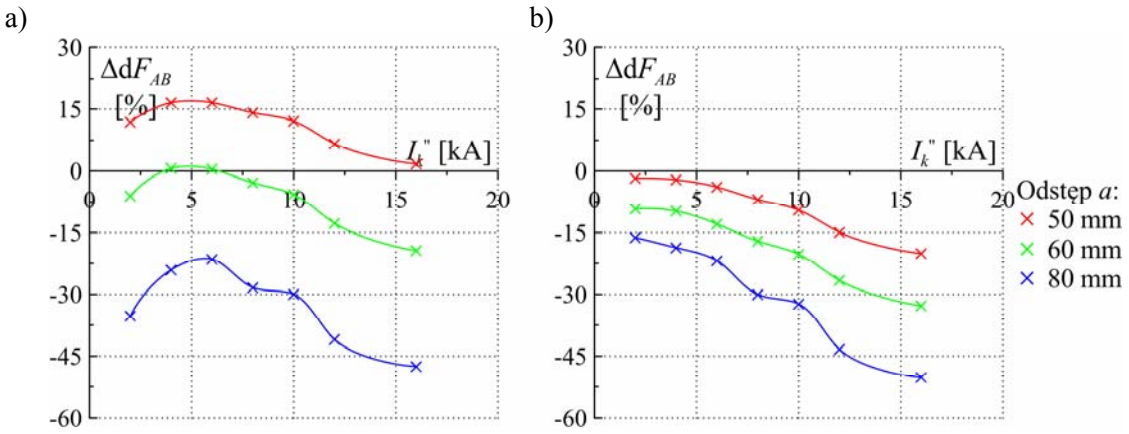
Rys. 9.9. Zależność względnego przyrostu lub zmniejszenia maksymalnej elementarnej siły elektrodynamicznej ΔdF_{AB} od spodziewanej wartości prądu zwarciowego $I_k^{"}$ w układach szynowych wykonanych z: a) miedzi, b) aluminium, o wymiarach 20x3 mm i różnych odstępach a



Rys. 9.10. Zależność względnego przyrostu lub zmniejszenia maksymalnej elementarnej siły elektrodynamicznej ΔdF_{AB} od spodziewanej wartości prądu zwarciowego $I_k^{"}$ w układach szynowych wykonanych z: a) miedzi, b) aluminium, o wymiarach 25x3 mm i różnych odstępach a



Rys. 9.11. Zależność względnego przyrostu lub zmniejszenia maksymalnej elementarnej siły elektrodynamicznej ΔdF_{AB} od spodziewanej wartości prądu zwarciowego $I_k^{"}$ w układach szynowych wykonanych z: a) miedzi, b) aluminium, o wymiarach 30x3 mm i różnych odstępach a



Rys. 9.12. Zależność względnego przyrostu lub zmniejszenia maksymalnej elementarnej siły elektrodynamicznej ΔdF_{AB} od spodziewanej wartości prądu zwarciowego I_k'' w układach szynowych wykonanych z: a) miedzi, b) aluminium, o wymiarach 40x5 mm i różnych odstępach a

Uwzględnienie w obliczeniach elementarnych sił elektrodynamicznych, działających na szynę środkową lub skrajną, w analizowanym przypadku ułożenia kolumn trójfazowego zwarcia łukowego, a także zmieniającej się w czasie w funkcji prądu łuku rezystancji łuku i pozycji kolumny łukowej, powoduje obniżenie wartości maksymalnej elementarnej siły elektrodynamicznej. Stopień zmniejszenia elementarnej siły elektrodynamicznej uwarunkowany jest przede wszystkim od odstępu a, który bardziej wpływa na ograniczenie prądu zwarcia łukowego niż na jej wzrost wywołany budową układu szynowego. Dla przykładu, w układzie szyn o wymiarach 40x5 mm, w przypadku nieuwzględnienia wpływu rezystancji łuku na wynik prądów i tym samym elementarnych sił, względny przyrost wartości maksymalnej elementarnej siły elektrodynamicznej zmienia się w zakresie od 65% dla szyn, w których a = 60 mm do 133% dla tego samego układu przy a = 100 mm (tab. 2.1, tab. 2.2 i tab. 2.4).

W przypadku uwzględnienia wpływu rezystancji łuku na wartość prądu zwarciowego, wyrażonego poprzez współczynnik ograniczenia prądu zwarciowego k_{ogr}, względny przyrost wartości maksymalnej elementarnej siły elektrodynamicznej dla tych samych szyn wykonanych z miedzi maleje wraz ze wzrostem spodziewanego prądu zwarciowego I_k'' w zakresie 34% ÷ 3% (rys. 9.3a) przy a = 60 mm. W przypadku szyn aluminiowych względny przyrost wartości maksymalnej elementarnej siły elektrodynamicznej wynosi 47% dla prądu I_k'' = 2 kA i maleje do 1% przy I_k'' = 16 kA (rys. 9.3b). Zwiększenie odstępu a do wartości 100 mm powoduje, że dla prądów I_k'' z przedziału 2 ÷ 8,5 kA, w przypadku szyn miedzianych, względny przyrost wartości maksymalnej elementarnej siły elektrodynamicznej ΔF zmienia się w przedziale

0% ÷ 34%, gdzie większa wartość odpowiada prądowi $I_k^{"}$ = 2 kA. Dla spodziewanych prądów zwarciowych $I_k^{"}$ > 8,5 kA wpływ rezystancji łuku (wyrażony poprzez współczynnik ograniczenia prądu k_{ogr}) na wartość prądu zwarcia łukowego jest na tyle duży, że nie występuje wzrost elementarnych sił elektrodynamicznych $\mathrm{d}F_{B1arc}$ i $\mathrm{d}F_{A1arc}$ w porównaniu do siły $\mathrm{d}F_{B\max}$ (rys. 9.4a). Podobnie jest w przypadku szyn aluminiowych, gdzie dla prądów $I_k^{"}$ z przedziału 2 ÷ 11 kA względny przyrost wartości maksymalnej elementarnej siły elektrodynamicznej ΔF zmienia się w przedziale 0% ÷ 52% (większa wartość odpowiada prądowi $I_k^{"}$ = 2 kA). Dla spodziewanych prądów zwarciowych $I_k^{"}$ > 11 kA wartości maksymalne elementarnych sił elektrodynamicznych $\mathrm{d}F_{B1arc}$ i $\mathrm{d}F_{A1arc}$ nie przekraczają wartości siły $\mathrm{d}F_{B\max}$ (rys. 9.4b).

Uwzględniając w obliczeniach prądów zwarciowych i maksymalnych wartości elektrodynamicznych sił elementarnych wpływ rezystancji łuku oraz położenia kolumn łuku zwarciowego za pomocą, zaproponowanego w rozdziale 4, modelu łuku zwarciowego, można zauważyć, że dla tego samego układu szyn względny przyrost wartości maksymalnej elementarnej siły elektrodynamicznej ΔF_{AB} znacznie maleje. W przypadku szyn miedzianych o wymiarach 40x5 mm przyrost wartości maksymalnej elementarnej siły elektrodynamicznej ΔF_{AB} jest na poziomie kilku procent, przy a = 60 mm i prądach $I_k^{"}$ mieszczących się w przedziale 3,6 ÷ 6,5 kA (rys. 9.12a). W pozostałym zakresie prądów zwarciowych $I_k^{"}$ następuje zmniejszenie wartości maksymalnej siły elektrodynamicznej $\mathrm{d}F_{Barc\max}$ poniżej wartości siły $\mathrm{d}F_{B\max}$. Wraz ze wzrostem odstępu a wartość maksymalna siły elektrodynamicznej $\mathrm{d}F_{Barc\max}$ maleje do około 50% wartości siły $\mathrm{d}F_{B\max}$ dla układu, w którym a wynosi zaledwie 80 mm.

Porównując ze sobą wszystkie analizowane układy szyn miedzianych, w miarę wzrostu a elementarna siła elektrodynamiczna $\mathrm{d}F_{Barc\max}$ powinna wzrastać. Jednak rezystancja łuku powoduje silniejsze ograniczenie prądu łukowego, a tym samym przyczynia się do zmniejszenia przyrostu elementarnej siły $\Delta\mathrm{d}F_{AB}$ w całym zakresie analizowanych wymiarów szyn. Natomiast dla niektórych układów szynowych zbudowanych z szyn aluminiowych, tj. dla szyn o wymiarach 15x3 mm występuje sytuacja odwrotna (rys. 9.8b). Wraz ze wzrostem odstępu a zwiększa się przyrost elementarnej siły elektrodynamicznej $\Delta\mathrm{d}F_{AB}$ w całym zakresie prądów $I_k^{"}$. Dla szyn o wymiarach 20x3 mm i 25x3 mm występuje połączenie dwóch przypadków (rys. 9.9b, rys. 9.10b). W zakresie małych prądów zwarciowych $I_k^{"}$ następuje wzrost $\Delta\mathrm{d}F_{AB}$, wywołany wzrostem odstępu a. Następnie wraz ze wzrostem spodziewanych wartości prądów zwarciowych $I_k^{"}$,

ograniczenie prądu, wywołane rezystancją łuku, powoduje zmniejszenie przyrostu elementarnej siły $\Delta \mathrm{d}F_{AB}$. W przypadku szyn o większych wymiarach, tj. dla szyn 30x3 mm i 40x5 mm, trend zmian przyrostu elementarnej siły elektrodynamicznej $\Delta \mathrm{d}F_{AB}$ od prądu $I_k^{"}$ i a jest porównywalny dla układów szynowych wykonanych z miedzi lub aluminium.

Tak więc, w przypadku układów szynowych zbudowanych z szyn o wymiarach 40x5 mm i większych, rezystancja łuku powoduje ograniczenie prądu do tego stopnia, że obliczona elementarna siła elektrodynamiczna $\mathrm{d}F_{Barc\max}$ nie przekracza wartości elementarnej siły $\mathrm{d}F_{B\max}$ wyznaczonej dla prostoliniowego układu szynowego, w którym płyną prądy zwarcia metalicznego. Przeprowadzona analiza wskazuje, że w układzie zbudowanym z szyn 40x5 mm i większych, w których odstęp pomiędzy wewnętrznymi krawędziami szyn a_0 jest większy od 20 mm, nie występuje przekroczenie wartości sił elementarnych w trakcie zwarcia łukowego, tj. $\Delta \mathrm{d}F_{AB} < 0\%$.

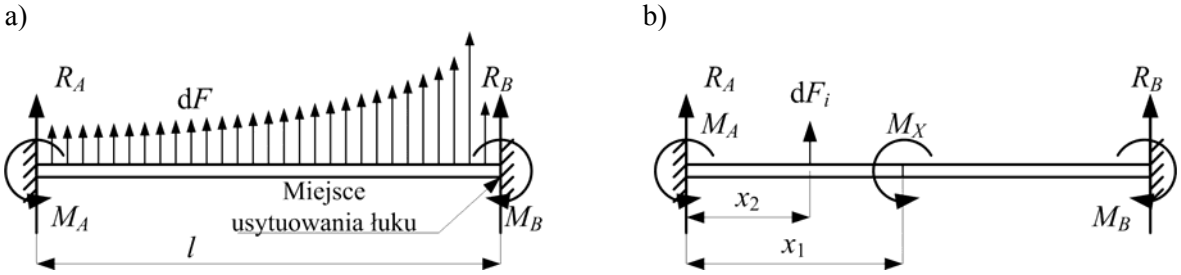
Pomimo znaczącego wpływu rezystancji łuku na wartości prądów zwarciowych, praktycznie w każdym z analizowanych pod względem wymiarowym układzie szyn, zauważono wzrost elementarnej siły elektrodynamicznej $\mathrm{d}F_{Barc\max}$ o ok. $10 \div 50\%$ wartości elementarnej siły elektrodynamicznej $\mathrm{d}F_{B\max}$ obliczonej dla prostoliniowego układu szynowego, w którym płyną prądy zwarcia metalicznego. Wzrost elementarnej siły elektrodynamicznej $\mathrm{d}F_{Barc\max}$ jest silniejszy dla układów szynowych zbudowanych z szyn o niewielkich wymiarach, np. 15x3 mm, 20x3 mm, 30x3 mm. Również w tego typu układach szynowych margines bezpieczeństwa dotyczący wytrzymałości elektrodynamicznej jest niewielki, a wzrost elementarnej siły elektrodynamicznej wywołanej obecnością łuku zwarciowego może powodować wzrost naprężeń mechanicznych do takiego stopnia, że przekroczą one wartości dopuszczalne.

9.3. Analiza naprężeń mechanicznych występujących w szynach w trakcie zwarcia łukowego

W celu zweryfikowania wyników obliczeń przyrostów sił elementarnych wywołanych obecnością przemieszczającego się wzdłuż szyn łuku i ich wpływu na narażenia elektrodynamiczne występujące w układzie szynowym, przeprowadzono uproszczone obliczenia naprężeń mechanicznych wywołanych nierównomiernym rozkładem sił elementarnych wzdłuż układu szynowego, wywołanym przez

przemieszczający się łuk zwarciowy. Obliczenia wykonano dla takich samych danych przedstawionych w rozdziale 9.2 i dotyczących kąta załączenia zwarcia Ψ_Z, rodzajów układów szynowych oraz spodziewanych prądów zwarciowych I_k''.

Analizę naprężeń mechanicznych wykonano w układzie szyn obustronnie utwierdzonych, zbudowanym z jednego przęsła, w którym kolumna łuku poruszającego się szybciej osiąga punkt utwierdzenia szyny. Z uwagi na duże odległości pomiędzy przemieszczającymi się kolumnami trójfazowego łuku awaryjnego, szczególnie w przypadku dużych prądów zwarciowych I_k'', położenie drugiej kolumny łukowej, poruszającej się z mniejszą prędkością nie zostało uwzględnione. Ilustrację graficzną przedstawiającą analizowaną jedną z szyn układu szynowego i rozkład obciążenia elektrodynamicznego w układzie półpętli wytworzonej przez kolumnę łukową łuku zwarciowego i szyny przedstawiono na rys. 9.13.



Rys. 9.13. Przęsło układu szynowego obustronnie utwierdzonego: a) rozkład sił elementarnych dF wzdłuż przęsła oraz b) momenty gnące i siły reakcji w podporach

Zgodnie z rys. 9.13 w punktach podparcia analizowanego przęsła układu szynowego występują momenty gnące M_A i M_B, określone zgodnie zależnościami [56, 75]:

$$M_A = \sum_{i=0}^{i=l} \mathrm{d}F_i \frac{x_i \left(l - x_i\right)^2}{l^2}, \tag{9.5}$$

$$M_B = \sum_{i=0}^{i=l} \mathrm{d}F_i \frac{x_i^2 \left(l - x_i\right)}{l^2}, \tag{9.6}$$

oraz siły reakcji R_A i R_B, które wyznaczane są na podstawie wzorów [56, 75]:

$$R_A = \sum_{i=0}^{i=l} \mathrm{d}F_i \frac{\left(l - x_i\right)^2}{l^3}\left(2x_i + l\right), \tag{9.7}$$

$$R_B = \sum_{i=0}^{i=l} \mathrm{d}F_i \frac{x_i^2}{l^3}\left(3l - 2x_i\right). \tag{9.8}$$

Moment gnący M_x działający na szynę w wybranym miejscu przęsła x_1 o długości l wyznaczono na podstawie równania:

$$M_x = M_A - R_A x_1 + \sum_{i=0}^{i=x_1} \mathrm{d}F_i \left(x_1 - x_2 \right). \tag{9.9}$$

Maksymalną wartość naprężeń mechanicznych gnących $\sigma_{arc\max}$ w analizowanym układzie szynowym obliczono zgodnie ze wzorem [4, 56, 75]:

$$\sigma_{arc\max} = \frac{M_{x\max}}{Z_x}, \tag{9.10}$$

przy czym $M_{x\max}$ jest maksymalną wartością momentu gnącego M_x wyznaczonego w przęśle, a Z_x jest wskaźnikiem wytrzymałości szyny na zginanie.

Obliczona zgodnie ze wzorem (9.10) maksymalna wartość naprężenia $\sigma_{arc\max}$ występująca w szynach w trakcie zwarcia łukowego była porównywana z maksymalną wartością naprężenia σ_m, występującą w takim samym układzie szynowym, w trakcie przepływu prądów zwarciowych zwarcia metalicznego zgodnie ze wzorem:

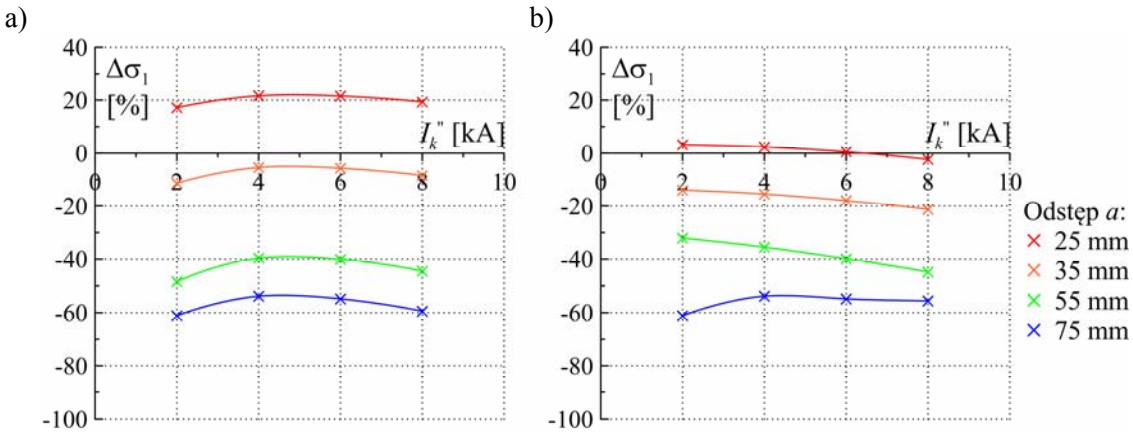
$$\Delta\sigma_1 = \frac{\sigma_{arc\max}}{\sigma_m} 100\% . \tag{9.11}$$

Naprężenie σ_m wyznaczono zgodnie z równaniem [74, 91, 93, 94]:

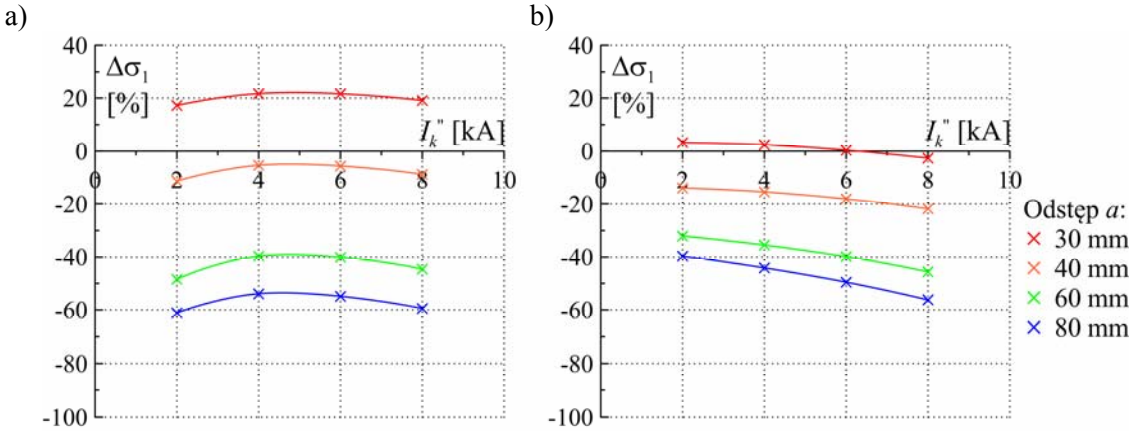
$$\sigma_m = V_\sigma V_r \beta \frac{F_{\max} l}{8 Z_x}, \tag{9.12}$$

przy czym współczynnik V_r = 1, zaś β = 0,5. Współczynnik V_σ, określający stosunek naprężenia dynamicznego do statycznego w przewodzie fazowym, wyznaczany jest zgodnie z [93, 94], a jego wartość zmienia się w granicach 0,4 ÷ 2,7. Wybór długości przęsła l układu szynowego uwarunkowany został wytrzymałością elektrodynamiczną układu szynowego, obliczaną dla zadanej wartości spodziewanego prądu zwarciowego $I_k^{"}$, odstępem a i wymiarami szyn. W przypadku dużych odstępów a i niewielkich spodziewanych prądów zwarciowych $I_k^{"}$ długość przęsła l ograniczono do 1 m.

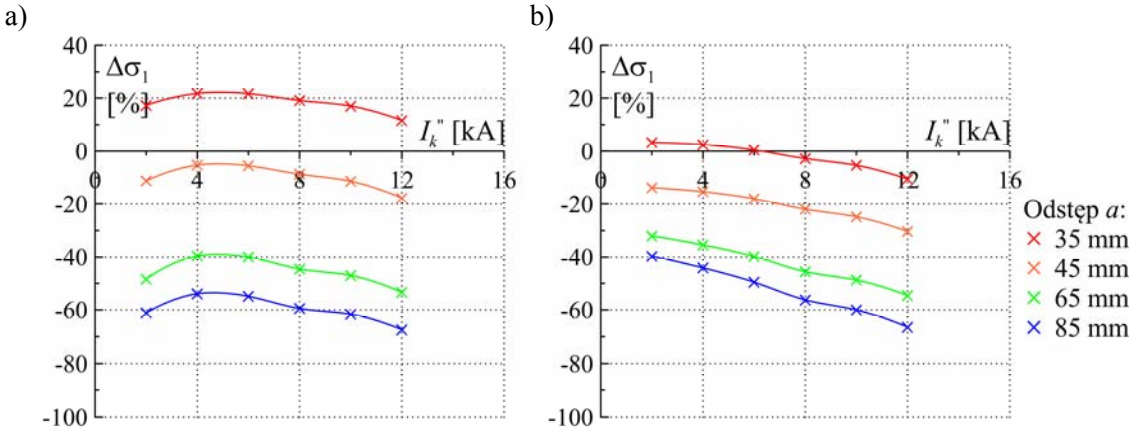
W celu określenia trendu zmian przyrostów naprężeń $\Delta\sigma_1$ wykonano obliczenia dla szerszego, w porównaniu do analizy przyrostów sił elementarnych, zakresu spodziewanych prądów zwarciowych $I_k^{"}$. Wyniki obliczeń przyrostów naprężeń $\Delta\sigma_1$, w funkcji spodziewanej wartości prądu zwarciowego $I_k^{"}$ i rożnych odstępów a, występujących w analizowanych układach szynowych przedstawiono kolejno na: rys. 9.14 – 15x3 mm, rys. 9.15 – 20x3 mm, rys. 9.16 – 25x3 mm, rys. 9.17 – 30x3 mm, rys. 9.18 – 40x5 mm.



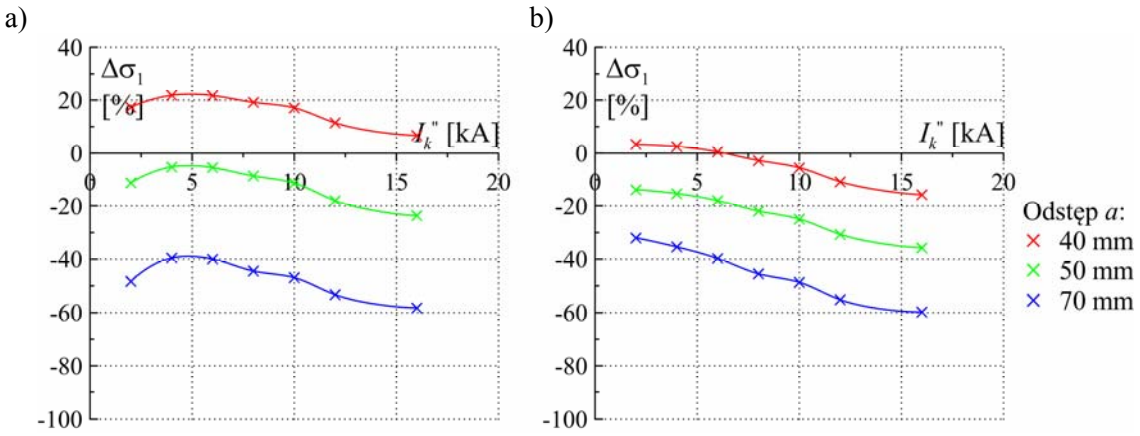
Rys. 9.14. Zależność względnego przyrostu lub zmniejszenia naprężeń $\Delta\sigma_1$ od spodziewanego prądu zwarciowego $I_k^{"}$ w układach szynowych wykonanych z: a) miedzi, b) aluminium, o wymiarach 15x3 mm i różnych odstępach a



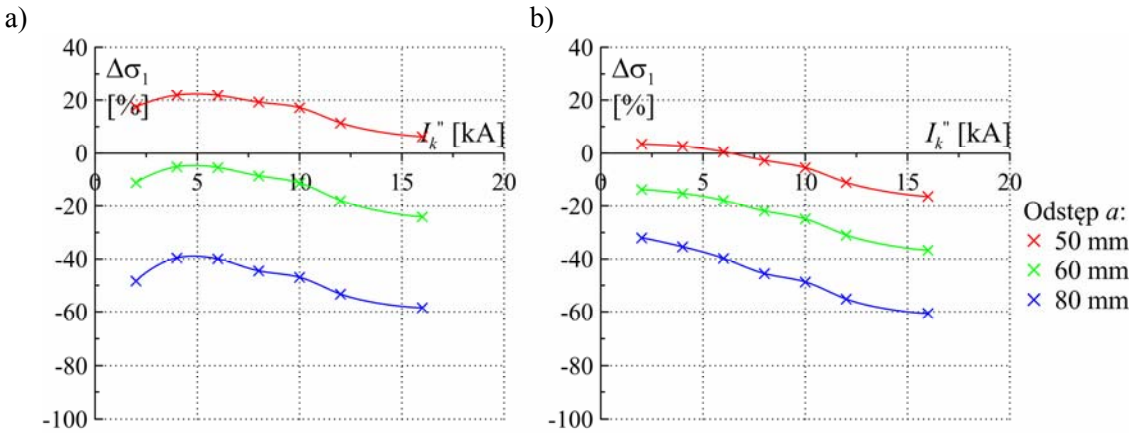
Rys. 9.15. Zależność względnego przyrostu lub zmniejszenia naprężeń $\Delta\sigma_1$ od spodziewanego prądu zwarciowego $I_k^{"}$ w układach szynowych wykonanych z: a) miedzi, b) aluminium, o wymiarach 20x3 mm i różnych odstępach a



Rys. 9.16. Zależność względnego przyrostu lub zmniejszenia naprężeń $\Delta\sigma_1$ od spodziewanego prądu zwarciowego $I_k^{"}$ w układach szynowych wykonanych z: a) miedzi, b) aluminium, o wymiarach 25x3 mm i różnych odstępach a



Rys. 9.17. Zależność względnego przyrostu lub zmniejszenia naprężeń $\Delta\sigma_1$ od spodziewanego prądu zwarciowego $I_k^{"}$ w układach szynowych wykonanych z: a) miedzi, b) aluminium, o wymiarach 30x3 mm i różnych odstępach a



Rys. 9.18. Zależność względnego przyrostu lub zmniejszenia naprężeń $\Delta\sigma_1$ od spodziewanego prądu zwarciowego $I_k^{"}$ w układach szynowych wykonanych z: a) miedzi, b) aluminium, o wymiarach 40x5 mm i różnych odstępach a

Wyniki obliczeń wskazują przekroczenie naprężeń mechanicznych spowodowanych przez nierównomierne obciążenie elektrodynamiczne przęsła, wywołane kolumną łukową łuku awaryjnego, w stosunku do naprężeń mechanicznych wyznaczanych na podstawie dostępnej literatury [93, 94]. Uzyskano względny przyrost naprężeń $\Delta\sigma_1$ na poziomie $0 \div 20\%$ dla większości układów szynowych, w których odstęp pomiędzy wewnętrznymi krawędziami szyn a_0 wynosi 10 mm. Podobnie, jak w przypadku przyrostów sił elementarnych, przyrost naprężeń $\Delta\sigma_1$ maleje wraz ze wzrostem odstępu a i wartością prądu zwarciowego $I_k^{"}$.

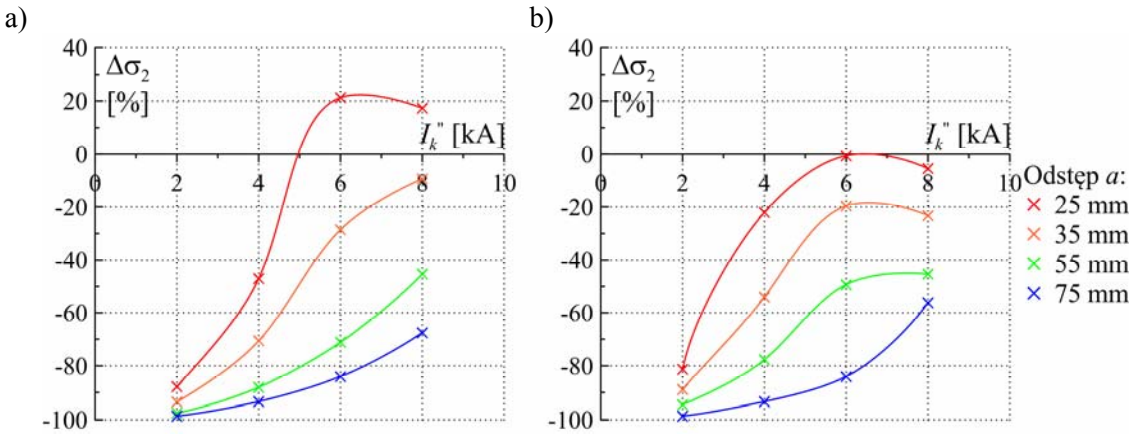
Jednakże o narażeniu układu szynowego decyduje przede wszystkim przekroczenie wartości dopuszczalnych, tak więc w tym celu maksymalną wartość naprężeń w szynach

występujących w trakcie zwarcia łukowego $\sigma_{arc\max}$ porównano z dopuszczalnym naprężeniem w szynie zgodnie ze wzorem:

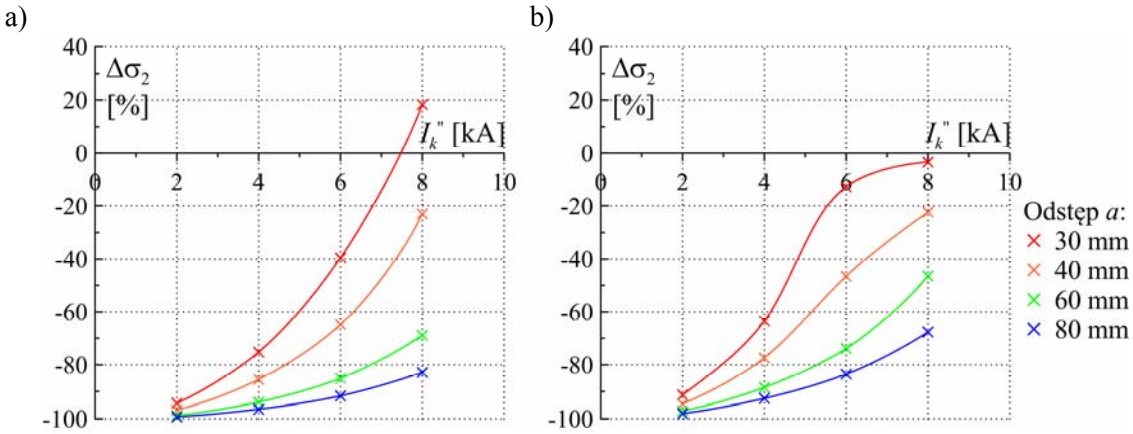
$$\Delta\sigma_2 = \frac{\sigma_{arc\max}}{qR_{p0,2}}100\%\,, \tag{9.13}$$

gdzie współczynnik q wynosi 1,5, a granica plastyczności $R_{p0,2}$ wywołująca trwałe odkształcenie na poziomie 0,2% jest równa $R_{p0,2}$ = 210 N/mm^2 dla szyn miedzianych i $R_{p0,2}$ = 120 N/mm^2 dla szyn aluminiowych [12, 29].

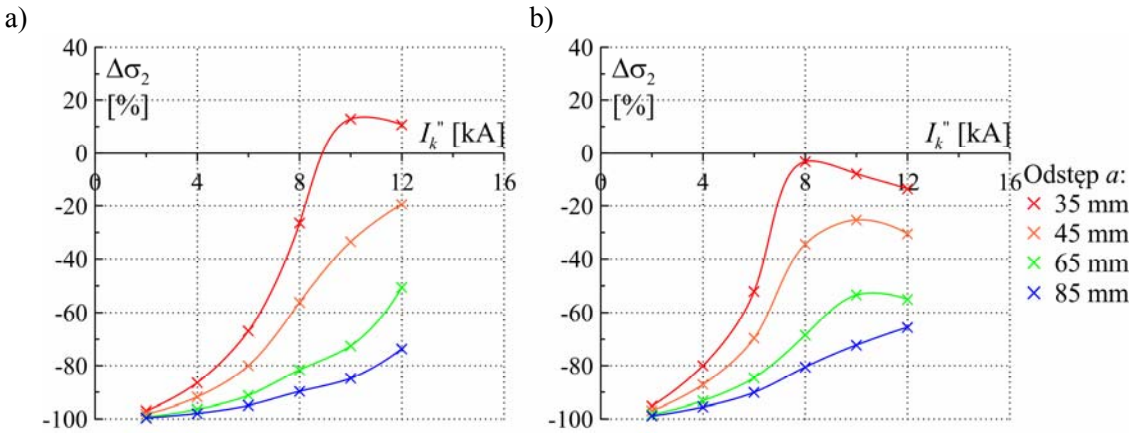
Wyniki obliczeń naprężeń mechanicznych względnych $\Delta\sigma_2$ występujących w trakcie zwarcia łukowego od spodziewanego prądu zwarciowego $I_k^{"}$ i różnych odstępów a, dla analizowanych przekrojów szyn i odstępów a ilustrują kolejno: rys. 9.19 – 15x3 mm, rys. 9.20 – 20x3 mm, rys. 9.21 – 25x3 mm, rys. 9.22 – 30x3 mm, rys. 9.23 – 40x5 mm.



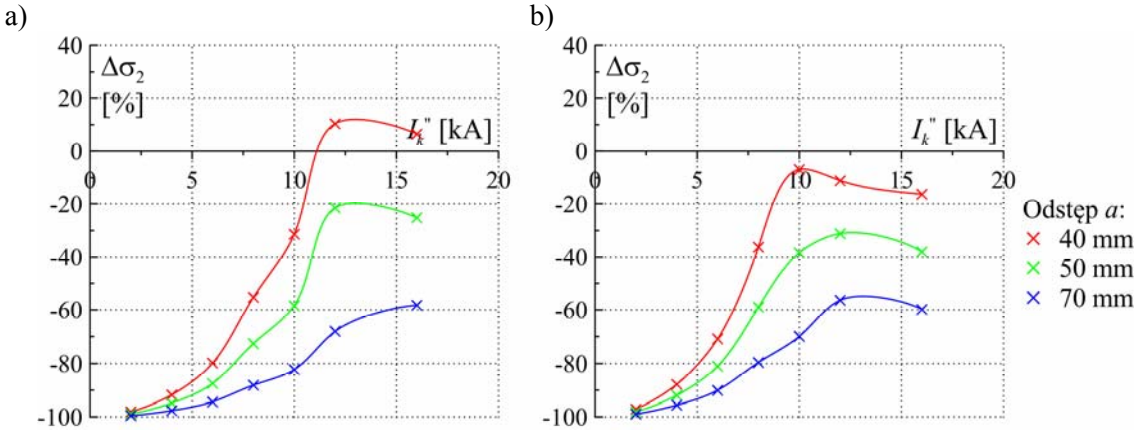
Rys. 9.19. Zależność względnego przyrostu lub zmniejszenia naprężeń $\Delta\sigma_2$ od spodziewanego prądu zwarciowego $I_k^{"}$ w układach szynowych wykonanych z: a) miedzi, b) aluminium, o wymiarach 15x3 mm i różnych odstępach a



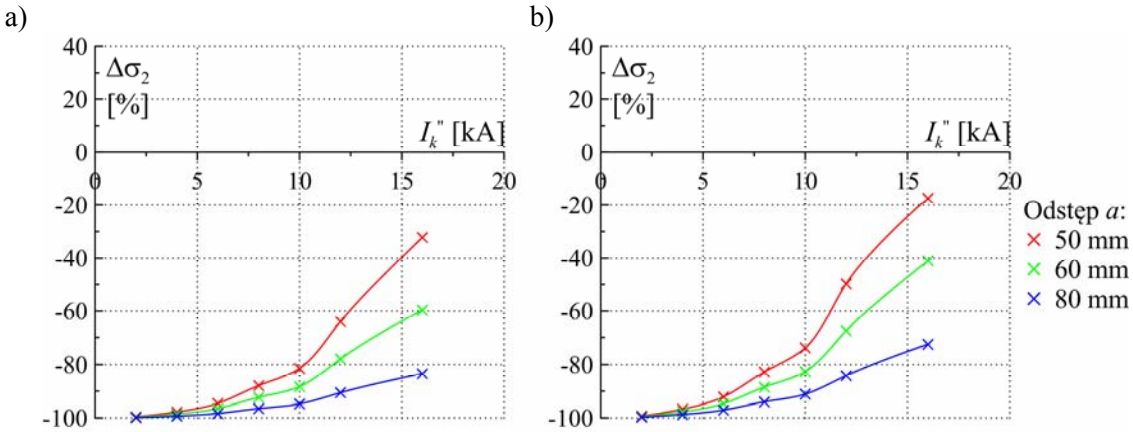
Rys. 9.20. Zależność względnego przyrostu lub zmniejszenia naprężeń $\Delta\sigma_2$ od spodziewanego prądu zwarciowego $I_k^{"}$ w układach szynowych wykonanych z: a) miedzi, b) aluminium, o wymiarach 20x3 mm i różnych odstępach a



Rys. 9.21 Zależność względnego przyrostu lub zmniejszenia naprężeń $\Delta\sigma_2$ od spodziewanego prądu zwarciowego $I_k^{"}$ w układach szynowych wykonanych z: a) miedzi, b) aluminium, o wymiarach 25x3 mm i różnych odstępach a



Rys. 9.22. Zależność względnego przyrostu lub zmniejszenia naprężeń $\Delta\sigma_2$ od spodziewanego prądu zwarciowego $I_k^{"}$ w układach szynowych wykonanych z: a) miedzi, b) aluminium, o wymiarach 30x3 mm i różnych odstępach a



Rys. 9.23. Zależność względnego zmniejszenia naprężeń $\Delta\sigma_2$ w funkcji od spodziewanego prądu zwarciowego $I_k^{"}$ w układach szynowych wykonanych z: a) miedzi, b) aluminium, o wymiarach 40x5 mm i różnych odstępach a

Przedstawione obliczenia względnych przyrostów naprężeń $\Delta\sigma_2$ wykazują przekroczenia dopuszczalnych naprężeń w układach szyn wykonanych z miedzi o wymiarach: 15x3 mm, 25x3 mm, 30x3 mm. Uzyskane przekroczenia naprężeń dopuszczalnych są na poziomie około 20%, w zależności od wymiarów szyn, i występują w górnym, z analizowanych dla poszczególnych układów, przedziale prądów zwarciowych I_k''. Na przykład dla szyn o wymiarach 15x3 mm, przedział ten wynosi I_k'' = 5 ÷ 6 kA. Przekroczenia dopuszczalnych naprężeń występują tylko dla najmniejszego z analizowanych odstępów a. Również w przypadku szyn o wymiarach 20x3 mm rozszerzenie zakresu obliczeń o większe wartości spodziewanych prądów zwarciowych I_k'' wykazuje względny przyrost naprężeń $\Delta\sigma_2$ na poziomie kilkunastu procent.

