

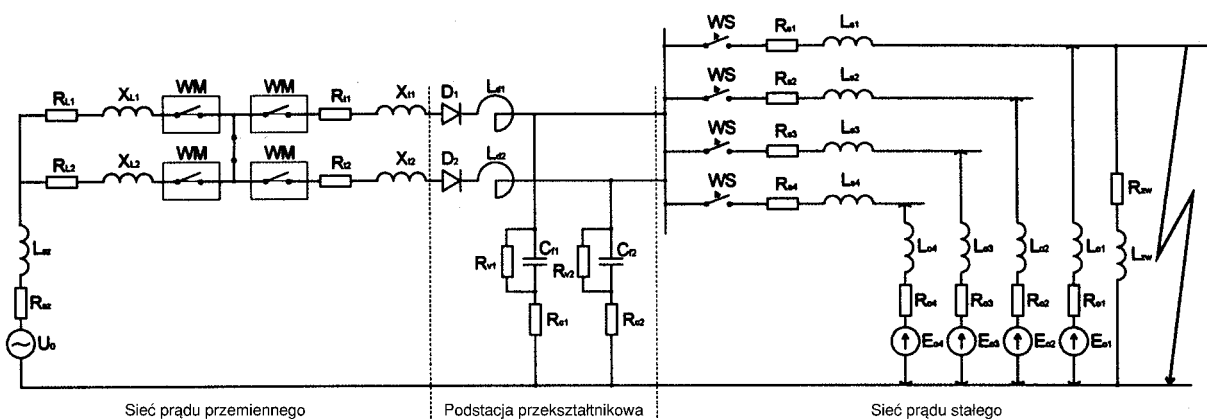
# Wyłączanie zwarć

## w systemie trakcji elektrycznej prądu stałego poprzez wyłączniki szybkie i wyłączniki mocy

*W układzie zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego można wyodrębnić trzy obwody charakteryzujące się specyficznymi warunkami pracy i parametrami elektrycznymi. Obwód pierwszy stanowi część zasilającego systemu elektroenergetycznego prądu przemiennego (źródła energii, sieci rozdzielcze, linie zasilające podstację trakcyjną). Obwód drugi obejmuje przekształtnikową podstację trakcyjną przetwarzającą energię prądu przemiennego na energię prądu stałego (transformator, prostownik, filtry wygładzające), obwód trzeci pełni natomiast rolę sieci rozdzielczej prądu stałego doprowadzającej energię prądu stałego do elektrycznych pojazdów trakcyjnych (rozdzielnia prądu stałego, sieć trakcyjna).*

Obwód główny układu zasilania, którego uproszczony schemat ideowy zamieszczono na rysunku 1, zawiera następujące elementy o parametrach istotnych w analizach stanów zwarciovych:

- $R_s, L_s, R_{L1}, R_{L2}, L_{L1}, L_{L2}$  – odpowiednio rezystancja i indukcyjność elementów systemu zasilającego (sieci elektroenergetycznej, linii zasilających podstację trakcyjną);
- $WM_L$  – liniowy wyłącznik mocy w podstacji trakcyjnej;



Rys. 1. Uproszczony schemat ideowy obwodu zasilania

- $WM_Z$  – wyłącznik mocy zespołu w podstacji trakcyjnej;
- $R_{I1}, R_{I2}, L_{I1}, L_{I2}$  – odpowiednio rezystancje i indukcyjności zespołów prostownikowych;
- $R_{S1}, R_{S2}, L_{S1}, L_{S2}$  – odpowiednio rezystancje i indukcyjności sieci trakcyjnej;
- $R_{ZW}, L_{ZW}$  – odpowiednio rezystancja i indukcyjność gałęzi zwarcia;
- $U_0$  – napięcie źródłowe systemu elektroenergetycznego;
- $WS$  – wyłącznik szybki;
- $C_f$  – pojemności filtra;
- $R_c, R_f$  – odpowiednio rezystor ograniczający i rozładowczy filtra.

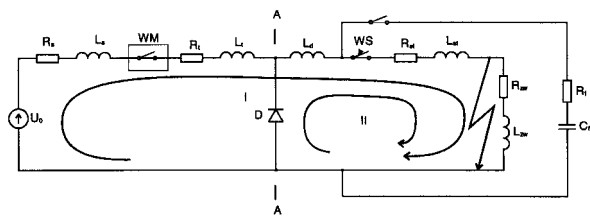
W obwodzie zasilaczy i sieci trakcyjnej typowym podstawowym zabezpieczeniem sterowanym przez autonomiczny (pierwotny) wyzwalacz prądowy jest spolaryzowany wyłącznik szybki prądu stałego ( $WS$ ). Efektywność wyłączania zwarć i trwałość wyłącznika szybkiego zależy od jego zdolności ograniczenia prądu zwarciovego. Na zdolność tę wpływa z kolei typ konstrukcji mechanicznej (czas własny) wyłącznika oraz skuteczność przerywania łuku elektrycznego (układ gaszenia łuku – cewka i komora). Dodatkowym elementem ograniczającym wartość przerywanego przez wyłącznik szybki prądu jest dławik urządzenia wygładzającego, zmniejszający stromość narastania prądu płynącego w obwodzie zwarciovym. Wpływ dławika na jakość przebiegu prądu zwarcia jest szczególnie istotny przy zwarciach bliskich, gdy indukcyjność pętli zwarcia stanowią wyłącznie reaktancje obwodu zasilającego i transformatorów prostownikowych o niewielkich wartościach (przeliczonych do poziomu napięcia wyprostowanego) w stosunku do indukcyjności sieci trakcyjnej.

W przypadku niezadziałania wyłącznika szybkiego przy zwarciu w sieci trakcyjnej lub wystąpienia zwarcia w obwodzie podstacji trakcyjnej (prostownika, szyn zbiorczych prądu stałego, czy w obwodzie filtra bez bezpiecznika), wyłączenia obwodu spod napięcia dokonuje jeden z właściwych dla układu zasilania wyłączników mocy ( $WM$ ) po stronie prądu przemiennego. Pobudzenie do otwarcia styków wyłącznika mocy jest inicjowane przez obwody wyzwalaczy pośrednich (bezwłoczne lub zwłoczne) albo z opóźnieniem przez układy zabezpieczeń (ziemnozwarciowe, podnapięcio-

