

Dr inż. Artur Rojek,  
Mgr inż. Andrzej Zbieć  
Instytut Kolejnictwa

# KOORDYNACJA ZABEZPIECZEŃ ZWARCIOWYCH W UKŁADZIE POJAZD TRAKCYJNY – PODSTACJA TRAKCYJNA

## SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie
2. Unormowania w zakresie koordynacji zabezpieczeń w systemie 3 kV DC
3. Podział wyłączników szybkich prądu stałego
4. Wyłączanie prądu stałego
5. Warunki uzyskania selektywności wyłączeń
6. Przebieg i wyniki badań
7. Podsumowanie i wnioski

## STRESZCZENIE

*Koordinacja zabezpieczeń zwarciovych jest jednym z elementów oceny interoperacyjności podsystemu „Energia”. Właściwa koordynacja wyłączników szybkich zainstalowanych w pojeździe trakcyjnym i obiekcie zasilania pozwala na wyłączenie prądu zwarciovego w pojeździe, bez wyłączenia zasilania na odcinku linii kolejowej. Zagadnienia koordynacji zabezpieczeń zwarciovych przeanalizowano teoretycznie oraz przeprowadzono badania laboratoryjne. Na podstawie wyników analiz określono warunki, w których jest możliwe selektywne wyłączenie zwarć. Określono parametry obwodu zwarciovego pozwalające na uzyskanie koordynacji zabezpieczeń oraz typy wyłączników szybkich i ich nastawy, które współpracując w jednym obwodzie pozwalają na selektywne wyłączenie zwarć w układzie pojazd trakcyjny – podstacja trakcyjna.*

## 1. WPROWADZENIE

Wszystkie systemy i układy elektryczne powinny być wyposażone w układy minimalizujące skutki zwarć i przeciążeń oraz odłączające części układów, w których występują

te zjawiska od źródeł zasilania. Cały system elektroenergetyczny, począwszy od generatora w elektrowni do najmniejszych urządzeń odbiorczych, ma strukturę drzewa. Każda gałąź „drzewa energetycznego” powinna być wyposażona w zabezpieczenia. Selektywność tych zabezpieczeń występuje wówczas, gdy prąd zwarciovowy lub przeciążeniowy jest wyłączany jak najbliżej miejsca powstawania zwarcia lub w przypadku niezadziałania najbliższego zabezpieczenia, wyłączenie następuje na kolejnym stopniu, nie dopuszczając do dalszych wyłączeń przez zabezpieczenia na „grubszych gałęziach”. W przypadku systemu zasilania trakcji elektrycznej można wyróżnić następujące poziomy zabezpieczeń:

- 1) zabezpieczenia urządzeń pokładowych – bezpieczniki topikowe,
- 2) zabezpieczenie pojazdu – taborowy wyłącznik szybki,
- 3) zabezpieczenie sieci trakcyjnej – podstacyjny wyłącznik szybki,
- 4) zabezpieczenie zespołu prostownikowego i rozdzielni 3 kV DC – wyłącznik mocy zespołu,
- 5) zabezpieczenie rozdzielni SN lub WN – wyłącznik liniowy w PT,
- 6) zabezpieczenie linii zasilającej – wyłącznik liniowy w GPZ.

Istnieją jeszcze dalsze poziomy lecz nie są one bezpośrednio związane z zasilaniem trakcji elektrycznej. Kolejność działania wymienionych poziomów zabezpieczeń, powinna być zgodna z wymienioną kolejnością poziomów zabezpieczeń. Koordynacja zabezpieczeń poziomów od 3 do 6 jest opanowana i nie stwarza wielkich problemów. Podobnie jest z koordynacją zabezpieczeń poziomów 1 i 2. Największą trudność stanowi koordynacja zabezpieczeń poziomów 2 i 3, czyli selektywność wyłączeń wyłączników szybkich w taborze i w podstacjach.

## **2. UNORMOWANIA W ZAKRESIE KOORDYNACJI ZABEZPIECZEŃ W SYSTEMIE 3 KV DC**

Koordynację zabezpieczeń zwarciovowych dla linii konwencjonalnych normują dwa dokumenty:

1. Techniczna specyfikacja interoperacyjności podsystemu „Energia” transeuropejskiego systemu kolei konwencjonalnych [1] (TSI Energia);
2. Norma PN-EN 50388:2008 [7].

Zgodnie z zapisami TSI Energia koordynacja zabezpieczeń elektrycznych, w tym zwarciovowych, jest jednym z podstawowych parametrów określających podsystem „Energia”. Zapisy dotyczące koordynacji zabezpieczeń zwarciovowych w normie PN-EN 50388 i TSI Energia są prawie takie same, gdyż TSI Energia zawiera powołania na tę normę w rozdziałach dotyczących zabezpieczeń. W obydwu dokumentach przyjęto, że wartość prądu zwarciovowego w systemie zasilania 3 kV DC może osiągać 50 kA. Różnice stanowią tablice przedstawiające sekwencje wyzwiania wyłącznika taborowego i podstacyjnego dla systemów zasilania prądu przemiennego i stałego. Dla systemów prądu stałego,

bez względu na poziom napięcia znamionowego, norma ta i TSI Energia podają wymaganie, aby w przypadku wystąpienia zwarcia w taborze, wyłączniki w pojeździe trakcyjnym i w podstacji zostały wyzwolone jak najszybciej. Dodatkowo w TSI Energia znajduje się przypis mówiący, że wyłącznik pojazdu trakcyjnego powinien zadziałać tak, aby w jak największym stopniu uniknąć otwarcia wyłącznika w podstacji trakcyjnej.

W normie PN-EN 50388 i w TSI Energia brak jest określenia wartości „bardzo dużego” prądu zwarcia. Obydwa dokumenty zalecają stosowanie wyłączników taborowych o zdolności łączeniowej pozwalającej na samodzielne wyłączenie wszystkich prądów zwarciovych. W TSI Energia zdefiniowano pojęcie „otwarcie natychmiastowe”, jako zadziałanie wyłącznika bez zamierzonego opóźnienia. Podano również, że dla systemów prądu stałego czas przepływu prądu zwarcia przez wyłącznik zawiera się w granicach od 20 do 60 ms, co jest spełnione przez wyłączniki szybkie typu WSe i BWS, eksploatowane w polskich podstacjach trakcyjnych [2, 11, 14, 15, 22]. Norma nie odnosi się wstecz do taboru już dopuszczonego do ruchu przez zarządcę infrastruktury, chociaż może on dopuścić istniejący tabor do ruchu na nowej infrastrukturze, o ile zostanie zawarte takie porozumienie.

Norma PN-EN 50388 dotycząca koordynacji zabezpieczeń określa, że należy zweryfikować kompatybilność systemów zabezpieczeń pomiędzy pojazdem trakcyjnym a podstacją w zakresie:

- zabezpieczeń przeciwzwarciowych,
- samoczynnego powtórnego załączania jednego lub więcej wyłączników szybkich w podstacji,
- wpływu zaniku napięcia linii i przywracania zasilania na pojazdy trakcyjne,
- prądu przejściowego w czasie zamykania (dla systemów zasilania prądem stałym),
- warunków dopuszczenia.

### 3. PODZIAŁ WYŁĄCZNIKÓW SZYBKICH PRĄDU STAŁEGO

Wyłączniki szybkie prądu stałego 3 kV są głównymi urządzeniami wyłączającymi prądy zwarciovowe w kolejowych systemach elektrotrakcyjnych. Znajdują one zastosowanie w podstacjach trakcyjnych, kabinach sekcyjnych oraz taborze kolejowym. Normy dotyczące urządzeń stacjonarnych: PN-EN 50123-1 [5] i PN-EN 50123-2 [6] wprowadzają podział wyłączników szybkich pod względem sposobu wyłączenia (powietrzne, gazowe i półprzewodnikowe), szybkości działania oraz miejsca zainstalowania. Ze względu na szybkość działania, normy te wyróżniają trzy typy wyłączników:

- szybkie ograniczające prąd (typ H),
- bardzo szybkie ograniczające prąd (typ V),
- quasi-szybkie (typ S).

**Wyłącznik szybki typu H** charakteryzuje zdolność na tyle szybkiego otwierania się, że prąd zwarciovowy nie osiąga wartości szczytowej, możliwej w przypadku braku jego działania. Wyłącznik typu H powinien mieć czas otwierania się (czas własny) nie dłuższy

niż 5 ms, a całkowity czas wyłączenia krótszy od 20 ms, dla przerywanego prądu o wartości spodziewanej co najmniej 7 razy większej niż nastawa wyzwalacza oraz początkowej stromości narastania prądu większej niż 5 kA/ms.

**Wyłącznik bardzo szybki typu V** charakteryzuje czas własny nie dłuższy niż 1 ms, a całkowity czas wyłączenia zwarcia nie dłuższy niż 4 ms, niezależnie od parametrów obwodu.

**Wyłącznikiem quasi-szybkim typu S** jest aparat, którego czas własny jest krótszy od 15 ms, a całkowity czas wyłączenia nie dłuższy niż 30 ms, przy założeniu, że wartość spodziewanego prądu jest co najmniej 3,5 raza większa od nastawy wyzwalacza wyłącznika i początkowa stromość narastania prądu jest większa niż 1,7 kA/ms. Ograniczenie wartości szczytowej prądu zwarcia przez wyłącznik typu S nie jest wymagane.