Ponadto zwiększenie odstępu a lub zmniejszenie długości przęsła l powoduje szybkie zmniejszenie się przyrostu $\Delta\sigma_2$. Uzasadnić to można tym, że wzrost odstępu a i zmniejszenie długości przęsła l powoduje wzrost wypadkowych sił, ale jednocześnie zwiększa wytrzymałość mechaniczną układu szynowego. W analizowanych układach szynowych dobierano maksymalną długość przęsła l, przy której jeszcze nie występowały przekroczenia sił i naprężeń w szynach w trakcie zwarcia metalicznego. W wielu przypadkach układów szynowych dobrano długość przęsła l = 1 m, ze względu na dość dużą wytrzymałość elektrodynamiczną, obliczoną dla przewidywanych prądów zwarciowych I_k''. Takie przypadki dotyczą połączeń szynowych między aparaturą łączeniową a szynami zbiorczymi, szczególnie w starszych typach rozdzielnic, które nadal są eksploatowane. Bardzo często szyny te dobierane są ze względu na obciążalność długotrwałą, a pomijane jest sprawdzenie ich wytrzymałości elektrodynamicznej.

Szczególny przypadek dotyczy szyn o wymiarach 25x3 mm i 30x3 mm, w których wykazano zwiększenie naprężeń przy odstępach a = 35 mm i a = 40 mm. Wartości te odpowiadają najmniejszym ze stosowanych w rozdzielnicach niskonapięciowych odstępów, tj.: 35, 45, 65, 70, 115, 185 mm.

10. Podsumowanie

Prezentowana praca ściśle nawiązuje do szeroko rozumianych badań dotyczących analizy zjawisk towarzyszących zwarciom łukowym, a przede wszystkim odnosi się do nieporuszanej w literaturze tematyki dotyczącej dynamiki przemieszczania się niskonapięciowego łuku awaryjnego i związanych z nią oddziaływań elektrodynamicznych występujących w niskonapięciowych układach szynowych podczas zwarć łukowych.

Przeprowadzona w rozdziale 2 analiza teoretyczna dotycząca oddziaływań elektrodynamicznych występujących w szynach w trakcie niskonapięciowego zwarcia łukowego w prostoliniowym układzie szyn ułożonych w jednej płaszczyźnie wykazała, że o wartościach maksymalnych elementarnych sił elektrodynamicznych działających na poszczególne szyny, oprócz wartości chwilowych prądów zwarciowych, wpływ ma geometria układu szynowego, tj. wymiary szyn i odstęp pomiędzy osiami szyn, jak również wzajemne położenie kolumn łukowych. Ponadto przy wstępnym pominięciu rezystancji łuku, niewywierającej wpływu na wartości prądów zwarciowych, wykazano, że w pewnych położeniach kolumn łukowych występuje 4-krotne, w stosunku do wartości elementarnej siły elektrodynamicznej występującej w trakcie zwarcia metalicznego, zwiększenie maksymalnej wartości elementarnej siły elektrodynamicznej działającej na szynę skrajną oraz środkową.

W dalszej części należy uwzględnić fakt, iż w niskonapięciowych układach rozdzielczych na wartość prądu zwarcia łukowego istotny wpływ ma rezystancja łuku, która powoduje jego ograniczenie w stosunku do wartości prądu płynącego w trakcie zwarcia metalicznego. Dodatkowo wpływ rezystancji łuku zwarciowego zwiększa się wraz ze wzrostem spodziewanej wartości prądu zwarciowego oraz odstępu pomiędzy osiami szyn. W celu określenia wpływu rezystancji przemieszczającego się wzdłuż szyn niskonapięciowego łuku zwarciowego na wartości chwilowe prądów zwarciowych, jak również wzajemnego położenia kolumn łukowych, opracowano model dynamiki łuku, który został omówiony w rozdziale 4.

W zastosowanym modelu obliczeniowym, w którym wyznaczona zostaje prędkość przemieszczania się kolumn trójfazowego zwarcia łukowego, uwzględniono m.in. wpływ rezystancji łuku zwarciowego na wartości prądów zwarciowych, poprzez zastosowanie modelu łuku zwarciowego Kizilcay'a. Ponadto w celu lepszego odzwierciedlenia prądu zwarcia łukowego wprowadzono własne modyfikacje modelu, polegające na uzależnieniu

od prądu zwarcia łukowego i długości łuku parametrów opisujących model łuku. Wybór modelu łuku i jego modyfikacja pod kątem wykorzystania w analizie niskonapięciowego łuku zwarciowego podyktowany został przede wszystkim prostotą budowy. Ponadto możliwość łatwego uzależnienia współczynników opisujących model łuku zwarciowego oraz przyjęty sposób opisu tych parametrów pozwolił na uzyskanie zbieżnych z wynikami eksperymentalnymi wyników obliczeń.

W celu określenia wartości poszczególnych współczynników opisujących zaproponowany model dynamiki niskonapięciowego łuku zwarciowego w funkcji prądu zwarciowego czy geometrii układu szynowego, konieczne było przeprowadzenie badań laboratoryjnych. W tym celu skonstruowano stanowisko probiercze, w którym, oprócz pomiarów prądów i napięć łukowych, przeprowadzono pomiary prędkości przemieszczania się łuku za pomocą własnej konstrukcji układu pomiaru prędkości. Spośród wielu sposobów oceny prędkości łuku, wykorzystano pomiar natężenia promieniowania w zakresie podczerwieni za pomocą czujników optycznych.

Dyskusję może budzić sama metoda pomiarowa prędkości łuku oraz pomiar prędkości jednej kolumny i na tej podstawie analiza położenia kolumn łukowych zwarcia trójfazowego. Wybór metody pomiarowej prędkości łuku podyktowany został m.in. łatwą budową samego układu i zaletami tego typu rozwiązania opisanymi w Załączniku C. Należy zaznaczyć, że użyta metoda pomiaru prędkości nie miała na celu określenia kształtu samej kolumny łukowej, lecz tylko jej położenia w układzie szynowym, co było zgodne z upraszczającymi założeniami dotyczącymi budowy samego modelu obliczeniowego. Oczywiście przeprowadzenie badań, np. za pomocą kamery szybkiej, jednoznacznie by potwierdziło dokładność użytej metody pomiarowej. Jednakże szacunkowa analiza przyrostów napięcia łuku i zmniejszania się wartości prądu, wywołanych wzrostem długości kolumn łukowych wskutek wydłużania ich na końcu układu szynowego, dają podobne wyniki badań prędkości, co zastosowana metoda pomiarowa. Obliczony czas przemieszczania się kolumn łukowych na odcinku pomiarowym w większości przeprowadzonych prób łukowych pokrywał się z czasem, jaki był potrzebny do pokonania całego układu szynowego z mierzoną prędkością, zarówno w badaniach łuku dwufazowego, jak i trójfazowego.

Większą uwagę poświęcono badaniom dwufazowego łuku zwarciowego z uwagi na prostą analizę prędkości przemieszczania się jednej kolumny łukowej, poruszającej się pomiędzy dwiema szynami. Uzyskane wyniki badań laboratoryjnych łuku dwufazowego posłużyły do wyznaczenia zależności empirycznych charakteryzujących parametry łuku

zwarciowego i współczynnika n_a opisującego dynamikę samego łuku. Utworzony w ten sposób model dynamiki łuku następnie wykorzystano w analizie trójfazowego łuku zwarciowego.

Przeprowadzona w rozdziale 8.1 analiza dynamiki trójfazowego łuku zwarciowego miała na celu określenie sposobu przemieszczania się dwóch kolumn łukowych palących się pomiędzy szynami płaskiego, prostoliniowego układu szyn oraz możliwego wzajemnego usytuowania kolumn łukowych i związanych z nim oddziaływań elektrodynamicznych występujących w szynach, w zależności od fazy powstania zwarcia. Wyniki analizy wykazały nierównomierne przemieszczanie się kolumn trójfazowego zwarcia łukowego wzdłuż szyn, gdzie w większości analizowanych przypadków jedna z kolumn wyraźne wyprzedzała drugą i tworzyła z układem szyn pętlę zwiększającą swoje rozmiary. Uzyskane wyniki posłużyły do opracowania analizy dotyczącej oddziaływań elektrodynamicznych w szynach występujących w trakcie zwarcia łukowego. Ponadto przeprowadzono badania dynamiki trójfazowego łuku zwarciowego w rzeczywistym modelu szyn zbiorczych, a uzyskane wyniki posłużyły do weryfikacji zaproponowanego modelu obliczeniowego i wyprowadzonych zależności na podstawie badań łuku dwufazowego.

Otrzymane wyniki obliczeń i potwierdzające je wyniki badań eksperymentalnych wskazują, że zaproponowany model dynamiki niskonapięciowego trójfazowego łuku awaryjnego w wystarczająco dokładny sposób odzwierciedla przebiegi prądów zwarciowych, napięć łukowych oraz prędkości przemieszczania się kolumn łukowych. Uzyskane różnice pomiędzy wynikami badań laboratoryjnych łuku trójfazowego i odpowiednimi wynikami obliczeń pokrywały się z różnicami uzyskanymi na etapie porównania wyników badań i obliczeń dynamiki łuku dwufazowego.

Kolejny etap pracy, to analiza oddziaływań elektrodynamicznych występujących w szynach w trakcie zwarcia łukowego. Zakres analizy obejmował układy szyn stosowanych w typowych konstrukcjach rozdzielnic dystrybucyjnych, które zasilane są z transformatorów o mocy nieprzekraczającej 630 kVA. Spotykane w tego typu rozwiązaniach rozdzielnic spodziewane prądy zwarciowe pokrywały się z zakresem prądów zwarciowych uzyskiwanych w badaniach laboratoryjnych. Przeprowadzona w rozdziale 9.1 i 9.2 analiza oddziaływań elektrodynamicznych wykazała, że w większości analizowanych przypadków układów szyn występuje wzmocnienie elementarnej siły elektrodynamicznej działającej na szyny w trakcie zwarcia łukowego, w porównaniu do wartości elementarnej siły elektrodynamicznej występującej w trakcie zwarcia

metalicznego, co stanowi potwierdzenie przytoczonej w rozdziale 3 tezy pracy. Wykazano, że w większości analizowanych układów szynowych względny przyrost elementarnej siły elektrodynamicznej $\Delta \mathrm{d}F_{AB}$ zmienia się w zakresie 0 ÷ 50%, przy spodziewanych prądach zwarciowych $I_k^{"}$ rzędu do kilku kA. Względny przyrost elementarnej siły elektrodynamicznej $\Delta \mathrm{d}F_{AB}$ szczególnie jest widoczny w układach szynowych wykonanych z szyn o niewielkich wymiarach, tj.: 15x3 mm, 25x3 mm oraz 30x3 mm.

Jednakże o bezpośrednich narażeniach elektrodynamicznych w układach szynowych decydują występujące w nich naprężenia. W tym celu przeprowadzono uproszczoną analizę występujących w trakcie trójfazowych zwarć łukowych naprężeń, w której wykazano przekroczenia dopuszczalnych wartości tych naprężeń w większości analizowanych układów szynowych. Uzyskane przekroczenia naprężeń dopuszczalnych w szynach są na poziomie około 20%, w zależności o wymiarów szyn i występują tylko dla najmniejszego z analizowanych odstępów a. Szczególny przypadek dotyczy szyn o wymiarach 25x3 mm i 30x3 mm, w których wykazano przekroczenie naprężeń dopuszczalnych przy odstępach wynoszących 35 mm i 40 mm, typowych dla konstrukcji niskonapięciowych rozdzielnic.

Należy jednak zaznaczyć, że przedstawiona analiza naprężeń jest analizą uproszczoną, której celem było wykazanie możliwych konsekwencji w przypadku wystąpienia zwarcia łukowego w układzie szynowym, w którym margines bezpieczeństwa dotyczący wytrzymałości elektrodynamicznej jest niewielki. Zaprezentowane rozważania częściowo uwzględniają dynamikę układów szynowych wyrażonych współczynnikami V_r, V_σ i β. W celu dokładniejszej analizy należałoby w obliczeniach uwzględnić wpływ ruchu łuku i zmieniający się w czasie rozkład obciążenia elektrodynamicznego wzdłuż przęsła, przy wykorzystaniu równań różniczkowych cząstkowych 4 rzędu. Dodatkowo należałoby przeprowadzić analizę dynamiczną drgań układów zbudowanych nie tylko z jednego przęsła, ale również z większej liczby przęseł, w której również zostałoby uwzględnione oddziaływanie i zmiana rozkładu obciążenia elektrodynamicznego wywołane drugą kolumną łukową.

Również w przypadku analizy narażeń elektrodynamicznych dobrze byłoby udoskonalić model obliczeniowy, czyli przeprowadzić badania prędkości łuku w układach zbudowanych z szyn o innych wymiarach i kształtach przekroju poprzecznego i zbadać wpływ tych parametrów na wyniki obliczeń prądów, prędkości, jak również udoskonalić sposób wyznaczenia parametrów łuku. Należałoby również rozszerzyć zakres badań o większe spodziewane prądy zwarciowe.

Literatura

1. ABB Power Technologies: *„I_S limiter: The world fastest limiting and switching device”*, ABB AG. 2012.
2. Ammerman R.F., Sen P. K., Nelson J. P.: *„Arc flash hazard incident energy calculations a historical perspective and comparative study of the standards: IEEE 1584 AND NFPA 70E”*, IEEE Paper No. PCIC-2007-2.
3. Aniceto J.M., Sun H.: *„Hybrid fault current limiter interaction with MV line differential protection”*, CIGRE 2010, Paris, August 2010.
4. Au A., Maksymiuk J., Pochanke Z.: „*Podstawy obliczeń aparatów elektroenergetycznych”,* WNT Warszawa 1976.
5. Besnard Ch.: *„Internal arc simulation in MV/LV substations”*, 20th International Conference on Electricity Distribution CIRED 2009, Prague 2009.
6. Bielówka M.: *„Model powietrznego łuku zakłóceniowego dla celów analizy skutków zwarć łukowych w urządzeniach elektroenergetycznych”*, rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2012.
7. Bjortuft T. R., Granhaug O., Hagen S. T., Kuhlefelt J. H., Salge G., Skryten P. K., Stangherlin S.: *„Internal arc fault testing of gas insulated metal enclosed MV switchgear”*, 18th International Conference on Electricity Distrubution CIRED, Turin 2005.
8. Boryń H., Kowalak D., Olesz M.: *„Laboratorium przekładników indukcyjnych”*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2011.
9. Bouman B., Alferink E., Lusing M., Verstraten J.: *„A view on internal arc testing of low voltage switchgear”,* Petroleum and Chemical Industry Conference Europe Conference Proceedings (PCIC EUROPE), 2012.
10. Bouman B., Verstraten J., Vervaet R., Oomen W.: *„Arc fault free design for electrical assemblies”*, Conference Papers: Petroleum and Chemical Industry Conference PCIC '06, 2006.
11. Ciok Z.: „*Modele matematyczne łuku łączeniowego”*, Politechnika Warszawska 1995.
12. Ciok Z.: „*Procesy łączeniowe w układach elektroenergetycznych*”, WNT Warszawa 1976.
13. Czapp S., Kowalak D., Borowski K.: „*Narażenia cieplne i elektrodynamiczne wyłączników różnicowoprądowych przy ich dobezpieczaniu wyłącznikami nadprądowym instalacyjnymi”*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki

i Automatyki Politechniki Gdańskiej nr 33, Konferencja Aktualne Problemy w Elektroenergetyce APE'13, 12-14 czerwca 2013, Gdańsk-Jurata, Politechnika Gdańska 2013.

14. Czucha J., Partyka R., Żyborski J.: *„AC low-voltage arcing fault protection by hybrid current limiting interrupting device"*, 7th Int. Symposium on "Short – Circuit Currents in Power Systems". Warszawa (Poland), 10-12 September 1996, Lodz: Tech. Univ. Lodz. Inst. Elect. Power Eng. 1996.
15. Czucha J., Partyka R., Żyborski J.: *„Ultraszybkie urządzenie do ograniczania prądu zwarciowego przy zwarciach łukowych w instalacjach niskiego napięcia"*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrycznego Politechniki Gdańskiej nr 6, 1996.
16. Daalder, J.E.; Lillevik, O.; Rein, A.; Rondeel, W.: *„Arcing in SF6-MV-switchgear. Pressure rise in equipment room"*, 10th Int. Conference on Electricity Distribution CIRED 1989.
17. Dominguez G., Becerra M., Piva D., Gati R.: *„On the optical radiation of ablation dominated arcs in air",* XVIXth Symposium on Physics of Switching Arc, Czech Republic, 5-9 September 2011.
18. Doughty, R.L.; Neal, T.E.; Dear, T.A.; Bingham, A.H.: *„Testing update on protective clothing and equipment for electric arc exposure"*, IEEE Industry Applications Society 44th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, Banff, Alberta 1997.
19. Drescher G., Spack H., Betzmann M.: *„Controlled pressure stress on switchgear rooms during internal arc faults"*, 9th International Conference Trends in Distribution Switchgear: 400V-145 kV for Utilities and Private Networks, 1998 (Conf. Publ. No. 459).
20. Drescher G., Spaeck H., Betzmann M.: *„Pressure stress of switchgear and compact substations in case of internal arcs"*, IEE Conf. Publ. No. 438: 14th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Part 1, CIRED 1997.
21. Finke, S.; Koenig, D.: *„Recent investigations on high current internal arcs in low voltage switchgear"*, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, USA, 2002.
22. Finke, S., Koenig, D., Kaltenborn, U.: *„Effects of fault arcs on insulating walls in electrical switchgear"*, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Anaheim CA USA, 2000.

23. Fleszyński J., Lisiecki J., Pohl Z.: *„Miernictwo wysokonapięciowe i laboratorium wysokich napięć”*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1979.
24. Funabashi T., Otoguro H., Dube L., Kizilcay M., Ametani A.: *„A study on fault arcs and its influence on digital fault location performance”*, IEE Developments in Power System Protection, Conference Publication No. 479, 2001.
25. Gentisch D., Grafe V., Ott H.-V., Hakelberg W., Brandt A.: *„S^3 – Speed, saverty and savings, ABB's new ultra-fast earthing switch*”, ABB Review 2/2010.
26. Graham A. M., Hodder M., Gates G.: *„Current methods for conducting an arc-flash hazard analysis”*, IEEE Transactions on industry applications, Vol. 44, No. 6, November/December 2008.
27. Gohil D.: *„Internal arcing fault and protection of equipment and personnel”*, 1st Half Update Meeting AZZ Central Electric, Western Mining Electrical Association Western Mining Electrical Association, 2006.
28. Guo Z., Bai B.: *„Experiment and simulation of PTC used in fault current limiter”*, China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Nanjing, China, September 2010.
29. Haynes W. M..: *„CRC Handbook of Chemistry and Physics”*, 93rd edition, CRC Press Taylor & Francis Group, USA, 2012.
30. Hering M.: *„Termokinetyka dla elektryków”*, WNT Warszawa 1980.
31. Hoagland, E.: *„Shell of Protection: Arc-Flash PPE Research Update”*, IEEE Industry Applications Magazine, Vol. 18 , Issue 3, 2012.
32. Huaren W., Xiaohui L., Stade D., Schau H.: *„Arc Fault Model for Low-Voltage AC Systems”*, IEEE Transactions on power delivery, Vol. 20, No. 2, April 2005.
33. Johns A. T., Aggarwal R.K., Song Y.H.: *„Improved techniques for modelling fault arcs on faulted EHV transmission systems”*, IEE Proc.-Cener. Transm. Distrzb., Vol. 141, No. 2, March 1994.
34. Kacejko P., Machowski J.: *„Zwarcia w systemach elektroenergetycznych”*, WNT Warszawa 2002.
35. Kay J.A., Arvola J., Kumpulainen L.: *„Protecting at the speed of light: Combining arc flash sensing and arc-resistant technologies”*, Pulp and Paper Industry Technical Conference (PPIC), Conference Record of 2010.
36. Kaźmierczak M.: *„Zwarcia łukowe – doświadczenia eksploatacyjne w polskiej energetyce zawodowej i przemysłowej”*, Elektroenergetyka – współczesność i rozwój, nr 2 (8), 2011.

37. Kizilcay, M., and Pniok, T.: *„Digital simulation of fault arcs in power system”*, European Transactions on Electric Power, Vol. 1, January 1991.
38. Klajn A., Markiewicz H., Surówka I.: *„Nowa metoda eliminacji łuku zakłóceniowego w urządzeniach elektrycznych”,* Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze – SIECI 2004, V Konferencja Naukowo-Techniczna.
39. Koch B.: *„Tests on XLPE-insulated cable arcing faults mid arcproofing”*, IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 3 , Issue 4, 1988.
40. Koch B.: *„Zwarcia łukowe. Podstawowe charakterystyki”*, Elektroinstalator nr 3, 2002.
41. Koch B.: *„Zwarcia łukowe. Przyrosty ciśnienia i produkty łuku”*, Elektroinstalator nr 6, 2002.
42. Koch, B.; Christophe, P.: *„Arc voltage for arcing faults on 25(28)-kV cables and splices”*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8 , Issue 3, 1993.
43. Koch B., Maksymiuk J.: *„Łukoodporność rozdzielnic osłoniętych i symulacja zwarć łukowych”*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007.
44. Kowalak D.: *„Dynamika niskonapięciowego łuku zwarciowego przemieszczającego się wzdłuż szyn”*, Modelowanie, Symulacja i Zastosowania w Technice – materiały konferencyjne, Kościelisko 13-17.06.2011.
45. Kowalak D.: *„Dynamika jednofazowego łuku awaryjnego”* – praca magisterska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2006.
46. Kowalak D.: *„Łuk awaryjny w rozdzielnicach osłoniętych”*, instrukcja do laboratorium urządzeń elektrycznych, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2008.
47. Kowalak D.: *„Model empiryczny określający dynamikę niskonapięciowego łuku zwarciowego”*, Widomości Elektrotechniczne 12/2011.
48. Kowalak D., Partyka R.: *„Zwarcia łukowe w rozdzielnicach osłoniętych i sposoby ograniczania ich skutków”*, Gdańskie Dni Elektryki 2009, Gdańsk 2009.
49. Kowalak D, Partyka R., Wolny A.: *„Discrete measurement of fault-arc velocity”*, Pomiary Automatyka Kontrola. - Vol. 53, nr 4 (2007).
50. Kurdziel R.: *„Działania cieplne i dynamiczne prądów zwarciowych”*, Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa 1957.
51. Lipski T., Partyka R.: *„Protection of disturbance arc on bus-bars by means of L. V. fuses”,* Conference material: 6th Int. Conference on Electrical Fuses and their Applications “ICEFA’99”. Torino, Italy, 20-22 September 1999. Torino: IEN Galileo Ferraris 1999.

52. Maksymiuk J: *„Aparaty elektryczne w pytaniach i odpowiedziach”*, WNT Warszawa 1997.
53. Maksymiuk J., Pochanke Z.: *„Obliczenia i badania diagnostyczne aparatury rozdzielczej”*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa, 2001.
54. Muirhead R.: *„Philosophy of overpressure relief in gas filled distribution switchgear”*, Conference Publication IEE: Third Int. Conference on Future Trends in Distribution Switchgear, 1990.
55. Neal T. E., Bingham A. H., Doughty, R. L.: *„Protective clothing guidelines for electric arc exposure”*, IEEE Transactions on industry applications, Vol. 33, No. 4, July/August 1997.
56. Niezgodziński M. E., Niezgodziński T.: *„Wzory, wykresy i tablice wytrzymałościowe”*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1987.
57. Papallo T.: *„Arc Flash Calculations Using a Physics-Based Circuit Model”*, IEEE Transactions on industry applications, Vol. 48, No. 4, July/August 2012.
58. Parise J., Martirano L., Laurini M.: *„Simplified arc-fault model: The reduction factor of the arc current”*, IEEE Conference Publications, Industry Applications Society Annual Meeting (IAS) 2012.
59. Partyka R.: *„Electrodynamic interaction in bus bar arrangements during short-circuits”*, Przegląd Elektrotechniczny 10/2004.
60. Partyka R.: *„Expulsion fuses for protection of bus-bars under arcing short-circuit conditions in L. V. switchboards”*, Conference materials: 9th Int. Symposium on “Switching Arc Phenomena”. Lodz, 17-20 September 2001, Łódź: Politech. Łódzka. Inst. Aparatów Elekt., 2001.
61. Partyka R.: *„Badanie skutków zwarć łukowych w rozdzielnicach osłoniętych”*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2006.
62. Partyka R., Holc A.: *„Jednofazowe wyłączanie trójfazowych zwarć łukowych w rozdzielnicach niskonapięciowych”*, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Elektryka, nr 87, Gdańsk 2000.
63. Partyka R., Kowalak D.: *„Dynamika łuku zwarciowego przemieszczającego się wzdłuż szyn rozdzielnic wysokiego napięcia”*, Acta Energetica nr 02/2009.
64. Partyka R., Leśniewski P., Czucha J.: *„Jednofazowe wyłączanie trójfazowych zwarć łukowych na szynach rozdzielnic niskonapięciowych”*, XI Międzynar. Konf. Nauk. „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce” APE’03. t. 4, Gdańsk-Jurata, 11-13 czerwca 2003. Gdańsk: Politechnika Gdańska 2003.

65. Rodoń F., Janikowski W.: *„Nowe zabezpieczenie łukoochronne ZŁ-4”*, Automatyka elektroenergetyczna-problematyka eksploatacji i modernizacji, XII Seminarium Energotest-Energopomiar 2009.
66. Roscoe G., Rapallo T., Valdes M.: *„Arc-flash energy mitigation by fast energy capture”,* IEEE Conference Publications, Pulp and Paper Industry Technical Conference (PPIC), 2010.
67. Schlabbach J.: *„Short circuit currents”*, IET Power and Energy Series 51, The Institution of Engineering and Technology, London 2005.
68. Schmale M., Pietsch G. J.: *„Influence of buffer volumes on pressure rise in switchgear installations due to internal arcing”*, IEEE Conference Publications: 17th International Conference on Gas Discharges and Their Applications, 2008.
69. Schau H., Stade D., Wey P.: *„A new concept of arcing fault protection in low voltage switchgear”*, 6th Int. Symposium on Short – Circuit Currents in Power Systems, Liege (Belgium), 1994. Liege: Univ. Liege. Inst. Elec. 1994.
70. Schumacher A.: *„Arcon – Arc fault protoction system”*, The arc-fault demonstration in the head office of the Moeller GmbH, Bonn 2008.
71. Sęk T., Gawryał A.: *„Doświadczenia eksploatacyjne związane z łukoochronnym zabezpieczeniem ZŁ-1 firmy Energotest-Energopomiar”*, Automatyka elektroenergetyczna-problematyka eksploatacji i modernizacji, XII Seminarium Energotest-Energopomiar, 2009.
72. Tarczyński W: *„Elektrodynamika aparatów elektrycznych”*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2007.
73. Teeraachariyakul N., Hokierti J.: *„Internal Arc Pressure Assessment of Outdoor Compact Substation”*, IEEE Conference Publications, The 7th International Power Engineering Conference IPEC 2005, 2005.
74. Thierry J. P., Kilindjian C.: *„Electrodynamic forces on busbars in LV systems”*, Cahier Technique Merlin Gerin, No. 162, 1996.
75. Walczak J.: *„Wytrzymałość materiałów oraz podstawy teorii sprężystości i plastyczności”*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, Kraków 1973.
76. Wapniarki S.: *„Sposoby ochrony rozdzielnic średniego napięcia przed skutkami łuku wewnętrznego”*, Energetyka, Nr 12/2003.
77. Wodziński J.: *„Wysokonapięciowa technika prób i pomiarów”*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997.

78. Wolny A.: *„Current breaking trough commutation”*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2001.
79. Wróbel M.: *„Światłowodowy układ pomiaru prędkości łuku przemieszczającego się wzdłuż szyn, konstrukcja modelu oraz badania wstępne”* – praca dyplomowa magisterska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2008.
80. Volger J.: *„Arc fault protection as seen by employers' liability insurance associations”*, The arc-fault demonstration in the head office of the Moeller GmbH, Bonn 2008.
81. Yutaka G., Mikimasa I., Koichi K., Shin-ichi T.: *„Arc voltage characteristics of high current fault arcs in long gaps”*, IEEE Transactions on power delivery, Vol. 15, No. 2, April 2000.
82. Zhang X., Zhang J., Pietsch G.: *„Calculation of the Three-Phase Internal Fault Currents in Medium-Voltage Electrical Installations”*, IEEE Transactions on power delivery, Vol. 23, No. 3, 2008.
83. Żyborski J., Hasan S.: *„Wyłączanie prądu zwarciowego przemiennego metodą wstrzykiwania prądu obwodowego”*, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Elektryka, nr 9, 1996.
84. Żyborski J., Lipski T., Partyka R.: *„Arcless current limiting and interrupting hybrid device for disturbance arc and other protections”*, 3nd Int. Conference on "Electrical Contacts, Arcs, Apparatus and their Applications", Vol. 1, Xi'an, P. R. China 19-22 may 1997. Xi'an: Shaangxi Sci. Tech. 1997.

Normy:

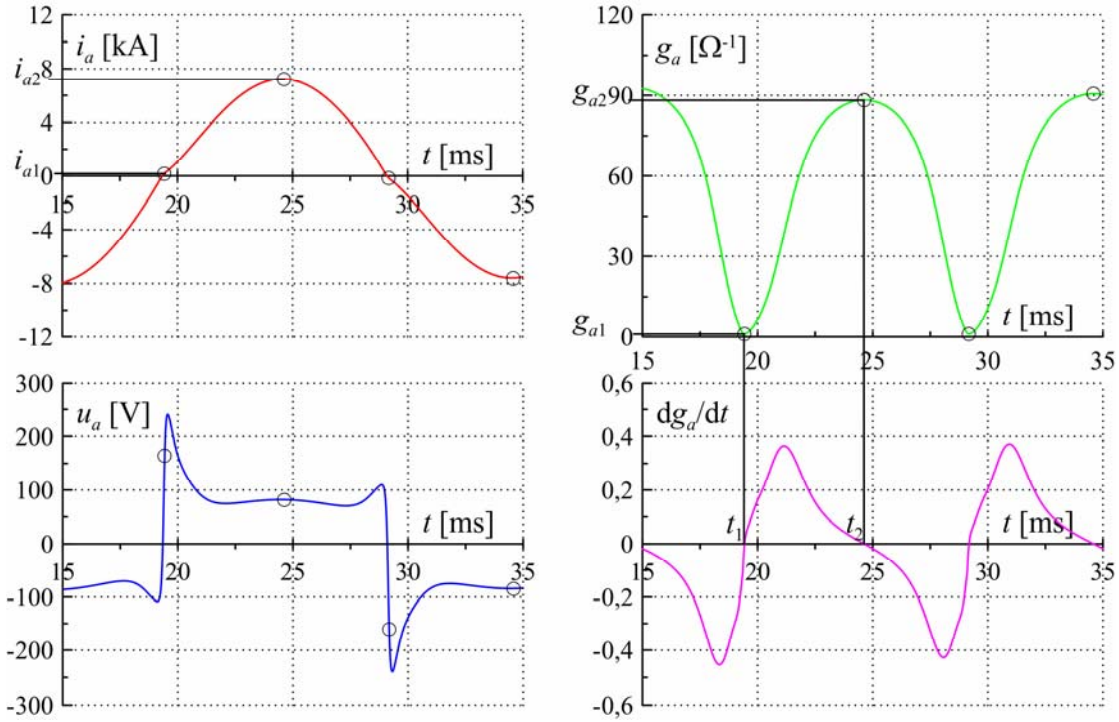
85. IEEE Std 1584™-2002: *„IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations”*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA 2002.
86. IEEE Std 1584a™-2004: *„IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations—Amendment 1”*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA 2004.
87. IEEE Std C37.20.7™-2007: *„IEEE Guide for Testing Metal-Enclosed Switchgear Rated Up to 38 kV for Internal Arcing Faults”*, IEEE Power Engineering Society, 3 ParkAvenue New York, NY 10016-5997, USA, 2008.
88. EN 60865-1:1997 *„Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 1: Definitions and calculation methods”*.

89. IEC 60865-1:1993 *„Short-circuit currents. Calculation of effects. Definitions and calculation methods”*.
90. IEC 60050 *„International Electrotechnical Vocabulary”* – IEV ref 651-07-01.
91. PN-E-05025:1990 *„Obliczanie skutków prądów zwarciowych”*.
92. PN-E-05163:2002 *„Rozdzielnice i sterownice niskonapięciowe osłonięte – Wytyczne badania w warunkach wyładowania łukowego, powstałego w wyniku zwarcia wewnętrznego”*.
93. PN-EN 60865-1:2002 *„Obliczanie skutków prądów zwarciowych – Część 1: Definicje i metody obliczania”*.
94. PN-EN 60865-1:2012 *„Prądy zwarciowe - Obliczanie skutków działania prądów zwarciowych – Część 1: Definicje i metody obliczania”*.
95. PN-EN 61008-1:2007 *„Wyłączniki różnicowoprądowe bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego do użytku domowego i podobnego (RCCB) – Część 1: Postanowienia ogólne”*.
96. PN-EN 62271-200:2012 *„Wysokonapięciowa aparatura rozdzielcza i sterownicza – Część 200: Rozdzielnice prądu przemiennego w osłonach metalowych na napięcie znamionowe powyżej 1 kV do 52 kV włącznie”*.

Załącznik A: Wyznaczenie parametrów modelu zaciskowego łuku zwarciowego

Praktyczne wykorzystanie zaciskowego modelu łuku zwarciowego jest możliwe przy znajomości jego parametrów, takich jak: stała czasowa łuku T_a, przewodność chwilowa łuku g_a i przewodność statyczna łuku G_a, którą dodatkowo charakteryzują składowa rezystancji łuku R_{sa} odniesiona do jednostki długości łuku l_a, i składowa stała napięcia u_{0a} odniesiona do jednostki długości łuku l_a. Parametry opisujące zaciskowy model łuku zwarciowego, których wartości wyznaczane są metodami doświadczalnymi, zależą od warunków, w jakich pali się łuk. W celu lepszego odzwierciedlenia w obliczeniach wyników badań eksperymentalnych parametry opisujące użyty model łuku zwarciowego uzależniono od wartości chwilowej prądu i_a. W przypadku opisu zmian składowej rezystancji łuku R_{sa} odniesionej do jednostki długości łuku l_a i składowej stałej napięcia u_{0a} odniesionej do jednostki długości łuku l_a wykorzystano funkcję wykładniczą. Natomiast do opisu zmian stałej czasowej łuku T_a od wartości bezwzględnej prądu łuku i_a wykorzystano funkcję potęgową. Wybór funkcji przedstawiających zmianę parametrów łuku od wartości bezwzględnej prądu i_a został podyktowany analizą uzyskanych wyników badań laboratoryjnych dwufazowego łuku zwarciowego. Analizie poddano każdą próbę zwarcia łukowego przy określonym spodziewanym prądzie zwarciowym $I_k^{"}$, jak również trend zmian parametrów modelu łuku zwarciowego w funkcji spodziewanego prądu zwarciowego $I_k^{"}$ i odstępu a_0. Poniżej zamieszczono przykładową procedurę wyznaczenia parametrów charakteryzujących użyty w pracy zaciskowy model łuku zwarciowego.

W celu wyznaczenia parametrów opisujących równanie łuku (4.18) posłużono się opracowaniem [11]. W tym celu konieczna jest znajomość zmian wartości przewodności łuku g_a, prądu łuku i_a oraz napięcia u_a w czasie trwania zwarcia. Przykładowe przebiegi powyższych wielkości zostały przedstawione na rys. 11.1.