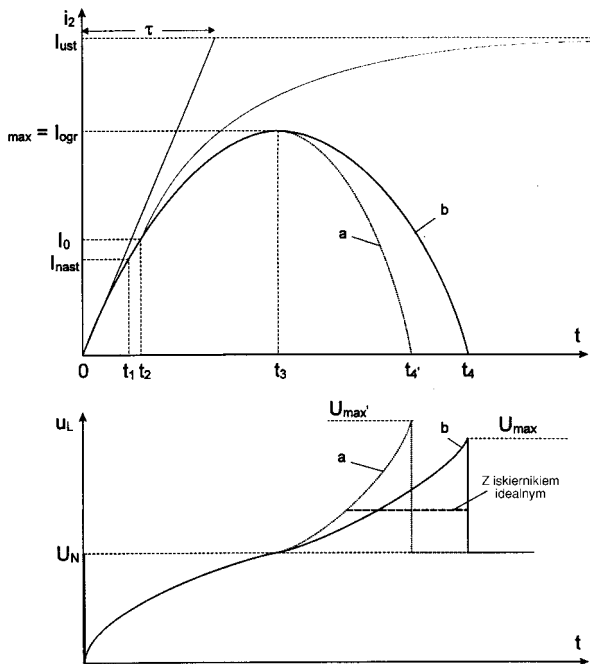
we). Należy zwrócić uwagę na różnicę w konfiguracji obwodu zwarcia wyłączanego przez wyłącznik szybki (WS) i wyłącznik mocy (WM). Schemat zastępczy obwodu zwarcia, uproszczony do parametrów przeliczonych na stronę prądu stałego, zamieszczono na rysunku 2. Przykładowe przebiegi wyłączenia prądu zwarcia wraz z przepięciami indukowanymi w indukcyjnościach obwodu pokazano odpowiednio na rysunku 3 – dla  $l = 0$  km i na rysunku 4 – dla  $l = l_i$  km sieci trakcyjnej w pętli zwarcia.

Rezystancja  $R_{zw}$  i indukcyjność obwodu zwarcia  $L_{zw}$  są wielkościami szcztawkowymi i wynikają z przekrojów i położenia przewodów w miejscu zwarcia. W opisie analitycznym przebiegów zwarciovych nie uwzględniono pojemności filtra  $C_f$ . Zagadnienia związane z wpływem filtra na przebiegi prądu zwarcia zostały omówione w pracy [10, 18]. Przykładowo dla filtra o konfiguracji Gamma (LC) przebiegi w obwodzie zilustrowano na rysunku 5. Występują tu drgania tłumione napięcia i prądu przy załączeniu na zwarcie, a przy spełnieniu poniższych warunków drgania odtłumione przy dużych wartościach przepięć na indukcyjności dławika  $L_d$ :

$$l - \frac{L}{i} \frac{di}{dt} > (R_s + R_t + R_{st} + R_{zw}) \quad (1)$$



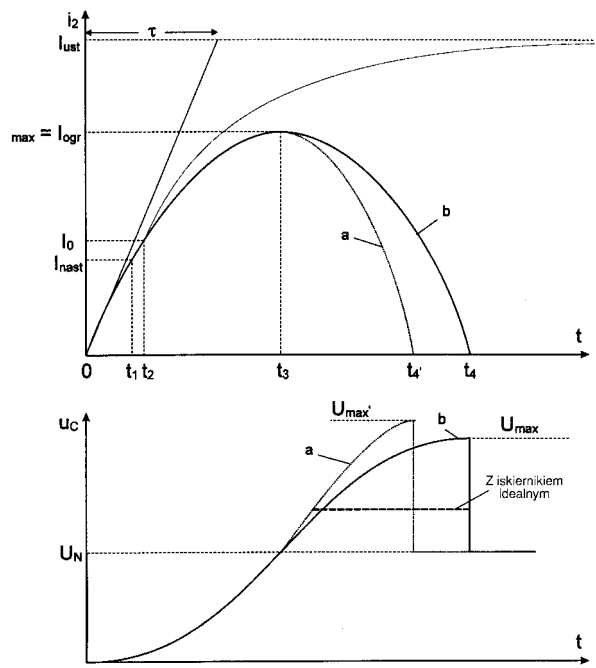
Rys. 2. Schemat zastępczy obwodu zwarcia



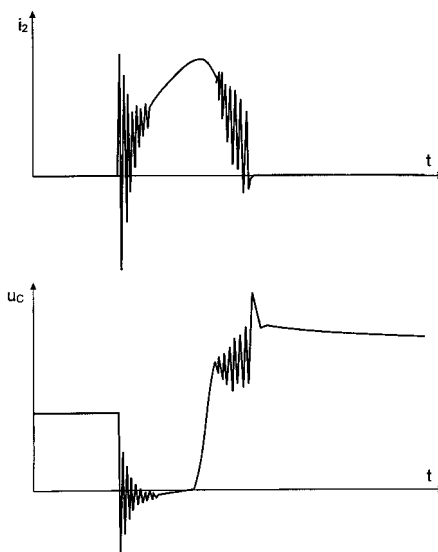
Rys. 3. Prąd zwarcia  $i_2$  oraz napięcie szyny „+”, gdy  $R_s > 0$  i  $C = 0$  (a – wyłącznik z krótszym czasem łukowym, b – wyłącznik z dłuższym czasem łukowym); zaznaczono wpływ iskiernika (ochronnika) napięciowego

Najczęściej spotykanym układem zasilania pojazdów trakcyjnych w sieci kolejowej 3 kV prądu stałego jest układ zasilania dwustronnego, gdy odcinek sieci trakcyjnej między podstacjami lub podstacją a kabiną sekcijną zasilany jest z obu stron. Zasilanie trakcji tramwajowej 600 V prądu stałego jest zazwyczaj jednostronne.

W przeprowadzanych analizach dotyczących zwarć często przyjmowano, że rezystancja w punkcie zwarcia  $R_z$  wynosi zero. Po uproszczeniach układu zasilania sieci można było rozdzielić obwód zasilania dwustronnego w punkcie zwarcia na dwa niezależne obwody o zasilaniu jednostronnym.



Rys. 4. Prąd zwarcia  $i_2$  oraz napięcie szyny „+”, gdy  $R_s = 0$  i  $C = 0$  (a – wyłącznik z krótszym czasem łukowym, b – wyłącznik z dłuższym czasem łukowym)



Rys. 5. Prąd zwarcia  $i_2$  i napięcie na kondensatorze  $U_c$  przy  $R_s = 0$ ,  $C = 0,8$  mF,  $L_s = 0,05$  mH, a komora WS traci właściwości izolacyjne w trakcie wyłączania zwarcia

W typowym układzie zasilania – zabezpieczeniem obwodu przed zwarciami jest wyłącznik szybki *WS*, reagujący na przekroczenie dopuszczalnej wartości prądu. Do wyznaczenia wartości nastawy wyłącznika szybkiego wystarcza znajomość minimalnej wartości prądu zwarcia oraz maksymalny prąd obciążenia, bowiem *WS* powinien wyłączać prądy zwarciove, a nie reagować na prądy obciążenia [8, 15]. Zwarcia mogą wystąpić w dowolnym punkcie obwodu, wywołując niepożądany przepływ prądu o znacznej wartości. Zwarcia o minimalnym prądzie ustalonym, występujące na końcu zasilanego odcinka, określane są jako zwarcia dalekie. Przy zasilaniu dwustronnym, w celu umożliwienia poboru prądu obciążenia większego od prądu zwarcia dalekiego, nastawy wyłączników są wyższe niż prąd minimalny występujący przy zwarciu blisko sąsiedniej podstacji. Jeżeli prąd ustalony zwarcia jest mniejszy od nastawy wyłącznika szybkiego, stosuje się uzależnienie wyłączników szybkich, powodujące synchroniczne wyłączenie wyłączników z obu stron odcinka, gdy przez co najmniej jeden wyłącznik popłynie prąd większy od nastawionej wartości. Dla układu dwóch uzależnionych wyłączników szybkich punkt zwarcia o prądzie minimalnym przyjmuje się w połowie odcinka między podstacjami. Uzależnienie wyłączenia odcinka sieci trakcyjnej zasilanej dwustronnie charakteryzuje się bezwłocznym zadziałaniem wyłącznika bliższego miejscu zwarcia i wyłączeniem zwłocznym przez układ uzależnienia o czasie trwania opóźnienia 200 ÷ 300 ms wyłącznika uzależnionego. Na ogół wyłącznik pierwszy wyłącza prąd zwarcia z ograniczeniem przed osiągnięciem wartości ustalonej, natomiast drugi wyłącza prąd zwarcia po ustaleniu przebiegu.