W wymaganiach podanych w grupie norm PN-EN 50123 dla wyłączników typu H i S określono tylko początkową stromość narastania prądu zwarciego ( $di/dt$ ), natomiast brak jest wartości stałej czasowej obwodu. Oznacza to, że wymaganą wartość  $di/dt$  można osiągnąć dla wielu par wartości prądu ustalonego zwarcia  $I_{ss}$  i stałej czasowej obwodu  $t_c$ . Przykładowo  $di/dt > 5$  kA/ms uzyskuje się dla:  $I_{ss} > 50$  kA i  $t_c = 10$  ms lub  $I_{ss} > 25$  kA i  $t_c = 20$  ms. Normy te definiują tylko, że stała czasowa obwodu probierczego podczas badań wyłącznika powinna być możliwie zbliżona do stałej czasowej obwodu, w którym będzie on pracował.

Norma PN-EN 50123-1 wprowadza również podział wyłączników uwzględniający ich funkcję oraz miejsce zainstalowania i wyróżnia następujące rodzaje wyłączników:

- liniowe (typ L),
- prostownikowe (typ R),
- sekcyjne (typ I).

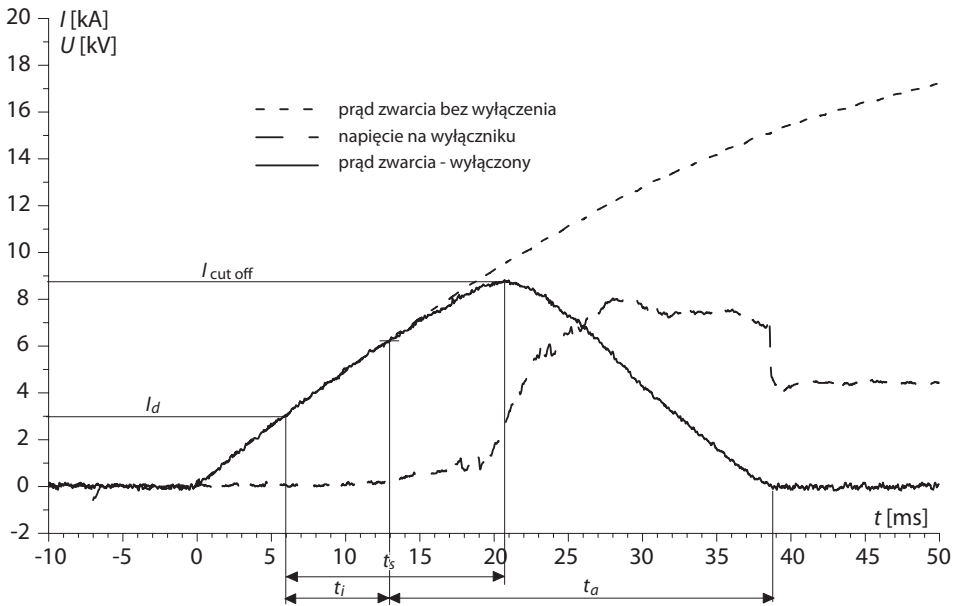
Do typu L są zaliczane wyłączniki łączące szyny główne prądu stałego podstacji z siecią trakcyjną. W polskich warunkach są one nazywane wyłącznikami podstacyjnymi lub wyłącznikami zasilaczy. Natomiast w kabinach sekcyjnych (wyłączniki kabinowe) znajdują się wyłączniki klasyfikowane przez normę jako wyłączniki sekcyjne typu I. W Polsce, w układzie zasilania elektrotrakcyjnego nie stosuje się wyłączników prostownikowych typu R służących do łączenia prostowników z szynami głównymi prądu stałego podstacji trakcyjnej.

W zakresie wyłączników szybkich przeznaczonych do pojazdów trakcyjnych (wyłączników taborowych), obecnie obowiązuje w Polsce norma PN-EN 60077-3 [8]. Norma ta nie podaje wymagań dotyczących parametrów czasowych wyłącznika taborowego; natomiast można w niej znaleźć podział wyłączników w zależności od ich budowy, zasady działania, reżymu pracy oraz znamionowej stałej czasowej układu, do którego wyłącznik jest przeznaczony. Norma PN-69/E-06120 [4], która już nie obowiązuje (wycofana w 2004 r. bez zastąpienia) definiowała wymaganie, aby wyłącznik taborowy wyłączył prąd zwarcia o wartości spodziewanej 10 kA, przy napięciu zasilania 4000 V i stałej czasowej obwodu zwarcia 20 ms. Norma ta także nie zawierała żadnych wymagań dotyczących czasu własnego wyłącznika czy czasu całkowitego wyłączenia zwarcia.

Porównując wymagania norm dla wyłączników szybkich podstacyjnych i taborowych można stwierdzić, że już na etapie wymagań normatywnych brak jest korelacji pomiędzy tymi rodzajami wyłączników. Dlatego stosując się tylko do wymagań tych norm trudno jest osiągnąć taki stan koordynacji zabezpieczeń zwarciovych, w którym będzie możliwe selektywne wyłączenie zwarc powstających w pojazdach trakcyjnych.

## 4. WYŁĄCZANIE PRĄDU STAŁEGO

Proces wyłączenia prądu stałego można podzielić na kilka etapów, których czasy trwania zależą od parametrów wyłącznika, obwodu bądź obydwu tych elementów. Na rysunku 1 przedstawiono przebieg prądu zwarciovego wyłączanego przez wyłącznik typu BWS-50 oraz napięcia na jego zaciskach. Przebieg został zarejestrowany podczas prób w PT Sabinka [18].



Rys. 1. Przebiegi prądu zwarciovego i napięcia na zaciskach wyłącznika szybkiego przy  $di/dt = 0,56$  kA/ms [18 i opracowanie własne]

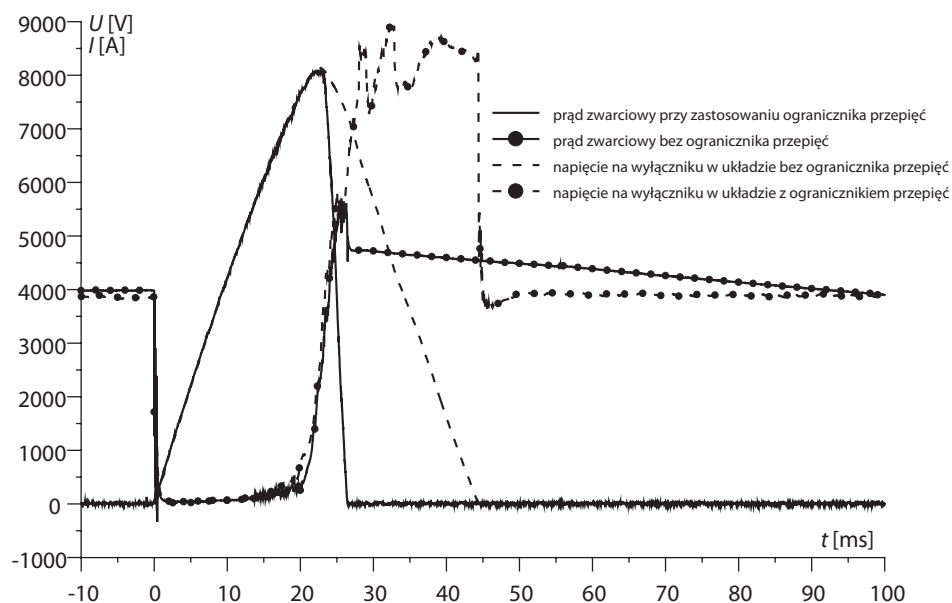
W klasycznych magneto-wydmuchowych wyłącznikach szybkiego prądu stałego w pierwszym etapie prąd narasta do poziomu nastawy wyłącznika ( $I_d$ ). Czas potrzebny do osiągnięcia przez prąd zwarciovym poziomu nastawy jest zależny od poziomu nastawy oraz od stromości narastania prądu – parametrów obwodu zwarciovego. Od tej chwili rozpoczyna się proces wyłączenia.

Po czasie własnym  $t_i$  styki wyłącznika zaczynają się rozchodzić. Czas własny wyłącznika jest zależny od jego konstrukcji, sposobu wyzwalania, masy elementów itp.

Gdy rozpoczyna się ograniczanie prądu zwarciovego (przebieg wykreślony linią ciągłą na rysunku 1 zaczyna przebiegać poniżej linii przerywanej – prądu zwarcia wyłączanego przez wyłącznik mocy zespołu prostownikowego), pomiędzy stykami wyłącznika pojawia się łuk elektryczny, którego napięcie zaczyna rosnąć.