Rys. 11.1. Przebiegi: prądu i_a, napięcia u_a, przewodności chwilowej łuku g_a łuku zwarciowego i pochodnej przewodności łuku dg_a/dt

W pierwszej kolejności obliczono przewodność statyczną G_a, która jest określona wzorem (4.17). Zależność ta, jak i odpowiadające jej wartości chwilowe prądu i_a i napięcia u_a występują dla dwóch czasów t_1 oraz t_2 (rys. 11.1), gdy $\frac{\mathrm{d}g_a}{\mathrm{d}t}=0$ [11, 24, 37]. Uwzględniając powyższy warunek równanie (4.18) przyjmuje postać:

$$g_a = \frac{|i_a|}{\left(u_{0a} + R_{sa}|i_a|\right) l_a}, \tag{11.1}$$

a po podstawieniu wartości prądów i_{a1} i i_{a2} oraz przewodności chwilowych łuku g_{a1} i g_{a2} odpowiadających czasom t_1 i t_2 otrzymujemy układ równań:

$$\begin{cases} g_{a1} = \dfrac{|i_{a1}|}{\left(u_{0a} + R_{sa}|i_{a1}|\right) l_{a1}} \\ g_{a2} = \dfrac{|i_{a2}|}{\left(u_{0a} + R_{sa}|i_{a2}|\right) l_{a2}} \end{cases}. \tag{11.2}$$

W celu rozwiązania układu równań (11.2), oprócz znajomości w danej chwili czasowej wartości bezwzględnej prądu i_a, wartości bezwzględnej napięcia łuku u_a i przewodności g_a, konieczne jest określenie długości łuku l_a. Ze względu na brak informacji o zmianach długości łuku l_a, przyjęto stałą długość łuku równą $l_a = l_{a1} = l_{a2}$

ograniczoną odstępem pomiędzy wewnętrznymi krawędziami szyn a_0. Tak więc rozwiązaniem układu równań (11.2) jest zależność:

$$\begin{cases} R_{sa} = \dfrac{g_{a1}|i_{a2}| - g_{a2}|i_{a1}|}{g_{a1}g_{a2}\left(|i_{a2}| - |i_{a1}|\right)l_a} \\ u_{0a} = \dfrac{|i_{a1}i_{a2}|\left(g_{a2} - g_{a1}\right)}{g_{a1}g_{a2}\left(|i_{a2}| - |i_{a1}|\right)l_a} \end{cases}. \tag{11.3}$$

Następnym etapem jest wyznaczenie stałej czasowej łuku T_a. Realizuje się to poprzez znalezienie całki ogólnej przekształconej zależności (4.18) opisanej równaniem:

$$\frac{1}{g_a}\frac{dg_a}{dt} = \frac{1}{T_a}\left[\frac{|u_a|}{\left(u_{0a} + R_{sa}|i_a|\right)l_a} - 1\right]. \tag{11.4}$$

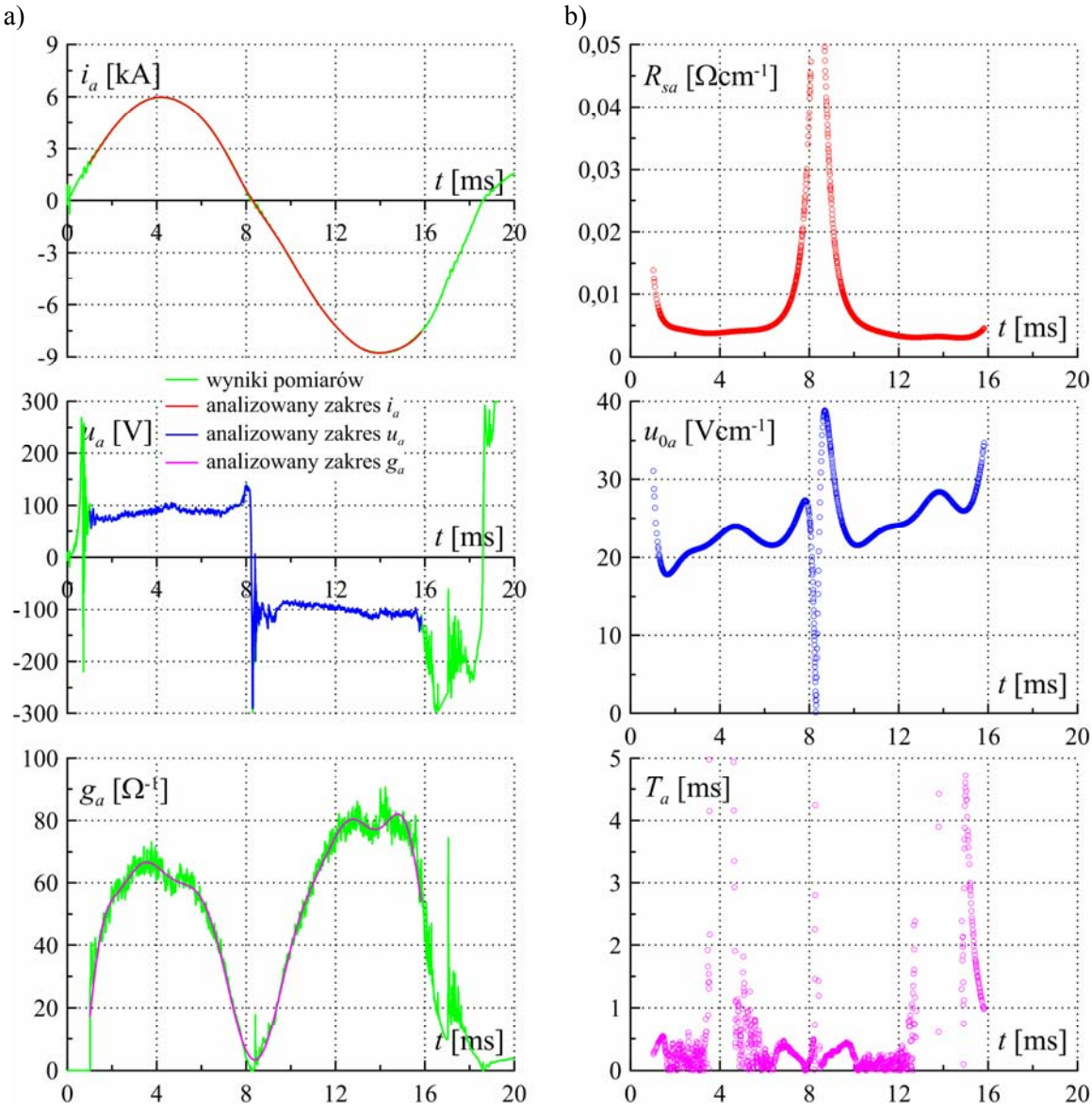
Podstawiając obliczone na podstawie zależności (11.3) parametry R_{sa} i u_{0a} oraz odpowiadające przedziałowi czasowemu $t_1 \div t_2$ przebiegi wartości bezwzględnej prądu i_a i napięcia łuku u_a do wzoru (11.4) obliczono wartość stałej czasowej T_a zgodnie ze wzorem [11]:

$$T_a = \frac{\int_{t_1}^{t_2}\left[\dfrac{|u_a|}{\left(u_0 + R_{sa}|i_a|\right)} - 1\right]\mathrm{d}t}{\ln\dfrac{g_{a2}}{g_{a1}}}. \tag{11.5}$$

Przedstawione na rys. 11.1 przebiegi pokazują dwukrotną zmianę znaku pochodnej przewodności łuku dg_a po czasie dt w ciągu jednego półokresu zmian prądu i_a. Dwukrotną zmianę znaku pochodnej przewodności łuku dg_a po czasie dt w ciągu jednego półokresu zmian prądu i_a uzyskuje się poprzez wykorzystanie do obliczeń parametrów opisujących równanie (4.18) oraz wyników uzyskanych z aproksymacji funkcją wielomianową przewodności łuku g_a. W tej sytuacji zależności (11.3) i (11.5) pozwalają jedynie na wyznaczenie zaledwie dwóch chwil czasowych t_1 i t_2, przypadających na jeden półokres zmian prądu i_a, i przypisanych im wartości R_{sa}, u_{0a} oraz T_a. Metoda ta powoduje znaczne „uśrednienie" wartości zmiennych R_{sa}, u_{0a} i T_a, które po podstawieniu do równania (4.18) wprowadzają znaczne błędy do dalszych obliczeń prądów zwarcia łukowego i_a oraz napięcia łuku u_a w odniesieniu do wyników badań laboratoryjnych.

Skokowy ruch stóp przyelektrodowych niskonapięciowego łuku zwarciowego powoduje silne oddziaływanie na wartość chwilową napięcia u_a oraz przewodność łuku g_a. Tak więc praktyczne wykorzystanie zależności (11.3) i (11.5), służących obliczeniu parametrów opisujących równanie (4.18), sprowadza się do wyznaczenia czasów t_1, t_2,...t_n

określających zmianę znaku pochodnej dg_a po czasie dt, wyznaczoną na podstawie zarejestrowanych przebiegów prądu i_a, napięcia u_a i obliczonej przewodności łuku g_a. Natomiast sama wartość chwilowa przewodności łuku g_a w danym czasie t_1, t_2,...t_n wyznaczona jest z funkcji będącej aproksymacją wielomianową przebiegu przewodności łuku g_a. Takie rozwiązanie pozwala na wyznaczenie znacznie większej ilości parametrów R_{sa}, u_{0a} i T_a, przypadających na jeden półokres przebiegu prądu i_a, a tym samym określenie ich zmian w funkcji czasu t lub od wartości chwilowej prądu i_a. Przykładowe przebiegi prądu i_a i napięcia u_a niskonapięciowego łuku zwarciowego, jak również obliczone tą metodą parametry łuku, zostały przedstawione na rys. 11.2.



Rys. 11.2. Przebiegi: a) prądu i_a, napięcia u_a i obliczonej przewodności łuku g_a oraz b) wyznaczone parametry modelu łuku dla łuku zwarciowego dwufazowego; szyny AP 40x5 mm, a = 60 mm, $I_k^{"}$ = 5,84 kA, I_a = 5,42 kA, U = 400 V

Należy jednak zaznaczyć, że zaproponowana metoda wyznaczania parametrów łuku powoduje, oprócz uzyskania większej liczby punktów, zmniejszenie granic przedziałów czasowych, w których są one wyznaczane. Skrócenie przedziałów czasu, w których obliczane są parametry łuku istotnie wpływa na wynik stałej czasowej T_a, która jest wyznaczana na podstawie zależności (11.5). W przypadku, gdy różnica wartości przewodności g_a pomiędzy sąsiednimi punktami dąży do zera, wartość mianownika zależności (11.5) gwałtownie maleje, co w efekcie powoduje, że przy bardzo małych przyrostach czasu dt, wartość stałej czasowej T_a gwałtownie wzrasta. Sytuacja taka występuje w momencie, gdy wartość bezwzględna prądu łuku i_a osiąga wartość szczytową lub jest bliska zeru. Uzyskane przy tych wartościach prądu i_a wyniki stałej czasowej T_a potraktowano jako błąd obliczeń i pominięto w dalszych obliczeniach ze względu na bardzo duże rozbieżności wartości w porównaniu do pozostałych wyników w innych przedziałach prądu.

Przedział czasu, w jakim wyznaczone zostały parametry łuku, z jednej strony ograniczony jest czasem rozpadu drucika, który inicjował łuk zwarciowy, a z drugiej strony – chwilą, w której łuk dociera do końca układu szynowego. Odpowiadające analizowanemu przedziałowi czasu wartości zmiennych i_a, u_a i g_a zostały przedstawione na rys. 11.2a. kolorem odpowiednio: czerwonym – prąd i_a, niebieskim – napięcie u_a, fioletowym – przewodność łuku g_a.

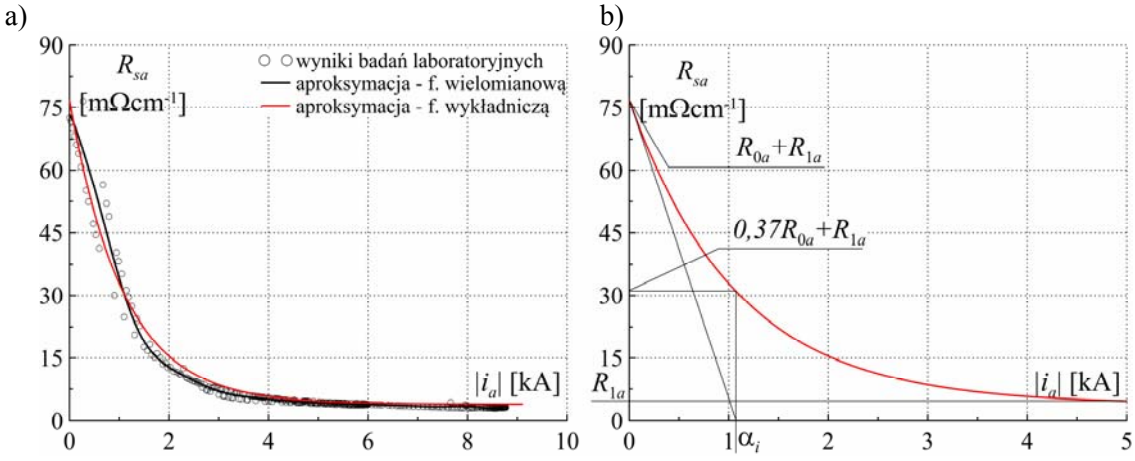
Kolejnym etapem obliczeń parametrów opisujących równanie (4.18) jest uzależnienie parametrów R_{sa}, u_{0a} i T_a od wartości bezwzględnej prądu i_a oraz wyznaczenie współczynników wchodzących w skład zależności (4.19) i (4.20).

W przypadku zależności określającej zmianę rezystancji łuku R_{sa} odniesionej do jednostki długości łuku l_a w funkcji wartości bezwzględnej prądu i_a wykorzystano aproksymację wyników uzyskanych z badań laboratoryjnych przebiegiem wykładniczym określonym wzorem (4.19). We wzorze tym wartość R_{1a} wyznaczono, jako wartość średnią arytmetyczną z zależności $R_{sa} = f(|i_a|)$ odpowiadającą wartościom $|i_a|$ mieszczącym się w granicach $0{,}4 \div 0{,}85 i_{a\max}$, w których $i_{a\max}$ jest wartością szczytową z wartości bezwzględnej prądu łuku i_a liczoną w danym półokresie przebiegu prądu.

Przy wartościach prądów nieprzekraczających $0{,}1 i_{a\max}$ zależność $R_{sa} = f(|i_a|)$ przedstawia funkcję liniową. W związku z tym, w celu obliczenia wartości R_{0a} wykorzystano aproksymację liniową przebiegu $R_{sa} = f(|i_a|)$ w zakresie prądów $0 \div 0{,}1 i_{a\max}$. Wartość parametru R_{0a} wyznaczono jako miejsce przecięcia krzywej aproksymacji liniowej zależności $R_{sa} = f(|i_a|)$, w zadanym zakresie prądów i_a, z osią rzędnych,

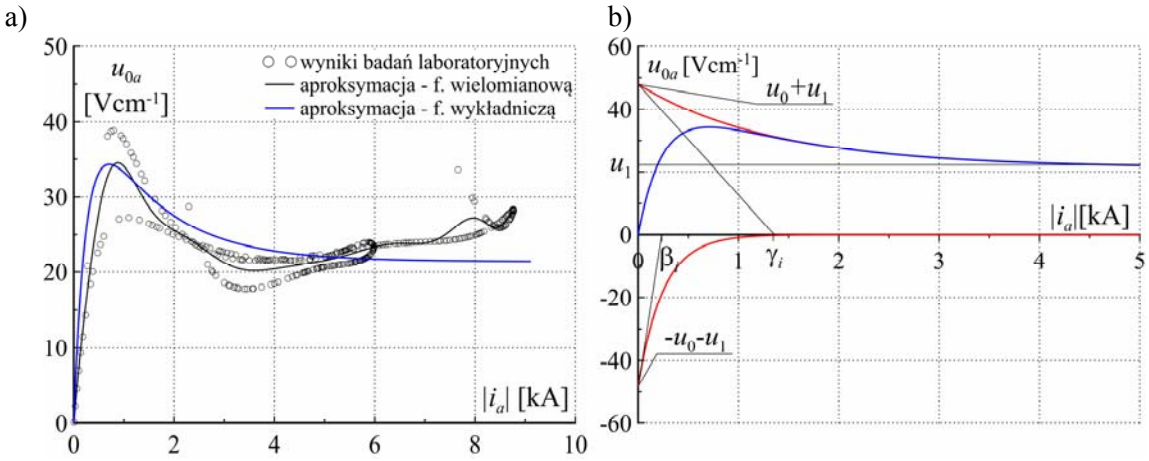
tj. dla i_a = 0 A. Przykładową zależność rezystancji łuku R_{sa} odniesionej do jednostki długości l_a od wartości chwilowej prądu i_a oraz jej aproksymację funkcją wykładniczą opisaną zależnością (4.19) zamieszczono na rys. 11.3.

Parametrowi α_i przypisano wartość równą wartości bezwzględnej prądu łuku i_a, jaka odpowiada wartości rezystancji $R_{sa} = R_{1a} + 0{,}37R_{0a}$ (rys. 11.3b).



Rys. 11.3. Zależność składowej rezystancji łuku R_{sa} odniesionej do jednostki długości łuku l_a od wartości chwilowej prądu zwarciowego i_a: a) wyniki badań laboratoryjnych i b) wyznaczone na ich podstawie parametry opisujące zależność $R_{sa} = f(|i_a|)$

Zależność składowej stałej napięcia łuku u_{0a} odniesionej do jednostki długości łuku l_a od bezwzględnej wartości prądu i_a zostało aproksymowane funkcją (4.20). Przykładową aproksymację funkcją wykładniczą uzyskanych na podstawie badań laboratoryjnych wyników obliczeń składowej stałej napięcia łuku u_{0a} odniesionej do jednostki długości l_a, zamieszczono na rys. 11.4. Wzór (4.20) opisują dwie składowe funkcji wykładniczych, których przebiegi zostały przedstawione na rys. 11.4b.



Rys. 11.4. Zależność napięcia odniesionego do jednostki długości łuku u_{0a} od wartości chwilowej prądu zwarciowego i_a: a) wyniki badań laboratoryjnych i b) wyznaczone na ich podstawie parametry opisujące zależność $u_{0a} = f(|i_a|)$

Parametr u_1 został obliczony jako wartość średnia arytmetyczna z zależności $u_{0a} = \mathrm{f}(|i_a|)$ w przedziale $|i_a|$ mieszczącym się w granicach $0{,}4 \div 0{,}85 i_{a\max}$.

Do wyznaczenia parametrów β_i i γ_i wykorzystano aproksymację wielomianową przebiegu $u_{0a} = f(|i_a|)$, której zależność pokazano na rys. 11.4a. W przedziale wartości $|i_a| = 0 \div 0{,}3\ i_{a\max}$ z aproksymacji wielomianowej funkcji $u_{0a} = f(|i_a|)$ wyznaczono wartość maksymalną składowej stałej napięcia $u_{0a\max}$ i odpowiadającą jej wartość prądu $i_{0a\max}$. Również z aproksymacji wielomianowej przebiegu $u_{0a} = f(|i_a|)$ w zakresie prądów mieszczących się w przedziale $|i_a| = 0 \div i_{0a\max}$, wyznaczono wartości prądów $i_{0a30\%}$ i $i_{0a90\%}$. Współczynnik β_i wyznaczono na podstawie zależności [23, 77]:

$$\beta_i = \frac{1{,}67}{3}\left(i_{0a90\%} - i_{0a30\%}\right). \tag{11.6}$$

Natomiast współczynnik γ_i obliczono na podstawie wzoru [23, 77]:

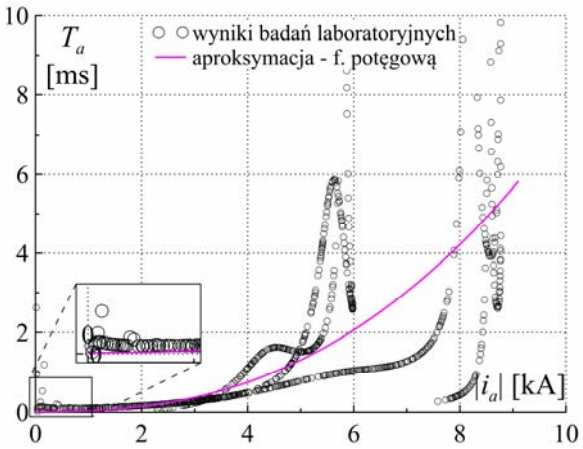
$$\gamma_i = \frac{i_{0a50\%}}{0{,}73}, \tag{11.7}$$

w którym $i_{0a50\%}$ jest wartością prądu odpowiadającą składowej stałej napięcia równej $u_{0a\max} - 0{,}5(u_{0a\max} - u_1)$ mieszczącej się w zakresie $u_{0a\max} \div u_1$.

Znajomość powyższych wielkości umożliwia obliczenie stałej u_0 na podstawie zależności [23, 77]:

$$u_0 = \frac{u_{0a\max} - u_1}{e^{-\frac{i_{0a\max}}{\gamma_i}} - e^{-\frac{i_{0a\max}}{\beta_i}}}. \tag{11.8}$$

Zmianę stałej czasowej łuku T_a w funkcji wartości bezwzględnej prądu łuku $|i_a|$ opisano za pomocą funkcji potęgowej zgodnie z równaniem (4.21), w której kształt funkcji określają współczynniki K_{Ta} i T_{0a}. Zależność stałej czasowej łuku T_a od wartości bezwzględnej prądu łuku i_a oraz jej aproksymacja funkcją potęgową zostały zamieszczone na rys. 11.5.



Rys. 11.5. Zależność stałej czasowej łuku T_a od wartości bezwzględnej prądu łuku i_a

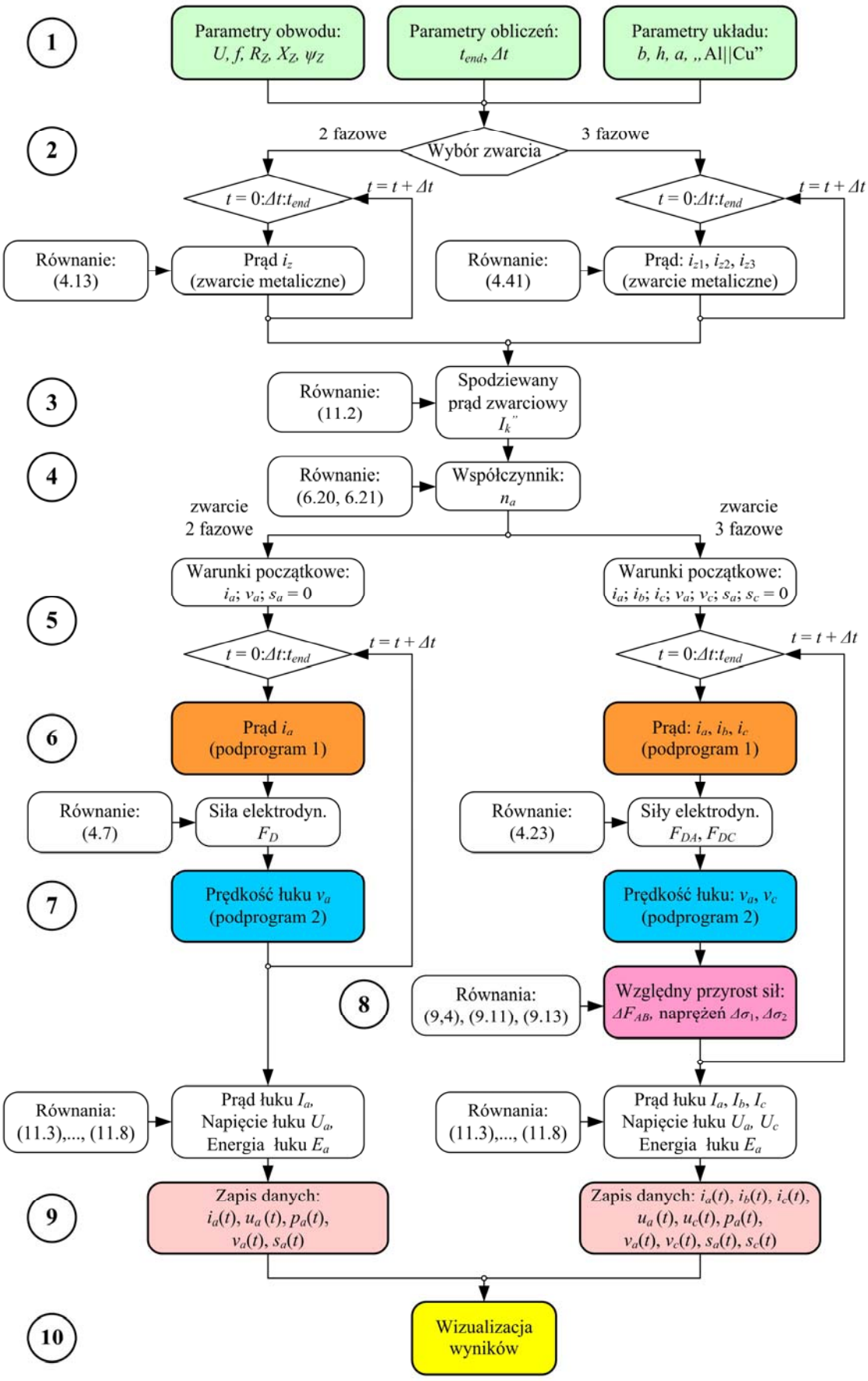
Wartość współczynnika K_{Ta} została obliczona jako współczynnik kierunkowy prostej będącej aproksymacją liniową przebiegu $T_a = f(|i_a|)$ w przedziale prądu $|i_a|$ mieszczącym się w zakresie $0{,}2 \div 0{,}6 i_{a\max}$, w którym zmiana stałej czasowej łuku T_a w funkcji wartości bezwzględnej prądu $|i_a|$ ma charakter liniowy (rys. 11.5). Natomiast wartość współczynnika T_{0a} została wyznaczona jako miejsce przecięcia się wykresu aproksymacji liniowej funkcji $T_a = f(|i_a|)$ z osią rzędnych, tj. dla $i_a = 0$ A.

Załącznik B: Struktura programów obliczeniowych

Obliczenia dotyczące wyznaczenia parametrów niskonapięciowego łuku zwarciowego oraz dynamiki łuku przemieszczającego się wzdłuż szyn zostały wykonane za pomocą programu Matlab. Program ten, ze względu na duże możliwości obliczeniowe i możliwość wprowadzania danych z plików zewnętrznych, wykorzystywany był na kilka sposobów, do których można zaliczyć:

- wyznaczenie prędkości chwilowej łuku na podstawie pomiarów laboratoryjnych oraz przygotowanie danych do dalszych obliczeń,
- obliczenie parametrów charakteryzujących model łuku zwarciowego,
- wyznaczenie współczynników poprawkowych użytego modelu dynamiki łuku,
- porównanie obliczeń dynamiki ruchu łuku zwarcia dwu i trójfazowego z wynikami badań eksperymentalnych,
- zapis i edycja uzyskanych wyników obliczeń i badań laboratoryjnych.

Układ programu został opracowany tak, aby umożliwiał obliczenie prądów, napięć, mocy łuku, energii zwarcia, prędkości i położenia łuku względem początkowego punktu zapłonu, dla przypadku zwarć łukowych dwu- i trójfazowych, przy wcześniej zdefiniowanych parametrach obwodu zwarciowego i układu szynowego. W obliczeniach zostały wykorzystane współczynniki poprawkowe i zmienne opisujące model łuku zwarciowego, które zostały wyznaczone na podstawie badań laboratoryjnych. Wartości tych parametrów zostały uzależnione od spodziewanego prądu zwarciowego I_k'', jako podstawowego parametru wyznaczanego w obliczeniach zwarciowych. Struktura głównego programu obliczeniowego określającego dynamikę łuku zwarciowego została przedstawiona na rys. 12.1.



Rys. 12.1. Struktura głównego programu obliczeniowego dynamiki łuku zwarciowego

Obliczenia zostały podzielone na 10 głównych etapów, w których wykonywane są poszczególne instrukcje programu, tj:

1 – Wprowadzenie danych dotyczących parametrów układu, takich jak napięcie U i częstotliwość f źródła zasilającego, rezystancja R_Z i reaktancja X_Z pętli zwarciowej oraz kąt fazowy powstania zwarcia łukowego Ψ_Z. Dodatkowo wprowadzane są dane określające parametry obliczeń, takie jak czas obliczeń t_{end} i krok obliczeń Δt, oraz parametry samego układu szynowego, tj.: wymiary szyn b, h, odstęp między osiami szyn a i materiał szyn. W tej części dokonywany jest wybór rodzaju obliczeń, ze względu na rodzaj zwarcia, tj. zwarcie dwu lub trójfazowe.

2 – Obliczenie wartości chwilowej prądów zwarcia metalicznego dwufazowego i_z lub trójfazowego: i_{z1}, i_{z2}, i_{z3} przy zadanych parametrach obwodu zwarciowego. Kąt załączenia zwarcia Ψ_Z na tym etapie obliczeń zostaje dobrany w taki sposób, aby przebieg prądu zwarciowego nie zawierał składowej nieokresowej i wyznaczany jest na podstawie zależności:

$$\Psi_Z = arc\,\mathrm{tg}\frac{X_Z}{R_Z}. \tag{12.1}$$

W przypadku zwarcia trójfazowego kąt załączenia zwarcia Ψ_Z zostaje tak obliczony, aby w fazie L2 występowała tylko składowa okresowa prądu zwarciowego. Obliczenia prądów przeprowadzane są w zależności od rodzaju zwarcia zgodnie ze wzorami (4.13) lub (4.41), przy pominięciu w obliczeniach wpływu przewodności łuku na wartość prądu.

3 – Obliczenie wartości spodziewanego prądu zwarciowego $I_k^{"}$, jako wartości skutecznej składowej okresowej prądu zwarcia metalicznego na podstawie wzoru:

$$I_k^{"} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)\,\mathrm{dt}}, \tag{12.2}$$

gdzie T jest okresem zmian napięcia, i jest analizowanym w obliczeniach prądem fazowym w przypadku zwarcia dwufazowego – i_z i trójfazowego – i_{z2}.

4 – Obliczenie współczynnika poprawkowego n_a uwzględniającego wpływ prądu łuku na zmianę promienia łuku. Wartość współczynnika poprawkowego n_a została wyznaczona na podstawie wyników badań prędkości łuku dwufazowego.

5 – Przypisanie warunków początkowych do obliczeń prądów zwarcia łukowego i prędkości kolumn przemieszczającego się łuku, i uzyskanie wyników symulacji metodą *krok po kroku*.

6 – Wyznaczenie w danym kroku obliczeń Δt wartości chwilowej prądu zwarcia łukowego za pomocą podprogramu 1 oraz wartości chwilowych wypadkowych sił elektrodynamicznych działających na kolumny łukowe.

7 – Obliczenie prędkości chwilowej łuku z wykorzystaniem podprogramu 2. Po zakończeniu obliczeń na podstawie danych zostają wyznaczone parametry charakteryzujące dane zwarcie łukowe. Dla zwarcia trójfazowego są to:

- prądy fazowe zwarcia łukowego I_a, I_b i I_c obliczone, jako wartości skuteczne zgodnie z zależnościami:

$$I_a = \sqrt{\frac{1}{k_T T}\int_0^{k_T T} i_a^{\,2}(t)\,\mathrm{dt}}\,, \tag{12.3}$$

$$I_b = \sqrt{\frac{1}{k_T T}\int_0^{k_T T} i_b^{\,2}(\mathrm{t})\,\mathrm{dt}}\,, \tag{12.4}$$

$$I_c = \sqrt{\frac{1}{k_T T}\int_0^{k_T T} i_c^{\,2}(\mathrm{t})\,\mathrm{dt}}\,, \tag{12.5}$$

  przy czym k_T jest liczbą całkowitą zaokrągloną w dół określająca krotność okresu zmian napięcia zasilania T w stosunku do całkowitego czasu trwania zwarcia łukowego t_z. W przypadku, gdy k_T jest mniejsze od 1, wartość skuteczna prądu obliczana jest z niepełnego okresu przebiegu. Czas zwarcia łukowego t_z określony jest jako czas, jaki upłynie od momentu powstania zwarcia do chwili zaniku prądu zwarciowego.

- napięcia łukowe U_a i U_c, liczone, jako wartości skuteczne za pomocą wzorów:

$$U_a = \sqrt{\frac{1}{k_T T}\int_0^{k_T T} u_a^{\,2}(t)\,\mathrm{dt}}\,, \tag{12.6}$$

$$U_c = \sqrt{\frac{1}{k_T T}\int_0^{k_T T} u_c^{\,2}(t)\,\mathrm{dt}}\,. \tag{12.7}$$

- energia zwarcia łukowego E_a w zadanym czasie obliczeń t_{end}, liczona zgodnie ze wzorem:

$$E_a = \int_0^{t_{end}} \left[p_a(t) + p_c(t)\right]\mathrm{dt}\,, \tag{12.8}$$

  gdzie p_a i p_c są mocami chwilowymi poszczególnych kolumn łukowych zwarcia trójfazowego, obliczone zgodnie z równaniami:

$$p_a(t) = i_a(t)u_a(t)\,, \tag{12.9}$$

$$p_c(t) = i_c(t)u_c(t)\,. \tag{12.10}$$

- prędkości dwóch kolumn łukowych $v_{a\text{mean}}$ i $v_{c\text{mean}}$, liczone, jako wartości średnie z przebiegu v_a i v_c zgodnie z równaniami:

$$v_{a\,\text{mean}} = \frac{1}{n_z}\sum_{n=0}^{n=n_z} v_a(n)\,, \tag{12.11}$$

$$v_{c\,\text{mean}} = \frac{1}{n_z}\sum_{n=0}^{n=n_z} v_c(n)\,, \tag{12.12}$$

przy czym n_z jest liczbą punktów obliczeń w czasie trwania zwarcia t_z wyznaczoną ze wzoru:

$$n_z = \frac{t_z}{\Delta t}\,. \tag{12.13}$$

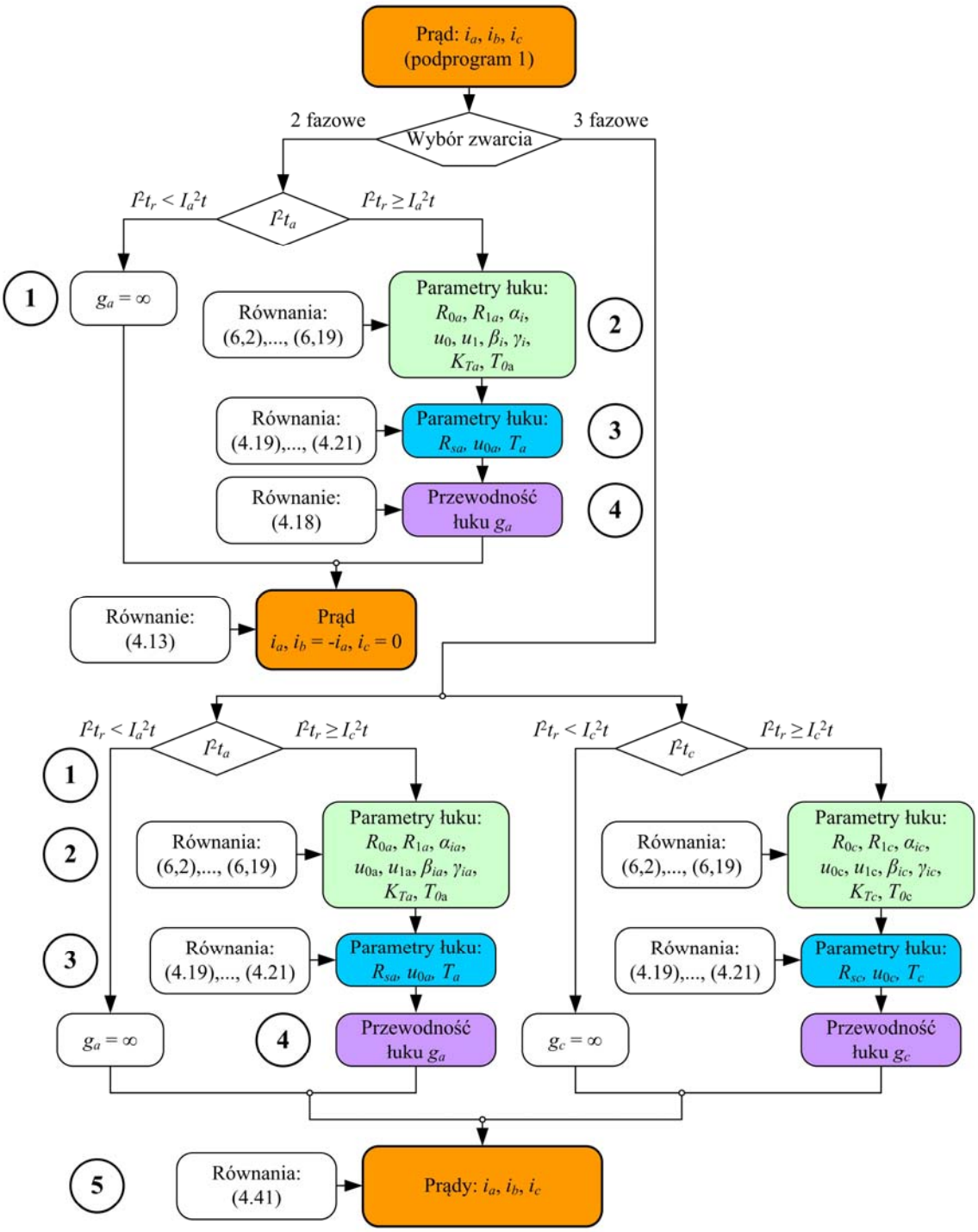
W przypadku zwarcia dwufazowego nie są wyznaczane: prąd I_c, napięcie łuku U_c i prędkość $v_{c\text{mean}}$. Natomiast przyjmuje się, że: $i_a = -i_b$, $i_c = 0$ A, $u_c = 0$ V.