Obecność pojazdu trakcyjnego i pobierany przez niego prąd obciążenia zwiększa dodatkowo wartość prądu zasilacza trakcyjnego w początkowej fazie zwarcia. Indukcyjności występujące w obwodzie nie mają wpływu na ustaloną wartość prądu zwarcia. Mają one decydujący wpływ na stromość narastania prądu zwarcia. Do wyznaczenia wartości minimalnej prądu podczas zwarcia wystarczy znajomość zastępczej rezystancji podstacji, rezystancji zastępczej systemu energetycznego zasilającego podstację i rezystancji sieci trakcyjnej. Prąd w trakcie zwarcia rośnie od wartości początkowej według krzywej zbliżonej do wykładniczej do chwili zadziałania wyłącznika:

$$i(t) = I_p + \Delta I (1 - e^{-t/\tau}) \quad (2)$$

$I_p$  – wartość początkowa prądu,  
 $\Delta I$  – przyrost prądu podczas zwarcia,  
 $\tau$  – stała czasowa przebiegu.

Dalszy wzrost prądu do wartości maksymalnej ograniczonej jest spowalniany narastającą rezystancją łuku otwierającego się wyłącznika szybkiego *WS*. Wzrost tej rezystancji do nieskończoności kończy proces rozłączania obwodu.

### Zwarcie wyłączane przez wyłącznik szybki

Równanie napięć obwodu ze schematu zamieszczonego na rysunku 2 przy wyłączeniu zwarcia przez wyłącznik szybki odnosi się do oczka oznaczonego symbolem  $I$  i ma postać:

$$U_o - (R_s + R_t + R_{st} + R_{zw}) \cdot i - r(i) \cdot i + \left( \frac{x_s}{\omega} - \frac{x}{\omega} + L_d + L_{st} + L_{zw} \right) \frac{di}{dt} = 0 \quad (3)$$

$$R_{st} = l \cdot r_{st}$$

$$L_{st} = l \cdot l_{st} \quad 0 \leq l \leq L_{PT}$$

gdzie:

$r_l(l)$  – nieliniowa rezystancja łuku między stykami *WS* [ $\Omega$ ],

$l$  – odległość punktu zwarcia od podstacji [km],

$L_{PT}$  – odległość między podstacjami [km],

$r_{st}$  – jednostkowa rezystancja sieci trakcyjnej [ $\Omega/\text{km}$ ],

$l_{st}$  – jednostkowa indukcyjność sieci trakcyjnej [mH/km].

Wzajemny związek między sumaryczną indukcyjnością obwodu  $L$  a stromością narastania prądu zwarciovego  $di/dt$  w chwili  $t_{zw} = t_o$  (największa stromość narastania) ma postać:

$$L \frac{di}{dt} = U_o \quad (4)$$

natomiast wpływ na stromość narastania prądu wywiera tłumiące działanie rezystancji obwodu i stała czasowa:

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (5)$$

$$\frac{di}{dt_o} = \frac{I_{ust.zw}}{\tau}$$

Według oznaczeń przyjętych na rysunkach 3 i 4 – czas  $t_1$  jest czasem, w którym prąd osiąga wartość nastawioną na wyzwalaczu, czas  $t_2$  jest czasem rozpoczęcia otwierania styków, czas  $t_3$  czasem osiągnięcia przez przebieg prądu największej wartości ograniczonej, czas  $t_4$  czasem przerwania prądu zwarcia ( $R_l \approx \infty$ ), czas  $t_o$  zaś jest czasem rozpoczęcia przepływu prądu zwarcia.

Rezystancja zastępcza  $R_l$  łuku elektrycznego między stykami wyłącznika szybkiego przyjmuje wartości:

$$R_l = 0, \quad 0 \leq t \leq t_2 \quad t_2 - t_1 = t_{wr}$$

$$R_l = f(i), \quad t_2 \leq t \leq t_3 \quad t_3 = t(l_{ogr}) \quad (6)$$

$$R_l = \infty, \quad t_3 \leq t \leq t_4 \quad t_4 = t_{zw}$$

gdzie:

$f(i)$  – funkcja określająca zależność rezystancji łuku od prądu, np. według wzoru Ayrtona [19],

$t_{wr}$  – czas własny wyłącznika szybkiego,

$t(l_{ogr})$  – czas osiągnięcia przez prąd maksymalnej wartości ograniczonej,

$t_{zw}$  – czas trwania zwarcia.

Na rysunku 6 podano przykładowe przebiegi prądów i napięć zarejestrowane w trakcie badań w podstacji trakcyjnej w obwodzie ze zwarcieciem za dławikiem filtra zasilanym z prostownika 12-pulsowego i wyłączanym przez *WS*. Symbole na rysunku 6 oznaczają:

*UD2* – napięcie za dławikiem,

UD1 – napięcie na zaciskach prostownika,  
 IB4 – prąd zwarcia (zwarcie za WS),  
 IB3 – prąd w jednej z faz uzwojenia wtórnego transformatora,  
 IB2 – prąd w jednej z faz uzwojenia pierwotnego transformatora.

Po upływie czasu zwarcia (wygaszenie łuku między stykami WS) wszystkie elementy obwodu głównego znajdują się w stanie bezprądowym, z wyjątkiem pojemności  $C_f$  filtru, w której nagromadzona energia jest wytracana na rezystorach rozładowniczych.

### Zwarcie w obwodzie prądu stałego wyłączane przez wyłącznik mocy

Zwarcie po stronie prądu stałego na zaciskach prostownika lub za dławikiem filtru charakteryzuje się małą rezystancją, kątem przewodzenia zaworów wydłużonym do około  $180^\circ$ el. i komutacją złożoną prostownika, w którym (prostownik 6-pulsowy) przewodzą równolegle po dwie diody jednocześnie w każdej z grup komutacyjnych. Zwarcie w takim obwodzie jest poza obszarem działania wyłącznika szybkiego WS i może być wyłączone tylko przez wyłącznik mocy WM.