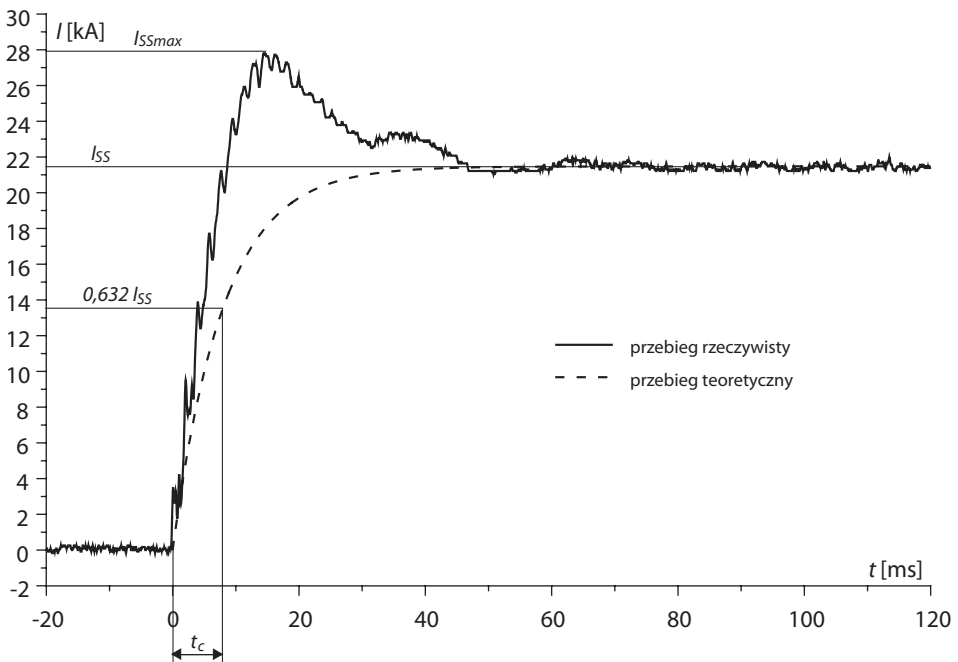
W miarę wydłużania się łuku, napięcie na stykach wyłącznika rośnie, początkowo powoli, a następnie coraz szybciej. Po czasie  $t_5$ , liczonym od chwili przekroczenia prądu  $I_{gr}$ , napięcie łuku wzrasta gwałtownie, a prąd zwarciovowy osiąga maksymalną wartość ograniczoną  $I_{cut\ off}$ . Oprócz czasu własnego  $t_r$ , czas w jakim wartość prądu zostanie ograniczona, zależy jest od szybkości rozchodzenia się styków wyłącznika i wzrostu rezystancji łuku. Dalszy wzrost napięcia łuku (wydłużenie się łuku, wzrost rezystancji, odbieranie energii) powoduje tłumienie prądu, aż do całkowitego jego zaniku. Szybkość malenia prądu zależna jest od parametrów obwodu zwarciovego, w szczególności wartości indukcyjności i jest w przybliżeniu taka sama jak szybkość narastania.

Zastosowanie dodatkowych środków zmniejszających wartość indukcyjności w obwodzie pozwala na zwiększenie stromości tłumienia prądu zwarciovego i skrócenie czasu łukowego  $t_a$ . Na rysunku 2 przedstawiono dwa przebiegi prądu zwarciovego w tym samym układzie w dwóch przypadkach: bez zastosowania dodatkowych środków (linia przerywana) oraz przy zbcznikowaniu dławika katodowego ogranicznikiem przepięć (linia ciągła). Ogranicznik przepięć po rozpoczęciu przewodzenia zwiera dławik katodowy, co powoduje zmniejszenie się indukcyjności w obwodzie i umożliwia szybsze stłumienie prądu zwarciovego.



Rys. 2. Przebiegi napięcia i prądu zwarciovego w układzie z ogranicznikiem napięcia i bez ogranicznika (opis w tekście) [19 i opracowanie własne]

Zgodnie z zapisami norm PN-EN 50123-1 [5] i PN-EN 60077-3 [8] parametry obwodu zwarciovego: stałą czasową  $t_c$  i ustalony prąd zwarcia  $I_{SS}$ , określa się dla przebiegu narastającego wykładniczo, tak jak to pokazano na rysunku 3 (przebieg wykreślony linią przerywaną). Jednak w warunkach rzeczywistych, podczas zwarc blisko podstacji lub w podstacji, przebieg prądu zwarciovego nie ma charakteru wykładniczego, lecz osiągnięcie wartości ustalonej  $I_{SS}$  poprzedzają wahania napięcia zbliżone do oscylacyjnych (rys. 3 – przebieg wykreślony linią ciągłą). W takich przypadkach, z punktu widzenia pracy wyłącznika, istotna jest wartość maksymalna prądu zwarciovego  $I_{SSmax}$  i rzeczywista prędkość narastania prądu zwarciovego, a nie stała czasowa  $t_c$  przebiegu narastającego wykładniczo i ustalony prąd zwarcia  $I_{SS}$ .



Rys. 3. Przebieg prądu zwarcia w podstacji trakcyjnej (opis w tekście) [3 i opracowanie własne]

## 5. WARUNKI UZYSKANIA SELEKTYWNOŚCI WYŁĄCZEŃ

Uzyskanie selektywności wyłączeń prądów zwarciovych i przetężeniowych powstających w taborze jest możliwe wówczas, gdy wyłącznik taborowy wyłączy prąd zanim zostanie wyzwolony wyłącznik w podstacji trakcyjnej lub kabinie sekcyjnej. Nastąpi to tylko w przypadku, gdy wyłącznik taborowy ograniczy prąd do wartości niższej od poziomu wyzwolenia wyłącznika podstacyjnego ( $I_{cut\ off\ tab} < I_{dPT}$ ).

W przypadku otwarcia wyłącznika szybkiego w podstacji, zostaje pozbawiony zasilania odcinek sieci (odcinek zasilania), stanowiący odcinek linii kolejowej pomiędzy

podstacją trakcyjną i kabiną sekcyjną lub dwiema sąsiednimi podstacjami. Dlatego wyłączniki szybkie w pojazdach trakcyjnych powinny mieć jak najkrótsze czasy własne  $t_f$  i czas ograniczania prądu  $t_s$  oraz całkowity czas wyłączenia.

O tym, czy zwarcie powstałe w taborze spowoduje wyzwolenie wyłącznika szybkiego w podstacji, decydują następujące parametry:

- poziom nastaw wyłącznika taborowego i podstacyjnego,
- czas własny i zdolność ograniczania prądu przez wyłącznik taborowy,
- stromość narastania prądu w obwodzie.

Gdy wyłącznik taborowy ma wyższy prąd wyzwolenia niż wyłącznik podstacyjny, każde zwarcie w pojeździe trakcyjnym będzie wyłączane przez wyłącznik zainstalowany w podstacji.

Jak wspomniano, zwarcie lub przetężenie powstające w pojeździe trakcyjnym nie spowoduje wyłączenia napięcia przez podstację, gdy wartość prądu zwarciego płynącego przez wyłącznik podstacyjny nie przekroczy jego poziomu wyzwolenia. Sytuacja taka może mieć miejsce, gdy zwarcie nastąpi w pojeździe znajdującym się na środku odcinka zasilanego dwustronnie, a prąd zwarcia będzie ograniczony przez dodatkową rezystancję (np. rezystancję łuku elektrycznego, rezystancję sieci trakcyjnej itp.). Wyłącznik w podstacji nie będzie wyłączał zwarcia również w przypadku, gdy stromość narastania prądu zwarciego będzie na tyle mała, że wyłącznik taborowy zacznie ograniczać prąd zanim osiągnie on poziom wyzwolenia wyłącznika szybkiego w podstacji. Wartość graniczna  $di/dt$ , przy której prąd zwarciego będzie wyłączany tylko przez wyłącznik taborowy, zależy od czasu własnego wyłącznika w pojeździe, jego zdolności ograniczania prądu i różnicy pomiędzy wartościami nastaw wyłączników taborowego i podstacyjnego. Zależność tę można zapisać w postaci:

$$di/dt_{gr} = \frac{I_{dPT} - I_{dtab}}{t_{Stab}}.$$

Dla wyłączników magneto-wydmuchowych czas  $t_s$  jest sumą czasu własnego i czasu palenia się tzw. krótkiego łuku, trwającego przeciętnie od części do kilku milisekund. Wartość czasu  $t_s$  oprócz czasu własnego wyłącznika, jest zależna od kilku czynników jednocześnie. Do tych czynników należą między innymi: budowa wyłącznika, stała czasowa obwodu zwarcia, wartość prądu w chwili rozchodzenia się styków wyłącznika itp.

Z tej zależności wynika, że im większa jest zdolność ograniczania prądu i mniejszy czas własny wyłącznika taborowego oraz czas potrzebny do ograniczenia prądu, a jednocześnie im większa jest różnica nastaw wyłączników podstacyjnego i taborowego, tym większa może występować stromość narastania prądu zwarcia, który będzie wyłączany tylko w pojeździe trakcyjnym, a wyłącznik podstacyjny nie zostanie wyzwolony. Ponadto można przyjąć, że wartość graniczna  $di/dt_{gr}$  nie jest zależna od parametrów związanych z konstrukcją wyłącznika zainstalowanego w podstacji. Przy wartości  $di/dt$  większej od granicznej, każde zwarcie w taborze spowoduje zadziałanie wyłącznika szybkiego w podstacji trakcyjnej.