8 – Obliczenie względnego przyrostu lub zmniejszenia: elektrodynamicznej siły elementarnej, działającej na szynę środkową w trakcie zwarcia łukowego ΔF_{AB}, naprężeń zginających, występujących w trakcie zwarcia łukowego, odniesionych do naprężenia zginającego w przewodzie fazowym w trakcie zwarcia metalicznego $\Delta\sigma_1$, naprężeń zginających, występujących w trakcie zwarcia łukowego, odniesionych do wartości dopuszczalnych naprężeń zgodnie z procedurą przedstawioną w rozdziale 9.

9 – Zapis wyników obliczeń do pliku.

10 – Wizualizacja wyników obliczeń.

W programie głównym obliczenia wartości chwilowych prądów zwarciowych przeprowadzane są za pomocą podprogramu 1, którego strukturę przedstawiono na rys. 12.2. W obliczeniach uwzględniono wpływ rezystancji łuku na wartość chwilową prądu zwarciowego, wykorzystując model łuku zwarciowego, w którym parametry opisujące równanie łuku wyznaczono na podstawie badań laboratoryjnych. Sposób wyznaczania wartości prądów w przypadku zwarć dwu i trójfazowych jest identyczny, przy czym w przypadku zwarcia trójfazowego, gdzie występują dwie kolumny łukowe palące się pomiędzy szynami skrajnymi i środkową, parametry określające poszczególne kolumny łukowe wyznaczane są odrębnie w zależności od wartości chwilowej prądu łukowego.



Rys. 12.2. Struktura podprogramu 1 wyznaczającego wartość prądu zwarciowego

Wyznaczenie wartości chwilowych prądów płynących w poszczególnych fazach w danym kroku obliczeń prądów składa się z 5 etapów, do których możemy zaliczyć:

1 – Pomięcie rezystancji łuku w obliczeniach prądów zwarciowych w czasie przed rozpadem drucika inicjującego zwarcie łukowe. Warunek mówiący o rozpadzie drucika

inicjującego zwarcie łukowe jest reprezentowany przez całkę Joule'a przedłukową I^2t_r elementu topikowego, która została wyznaczona na podstawie badań laboratoryjnych. Wprowadzenie warunku dotyczącego rozpadu drucika w początkowym etapie obliczeń wartości chwilowych prądów zwarciowych ma na celu zmniejszenie różnic pomiędzy uzyskiwanymi wynikami obliczeń prądów łukowych i prędkości przemieszczania się łuku a wynikami badań laboratoryjnych. W badaniach laboratoryjnych zapłon sztucznie zainicjowanego łuku wymaga dostarczenia pewnej porcji energii, która powoduje rozpad elementu topikowego, co przy zadanej wartości prądu zwarciowego wymaga czasu.

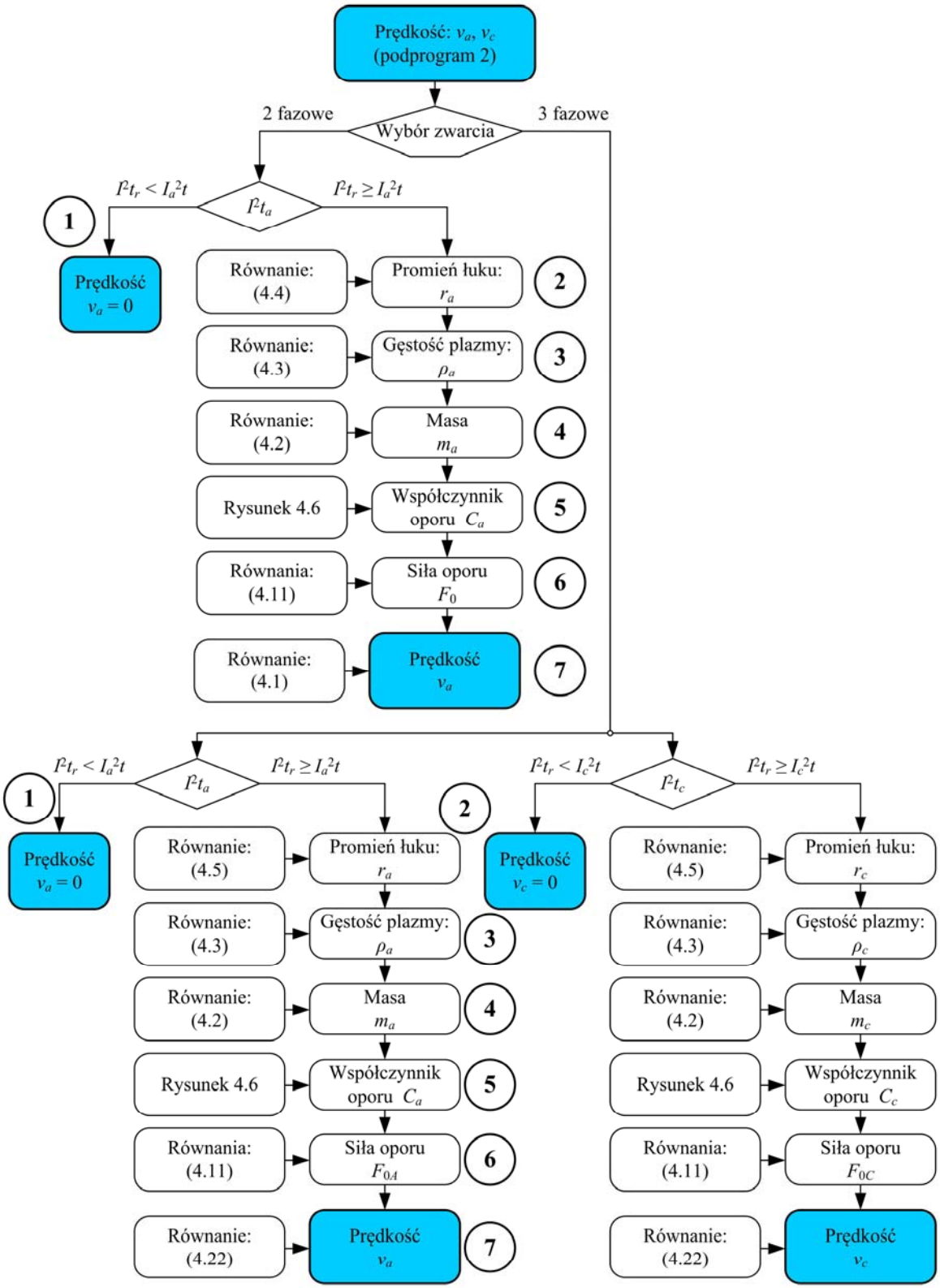
2 – Przypisanie zmiennych opisujących zależności określające parametry równania łuku: rezystancję odniesioną do jednostki długości łuku R_{sa}, składowa stałą napięcia odniesioną do jednostki długości łuku u_{0a} i stałą czasową łuku T_a. Poszczególne zmienne opisujące podane parametry równania łuku zakłóceniowego wyznaczone zostały na podstawie badań laboratoryjnych i uzależniono je od geometrii oraz materiału szyn, a także od wartości spodziewanego prądu zwarciowego I_k''.

3 – Obliczenie w danym kroku parametrów równania modelu łuku zakłóceniowego na podstawie wzorów (4.19), (4.20) i (4.21). Parametry: R_{sa}, u_{0a} oraz T_a uzależnione są od wartości chwilowej prądu łukowego wyznaczonej z poprzedniego kroku obliczeń.

4 – Wyznaczenie w danym kroku obliczeń chwilowej przewodności łuku g_a na podstawie równania (4.18).

5 – Obliczenie wartości chwilowej prądów łukowych zgodnie z zależnościami (4.13) oraz (4.14) – dla zwarcia dwufazowego, oraz (4.41) i (4.42) – dla zwarcia trójfazowego.

Prędkości chwilowe łuku lub łuków palących się pomiędzy szynami układu wyznaczane są w danym kroku obliczeń za pomocą podprogramu 2, którego struktura została przedstawiona na rys. 12.3. Procedura wyznaczenia prędkości chwilowych przemieszczającego się łuku zwarciowego jest podobna jak w przypadku podprogramu 1. W przypadku zwarcia trójfazowego, w którym występują dwie kolumny łukowe prędkość każdej z kolumn łukowych obliczana jest osobno.



Rys. 12.3. Struktura podprogramu 2 wyznaczającego prędkość łuku zwarciowego

Proces obliczeń prędkości chwilowej przemieszczającego się łuku zwarciowego został podzielony na 7 etapów, w których:

1 – Analizowana jest całka Joule'a przedłukowa elementu topikowego I^2t_r z obliczoną z wartości chwilowej prądu w danym kroku obliczeń całką Joule'a I_a^2t. W przypadku, gdy spełniona jest nierówność $I^2t_r < I_a^2t$, przypisywana jest wartość prędkości łuku $v_a = 0$ (przed rozpadem topika). W przypadku, gdy obliczona całka Joule'a I_a^2t jest większa lub równa całce Joule'a przedłukowej elementu topikowego I^2t_r (po rozpadzie topika) następuje procedura obliczenia parametrów pomocniczych niezbędnych do wyznaczenia prędkości łuku.

2 – Obliczany jest promień walca odzwierciedlającego kolumnę łukową r_a, zgodnie z równaniem (4.4).

3 – Wyznaczona jest gęstości plazmy ρ_a łuku według wzoru (4.3).

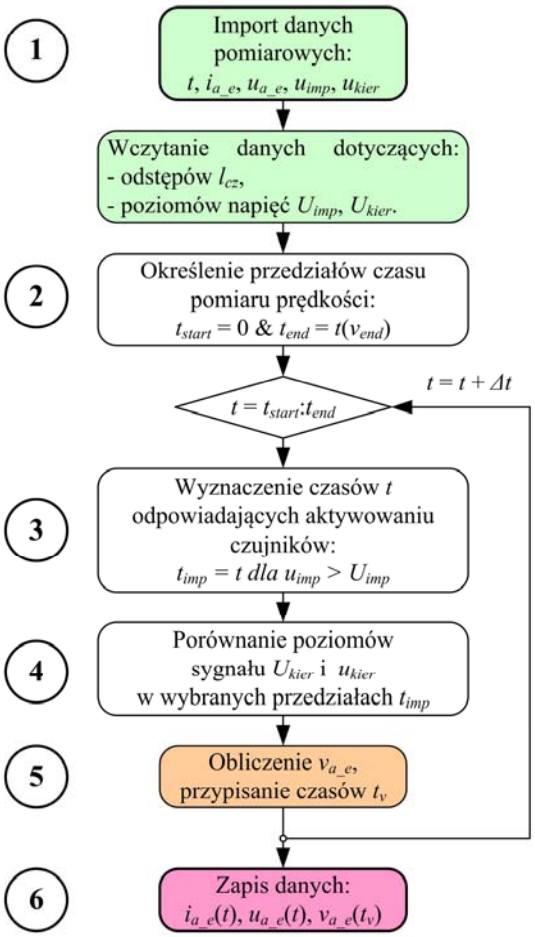
4 – Obliczona zostaje masa walca odzwierciedlającego kolumnę łukową ograniczonego wymiarami r_a i l_a, zgodnie z zależnością (4.2).

5 – Określony zostaje współczynnik oporu aerodynamicznego C_a dla walca odzwierciedlającego kolumnę łukową według wykresu przedstawionego na rys. 4.6.

6 – Obliczona jest wypadkowa siła oporu aerodynamicznego F_0 dla walca odzwierciedlającego kolumnę łukową poruszającego się prędkością v_a wyznaczoną w kroku $t - \Delta t$.

7 – Wyznaczona zostaje w danym kroku obliczeń prędkość chwilowa kolumny łukowej v_a w przypadku zwarcia dwufazowego zgodnie ze wzorem (4.1) lub prędkości v_a i v_c dwóch kolumn zwarcia trójfazowego. Prędkość przemieszczania się łuku w tym przypadku wyznaczana jest na podstawie zależności (4.22).

Obliczenie prądów zwarciowych i prędkości łuku zwarciowego w programie głównym oparte jest na podstawie przedstawionego w podrozdziałach 4.1 i 4.2 modelu empirycznego, w którym współczynniki opisujące równanie łuku zwarciowego, oraz współczynnik poprawkowy zawarty w równaniu dynamiki łuku wyznaczane są na podstawie badań laboratoryjnych łuku dwufazowego. W celu wyznaczenia niezbędnych zmiennych opracowano dodatkowe programy, w których potrzebne zmienne są obliczane. Na rys. 12.4 zamieszczono strukturę programu obliczającego prędkość łuku dwufazowego na podstawie zarejestrowanych podczas pomiarów laboratoryjnych wielkości. Sposób pomiaru prędkości łuku dwufazowego został przedstawiony w rozdziale 6. Program ten dodatkowo przygotowuje pod względem edytorskim uzyskane wyniki pomiarów do dalszej analizy.



Rys. 12.4. Struktura programu obliczającego prędkość łuku na podstawie zarejestrowanych sygnałów w trakcie badań laboratoryjnych

Proces wyznaczenia prędkości chwilowej przemieszczającego się wzdłuż prostoliniowego układu szyn łuku zwarcia dwufazowego na podstawie uzyskanych wyników badań laboratoryjnych został podzielany na 6 etapów, w których wykonywane są instrukcje programu polegające na:

1 – Imporcie zapisanych w pamięci oscyloskopu sygnałów pomiarowych: prądu łukowego $i_{a_e}(t)$, napięcia łuku $u_{a_e}(t)$ oraz sygnałów u_{imp} i u_{kier} z układu pomiaru prędkości UPP, którego opis zasady działania umieszczono w rozdziale 6.2. W tej części programu wprowadzane są dane dotyczące odstępu pomiędzy sąsiednimi czujnikami pomiarowymi l_{cz}, oraz dotyczące poziomów rejestrowanych napięć U_{imp} i U_{kier}, dla których przypisane są informacje o zwrotach prędkości łuku.

2 – Określeniu przedziału czasu, w którym przeprowadzony został pomiar prędkości łuku v_a na odcinku kontrolnym układu szynowego. Za punkt początkowy przedziału t_{start}

przyjęto moment wystąpienia zwarcia, który zapisany został przez oscyloskop w chwili $t = 0$. Punkt końcowy t_{end} przedziału został określony przez chwilę czasową odpowiadającą momentowi zadziałania ostatniego czujnika układu UPP, umieszczonego na końcu odcinka kontrolnego układu szynowego.

3 – Wyznaczeniu chwil czasowych, w których zostały aktywowane czujniki optyczne. Aktywowanie czujników optycznych określone jest poprzez spełnienie warunku $u_{imp} > U_{imp}$.

4 – Porównaniu mierzonego sygnału u_{kier} z zadanymi przedziałami sygnału U_{kier} w wybranych i określonych w etapie 3 przedziałach czasu.

5 – Obliczeniu wartości prędkości łuku v_{a_e} w wybranych przedziałach czasu. Układ pomiaru prędkości umożliwia wykrycie kierunku, w którym przemieszcza się łuk, oraz w przypadku niezadziałania pojedynczego czujnika umożliwia też skorygowanie wyników obliczeń. W przypadku wyzwolenia kolejno następujących po sobie czujników, prędkość łuku obliczana jest zgodnie z zależnością:

$$v_{a_e} = \frac{l_{cz}}{t_{n+1} - t_n}, \tag{12.14}$$

gdzie: t_n, t_{n+1} są chwilami czasowymi odpowiadającymi zadziałaniu n i n +1 czujnika. W sytuacji, gdy w trakcie pomiaru nastąpi z jakichkolwiek powodów niezadziałanie czujnika, wynik obliczeń zostaje skorygowany zgodnie ze wzorem:

$$v_{a_e} = \frac{2l_{cz}}{t_{n+2} - t_n}, \tag{12.15}$$

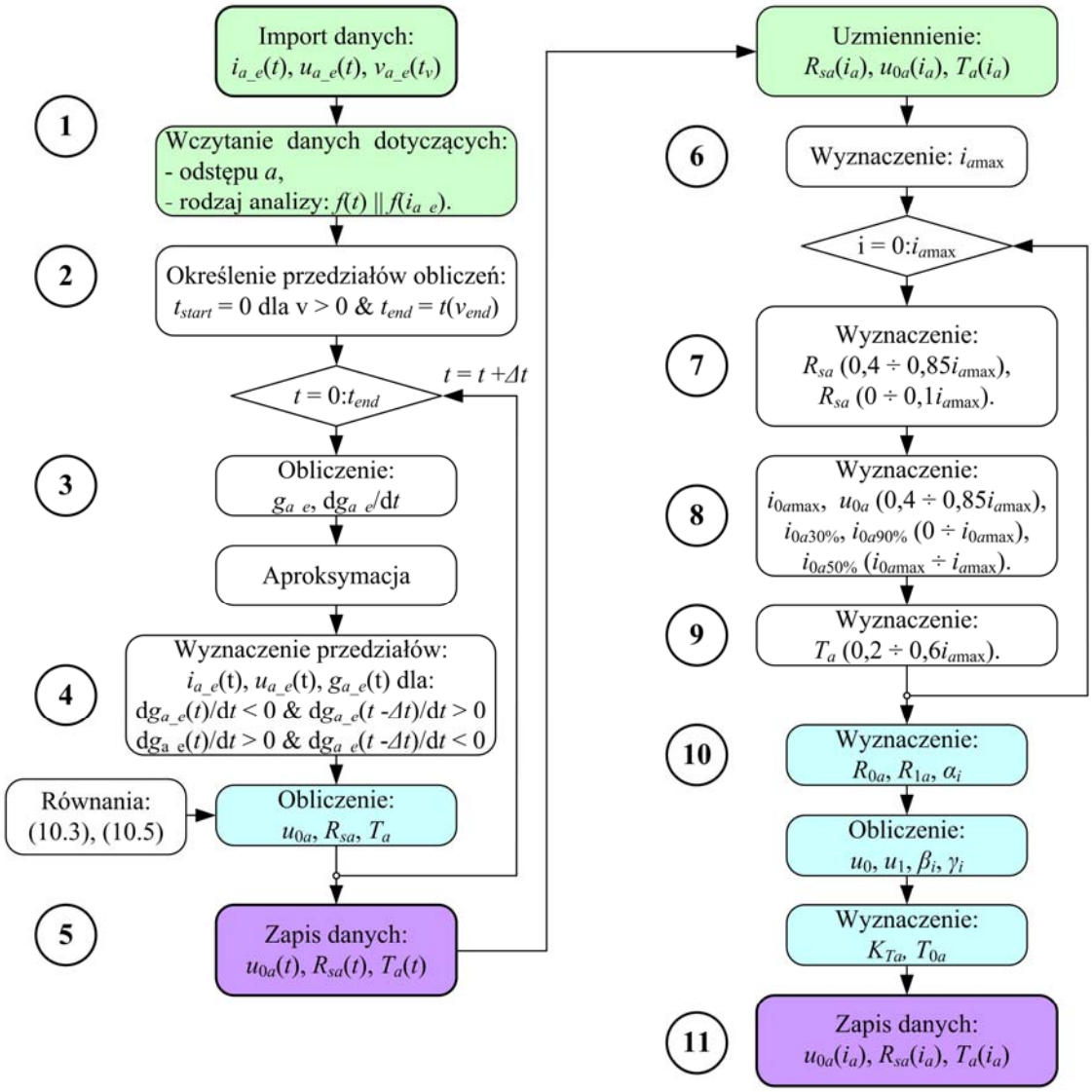
przy czym t_{n+2} jest chwilą czasową zadziałania n + 2 czujnika. W przypadku wykrycia ujemnego zwrotu prędkości wartość obliczona na podstawie wzoru (12.14) mnożona jest przez –1. Uzyskany wynik obliczeń prędkości przypisywany jest dla chwili czasowej t_v odpowiadającej połowie przedziału czasu, wynikającego z chwil czasowych, w których nastąpiło pobudzenie czujników.

6 – Zapisie wyników pomiarów i obliczeń do pliku.

Przygotowane wyniki pomiarowe następnie poddawane są dalszej analizie, w której wyznaczane są współczynniki niezbędne do dalszych obliczeń w zastosowanym modelu obliczeniowym.

Na rys. 12.5 przedstawiono strukturę programu, w którym obliczane są zmienne opisujące wykorzystane równanie łuku zwarciowego. Program ten umożliwia obliczenie współczynników rezystancji R_{sa} odniesionej do jednostki długości łuku l_a, składowej stałej napięcia u_{0a} odniesionej do jednostki długości łuku l_a i stałej czasowej łuku T_a,

jak również uzależnienie ich w funkcji czasu t lub od wartości chwilowej prądu zwarciowego i_a. Sposób wyznaczenia i aproksymacji powyższych zmiennych opisano w Załączniku A.



Rys. 12.5. Struktura programu wyznaczającego współczynniki opisujące równanie łuku zwarciowego

W zależności od wyboru funkcji program obliczeniowy składa się z 5 lub 11 etapów, w których wykonywane są poszczególne instrukcje programu tj.:

1 – Import wyników pomiarów laboratoryjnych: $i_{a_e}(t)$, $u_{a_e}(t)$ i $v_{a_e}(t)$ oraz wprowadzenie danych dotyczących układu szynowego, którego wyniki dotyczą.

2 – Określenie przedziału czasowego, w którym wykonywane są obliczenia szukanych parametrów. W celu wyznaczenia przedziału obliczeń posłużono się wynikami prędkości

łuku $v_{a_e}(t)$ i na tej podstawie przyjęto punkt startowy obliczeń $t_{start} = 0$. Końcowy punkt obliczeń t_{end} określono jako ostatni punkt pomiarowy prędkości v_{a_e} odpowiadający momentowi opuszczenia przez łuk odcinka kontrolnego, w którym wykonywany był pomiar prędkości.

3 – Obliczenie chwilowej przewodności łuku g_{a_e} i pochodnej przewodności łuku $\frac{\mathrm{d}\, g_{a_e}}{\mathrm{d}\, t}$ na podstawie wyników badań laboratoryjnych w analizowanym przedziale czasu.

4 – Wyznaczenie przedziałów czasów, w których następuje zmiana znaku pochodnej przewodności łuku $\frac{\mathrm{d}\, g_{a_e}}{\mathrm{d}\, t}$ i przypisanie do pamięci podręcznej wyników pomiaru prądu $i_{a_e}(t)$, napięcia łuku $u_{a_e}(t)$, oraz przewodności łuku $g_{a_e}(t)$ w wyznaczonych przedziałach czasu. Obliczenie zgodnie z równaniami (11.3), (11.5) szukanych zmiennych.

5 – Zapis wyników obliczeń do pliku.

6 – Uszeregowanie wyników obliczeń R_{sa}, u_{0a} i T_a w funkcji wartości chwilowej prądu łukowego i_{a_e} i wyznaczenie wartości maksymalnej prądu $i_{a\max}$ w poszczególnych półokresach prądu łukowego i_{a_e}.

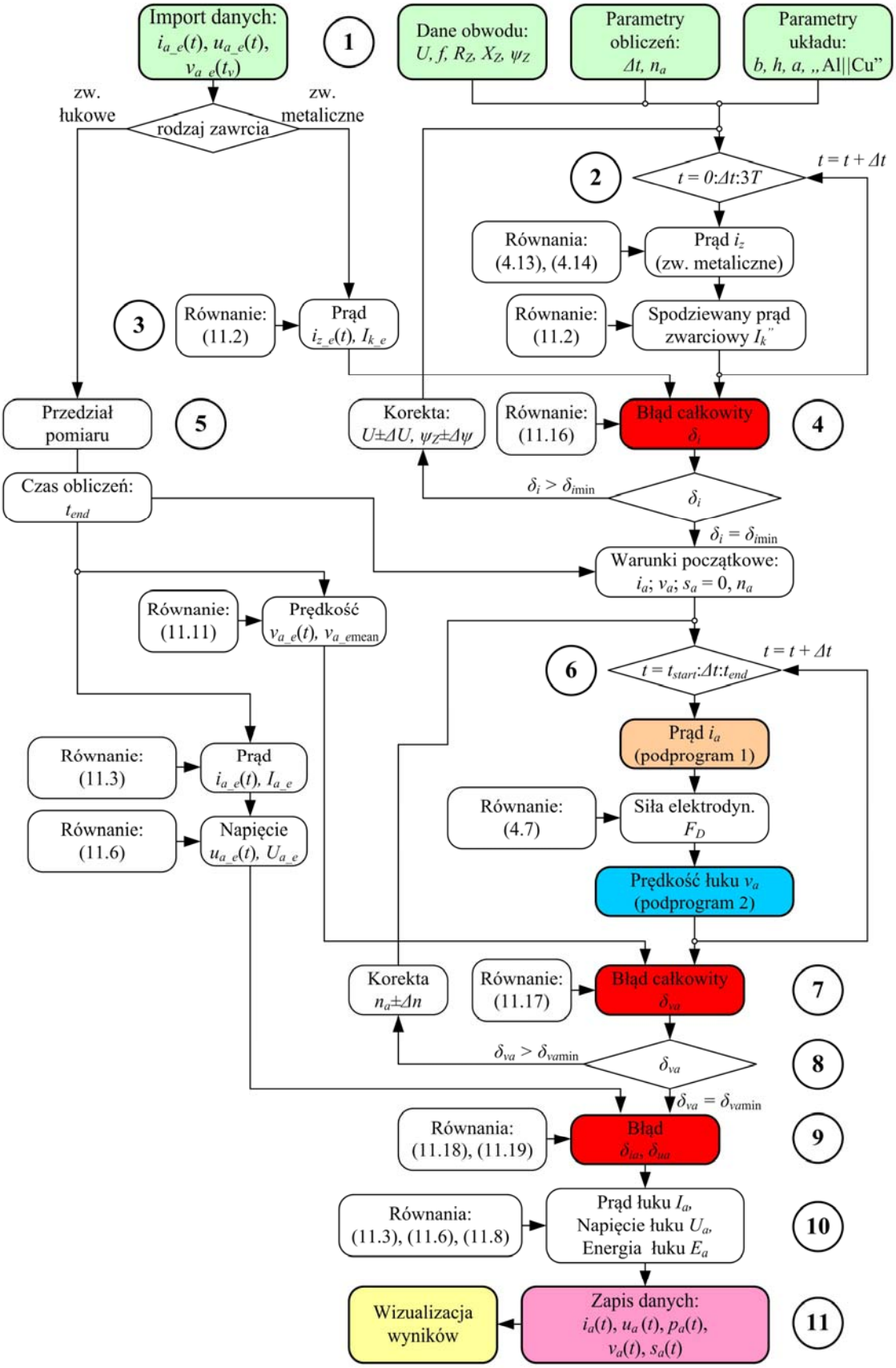
7 – Przypisanie do pamięci podręcznej programu wyników obliczeń R_{sa} w zadanych przedziałach wartości chwilowej prądu łukowego i_a, tj.: $0{,}4 \div 0{,}85 i_{a\max}$ oraz $0 \div 0{,}1 i_{a\max}$.

8 – Przypisanie do pamięci podręcznej programu wyników obliczeń u_{0a} w zadanych przedziałach wartości chwilowej prądu łukowego i_a oraz wyznaczenie wartości prądu łukowego $i_{0a\max}$ odpowiadającemu wartości szczytowej składowej stałej napięcia u_{0a} odniesionej do jednostki długości łuku l_a, prądu łukowego $i_{0a30\%}$ i $i_{0a90\%}$ w przedziale prądu $0 \div i_{0a\max}$ i $i_{0a50\%}$ z zakresu $i_{0a\max} \div i_{a\max}$ oraz odpowiadających im wartości składowej stałej napięcia u_{0a}.

10 – Obliczenie współczynników: równania (4.19) opisującego rezystancję $R_{sa}(i_a)$, do których należą R_{0a}, R_{1a} i α_i, zależności (4.20) określającej zmianę składowej stałej napięcia $u_{0a}(i_a)$ (współczynniki u_0, u_1, β_i i γ_i), równania (4.21) opisującego zmianę stałej czasowej $T_a(i_a)$, tj.: K_{Ta} i T_{0a}. Sposób wyznaczenia poszczególnych zmiennych został zaprezentowany w Załączniku A.

11 – Zapis wyników obliczeń do pliku.

Kolejnym krokiem przy wyznaczeniu współczynników zawartych w empirycznym modelu dynamiki łuku jest wyznaczenie współczynnika poprawkowego n_a zawartego w równaniu dynamiki łuku zwarciowego. Współczynnik poprawkowy n_a wyznaczany jest w programie, którego struktura działania została przedstawiona na rys. 12.6.



Rys. 12.6. Struktura programu wyznaczającego współczynnik poprawkowy n_a zawarty w modelu dynamiki łuku

Procedura obliczenia współczynnika poprawkowego n_a realizowana jest na podstawie wyników badań laboratoryjnych metodą kolejnych przybliżeń. Cały cykl obliczeniowy podzielony został na dwie zasadnicze części. W pierwszej części następuje korekta wstępnie wczytanych parametrów obwodu probierczego, tj.: napięcia zasilania obwodu U oraz kąta załączenia zwarcia Ψ_Z. Korekta tych parametrów realizowana jest poprzez porównanie ze sobą wyników pomiarów prądu zwarcia metalicznego i_{z_e} z wynikami obliczeń prądu i_z na podstawie wstępnie wprowadzonych danych obwodu probierczego. Zestawienie wyników obliczeń i pomiarów prądu zwarcia metalicznego realizowane jest dla czasu obliczeń $t_{end} = 3T$, przy czym czas ten jest nie mniejszy niż czas próby zwarcia metalicznego.

Cały proces wyznaczenia współczynnika poprawkowego został podzielony na 10 podstawowych etapów, w których wykonywane są następujące czynności:

1 – Import wyników badań laboratoryjnych prób zwarciowych oraz wprowadzenie danych dotyczących m.in. parametrów obwodu zwarciowego, tj.: napięcia zasilania U i częstotliwości f źródła zasilającego, rezystancji R_Z i reaktancji X_Z pętli zwarciowej oraz kąta fazowego załączenia zwarcia łukowego Ψ_Z. Dodatkowo wprowadzane są dane opisujące parametry obliczeń, takie jak czas obliczeń t_{end} i krok obliczeń Δt oraz parametry samego układu szynowego, tj.: wymiary szyn b i h, odstęp między osiami szyn a oraz rodzaj materiału szyn.

2 – Wykonanie obliczeń prądu dwufazowego zwarcia metalicznego i_z przy zadanych parametrach obwodu na podstawie równań (4.13) i (4.14) oraz obliczenie spodziewanej wartości prądu zwarciowego $I_k^{"}$ według zależności (12.2).

3 – Wczytanie ze zbioru wyników badań laboratoryjnych przebiegu prądu zwarciowego $i_{z_e}(t)$ z próby kalibracyjnej oraz obliczenie wartości skutecznej prądu zwarcia metalicznego $I_{k_e}^{"}$ zgodnie ze wzorem (12.2).

4 – Porównanie pod względem wartości skutecznej i fazy wyników pomiarów i obliczeń prądów zwarcia metalicznego przy zadanych parametrach obwodu, i obliczenie błędu δ_i zgodnie z zależnością:

$$\delta_i = \frac{100}{I_{k_e}} \sqrt{\frac{1}{3T} \int_0^{3T} \left(i_z - i_{z_e} \right)^2 dt} \,. \tag{12.16}$$

Obliczenie błędu δ_i realizowane jest metodą kolejnych przybliżeń. Program szuka minimalnej wartości błędu $\delta_{i\min}$ poprzez wprowadzanie w kolejnych przybliżeniach korekt – w pierwszej kolejności kąta załączenia zwarcia $\Psi_Z \pm \Delta\Psi$, a następnie napięcia źródła

zasilającego $U \pm \Delta U$. Dokładność wprowadzanej korekty kąta załączenia zwarcia wynosi $\Delta\Psi = 1^{\circ}$, napięcia $\Delta U = 1$ V. Wartość minimalna błędu całkowitego $\delta_{i\min}$ obliczana jest z dokładnością 0,1%.

5 – Obliczenie, na podstawie wyników badań zwarć łukowych, wartości skutecznej prądu łukowego I_{a_e}, napięcia łuku U_{a_e} oraz uśrednionej prędkości łuku $v_{a_e\text{mean}}$ zgodnie z odpowiednimi zależnościami (12.3), (12.6) i (12.11). Na typ etapie obliczeń wyznaczany jest również czas pomiaru prędkości łuku na odcinku kontrolnym t_{end}.

6 – Obliczenie prądu zwarcia łukowego i_a (podprogram 1) oraz prędkości v_a (podprogram 2) przy skorygowanych wartościach napięcia zasilania U, kąta załączenia zwarcia Ψ_Z oraz wprowadzonych w pierwszym etapie danych dotyczących układu zwarciowego i wstępnie wprowadzonego szukanego współczynnika poprawkowego n_a. Sposób wyznaczenia prądu łukowego i_a oraz prędkości v_a jest identyczny jak w przedstawionym na rys. 12.1 programie głównym.

7 – Porównanie pod względem wartości chwilowej wyników pomiarów prędkości v_{a_e} i obliczeń v_a przemieszczania się łuku oraz obliczenie błędu względnego prędkości zgodnie ze wzorem:

$$\delta_{va} = \frac{100}{t_{end}} \int_0^{t_{end}} \left| \frac{v_a(t) - v_{a_e}(t)}{v_{a_e}(t)} \right| dt \,. \tag{12.17}$$

8 – Wyszukanie minimalnej wartości błędu względnego prędkości $\delta v_{a\min}$ metodą kolejnych przybliżeń polegającą na wprowadzeniu do wcześniej wczytanej wartości współczynnika poprawkowego n_a. W dalszym etapie wprowadzona zostaje korekta Δn współczynnika poprawkowego n_a i powtórzenie 6 i 7 etapu obliczeń aż do momentu wyznaczenia minimalnej wartości błędu względnego prędkości $\delta v_{a\min}$. Współczynnik n_a obliczany jest z dokładnością równą krokowi korekty $\Delta n = 0{,}05$.

9 – Porównanie wyników symulacji i pomiarów błędu całkowitego prądu łukowego i napięcia łuku zgodnie z zależnościami:

$$\delta_{ia} = \frac{100}{I_{a_e}} \sqrt{\frac{1}{k_T T} \int_0^{k_T T} \left(i_a - i_{a_e} \right)^2 dt} \,, \tag{12.18}$$

$$\delta_{ua} = \frac{100}{U_{a_e}} \sqrt{\frac{1}{k_T T} \int_0^{k_T T} \left(u_a - u_{a_e} \right)^2 dt} \,. \tag{12.19}$$

10 – Obliczenie wartości skutecznej prądu zwarcia łukowego I_a, napięcia łuku U_a, mierzonego jako wartość skuteczna oraz energii zwarcia łukowego E_a zgodnie ze wzorami

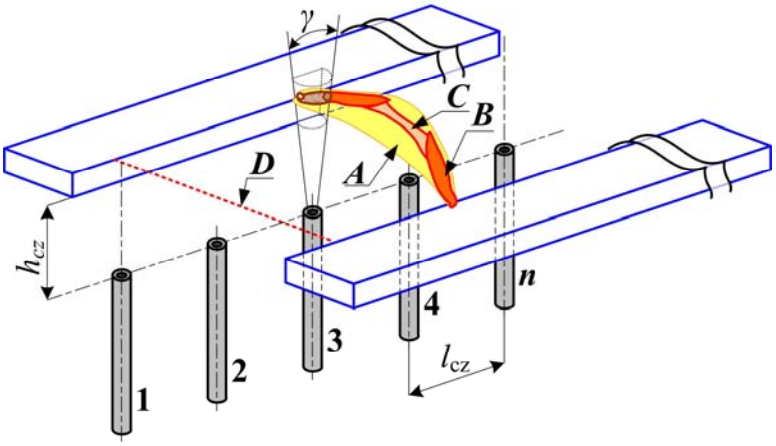
(12.3), (12.6) i (12.8). Podane wartości wyliczone są dla czasu zwarcia t_{end}, odpowiadającemu czasowi przebycia przez łuk odcinka kontrolnego układu szynowego.

11 – Zapis wyników symulacji i obliczeń do pliku oraz wizualizacja danych.

Załącznik C: Budowa układu pomiaru prędkości łuku

Na prędkość przemieszczania się łuku, oprócz wartości prądu, wpływają m.in.: rodzaj materiału, z jakiego wykonano szyny, ich profil, stan powierzchni i sposób ułożenia oraz odstęp między nimi. Duże zmiany prędkości chwilowej i szerokości strefy świecącej przemieszczającego się łuku nie gwarantują optymalnej rozdzielczości pomiaru.

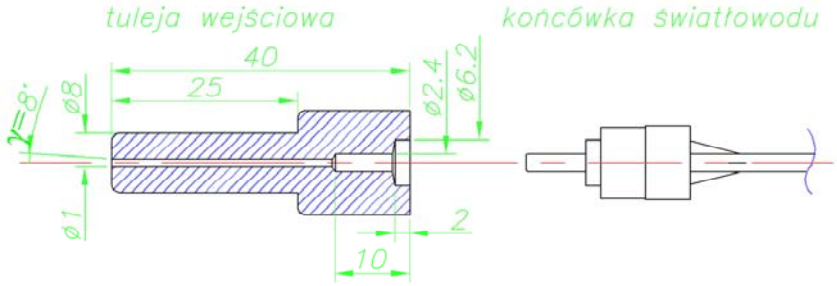
Uwzględnienie tego faktu byłoby możliwe tylko wówczas, gdyby znano drogę, jaką pokona łuk w danym okresie czasu wzdłuż szyn. Dlatego w badaniach prędkości łuku dobrano stałe odstępy l_{cz} między czujnikami wynoszące 40 mm, jak to pokazano na rys. 13.1.