Rezystancja zwarcia po stronie prądu stałego, o wartości  $R_{zw} \approx 0$ , odpowiada w obwodzie trójfazowej sieci zasilającej zwarcie symetrycznemu. Przy zwartych zaciskach wyjściowych prostownika, prądy fazowe sieci zasilającej mają przebiegi sinusoidalne opóźnione o kąt  $90^\circ$ el. względem odpowiednich napięć (przy bardzo małych rezystancjach obwodu zwarciegowego). Chwilowe wartości napięcia stałego, odniesionego do okresów pracy poszczególnych anod przy pominięciu rezystancji obwodu zasilającego wynoszą:

$$\begin{aligned} u_{d1} &= U_2 \sqrt{2} \cos \omega t - \frac{X}{\omega} \frac{d i_1}{dt} \\ u_{d2} &= U_2 \sqrt{2} \cos \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right) - \frac{X}{\omega} \frac{d i_2}{dt} \\ u_{d3} &= U_2 \sqrt{2} \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) - \frac{X}{\omega} \frac{d i_3}{dt} \end{aligned} \quad (7)$$

W stanie zwarcia prąd przewodzenia zaworów prostownika wydłuża się (do ok.  $180^\circ$ el.), a wielkości wchodzące do (7) wiązane są zależnościami:

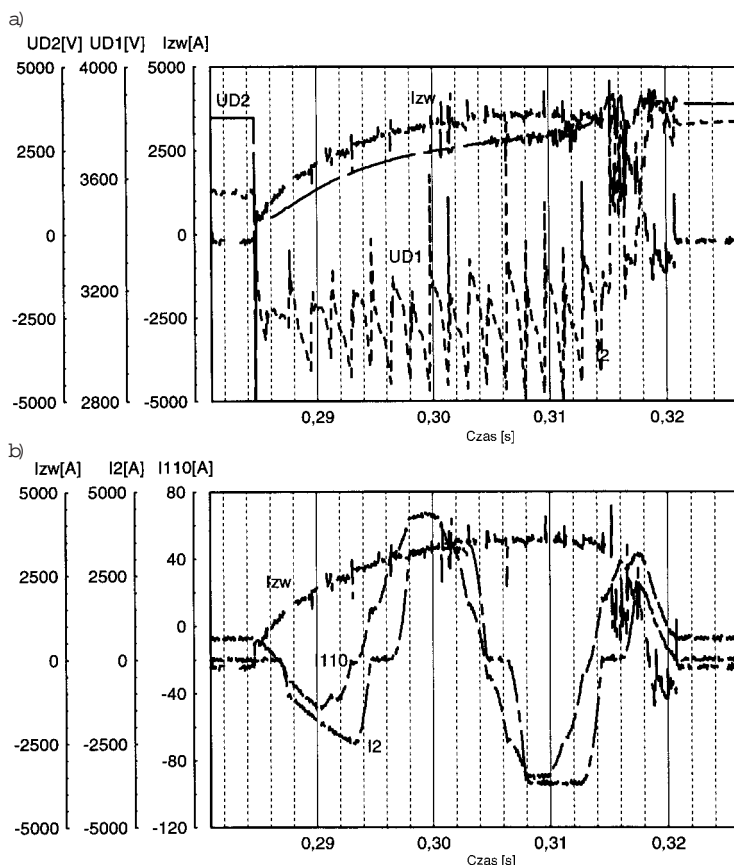
$$\begin{aligned} i_1 + i_2 + i_3 &= I_d = \text{const} \\ \frac{d I_d}{dt} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$u_d = 0; \quad R_s L_s = 0; \quad R_{zw} L_{zw} = 0$$

lub dla prądu wyprostowanego narastającego w początkowym stanie zwarcia:

$$u_d = -L_d \frac{d i_d}{dt} \quad (9)$$

$$R_s L_s \neq 0; \quad R_{zw} L_{zw} \cong 0$$



Rys. 6. Przebiegi prądów i napięć przy zwarciu wyłączanym przez WS  
 I110 – prąd fazy uzwojenia pierwotnego transformatora, I2 – prąd strony wtórnej transformatora,  $I_{zw}$  – prąd zwarcia, UD1 – napięcie wyjściowe z prostownika, UD2 – napięcie za filtrem prostownika

Chwilowe wartości napięcia stałego wyprostowanego wynoszą dla zwarcia przed dławikiem:

$$u_d = u_i - \frac{X}{\omega} \frac{d i}{dt} = 0 \quad (10)$$

i za dławikiem odpowiednio:

$$u_d = u_i - \frac{x}{\omega} \frac{d i}{dt} = L \frac{d i}{dt} \quad (11)$$

gdzie:

$$u_i = \frac{U_2 \sqrt{2}}{2} \sin(\omega t + \psi_i) \quad (12)$$

jest sumą  $i$ -tych napięć komutujących faz transformatora.

Na rysunku 7 zamieszczono przebiegi prądów zwarcia po stronie prądu stałego z dławikiem (linia ciągła) i bez dławika (linia przerywana). Maksymalna wartość prądu zwarcia wynosi:

$$I_{zmx} = K_p I_{zw} \frac{\pi}{3} \quad (13)$$

$$K_p = \left( 1 + e^{-\frac{R_{rot}}{x}} \right) \quad (14)$$

$$I_{z\text{ust}} \cong \frac{\sqrt{2}U}{X} \quad (15)$$

Prąd zwarcia w obwodzie wyłączany przez WM trójfazowej sieci zasilającej osiąga wartość maksymalną ograniczoną lub ustaloną (zależnie od czasu reakcji WM) i płynie w oczku I (schemat zastępczy na rysunku 2) do chwili wygaszenia łuku w wyłączniku mocy WM. Od chwili, w której pochodna prądu przyjmuje wartość ujemną pojawia się w II oczku (schemat obwodu z rysunku 2) składowa prądu generowana przez napięcie na indukcyjnościach obwodu podtrzymujących przepływ prądu. Na rysunku 8 zamieszczono przebiegi wyłączania prądu zwarcia (punkt zwarcia znajduje się za dławikiem) przez wyłącznik mocy WM (wyłącznik szybki WS jest w stanie załączenia) dla rzeczywistego obwodu zasilanego przez prostownik 12-pulsowy. Zarejestrowane przebiegi oznaczono symbolami:

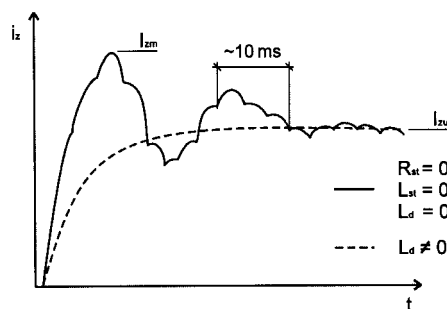
IB4 – prąd zwarcia za prostownikiem,

IB3 – prąd zwarcia w jednej z faz uzwojenia wtórnego transformatora prostownikowego,

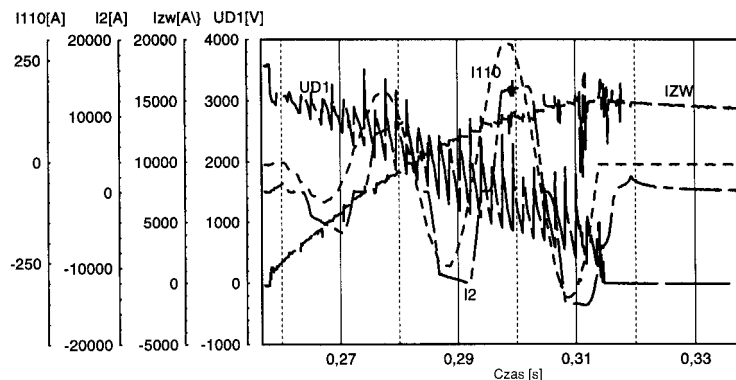
IB2 – prąd zwarcia w jednej z faz uzwojenia pierwotnego transformatora prostownikowego,

UD1 – napięcie na zaciskach prostownika,

UD2 – napięcie za dławikiem (napięcie baterii kondensatorów).