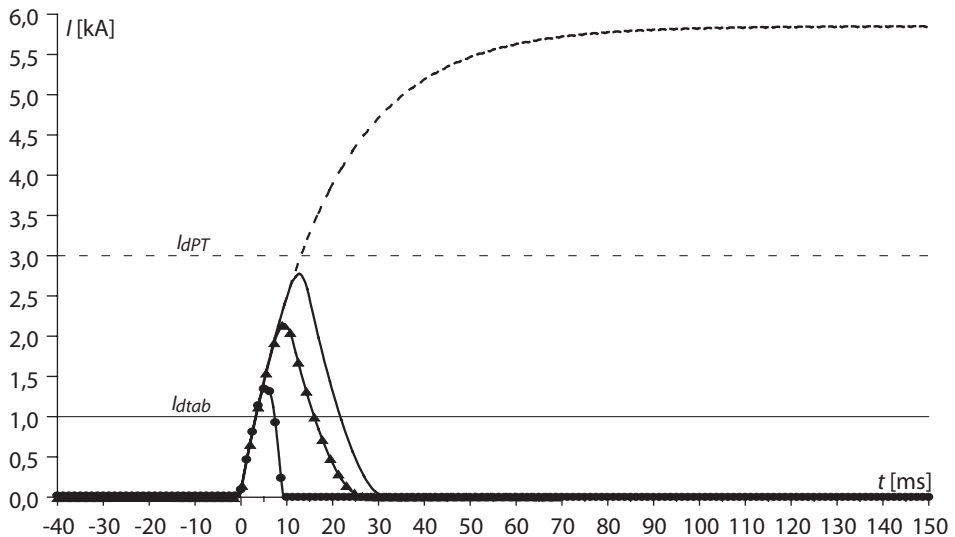


Ilustracją opisanych zjawisk i zależności są przebiegi przedstawione na rysunkach od 4 do 6. Przebiegi te otrzymano za pomocą symulacji, w których wykorzystano modele wyłączników szybkich opisanych w opracowaniach [12, 17]. W celu uproszczenia przyjęto, że dla danego typu wyłącznika czas własny  $t_i$  i czas ograniczenia prądu  $t_s$  jest niezależny od parametrów obwodu. Poszczególne przebiegi na rysunkach od 4 do 6 oznaczono następująco:

- linia przerywana – przebieg prądu zwarcia w przypadku braku działania wyłącznika,
- linia ciągła – przebieg prądu wyłączanego przez wyłącznik o czasie własnym 6,5 ms ( $t_s \approx 11$  ms),
- linia ze znacznikami trójkątnymi – przebieg prądu wyłączanego przez wyłącznik o czasie własnym 3 ms ( $t_s \approx 7$  ms),
- linia ze znacznikami okrągłymi – przebieg prądu wyłączanego przez wyłącznik o czasie własnym bliskim zeru ( $t_s \approx 2$  ms).

Do porównania, oprócz przebiegów prądów wyłączanych przez wyłącznik taborowy, którego nastawę przyjęto na poziomie  $I_{dtab} = 1$  kA (linia ciągła), na rysunkach przedstawiono linią przerywaną poziom nastawy wyłącznika w podstacji trakcyjnej o wartości  $I_{dPT} = 3$  kA.

Na rysunku 4 przedstawiono sytuację, w której zwarcie w pojeździe trakcyjnym następuje daleko od podstacji. W tym przypadku, przy  $di/dt = 0,29$  kA/ms ( $t_c = 19,5$  ms), wyłączenie zwarcia następuje tylko w pojeździe, gdyż niezależnie od przyjętego czasu własnego wyłącznika taborowego, wartość prądu ograniczonego nie przekracza poziomu nastawy wyłącznika w podstacji.

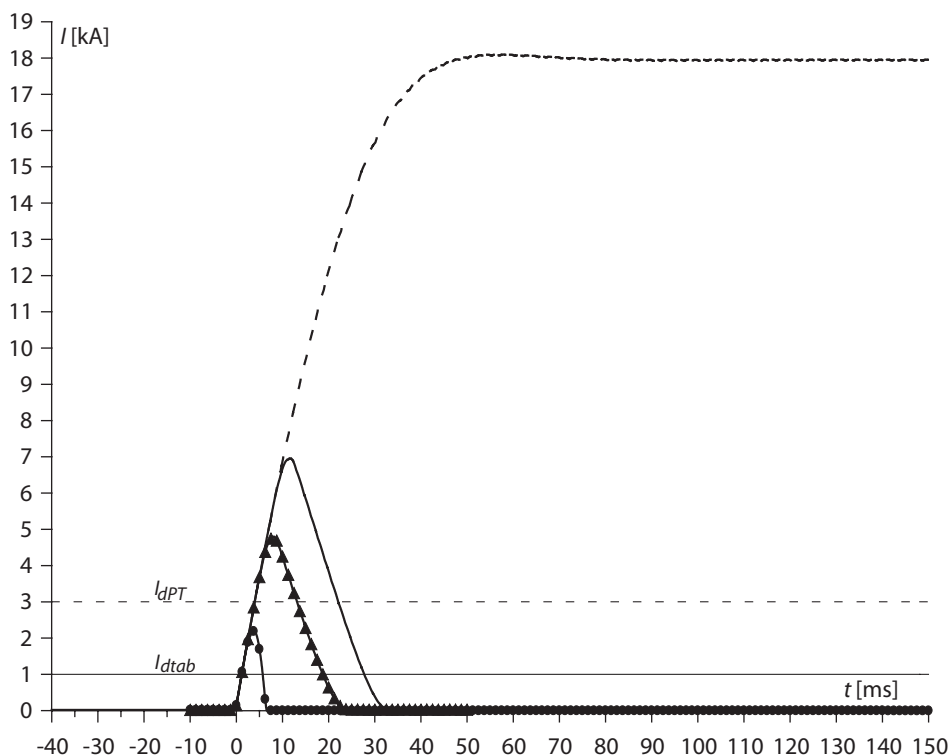


Rys. 4. Przebiegi prądów podczas zwarcia odległego od podstacji przy  $di/dt = 0,29$  kA/ms oraz  $t_c = 19,5$  ms [opracowanie własne]

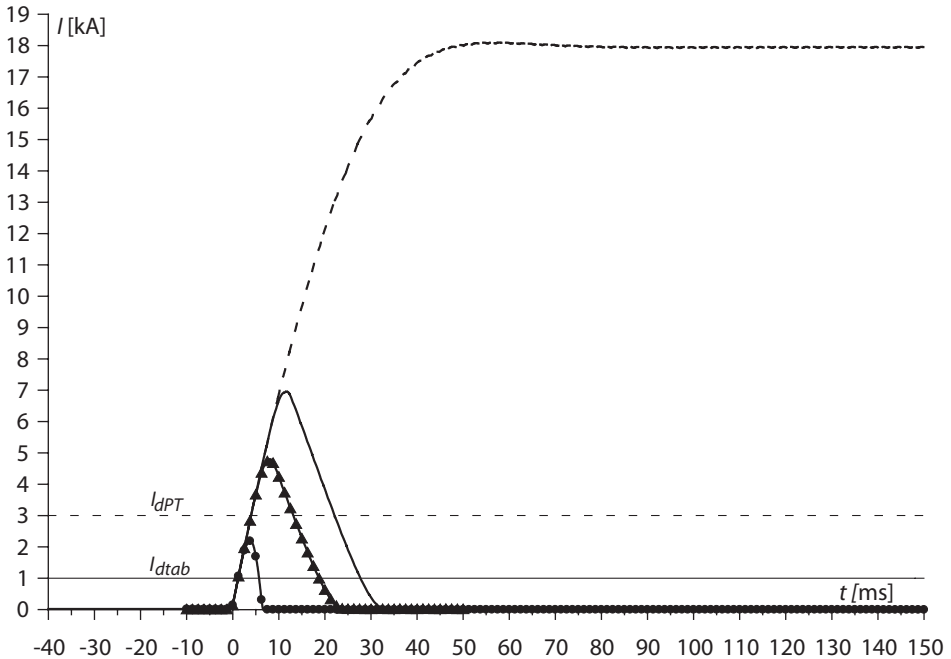
Gdy zwarcie w taborze wystąpi w pobliżu podstacji, stromość narastania prądu, a zatem możliwość selektywnego wyłączenia zwarcia w głównej mierze zależy od indukcyjności podstacji. Zjawisko to ilustrują rysunki 5 i 6. Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi prądu zwarciego w obwodzie o indukcyjności cztery razy większej od występującej w obwodzie, w którym prąd zwarcioowy ma przebieg jak na rysunku 6.

Przy stromości narastania prądu o wartości  $0,74 \text{ kA/ms}$  i  $t_c \approx 24 \text{ ms}$  (rys. 5), zwarcie w taborze będzie wyłączane bez zadziałania wyłącznika szybkiego w podstacji tylko wówczas, gdy wyłącznik taborowy będzie charakteryzował się czasem własnym bliskim zeru (przebieg wykreślony linią ze znacznikami okrągłymi). W przeciwnym razie, nawet przy czasach własnych rzędu  $3 \text{ ms}$  prąd zwarcioowy przekroczy nastawę wyłącznika podstacyjnego i spowoduje jego wyłączenie.

Im wartość  $di/dt$  jest większa, tym mniejsza jest szansa na to, że zwarcie w taborze zostanie wyłączone tylko przez jego wyłącznik. Pokazuje to rysunek 6, na którym nawet najwyższy z przyjętych wyłączników nie jest w stanie ograniczyć prądu poniżej poziomu nastawy wyłącznika podstacyjnego ( $di/dt = 2 \text{ kA/ms}$ ,  $t_c = 9 \text{ ms}$ ). Dla tego przypadku wyłącznik taborowy powinien ograniczyć prąd w czasie mniejszym niż  $1 \text{ ms}$  od chwili przekroczenia jego nastawy.