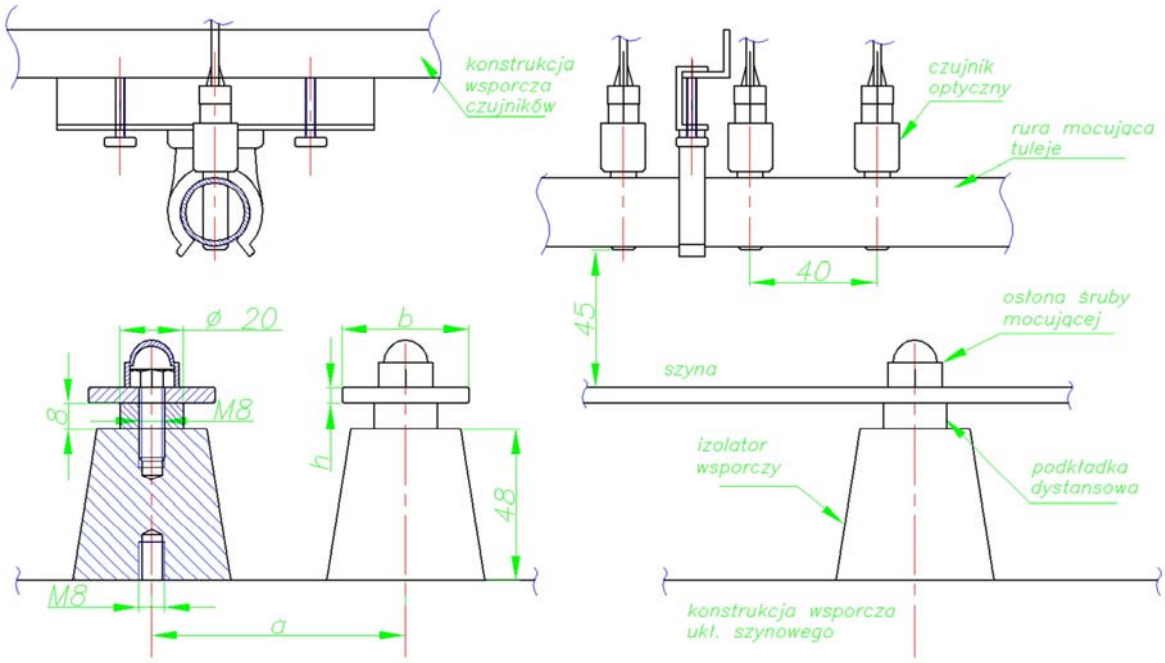
Rys. 13.1. Czynniki oddziałujące na pomiar prędkości łuku: γ – kąt detekcji łuku, h_{cz} – odległość czujników od „obserwowanej" powierzchni szyn, l_{cz} – odległość pomiędzy sąsiadującymi czujnikami: A – obszar gazu promieniującego, B – strumienie plazmy, C – kanał wyładowania kolumny łukowej, D – miejsce zapłonu łuku, 1, 2, 3, 4, n – numery czujników

Duża precyzja pomiaru wymaga zastosowana wielu czujników, a stosowane czujniki powinny charakteryzować się wąskim kątem detekcji γ, pozwalającym na zminimalizowanie odstępu l_{cz}. Jednak należy zauważyć, że znaczne ograniczenie kąta detekcji γ powoduje osłabienie sygnału świetlnego, co w przypadku zmniejszonej intensywności promieniowania łuku uniemożliwia wykrycie jego pozycji. Do takiej sytuacji dochodzi w okolicach zera prądu. Natomiast zbyt bliskie usytuowanie sensorów względem siebie o dużym kącie detekcji γ powoduje działanie kilku sond prawie równocześnie, uniemożliwiając tym prawidłowy pomiar. Sondy pomiarowe zostały wykonane z nieprzeźroczystego materiału, w którym w każdej z nich wywiercony został

przelotowy otwór o średnicy 1 mm. Zastosowanie małej średnicy otworu w sondzie pomiarowej ma na celu ograniczenie kąta detekcji γ w taki sposób, aby dany fotodetektor wykrył emitowane promieniowanie łuku, który znajduje się bezpośrednio nad czujnikiem. Wykonanie czujnika (tulei) w formie rurki o długości 40 mm, zakończonej z drugiej strony końcówką światłowodu, ma na celu zminimalizowanie sygnału świetlnego odbitego od powierzchni wewnętrznej otworu. Drugą zaletą tego typu rozwiązania jest ograniczenie penetracji par metali występujących w łuku, które osadzając się na powierzchni czołowej światłowodu prowadzą do uszkodzenia czujnika. Widok czujnika optycznego pokazano na rys. 13.2. Jego wymiary dobrano na podstawie badań laboratoryjnych. Natomiast ułożenie sond względem układu szynowego zostało przedstawione na rys. 13.3.



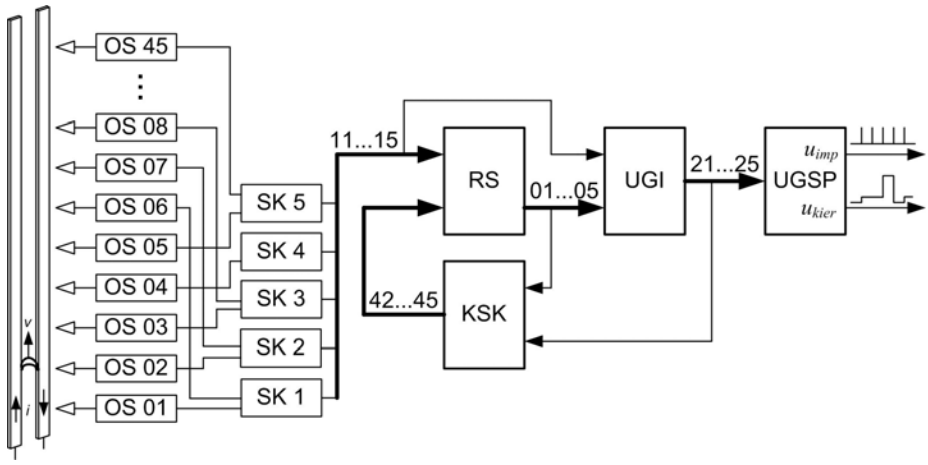
Rys. 13.2. Przekrój pojedynczej tulei czujnika optycznego



Rys. 13.3. Zamocowanie czujników optycznych względem układu szynowego

Zwiększanie liczby czujników, przy zachowaniu optymalnego obszaru detekcji γ, prowadzi do konieczności łączenia ich przemiennie do różnych kanałów rejestratora, w którym dopiero po uformowaniu wąskich impulsów można wyprowadzić je na wspólne wyjście.

Zachowanie dokładności pomiaru ograniczone jest z jednej strony wartością minimalnej drogi, jaką pokona łuk w okolicach przejścia prądu przez zero, a z drugiej strony – szybkością zmian sygnałów w sensorach. Szybkość komutacji sond decyduje o maksymalnej prędkości łuku, jaka może być wykryta. Stąd też w badaniach prędkości łuku wykorzystano fotodetektory typu SFH 203A charakteryzujące się szybko narastającym sygnałem w momencie pojawienia się łuku nad daną sondą oraz krótkim czasem trwania sygnału (rys. 6.2b). Pomiar prędkości chwilowej łuku awaryjnego przeprowadzono za pomocą układu, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 13.4.



Rys. 13.4. Schemat blokowy światłowodowego układu pomiaru prędkości UPP: OS – układ obróbki sygnału optycznego, SK – sumator sygnałów z układów OS, RS – przerzutnik RS, UGI – układ generowania impulsów, KSK – układ kasowania sygnału u_{kier}, UGSP – układ generowania sygnałów u_{imp}, u_{kier}

Idea działania układu pomiaru prędkości UPP oparta jest na wygenerowaniu krótkich impulsów u_{imp}, o czasie trwania 15 μs, oznaczających zadziałanie punktowych czujników oraz dodatkowego sygnału pomocniczego u_{kier}, którego wartość określa kierunek przemieszczania się łuku. Rozwiązanie 5-cio kanałowe umożliwia wyznaczenie zwrotu prędkości dla kolejno po sobie aktywnych czujników, jak również pozwala na wykrycie uszkodzenie czujnika lub przeskoku łuku na pojedynczej sondzie i skorygowanie błędu pomiaru.

Układ pomiaru prędkości UPP (rys. 13.4) składa się z 45-ciu fotodetektorów oraz obsługujących je modułów wejściowych OS, 5-ciu układów obróbki sygnałów SK, przerzutników RS, układu generowania impulsów UGI, modułów kasowania sygnałów określających kierunek ruchu łuku KSK oraz układu generowania impulsów pomocniczych UGSP. Poszczególne moduły połączone są ze sobą za pomocą „magistral" oznaczonych liczbami dwucyfrowymi, z których pierwsza cyfra oznacza numer magistrali a druga numer kanału.

W celu określenia kierunku przemieszczania się łuku konieczna jest znajomość kolejności działania poszczególnych czujników. Różnica czasu pomiędzy pojawieniem się sygnałów w kolejnych czujnikach oraz odstępu między nimi pozwala wyznaczyć średnią prędkość łuku na analizowanym odcinku.

Z równomiernie rozstawionych wzdłuż układu szynowego 45 punktowych czujników optycznych sygnał świetlny doprowadzany jest do układów wejściowych OS za pomocą światłowodów, a następnie zamieniany jest na sygnał elektryczny i poddawany dalszej obróbce. Zadaniem układów OS jest wygenerowanie krótkich impulsów o czasie trwania około 110 μs.

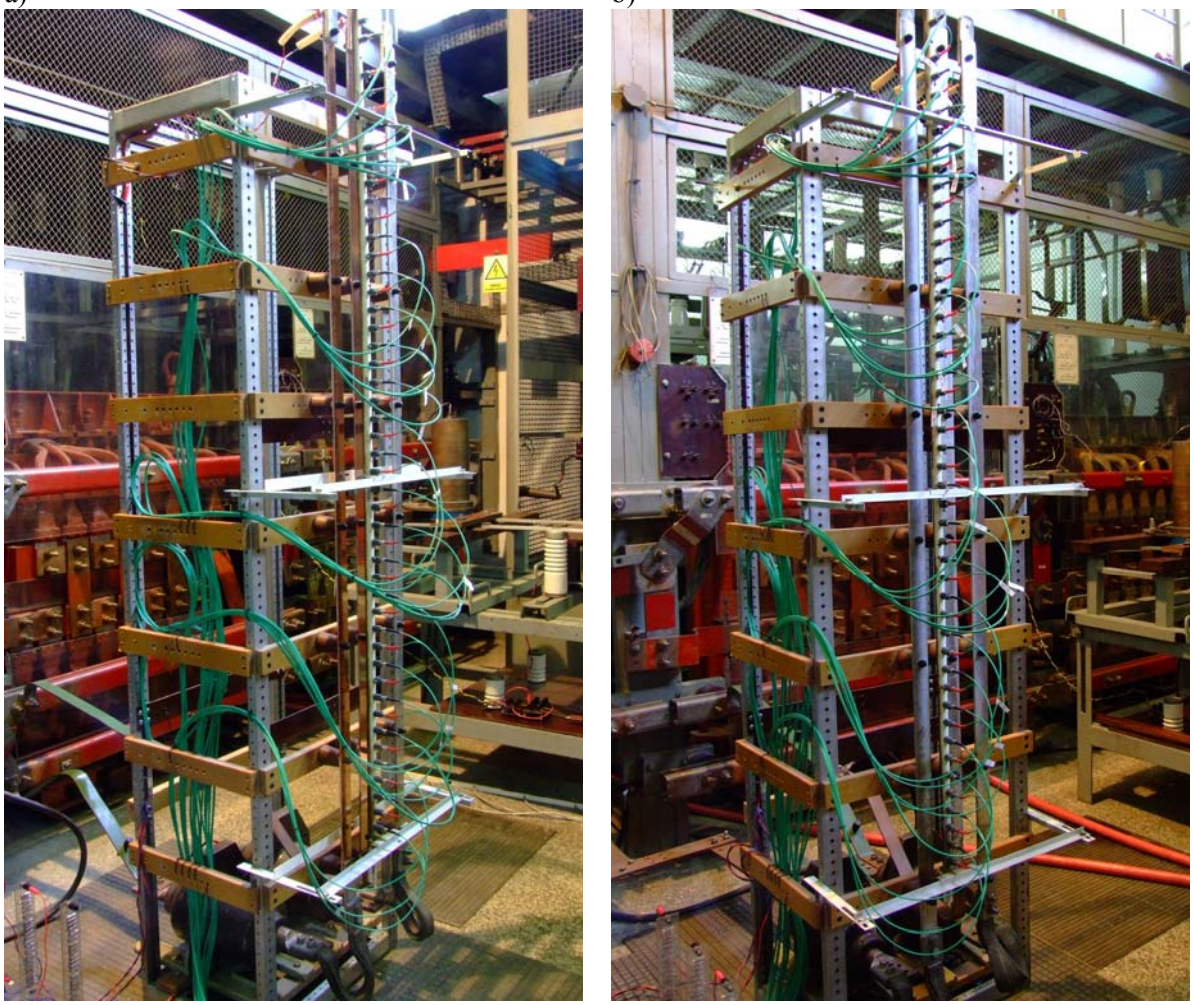
W układzie pomiarowym wykorzystano pięć niezależnych kanałów SK, w których sygnał z poszczególnych czujników jest sumowany oraz poddawany dalszej obróbce. Dzięki większej liczbie kanałów uzyskano dokładniejszy pomiar, szczególnie przy mniejszych wartościach prędkości łuku, a więc w okolicach zera prądu łukowego. Sygnały wyjściowe z układu SK są skracane do czasu 15 μs, a następnie podawane są na szynę 11,...,15. Rozwiązanie takie pozwala na wyeliminowanie ewentualnych pobudzeń czujników obszarem zjonizowanego gazu poruszającego się za kolumną łukową.

Impulsy szyny 11,..., 15 podawane są na zespół przerzutników RS, których celem jest wygenerowanie impulsów określających kierunek łuku, których stan zostanie zachowany po zakończeniu trwania impulsu sterującego. Sygnały wyjściowe z przerzutników RS podawane są na szyny 01,..., 05. Zmiana stanu impulsu określającego kierunek ruchu łuku w danym kanale może nastąpić dopiero po podaniu impulsu resetującego z układu KSK, a więc po pojawieniu się łuku nad kolejnym z czujników. W układzie generacji impulsów UGI następuje porównanie odpowiednich sekwencji impulsów sterujących u_{imp} i impulsów określających kierunek przemieszczania się łuku, oraz wygenerowanie sygnałów w kanałach 21,..., 25, które kierowane są na układ wytwarzający sygnał pomocniczy UGSP, jak również do modułu kasowania sygnału sterującego KSK i dalej przekazywane poprzez magistralę 41,..., 45 na wejścia resetujące

przerzutników RS. W module UGSP, na podstawie kolejności impulsów, generowany jest sygnał pomocniczy u_{kier}, którego wartość odpowiada kolejności działania czujników i przypisana jest zwrotowi prędkości, oraz sygnał u_{imp} w postaci krótkich impulsów, których poziom wysoki określa pobudzenie czujnika. Algorytmy opisujące zasadę działania poszczególnych modułów układu szczegółowo opisano w [79].

Widok stanowiska badawczego, w którym wykonano pomiary prędkości przemieszczania się łuku zwarciowego został przedstawiony na rys. 13.5.

a) b)



Rys. 13.5. Widok stanowiska probierczego do badań prędkości: a) dwufazowego, b) trójfazowego łuku zwarciowego

Załącznik D: Wyniki obliczeń parametrów opisujących model łuku zwarciowego

Zestawione uśrednione wyniki pomiarów prądów dwufazowych niskonapięciowych zwarć łukowych wraz z obliczonymi parametrami charakteryzującymi zależności (4.19), (4.20) i (4.21) oraz współczynnik n_a zamieszczono w tab. 14.1 ÷ tab. 14.9. Obliczenia parametrów charakteryzujących te zależności zostały przeprowadzone dla łuku dwufazowego palącego się na szynach miedzianych lub aluminiowych zgodnie z procedurą przedstawioną w Załączniku A (zmienne opisujące model łuku zwarciowego) oraz w Załączniku B – rys. 12.5 (współczynnik n_a). Oprócz wyników pomiarów w tabelach zamieszczono wartości odchylenia standartowego σ mierzonych wielkości oraz współczynnika ufności Δ wyrażonego w jednostkach wielkości mierzonej. Współczynnik ufności Δ został podany dla poziomu ufności wynoszącego 95%.

Tab. 14.1. Wyniki obliczeń parametrów opisujących rezystancję łuku R_{sa} odniesioną do jednostki długości l_a dla szyn miedzianych o profilu 40x5 mm

Lp	a_0	I_{k_e}''	R_{0a}	σ_{R0a}	Δ_{R0a}	R_{1a}	σ_{R1a}	Δ_{R1a}	α_i	$\sigma_{\alpha i}$	$\Delta_{\alpha i}$
	[mm]	[kA]	[mΩ/cm]						[A]		
1	20	2,145	45,7	20,9	20,5	6,039	0,208	0,204	649	86	84
2		5,748	34,8	26,6	21,3	4,032	0,166	0,133	1055	255	204
3		8,669	37,3	10,4	8,3	3,297	0,113	0,090	1208	259	208
4		12,65	28,8	11,5	13,0	2,680	0,080	0,090	1483	366	414
5	40	2,019	61,9	14,5	11,6	5,678	0,587	0,470	612	139	111
6		5,731	56,9	30,3	26,6	3,541	0,430	0,377	781	460	403
7		9,491	52,9	322,3	315,8	2,865	0,358	0,351	993	628	615
8		15,23	32,4	175,5	140,5	2,262	0,129	0,104	1242	410	328
9	60	2,242	84,0	23,5	20,6	5,255	0,525	0,460	435	198	173
10		6,271	62,9	57,2	50,1	3,089	0,316	0,277	749	365	320
11		10,53	64,4	77,0	56,8	2,663	0,145	0,201	855	149	207
12		14,84	46,0	27,4	31,0	1,969	0,320	0,362	951	627	710

Tab. 14.2. Wyniki obliczeń parametrów opisujących rezystancję łuku R_{sa} odniesioną do jednostki długości l_a dla szyn aluminiowych o profilu 40x5 mm

Lp	a_0	I_{k_e}''	R_{0a}	σ_{R0a}	Δ_{R0a}	R_{1a}	σ_{R1a}	Δ_{R1a}	α_i	$\sigma_{\alpha i}$	$\Delta_{\alpha i}$
	[mm]	[kA]	[mΩ/cm]						[A]		
1	20	2,159	91,3	38,0	30,4	8,638	1,442	1,154	486	122	98
2		5,854	46,9	13,8	11,1	4,008	0,053	0,042	1253	115	92
3		8,802	40,5	14,0	11,2	3,429	0,093	0,075	1433	313	250
4		12,57	29,7	5,5	4,4	2,699	0,196	0,157	2072	320	256
5	40	1,843	147,9	274,8	240,9	7,143	0,930	0,815	295	234	205
6		5,215	85,0	16,6	13,3	3,968	0,316	0,253	562	211	169
7		8,838	65,7	49,0	39,2	3,036	0,315	0,252	1134	464	372
8		12,61	49,8	24,7	19,8	2,401	0,433	0,347	1353	211	169
9	60	2,245	182,8	22,9	22,4	5,350	0,558	0,547	286	88	86
10		6,209	112,1	114,9	100,7	3,040	0,241	0,211	523	142	125
11		10,49	81,3	158,7	220,0	2,077	0,301	0,418	841	59	81
12		14,72	65,5	78,2	88,5	1,668	0,486	0,551	1048	35	40

Tab. 14.3. Wyniki obliczeń wartości początkowej u_0 i ustalonej u_1 składowej stałej napięcia u_{0a} odniesionej do jednostki długości łuku l_a dla szyn miedzianych o profilu 40x5 mm

Lp	a_0	I_{k_e}''	u_0	σ_{u0}	Δ_{u0}	u_1	σ_{u1}	Δ_{u1}
	[mm]	[kA]	[V/cm]					
1	20	2,145	77,6	25,0	24,5	19,5	0,5	0,5
2		5,748	84,3	10,8	8,6	20,2	0,9	0,7
3		8,669	54,0	16,1	12,9	20,6	0,7	0,6
4		12,65	64,5	1,6	1,8	20,6	1,1	1,2
5	40	2,019	53,6	24,6	19,7	18,9	1,4	1,1
6		5,731	59,2	47,4	41,5	18,2	2,0	1,8
7		9,491	39,1	11,9	11,7	19,5	2,0	1,9
8		15,23	44,2	16,5	13,2	19,4	0,8	0,6
9	60	2,242	24,2	6,5	5,7	16,2	0,6	0,5
10		6,271	36,5	38,9	34,1	16,3	0,7	0,6
11		10,53	16,7	5,7	7,9	16,9	1,0	1,3
12		14,84	23,1	7,8	8,8	17,6	1,1	1,3

Tab. 14.4. Wyniki obliczeń wartości początkowej u_0 i ustalonej u_1 składowej stałej napięcia u_{0a} odniesionej do jednostki długości łuku l_a dla szyn aluminiowych o profilu 40x5 mm

Lp	a_0	I_{k_e}''	u_0	σ_{u0}	Δ_{u0}	u_1	σ_{u1}	Δ_{u1}
	[mm]	[kA]	[V/cm]					
1	20	2,159	59,8	16,7	13,3	20,7	2,7	2,1
2		5,854	58,5	5,4	4,4	20,7	0,7	0,6
3		8,802	54,9	57,9	46,3	21,4	0,4	0,3
4		12,57	55,5	15,7	12,5	23,2	1,2	0,9
5	40	1,843	47,3	14,6	12,8	17,4	2,0	1,8
6		5,215	44,1	19,4	15,5	17,5	1,9	1,5
7		8,838	45,0	48,7	38,9	19,7	0,6	0,5
8		12,61	40,2	53,5	42,8	19,7	1,1	0,9
9	60	2,245	30,3	2,3	2,2	15,2	0,8	0,7
10		6,209	27,4	6,2	5,4	16,4	0,5	0,4
11		10,49	23,7	12,9	17,9	17,7	1,2	1,7
12		14,72	22,5	13,9	15,8	18,2	1,0	1,2

Tab. 14.5. Wyniki obliczeń stałych β_i i γ_i opisujących szybkość stabilizowania się składowej stałej napięcia u_{0a} dla szyn miedzianych o profilu 40x5 mm

Lp	a_0	I_{k_e}''	β_i	$\sigma_{\beta i}$	$\Delta_{\beta i}$	γ_i	$\sigma_{\gamma i}$	$\Delta_{\gamma i}$
	[mm]	[kA]	[A]					
1	20	2,145	222	40	39	376	45	44
2		5,748	517	87	69	1574	246	197
3		8,669	639	155	124	1715	293	234
4		12,65	840	360	407	1800	17	19
5	40	2,019	237	50	40	401	38	30
6		5,731	301	63	56	1014	107	94
7		9,491	542	56	55	1447	524	514
8		15,23	676	99	79	935	103	83
9	80	2,242	184	89	78	385	107	94
10		6,271	318	180	158	757	195	170
11		10,53	432	50	70	1252	209	290
12		14,84	499	276	312	3431	63	72

Tab. 14.6. Wyniki obliczeń stałych β_i i γ_i opisujących szybkość stabilizowania się składowej stałej napięcia u_{0a} dla szyn aluminiowych o profilu 40x5 mm

Lp	a_0	I_{k_e}''	β_i	$\sigma_{\beta i}$	$\Delta_{\beta i}$	γ_i	$\sigma_{\gamma i}$	$\Delta_{\gamma i}$
	[mm]	[kA]	[A]					
1	20	2,159	223	57	46	348	76	61
2		5,854	402	34	28	1401	186	149
3		8,802	574	160	128	1753	624	499
4		12,57	797	144	115	2455	291	233
5	40	1,843	209	35	31	422	160	140
6		5,215	281	101	81	947	327	262
7		8,838	374	142	113	1219	711	569
8		12,61	497	77	61	1871	891	713
9	80	2,245	208	49	48	483	129	126
10		6,209	282	116	102	1510	299	262
11		10,49	375	276	375	1814	669	928
12		14,72	521	78	88	2305	344	389

Tab. 14.7. Wyniki obliczeń parametrów opisujących stałą czasową łuku T_a palącego się na szynach miedzianych o profilu 40x5 mm

Lp	a_0	I_{k_e}''	K_{Ta}	σ_{KTa}	Δ_{KTa}	T_{0a}	σ_{T0a}	Δ_{T0a}
	[mm]	[kA]	[μs /kA]			[μs]		
1	20	2,145	3,187	0,837	1,175	98,6	33,5	47,0
2		5,748	0,587	0,116	0,133	63,4	38,2	43,8
3		8,669	0,238	0,067	0,076	103,9	36,1	41,3
4		12,65	0,254	0,081	0,131	64,0	44,9	72,8
5	40	2,019	2,642	1,040	1,192	110,3	12,8	14,7
6		5,731	0,528	0,152	0,190	99,0	37,4	47,0
7		9,491	0,936	0,963	1,352	72,1	77,0	108,0
8		15,23	0,056	0,008	0,009	72,6	19,9	22,8
9	80	2,242	12,358	15,007	18,839	113,7	24,0	30,2
10		6,271	0,700	0,440	0,552	56,6	24,5	30,8
11		10,53	0,207	0,013	0,027	62,2	31,2	61,8
12		14,84	0,132	0,081	0,132	61,0	33,5	54,3

Tab. 14.8. Wyniki obliczeń parametrów opisujących stałą czasową łuku T_a palącego się na szynach aluminiowych o profilu 40x5 mm

Lp	a_0	I_{k_e}''	K_{Ta}	σ_{KTa}	Δ_{KTa}	T_{0a}	σ_{T0a}	Δ_{T0a}
	[mm]	[kA]	[μs /kA]			[μs]		
1	20	2,159	2,831	1,357	1,555	188,2	53,4	61,2
2		5,854	0,524	0,118	0,135	68,3	34,7	39,8
3		8,802	0,174	0,051	0,059	108,9	34,6	39,6
4		12,57	0,113	0,015	0,017	58,7	34,4	39,5
5	40	1,843	4,917	2,602	3,266	120,1	8,0	10,0
6		5,215	0,881	0,368	0,422	85,9	18,2	20,8
7		8,838	0,541	0,168	0,192	82,3	47,1	54,0
8		12,61	0,271	0,257	0,294	92,7	47,6	54,5
9	80	2,245	11,194	9,575	13,439	129,2	39,0	54,8
10		6,209	1,359	2,148	2,697	84,6	23,4	29,4
11		10,49	0,201	0,179	0,356	44,8	15,6	31,0
12		14,72	0,239	0,220	0,357	72,5	28,9	46,9

Tab. 14.9. Wyniki obliczeń współczynnika poprawkowego n_a dla łuku palącego się na szynach prostokątnych o wymiarach 40x5 mm

Materiał:			miedź			aluminium		
Lp	a_0	I_{k_e}''	n_a	σ_{na}	Δ_{na}	n_a	σ_{na}	Δ_{na}
	[mm]	[kA]	[-]			[-]		
1	20	2,159	0,156	0,006	0,009	0,241	0,007	0,008
2		5,854	0,188	0,009	0,010	0,243	0,009	0,010
3		8,802	0,193	0,005	0,006	0,252	0,010	0,011
4		12,57	0,213	0,003	0,005	0,258	0,008	0,009
5	40	1,843	0,228	0,031	0,035	0,282	0,020	0,025
6		5,215	0,237	0,028	0,035	0,285	0,011	0,013
7		8,838	0,238	0,009	0,012	0,289	0,015	0,018
8		12,61	0,254	0,021	0,024	0,301	0,055	0,063
9	80	2,245	0,260	0,012	0,016	0,313	0,040	0,057
10		6,209	0,285	0,019	0,024	0,316	0,040	0,050
11		10,49	0,290	0,025	0,049	0,320	0,026	0,031
12		14,72	0,280	0,015	0,025	0,334	0,029	0,037

Załącznik E: Wyniki badań eksperymentalnych i obliczeń dynamiki dwufazowego łuku zwarciowego

Zestawione uśrednione wyniki obliczeń i pomiarów prądów dwufazowych niskonapięciowych zwarć łukowych wraz z uzyskanymi różnicami zamieszczono w tab. 15.1. W tab. 15.1 przedstawiono wyniki obliczeń z dwóch etapów tworzenia modelu obliczeniowego, tj.: z etapu wyznaczenia zmiennych niezbędnych do obliczenia prędkości łuku i weryfikacji użytego modelu łuku oraz wyników końcowych po zastosowaniu wyprowadzonych zależności empirycznych.

Tab. 15.1. Uśrednione wyniki pomiarów i obliczeń prądów niskonapięciowego dwufazowego łuku awaryjnego palącego się na szynach P 40x5 mm i AP 40x5 mm

		Wyniki prób		Obliczenia wstępne*				Obliczenia z użyciem wzorów empirycznych	
Lp	a	I_{k_e}''	I_{a_e}	I_k''	δ_i	I_a	δi_a	I_a	δi_a
	[mm]	[kA]	[kA]	[kA]	[%]	[kA]	[%]	[kA]	[%]
Szyny P 40x5 mm									
1	60	2,145	2,058	2,134	0,76	1,989	6,52	1,978	7,99
2		5,748	4,852	5,722	0,61	4,833	3,07	4,869	3,81
3		8,669	6,547	8,699	0,60	6,437	4,45	6,464	5,05
4		12,65	10,40	12,60	1,19	9,869	7,10	10,717	6,81
5	80	2,019	1,766	2,009	2,10	1,761	12,85	1,644	16,77
6		5,731	4,234	5,787	1,90	4,105	9,80	4,567	17,96
7		9,491	6,866	9,514	0,55	6,710	11,79	7,430	10,80
8		15,23	10,45	15,23	0,85	10,40	9,95	10,284	16,63
9	100	2,242	1,697	2,231	0,75	1,857	24,12	1,641	18,34
10		6,271	4,328	6,272	1,36	4,191	23,44	4,238	22,23
11		10,53	5,726	10,52	1,25	6,409	25,34	6,497	27,25
12		14,84	9,740	14,89	1,37	9,020	17,92	9,001	15,87
Szyny AP 40x5 mm									
1	60	2,159	1,977	2,159	0,67	1,980	7,03	1,986	7,78
2		5,854	5,349	5,856	0,63	5,242	3,14	5,161	4,66
3		8,802	7,084	8,819	0,96	6,991	5,31	6,911	7,36
4		12,57	10,04	12,712	2,46	9,685	4,76	9,446	6,93
5	80	1,843	1,638	1,838	2,21	1,606	10,71	1,592	9,30
6		5,215	4,292	5,219	1,48	4,163	9,18	4,128	10,80
7		8,838	6,833	9,072	3,14	6,734	12,66	6,986	13,00
8		12,61	9,027	12,85	3,13	8,859	7,79	9,249	10,61
9	100	2,245	1,903	2,241	0,87	1,871	9,47	1,824	15,31
10		6,209	4,075	6,298	2,30	4,227	12,75	4,349	21,03
11		10,49	6,390	10,59	1,32	6,312	14,85	6,559	12,42
12		14,72	8,864	14,99	3,16	8,226	15,28	8,981	12,03

* - wyznaczenie współczynnika n_a, weryfikacja zastosowanego modelu łuku zakłóceniowego

W tab. 15.2 zamieszczono wyniki badań eksperymentalnych oraz obliczeń średniej prędkości przemieszczającego się dwufazowego łuku awaryjnego wzdłuż szyn prostokątnych P 40x5 mm i AP 40x5 mm. Podobnie, jak w przypadku wyników prądów, w tab. 15.2 zestawiono uśrednione wyniki badań eksperymentalnych i obliczeń.

Tab. 15.2. Uśrednione wyniki pomiarów i obliczeń prędkości przemieszczającego się niskonapięciowego dwufazowego łuku awaryjnego

		Wyniki prób		Obliczenia wstępne*		Obliczenia z użyciem wzorów empirycznych	
Lp	a	I_{k_e}''	v_{a_emean}	v_{amean}	δv_a	v_{amean}	δv_a
	[mm]	[kA]	[m/s]	[m/s]	[%]	[m/s]	[%]
Szyny P 40x5 mm							
1	60	2,145	68,6	67,4	-1,63	63,1	-8,09
2		5,748	129,1	127,4	-1,31	131,6	1,95
3		8,669	161,7	158,3	-2,10	161,5	-0,15
4		12,65	222,6	215,1	-3,37	256,7	7,13
5	80	2,019	41,4	39,2	-5,26	38,2	-3,85
6		5,731	82,1	78,3	-4,59	83,3	3,17
7		9,491	112,7	115,1	2,17	116,1	3,09
8		15,23	163,1	158,8	-2,61	146,5	-10,16
9	100	2,242	30,6	31,4	2,33	24,7	-17,80
10		6,271	51,9	51,5	-0,78	47,7	-8,13
11		10,53	64,7	67,6	4,51	65,1	0,63
12		14,84	105,9	95,4	-9,84	75,3	-28,85
Szyny AP 40x5 mm							
1	60	2,159	49,2	48,8	-0,67	46,6	4,36
2		5,854	118,5	117,4	-0,98	96,4	-18,67
3		8,802	137,7	133,0	-3,39	119,6	-13,14
4		12,57	180,6	172,9	-4,27	146,3	-19,00
5	80	1,843	28,7	29,1	1,58	29,1	1,68
6		5,215	69,1	66,6	-3,55	62,9	-8,98
7		8,838	95,7	93,0	-2,80	87,8	-8,22
8		12,61	124,8	121,4	-2,69	109,2	-12,08
9	100	2,245	33,7	29,0	-13,92	25,8	-27,29
10		6,209	57,9	50,6	-12,61	52,0	-5,81
11		10,49	69,7	66,2	-4,99	65,1	25,00
12		14,72	83,7	70,8	-15,38	79,5	12,83

* - wyznaczenie współczynnika n_a, weryfikacja zastosowanego modelu łuku zakłóceniowego

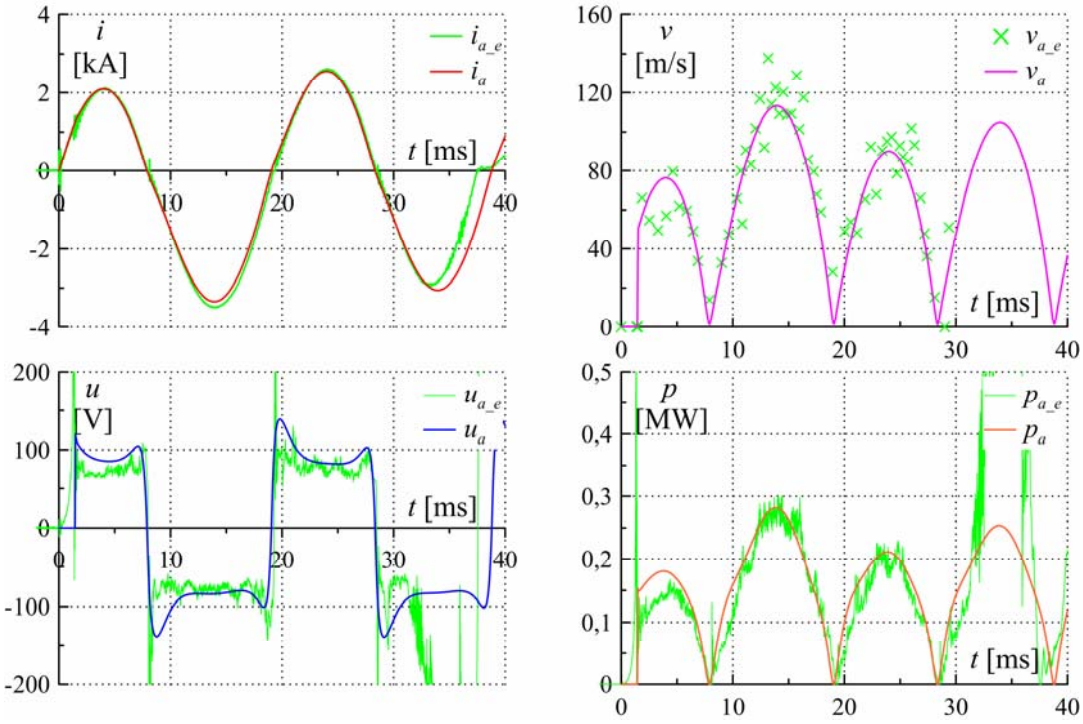
Uśrednione wyniki eksperymentalne oraz wyniki obliczeń napięć łukowych dwufazowego zwarcia łukowego zamieszczono w tab. 15.3.