Rys. 7. Przebieg prądu zwarcia na wyjściu prostownika przy zwarcu przed i za dławikiem



Rys. 8. Przebiegi prądów i napięć przy zwarcu wyłączanym przez WM  
I110 - prąd fazy uzwojenia pierwotnego transformatora, I2 - prąd strony wtórnej transformatora, Izw - prąd zwarcia, UD1 - napięcie wyjściowe z prostownika

Jeżeli obwód zwarcia z rysunku 1 uprościć do postaci schematu zastępczego z rysunku 2, to odpowiednie prądy i napięcia opisywane są wzorami:

a) zwarcie na zaciskach prostownika:

oczko I:

$$U_o - (R_s + R_t + R_{zw})i - r_l(i)i - \left( \frac{X_s}{\omega} + \frac{X_t}{\omega} \right) \frac{di}{dt} = 0 \quad (16)$$

$$t_o < t \leq t_{zw}$$

oczko II:

$$R_{zw}i - L \frac{di}{dt} = 0 \quad (17)$$

$$t(l_{ogr}) < t \leq t_{\infty}$$

b) zwarcie na zaciskach wyjściowych dławika:

oczko I

$$U_o - (R_s + R_t + R_{zw})i - r_l(i)i - \left( \frac{X_s}{\omega} + \frac{X_t}{\omega} + L_d \right) \frac{di}{dt} = 0 \quad (18)$$

$$t_o < t \leq t_{zw}$$

oczko II:

$$R_{zw}i - L_d \frac{di}{dt} = 0 \quad (19)$$

$$t(l_{ogr}) < t \leq t_{\infty}$$

gdzie:

$t_{zw}$  – czas zgaszenia łuku (przerwania obwodu oczka I) przez WM.

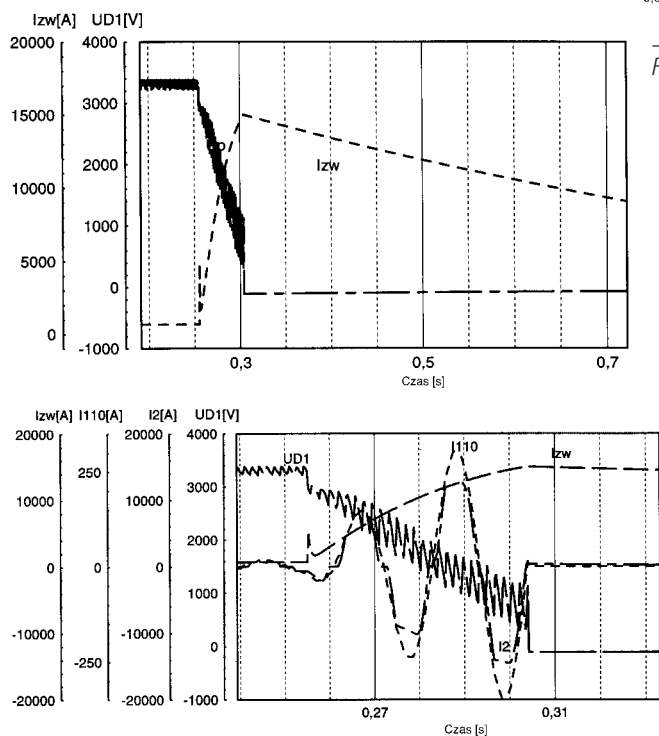
Prąd zwarcia płynący w obwodzie II oczka po wyłączeniu zasilania przez wyłącznik mocy w czasie  $t_{zw}$  jest prądem następczym. Jego wartość początkowa jest zbliżona do wartości prądu ograniczonego zwarcia – jeżeli czas zadziałania wyłącznika mocy WM jest porównywalny z czasem wyłącznika szybkiego WS – lub zbliżony do wartości ustalonej prądu zwarcia, jeżeli czas zadziałania WM jest większy niż wartość trzech stałych czasowych obwodu zwarcia. Prąd ten podtrzymywany jest przez energię zmagazynowaną w elementach indukcyjnych i pojemnościowych obwodu oczka II, a tłumiony na elementach rezystancyjnych. Przebieg prądu następczego jest przebiegiem wykładniczym zanikającym, a czas przepływu prądu waha się w granicach od dziesiątych części sekundy do kilku sekund w zależności od parametrów RLC obwodu. Na rysunkach 9 i 10 zamieszczono przebiegi prądów następczych w obwodzie zwarciowym uzyskane z symulacji (rys. 9) i w trakcie pomiarów [10] w podstacji trakcyjnej (rys. 10). Obwód, dla którego wykonano rejestracje, zasilany był z prostownika 12-pulsowego z filtrem typu Gamma o parametrach  $L_d = 6,3$  mH,  $C_f = 0,8$  mF, indukcyjnością szczytkową  $L_{zw} = 50$   $\mu$ H i rezystancją  $R_{zw} \approx 0$   $\Omega$ .

Na rysunku 11 zamieszczono przebieg zarejestrowanego prądu zwarcia w obwodzie podstacji trakcyjnej ze wzbudzeniem oscylacji tłumionych w obwodzie: pojemność filtra – indukcyjność szczytkowa pętli zwarcia. Jest to przebieg

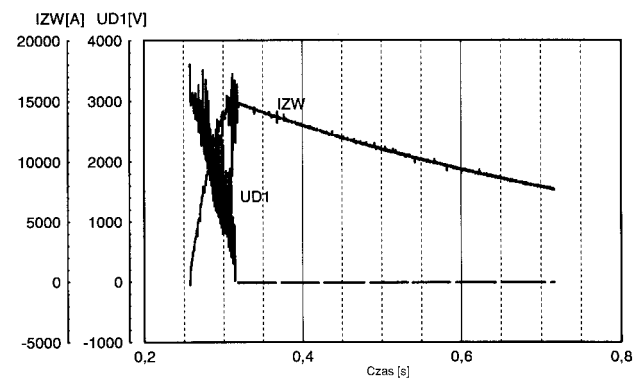
oscylacyjnego przeładowania kondensatora po załączeniu prostownika z filtrem Gamma przez WS na obwód o rezystancji bliskiej zeru i niewielkiej indukcyjności.

Na rysunku 12 zamieszczono przebiegi dla obwodu z dołączonym w szereg z kondensatorem rezystorem  $R_f$  o wartości  $0,2 \Omega$ . Oscylacje są w tym przypadku silnie tłumione.