Rys. 5. Przebiegi prądów podczas zwarcia blisko podstacji przy  $di/dt = 0,74 \text{ kA/ms}$  oraz  $t_c = 23,7 \text{ ms}$  [opracowanie własne]



Rys. 6. Przebiegi prądów podczas zwarcia blisko podstacji przy  $di/dt = 2 \text{ kA/ms}$  oraz  $t_c = 9 \text{ ms}$  (opracowanie własne)

Z przedstawionych wyników symulacji i analiz wynika, że obecnie nie jest możliwe uzyskanie każdorazowo selektywności wyłączeń prądów zwarciovych w taborze. Analizując parametry wyłączników szybkich dostępnych na europejskim rynku, największy zakres selektywności można uzyskać w przypadku zastosowania w taborze próżniowych wyłączników serii DCN-L i DCU. Dzięki bardzo małym czasom własnym i bardzo dobrym własnościom odgraniczania prądu, które są praktycznie niezależne od parametrów obwodu zwarciovego, jest możliwe osiągnięcie niskich wartości  $I_{\text{cut off tab}}$  dla wyłącznika taborowego.

Zastosowanie w taborze wyłącznika próżniowego, którego  $t_{\text{stab}} \approx 2 \text{ ms}$  przy różnicy nastaw wyłączników w taborze i podstacji rzędu  $2 \text{ kA}$ , pozwala na selektywność wyłączeń prądu o stromości narastania do  $1 \text{ kA/ms}$ . Taka wartość  $di/dt$  występuje w obwodzie o stałej czasowej  $20 \text{ ms}$  przy prądzie ustalonym zwarcia do  $20 \text{ kA}$ , co odpowiada parametrom układów na przeważającej długości linii kolejowych w Polsce.

Oprócz stosowania w taborze ultraszybkich wyłączników próżniowych, dalszą poprawę selektywności wyłączania zwarć można uzyskać przez zwiększenie nastaw w podstacjach trakcyjnych i kabinach sekcyjnych oraz zmniejszenie stromości narastania prądu zwarciovego. Drugi z tych czynników można uzyskać przez zwiększenie indukcyjności dławików katodowych w podstacjach trakcyjnych. Natomiast zwiększenie nastaw wyłączników podstacyjnych możliwe jest w wypadku:

- zmniejszenia odległości między podstacjami,
- zwiększenia przekroju sieci trakcyjnej,
- budowy / modernizacji podstacji o sztywniejszych charakterystykach zewnętrznych,
- zastosowania sterowników zewnętrznych do wyzwalania wyłączników szybkich.

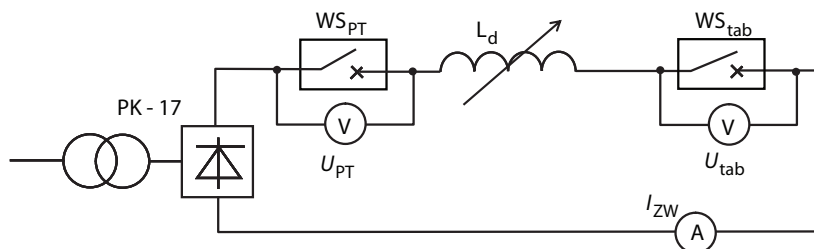
Pierwsze trzy działania są możliwe do zastosowania głównie w przypadku kompleksowej modernizacji systemu zasilania trakcji. Natomiast wprowadzenie wyzwalania wyłączników przez zewnętrzny sterownik nie wymaga tak wielkich nakładów. Ponadto rozwiązanie to, oprócz podniesienia nastawy wyłącznika podstacyjnego, pozwala na opóźnienie jego wyzwolenia, dając czas na wyłączenie zwarcia przez wyłącznik taborowy.

## 6. PRZEBIEG I WYNIKI BADAŃ

### 6.1. Przygotowanie do badań

Badania przeprowadzono w laboratorium zwarciovym Instytutu Kolejnictwa w Mińsku Mazowieckim na zlecenie spółki PKP Energetyka S.A. [20]. Układ pomiarowy przedstawiono na rysunku 7. Jako wyłącznik podstacyjny ( $WS_{PT}$ ) zastosowano wyłącznik szybki typu BWS z komorą gaszeniową KBD-50. Wyłącznik taborowy ( $WS_{tab}$ ) odwzorowano przez zastosowanie różnych typów wyłączników, którymi były:

- 1) ultraszybki wyłącznik próżniowy typu DCN-2,5, którego zasada pracy i konfiguracja obwodu głównego jest taka sama jak wyłączników taborowych serii DCU,
- 2) wyłącznik typu UR26-64 firmy Secheron,
- 3) wyłącznik typu BWS z komorą łukową KBD-50b.



Rys. 7. Schemat układu pomiarowego do badań koordynacji zabezpieczeń [20]

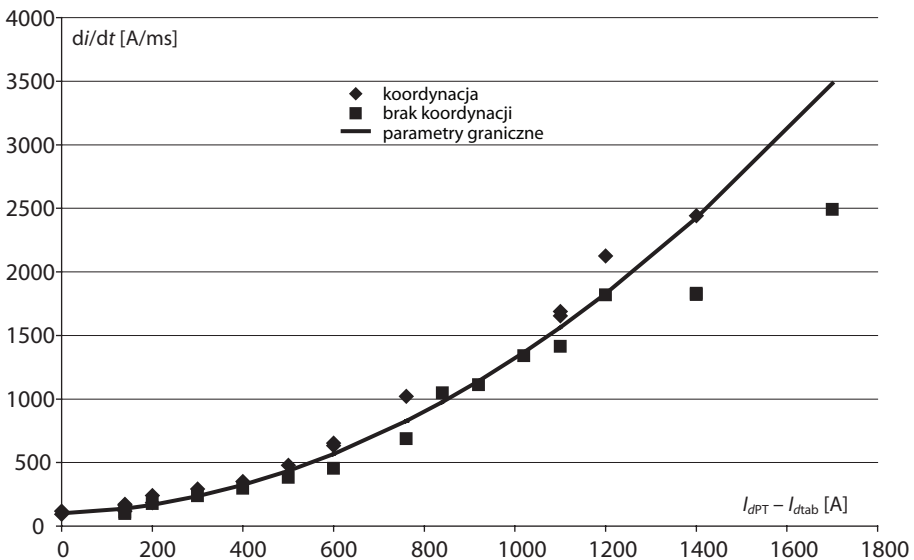
Przed przystąpieniem do badań przeprowadzono skalowanie nastaw wyłączników. Rzeczywiste nastawy wyłączników typu BWS określono stosując tester wyłączników szybkich typu TWS-3000 produkcji firmy KOLEN. Nastawy wyłącznika typu DCN określono przez skalowanie układu wyzwalania wyłącznika na stanowisku serwisowym producenta – firmy Woltan. Również nastawy wyłącznika typu UR26-64 określono na podstawie skalowania wykonanego przez producenta. We wszystkich przypadkach dokładność skalowania nie była gorsza niż 2%.

Indukcyjność  $L_d$  odwzorowuje indukcyjność dławika katodowego zespołu (-ów) prostownikowego oraz indukcyjność sieci trakcyjnej, której wartość w zależności od konstrukcji sieci zawiera się w przedziale od 1 do 2 mH/km.

## 6.2. Badania z wyłącznikiem DCN

Wyłącznik DCN odwzorowywał pracę ultraszybkiego wyłącznika taborowego serii DCU lub DCN-L. Podczas prób, nastawa wyłącznika taborowego wynosiła 800 lub 1100 A. Nastawy wyłącznika podstawacyjnego zmieniano w zakresie od 2500 do 1100 A, dając  $\Delta I = I_{dPT} - I_{dtab}$  w zakresie od 0 do 1700 A. Stromość narastania prądu regulowano zmieniając wartość indukcyjności dławika  $L_d$  od 0 do 31,4 mH.