Tab. 15.3. Uśrednione wyniki pomiarów i obliczeń napięć niskonapięciowego dwufazowego łuku awaryjnego palącego się na szynach P 40x5 mm, AP 40x5 mm

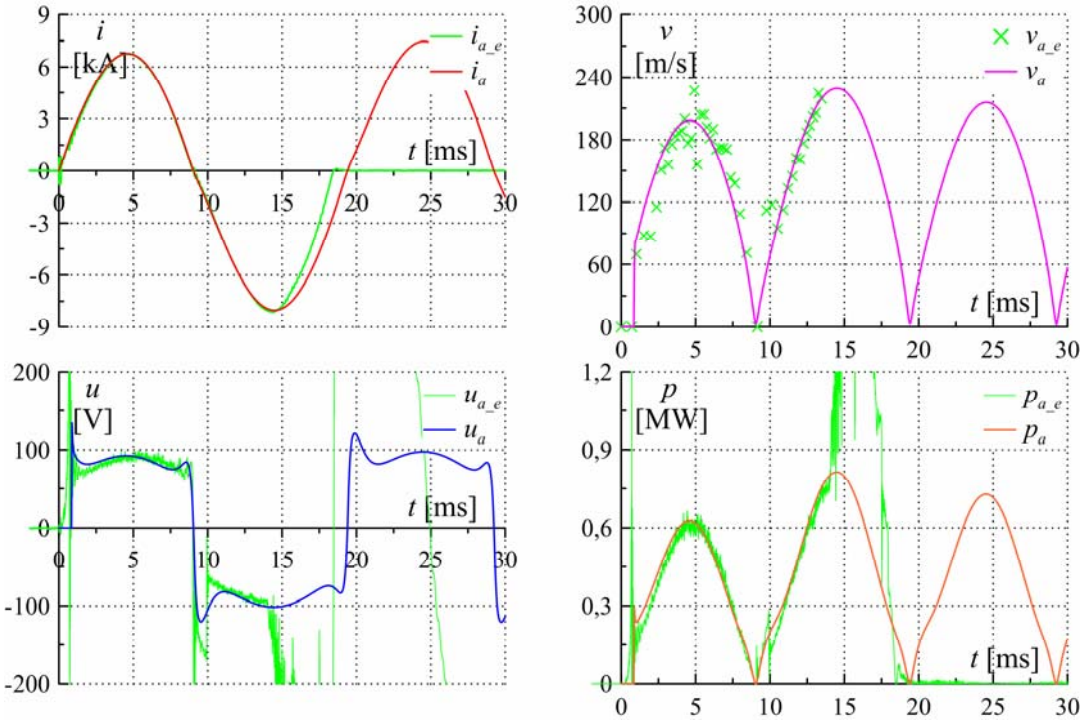
		Wyniki prób		Obliczenia wstępne*		Obliczenia z użyciem wzorów empirycznych	
Lp	a	I_{k_e}''	U_{a_e}	U_a	δu_a	U_a	δu_a
	[mm]	[kA]	[V]	[V]	[%]	[V]	[%]
Szyny P 40x5 mm							
1	60	2,145	87,5	81,7	-13,60	89,6	-0,25
2		5,748	96,3	90,2	-5,39	85,4	-11,31
3		8,669	97,3	91,1	-3,62	88,1	-9,39
4		12,65	115,0	98,5	-10,32	99,9	-13,76
5	80	2,019	175,9	151,8	-13,70	182,1	3,52
6		5,731	225,6	201,1	-10,83	160,9	-29,03
7		9,491	227,7	205,7	-9,63	170,8	-24,99
8		15,23	196,3	177,3	-9,68	180,1	-8,29
9	100	2,242	204,2	194,7	-4,65	227,9	11,67
10		6,271	225,9	219,4	-2,86	212,1	-6,07
11		10,53	262,3	227,0	-13,46	222,7	-15,09
12		14,84	245,4	234,3	-4,56	234,0	-4,68
Szyny AP 40x5 mm							
1	60	2,159	102,7	88,8	-13,60	92,3	-10,13
2		5,854	100,6	95,2	-5,39	104,2	3,54
3		8,802	107,4	103,5	-3,62	110,4	2,84
4		12,57	119,8	107,5	-10,32	117,6	-1,82
5	80	1,843	149,0	154,0	3,31	152,4	2,28
6		5,215	166,5	156,8	-5,81	158,4	-4,87
7		8,838	185,9	183,6	-1,26	170,7	-8,17
8		12,61	204,7	192,1	-6,12	181,5	-11,30
9	100	2,245	183,9	180,0	-2,11	184,0	0,03
10		6,209	216,4	207,6	-4,08	195,3	-9,76
11		10,49	270,4	216,8	-19,84	196,0	-26,66
12		14,72	269,0	247,7	-7,94	222,5	-19,38

* - wyznaczenie współczynnika n_a, weryfikacja zastosowanego modelu łuku zakłóceniowego

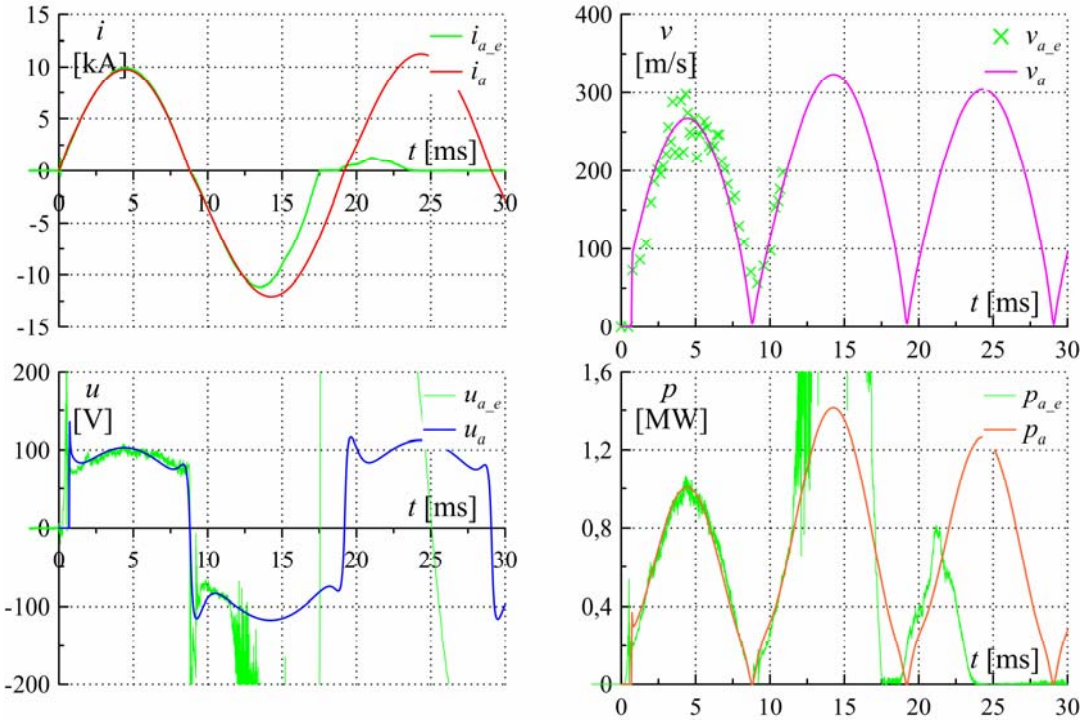
Przykładowe wyniki badań eksperymentalnych oraz obliczeń łuku zwarciowego dwufazowego, palącego się w układzie szyn P 40x5 mm i o analizowanych odstępach a ilustrują rys. 15.1 ÷ rys. 15.12. Na rys. 15.13 ÷ rys. 15.24 zamieszczono wyniki badań oraz obliczeń dla dwufazowego łuku palącego się w układzie szyn o wymiarach 40x5 mm wykonanych z aluminium. Badania prędkości łuku dwufazowego palącego się na szynach aluminiowych wykonano w takim samym zakresie odstępów a, jak dla szyn miedzianych. Na przebiegach kolorem zielonym przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, natomiast pozostałymi kolorami wyniki obliczeń.



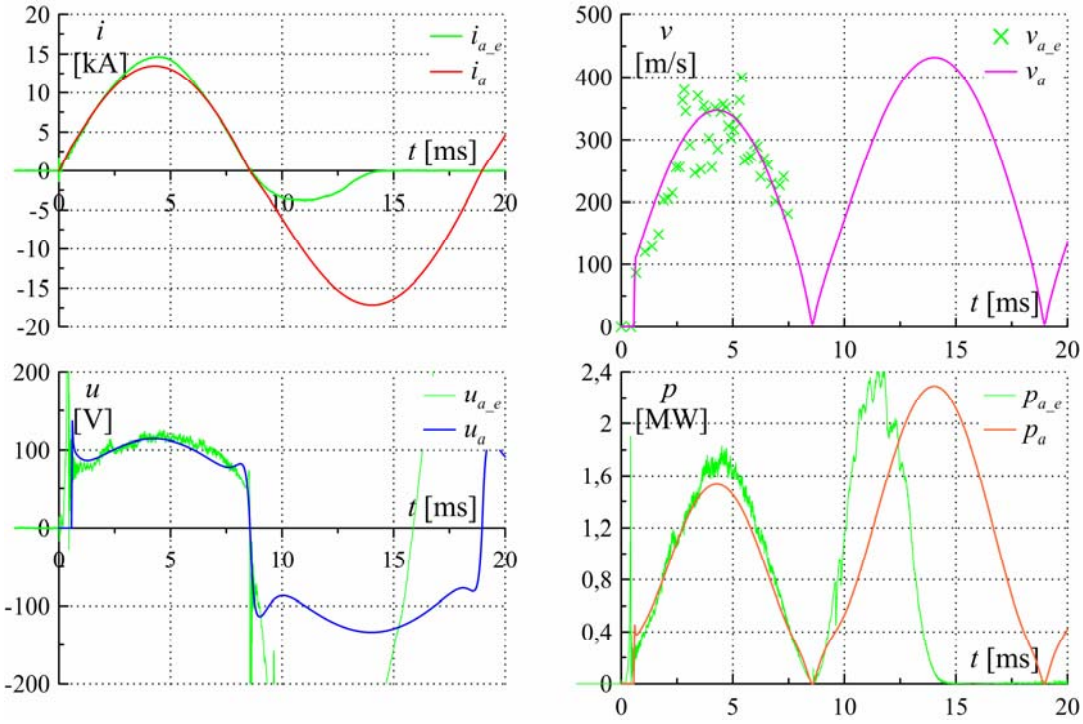
Rys. 15.1. Przebiegi: prądu łukowego, napięcia łukowego, prędkości łuku i mocy; szyny P 40x5 mm, a = 60 mm: I_{k_e}'' = 2,145 kA, U = 400 V, I_{a_e} = 2,057 kA, U_{a_e} = 90,7 V, $v_{a_e\text{mean}}$ = 62,6 m/s, I_a = 1,982 kA, U_a = 90,3 V, $v_{a\text{mean}}$ = 59,9 m/s



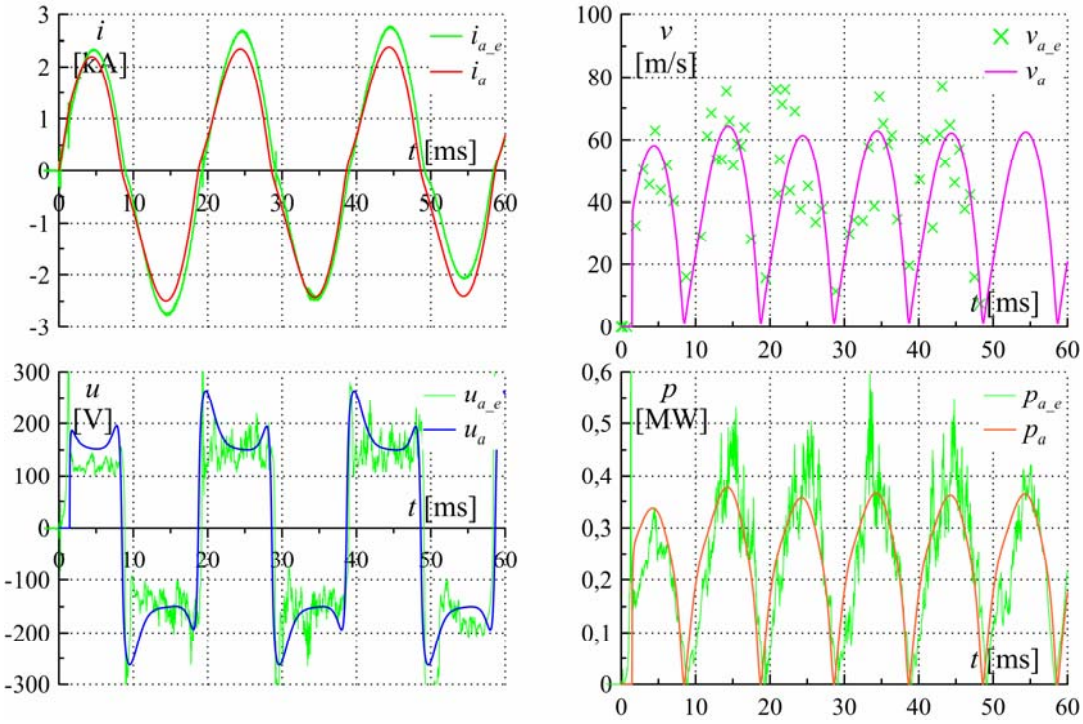
Rys. 15.2. Przebiegi: prądu łukowego, napięcia łukowego, prędkości łuku i mocy; szyny P 40x5 mm, a = 60 mm: I_{k_e}'' = 5,748 kA, U = 400 V, I_{a_e} = 4,784 kA, U_{a_e} = 97,1 V, $v_{a_e\text{mean}}$ = 131 m/s, I_a = 4,815 kA, U_a = 85,2 V, $v_{a\text{mean}}$ = 130 m/s



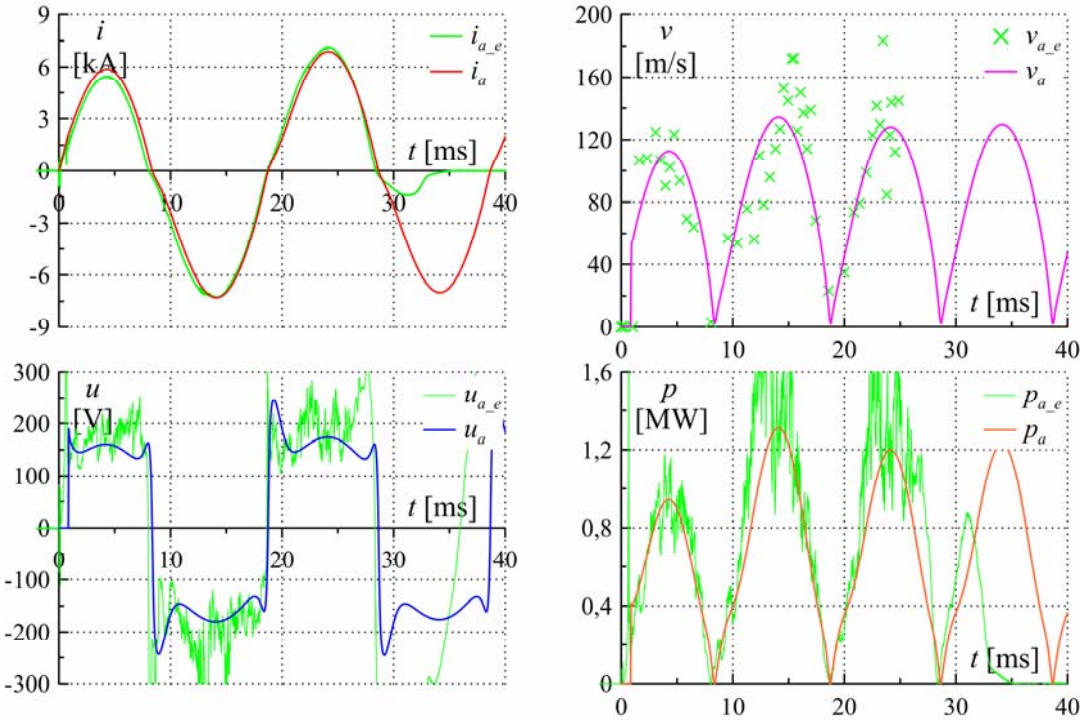
Rys. 15.3. Przebiegi: prądu łukowego, napięcia łukowego, prędkości łuku i mocy; szyny P 40x5 mm, a = 60 mm: I_{k_e}'' = 8,669 kA, U = 400 V, I_{a_e} = 6,543 kA, U_{a_e} = 94,4 V, $v_{a_e\text{mean}}$ = 163 m/s, I_a = 6,465 kA, U_a = 88,2 V, $v_{a\text{mean}}$ = 161 m/s



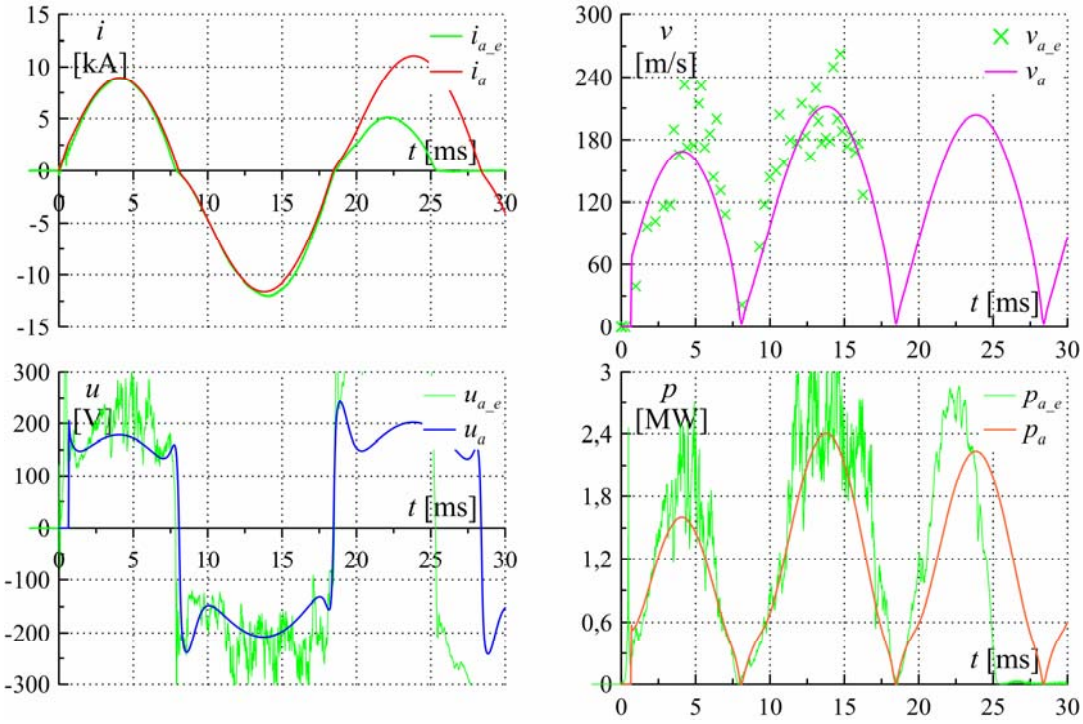
Rys. 15.4. Przebiegi: prądu łukowego, napięcia łukowego, prędkości łuku i mocy; szyny P 40x5 mm, a = 60 mm: I_{k_e}'' = 12,652 kA, U = 400 V, I_{a_e} = 10,775 kA, U_{a_e} = 113 V, $v_{a_e\text{mean}}$ = 234 m/s, I_a = 10,234 kA, U_a = 98 V, $v_{a\text{mean}}$ = 249 m/s



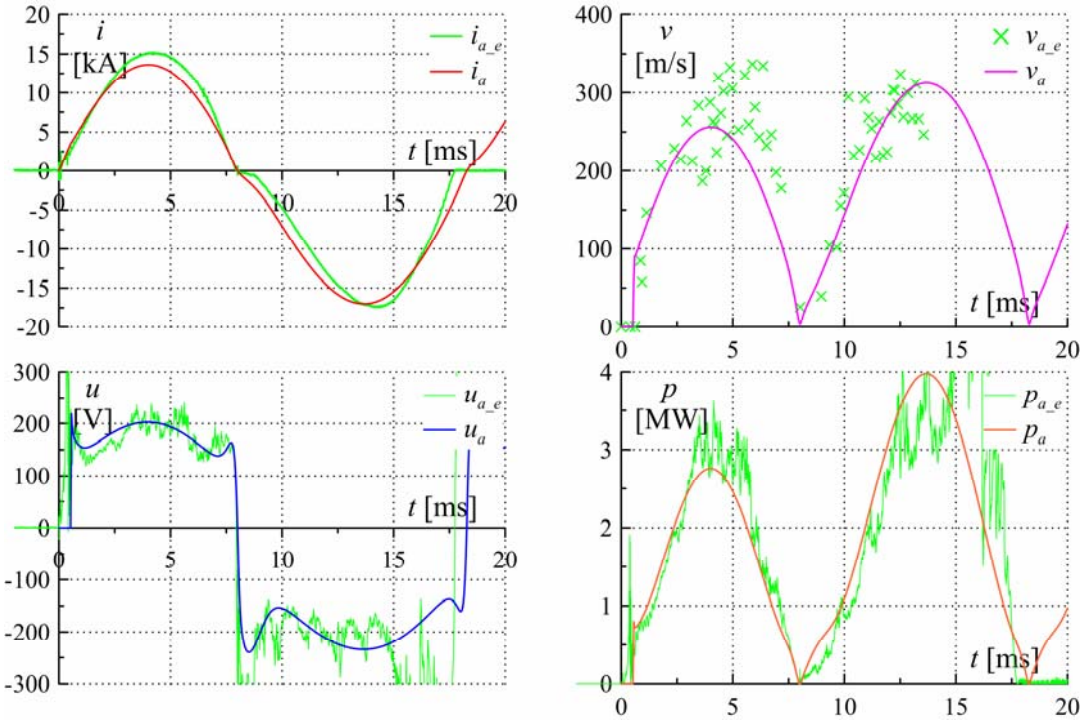
Rys. 15.5. Przebiegi: prądu łukowego, napięcia łukowego, prędkości łuku i mocy; szyny P 40x5 mm, a = 80 mm: I_{k_e}'' = 2,019 kA, U = 400 V, I_{a_e} = 1,781 kA, U_{a_e} = 164 V, v_{a_emean} = 39,9 m/s, I_a = 1,648 kA, U_a = 181 V, v_{amean} = 38,6 m/s



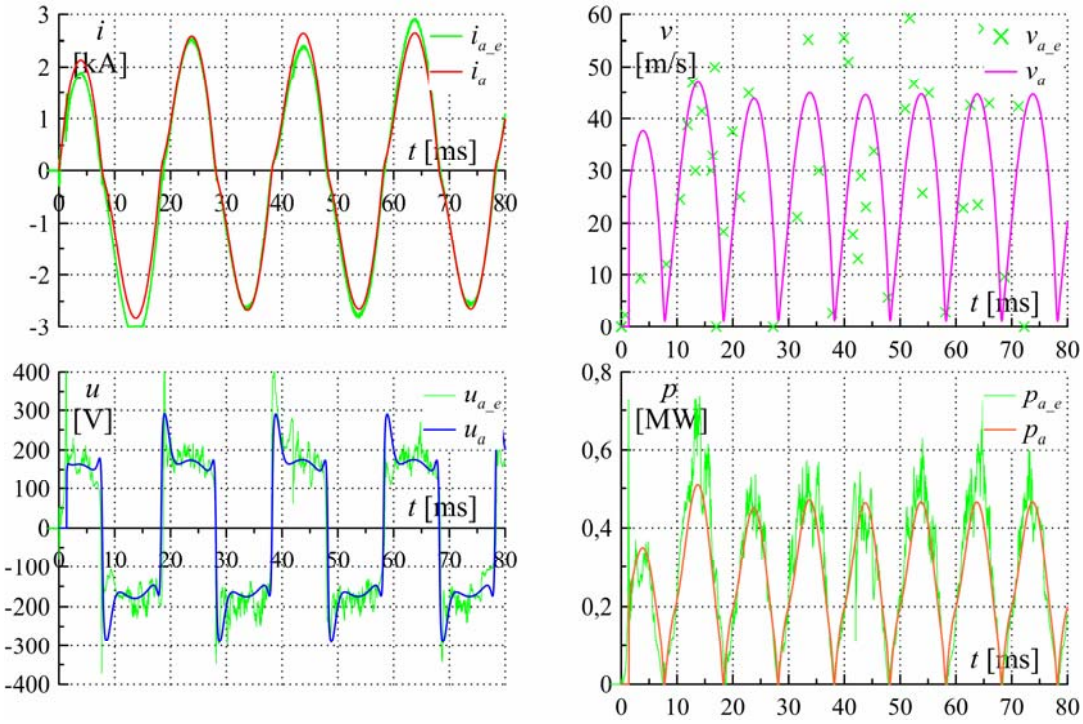
Rys. 15.6. Przebiegi: prądu łukowego, napięcia łukowego, prędkości łuku i mocy; szyny P 40x5 mm, a = 80 mm: I_{k_e}'' = 5,731 kA, U = 400 V, I_{a_e} = 4,463 kA, U_{a_e} = 193 V, v_{a_emean} = 80,0 m/s, I_a = 4,558 kA, U_a = 161 V, v_{amean} = 83,3 m/s



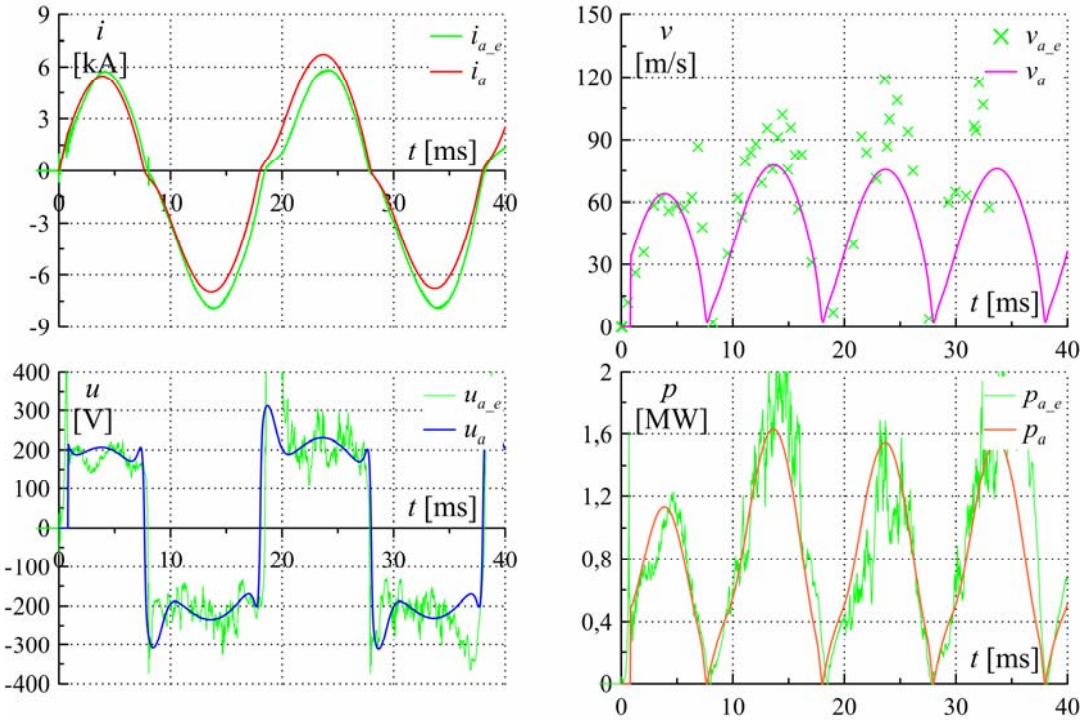
Rys. 15.7. Przebiegi: prądu łukowego, napięcia łukowego, prędkości łuku i mocy; szyny P 40x5 mm, a = 80 mm: $I_{k_e}^{"}$ = 9,491 kA, U = 400 V, I_{a_e} = 7,723 kA, U_{a_e} = 201 V, v_{a_emean} = 141 m/s, I_a = 7,624 kA, U_a = 172 V, v_{amean} = 119 m/s



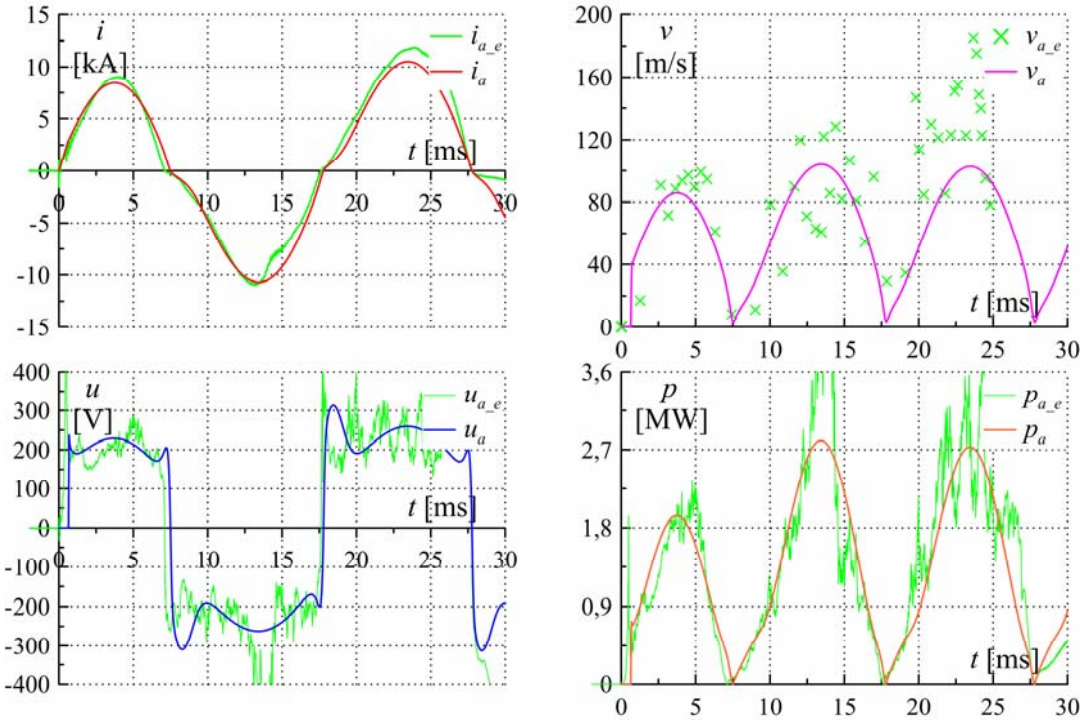
Rys. 15.8. Przebiegi: prądu łukowego, napięcia łukowego, prędkości łuku i mocy; szyny P 40x5 mm, a = 80 mm: $I_{k_e}^{"}$ = 15,232 kA, U = 400 V, I_{a_e} = 10,488 kA, U_{a_e} = 195 V, v_{a_emean} = 193 m/s, I_a = 10,336 kA, U_a = 182 V, v_{amean} = 154 m/s



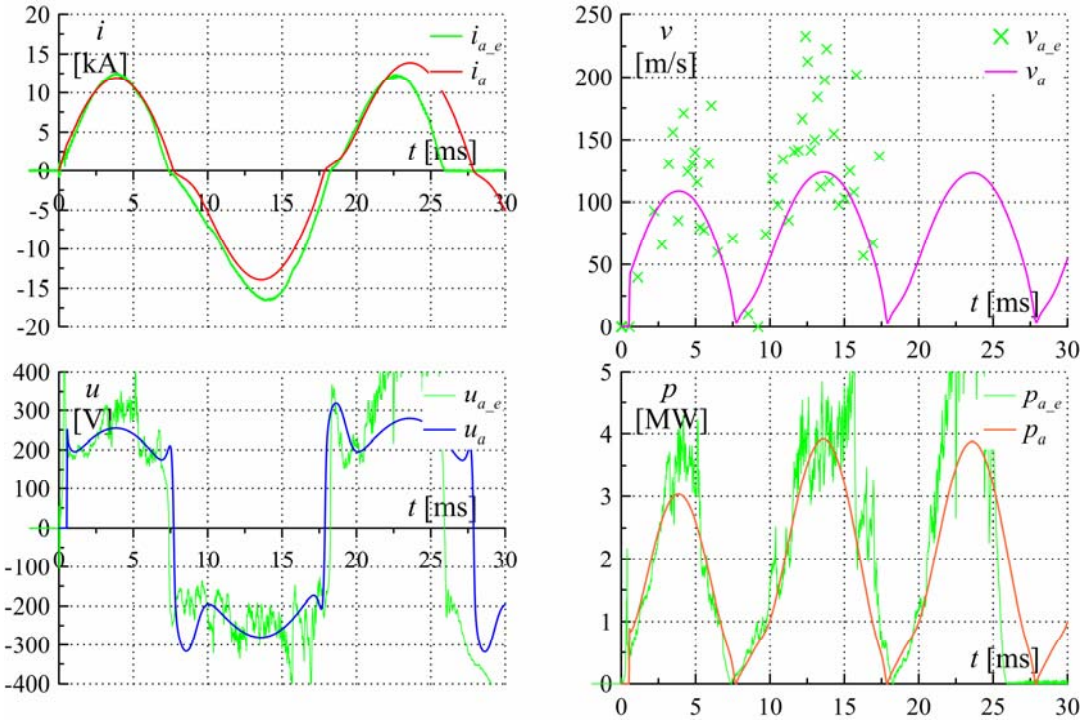
Rys. 15.9. Przebiegi: prądu łukowego, napięcia łukowego, prędkości łuku i mocy; szyny P 40x5 mm, a = 100 mm: I_{k_e}'' = 2,242 kA, U = 400 V, I_{a_e} = 1,802 kA, U_{a_e} = 180 V, v_{a_emean} = 34,1 m/s, I_a = 1,641 kA, U_a = 227 V, v_{amean} = 24,3 m/s



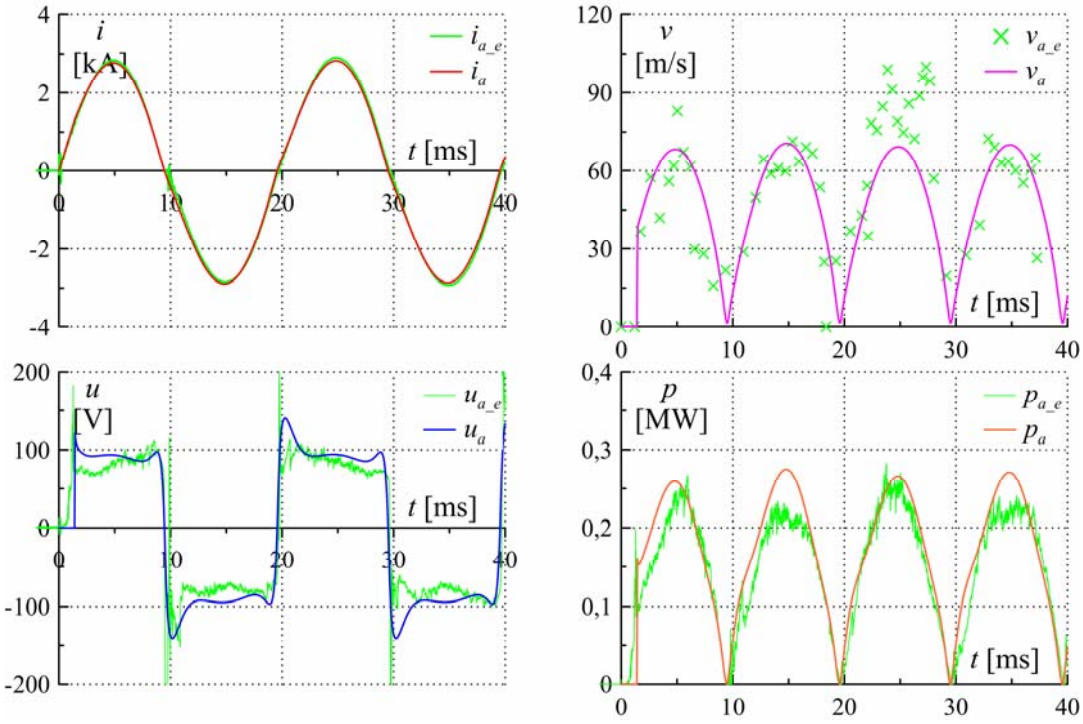
Rys. 15.10. Przebiegi: prądu łukowego, napięcia łukowego, prędkości łuku i mocy; szyny P 40x5 mm, a = 100 mm: I_{k_e}'' = 6,271 kA, U = 400 V, I_{a_e} = 4,642 kA, U_{a_e} = 231 V, v_{a_emean} = 56,6 m/s, I_a = 4,214 kA, U_a = 211 V, v_{amean} = 47,5 m/s



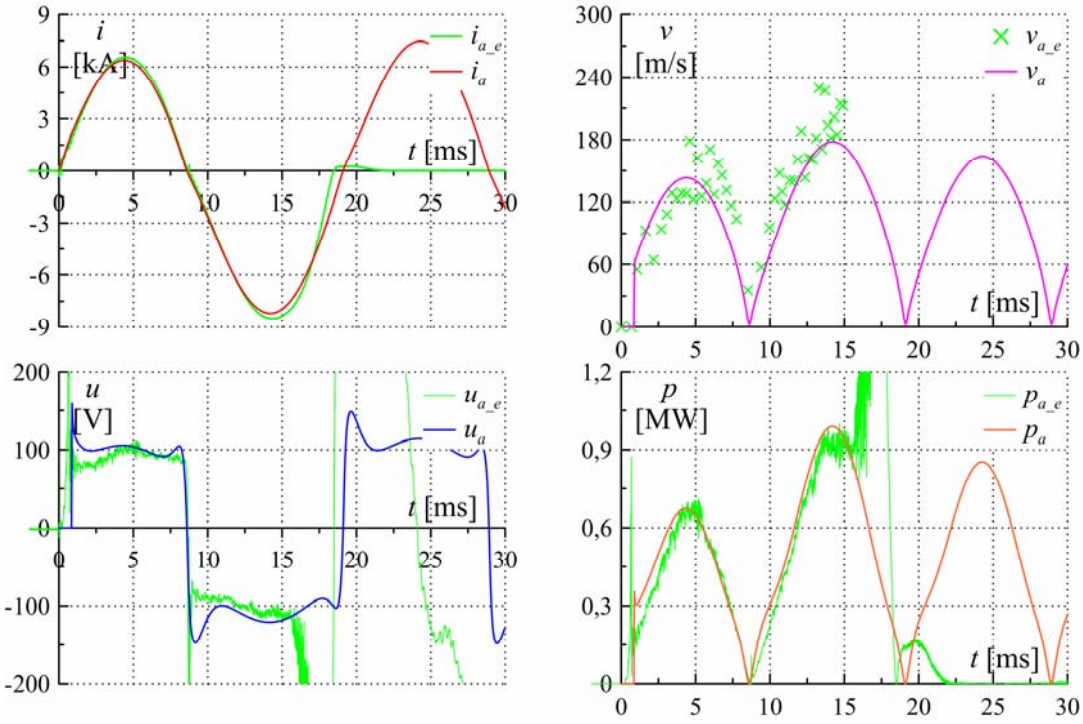
Rys. 15.11. Przebiegi: prądu łukowego, napięcia łukowego, prędkości łuku i mocy; szyny P 40x5 mm, a = 100 mm: I_{k_e}'' = 10,527 kA, U = 400 V, I_{a_e} = 6,219 kA, U_{a_e} = 248 V, $v_{a_e\text{mean}}$ = 75,0 m/s, I_a = 6,453 kA, U_a = 223 V, $v_{a\text{mean}}$ = 64,5 m/s



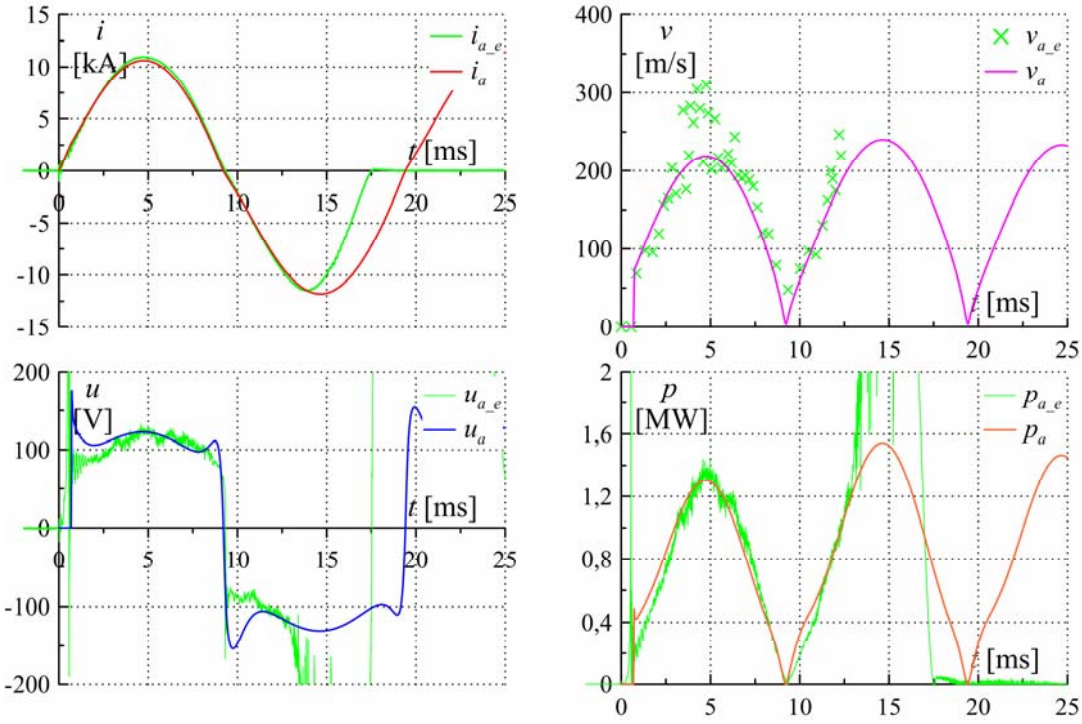
Rys. 15.12. Przebiegi: prądu łukowego, napięcia łukowego, prędkości łuku i mocy; szyny P 40x5 mm, a = 100 mm: I_{k_e}'' = 14,839 kA, U = 400 V, I_{a_e} = 10,283 kA, U_{a_e} = 242 V, $v_{a_e\text{mean}}$ = 105 m/s, I_a = 9,213 kA, U_a = 233 V, $v_{a\text{mean}}$ = 77,8 m/s



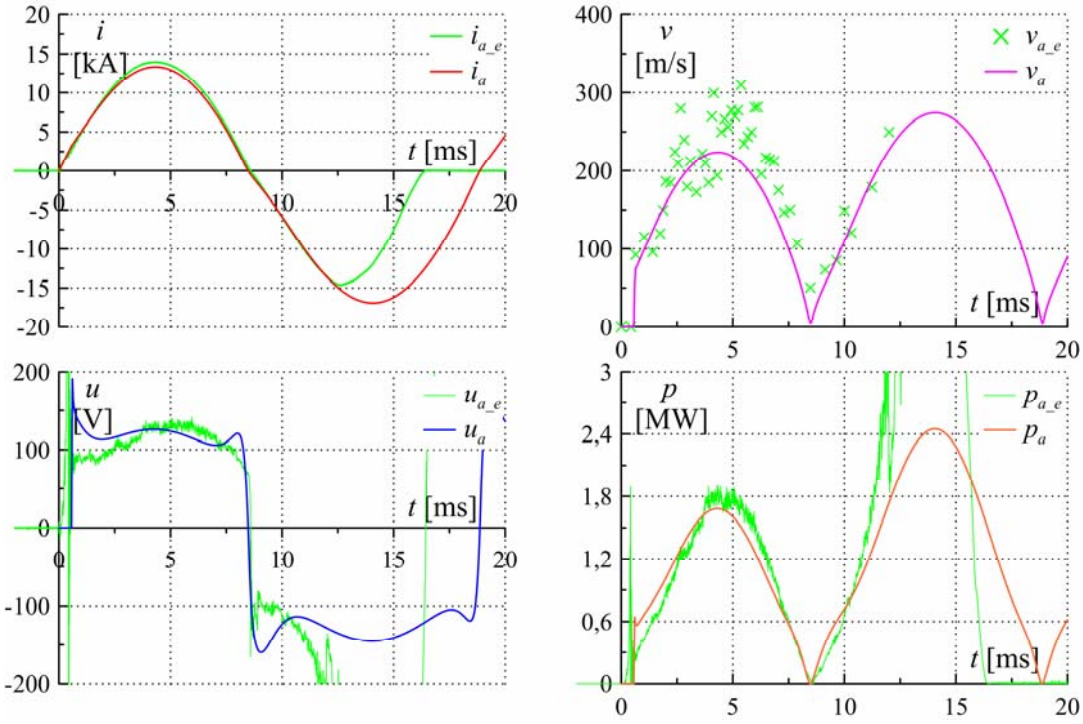
Rys. 15.13. Przebiegi: prądu łukowego, napięcia łukowego, prędkości łuku i mocy; szyny AP 40x5 mm, a = 60 mm: I_{k_e}'' = 2,130 kA, U = 400 V, I_{a_e} = 1,980 kA, U_{a_e} = 104 V, $v_{a_e\text{mean}}$ = 49,6 m/s, I_a = 1,986 kA, U_a = 91,1 V, $v_{a\text{mean}}$ = 47,1 m/s



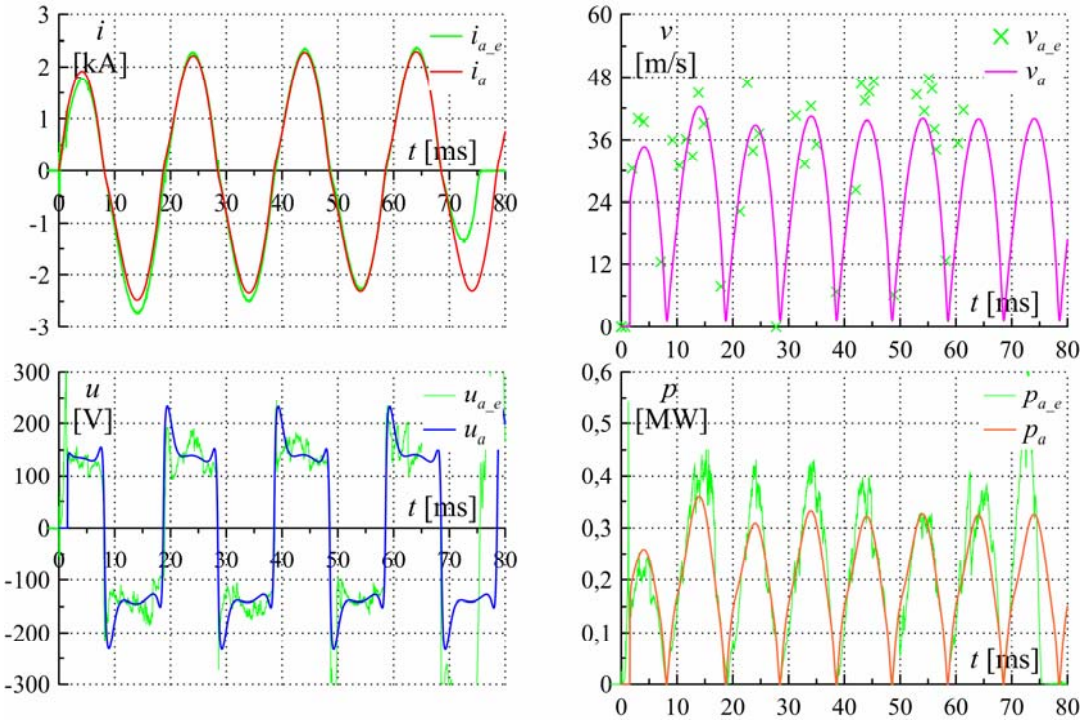
Rys. 15.14. Przebiegi: prądu łukowego, napięcia łukowego, prędkości łuku i mocy; szyny AP 40x5 mm, a = 60 mm: I_{k_e}'' = 5,854 kA, U = 400 V, I_{a_e} = 5,304 kA, U_{a_e} = 106 V, $v_{a_e\text{mean}}$ = 118 m/s, I_a = 5,178 kA, U_a = 104 V, $v_{a\text{mean}}$ = 106 m/s



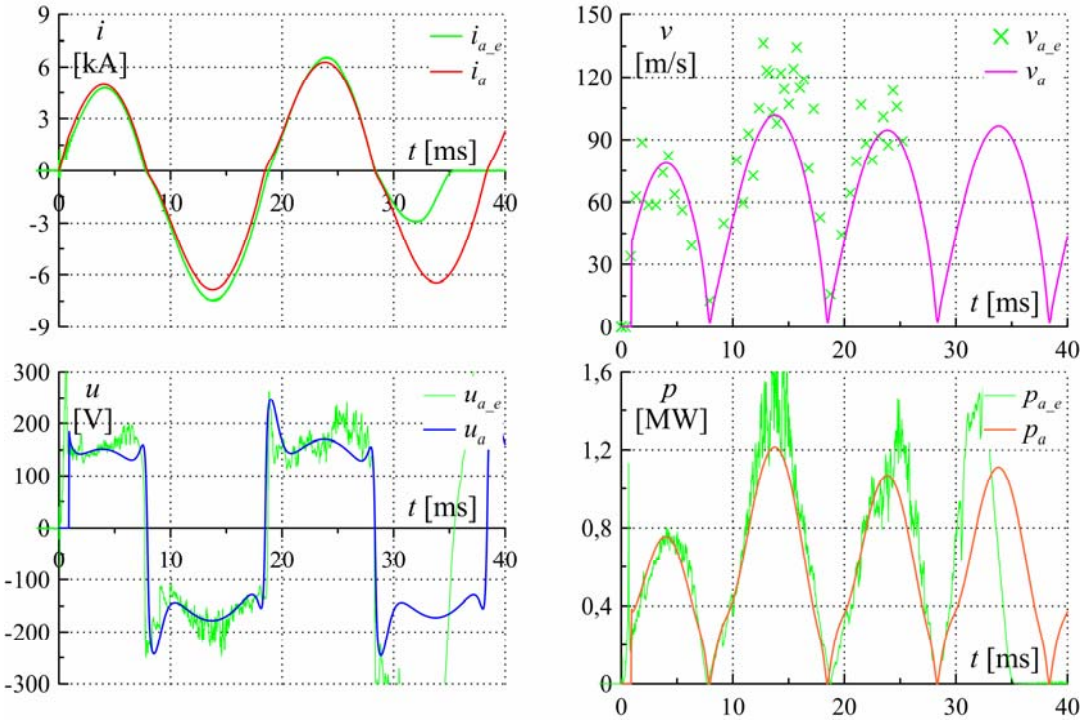
Rys. 15.15. Przebiegi: prądu łukowego, napięcia łukowego, prędkości łuku i mocy; szyny AP 40x5 mm, a = 60 mm: I_{k_e}'' = 8,802 kA, U = 400 V, I_{a_e} = 7,250 kA, U_{a_e} = 107 V, v_{a_emean} = 148 m/s, I_a = 7,022 kA, U_a = 111 V, v_{amean} = 136 m/s



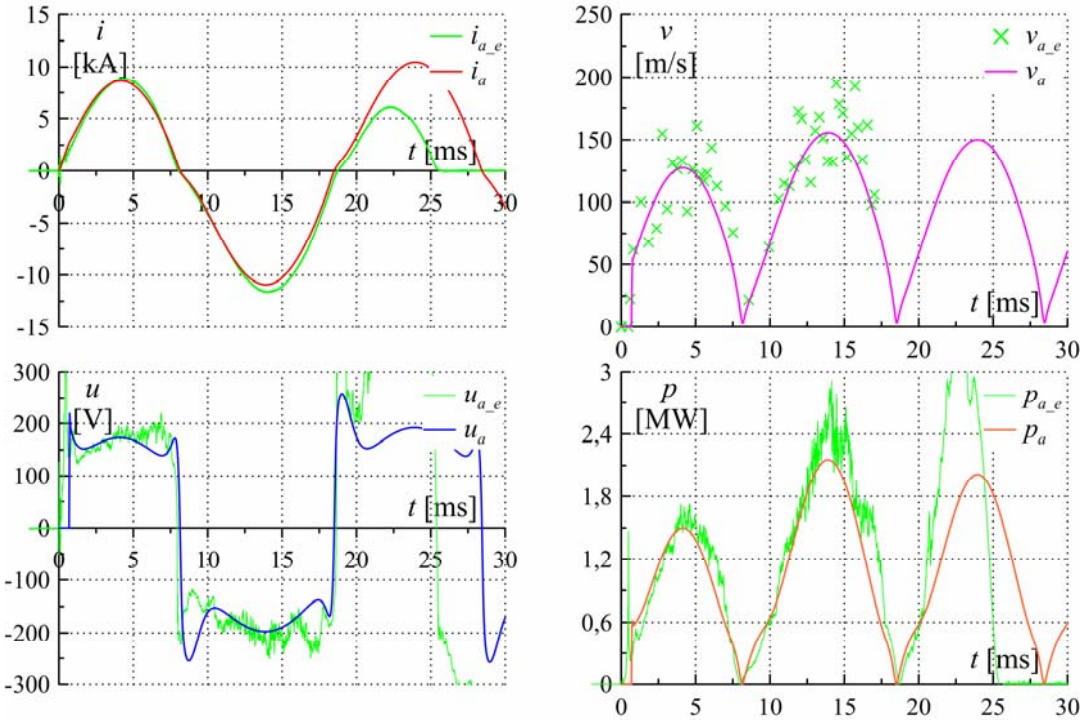
Rys. 15.16. Przebiegi: prądu łukowego, napięcia łukowego, prędkości łuku i mocy; szyny AP 40x5 mm, a = 60 mm: I_{k_e}'' = 12,572 kA, U = 400 V, I_{a_e} = 9,458 kA, U_{a_e} = 125 V, v_{a_emean} = 196 m/s, I_a = 9,099 kA, U_a = 118 V, v_{amean} = 154 m/s



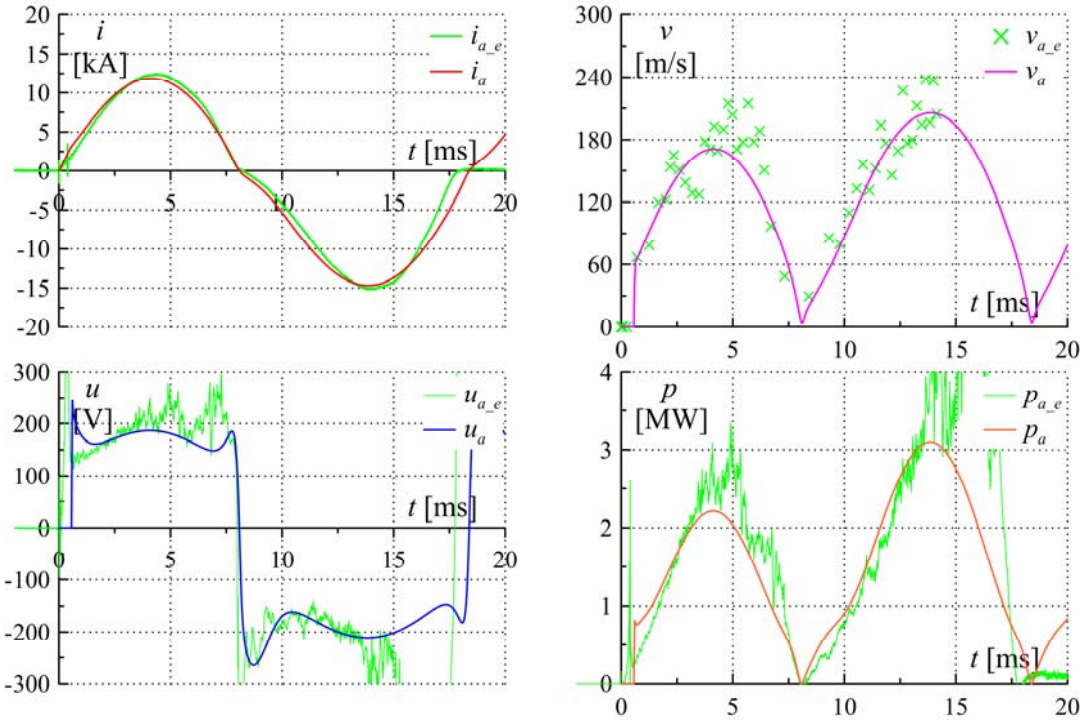
Rys. 15.17. Przebiegi: prądu łukowego, napięcia łukowego, prędkości łuku i mocy; szyny AP 40x5 mm, a = 80 mm: I_{k_e}'' = 1,843 kA, U = 400 V, I_{a_e} = 1,599 kA, U_{a_e} = 156 V, v_{a_emean} = 26,7 m/s, I_a = 1,595 kA, U_a = 152 V, v_{amean} = 28,7 m/s



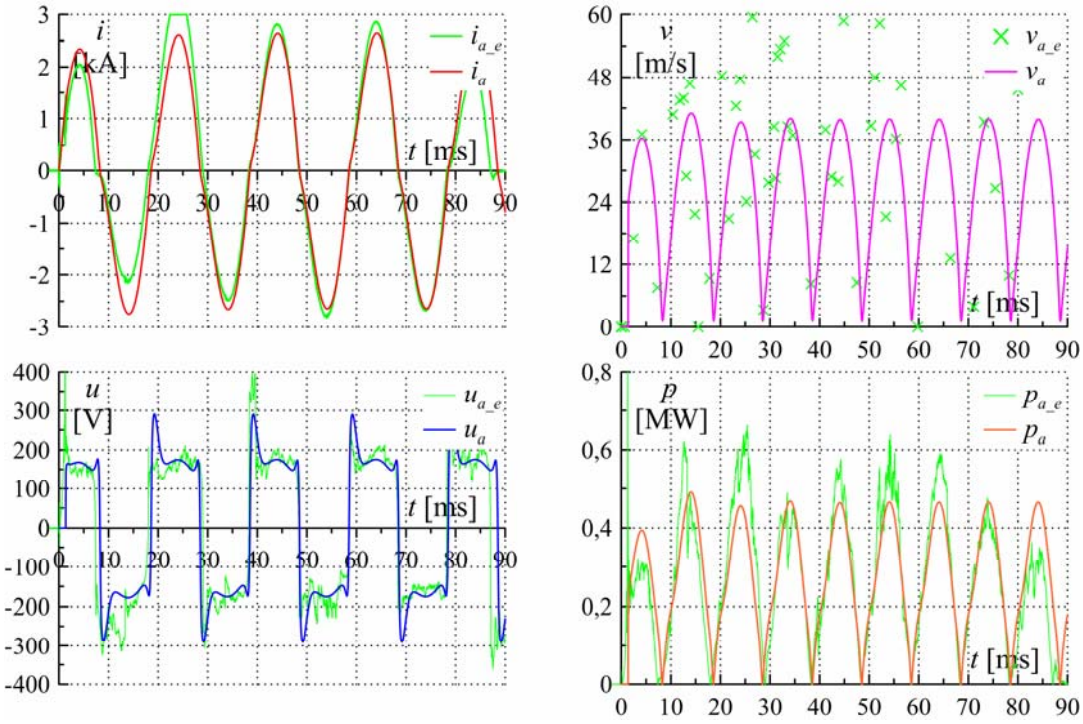
Rys. 15.18. Przebiegi: prądu łukowego, napięcia łukowego, prędkości łuku i mocy; szyny AP 40x5 mm, a = 80 mm: I_{k_e}'' = 5,215 kA, U = 400 V, I_{a_e} = 4,336 kA, U_{a_e} = 167 V, v_{a_emean} = 69,5 m/s, I_a = 4,120 kA, U_a = 158 V, v_{amean} = 62,5 m/s



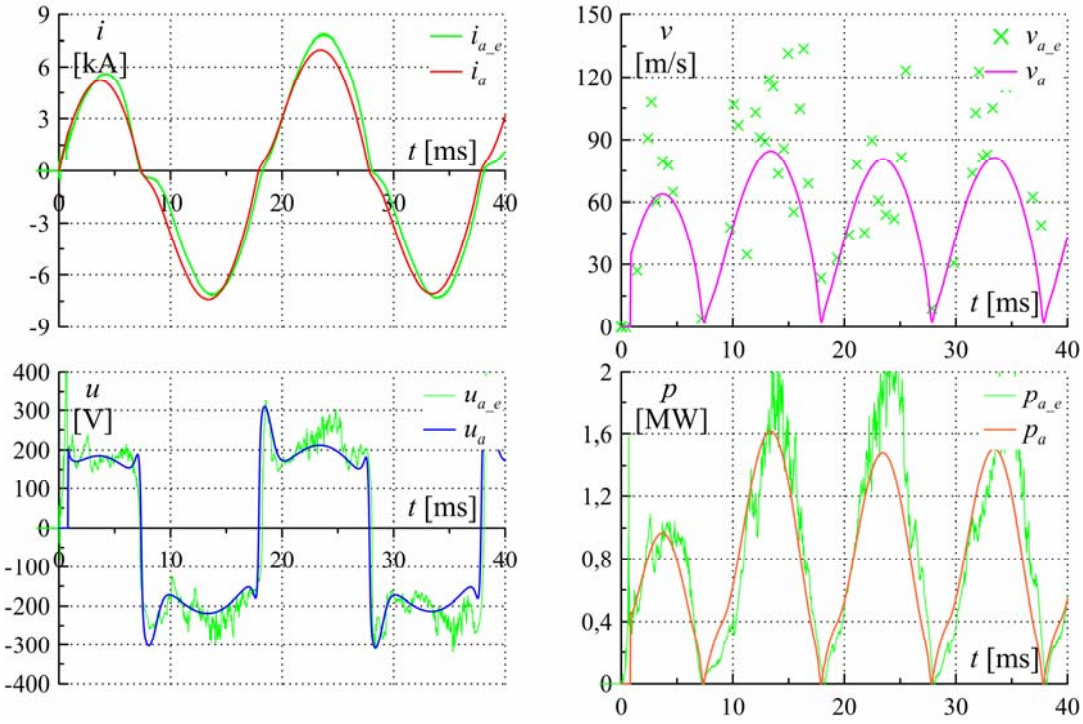
Rys. 15.19. Przebiegi: prądu łukowego, napięcia łukowego, prędkości łuku i mocy; szyny AP 40x5 mm, a = 80 mm: I_{k_e}'' = 8,838 kA, U = 400 V, I_{a_e} = 7,515 kA, U_{a_e} = 179 V, v_{a_emean} = 106 m/s, I_a = 7,224 kA, U_a = 170 V, v_{amean} = 92,9 m/s



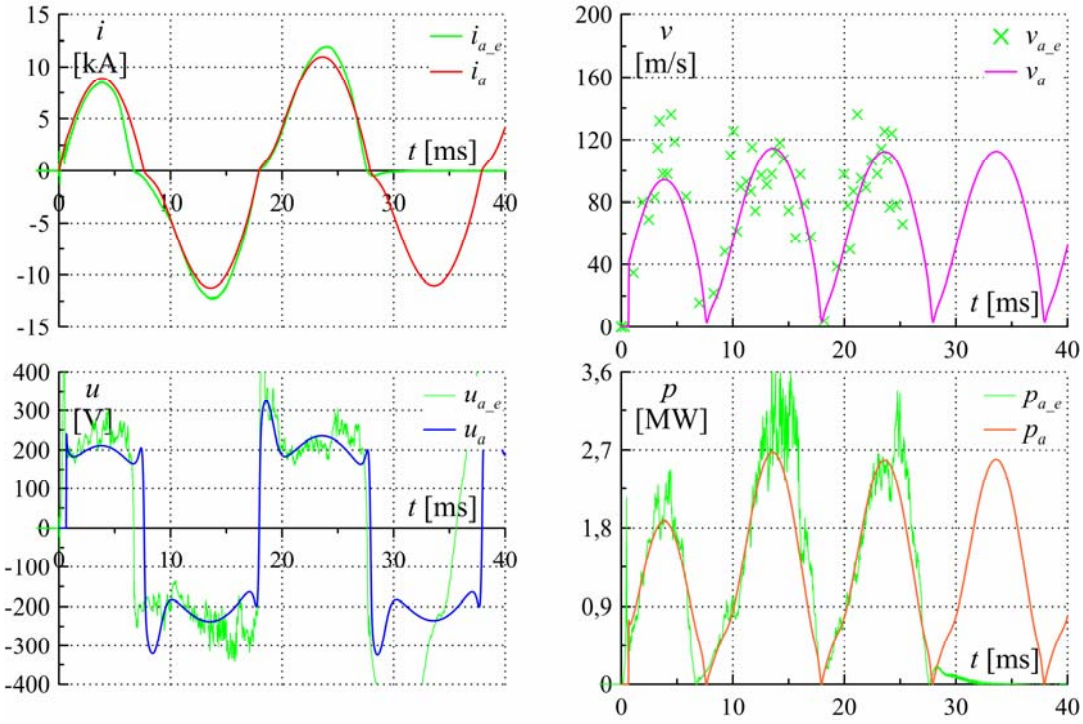
Rys. 15.20. Przebiegi: prądu łukowego, napięcia łukowego, prędkości łuku i mocy; szyny AP 40x5 mm, a = 80 mm: I_{k_e}'' = 12,610 kA, U = 400 V, I_{a_e} = 9,049 kA, U_{a_e} = 207 V, v_{a_emean} = 129 m/s, I_a = 9,146 kA, U_a = 182 V, v_{amean} = 121 m/s



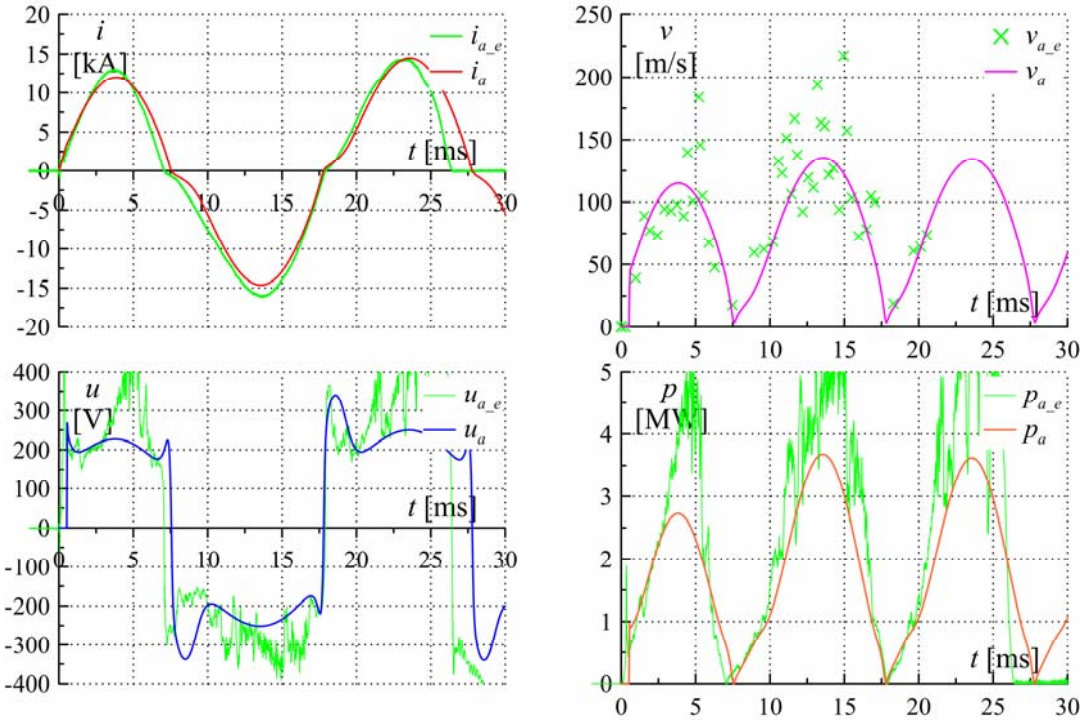
Rys. 15.21. Przebiegi: prądu łukowego, napięcia łukowego, prędkości łuku i mocy; szyny AP 40x5 mm, a = 100 mm: I_{k_e}'' = 2,245 kA, U = 400 V, I_{a_e} = 1,903 kA, U_{a_e} = 179 V, v_{a_emean} = 27,3 m/s, I_a = 1,825 kA, U_a = 184 V, v_{amean} = 25,6 m/s



Rys. 15.22. Przebiegi: prądu łukowego, napięcia łukowego, prędkości łuku i mocy; szyny AP 40x5 mm, a = 100 mm: I_{k_e}'' = 6,209 kA, U = 400 V, I_{a_e} = 4,220 kA, U_{a_e} = 204 V, v_{a_emean} = 58,9 m/s, I_a = 4,349 kA, U_a = 195 V, v_{amean} = 51,7 m/s



Rys. 15.23. Przebiegi: prądu łukowego, napięcia łukowego, prędkości łuku i mocy; szyny AP 40x5 mm, a = 100 mm: $I_{k_e}^{"}$ = 10,491 kA, U = 400 V, I_{a_e} = 6,903 kA, U_{a_e} = 247 V, $v_{a_e\text{mean}}$ = 63,0 m/s, I_a = 6,798 kA, U_a = 213 V, $v_{a\text{mean}}$ = 70,9 m/s



Rys. 15.24. Przebiegi: prądu łukowego, napięcia łukowego, prędkości łuku i mocy; szyny AP 40x5 mm, a = 100 mm: $I_{k_e}^{"}$ = 14,724 kA, U = 400 V, I_{a_e} = 9,466 kA, U_{a_e} = 262 V, $v_{a_e\text{mean}}$ = 81,2 m/s, I_a = 8860 kA, U_a = 229 V, $v_{a\text{mean}}$ = 75,6 m/s

Załącznik F: Wyniki badań eksperymentalnych i obliczeń prędkości przemieszczania się trójfazowego łuku zwarciowego

Zestawione uśrednione wyniki pomiarów prądów trójfazowych niskonapięciowych zwarć łukowych, uzyskanych prędkości przemieszczania się łuku i napięć łukowych przedstawiono w tab. 16.1 i tab. 16.2. Oprócz wyników pomiarów w tabelach zamieszczono obliczenia odchylenia standartowego σ mierzonych wielkości oraz współczynnika ufności Δ wyrażonego w jednostkach wielkości mierzonej. Współczynnik ufności Δ został podany dla poziomu ufności wynoszącego 95%.

Tab. 16.1. Uśrednione wyniki pomiarów prądów fazowych I_a, I_b i I_c z analizowanego zakresu prób trójfazowych zwarć łukowych

Lp	a	I_{k_e}	I_{a_e}	σ_{Ia}	Δ_{Ia}	I_{b_e}	σ_{Ib}	Δ_{Ib}	I_{c_e}	σ_{Ic}	Δ_{Ic}
	[mm]	[kA]	[kA]	[A]		[kA]	[A]		[kA]	[A]	
1	60	2,511	2,317	67	66	2,151	81	80	1,777	77	75
2		5,828	6,206	231	226	6,220	877	860	4,484	404	396
3		9,502	10,36	507	497	10,789	1951	1912	6,613	1109	1087
1	80	2,627	2,322	66	64	2,123	34	34	1,527	123	120
2		5,964	5,406	498	488	5,734	689	675	3,779	559	548
3		9,697	8,360	384	435	9,266	832	942	5,762	1092	1236

Tab. 16.2. Uśrednione wyniki pomiarów prędkości $v_{a_e\mathrm{mean}}$ oraz napięć łukowych U_{a_e} i U_{c_e} z analizowanego zakresu prób trójfazowych zwarć łukowych

Lp	a	I_{k_e}	$v_{a_e\mathrm{mean}}$	σ_{Ia}	Δ_{Ia}	U_{a_e}	σ_{Ua}	Δ_{Ua}	U_{c_e}	σ_{Uc}	Δ_{Uc}
	[mm]	[kA]	[m/s]			[V]			[V]		
1	60	2,511	40,2	3	3,0	119	18	17,6	116	5	4,8
2		5,828	87,0	14	14,0	120	8	8,3	109	6	5,8
3		9,502	128	23	22,9	128	4	3,9	119	4	4,2
1	80	2,627	31,8	2	1,9	150	13	12,7	163	13	12,5
2		5,964	58,5	11	10,5	169	12	11,5	158	6	5,7
3		9,697	97,4	5	6,0	182	1	0,8	170	10	11,4

Zestawione uśrednione wyniki obliczeń i pomiarów trójfazowych prądów niskonapięciowych zwarć łukowych wraz z uzyskanymi różnicami zamieszczono w tab. 16.3. W przypadku prądów łukowych w tab. 16.3 przedstawiono wyniki obliczeń po zastosowaniu zależności empirycznych.

Tab. 16.3. Uśrednione wyniki pomiarów, obliczeń oraz błędów obliczeń prądów fazowych I_a, I_b i I_c w analizowanym zakresie prób trójfazowych zwarć łukowych

Lp	a	I_{k_e}	I_{a_e}	I_{b_e}	I_{c_e}	I_a	I_b	I_c	δi_a	δi_b	δi_c
	[mm]	[kA]	[kA]			[kA]			[%]		
1	60	2,511	2,317	2,151	1,777	2,227	2,222	1,803	10,88	10,15	12,85
2		5,828	6,206	6,220	4,484	5,788	6,152	4,177	11,69	7,41	9,09
3		9,502	10,36	10,79	6,613	9,345	10,06	6,170	11,35	9,51	7,96
5	80	2,627	2,322	2,123	1,527	2,159	2,156	1,518	16,08	10,60	27,75
6		5,964	5,406	5,734	3,779	5,006	5,591	3,291	12,56	8,40	17,04
7		9,697	8,360	9,266	5,762	7,286	8,540	4,970	16,03	10,64	16,65

W tab. 16.4 zamieszczono wyniki badań eksperymentalnych oraz obliczeń średniej prędkości przemieszczającego się trójfazowego łuku awaryjnego wzdłuż szyn prostokątnych AP 40x5 mm. Podobnie, jak w przypadku wyników prądów, w tab. 16.4 zestawiono uśrednione wyniki badań eksperymentalnych i obliczeń. Tab. 16.5 przedstawia uśrednione wyniki badań eksperymentalnych oraz wyniki obliczeń napięć łukowych trójfazowego zwarcia łukowego.

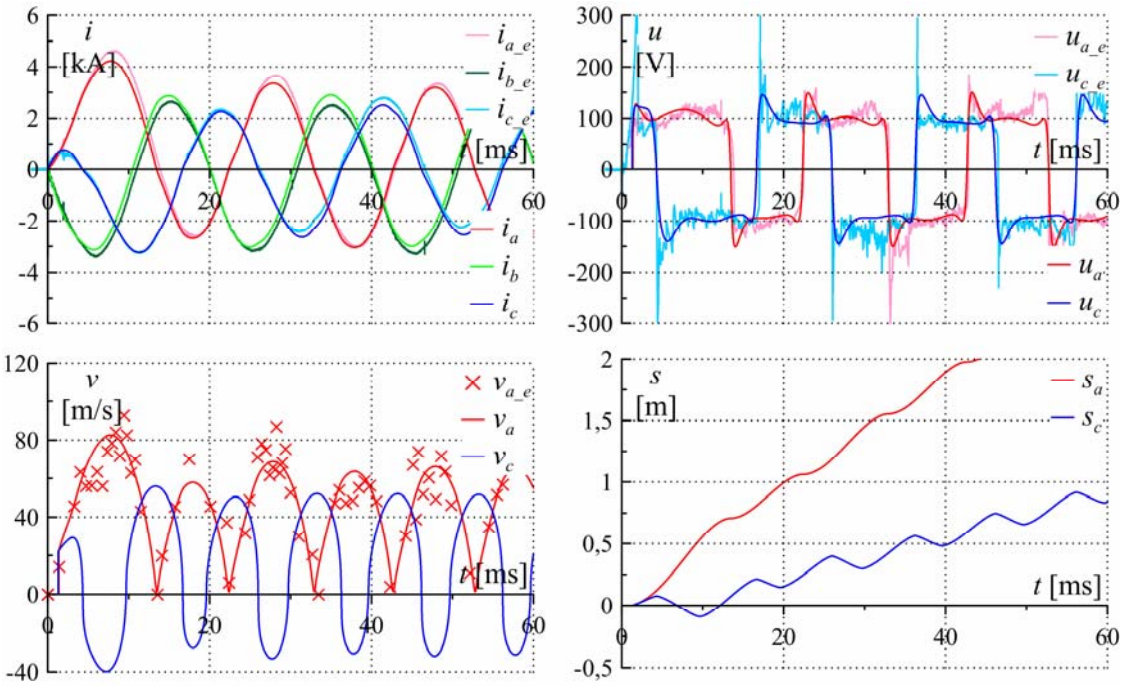
Tab. 16.4. Uśrednione wyniki pomiarów prędkości łuku $v_{a_e\mathrm{mean}}$, obliczeń $v_{a\mathrm{mean}}$ i $v_{c\mathrm{mean}}$ oraz błędów obliczeń w analizowanym zakresie prób trójfazowych zwarć łukowych

Lp	a	I_{k_e}	$v_{a_e\mathrm{mean}}$	$v_{a\mathrm{mean}}$	$v_{c\mathrm{mean}}$	δv_a	$\delta v_{a\mathrm{mean}}$
	[mm]	[kA]	[m/s]	[m/s]		[p.u.]	[%]
1	60	2,511	40,2	40,3	19,7	3	3,0
2		5,828	87,0	85,4	42,3	14	14,0
3		9,502	128	130,8	72,6	23	22,9
5	80	2,627	31,8	33,6	12,6	2	1,9
6		5,964	58,5	61,7	26,6	11	10,5
7		9,697	97,4	95,3	44,3	5	6,0

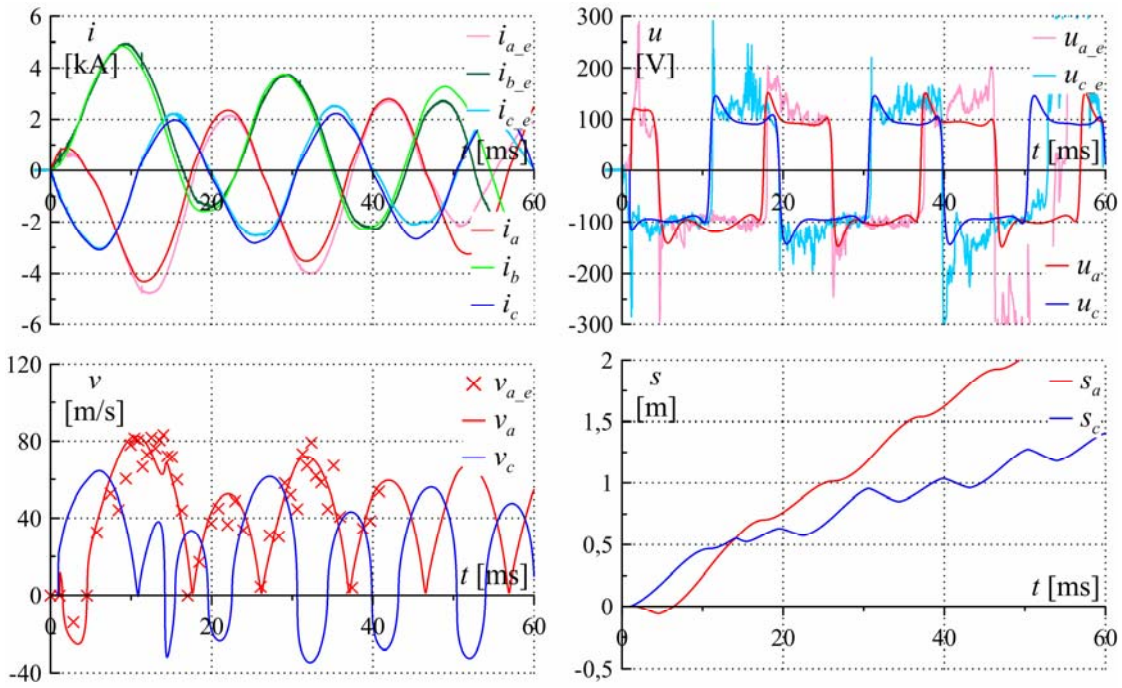
Tab. 16.5. Uśrednione wyniki pomiarów, obliczeń oraz błędów obliczeń napięć łukowych U_a i U_c w analizowanym zakresie prób trójfazowych zwarć łukowych

Lp	a	I_{k_e}	U_{a_e}	U_{c_e}	U_a	U_c	δU_a	δU_c
	[mm]	[kA]	[V]		[V]		[%]	
1	60	2,511	119,5	116,0	98,3	97,3	-16,51	-16,03
2		5,828	120,0	109,3	113,1	104,0	-5,35	-4,72
3		9,502	128,4	119,2	125,3	113,7	-2,32	-4,55
5	80	2,627	150,4	163,5	153,0	152,4	2,19	-6,34
6		5,964	168,7	158,1	169,2	157,1	0,64	-0,55
7		9,697	181,6	169,9	181,8	169,8	0,13	0,09

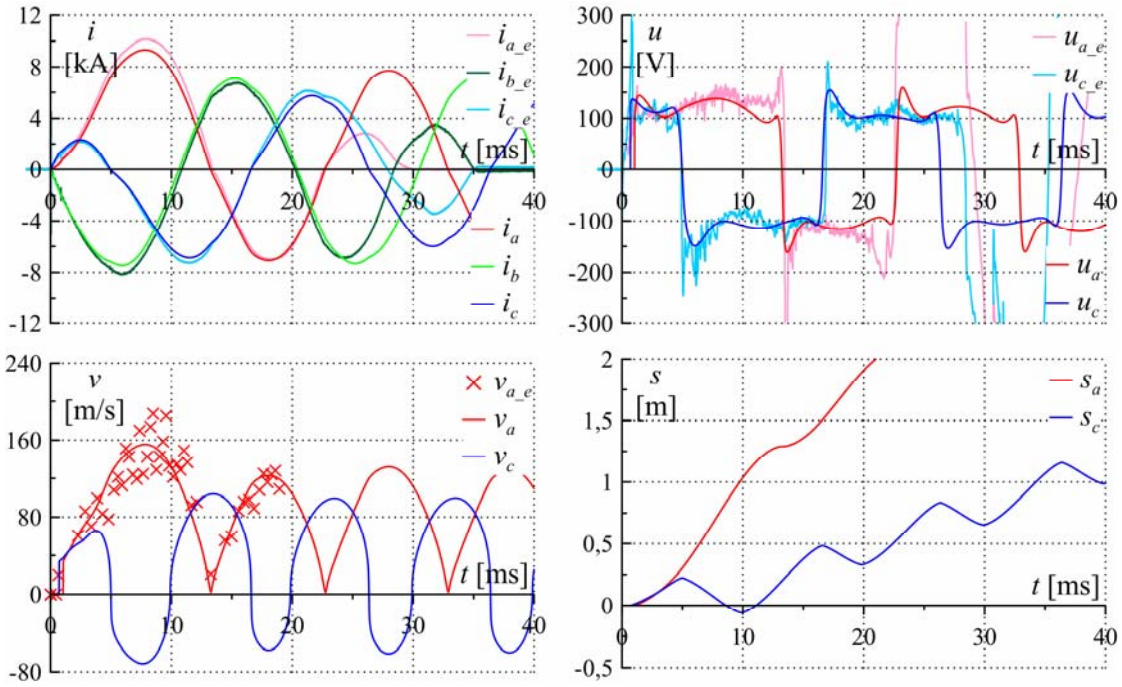
Przykładowe wyniki badań eksperymentalnych oraz obliczeń trójfazowego łuku zwarciowego palącego w układzie szyn AP 40x5 mm i o analizowanych odstępach a ilustrują rys. 16.1÷ rys. 16.12.



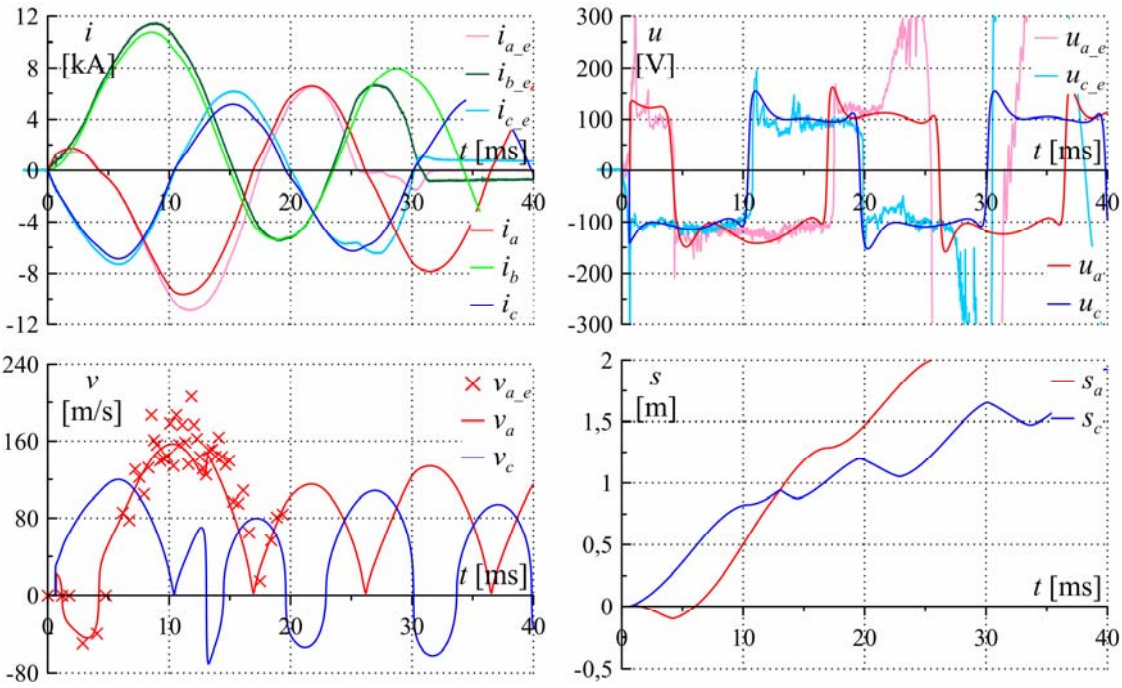
Rys. 16.1. Przebiegi: prądów, napięć, prędkości i drogi kolumn trójfazowego zwarcia łukowego; szyny AP 40x5 mm, a = 60 mm, U_n = 400 V, Ψ_Z = 8º, I_{k_e}" = 2,39 kA, I_{a_e} = 2,36 kA, I_{b_e} = 2,08 kA, I_{c_e} = 1,71 kA, U_{a_e} = 112 V, U_{c_e} = 112 V, $v_{a_e\text{mean}}$ = 42 m/s, I_a = 2,37 kA, I_b = 2,25 kA, I_c = 1,84 kA, U_a = 98 V, U_c = 96 V, $v_{a\text{mean}}$ = 43 m/s, $v_{c\text{mean}}$ = 16 m/s



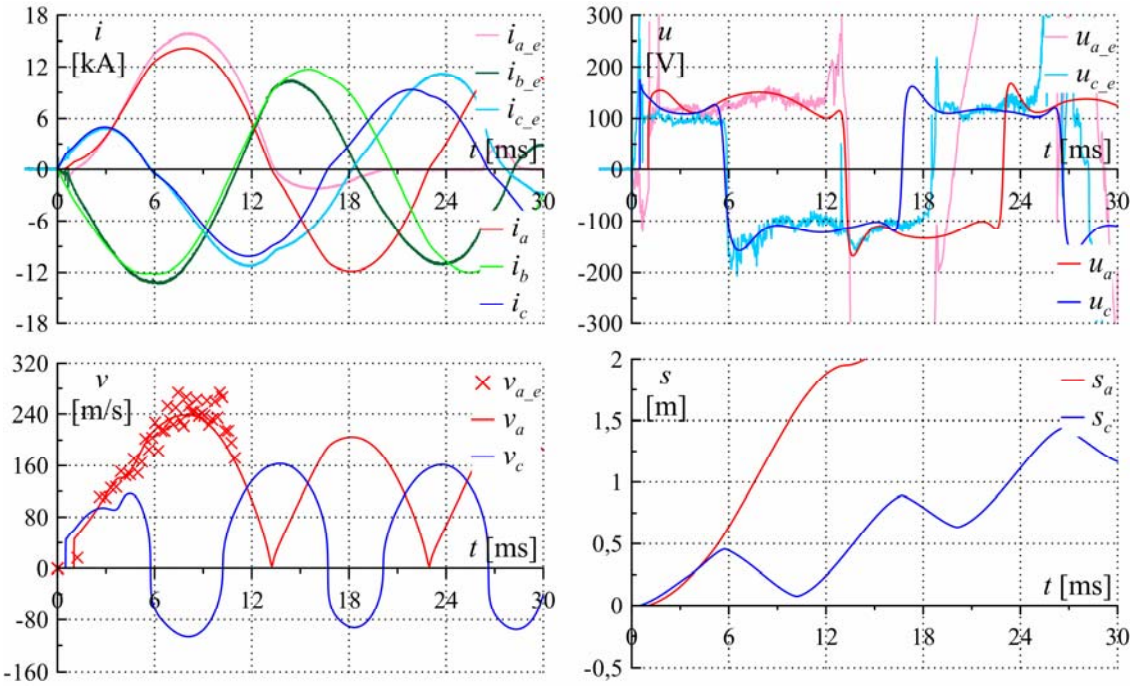
Rys. 16.2. Przebiegi: prądów, napięć, prędkości i drogi kolumn trójfazowego zwarcia łukowego; szyny AP 40x5 mm, a = 60 mm, U_n = 400 V, Ψ_Z = 124º, I_{k_e}" = 2,34 kA, I_{a_e} = 2,33 kA, I_{b_e} = 2,23 kA, I_{c_e} = 1,81 kA, U_{a_e} = 110 V, U_{c_e} = 123 V, $v_{a_e\text{mean}}$ = 37 m/s, I_a = 2,31 kA, I_b = 2,46 kA, I_c = 1,96 kA, U_a = 98 V, U_c = 97 V, $v_{a\text{mean}}$ = 38 m/s, $v_{c\text{mean}}$ = 24 m/s



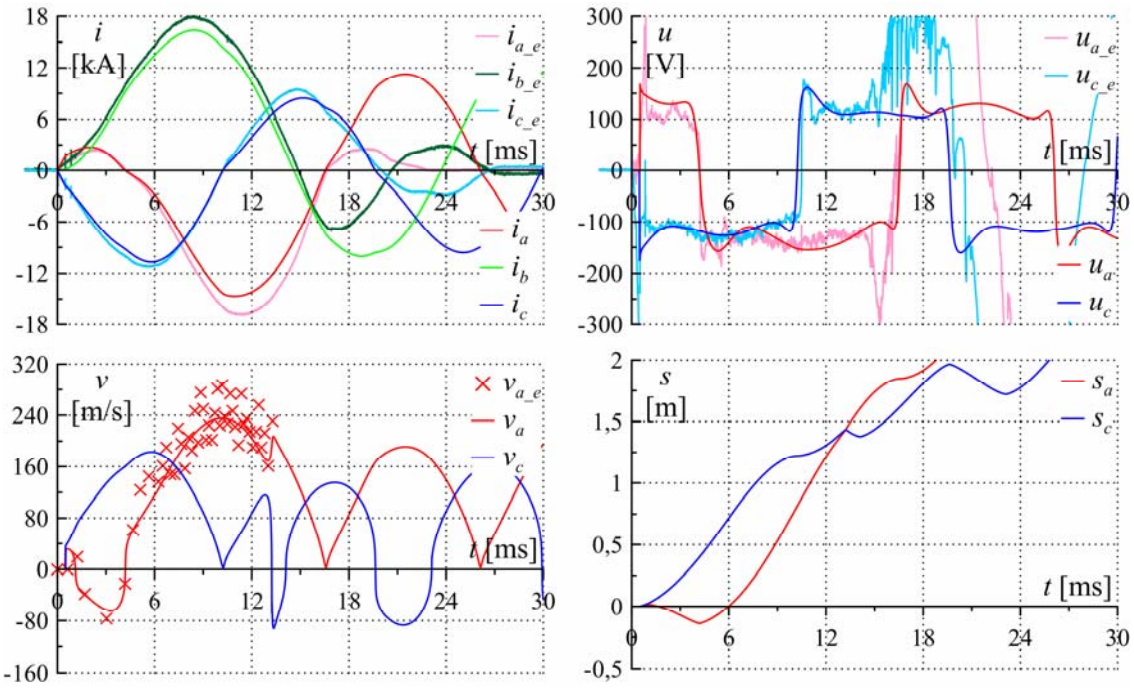
Rys. 16.3. Przebiegi: prądów, napięć, prędkości i drogi kolumn trójfazowego zwarcia łukowego; szyny AP 40x5 mm, a = 60 mm, U_n = 400 V, Ψ_Z = 4°, $I_{k_e}^{"}$ = 5,67 kA, I_{a_e} = 6,47 kA, I_{b_e} = 5,48 kA, I_{c_e} = 4,00 kA, U_{a_e} = 132 V, U_{c_e} = 116 V, v_{a_emean} = 95 m/s, I_a = 6,36 kA, I_b = 5,66 kA, I_c = 4,03 kA, U_a = 114 V, U_c = 106 V, v_{amean} = 95 m/s, v_{cmean} = 19 m/s



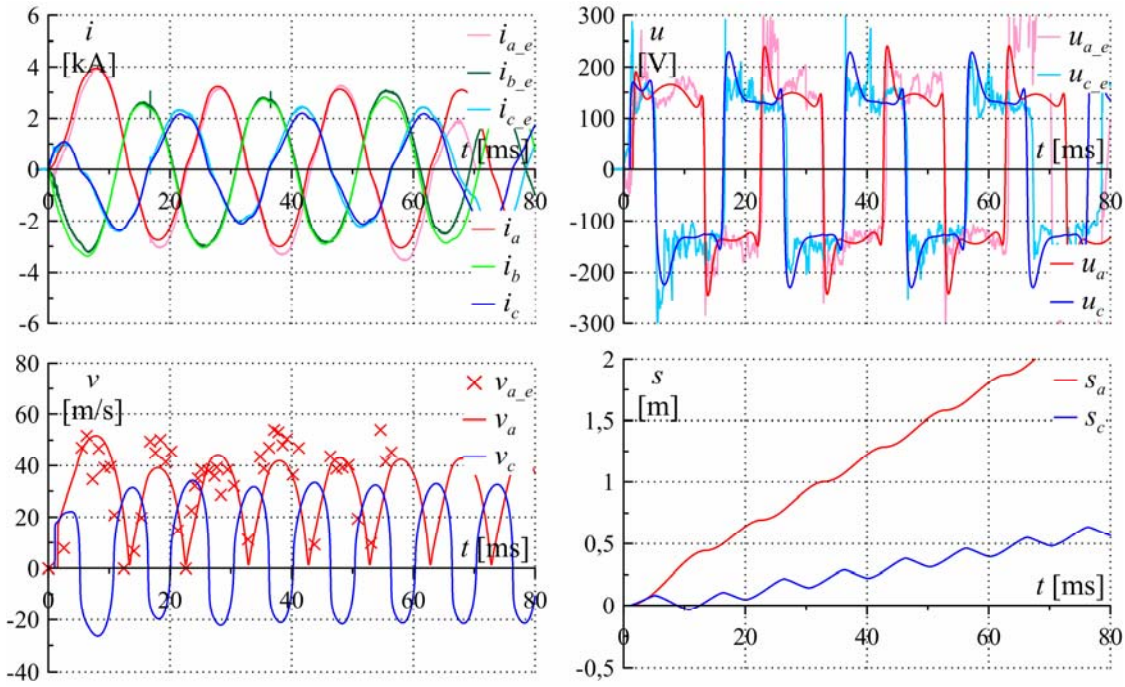
Rys. 16.4. Przebiegi: prądów, napięć, prędkości i drogi kolumn trójfazowego zwarcia łukowego; szyny AP 40x5 mm, a = 60 mm, U_n = 400 V, Ψ_Z = 123°, $I_{k_e}^{"}$ = 5,61 kA, I_{a_e} = 6,08 kA, I_{b_e} = 7,02 kA, I_{c_e} = 4,83 kA, U_{a_e} = 118 V, U_{c_e} = 103 V, v_{a_emean} = 79 m/s, I_a = 5,71 kA, I_b = 7,02 kA, I_c = 4,62 kA, U_a = 116 V, U_c = 103 V, v_{amean} = 77 m/s, v_{cmean} = 69 m/s



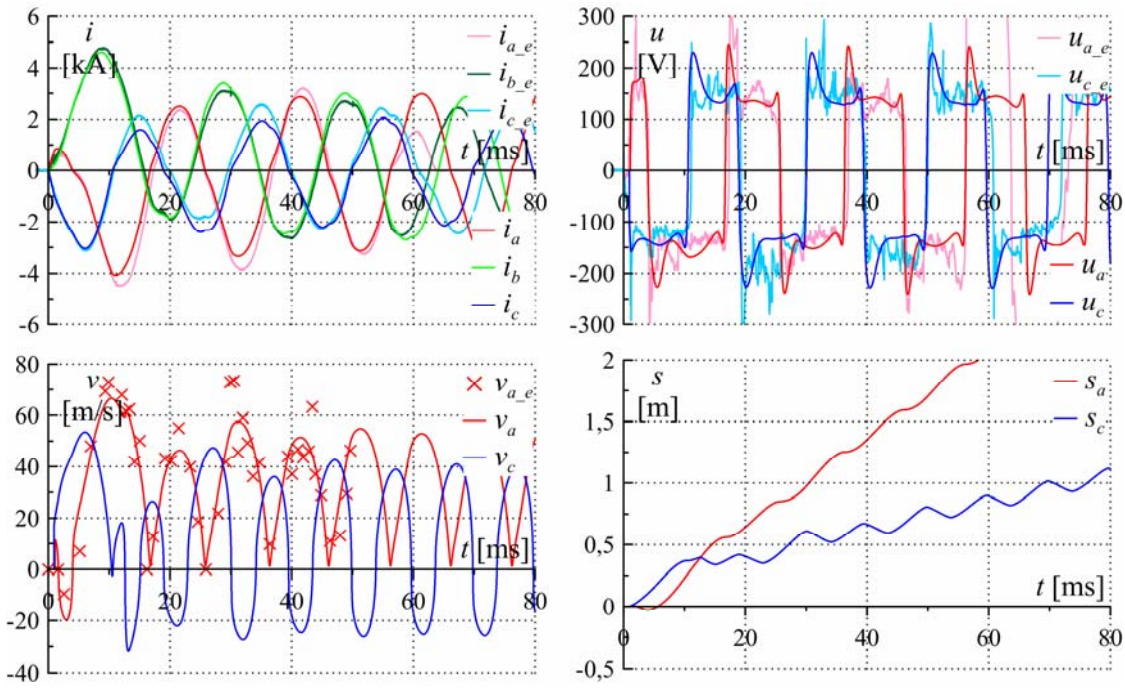
Rys. 16.5. Przebiegi: prądów, napięć, prędkości i drogi kolumn trójfazowego zwarcia łukowego; szyny AP 40x5 mm, a = 60 mm, U_n = 400 V, Ψ_Z = 0º, $I_{k_e}^{"}$ = 9,49 kA, I_{a_e} = 11,1 kA, I_{b_e} = 9,26 kA, I_{c_e} = 5,12 kA, U_{a_e} = 123 V, U_{c_e} = 117 V, $v_{a_e\text{mean}}$ = 161 m/s, I_a = 10,5 kA, I_b = 9,23 kA, I_c = 4,99 kA, U_a = 128 V, U_c = 110 V, $v_{a\text{mean}}$ = 164 m/s, $v_{c\text{mean}}$ = 12 m/s



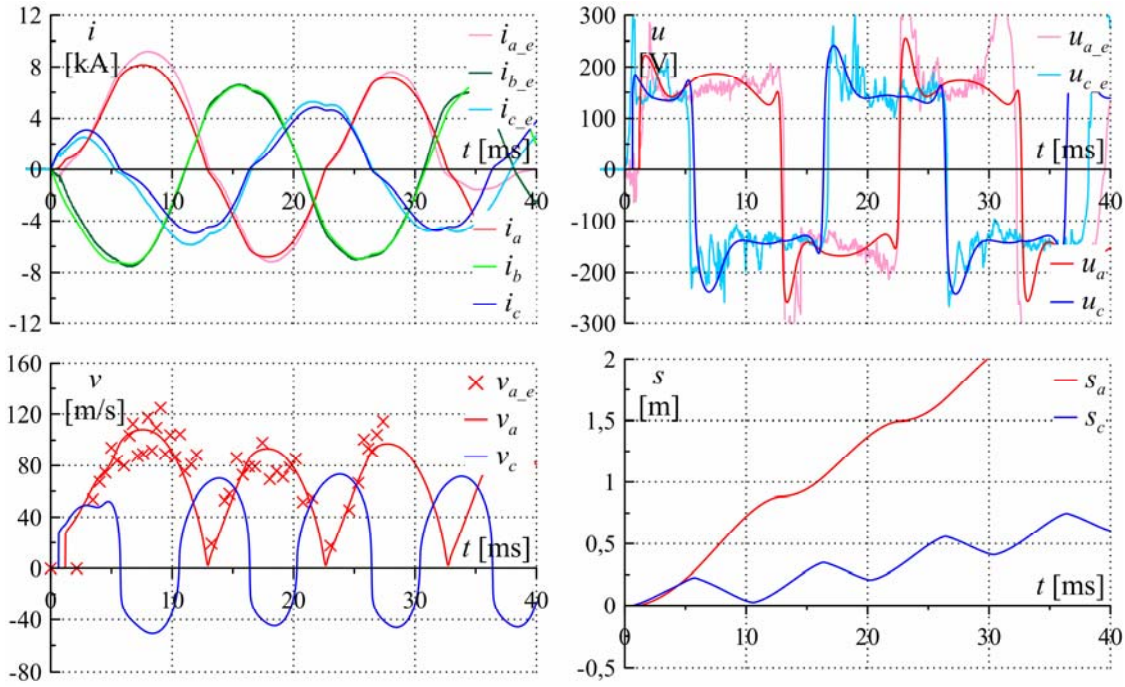
Rys. 16.6. Przebiegi: prądów, napięć, prędkości i drogi kolumn trójfazowego zwarcia łukowego; szyny AP 40x5 mm, a = 60 mm, U_n = 400 V, Ψ_Z = 119º, $I_{k_e}^{"}$ = 9,44 kA, I_{a_e} = 9,98 kA, I_{b_e} = 12,5 kA, I_{c_e} = 7,27 kA, U_{a_e} = 132 V, U_{c_e} = 122 V, $v_{a_e\text{mean}}$ = 109 m/s, I_a = 9,27 kA, I_b = 12,1 kA, I_c = 7,13 kA, U_a = 129 V, U_c = 114 V, $v_{a\text{mean}}$ = 115 m/s, $v_{c\text{mean}}$ = 109 m/s



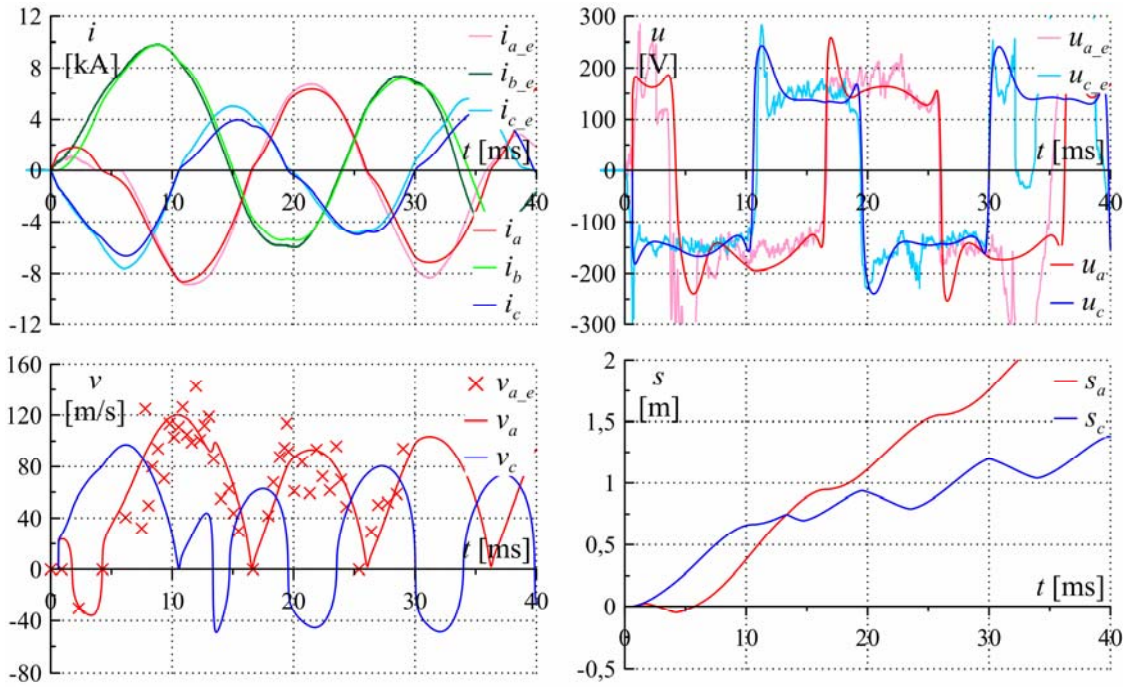
Rys. 16.7. Przebiegi: prądów, napięć, prędkości i drogi kolumn trójfazowego zwarcia łukowego; szyny AP 40x5 mm, a = 80 mm, $I_{k_e}^{"}$ = 2,34 kA, U_n = 400 V, Ψ_Z = 6º, I_{a_e} = 2,24 kA, I_{b_e} = 2,15 kA, I_{c_e} = 1,57 kA, U_{a_e} = 147 V, U_{c_e} = 146 V, v_{a_emean} = 30 m/s, I_a = 2,20 kA, I_b = 2,15 kA , I_c = 1,49 kA, U_a = 153 V, U_c = 153 V, v_{amean}= 30 m/s, v_{cmean} = 9,6 m/s



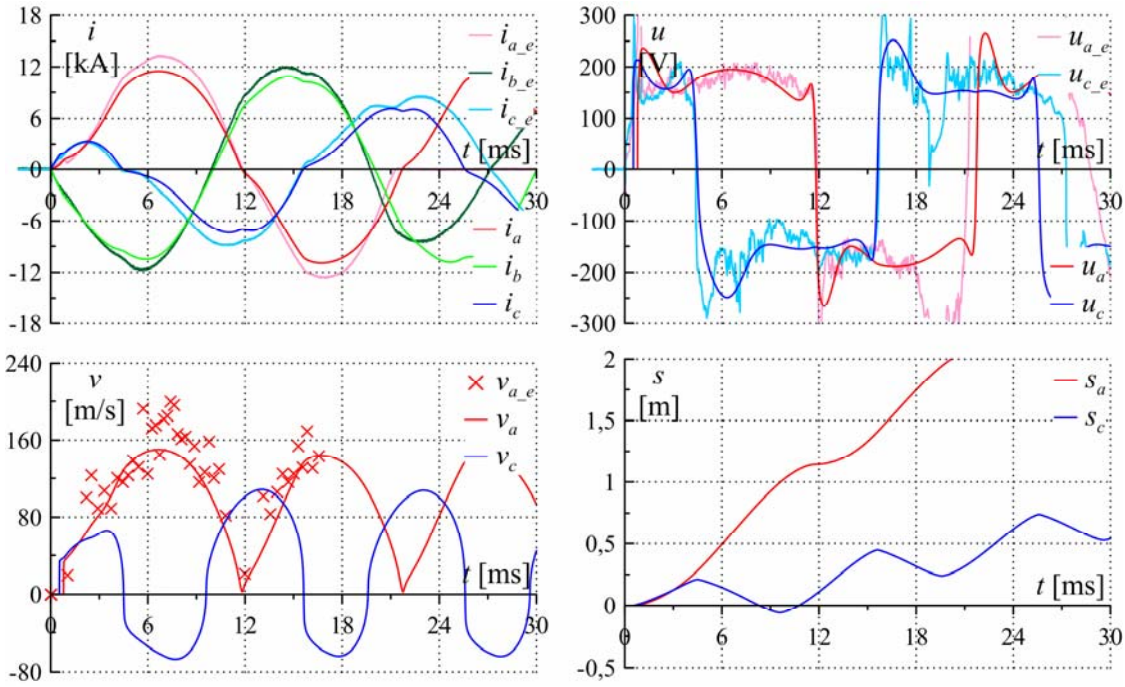
Rys. 16.8. Przebiegi: prądów, napięć, prędkości i drogi kolumn trójfazowego zwarcia łukowego; szyny AP 40x5 mm, a = 80 mm, U_n = 400 V, Ψ_Z = 123º, $I_{k_e}^{"}$ = 2,36 kA, I_{a_e} = 2,32 kA, I_{b_e} = 2,08 kA, I_{c_e} = 1,60 kA, U_{a_e} = 141 V, U_{c_e} = 164 V, v_{a_emean} = 34 m/s, I_a = 2,12 kA, I_b = 2,17 kA , I_c = 1,55 kA, U_a = 153 V, U_c = 152 V, v_{amean} = 36 m/s, v_{cmean}= 7,5 m/s



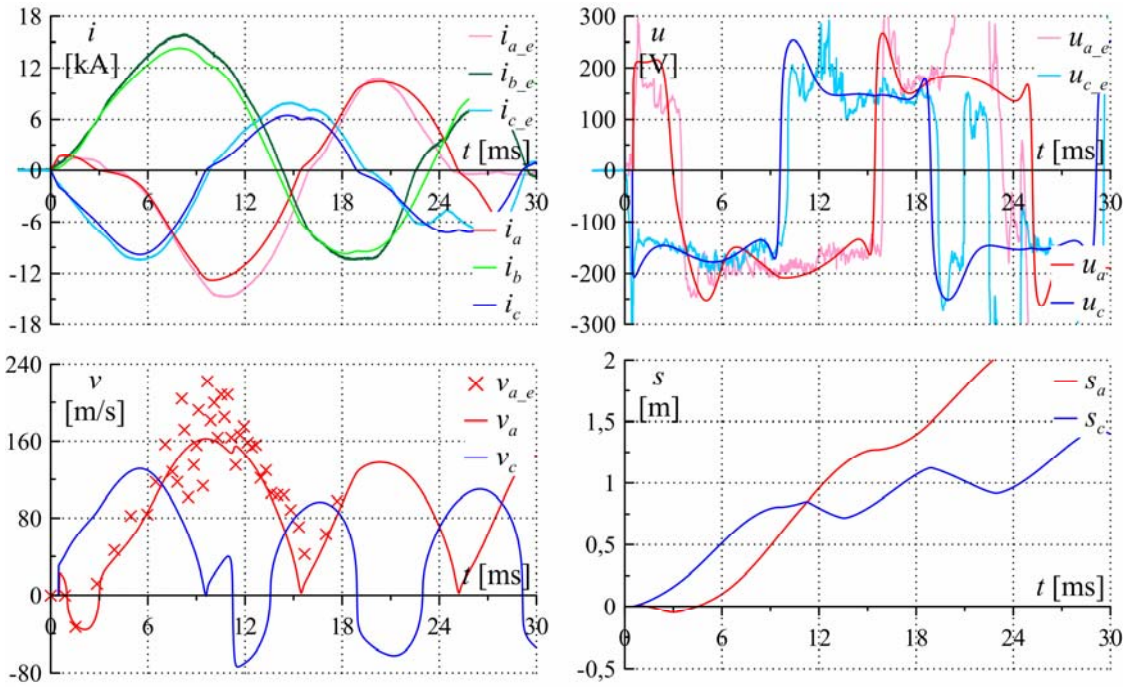
Rys. 16.9. Przebiegi: prądów, napięć, prędkości i drogi kolumn trójfazowego zwarcia łukowego; szyny AP 40x5 mm, a = 80 mm, U_n = 400 V, Ψ_Z = 0º, $I_{k_e}^{"}$ = 6,00 kA, I_{a_e} = 5,85 kA, I_{b_e} = 5,14 kA, I_{c_e} = 3,31 kA, U_{a_e} = 165 V, U_{c_e} = 164 V, v_{a_emean} = 65 m/s, I_a = 5,36 kA, I_b = 5,21 kA , I_c = 2,84 kA, U_a = 167 V, U_c = 160 V, v_{amean} = 65 m/s, v_{cmean}= 13 m/s



Rys. 16.10. Przebiegi: prądów, napięć, prędkości i drogi kolumn trójfazowego zwarcia łukowego; szyny AP 40x5 mm, a = 80 mm, U_n = 400 V, Ψ_Z = 115º, $I_{k_e}^{"}$ = 5,93 kA, I_{a_e} = 4,76 kA, I_{b_e} = 6,16 kA, I_{c_e} = 4,37 kA, U_{a_e} = 175 V, U_{c_e} = 151 V, v_{a_emean} = 48 m/s, I_a = 4,65 kA, I_b = 5,99 kA , I_c = 3,74 kA, U_a = 171 V, U_c = 154 V, v_{amean} = 54 m/s, v_{cmean} = 18 m/s



Rys. 16.11. Przebiegi: prądów, napięć, prędkości i drogi kolumn trójfazowego zwarcia łukowego; szyny AP 40x5 mm, a = 80 mm, U_n = 400 V, Ψ_Z = 8º, $I_{k_e}^{"}$ = 9,65 kA, I_{a_e} = 8,75 kA, I_{b_e} = 8,76 kA, I_{c_e} = 4,50 kA, U_{a_e} = 182 V, U_{c_e} = 171 V, v_{a_emean} = 102 m/s, I_a = 7,62 kA, I_b = 7,96 kA , I_c = 4,21 kA, U_a = 180 V, U_c = 172 V, v_{amean} = 105 m/s, v_{cmean} = 24 m/s



Rys. 16.12. Przebiegi: prądów, napięć, prędkości i drogi kolumn trójfazowego zwarcia łukowego; szyny AP 40x5 mm, a = 80 mm, U_n = 400 V, Ψ_Z = 125º, $I_{k_e}^{"}$ = 9,75 kA, I_{a_e} = 8,03 kA, I_{b_e} = 9,97 kA, I_{c_e} = 6,68 kA, U_{a_e} = 182 V, U_{c_e} = 163 V, v_{a_emean} = 93 m/s, I_a = 6,84 kA, I_b = 9,08 kA, I_c = 5,78 kA, U_a = 184 V, U_c = 166 V, v_{amean} = 87 m/s, v_{cmean} = 23 m/s