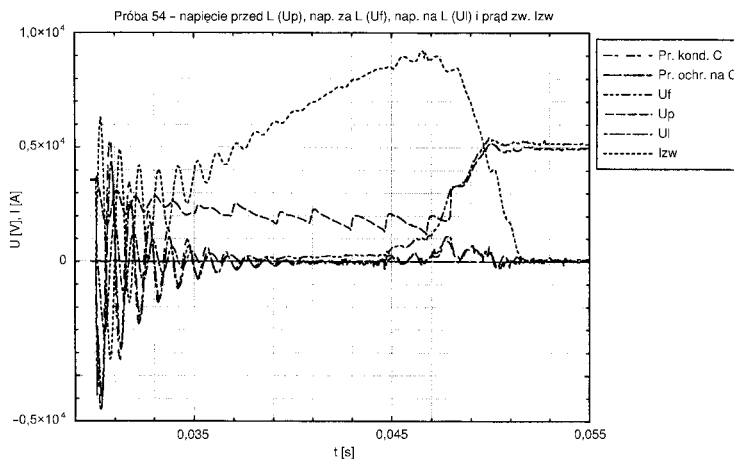
Na rysunku 13 zilustrowano przypadek rzeczywistego zwarcia wyłączanego przez wyłącznik szybki WS ze wzbudzeniem oscylacji tłumionych w obwodzie: kondensator filtru – indukcyjność szczytkowa pętli zwarcia w czasie  $t_o - t(l_{ogr})$  oraz oscylacji odtłumionych w obwodzie zwarcia w czasie  $t(l_{ogr}) - t_{zw}$  przy przejściowej utracie własności izolacyjnych komory WS.



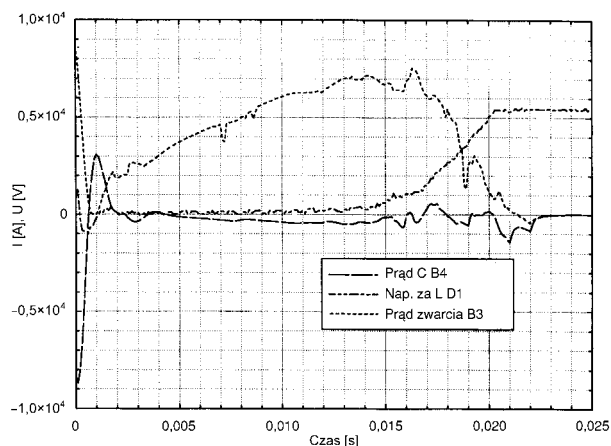
Rys. 9. Przebieg prądu zwarcia i prądu następczego  $I_{zw}$  oraz napięcia prostownika UD1 przy zwarcu bliskim wyłączanym przez WM (symulacja komputerowa) – rysunek dolny przedstawia przebieg prądu jednej fazy uzwojenia pierwotnego I110 i fazy wtórnej I2 transformatora prostownikowego



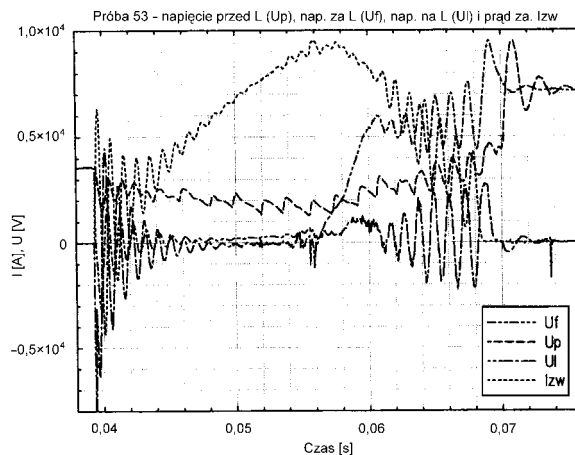
Rys. 10. Przebieg prądu zwarcia i prądu następczego  $I_{zw}$  oraz napięcia na wyjściu prostownika UD1 (wyniki z pomiarów w podstacji trakcyjnej) przy zwarcu wyłączanym przez WM



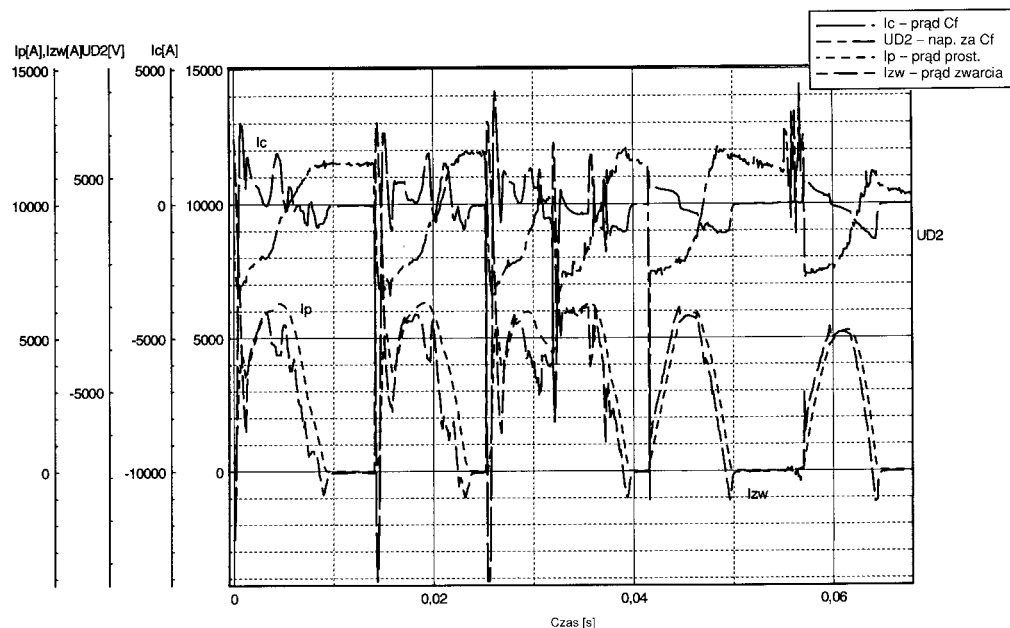
Rys. 11. Przebiegi prądów i napięć w obwodzie zwarcia  $R_{zw} = 0$ ,  $C_f = 0,8 \text{ mF}$ ,  $L_{zw} = 0,05 \text{ mH}$ ,  $L_d = 6,3 \text{ mH}$ ,  $R_f = 0$



Rys. 12. Przebiegi prądów i napięć w obwodzie zwarcia  $R_{zw} = 0,2 \Omega$ ,  $C_f = 0,8 \text{ mF}$ ,  $L_{zw} = 0,05 \text{ mH}$ ,  $L_d = 6,3 \text{ mH}$ ,  $R_f = 0 \Omega$  (wyniki pomiarów, na dławiku zastosowano zwiernik tyrystorowy)



Rys. 13. Przebiegi prądów i napięć w obwodzie zwarcia  $R_{zw} = 0$ ,  $C_f = 0,8 \text{ mF}$ ,  $L_{zw} = 0,05 \text{ mH}$ ,  $L_d = 6,3 \text{ mH}$ ,  $R_f = 0$ , z przejściową utratą właściwości izolacyjnych komory wyłącznika szybkiego (wyniki pomiarów laboratoryjnych)