Opracowując wyniki badań poddano analizie związek pomiędzy wartością stromości narastania prądu, różnicy nastaw wyłączników taborowego i podstawacyjnego oraz uzyskaniem lub nie, selektywnego wyłączenia zwarcia przez wyłącznik taborowy. Związek tych zjawisk i wielkości w graficzny sposób przedstawiono na rysunku 8. Prawidłowe

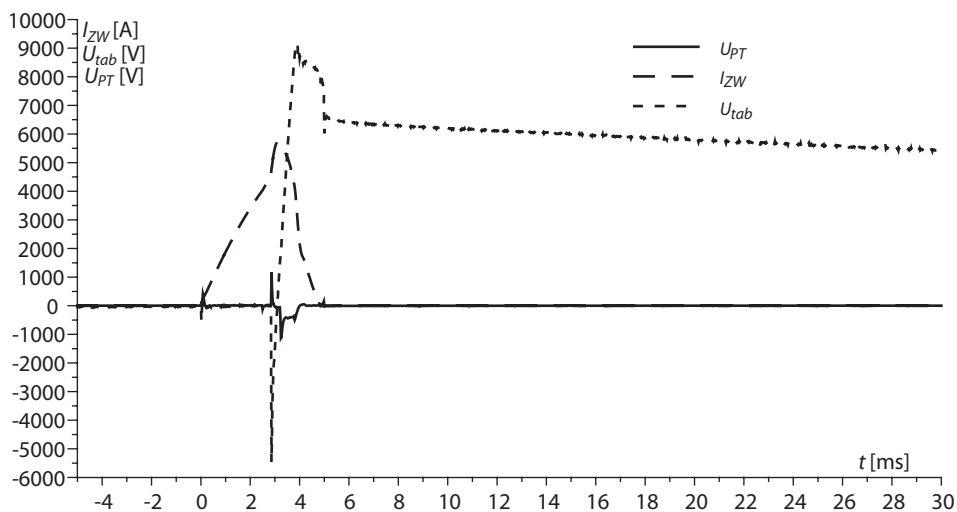


Rys. 8. Selektywność wyłączania zwarcia przez ultraszybki wyłącznik taborowy w zależności od szybkości narastania prądu zwarciovego obwodu i różnicy nastaw wyłączników taborowego próżniowego i podstawacyjnego typu BWS [20]

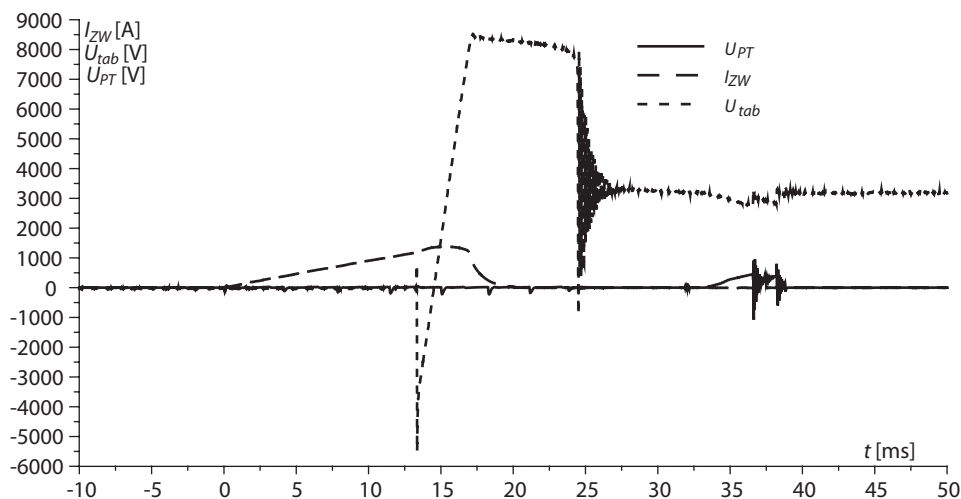
wyłączenie prądu zwarcia przez wyłącznik taborowy ilustruje rysunek 9. W czasie kilku prób, parametry obwodu i nastawy wyłączników miały wartości bliskie granicznym. Styki wyłącznika podstawacyjnego rozwarły się nieznacznie – pojawiło się napięcie  $U_{PT}$  (rysunek 10), lecz strumień w cewce trzymającej był nadal na tyle duży, aby nie pozwolić na pełne otwarcie wyłącznika.

Podczas części prób nastąpiło otwarcie wyłącznika podstawacyjnego po czasie około 10–20 ms od chwili zaniku prądu w obwodzie (rys. 11). Jest to najprawdopodobniej

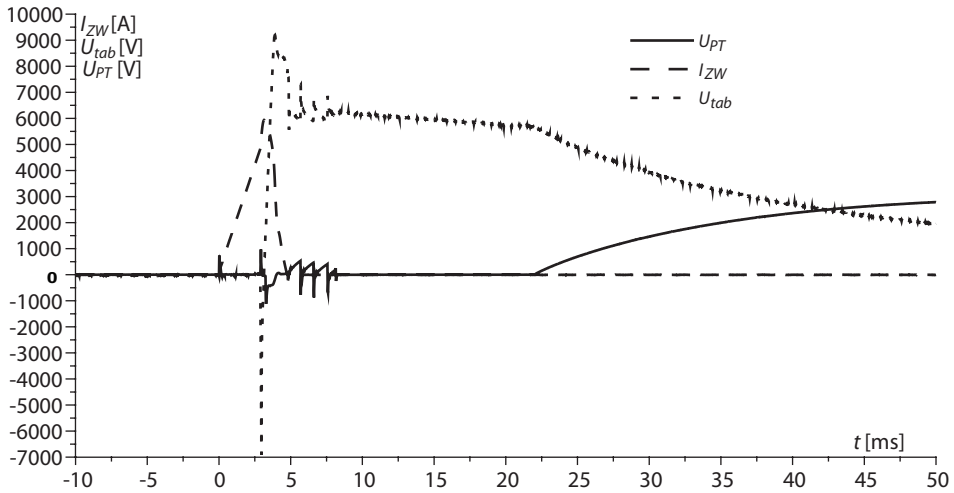
spowodowane tym, że przy granicznych parametrach obwodu, osłabienie strumienia w cewce trzymającej jest zbyt małe, aby styki wyłącznika rozwarły się w czasie przepływu prądu zwarciego. Jednak osłabienie to powoduje, że siły cewki trzymającej oraz sprężyn napędu pozostają przez pewien czas w równowadze. W tym czasie następuje ustalanie się zjawisk elektrycznych i mechanicznych, a siła stykowa jest bardzo mała. W części przypadków, o których wspomniano, może dochodzić do tylko krótkotrwałego rozwarcia styków, a w innych przypadkach rozwarcie to jest zupełne.



Rys. 9. Przebiegi prądu zwarciego i napięć na zaciskach wyłączników.  $\Delta I = 1200$  A,  $di/dt = 1819$  A/ $\mu$ s. Wynik próby pozytywny [20]



Rys. 10. Przebiegi prądu zwarciego i napięć na zaciskach wyłączników.  $\Delta I = 140$  A,  $di/dt = 98$  A/ $\mu$ s. Wynik próby pozytywny [20]



Rys. 11. Przebiegi prądu zwarciovego i napięć na zaciskach wyłączników:  $\Delta I = 1100$  A,  $di/dt = 1689$  A/ $\mu$ s. Wynik próby negatywny [20]

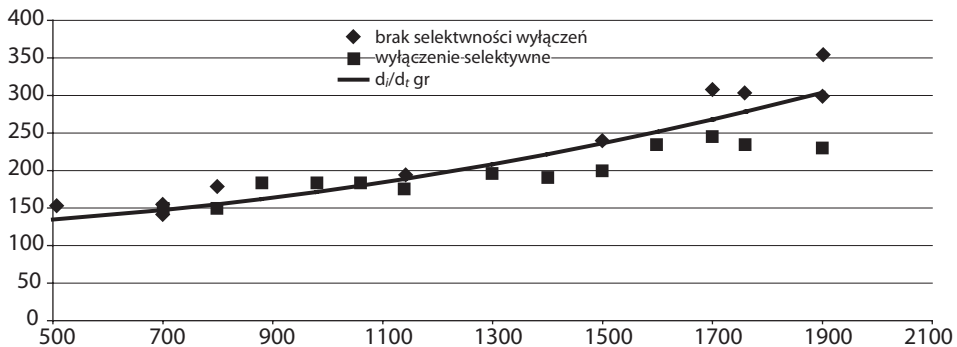
Z rysunku 11 wynika, że można wyznaczyć graniczne wartości  $di/dt$ , dla których przy określonych wartościach różnicy nastaw wyłączników jest zapewnione selektywne wyłączenie zwarcia powstałego w taborze przez ultraszybki wyłącznik próżniowy.

Badania wykazały, że zastępując dławiki katodowe zespołów typu PD-16 z 1,8 na 4 mH uzyskuje się koordynację zabezpieczeń przy różnicy nastaw wyłączników mniejszej o około 150 A przy pracy jednego zespołu i o około 300 A przy pracy dwóch zespołów.

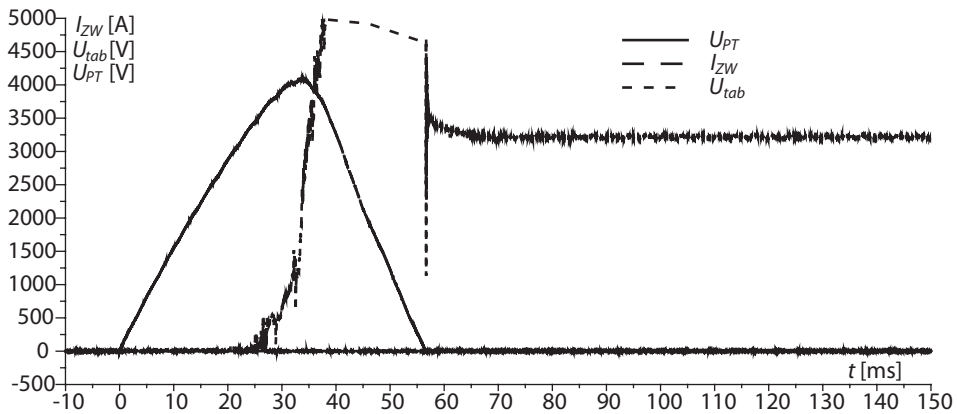
### 6.3. Badania z wyłącznikiem BWS

Z wyłącznikiem typu BWS przeprowadzono serię prób, w trakcie których nastawa wyłącznika podstacyjnego wynosiła 2500 i 3000 A. Nastawy wyłącznika taborowego były zmieniane w zakresie od 2500 do 1100 A, dając  $\Delta I$  w zakresie od 500 do 1900 A. Stromość narastania prądu regulowano zmieniając wartość indukcyjności dławika  $L_d$  do 20,2 mH, uzyskując najmniejszą wartość stromości narastania prądu poniżej 0,15 kA/ms.

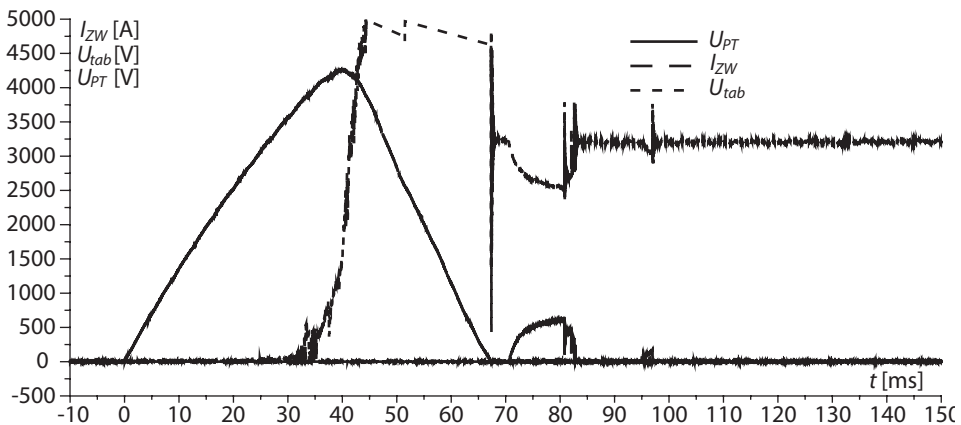
Tak jak dla prób z wyłącznikiem DCN, również wyniki badań z wyłącznikiem BWS poddano analizie, określając związek pomiędzy wartością stromości narastania prądu, różnicy nastaw wyłączników taborowego i podstacyjnego oraz uzyskaniem lub nie, selektywnego wyłączenia zwarcia przez wyłącznik taborowy. Związek tych zjawisk i wielkości w graficzny sposób przedstawiono na rysunku 12. W czasie części prób parametry obwodu i nastawy wyłączników miały wartości bliskie granicznym. Styki wyłącznika podstacyjnego rozwarły się nieznacznie – pojawiło się napięcie  $U_{PT}$  (rys. 14), lecz strumień w cewce trzymającej był nadal na tyle duży, aby nie pozwolić na pełne otwarcie wyłącznika. Prawidłowe wyłączenie prądu zwarcia przez wyłącznik taborowy ilustruje rysunek 13, a wyłączenie przez obydwa wyłączniki rysunek 15.



Rys. 12. Selektywność wyłączania zwarcia przez wyłącznik taborowy w zależności od szybkości narastania prądu zwarciego obwodu i różnicy nastaw wyłączników taborowego typu BWS i podstacyjnego typu BWS [20]

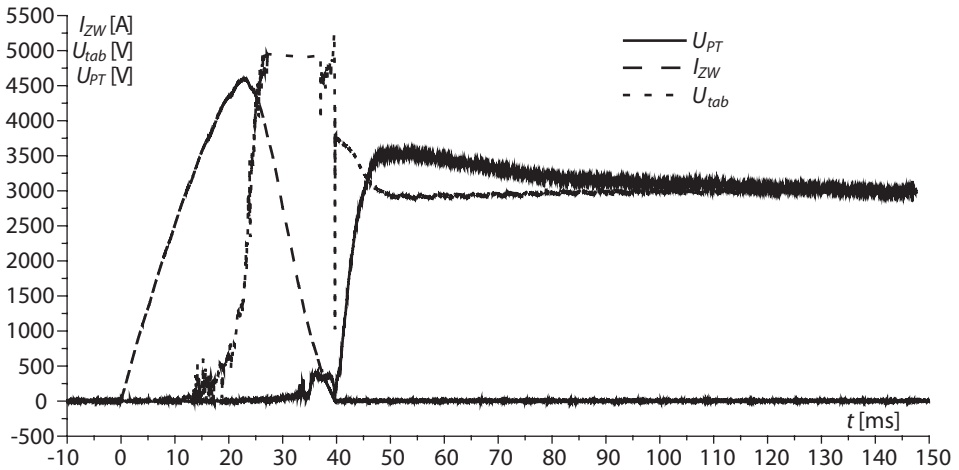


Rys. 13. Przebiegi prądu zwarciego i napięć na zaciskach wyłączników:  $\Delta I = 880$  A,  $di/dt = 184$  A/ $\mu$ s. Wynik próby pozytywnej [20]



Rys. 14. Przebiegi prądu zwarciego i napięć na zaciskach wyłączników:  $\Delta I = 700$  A,  $di/dt = 149$  A/ $\mu$ s. Wynik próby pozytywnej [20]



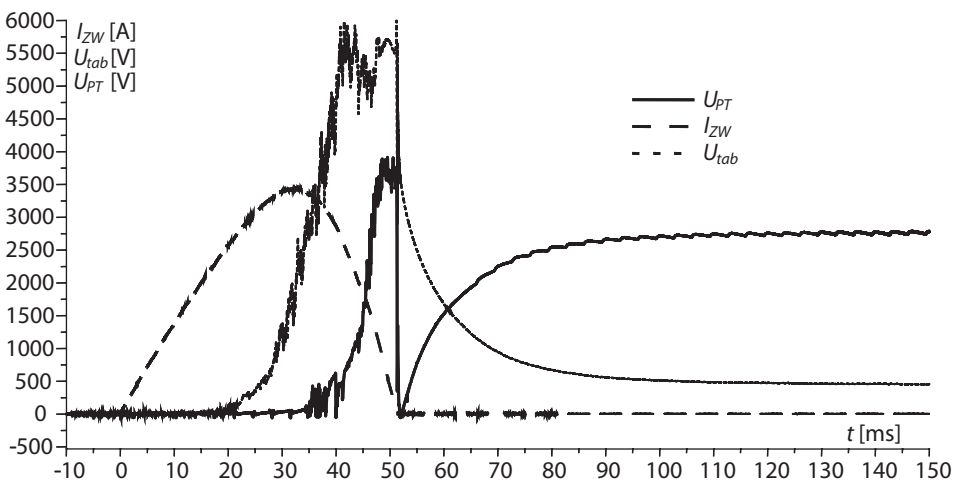


Rys. 15. Przebiegi prądu zwarciovego i napięć na zaciskach wyłączników:  $\Delta I = 1900$  A,  $di/dt = 285$  A/ $\mu$ s. Wynik próby negatywny [20]

#### 6.4. Badania z wyłącznikiem typu UR26-64

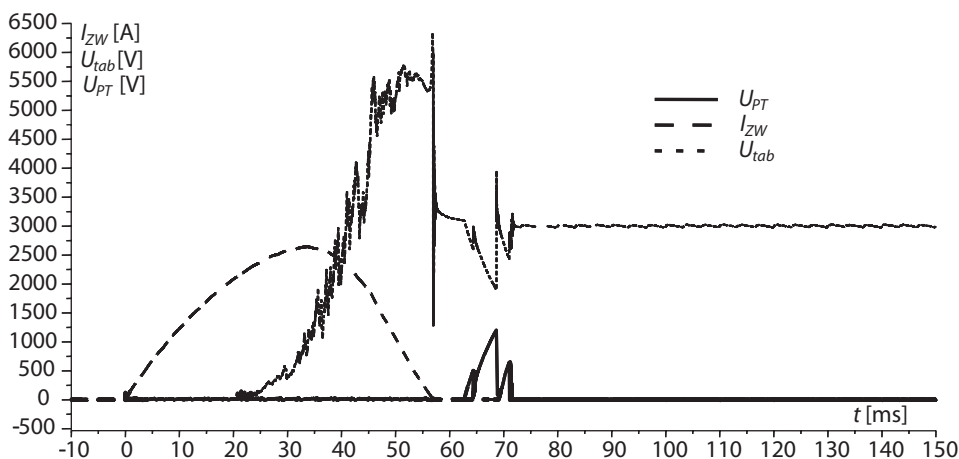
Z wyłącznikiem taborowym typu UR26-64 przeprowadzono 3 próby. Wszystkie z włączonym w obwód zwarciovych dławikiem o indukcyjności  $L_d = 20,2$  mH i  $\Delta I = 1100$  A. W celu ograniczenia prądu zwarciovego, w dwóch próbach włączono w obwód zwarciovych dodatkową rezystancję o wartościach odpowiednio 0,4 i 0,5  $\Omega$ .

Stosując wyłącznik typu UR26-64 nie uzyskano selektywnego wyłączania zwarć nawet dla bardzo małych stromości narastania prądu zwarciovego, rzędu 0,15 kA/ms i różnicy nastaw 1,1 kA (rys. 16).



Rys. 16. Przebiegi prądu zwarciovego i napięć na zaciskach wyłączników:  $\Delta I = 1000$  A,  $di/dt = 162$  A/ $\mu$ s,  $R_d = 0$ . Wynik próby negatywny [20]

Quasi-selektywne zadziałanie zabezpieczeń uzyskano, ograniczając prąd zwarciaowy przez dodatkową rezystancję  $0,5 \Omega$ , przy indukcyjności  $L_d = 20,2 \text{ mH}$  (rys. 17). W tych warunkach wyłącznik typu UR26-64 ograniczył prąd zwarciaowy do wartości  $2,64 \text{ kA}$ , czyli około  $140 \text{ A}$  wyższej, niż poziom nastawy wyłącznika podstacyjnego. Podczas tej próby, parametry obwodu i nastawy wyłączników miały wartości bliskie granicznym. Styki wyłącznika podstacyjnego rozwarły się nieznacznie – pojawiło się napięcie  $U_{PT}$ , lecz strumień w cewce trzymającej był nadal na tyle duży, aby nie pozwolić na pełne otwarcie wyłącznika.



Rys. 17. Przebiegi prądu zwarciaowego i napięć na zaciskach wyłączników:  $\Delta l = 1000 \text{ A}$ ,  $di/dt = 160 \text{ A}/\mu\text{s}$ ,  $R_d = 0,5 \Omega$ . Wynik próby pozytywny [20]

## 7. PODSUMOWANIE

Podsumowując wyniki przeprowadzonych badań, pomiarów i analiz można przyjąć, że:

1. Stosując w taborze wyłączniki ultraszybkie jest możliwe uzyskanie koordynacji zabezpieczeń:
  - przy różnicy nastaw wyłączników około  $140 \text{ A}$  przy stromości narastania prądu zwarciaowego nie większej niż około  $100 \text{ A}/\mu\text{s}$ , co odpowiada zwarciom w odległości ponad  $10 \text{ km}$  od podstacji trakcyjnej,
  - przy  $di/dt \approx 1,8 \text{ kA/ms}$  przy  $\Delta l \approx 1,2 \text{ kA}$  lub przy  $di/dt \approx 2,5 \text{ kA/ms}$  przy  $\Delta l \approx 1,7 \text{ kA}$ .
2. Z punktu widzenia koordynacji zabezpieczeń, celowe jest zwiększenie wartości indukcyjności dławików katodowych zespołów PD-16 i PD-12 z  $1,8$  na  $4 \text{ mH}$ , co pozwala na osiągnięcie selektywności zabezpieczeń przy zmniejszeniu różnicy nastaw wyłączników o około  $150 \text{ A}$ .
3. Z uwagi na duże wartości indukcyjności dławików katodowych zespołów prostownikowych PD-17, zwarcie w taborze wyposażonym w wyłącznik ultraszybki, będącym w bezpośrednim sąsiedztwie podstacji, może być wyłączone przy różnicy nastaw

- wyłączników powyżej 500 A przy pracy jednego zespołu i około 750 A przy pracy dwóch zespołów.
4. Bardzo szybkie wyłączenie prądu zwarciovego powoduje, że wyłącznik podstacyjny nie otwiera się, nawet przy znacznym przekroczeniu nastawy. Bardzo krótki czas przepływu prądu nie jest wystarczający do zredukowania strumienia magnetycznego cewki trzymającej wyłącznika do poziomu, w którym może nastąpić stałe rozerwanie styków wyłącznika.
  5. Zastosowanie w taborze wyłącznika typu BWS zapewnia selektywność wyłączeń w odległości minimum 3,5 km od podstacji, przy różnicy nastaw wyłączników co najmniej 1600 A.
  6. Zastosowanie w taborze wyłącznika typu BWS pozwala na osiągnięcie selektywności wyłączania zwarć przy zasilaniu sieci trakcyjnej z jednego zespołu wyposażonego w dławik 4 mH, gdy różnica nastaw wyłączników i odległość pojazdu od podstacji będzie zgodna z danymi zawartymi w tablicy 1.

Tablica 1

**Wartości  $\Delta I$  oraz przybliżone odległości pojazdu od podstacji przy zastosowaniu zespołu prostownikowego z dławikiem 4 mH, umożliwiające uzyskanie selektywności wyłączeń, przy zastosowaniu wyłączników taborowych typu BWS**

Odległość od podstacji [km]	$\Delta I$ [A]
$\approx 10,8$	$\geq 700$
$\approx 9$	$\geq 880$
$\approx 7,3$	$\geq 1300$
$\approx 5,7$	$\geq 1600$

7. Zastosowanie w taborze wyłącznika typu UR26-64 zapewnia selektywność wyłączeń tylko zwarć bardzo odległych, przy odległości taboru powyżej 10 km od podstacji (przy różnicy nastaw wyłączników co najmniej 1100 A). Odległość ta może być mniejsza, jeżeli prąd zwarciovowy będzie ograniczony przez rezystancję pętli zwarciovowej (sieci trakcyjnej) do poziomu, przy którym wyłącznik taborowy ograniczy prąd do wartości niewywołującej wyłącznik podstacyjny.

## BIBLIOGRAFIA

1. Decyzja Komisji 2011/274/UE z dnia 26 kwietnia 2011 r. dotycząca technicznej specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Energia” transeuropejskiego systemu kolei konwencjonalnych Dz.U. WE L126.
2. Domański J., Polowczyk W., Jankowicz S.: *Wyłączniki szybkie prądu stałego typu BWS-50*. Sprawozdanie z badań nr 5567A/LAR/97. Warszawa, Instytut Elektrotechniki, 1997.
3. Karpowicz J., Rojek A.: *Badania wyłącznika do podstacji kolejowych typu DCN*. CNTK. Temat 3064/12, Warszawa, 2003.

4. Polska Norma PN-E-06120:1969. *Pojazdy trakcyjne – Aparaty elektryczne prądu stałego – Ogólne wymagania i badania.*
5. Polska Norma PN-EN 50123-1:2003 *Zastosowania kolejowe. Urządzenia stacyjne. Aparatura łączeniowa prądu stałego. Wymagania ogólne* (oryg.).
6. Polska Norma PN-EN 50123-2:2003 *Zastosowania kolejowe. Urządzenia stacyjne. Aparatura łączeniowa prądu stałego. Wyłączniki prądu stałego* (oryg.).
7. Polska Norma PN-EN 50388:2008. *Zastosowania kolejowe – System zasilania i tabor – Warunki techniczne koordynacji pomiędzy systemem zasilania (podstacja) i taborom w celu osiągnięcia interoperacyjności.*
8. Polska Norma PN-EN 60077-3:2002 *Zastosowania kolejowe. Wyposażenie elektryczne taboru kolejowego. Część 3: Elementy elektrotechniczne. Zasady dotyczące wyłączników napięcia stałego* (oryg.).
9. Przybylska M., Rojek A., Majewski W., Kruczek W.: *Badania certyfikacyjne wyłącznika typu DCN-L.* CNTK. Temat 3538/12, Warszawa, 2008.
10. Przybylska M., Rojek A., Majewski W., Kruczek W.: *Badania certyfikacyjne wyłączników próżniowych serii DCU.* CNTK. Temat 3666/12. Warszawa, 2009.
11. Przybylska M., Rojek A., Majewski W.: *Badania rozdzielnicy RPSplus/K 3 kV.* CNTK. Temat 3482/12. Warszawa, 2008.
12. Rojek A., Kozłowski A.: *Modelowanie wyłączników szybkich prądu stałego.* IX Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2000. Zakopane 2000.
13. Rojek A., Przybylska M., Czarnecki R.: *Badania zwarciove wyłącznika typu DCU.* CNTK. Temat 3187/12. Warszawa, 2004.
14. Rojek A., Sochoń A., Wadas Z.: *Badania zdolności łączeniowej włącznika szybkiego typu BWS-50 w celce rozdzielnicy prądu stałego typu RPS/K.* CNTK. Warszawa, 1999.
15. Rojek A., Sochoń A., Wadas Z.: *Badania zdolności łączeniowej włącznika szybkiego typu BWS-50 w kontenerowej rozdzielnicy prądu stałego typu KRWN-3.* CNTK. Warszawa, 1999.
16. Rojek A.: *Koordinacja zabezpieczeń zwarciowych w układzie podstacja – pojazd trakcyjny w systemie zasilania 3 kV DC.* „Technika Transportu Szynowego”, 2005, nr 10.
17. Rojek A.: *Modelowanie zjawisk szybkozmiennych w układzie podstacji trakcyjnej przy wykorzystaniu programu PCNAP.* V Konferencja Komputerowe Systemy Wspomagania Nauki, Przemysłu i Transportu. Zakopane, 2001.
18. Rojek A.: *Próba zwarcia udarowego transformatora 7,4 MVA i prostownika diodowego PD-17/3,3 na podstacji trakcyjnej.* CNTK. Temat 3271/12. Warszawa, 2005.
19. Rojek A.: *Zasady koordynacji zabezpieczeń wyłączników szybkich w układzie podstacja trakcyjna – pojazd trakcyjny – Etap I.* CNTK. Temat 4379/12. Warszawa, 2009.
20. Rojek A.: *Zasady koordynacji zabezpieczeń wyłączników szybkich w układzie podstacja trakcyjna – pojazd trakcyjny – Etap II.* IK. Temat 4379/12. Warszawa, 2010.
21. Sikorski J., Tajer T.: *Lokomotywa elektryczna serii ET 21.* Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1964.
22. Szubert L., Kempys A., Zerhau Cz., Sadowski J.: *Sprawozdanie z badania wyłączników szybkich prądu stałego typu BWS.* FAE „Apena”. Bielsko-Biała, 1991.