Rys. 14. Przykład zwarcia bliskiego za WS z wielokrotnym przebicciem przez komorę WS ( $R_{zw} = 0$ ,  $C_f = 0,8$  mF,  $L_{zw} = 0,05$  mH,  $L_d = 6$  mH,  $R_c = 0$ )  $I_c$  - prąd kondensatora,  $I_{zw}$  - prąd zwarcia,  $I_p$  - prąd prostownika 6-pulsowego,  $U_{D2}$  - napięcie na kondensatorze  $C_f$  - przy wielokrotnym przebicciu przez komorę

### Podsumowanie

Podstawowym zabezpieczeniem przeciwzwarciowym w obwodzie zasilania sieci trakcyjnej jest wyłącznik szybki. Liczba jego zadziałań zależy nie tylko od liczby zwarć w obwodzie sieci trakcyjnej, lecz także od marginesu między wartością minimalnego (dalekiego) prądu zwarcia a maksymalnymi prądami obciążenia. Szczególnie trudne do wyłączenia i znaczące dla trwałości wyłączników szybkich są zwarcia bliskie o niskiej wartości rezystancji i indukcyjności pętli zwarcia. W takich przypadkach o ograniczeniu wartości prądu wyłączalnego decydują parametry WS i dławika zespołu. Obszar skuteczności działania WS jest ograniczony do obwodu zasilacza i sieci trakcyjnej, gdzie następuje wyłączenie bezzwłoczne przez wyzwalacz nadprądowy bezpośredni lub w oparciu o inne kryteria (jak stromość narastania prądu, charakterystykę czasowo-prądową).

W przypadku zwarcia w zespole prostownikowym, w obwodzie szyn zbiorczych prądu stałego lub przemiennego zabezpieczeniem jest wyłącznik mocy (zespołu prostownikowego lub linii zasilającej) wyzwalany przez wyzwalacze wtórne bezzwłoczne nadmiarowe lub sterowane poprzez układ ochrony podnapięciowej lub ziemnozwarciowej, albo też wyzwalacze zwłoczne (wyłączanie przeciążeń). Układ ochrony podnapięciowej oddziałuje także na wyłączniki szybkie, które przy zwarcu na szynach zbiorczych lub wyjściu z prostownika odcinają zasilanie zwarcia poprzez sieć trakcyjną z sąsiednich podstacji trakcyjnych. Wymuszenie wyłączenia przez ochronę podnapięciową jest w takim przypadku konieczne, ponieważ wyłączniki szybkie są spolaryzowane na kierunek przepływu prądu do sieci trakcyjnej.

Wyłącznik mocy WM, poza podstawowym zadaniem, jakim jest wyłączenie zwarć w obwodzie prostowników i szyn zbiorczych, jest dla zwarć bliskich w sieci trakcyjnej zabez-

pieczeniem rezerwowym wyłącznika szybkiego WS w przypadku jego niezadziałania lub awarii. Czas zadziałania WM w stosunku do czasu zadziałania WS jest znacznie większy i na ogół WM rozwiera obwód zwarcia w stanie ustalonym.

Warunki przerywania łuku elektrycznego w obwodzie prądu stałego o dużej wartości w stosunku do odpowiedniej wartości prądu przemiennego płynącego w obwodzie WM są znacznie trudniejsze. Dlatego też dla wyłącznika szybkiego prądu stałego wymagania konstrukcyjne i eksploatacyjne są stosunkowo ostre w porównaniu z wyłącznikiem mocy podstacji trakcyjnej i zespołów. Skutkiem wysokich napięć powrotnych może być występowanie w przestrzeni roboczej wyłącznika szybkiego zapłonów wtór-

nych przez komorę, co z kolei będzie przyczyną powstawania kolejnych przebiegów łączeniowych. Warunki do powstawania zapłonów wtórnych są szczególnie sprzyjające przy wyłączeniu zwarć bliskich, a ich końcowym efektem może być wyłączenie obwodu przez wyłącznik mocy. Zjawiska te są trudne do zaobserwowania i zarejestrowania w warunkach eksploatacyjnych, ale bywały odnotowywane (rys. 14) [10, 14] i stanowią zagrożenie dla trwałości wyłącznika szybkiego. Ich występowanie nie jest częste, a jego skutkiem może być trwałe uszkodzenie wyłącznika szybkiego, pociągające za sobą uszkodzenie innych elementów obwodu (rezystorów ograniczających, pojemności filtrów itp.). Z tego względu przy projektowaniu filtra wygładzającego do zespołu prostownikowego podstacji należy uwzględnić warunki wyłączenia zwarć tak, aby nieprawidłowe zadziałania wyłącznika szybkiego nie powodowały lawinowych uszkodzeń innych elementów obwodu [2, 14÷18].

□

Autorzy

Tadeusz Maciołek

Leszek Mierzejewski

Adam Szela

Zakład Trakcji Elektrycznej

Instytut Maszyn Elektrycznych, Politechnika Warszawska

### Literatura

- [1] Cholewicki T.: *Metody obliczeń obwodów elektrycznych*. PWT, Warszawa, 1959.
- [2] Dzikowski J.: *Zasilanie trakcji elektrycznej*. Pł., 1960.
- [3] Jakszuk H., Kaczmarek Cz.: *Filtr do zespołu przekształtnikowego z jednostopniową transformacją napięcia 110/3,3 kV do kontenerowej podstacji trakcyjnej PKP*. Technika Transportu Szynowego 1-2/2000.

- [4] Królikowski Cz.: *Technika łączenia obwodów elektroenergetycznych*. PWN, Warszawa-Poznań 1975.
- [5] Maciołek T., Mierzejewski L., Szela A.: *Zwarcie w sieci trakcyjnej prądu stałego wyłączane po stronie prądu przemiennego*. IX Ogólnopolska Konferencja Naukowa z zakresu Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2000, Zakopane, 28–20 IX 2000.
- [6] Maksymiuk J.: *Aparaty elektryczne*. Warszawa, WNT, 1992.
- [7] Mierzejewski L., Szela A.: *Analysis of effectiveness of filters for DC traction system with rolling stock equipped with power electronic converters and asymmetry of the power utility system supply lines*. XIV Symposium on Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits. Politechnika Poznańska, Maj 1996.
- [8] Mierzejewski L., Szela A., Gałuszewski M.: *System zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego*. WPW 1989.
- [9] Mierzejewski L., Szela A.: *Filtry wygładzające w podstacjach kolejowych prądu stałego 3 kV*. Technika Transportu Szynowego 1-2/2000.
- [10] Mierzejewski L., Szela A. i inni: *Sprawozdania z pomiarów filtru typu Gamma dla podstacji trakcyjnej z transformacją jednostopniową w laboratorium CNTK w Mińsku Maz.* Zakład Trakcji Elektrycznej IME PW i CNTK na rzecz CIEN PKP, październik 1998.
- [11] Mierzejewski L., Szela A.: *Zastosowanie technik komputerowych we wdrażaniu transformacji jednostopniowej napięcia 110/3kV w podstacjach trakcyjnych PKP – od koncepcji do uruchomienia*. II Konferencja Elektroenergetyczna, Gdańsk, 9–10 IX 1999.
- [12] Mierzejewski L., Szela A.: *Badania zwarć i przepięć w obwodach trakcji elektrycznej prądu stałego z transformacją jednostopniową napięcia 110/3 kV*. Fourth Int. Conference „Modern Electric Traction”, MET'99, Warsaw, 23–25 IX 1999.
- [13] Mierzejewski L., Szela A.: *Ground transportation systems*. (w): The Encyclopedia of Electrical and Electronic Engineering, Supplement 1.; John Wiley & Sons, NY, USA, 2000, pp. 169–194
- [14] Nasiłowski J.: *Wyłączniki szybkie*. WNT, 1960.
- [15] Wdowiak J., Mierzejewski L., Szela A.: *Projektowanie systemu zasilania trakcji elektrycznej. Podstacje trakcyjne*. Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa, 1993.
- [16] Zgłoszenie patentowe nr P 327022: *Filtr aperiodyczny i sposób wyznaczania parametrów filtra prostowników trakcji elektrycznej*. 1998.
- [17] Opracowanie koncepcji dokumentacji na filtr Gamma dla podstacji trakcyjnej PKP-Huta Zawadzka z jednostopniową transformacją napięcia 110 kV (nie publikowane) Elester PKP i APENA, 1998.
- [18] Opracowanie koncepcji i dokumentacji filtru typu Gamma dla 12-pulsowego zespołu prostownikowego z jednostopniową transformacją napięcia 110/3 kV w kontenerowej podstacji trakcyjnej PKP Barłogi (nie publikowane). Adtranz, 1999.
- [19] Figurzyński Z., Frydryszak A.: *Prostowniki w elektroenergetyce*. WNT, 1964.

## Targi, konferencje, sympozja w 2001 r.

### Czwiat

**20–25.05.2001**

54<sup>th</sup> UITP Congress and Exhibition  
Londyn  
fax +32 2 660 1072

**12–14.06.2001**

Rail 2001 Congress  
Strasburg  
fax +22 1 4705 5249

**13–15.06.2001**

Czech Railways 2001 Exhibition and Congress  
Ostrawa  
e-mail: railway@centrum.cz

**19–21.09.2001**

Infrarail 2001 Exhibition  
Londyn  
e-mail: mbe.infrarail@dial.pipex.com

**2-4.10.2001**

Nordic Rail Conference & Exhibition  
Jonkoping, Szwecja  
e-mail: nordicrail@elmia.se

### Polska

**17–18.05.2001**

Kolej na Kolej - wystawa  
Zduńska Wola Karsznice  
tel./fax 0-43 347-79-26

**23.05.2001**

Logistyka w transporcie szynowym  
Wroc<sup>3</sup>aw  
Tel./fax (0-71) 347 79 26

**24.05.2001**

Technika kolejowa w systemach logistycznych  
Wroc<sup>3</sup>aw  
Tel./fax (0-71) 347 79 26

**31.05–2.06.2001**

V Międzynarodowa Konferencja MET  
Gdańsk  
e-mail: met@ely.pg.gda.pl

**1–3.09.2001**

VI Wystawa Komunikacji Miejskiej  
Łódź  
e-mail: info@mtl.lodz.pl

**17–19.10.2001**

TRAKO 2001 Międzynarodowe Targi Kolejowe  
Gdańsk  
e-mail: dorota.daszowska@mtgsa.com.pl

Informacje o swojej imprezie prześlij  
e-mail: [tts@emipress.com.pl](mailto:tts@emipress.com.pl)





## Rozpoczęły się przygotowania do targów TRAKO 2001

Czwarta już edycja Międzynarodowych Targów Kolejowych TRAKO 2001 odbędzie w tym roku w dniach 17–19 października w Gdańsku. W połowie ub. roku doszło do połączenia dwóch, niezależnych dotąd, organizatorów imprez targowych w Trójmieście: WTC Gdynia Expo – organizatora dotychczasowych edycji targów TRAKO oraz Międzynarodowych Targów Gdańskich SA. Imprezy targowe – organizowane dotychczas w Gdyni – zostały przeniesione do Gdańska, także pracownicy WTC Gdynia Expo zostali przeniesieni do Gdańska.

Tereny wystawiennicze Międzynarodowych Targów Gdańskich SA. mają powierzchnię znacznie większą niż w Gdyni. Warunki ekspozycji dla wystawców, które w Gdyni można uznać było za bardzo dobre, w Gdańsku są jeszcze dogodniejsze. Tereny targowe znajdują się w odległości około 300 m od dworca Gdańsk Oliwa. Przed rozpoczęciem targów zostanie ukończona budowa bocznic kolejowej, na której będą prezentowane pojazdy szynowe.

Targi TRAKO, odbywające się w cyklu dwuletnim, wpisały się na stałe w kalendarz imprez wystawienniczych, także na forum międzynarodowym. Wstępne zgłoszenia (termin ostatecznych zgłoszeń upływa 15 września 2001 r.) wskazują, że liczba wystawców przekroczy 100.

Patronaty Honorowe nad targami objęli: Minister Transportu i Gospodarki Morskiej, Główny Inspektor Kolejnictwa, Prezes Zarządu Polskich Kolei Państwowych, Przewodniczący Organizacji Współpracy Kolei OSZD, Prezes Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji i Prezes Zarządu Głównego Stowarzyszenia Elektryków Polskich

### Na targach zaprezentowane zostaną:

- oferty sektorów PKP
- firmy współpracujące z koleją (wszystkie sektory)
- oferty spedycji kolejowej
- oferty dla przemysłowych bocznic kolejowych
- tabor pasażerski i towarowy
- firmy oferujące produkty i usługi dla kolejnictwa

### Przewidziano wiele imprez towarzyszących:

- Sympozjum TRAKO 2001 „Kolej transport przyjazny”, z trzema sesjami:
  - plenarną,
  - automatyka i nowe technologie,
  - tabor – bezpieczeństwo przewozów
- Świat Małej Kolei:
  - Mistrzostwa Polski w modelarstwie kolejowym
  - Wystawa modeli i dioram
  - Wystawa fotografii kolejowych
  - Prezentacja oferty firm modelarskich
  - Spotkania modelarzy i miłośników kolei
- Prezentacje firm

### Podobnie jak w latach ubiegłych w czasie targów zostaną przeprowadzone konkursy:

- im. inż. Ernesta Malinowskiego na najciekawszy wyrób i innowację techniczną stosowaną w kolejnictwie; nagrodą jest statuetka autorstwa prof. Gustawa Zemły, będąca repliką pomnika inż. Ernesta Malinowskiego w Peru;
- na najciekawszą prezentację i ekspozycję firmy, oraz przyznana zostanie
- nagroda specjalna im. prof. Czesław Jaworskiego za wybitne osiągnięcia w technologii i produkcji urządzeń na potrzeby trakcji elektrycznej; medal funduje Kapituła Nagrody, reprezentowana przez Zarząd Krajowy Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji.