

Stefan JANUSZEWSKI

Eugeniusz KORZYCKI

Henryk ŚWIĄTEK

Krzysztof ZYMMER

## 60 LAT UDZIAŁU INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI W PRACACH DOTYCZĄCYCH ZASILANIA SIECI TRAKCYJNYCH PRĄDU STAŁEGO

### **STRESZCZENIE**

*W artykule omówiono prace prowadzone w Instytucie Elektrotechniki w zakresie obejmującym zespoły prostownikowe przeznaczone dla systemów zasilania prądem stałym trakcji kolejowej, komunikacji miejskiej i kopalnianej. Przedstawiono rozwiązania techniczne stosowanych w latach pięćdziesiątych i na początku sześćdziesiątych ubiegłego wieku prostowników rtęciowych. Następnie omówiono kolejne wersje rozwiązań technicznych prostowników wykonywanych w oparciu o krzemowe diody mocy. Przedstawiono także udział Instytutu Elektrotechniki w opracowaniu i badaniach właściwości krzemowych diod mocy produkcji krajowej stosowanych także w prostownikach trakcyjnych. Omówiono współpracę Instytutu Elektrotechniki z przemysłem krajowym przy opracowywaniu i wprowadzaniu do produkcji kolejnych wersji trakcyjnych zespołów prostownikowych. Zaprezentowano także udział pracowników Instytutu przy opracowywaniu norm krajowych, dotyczących zasad projektowania i eksploatacji elektrycznego wyposażenia podstacji trakcyjnych prądu stałego.*

**Słowa kluczowe:** *podstacje trakcyjne prądu stałego, zespoły prostownikowe, prostowniki rtęciowe, prostowniki półprzewodnikowe*

---

**dr inż. Stefan JANUSZEWSKI, mgr inż. Eugeniusz KORZYCKI**  
**mgr inż. Henryk ŚWIĄTEK, doc. dr hab. inż. Krzysztof ZYMMER**  
e-mail: [npm@iel.waw.pl](mailto:npm@iel.waw.pl)

Zakład Przekształtników Mocy  
Instytut Elektrotechniki

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 233, 2007

## 1. WSTĘP

---

Przed ostatnią wojną światową liczba instalacji prostownikowych w Polsce była niewielka. Zespoły większej mocy wymagające fachowej obsługi były eksploatowane prawie wyłącznie przez PKP (od uruchomienia zelektryfikowanej linii dojazdowej Warszawa – Otwock w 1937 r.) i przedsiębiorstwa komunikacji miejskiej. W przemyśle – w zastosowaniu do napędów – pracowało tylko kilka jednostek. Wobec braku produkcji krajowej i prawie wyłącznego korzystania z pomocy zagranicznych dostawców przy projektowaniu stacji prostownikowych krąg fachowców zainteresowanych tematyką związaną z prostownikami rțęciowymi i stacjami prądu stałego był z natury rzeczy niewielki.

Po wojnie wobec szybko postępującego procesu uprzemysłowienia kraju i elektryfikacji kolei w Polsce przy jednocześnie prowadzonej modernizacji starych urządzeń – niezbędne okazało się rozpoczęcie własnej produkcji zaworów rțęciowych. W uzyskaniu sukcesów w tym zakresie poważny udział miał ówczesny Zakład Trakcji Elektrycznej (kierowany przez prof. Antoniego Jabłońskiego) Instytutu Elektrotechniki (IEL). Zakład po nawiązaniu systematycznej współpracy z wytwórnią „Katoda” w Łodzi IEL rozwiązał bądź przyczynił się do rozwiązania szeregu problemów konstrukcyjnych i technologicznych, mających zasadniczy wpływ na udoskonalenie produkcji zaworów rțęciowych.

We wszystkich okolicznościowych publikacjach poświęconych kolejnym jubileuszom IEL z okazji X, XX, XXV, XXXV oraz pięćdziesięciolecia działalności były wymieniane prace badawcze dotyczące zasilania podstacji trakcyjnych jako istotne osiągnięcia IEL. Pierwsze wyróżnienie zawiera publikacja [1] wymieniająca wśród wielu ważnych prac IEL: „Ustalenie przyczyny wadliwego działania prostowników rțęciowych krajowej produkcji oraz ustalenie na tej podstawie wytycznych zmian konstrukcyjnych”.

Jeszcze w 1956 r. w IEL reprezentowano pogląd [2], że „... okres doskonalenia konstrukcji prostowników półprzewodnikowych tak, aby ich zalety techniczne i ekonomiczne przewyższały zalety rțęciowych, musi być z natury rzeczy długi zwłaszcza dla napięć powyżej 1000 V i jest oceniany na 15 do 25 lat”. Zbliżona opinia została podtrzymana w 1958 r. [3]: „...trudno się spodziewać, aby prostowniki germanowe lub krzemowe wyparły prostowniki rțęciowe z ostatnich ich bastionów (1000 V i więcej) wcześniej jak za 10...15 lat”. Kiedy to już nawet w IEL rozpoczęto prace rozwojowe w zakresie badania diod i konstrukcji prostowników półprzewodnikowych [4, 5].

## 2. ROZWÓJ PRODUKCJI PROSTOWNIKÓW RTĘCIOWYCH W POLSCE

---

Przekształtniki rtęciowe, których najbardziej rozpowszechnionym przedstawicielem był prostownik rtęciowy były typowymi przykładami empirycznego rozwoju konstrukcji i jej szerokiego zastosowania w technice bez dostatecznej podbudowy teoretycznej, ułatwiającej konstruktorom doskonalenie tych urządzeń. Teoretyczne wyjaśnienie mechanizmu zjawisk fizycznych, występujących przy wyładowaniu elektrycznym w parze rtęci i ich wpływu na poszczególne parametry prostowników nie nadążało za potrzebami techniki. W dalszym ciągu – mimo upływu pięćdziesięciu lat od chwili pierwszego zastosowania przemysłowego prostowników (1904 r.) – osobiste doświadczenie konstruktora i żmudny dobór parametrów na modelach były (nawet w renomowanych wytwórniach światowych) czynnikami warunkującymi uzyskanie dobrych rezultatów. Te szczególne okoliczności powodowały, że uruchomienie produkcji prostowników rtęciowych – bez wykorzystania bogatego doświadczenia fabryk przodujących w tej dziedzinie – było zadaniem wyjątkowo trudnym.

Produkcję krajowych prostowników rtęciowych uruchomiono z inicjatywy załogi małego warsztatu prostowników o nazwie „Katoda” w Łodzi. Nie mieliśmy przy tym żadnych tradycji przedwojennych. Pod koniec 1949 roku wykonano prototyp prostownika, oznaczonego PR-05. Był to prostownik metalowy, chłodzony powietrzem, pompowy, z uszczelnieniami gumowymi, na prąd znamionowy 500 A i napięcie 600 V. Drugą serię prostowników na prąd 600 A wyprodukowano w 1950 r., oznaczono symbolem PR-06 (rys. 1) i przekazano do próbnej pracy eksploatacyjnej na podstacji trakcyjnej Miejskiego Przedsiębiorstwa Komunikacyjnego w Łodzi. Jednocześnie Zakład Trakcji Elektrycznej Instytutu Elektrotechniki przeprowadził próby prototypu wymienionego prostownika i opracował opinię o jego działaniu, zalecając rozpoczęcie produkcji [6].

W 1949 r. przed przekazaniem prostownika PR-06 do próbnej eksploatacji na konferencji technicznej w Łodzi przy udziale Instytutu Elektrotechniki omówiono plan rozwoju produkcji tego typu prostowników i wysunięto postulat rozpoczęcia ich wytwarzania. Zagadnienia produkcji prostowników rtęciowych były w owym czasie dla krajowego przemysłu elektrotechnicznego zupełnie nowe. Wytwórnia nie dysponowała wówczas żadnym specjalistą, który byłby dobrze obeznany z dosyć specjalną technologią produkcji tych urządzeń stosowaną w wytwórniach zagranicznych. Zamierzenia produkcyjne opierały się jedynie na doświadczeniu uzyskanym przy remoncie prostowników innych firm. W pierwszym okresie produkcji popełniono wiele błędów. Kilka serii prostow-



**Rys. 1. Prostownik rtęciowy PR-06 (660 V lub 250 V, 600 A). Opracowanie Fabryka Prostowników KATODA w Łodzi przy współpracy Instytutu Elektrotechniki w zakresie badań i oceny. Produkowany w latach 1959...1967 w kilku odmianach konstrukcyjnych. W okresie tym dostarczono do podstacji miejskich i kopalnianych kilkaset prostowników tego typu, dzięki czemu zahamowano praktycznie import**

konania były nieznaczne i czas wykonania próby w warunkach laboratoryjnych bardzo krótki. Na podstawie doświadczenia uzyskanego przy próbach na modelach opracowano w skali laboratoryjnej technologię wytwarzania prostowników oraz wykonano kilka próbnych zaworów szklanych o prądzie kilkudziesięciu amperów, które służyły dla wewnętrznych potrzeb laboratoryjnych jako źródła prądu stałego (rys. 2).

Eksplatacja prostowników rtęciowych wymagała specjalnych zabiegów konserwacyjnych, szczególnie przy remontach związanych z otwarciem, formowaniem przechowywaniem i montażem tych prostowników [7]. Dla usprawnie-

wników, wyprodukowanych w latach 1949...1951 nie odpowiadało wymaganiom eksploatacji. Złożyło się na to wiele przyczyn. Mała wytwórnia cierpiała na duże braki w zaopatrzeniu materiałowym, w wyposażeniu maszynowym i laboratoryjnym.

Wyjaśnienie nawet stosunkowo prostych zagadnień natury konstrukcyjnej lub technologicznej na dużych prostownikach rtęciowych typu przemysłowego było bardzo kłopotliwe i kosztowne. Po otwarciu zaworu rtęciowego konieczne było jego formowanie wymagające dłuższego okresu czasu. W celu wyjaśnienia szeregu problemów związanych z nieprawidłowym działaniem pierwszych krajowych metalowych prostowników rtęciowych (np. zaburzenia w pracy łuku polegające na jego krótkotrwałym gaśnięciu) zastosowano w IEL metodę eksperymentowania na małych modelach zaworów szklanych, których koszty wy-

nia krajowej eksploatacji prostowników rtęciowych opracowano szczegółowe wytyczne obsługi i konserwacji oraz ramową instrukcję eksploatacji prostowników dla potrzeb przedsiębiorstw trakcyjnych. Zebrane doświadczenie w tym zakresie było również przekazywane w drodze porad technicznych i konsultacji wielu przedsiębiorstwom eksploatującym prostowniki, przez które eksperci Instytutu Elektrotechniki byli wzywani w przypadkach wystąpienia zakłóceń w urządzeniach podstawowych (przedsiębiorstwa komunikacji miejskiej, PKP, hutnictwo, przemysł górniczy).

**Rys. 2.** Szklany trójfazowy prostownik rtęciowy (60 A, 400 V) zaprojektowany i wykonany w Instytucie Elektrotechniki (1954 r.)



### 3. PROSTOWNIKI KRZEMOWE NA PODSTACJACH TRAKCYJNYCH PRĄDU STAŁEGO

---

W latach 1955...1960 zaszły zasadnicze zmiany w światowej technice przekształcania prądu przemiennego w stały, spowodowane opanowaniem produkcji półprzewodnikowych diod monokrystalicznych, najpierw germanowych, następnie krzemowych. W miarę postępów osiąganych w technologii pojawiały się diody krzemowe o coraz korzystniejszych parametrach, umożliwiające budowę prostowników dla różnorodnych zastosowań w szerokim asortymencie napięć i prądów. W ówczesnym stanie techniki były osiągalne z produkcji seryjnej szeregu wytwórni zagranicznych diody krzemowe na prąd znamionowy do 300 A i graniczne napięcie wsteczne do 1500...2000 V. Z tych elementów zaworowych budowano wówczas prostowniki krzemowe o znamionowych mocach jednostkowych dochodzących do kilkunastu megawatów (elektrometalurgia) i napięciach znamionowych ponad 3 kV (trakcja elektryczna prądu stałego). Tak szeroki zakres parametrów technicznych w połączeniu z powszechnie już znanymi zaletami umożliwił prostownikom krzemowym

gwałtowną i pełną powodzenia ekspansję w większości dziedzin zastosowania, w których dominowały przedtem prostowniki rtęciowe. Spowodowało to ograniczenie do minimum zastosowania prostowników rtęciowych w nowoprojektowanych instalacjach prostownikowych i w konsekwencji zaniechanie produkcji tych prostowników w wielu wytwórniach.

Zgodnie z ogólnoświatowymi trendami, również w Polsce podjęto prace zmierzające do uruchomienia produkcji prostowników krzemowych. W latach 1958...1962 prace te koncentrowały się głównie w Instytucie Elektrotechniki i zmierzały do opanowania podstaw konstrukcji tych nowych urządzeń w oparciu o wszechstronne poznanie właściwości i zasad wykorzystywania krzemowych diod mocy. Począwszy od roku 1962 wyniki prac podstawowych wdrażane były stopniowo w przemyśle, zaś wytypowane dla rozwoju produkcji prostowników krzemowych krajowe wytwórnie rozpoczęły, przy współpracy z Instytutem Elektrotechniki, realizację konkretnych opracowań konstrukcyjnych, stanowiących załączek przemysłowej produkcji tych wyrobów w Polsce [8].

Do 1966 r. opracowano kilkanaście konstrukcji prostowników krzemowych, które produkowane były zależnie od potrzeb w mniejszych lub większych seriach i przeznaczone do wykorzystania w różnych dziedzinach, jak np. elektrometalurgia metali kolorowych, przemysł chemiczny, przemysł hutniczy, spawalnictwo i trakcja elektryczna [9, 10].

Spośród konstrukcji opracowanych dla celów trakcyjnych były produkowane seryjnie prostownikowe przewoźne stacje dla trakcji dołowej, zaś eksperymentalne zespoły dla podstacji trakcyjnych komunikacji miejskiej i PKP znajdowały się w eksploatacji próbnej.

#### 4. PRACE NAUKOWO BADAWCZE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI W DZIEDZINIE DIOD I PROSTOWNIKÓW PÓŁPRZEWODNIKOWYCH

---

Prace te podjęte w roku 1958, były prowadzone równoległe w dwu kierunkach, z których jeden obejmował badania właściwości półprzewodnikowych diod mocy [11], drugi zaś zasady ich wykorzystywania w prostownikach [12].

##### 4.1. Badania właściwości półprzewodnikowych diod mocy

---

W oparciu o zakupioną z importu pewną liczbę diod germanowych i krzemowych dostarczanych przez różnych wytwórców, przeprowadzono komplekso-

we badania parametrów technicznych tych elementów. Porównanie wyników badań z parametrami deklarowanymi przez wytwórcę pozwoliło zebrać doświadczenia co do sposobów i kryteriów określania danych znamionowych diod. Niezależnie prace te umożliwiły opanowanie metod badań diod mocy [13, 14].

Doświadczenia Instytutu Elektrotechniki wykazały, że opracowane przez Międzynarodową Komisję Elektrotechniczną (IEC) zalecenia w zakresie zasad ustalania danych znamionowych diod mocy były w różnym stopniu respektowane przez wielu wytwórców zagranicznych, skąd wynikały trudności w zakresie porównania właściwości i przydatności diod różnych producentów. W szczególności istotne różnice występowały w zakresie kryteriów ustalania granicznego i znamionowego napięcia wstecznego oraz przeciążalności prądowej diod. Zastosowany w Instytucie Elektrotechniki kompleksowy system badań parametrów stworzył podstawy do oceny właściwości diod różnych typów według jednolitych kryteriów, umożliwiając tym samym prawidłową ocenę przydatności diod do pracy w układach prostowniczych. Z ważniejszych osiągnięć w tej dziedzinie należy wymienić opracowanie metod pomiaru temperatury złącza PN i pomiaru przejściowej impedancji cieplnej oraz metody wyznaczania przeciążalności prądowej diod mocy [15].

Na podstawie zdobytych w ten sposób doświadczeń opracowano w Instytucie Elektrotechniki normę branżową na diody mocy, która stanowiła podstawę dla oceny parametrów i jakości diod produkcji krajowej<sup>\*)</sup>.

Równolegle do wspomnianych badań natury metodologicznej opracowano i wykonano szereg urządzeń i stanowisk pomiarowo-badawczych niezbędnych do wyznaczania określonych parametrów i charakterystyk diod mocy. Wymienić tu trzeba charakterografy do wyznaczania napięcia granicznego i charakterystyki prądowo-napięciowej diod w kierunku wstecznym, stanowiska do pomiaru napięcia w stanie przewodzenia diody oraz do wyznaczania charakterystyk prądowo-napięciowych w kierunku przewodzenia, urządzenia do pomiaru temperatury złącza PN, stanowisko do badania diod w warunkach pracy znamionowej w układzie syntetycznym oraz układ do wyznaczania przeciążalności prądowej. Niektóre z tych urządzeń wykonano na zamówienie Fabryki ELTA, Bielańskiej Fabryki Prostowników i fabryki TEWA, a więc wytwórni produkujących w kraju prostowniki półprzewodnikowe, bądź diody [16].

W 1966 r. Instytut Elektrotechniki był w stanie przeprowadzać w swoim laboratorium kompleksowe badania diod mocy w zakresie niezbędnym do atestowania przyrządów półprzewodnikowych produkcji krajowej oraz prowadzenia ocen porównawczych właściwości diod różnych wytwórców [11]. Dalsze prace

---

<sup>\*)</sup> W 1966 r. produkowane były w kraju krzemowe diody mocy na prąd znamionowy 10 A i 100 A w opracowaniu znajdowała się dioda krzemowa na prąd 200 A.

rozwojowe w tej dziedzinie obejmowały zagadnienia trwałości i niezawodności diod mocy [17, 18, 19].

#### 4.2. Prace rozwojowe w zakresie konstrukcji prostowników półprzewodnikowych

Równoległe z pracami w zakresie badania właściwości technicznych diod germanowych i krzemowych [20] rozpoczęto w roku 1958 w Instytucie Elektrotechniki prace rozwojowe dotyczące podstaw konstrukcji energoelektronicznych prostowników z diodami półprzewodnikowymi. Prowadzone prace naukowo-badawcze zmierzały do zapoznania się ze specyfiką konstrukcji nowoczesnych prostowników półprzewodnikowych i do stworzenia podstaw dla wprowadzenia tych urządzeń do produkcji w polskim przemyśle elektrotechnicznym [21].

Początkowo zajmowano się oddzielnie poszczególnymi zagadnieniami dotyczącymi rozwiązań konstrukcyjnych podstawowych podzespołów prostowników półprzewodnikowych. Jako jeden z pierwszych rozpatrywano problem łączenia szeregowego i równoległego pojedynczych diod półprzewodnikowych w celu uzyskania zestawów o większych mocach, które mogłyby znaleźć praktyczne wykorzystanie w eksploatacji. Wymagało to ustalenia kryteriów doboru charakterystyk prądowo – napięciowych poszczególnych diod przewidzianych do współpracy w zestawach. W przypadku łączenia szeregowego diod były badane warunki optymalnej pracy dzielników napięcia złożonych z rezystorów, kondensatorów bądź obu tych elementów. Uwagę poświęcono również zagadnieniom związanym z działaniem systemów sygnalizacji uszkodzonych diod pracujących w połączeniach zarówno szeregowych, równoległych jak i mieszanych.

Niezależnie od wspomnianych prac w zakresie układów elektrycznych przeprowadzono szereg badań dla przeanalizowania problemu optymalnego chłodzenia diod półprzewodnikowych w szafach prostowniczych, zarówno w warunkach chłodzenia naturalnego, jak i wymuszonego.

Następnym etapem prac prowadzonych w Instytucie Elektrotechniki było wykonywanie konstrukcji modelowych prostowników z diodami początkowo germanowymi, a następnie krzemowymi. Jako najważniejsze należy wymienić:

- pierwszy w Polsce prostownik germanowy 250 V, 300 A (rys. 3) wyposażony w diody germanowe 100 A (rys. 4) (wykonane w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk), który został w roku 1961 zainstalowany do eksploatacji próbnej w Kopalni „Bolesław Śmiały” w Łaziskach Górnych, gdzie pracował bez zakłóceń w ciągu trzech lat [22];



- prostownik germanowy 600 A, 14 V, który pracował kilka lat z wynikiem pozytywnym w galwanizerni Zakładu A-10 w Międzylesiu;
- konstrukcje modelowe prostowników krzemowych 250 V, 100 A do pierwszej automatycznej przewoźnej stacji prostowniczej wykonywanej w Zakładach Konstrukcyjno-Mechanicznych Przemysłu Węglowego [23];
- stacjonarny prostownik krzemowy 250 V, 400 A przeznaczony dla dolowej podstacji trakcyjnej w Kopalni „Makoszowy” w Zabrze.



**Rys. 3. Pierwszy eksperymentalny prostownik germanowy PG-03 (250 V, 300 A) dla trakcji elektrycznej kopalnianej. Opracowanie i wykonanie Instytut Elektrotechniki (1959-1960)**

W wyniku prowadzonych prac koncepcyjnych oraz badań modelowych zestawów i prostowników półprzewodnikowych uzyskano dane niezbędne do rozwiązania tak istotnych problemów konstrukcyjnych jak prawidłowy dobór układów do ochrony diod półprzewodnikowych od różnego rodzaju przebiegów oraz dobór układów i urządzeń zabezpieczających diody od prądów przetężeniowych (przeciążenia i zwarcia).

To ostatnie zagadnienie, którego prawidłowe rozwiązanie decyduje w głównej mierze o pewności działania prostownika półprzewodnikowego,



**Rys. 4. Dioda germanowa (100 A, 75 V) wykonana w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN**

wymagało opanowania metody koordynowania współpracy różnych urządzeń zabezpieczających takich jak: bezpieczniki topikowe ograniczające prąd zakłóceniuowy, zwierniki, małowabarytowe wyłączniki szybkie prądu stałego i wyłączniki prądu przemiennego. Niezbędnym warunkiem rozwiązania problemu koordynacji zabezpieczeń przetężeniowych – w celu uzyskania wymaganej przez rodzaj eksploatacji wybiórczości i selektywności działania zastosowanych urządzeń ochronnych – było opanowanie analitycznych metod wyznaczania prądów zwarciovych w układach prostowniczych z diodami półprzewodnikowymi, przy czym dla sprawdzenia metod rachunkowych wykorzystywano wyniki eksperymentalnych prób zwarciovych.

Rezultaty prac naukowo-badawczych prowadzonych w tym zakresie, jak również doświadczenia uzyskane przy budowie, badaniach laboratoryjnych i eksperymentalnych szeregu modelowych konstrukcji prostowników półprzewodnikowych – przyniosły z jednej strony potwierdzenie słuszności opracowanych podstaw projektowania, z drugiej zaś dały wskazówki niezbędne do dalszych ulepszeń układowych i konstrukcyjnych przydatnych szczególnie przy przekazywaniu wyników prac Instytutu Elektrotechniki do zakładów przemysłowych przygotowujących produkcję krajowych prostowników półprzewodnikowych, a mianowicie do:

- Fabryki Transformatorów i Aparatury Trakcyjnej ELTA w Łodzi;
- Bielańskiej Fabryki Prostowników w Bielawie;
- Mikołowskiej Fabryki Transformatorów w Mikołowie.

Większość konstrukcji prostowników półprzewodnikowych produkowanych wówczas w kraju powstała w oparciu o podstawowe prace naukowo-badawcze prowadzone w Instytucie Elektrotechniki w naświetlonym poprzednio zakresie. Niezależnie Instytut Elektrotechniki opracowywał niektóre założenia konstrukcji, brał udział we wstępnych opracowaniach projektowych poszczególnych prostowników, organizował krótkoterminowe praktyki na własnym terenie dla przedstawicieli zainteresowanych wytwórni, prowadził konsultacje w fabrycznych biurach konstrukcyjnych, opiniował dokumentację techniczną, opracowywał programy i metodykę badań oraz przeprowadzał próby laboratoryjne większości prototypowych zespołów prostownikowych z diodami półprzewodnikowymi, wydając ocenę o tych konstrukcjach. Uczestniczył również w pracach rozruchowych podczas przekazywania odbiorcom prostowników krzemowych o poważniejszym znaczeniu (w tym także importowanych).

Zgromadzone doświadczenia z przeprowadzonych badań konstrukcyjnych, laboratoryjnych i eksploatacyjnych modeli oraz prototypów prostowników germanowych i krzemowych umożliwiły opracowanie w Instytucie Elektrotechniki projektu polskiej normy PN-67/E „Zespoły prostownikowe z diodami półprzewodnikowymi. Wymagania i badania techniczne”.

## 5. KORZYŚCI Z ZASTOSOWANIA PROSTOWNIKÓW KRZEMOWYCH NA PODSTACJACH TRAKCYJNYCH PRĄDU STAŁEGO

---

Do 1970 r. na podstacjach trakcyjnych prądu stałego stosowane były powszechnie zespoły prostownikowe z zaworami rtęciowymi. W miarę doskonalenia prostowników krzemowych, ujawnione ich zalety stworzyły przesłanki techniczne dla wprowadzenia tych rozwiązań również na podstacjach trakcyjnych w całym zakresie napięć od 250 V (trakcja dołowa) do 3300 V (trakcja kolejowa). W celu zobrazowania przydatności prostowników krzemowych do eksploatacji na podstacjach trakcyjnych można wymienić te ich zalety w porównaniu do prostowników rtęciowych, które w danym przypadku miały najistotniejsze znaczenie:

- **Natychmiastowa gotowość do pracy.** Prostownik krzemowy może być w zakresie temperatury otoczenia od  $-40$  do  $+40$  °C obciążony natychmiast w granicach deklarowanej przeciążalności prądowej. Przed uruchomieniem prostownika krzemowego nie są potrzebne żadne wstępne zabiegi, które były niezbędne w przypadku prostowników rtęciowych.
- **Prostota budowy i swoboda ukształtowania konstrukcji,** małe rozmiary i masa na jednostkę mocy. Część zaworową prostownika krzemowego stanowią zazwyczaj szafy diodowe, w których diody zgrupowane są w zestawach połączonych między sobą. Stwarza to dość poważną swobodę ukształtowania konstrukcyjnego szafy, także i dzięki temu, że najczęściej poza wentylatorami szafy te nie zawierają urządzeń pomocniczych (nie licząc drobnych elementów, jak niewielkie kondensatory, rezystory i lampki sygnalizacyjne).
- **Prostota obsługi i konserwacji, łatwość automatyzacji.** Wobec niewielkiej liczby urządzeń i układów pomocniczych, zalety w tym względzie są oczywiste. Konserwacja ogranicza się zazwyczaj do okresowej kontroli stanu diod. Wymiana diody w przypadku jej uszkodzenia może być dokonana w bardzo krótkim czasie bez potrzeby angażowania wykwalifikowanego personelu. Łatwość automatyzacji decyduje o szczególnej przydatności tych prostowników do eksploatacji bez obsługi stałej w systemie sterowania zdalnego.
- **Wysoka sprawność.** Przy napięciu 250 V prostowniki krzemowe wykazują sprawność wyższą o około 8 – 9 % od prostowników rtęciowych, przy napięciu 660 V – o około 3 – 4 %, zaś przy napięciu 3,3 kV – o około 2 %.

- **Pewność działania i trwałość.** W przypadku zastosowania diod dobrej jakości oraz prawidłowego układu zabezpieczeń, pewność działania prostowników krzemowych jest większa niż prostowników rtęciowych. Budowa prostowników krzemowych umożliwia wprowadzenie pewnej liczby dodatkowych diod, co w wielu przypadkach pozwala obciążać prostownik pełną mocą również w razie uszkodzenia jednej lub kilku diod. Tym sposobem może być realizowany system rozłożonej rezerwy mocy na podstacjach. Trwałość prostownika krzemowego, o której decyduje trwałość diod, była określana – raczej ostrożnie – jako nie mniejsza niż trwałość transformatora prostownikowego (30 – 40 lat).
- **Odporność na wstrząsy i inne narażenia mechaniczne.** Ze względu na dużą oporność diod na wstrząsy i wibracje prostowniki krzemowe nadają się dobrze do zastosowania w podstacjach przewoźnych, jak również na taborze ruchomym.

Zagadnienie celowości wprowadzania prostowników krzemowych na podstacje trakcyjne w kraju było analizowane w Instytucie Elektrotechniki, w szczególności dla zastosowania ich na podstacjach PKP. Pozytywne wyniki rozważań były podstawą dla rozpoczęcia prac zmierzających do uruchomienia seryjnej produkcji prostowników krzemowych przeznaczonych do tego celu. Dokonywana przy tej okazji analiza cen zespołów prostownikowych z zaworami rtęciowymi i z diodami krzemowymi wskazywała, że ceny tych ostatnich powinny ustabilizować się na poziomie zbliżonym lub nawet nieco niższym od poziomu cen zespołów z zaworami rtęciowymi.

## 6. PODSTAWOWE ZAGADNIENIA W KONSTRUKCJI PROSTOWNIKÓW KRZEMOWYCH DLA PODSTACJI TRAKCYJNYCH PRĄDU STAŁEGO

---

Prostowniki krzemowe przeznaczone do zasilania trakcji elektrycznej powinny być dostosowane do znoszenia nagłych i bardzo zmiennych obciążeń prądowych przy zachowaniu wysokiej pewności działania. Chwilowa moc pobierana z prostownika może w krańcowych przypadkach kilkakrotnie przekroczyć średnią wartość dobową oraz w pewnych okresach może być bliska zeru.

Te ciężkie warunki pracy muszą być brane pod uwagę przy wyborze najodpowiedniejszego typu diod krzemowych, które powinny być szczególnie odporne na nagłe i duże wahania temperatur złącz PN, co przy różnych współ-

czynnikach rozszerzalności cieplnej materiałów wchodzących w skład diod, powoduje powstawanie zmiennych naprężeń, mogących powodować występowanie zjawisk zmęczenia szczególnie przy zastosowaniu lutów miękkich w technologii diod. Zmęczenie materiału może odbijać się ujemnie na trwałości diod krzemowych.

Ponadto prostowniki krzemowe pracujące w trakcji elektrycznej były narażone na stosunkowo częste zwarcia zwłaszcza w obwodzie prądu stałego, co wymagało odpowiedniego doboru urządzeń zabezpieczających od prądów zakłóceniovych.

## 7. KRAJOWE KONSTRUKCJE PROSTOWNIKÓW KRZEMOWYCH DLA PODSTACJI TRAKCYJNYCH

---

W tabeli 1 zestawiono podstawowe parametry pierwszych prostowników krzemowych dla podstacji trakcyjnych, opracowanych w kraju, których została uruchomiona produkcja seryjna, wykonano prototypy lub zespoły eksperymentalne. Rozważano jednak celowość opracowania jeszcze nowych typów prostowników krzemowych w układzie sześciofazowym z dławikiem wyrównawczym na 660 V oraz 3,3 kV dla stopniowego zastępowania – w miarę zużycia – prostowników rtęciowych na istniejących podstacjach miejskich i kolejowych bez konieczności generalnej wymiany transformatorów.

### 7.1. Trakcja kopalniana (dołowa)

---

W dotychczasowym systemie zasilania dołowej sieci trakcyjnej stosowano dla całej kopalni lub dla jej poważnej części jedną stałą stację prostownikową dużej mocy, wyposażoną z reguły w prostowniki rtęciowe. Stacje te były umiejscowione w komorach w centralnym punkcie poboru mocy. W miarę postępu eksploatacji pokładów położenie stacji prostownikowej stawało się coraz mniej korzystne.

W Zakładach Konstrukcyjno-Mechanicznych Przemysłu Węglowego wspólnie z Instytutem Elektrotechniki opracowano automatyczne przewożne stacje prostownikowe typu APSa-100/6 250 V, 400 A do zasilania dołowej trakcji elektrycznej prądu stałego w kopalniach węgla kamiennego, rud żelaza i miedzi (rys. 5). Stacje te stanowiły oryginalną konstrukcję krajową, opierającą się na kilkuletnich doświadczeniach i pracach eksperymentalnych, prowadzonych w ośrodkach naukowo-badawczych, a następnie wdrożonych do seryjnej produkcji w Mikołowskiej Fabryce Transformatorów [23].

**TABELA 1**

Zestawienie podstawowych parametrów pierwszych krajowych prostowników krzemowych dla trakcji elektrycznej prądu stałego (1958-1966)

Lp	Producent	Typ	Napięcie zasilania transformatora prostownikowego	Moc znamionowa	Napięcie wyprostowane	Prąd wyprostowany	Wymiary gabarytowe szer × dł. × wys.	Ciężar	Uwagi
			kV	kW	V	A	Mm	kG	
1	MFT	APSPa-100/6	6	100	250	400	880 × 2015 × 1440	1200	Gabaryty i ciężar dotyczą całej stacji przelazowej
2	MFT	APSPa-250/250/6	6	250	250	1000	860 × 2505 × 1415	1800	Jak wyżej
3.	MFT	APSPa-240/600/6	6	240	600	400	860 × 2505 × 1415	1800	Jak wyżej
4.	ELTA	PK-06/0,66	15	400	660	600	1000 × 500 × 2000	200	Gabaryty i ciężar odnoszą się do szafy diodowej z chłodzeniem naturalnym
5.	ELTA	PK-12/0,66	15	800	660	1200	1200 × 1100 × 2000	500	Jak wyżej
6.	ELTA	PK-6,6/3,3	30	2200	3300	660	2100 × 800 × 2200	2100	Gabaryty i ciężar odnoszą się do dwóch szaf diodowych z chłodzeniem wymuszonym



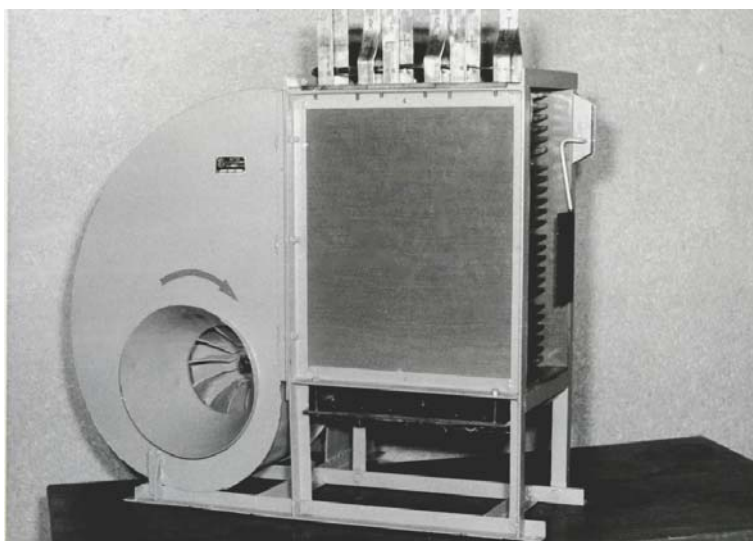
**Rys. 5. Automatyczna przewoźna stacja prostownikowa typu APSPA-100/6-250 (100 kW, 250 V). Opracowanie i wykonanie układu prostowniczego Instytut Elektrotechniki, opracowanie automatyki i wykonanie kompletnej stacji: Zakłady Konstrukcyjno-Mechanizacyjne Przemysłu Węglowego w Katowicach. Produkcja: Mikołowska Fabryka transformatorów**

Zastosowanie stacji przewoźnej dawało poważne oszczędności w przekrojach miedzi, zmniejszając równocześnie straty przesyłowe wskutek możliwości elastycznego instalowania ich w najkorzystniejszych punktach zasilania (blisko odbioru). Ponadto stała się zbędna w tym przypadku budowa kosztownych komór dla stacji prostownikowych. Przewoźne stacje wymagały niewiele miejsca i były lokowane w wyrobiskach, chwilowo niewykorzystanych korytarzach itp.

Zwarty układ we wspólnej obudowie na podwoziu kołowym dostosowanym do łatwego transportu poziomego i pionowego oraz eksploatacja bez obsługi dzięki jej pełnemu zautomatyzowaniu – to zalety stacji, które zdecydowały o szerokim zastosowaniu tego rozwiązania w polskim górnictwie węglowym.

Dane techniczne stacji prostownikowej typu APSAa-100/6 były następujące:

- |                         |  |
|-------------------------|--|
| • zasilanie             | $3 \times 6 \text{ kV} \pm 5\%$ , 50 Hz, |
| • moc znamionowa        | 100 kW,                                  |
| • napięcie wyprostowane | 250 V,                                   |
| • prąd wyprostowany     | 400 A,                                   |
| • przeciążalność        | 125 % – 15 min. 200% – 15 s,             |
| • sprawność             | 93 % (przy 400 A),                       |
| • współczynnik mocy     | 0,925 (przy 400 A).                      |



**Rys. 6. Zestaw prostowniczy z wentylatorem opracowany i wykonany w Instytucie Elektrotechniki do stacji APSPa-100/6-250 (rys. 5)**

Przewoźna stacja prostownikowa składała się podstawowo z transformatora, prostownika krzemowego (rys. 6), urządzeń automatyki, urządzeń prób linii i zabezpieczeń, zasilaczy trakcyjnych. Transformator suchy 113 kVA, 6000 V/200 V, w układzie połączeń gwiazda – gwiazda o napięciu zwarcia 6,7 % miał klasę izolacji B i ciężar 425 kG. Stacja została

wykonana w trójfazowym mostkowym układzie prostowniczym z zastosowaniem dwunastu krzemowych diod mocy typu S8AN125 150 A, 800 V (angielskiej firmy Westinghouse). Ochronę diod krzemowych przed przepięciami komutacyjnymi i łączeniowymi stanowią odpowiednio dobrane obwody tłumiące RC, natomiast przed nadmiernym wzrostem temperatury powietrza chłodzącego – termometr kontaktowy działający na wyzwalacze zanikowe wyłączników szybkich prądu stałego. Dla ochrony diod od zwarć wewnętrznych zainstalowano bezpieczniki typu BU-Wts/200.

Po stronie prądu wyprostowanego stacja została wyposażona w dwa zasilacze trakcyjne, jeden odpływ do przewodów powrotnych, układ próby linii oraz układ samoczynnego powtórnego załączania z obwodami zdalnej sygnalizacji stanu prostowników. Zasilacze trakcyjne zostały wyposażone w wyłączniki szybkie prądu stałego WSPS-400 produkcji fabryki APENA, które posiadają czas własny 1,5 ms przy początkowej stromości prądu zwarciovego większej od 500 A/ms, zaś całkowity czas działania nie większy niż 6 ms w obwodach praktycznie bezindukcyjnych. Ciężar wyłącznika wynosi 42 kG. Do pierwszych stacji APSa-100/6 były stosowane opracowane w IEL i produkowane we własnym Zakładzie Doświadczalnym wyłączniki szybkie prądu stałego [24].

Wyzwalacze elektromagnetyczne wyłączników szybkich prądu stałego WSPS-400 stanowiły zabezpieczenie przeciążeniowe oraz zwarciovowe w przypadku zwarcia w pobliżu stacji, natomiast układ zabezpieczenia różniczkującego zabezpieczał przed zwarciami odległymi od stacji o prądach mniejszych od znamionowego prądu zasilania. Sterowanie wyłączników szybkich odbywało się samoczynnie przez układ SPZ z uprzednią próbą linii. Komplet urządzeń

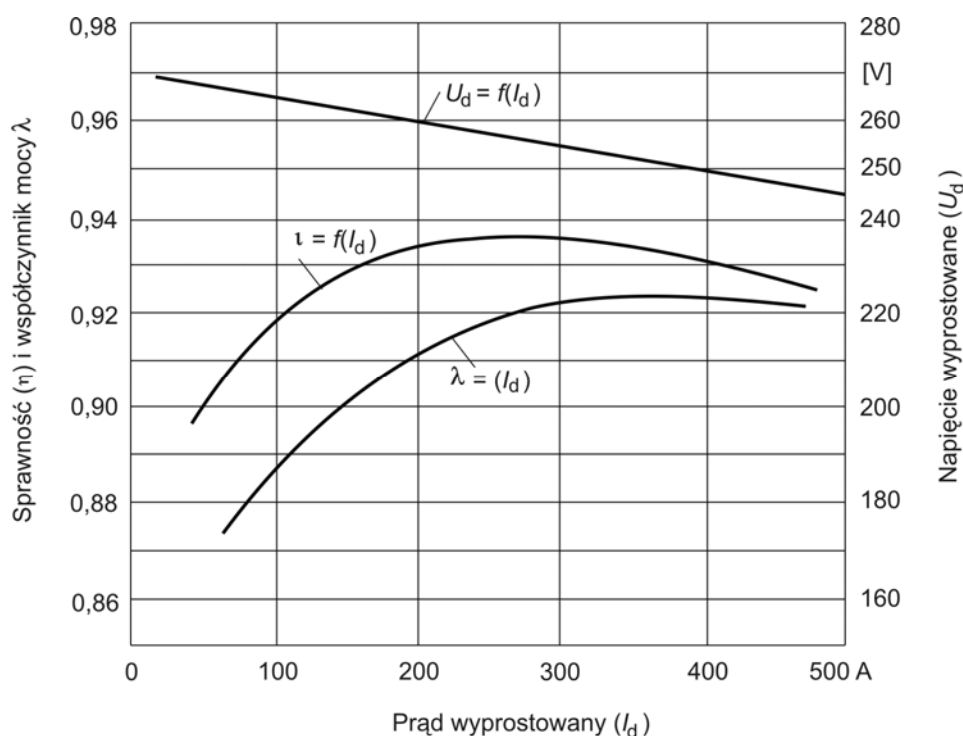


stacji został zmontowany we wspólnej pyłoszczelnej obudowie na podwoziu kołowym dostosowanym do łatwego transportu w przekopach i chodnikach kopalnianych.

W celu pełnego pokrycia zapotrzebowania na stacje przewoźne zostały opracowane dwa typy tego rodzaju urządzeń, a mianowicie stacja APSPa-250/250/6, 250 V, 1000 A dla kopalń o większej koncentracji wydobycia oraz stacja APSPa-240/600/6, 600 A do zasilania dołowej trakcji elektrycznej 600 V, która ma perspektywy rozwoju w kopalniach o największym wydobyciu dobowym.

Do roku 1967 w polskim górnictwie pracowało już ponad 250 automatycznych przewoźnych stacji prostownikowych typu APSPa-100/6, a działanie ich nie nasuwało żadnych zastrzeżeń ruchowo-eksploatacyjnych.

Automatyczne przewoźne stacje prostownikowe (rys. 5.) stanowiły jedno z najnowocześniejszych urządzeń zasilających w dołowej trakcji elektrycznej 250 V prądu stałego w skali światowej elektrotechniki górniczej [25]. Pozwalały one na rozwiązanie transportu o dużej masie przewozowej i długich drogach przy zachowaniu wysokich wskaźników techniczno-ekonomicznych. Na rysunku 7 przedstawiono podstawowe charakterystyki eksploatacyjne przewoźnej stacji prostownikowej o mocy 100 kW.



**Rys. 7.** Charakterystyki eksploatacyjne automatycznej przewoźnej stacji prostownikowej typu APSPa-100/250/6 (100 kW, 250 V, 400 A)

Opracowanie i wdrożenie tych stacji było dobrym przykładem prawidłowego współdziałania zaplecza naukowo-badawczego z producentem stacji i użytkownikami przy rozwiązywaniu problemu niezbędnego dla przemysłu węglowego. W wyniku wdrożenia w pełni sprawdzonej innowacji już po roku od uruchomienia produkcji było pokrywane w całości krajowe zapotrzebowanie na ten wyrób. W okresie szczytowego wydobycia węgla we wszystkich kopalniach pracowało ponad 1500 stacji zasilających trakcję dołową.

## 7.2. Podstacje trakcji miejskiej

Korzyści z zastosowania prostowników krzemowych w komunikacji miejskiej uwidocznione są najbardziej w przypadku instalowania ich w podstacjach kioskowych. Pomieszczenie takiej podstacji wykonuje się w formie lekkiej konstrukcji blaszanej wzmocnionej kątownikiem.

W podstacji kioskowej wyodrębnia się rozdzielnię prądu zmiennego z wyłącznikiem średniego napięcia, pomieszczenie transformatora, prostownika krzemowego oraz rozdzielnię prądu stałego z komorami na szybkie wyłączniki zasilaczowe. Podstacja taka nie wymaga ogrzewania i powinna być dostosowana do sterowania zdalnego.

W Fabryce ELTA przy udziale Instytutu Elektrotechniki w zakresie projektowania i badań laboratoryjnych opracowane zostały dwa warianty konstrukcyjne zespołów prostownikowych z diodami krzemowymi dla komunikacji miejskiej o następujących danych technicznych:

• typ prostownika	PK-12/0,66	PK-06/0,66
• napięcie zasilania zespołu	15 kV $\pm$ 5 %	15 kV $\pm$ 5 %
• moc znamionowa	800 kW	400 kW
• napięcie wyprostowane	660 V	660 V
• prąd wyprostowany	1200 A	600 A
• przeciążalność zespołu:		
15 minut	1,25 $I_n$	1,25 $I_n$
10 sekund	2 $I_n$	2 $I_n$
• maksymalna temperatura otoczenia	+ 40°C	+ 40°C

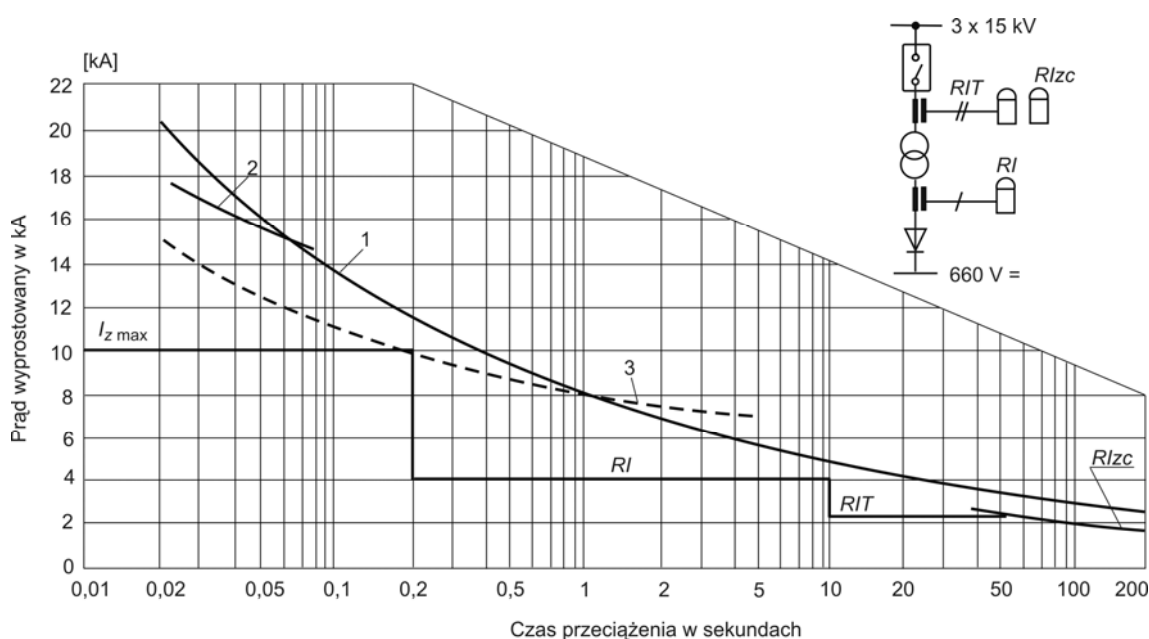
Zespół z prostownikiem PK-12/0,66 był zasilany z transformatora olejowego TONZ-3/900/15. Zastosowany trójfazowy mostkowy układ prostowniczy zmontowany łącznie z 96 diod krzemowych typu S12AN125 na prąd 140 A i napięcie graniczne 1200 V (angielskiej firmy Westinghouse). W każdym ramieniu mostka jest połączonych 8 gałęzi równoległych po 2 diody szeregowo. Każde dwie diody połączone szeregowo zabezpieczone są specjalnym bezpiecznikiem szybkim typu GS1000/200 (English Electric) z równolegle załączo-

nym bezpiecznikiem sygnalizacyjnym typu GSL1000 działającym na mikro-wyłącznik typu MPz.

Szafa diodowa o wymiarach  $1,2 \times 1 \times 2$  m i masie 500 kG jest typu wolnostojącego z dwustronnymi drzwiami. W szafie znajduje się 6 zestawów diodowych, zawierających po 16 diod krzemowych przykręconych do indywidualnych radiatorów aluminiowych o dużej powierzchni chłodzenia. Pod względem elektrycznym zestaw 16 diodowy stanowi jedno ramię mostka. Sześć zestawów diodowych montowanych razem można umieścić w szafie (wersja stacyjna) lub bezpośrednio na konstrukcji nośnej w komorze kiosku (wersja kioskowa).

Zestawy diodowe są przewidziane do chłodzenia naturalnego z wyeliminowaniem wentylatora, który stanowił zazwyczaj jedyną część wirującą w szafach prostowniczych z diodami krzemowymi i był nieraz powodem zakłóceń akustycznych w pomieszczeniu stacyjnym. Ustawienie prostownika jest konieczne nad kanałem wentylacyjnym. Łączne straty w szafie diodowej wynoszą 6 kW (0,75 % mocy znamionowej).

Prostownik PK-12/0,66 zmontowany z 96 diod krzemowych może wytrzymać prąd zwarcia 10 kA w ciągu 200 ms (rys. 8.). Ochrona od przeciążeń z uwzględnieniem deklarowanej przeciążalności została zrealizowana w sposób konwencjonalny za pomocą odpowiednich przekaźników prądowych pobudzanych z przekładników. Zastosowano wyłączniki szybkie typu WSe w zasilaczach trakcyjnych.



**Rys. 8. Koordynacja zabezpieczeń nadprądowych prostownika krzemowego typu PK-12/0,66:** 1 – charakterystyka przeciążalności prostownika, 2 – charakterystyka prądowo-czasowa bezpieczników diodowych GS-1000/200, 3 – charakterystyka prądowo-czasowa bezpieczników diodowych GS-1000/150

Prostownik PK-06/0,66 został również opracowany w układzie trójfazowym mostkowym, zawierającym łącznie 48 diod krzemowych tego samego typu. Zasilanie odbywa się z transformatora olejowego. Konstrukcja jego jest analogiczna jak prostownika PK-12/0,66.

Obie opisane konstrukcje zrealizowane zostały jako prostowniki eksperymentalne i przeszły z pozytywnym wynikiem badania laboratoryjne. Prostownik typu PK-12/0,66 zainstalowany został do eksploatacji próbnej na jednej z podstacji trakcyjnych w Łodzi, gdzie wykazał swoje walory użytkowe przy pełnej akceptacji dozoru. Prostowniki te weszły do produkcji seryjnej.

### 7.3. Podstacje Polskich Kolei Państwowych

Opracowane w końcu 1964 r. w Instytucie Elektrotechniki analizy techniczno-ekonomiczne potwierdziły przewidywane korzyści z wprowadzenia prostowników krzemowych na podstacjach PKP o napięciu 3300 V. W roku 1965 opracowana została dokumentacja techniczna, a w roku 1966 wykonany został w Fabryce ELTA eksperymentalny zespół z prostownikiem krzemowym dla potrzeb podstacji trakcyjnych PKP. Po uzyskaniu pozytywnych wyników badań laboratoryjnych zespół ten przekazany został do kilkumiesięcznej eksploatacji próbnej. W roku 1967 wykonano kilka zespołów tego rodzaju, z uwzględnieniem doświadczeń zebranych podczas eksploatacji próbnej i badań laboratoryjnych zespołu eksperymentalnego.

Eksperymentalny zespół o mocy znamionowej 2180 kW i prądzie znamionowym 660 A z przeciążalnością wg klasy VIb zaleceń IEC (150%  $I_n$  – 2 godz., 200%  $I_n$  – 5 min.) obejmował transformator prostownikowy typu TONZ-3/3-3600/35 o mocy znamionowej 2400 kVA oraz prostownik krzemowy typu PK-0,66/3,3 składający się z dwóch szaf diodowych i jednej szafy aparatuwej. Zastosowano diody krzemowe firmy Westinghouse typu S12AN125 o prądzie znamionowym 150 A i napięciu granicznym 1200 V. W każdym ramieniu trójfazowego układu mostkowego, w którym wykonano prostownik, znajdowało się 10 diod połączonych szeregowo i 8 diod połączonych równolegle. Łączna liczba diod w prostowniku wynosiła 480. Wymiary gabarytowe zestawionych dwu szaf diodowych miały 2500 × 800 × 2100 mm, łączny ich ciężar około 2100 kG.

Prostownik zaprojektowano w taki sposób, aby wytrzymywał prąd zwarcia o wartości ustalonej do 10 kA przez okres czasu wystarczający do zlikwidowania zwarcia przez wyłącznik prądu przemiennego zespołu (160 – 200 milisekund). W związku z tym nie zachodzi potrzeba stosowania wyłącznika szybkiego prądu stałego jako wyłącznika zespołu. Prostownik zawiera układ detekcyjny do wykrywania przebitych diod. Diody w prostowniku zostały zmon-

towane na zbiorczych radiatorach, chłodzonych wymuszonym podmuchem powietrza o prędkości około 3 m/sek. Z dwu szaf diodowych każda zawierała grupę diod związanych tylko z jednym z biegunów wyjściowych prostownika.

Wprowadzenie do techniki prostowników półprzewodnikowych z diodami krzemowymi stworzyło możliwość poważnej modernizacji również w dziedzinie urządzeń przekształtnikowych do zasilania sieci trakcyjnych zelektryfikowanego transportu dołowego, miejskiego i kolejowego. Podjęte w roku 1958 w Instytucie Elektrotechniki prace badawcze zmierzające do opanowania zasad wykorzystania diod monokrystalicznych w prostownikach dla celów energoelektronicznych, stworzyły podstawy konstrukcji tych nowoczesnych urządzeń [21].

Praktyczne wdrożenie tych prac w przemyśle elektrotechnicznym począwszy od roku 1962 przyczyniło się do przygotowania produkcji przemysłowej prostowników krzemowych dla różnorodnych zastosowań, a w szczególności dla potrzeb podstacji trakcyjnych, komunikacji miejskiej i kolejowej.

## 8. MODYFIKACJE PROSTOWNIKÓW DO PODSTACJI TRAKCYJNYCH PKP

---

Perspektywiczne potrzeby eksploatacyjno-przewozowe PKP związane z planowanym wprowadzeniem do ruchu ciężkich pociągów towarowych (do 5 tys. ton) i ekspresowych dla ruchu międzymiastowego (do 200 km/h) oraz elektrycznych zespołów trakcyjnych o dużym przyśpieszeniu dla ruchu podmiejskiego – uwarunkowały potrzebę opracowania jakościowo nowych prostowników diodowych, przeznaczonych dla podstacji trakcyjnych zasilających sieć jezdnią 3,3 kV [26].

Niezbędność modyfikacji prostowników wynikała również z konieczności ograniczenia szkodliwego oddziaływania na sieć energetyczną zaburzeń generowanych również przez prostowniki diodowe zgrupowane na podstacjach trakcyjnych. Zagadnienia te stawały się istotne w większych aglomeracjach i okręgach przemysłowych i wiązały się także z powstawaniem norm międzynarodowych określających wymagane poziomy kompatybilności elektromagnetycznej dotyczące urządzeń energoelektronicznych instalowanych w różnych środowiskach [27].

Wreszcie jednolitego podejścia wymagała sprawa dopuszczalnych przeciążalności roboczych prądowych prostowników diodowych przewidzianych do pracy w warunkach zmiennej w czasie obciążalności. O dopuszczalnej przeciążalności prądowej zespołu prostownikowego podstawowo decyduje przeciążal-

ność jego prostownika diodowego, a przede wszystkim zdolność obciążeniowa w czasie zastosowanych diod krzemowych i przyjętego systemu ich chłodzenia.

W porozumieniu z resortem kolei opracowano w IEL dwa identyczne pod względem konstrukcyjnym prostowniki diodowe o 12-fazowej pulsacji napięcia wyprostowanego różniące się pod względem mocy znamionowej. Koncepcja wynikała z możliwości stosowania tych samych prostowników na podstacjach o różnym charakterze obciążenia trakcyjnego, charakterystycznego dla podstacji węzłowych bądź szlakowych, zasilających linie o ruchu podmiejskim, towarowym lub dalekobieżnym. Charakterystyki zewnętrzne (napięciowo-prądowe) tych zespołów prostownikowych zostały tak zaprojektowane, aby istniała możliwość równoległej pracy obu zespołów w tej samej podstacji trakcyjnej, co pozwalało na uzyskanie żądanej jej mocy dyspozycyjnej w zależności od potrzeb ruchowych. Opracowano również metodę analityczno-graficzną do określania przeciążalności prostowników o naturalnym chłodzeniu. Jest ona bardzo przydatna zarówno podczas prac projektowych jak i przy prowadzeniu racjonalnej eksploatacji prostowników na podstacjach trakcyjnych [28].

Prostowniki diodowe o 12-fazowej pulsacji napięcia wyprostowanego [29] zostały wdrożone do produkcji w fabryce ELTA (1985 r.). Instytut Elektrotechniki uczestniczył przy badaniach prototypów tych urządzeń i wstępnej ich eksploatacji na podstacjach trakcyjnych. W wyniku badań zaistniała konieczność wprowadzenia zmiany konstrukcyjnej klamry dociskającej obie części radiatora do diody w obudowie pastylkowej. Pozwoliło to na pełne wykorzystanie obciążalności prądowej diod w całym zakresie dopuszczalnych temperatur. Te prostowniki były podstawowo przeznaczone dla potrzeb trakcji elektrycznej PKP o napięciu 3,3 kV prądu stałego i dawały resortowi kolei możliwość wyposażenia nowo budowanych i modernizowanych podstacji w nowoczesne, ekonomiczne i o szerokim przedziale mocy (tab. 2) – źródła zasilania sieci trakcyjnej. Najistotniejszą zaletą tych prostowników w odniesieniu do starych dotychczas eksploatowanych 6-fazowych było istotne zmniejszenie oddziaływania na zasilającą sieć energetyczną [30]. Zaleta ta, w związku z coraz większą liczbą urządzeń wrażliwych na tego rodzaju zakłócenia była zbieżna z międzynarodowymi normami IEC dotyczącymi dopuszczalnych zawartości wyższych harmonicznych prądu w sieci energetycznej, generowanych przez przekształtniki diodowe i tyrystorowe [31].

Podjęte w latach siedemdziesiątych w Instytucie Elektrotechniki oraz u przyszłego producenta w Fabryce ELTA w Łodzi, prace nad dokumentacją i wdrożeniem do produkcji nowych trakcyjnych przekształtników diodowych 12-fazowej pulsacji napięcia wyprostowanego, zostały zakończone wprowadzeniem ich do eksploatacji tylko dla potrzeb PKP. Natomiast prowadzone początkowo tego rodzaju prace z przeznaczeniem dla potrzeb komunikacji miejskiej zostały przerwane ze względu na brak zainteresowania użytkowników.

Natomiast na zlecenie Generalnej Dyrekcji Budowy Metra w Warszawie prowadzono prace nad zaprojektowaniem i wykonaniem prototypu przekształtnika diodowego o 12-fazowej pulsacji dla potrzeb pierwszej linii metra w Warszawie [32].

**TABELA 2**

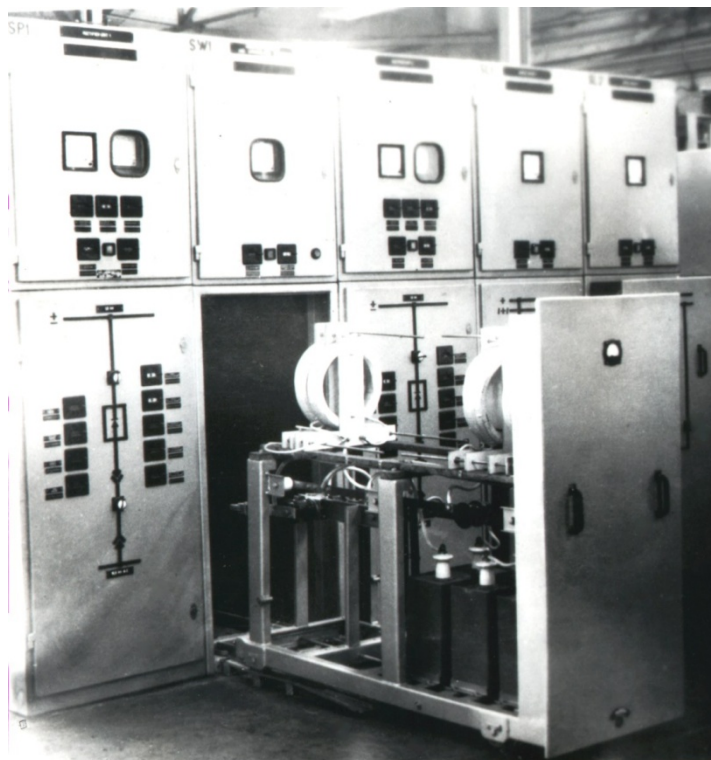
Zestawienie podstawowych parametrów zmodernizowanych krajowych prostowników krzemowych dla trakcji elektrycznej prądu stałego (1995...2005)

Nazwa parametru	Jednostka	Typ prostownika krzemowego			
		PD-1,7/3,3	PD-1,7/3,3	PD-2,4/0,825	PD-1,2/0,66
Napięcie zasilania transformatora prostownikowego	kV	110	15 lub 20	15	15
Napięcie wyprostowane	V	3300	3300	825	660
Prąd wyprostowany ciągle	A	1700	1700	2400	1200
Wytrzymałość zwarciova	kA/ms	41/20 28/200	41/20 28/200	40/20 25/200	25/20 20/200
Wytrzymałość przepięciowa	kV	21	21	4	4
Wymiary gabarytowe	m	3,6 × 1,0 h = 2,2	3,6 × 1,0 h = 2,2	1,0 × 0,8 h = 2,1	1,0 × 0,8 h = 1,9
Masa	kg	1450	1450	500	400

## 9. REZONANSOWE URZĄDZENIA WYGŁADZAJĄCE

Poprawna praca pierwszych prostowników o pulsacji 6-fazowej wymagała wprowadzenia na podstawie trakcyjne odpowiednich urządzeń wygładzających. Urządzenia takie opracowano i wykonano w IEL (1958 r.). Składały się one z czterech filtrów rezonansowych 300, 600, 900 i 1200 Hz z opornikami rozładowującymi i zabezpieczeniami (rys. 9). Zastosowano specjalną konstrukcję dławików powietrznych o regulowanej indukcyjności i wysokonapięciowych (3 kV DC) kondensatorów obciążanych prądami o zwiększonej częstotliwości (do 1200 Hz). Po badaniach i wstępnej eksploatacji prototypów, produkcja prze-

mysłowa urządzeń wygładzających została zorganizowana w resorcie komunikacji (Przedsiębiorstwo Kolejowych Robót Elektryfikacyjnych). Wszystkie krajowe podstacje kolejowe mają takie urządzenia. W ramach dostaw kompleksowych wyposażenia podstacji, filtry były również eksportowane do Brazylii (1965 r.) i Egiptu (1967 r.).



**Rys. 9. Rezonansowe urządzenie wygładzające instalowane w rozdzielni na konstrukcji wysuwanej**

Nowe prostowniki diodowe o 12-fazowej pulsacji napięcia wyprostowanego wymagały opracowania i wdrożenia do produkcji odpowiednich rezonansowych urządzeń wygładzających oraz funkcjonalnie z nimi związanych bezrdzeniowych dławików wygładzających [33].

Uwzględniając fakt, że te prostowniki będą instalowane w podstacjach trakcyjnych nowych jak i istniejących modernizowanych – zaszła potrzeba opracowania zarówno pojedynczych urządzeń wygładzających współpracujących tylko z jednym przekształtnikiem jak i centralnych dla podstacji przystosowanych do współpracy z kilkoma prostownikami pracującymi równolegle. Oba te rodzaje urządzeń wygładzających zaprojektowano w IEL, natomiast wdrożenie ich do produkcji nastąpiło w Przedsiębiorstwie Kolejowych Robót Elektryfikacyjnych w Warszawie.



Jako pierwsze zostało opracowane i wykonane indywidualne urządzenie wygładzające typu UWK-2 przeznaczone do współpracy z jednym przekształtnikiem diodowym typu PD-16/3,3 lub PD-12/3,3 wyposażonym w dławik wygładzający o indukcyjności 1 mH. Jako drugie natomiast zostało opracowane i wykonane centralne urządzenie wygładzające typu CUW-1 przystosowane do współpracy maksymalnie z trzema omawianymi przekształtnikami, wyposażonymi w odpowiednie dla nich (o tych samych prądach znamionowych i klasach przeciążalności prądowej) dławiki wygładzające o jednakowej indukcyjności, wynoszącej 1,8 mH.

Zarówno indywidualne jak i centralne urządzenia wygładzające zostały tak zaprojektowane, że zgodnie z wymaganiami resortu kolei dla skrajnych warunków ich pracy spełniały one obowiązujące wówczas w PKP przepisy nieprzekraczania dopuszczalnego napięcia zakłócającego wynoszącego 0,5 % roboczego napięcia wyprostowanego.

Niezbędnym elementem poprawnej pracy rezonansowych urządzeń wygładzających jest bezrdzeniowy dławik wygładzający, włączony szeregowo w tor prądowy [34], zwykle o biegunowości dodatniej za przekształtnikiem. Ponadto dławik taki powoduje zmniejszenie stromości narastania prądu w razie powstawania zwarcia na szynach prądu stałego podstacji, lub na odcinku zasilania sieci trakcyjnej, co nie było bez znaczenia dla eksploatowanych przez PKP zasilaczowych wyłączników szybkich prądu stałego typu WSe. Fabryka ELTA zaprojektowała i wykonała dławik wygładzający o indukcyjności 1,8 mH przystosowany do współpracy z obu przekształtnikami.

## 10. ZESPOŁY PROSTOWNIKOWE NOWEJ GENERACJI

Opracowane w Instytucie Elektrotechniki (IEL) i wdrożone w 1985 r. do produkcji seryjnej w ówczesnej Fabryce „ELTA” w Łodzi trakcyjne zespoły prostownikowe o 12-fazowej pulsacji napięcia wyprostowanego typu PD-16/3,3 i PD-12/3,3 [35, 36] są eksploatowane na sieci PKP od prawie 20 lat. Zespoły te z trójzwojowymi transformatorami prostownikowymi o mocach 5,85 MVA i 4,4 MVA i gwarantowanych napięciach zwarcia 8% są zasilane liniami średniego napięcia (15 kV lub 20 kV). Spełniają one wymagania energetyki w zakresie dopuszczalnej wielkości współczynnika odkształcenia napięcia w linii zasilającej.

Prostowniki tych zespołów o układzie dwóch szeregowo połączonych 3-faz. mostków zostały wykonane z krajowych (Lamina) modułów diodowych

typu MOD9P-1600-20-T i MOD9P-1000-20-T. Prostowniki te posiadały sztywne połączenia pomiędzy modułami i szynami łączącymi, co miało ujemny wpływ na poprawną pracę na styku pastylkowej diody z aluminiowym radiatorem. Zastosowany w nich bezpośredni pomiar napięcia i prądu z tablicowymi miernikami nie daje możliwości komunikacji z systemem zdalnego sterowania. Trójzwojeniowe (Y/d11yo) olejowe transformatory prostownikowe tych zespołów o mocach 5850 kVA i 4400 kVA przy napięciach zasilania  $3 \times 15$  kV lub  $3 \times 20$  kV i gwarantowanym napięciu zwarcia 8 % są wyposażone w beznapięciowy 5 pozycyjny przełącznik zaczełów umożliwiający tylko ręczne przełączanie zaczełów w zakresie od - 2,5 % do + 7,5 %.

### 10.1. Zespoły prostownikowe dla linii trakcyjnych 3 kv dc szybkiego ruchu

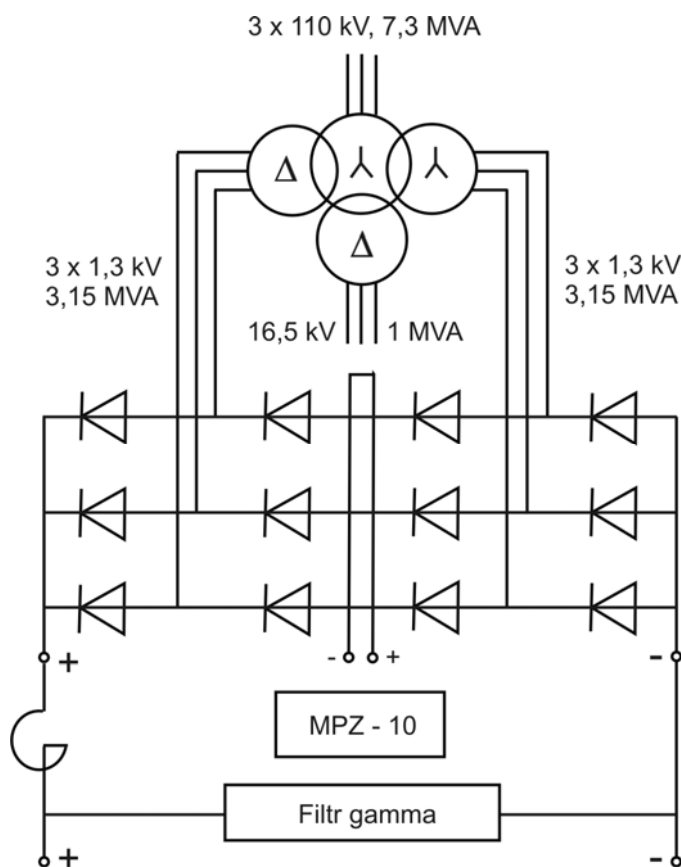
Z przeprowadzonych w końcu lat dziewięćdziesiątych przez specjalistyczne ośrodki naukowo-badawcze szeregu analiz technicznych i symulacji komputerowych wynika, że podstacje trakcyjne wyposażone w zespoły PD-16/3,3 i PD-12/3,3 nie mogą zapewnić wymaganego dla linii szybkiego ruchu wystarczającego obciążenia, a w szczególności dotrzymania dopuszczalnego zakresu wahań napięcia w sieci trakcyjnej. Podstawowym powodem powyższego jest zbyt silne nachylenie charakterystyki  $U_d = f(I_d)$ , wynikające z przebiegu charakterystyk zewnętrznych ich zespołów prostownikowych oraz stosunkowo dużych spadków napięcia w typowych liniach zasilających średniego napięcia, a w szczególności liniach napowietrznych.

Celem uzyskania znaczącego zmniejszenia wpływu spadku napięcia w liniach zasilających podstacje trakcyjne, na zakres wahań napięcia w sieciach trakcyjnych, został przez PKP przyjęty wariant zasilania podstacji trakcyjnej napięciem 110 kV. Przyjęcie takiego rozwiązania związane było między innymi z koniecznością opracowania, wykonania i przebadania nowego 12-pulsowego zespołu prostownikowego z czterozwojeniowym transformatorem o mocy 7,3 MVA zasilanym bezpośrednio z sieci wysokiego napięcia 110 kV (rys. 10.). Zespół taki został nazwany zespołem z jednostopniową transformacją napięcia 110 kV AC/3 kV DC [37]. Transformator prostownikowy tego zespołu został zaprojektowany i wykonany przez fabrykę EMIT. Transformator ten oprócz dwóch wtórnych uzwojeń prostownikowych (gwiazda i trójkąt) o mocach po 3,15 MVA i napięciach zwarcia po 11 % ma dodatkowe trzecie uzwojenie wtórne o mocy 1 MVA i napięciu 16,5 kV przeznaczone do zasilania układu potrzeb własnych podstacji. Prostownik do tego zespołu został opracowany, wykonany i zbadany w Instytucie Elektrotechniki (rys. 11) oraz zainstalowany na podstacji PKP Huta Zawadzka.

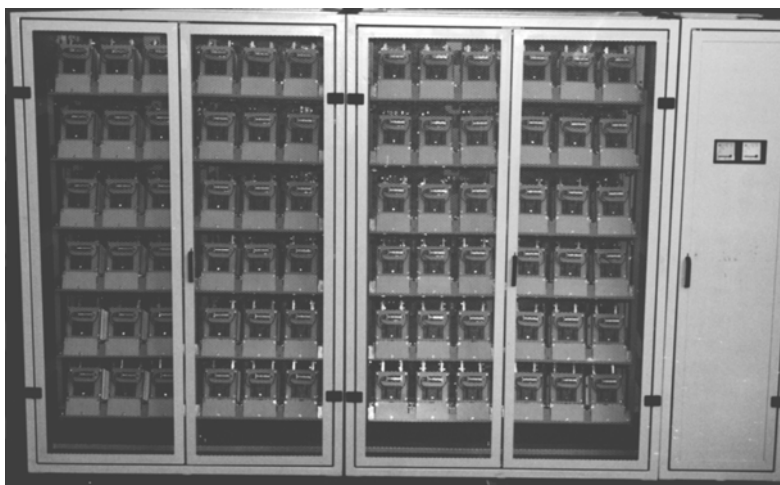
Z uwagi na to, iż nie w każdym przypadku modernizowanych linii kolejowych, a w szczególności szybko ruchu (do 200 km/godz.), będzie istniała możliwość zapewnienia zasilania podstacji trakcyjnych tych linii napięciem 110 kV, zaistniała technicznie uzasadniona potrzeba opracowania nowych 12-pulsowych zespołów prostownikowych dla podstacji trakcyjnych posiadających tylko możliwość zasilania ich średnim napięciem 15 kV lub 20 kV. Zespoły takie celem uzyskania istotnego wpływu na wielkość zakresu wahań napięcia w sieci trakcyjnej charakteryzują się następującymi cechami:

- posiadają taką samą obciążalność znamionową i klasę przeciążalności prądowej jaką posiadają zespoły prostownikowe z jednostopniową transformacją napięcia 110/3 kV;
- zapewniają mniejsze pochylenie charakterystyki zewnętrznej co oznacza, że transformatory prostownikowe tych zespołów posiadają mniejsze procentowe napięcie zwarcia. Wartość tego napięcia wyznaczona obliczeniowo i potwierdzona na drodze odpowiednich symulacji komputerowych została określona na 6 %;
- transformatory prostownikowe po stronie zasilania są wyposażone w wielopozycyjne przełączniki zaczepek pod obciążeniem.

Ze względów techniczno-ekonomicznych przyjęto, że zespół prostownikowy zasilany średnim napięciem posiadać będzie taki sam prostownik diodowy jak zespół zasilany wysokim napięciem. Oznacza to, że parametry obciążeniowe jak i przeciążeniowe tych zespołów będą takie same, ponieważ o parametrach tych podstawowo decydują użyte do jego budowy diody i zastosowany sposób ich chłodzenia [38, 39]. Ponadto wskazane jest, aby linie zasilające



Rys. 10. Schemat ideowy zespołu prostownikowego ZP-1,7/3,3 (1700 A, 3300 V) zasilanego z linii 110 kV



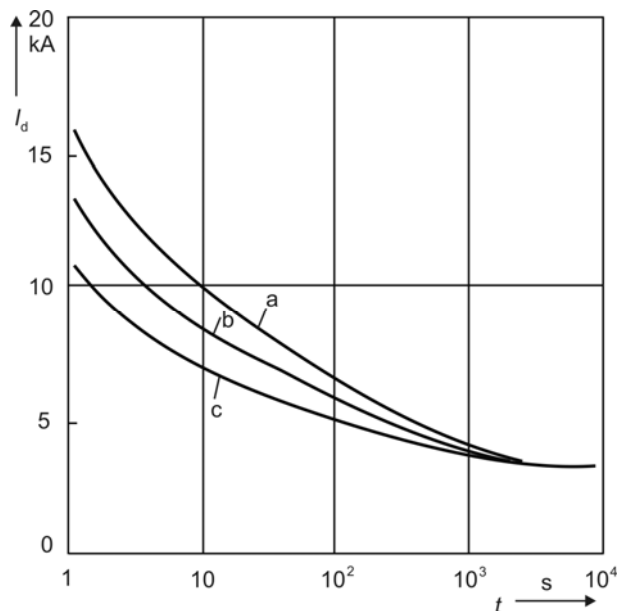
**Rys. 11. Prostownik diodowy PD-1,7/3,3 (1700 A, 3300 V) dla kolejowych podstacji trakcyjnych zasilających linie szybkiego ruchu przy jednostopniowej transformacji napięcia z sieci 110 kV. Opracowanie, wykonanie, badania i uruchomienie – Instytut Elektrotechniki**

podstacje trakcyjne były liniami kablowymi, lub wzmocnionymi liniami napowietrznymi (większy przekrój czy inny rodzaj przewodu). Zgodnie z wymaganiami PKP opracowane przez Instytut Elektrotechniki zespoły prostownikowe ZP-1,7/3,3 (zasilane napięciem 110 kV) jak i zespoły ZP-1,7/3,3 (zasilane napięciem 15 kV lub 20 kV), zo-

stały wyznaczonowane w dwóch klasach przeciążalności prądowej (rys. 12):

Do budowy tych prostowników zastosowano diody nowej generacji o napięciu  $U_{RRM} = 2500$  V, prądu  $I_{F(AV)} = 3000$  A i dopuszczalnym prądzie przeciążenia  $I_{FSM} = 26$  kA. Pozwoliło to zwiększyć moc ciągłą prostownika do 7,3 MW, a także jego przeciążalność prądową do poziomu wystarczającego do współpracy z transformatorem o napięciu zwarcia równym 6%. Należy podkreślić, że efekty te uzyskano przy czterokrotnie mniejszej liczbie diod prostownika (72 diody) w stosunku do rozwiązania stosowanego w poprzednich latach. Zespoły tego rodzaju zostały zainstalowane na modernizowanej podstacji trakcyjnej w Mińsku Mazowieckim a ich walory eksploatacyjne uzyskały wysoką ocenę użytkownika.

Równocześnie opracowany został prostownik prze-



**Rys. 12. Przeciążalność roboczą prostownika PD-1,7/3,3 (1700 A, 3300 V): a) przy zasilaniu z sieci 15; lub 20 kV i obciążalności 1100 A; b) przy zasilaniu z sieci 110 kV i obciążalności 1700 A; c) przy obciążalności 2100 A**

znaczony dla kolejowych podstacji kontenerowych. W prostowniku tym przewidziano diody o prądzie  $I_{F(AV)} = 4000$  A, co pozwoliło ograniczyć liczbę tych elementów do 36 lub 24 przy parametrach odpowiadających parametrom rozwiązania omówionego powyżej. Prostownika tego jednak nie wytwarzano ze względu na brak zainteresowania użytkowników. Dopiero w roku 2007 uzyskano zamówienie na rozwiązanie tego rodzaju, jednak z przeznaczeniem do podstacji budynkowych. Należy podkreślić, że rozwiązanie tego rodzaju jest bardziej konkurencyjne cenowo w stosunku do odpowiedniego urządzenia o 72 diodach prostowniczych. W rozwiązaniu tym zastosowano diody mocy nowej generacji opracowane przez Zakład Lamina SI przy współpracy z Instytutem Elektrotechniki.

Należy nadmienić, iż opracowane zespoły z reguły pracują na podstacjach bezobsługowych objętych systemem zdalnego sterowania, a zatem muszą to być zespoły maksymalnie odporne na wszelkiego rodzaju zagrożenia natury przetężeniowej (przeciążenia, zwarcia) i przepięciowej (atmosferyczne, łączeniowe), jakie mogą występować w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Ponadto prostowniki diodowe tych zespołów, jako elementy najbardziej podatne na takie zagrożenia, są wyposażone w odpowiedni system pomiarowo-kontrolny, który w aktywny sposób współpracuje z zastosowanym dla danej podstacji trakcyjnej systemem zdalnego sterowania (np. CAN-BUS). Do realizacji takiego systemu, dla zespołu prostownikowego z jednostopniową transformacją napięcia 110/3 kV, zostało zastosowane elektroniczne urządzenie pomiarowe typu MPZ-10 (Moduł Pomiarowy Zespołu), opracowane i wykonane przez firmę MY-SOFT w Warszawie według dostarczonych przez Instytut Elektrotechniki szczegółowych wymagań [40]. Urządzenie MPZ-10, składające się z niskonapięciowego modułu odczytowego połączonego światłowodami ze specjalistycznymi, znajdującymi się na wysokim potencjale sondami pomiarowymi, umożliwia jednocześnie dokonywanie określonych pomiarów i przesyłanie ich wyników do systemu zdalnego sterowania, a mianowicie:

- napięcia i prądu wyprostowanego;
- temperatury obudowy diody i jej radiatora;
- temperatury powietrza chłodzącego w szafie prostownika.

Ponadto urządzenie MPZ-10 w części niskonapięciowej zawiera osiem przekaźników o wyjściach bezpotencjałowych służących do sygnalizowania, sterowania lub zabezpieczania w przypadku przekroczeń nastawialnych wartości zadanych dla mierzonych parametrów.

Należy nadmienić, iż wyposażone w te urządzenia prostowniki diodowe dwóch zespołów ZP-1,7/3,3 bezawaryjnie pracują od 1998 r. na podstacji trakcyjnej Huta Zawadzka (CMK), mogą stanowić technicznie uzasadnioną podstawę do opracowania odpowiednich systemów automatycznego sterowania pracą

i skutecznego zabezpieczania tych zespołów w oparciu o urządzenie MPZ-10. Opracowania te przede wszystkim powinny dotyczyć projektów modernizacyjnych czy nowo budowanych bezobsługowych podstacji trakcyjnych ze zdalnym sterowaniem.

## 10.2. Zespoły prostownikowe dla komunikacji miejskiej (tramwaj, metro)



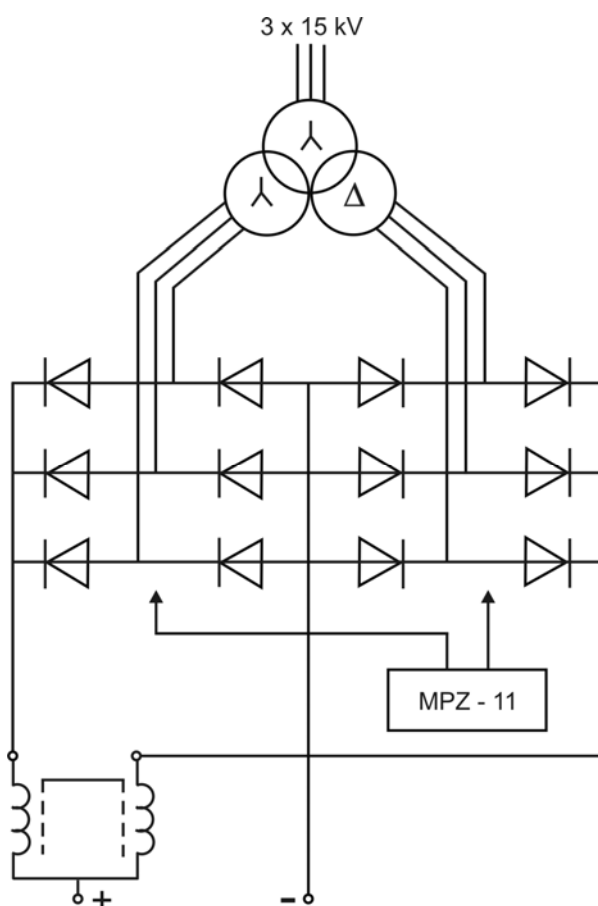
**Rys. 13. Prostownik diodowy PD-1,2/0,66 (1200 A, 660 V) dla podstacji tramwajowych i trolejbusowych. Opracowanie i badania Instytut Elektrotechniki. Wykonanie Przedsiębiorstwo Kolejowych Robót Elektryfikacyjnych**

W wyniku przeprowadzonej analizy techniczno-ekonomicznej dotyczącej zarówno doboru parametrów prądowo-napięciowych diod dla projektowanych prostowników (tramwaj, metro) jak i odpowiedniego dla nich radiatora chłodzącego oraz klamry ściskającej przyjęto, iż w składowych 3-fazowych mostkach tych prostowników nie będzie szeregowych i równoległych połączeń diod. Ponadto przyjęto, że zostaną one zbudowane z diod pastylkowych typu D95-1800/22 (tramwaj) i D95-2500/24 (metro) produkcji krajowej (Lamina S.I.) zainstalowanych na aluminiowym radiatorze typu RY-205w (z szynowymi miedzianymi wyprowadzeniami prądowymi) z klamrą ściskającą typu K2A (z ceramicznymi podkładkami izolacyjnymi). Oznacza to, że w każdym mostku składowym będzie po 6 modułów diodowych (dioda z radiatorem), zaś w całym prostowniku zarówno dla tramwaju jak i metra będzie po 12

modułów (dwa mostki trójfazowe połączone równolegle).

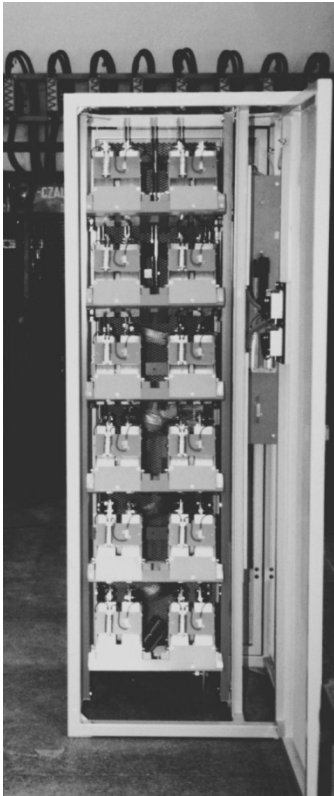
Opracowanie dokumentacji technicznej opisanych powyżej prostowników zostało wykonane w Instytucie Elektrotechniki w ramach projektu celowego Nr 10 T10 003 2000C/5173. W oparciu o tę dokumentację współpracujące w tym projekcie Przedsiębiorstwo Kolejowych Robót Elektryfikacyjnych wykona-

ło dwa prototypy tych prostowników (rys. 13) podstawowo przeznaczonych dla trakcyjnych podstacji zasilających miejską sieć tramwajową. Schematy ideowe zespołów prostownikowych wyposażonych w układy pomiarowe przedstawiono na rys. 14.

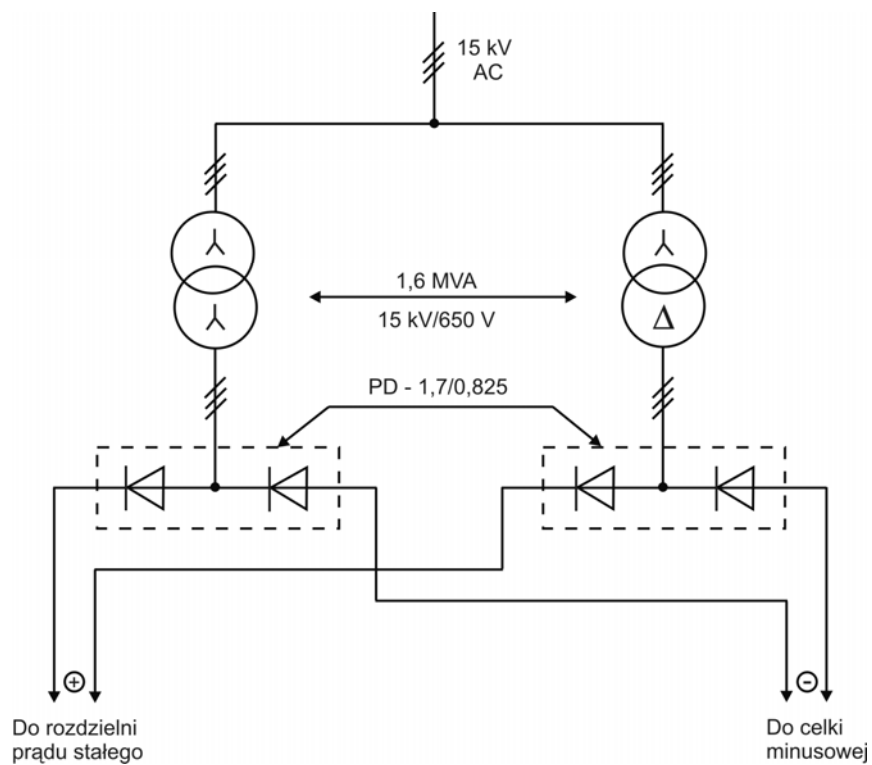


**Rys. 14. Schemat ideowy zespołu prostownikowego ZP-1,2/0,66 dla komunikacji miejskiej**

Opracowany w Instytucie Elektrotechniki 12-pulsowy zespół prostownikowy typu ZP-2,4/0,825 (2,4 kA/0,825 kV DC) dla podstacji trakcyjnych warszawskiego metra przedstawiono na rys. 15. W skład tego zespołu wchodzi dwa prostowniki typu PD-1,7/0,825 (1,7 kA, 0,825 kV) każdy o układzie prostowniczym mostka trójfazowego (rys. 16) oraz dwa suche transformatory prostownikowe każdy o mocy 1,6 MVA i układach połączeń Y/d11 i D/d0. Prostownik PD-1,7/0,825 został wyznaczony w I i III klasie przeciążalności prądowej zgodnie z normą PN-EN 146-1-1. Zespół ten zainstalowano na podstacji trakcyjnej metra „Wilanowska” w 2003 r. i dotychczas pracuje bezawaryjnie.



**Rys. 15. Prostownik diodowy PD-1,7/0,825 (1700 A, 825 V) dla podstacji METRA**



**Rys. 16. Schemat ideowy 12-pulsowego zespołu prostownikowego typu ZP-2,4/0,825 3200 A, 825 V dla metra warszawskiego**



### 10.3. Korzyści wynikające z zastosowania nowych prostowników

Zastosowane w wykonanych przez Instytut Elektrotechniki prostownikach trakcyjnych modernizacje konstrukcyjne w istotny sposób zwiększają ich odporność na typowe w trakcji elektrycznej zagrożenia przeciążeniowe i/lub przepięciowe, a tym samym powiększają ich niezawodność eksploatacyjną. Należy nadmienić, iż zwiększona niezawodność jak również posiadanie ciągłej informacji o faktycznym stanie pracy tych prostowników ma istotne znaczenie dla ich poprawnego działania, przede wszystkim na powszechnie stosowanych obecnie podstacjach bezobsługowych. Jednym z przykładów potwierdzających powyższe jest bezawaryjnie od 6 lat pracujący prostownik na podstacji trakcyjnej PKP (Huta Zawadzka). Zastosowanie nowych prostowników przynosi następujące korzyści:

1. Z przedstawionych porównań podstawowych parametrów i właściwości technicznych nowych rozwiązań 12-pulsowych zespołów prostownikowych, przeznaczonych dla trakcji elektrycznej 3 kV DC linii szybkiego ruchu, zasilanych wysokim (110 kV) lub średnim (15 kV, 20 kV) napięciem wynika, iż wdrożony w lutym 2003 r. do eksploatacji zespół prostownikowy typu ZP-1,7/3,3 zasilany napięciem 15 kV jest dla PKP rozwiązaniem alternatywnym w odniesieniu do bezawaryjnie pracującego od 1998 r. zespołu prostownikowego typu ZP-1,7/3,3 zasilanego wysokim napięciem 110 kV.
2. Istnienie zbadanych i wdrożonych do eksploatacji dwóch równoważnych odmian 12-pulsowych zespołów prostownikowych (ZP-1,7/3,3 – 110 kV i ZP-1,7/3,3 – 15 lub 20 kV) dla podstacji trakcyjnych rozmieszczonych wzdłuż linii szybkiego ruchu daje PKP istotną (ze względów ekonomicznych) możliwość wyboru rodzaju zasilania tych podstacji.
3. W przypadku zastosowania prostownika diodowego wyposażonego w elektroniczne urządzenie pomiarowe typu MPZ-10 [40], posiadające regulowane progi nastawcze dla mierzonych parametrów oraz przełączniki wykonawcze, może być zapewniona poprawna i efektywna eksploatacja tych zespołów. Urządzenie MPZ-10 to oprócz funkcji pomiarowych prądu i napięcia wyprostowanego oraz temperatur obudowy najgorętszej diody, jej radiatora i powietrza chłodzącego wewnątrz szafy prostownika, może dodatkowo pełnić szereg funkcji zabezpieczających, sterowniczych i informacyjnych dla centralnej dyspozytorni.

Do funkcji zabezpieczających należy zaliczyć:

- Zabezpieczenie prostownika od niedopuszczalnego przegrzania poprzez ciągły pomiar temperatury obudowy jego diody znajdującej się w obszarze najbardziej nagrzewających się diod.

- Awaryjne zabezpieczenie prostownika od skutków zwarcia zewnętrznego, kontrolowanego dodatkowo przez urządzenie MPZ-10 dzięki odpowiedniej nastawie trzeciego progu prądowego (wartości prądu i czasu jego trwania).

Natomiast do funkcji sterowniczych można zaliczyć:

- Regulację napięcia wyprostowanego, poprzez zmianę zaczepów transformatora prostownikowego z wykorzystaniem jego podobciążeniowego przełącznika zaczepów, lub zmianę pochylenia charakterystyki zewnętrznej podstacji ( $U_d = f(I_d)$ ) zależnej od ilości równolegle pracujących zespołów prostownikowych. W obydwu przypadkach elementem pobudzającym jest zmiana stanu styków odpowiednich przełączników wykonawczych urządzenia MPZ-10 po przekroczeniu nastawionych progów napięciowych i przyjętych dla nich czasów trwania tego przekroczenia.
- Samoczynne i w pełni automatyczne sterowanie pracą zespołów prostownikowych w zależności od stanu cieplnego prostowników kontrolowanego ciągłym pomiarem temperatury radiatora najgorętszej diody. W przypadku, gdy temperatura radiatora, diody prostownika aktualnie pracującego przekroczy nastawioną górną wartość przez określony czas, następuje automatyczne włączenie do pracy równoległej drugiego zespołu i jeżeli temperatura ta osiągnie nastawioną dolną wartość, to po określonym czasie nastąpi automatyczne wyłączenie z pracy jednego dłużej pracującego zespołu. Podstawowym celem tego rodzaju sterowania jest niedopuszczenie do ewentualnego niepożądanego zadziałania zabezpieczenia od przegrzania prostownika danego zespołu oraz ograniczenie strat mocy podstacji.

Efekty przytoczonych powyżej trzech funkcji urządzenia MPZ-10 pomiarowej zabezpieczającej i sterowniczej mogą być w całości lub częściowo (w zależności od wymagań użytkownika) przesyłane do centralnej dyspozytorni w dowolnym systemie informacyjnym. Z prostowników dwóch zespołów ZP-1,7/3,3 – 110 kV bezawaryjnie pracujących na podstacji trakcyjnej Huta Zawadzka (CMK) zgodnie z życzeniem PKP przesyłane są tylko wybrane informacje w systemie CAN-BUS.

## 11. NOWE ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE W PROSTOWNIKACH TRAKCYJNYCH

---

Wyniki wieloletniej eksploatacji trakcyjnych prostowników diodowych na podstacjach kolejowych i miejskich utwierdziły w przekonaniu o konieczności dokonania zmian konstrukcyjnych, które dotyczą:

1. Rozdzielenia toru prądowego od toru cieplnego w zmodernizowanych modułach diodowych (dioda, radiator, klamra). Rozdzielenie to polega na zastosowaniu miedzianych wyprowadzeń prądowych spod elektrod (katody, anody) diod. Dzięki temu prąd diody nie przepływa przez aluminiowy radiator, a zatem nie jest on dodatkowo podgrzewany.
2. Wyeliminowania sztywnych połączeń modułów diodowych z izolacyjną konstrukcją wsporczą i ich przyłączeniami prądowymi do oszynowania prostownika. Zrezygnowanie ze sztywnych połączeń zrealizowano przez zastosowanie odpowiednich (pod względem przekroju i długości) elastycznych połączeń wykonanych z płaskiej pobielanej plecionki miedzianej. Dzięki takiemu rozwiązaniu prostownik charakteryzuje się stabilną konstrukcją mechaniczną obudowy oraz elastycznie umocowanym torem prądowym. Rozwiązanie takie eliminuje szkodliwe oddziaływanie na moduły diodowe (styk diody z radiatorem) naprężeń mechanicznych powstających w torach prądowych w przypadku zwarć i przeciążeń prostownika.
3. Zastosowania podwójnej izolacji konstrukcji wsporczej elementów znajdujących się pod napięciem w stosunku do uziemionej obudowy szafy prostownika. Zastosowanie podwójnej izolacji dla elementów znajdujących się pod wysokim napięciem zrealizowano w ten sposób, że zarówno moduły diodowe jak i oszynowanie prostownika są montowane na izolacyjnych belkach tej konstrukcji przymocowanych do uziemionej metalowej obudowy prostownika. W taki sam sposób są wykonane połączenia elektryczne obwodów pomiarowych i elementów obwodów RC zabezpieczających diody prostownika od przepięć łączeniowych.
4. Wprowadzenie diod dużej mocy pozwoliło kilkakrotnie zmniejszyć liczbę tych elementów w prostowniku przy zwiększonej mocy ciągłej i dopuszczalnej przeciążalności prądowej urządzenia.

Należy nadmienić, że opisane powyżej rozwiązania konstrukcyjne zostały zastosowane w dotychczas wykonanych przez Instytut Elektrotechniki prostownikach trakcyjnych nowej generacji.

## 12. ZALETY TECHNICZNE ZASTOSOWANYCH ROZWIĄZAŃ

---

W prostownikach trakcyjnych nowej generacji utrzymano ukośne (pod kątem  $30^\circ$ ) montowanie modułów diodowych na wspólnej wsporczej izolacyjnej konstrukcji szafy. Przyjęty sposób montażu modułów łącznie z osiatkowanymi drzwiami (z przodu i z tyłu) szafy zapewnia jednakowe chłodzenie dla wszystkich modułów przy jednoczesnym maksymalnym ograniczeniu podgrzewania modułów górnych ciepłym powietrzem z modułów dolnych.

W wyniku stosowania w wykonanych przez Instytut Elektrotechniki prostownikach trakcyjnych zmodernizowanych modułów diodowych, prostowniki te w porównaniu z prostownikami innych producentów charakteryzują się następującymi zaletami technicznymi:

- Radiatory zmodernizowanych modułów odprowadzają ciepło powstałe tylko od strat mocy w diodach, a nie również ciepło powstające w radiatorach, jak ma to miejsce w starych modułach od przepływającego przez nie prądu obciążenia diody. Dzięki temu diody mają zapewnione skuteczniejsze chłodzenie.
- Sumaryczne straty mocy w prostowniku wyposażonym w zmodernizowane moduły diodowe są ok. 5 % mniejsze od porównywalnych strat mocy w prostowniku wyposażonym w stare moduły diodowe. Uzyskanie takiego efektu było możliwe dzięki rozdzieleniu toru prądowego od toru cieplnego w zmodernizowanych modułach diodowych.
- Zastosowanie w zmodernizowanych modułach miedzianego wyprowadzenia prądowego bezpośrednio spod elektrod diody wyeliminowało dodatkowo kłopotliwe mechanicznie i przegrzewające się odprowadzenia prądowe radiatora w module tradycyjnym. Uzyskano korzystniejsze charakterystyki rezystancji cieplnej modułu w funkcji strat mocy z punktu widzenia przeciążeniowych stanów pracy prostownika trakcyjnego.
- Dzięki rezygnacji ze sztywnych połączeń modułów diodowych z izolacyjną konstrukcją wsporczą szafy prostownika oraz z ich wyprowadzeniami prądowymi, wyeliminowano naprężenia mechaniczne styku diody z radiatorem w przypadku ewentualnych zwarć oraz częstych i nieregularnych przeciążeń typowych dla prostowników trakcyjnych. W odniesieniu do prostowników dla potrzeb metra dodatkowo dochodzą jeszcze naprężenia pochodzące od mechanicznych drgań szafy powstających podczas przejeżdżania pociągów, których torowiska jak i konstrukcja wsporcza szafy prostownika są ze sobą w sztywny sposób powiązane mechanicznie przez konstrukcję tubingu.

- Wprowadzenie diod krzemowych nowej generacji pozwoliło istotnie uprościć konstrukcję prostowników, poprawić ich parametry techniczne i właściwości eksploatacyjne.
- Dla prostowników wyposażonych w elektroniczne urządzenia pomiarowe typu MPZ-10 czy MPZ-11 mogące współpracować z dowolnymi podstawowymi systemami zdalnego sterowania, przekazywanie informacji o ich stanie pracy ma istotne znaczenie dla prowadzenia prawidłowej eksploatacji tych prostowników (np. monitorowanie podwyższonego stanu cieplnego prostownika, przekroczenie dopuszczalnej nierównomierności obciążania się równoległe połączonych zestawów diodowych).

Zastosowane w wykonanych przez Instytut Elektrotechniki prostownikach trakcyjnych wyżej opisane modernizacje konstrukcyjne w istotny sposób podwyższają ich odporność na typowe w trakcji elektrycznej zagrożenia przeciążeniowe czy przepięciowe, a tym samym powiększają ich niezawodność eksploatacyjną. Należy nadmienić, iż zwiększona niezawodność jak również posiadanie ciągłej informacji o faktycznym stanie pracy tych prostowników ma istotne znaczenie dla ich poprawnego działania, przede wszystkim na powszechnie obecnie stosowanych podstacjach bezobsługowych. Jednym z przykładów potwierdzających powyższe są od 9 lat pracujące bezawaryjnie prostowniki na podstacji trakcyjnej PKP (Huta Zawadzka).

System zasilania warszawskiego metra został całkowicie oparty na urządzeniach krajowych, w większości specjalnie wyprodukowanych dla tego celu. Było to poważnym osiągnięciem biur projektowych, inwestora i konstruktorów z IEL oraz z przemysłu. Konieczne jest jednak stałe udoskonalanie i unowocześnianie przyjętego systemu zasilania wykorzystujące rozszerzające się możliwości przemysłu krajowego, doświadczenia zagraniczne i własne przy budowie i dotychczasowej eksploatacji metra. Szczególnie korzystne byłoby wprowadzenie trójzwojeniowych suchych transformatorów prostownikowych i wyłączników szybkich z lekkimi komorami wydmuchowymi bez azbestu. Niezbędna będzie również automatyka zabezpieczeniowa statyczna oparta o układy elektroniczne o charakterystykach lepiej dostosowanych do charakterystyk chronionych urządzeń.

### 13. BUDOWA PROSTOWNIKÓW TRAKCYJNYCH

---

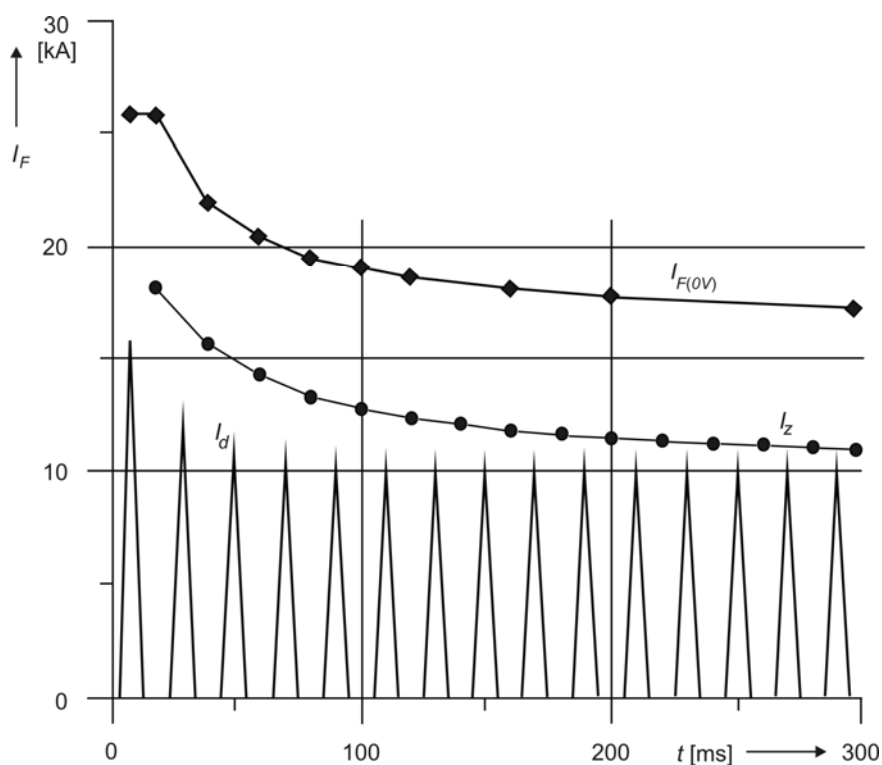
Prostowniki diodowe dla omawianych zespołów składają się z wolnostojących dwóch szaf zestawów diodowych typu ZD-2,1/1,65 (2100 A, 1650 V)

o układzie prostowniczym trójfazowych mostków połączonych szeregowo po stronie napięcia wyprostowanego i jednej szafy aparatu-pomiarowej typu SAP-4 (4 kV DC). W każdej szafie ZD znajduje się w zależności od przeznaczenia prostownika (podstacja budynkowa lub kontenerowa) po 36, 18 lub 12 modułów diodowych złożonych z diod pastylkowych o prądzie 2500 A i napięciu 2500 V oraz aluminiowych radiatorów RY205w (z miedzianymi szynowymi wyprowadzeniami prądowymi) lub diod pastylkowych o prądzie 4000 A i napięciu 400 V i aluminiowych radiatorów RY 300w. Moduły te są odpowiednio rozmieszczone na izolacyjnej konstrukcji szafy zestawu diodowego, na której w tylnej części znajdują się ponadto szyny zasilające R, S, T i wyjściowe DC. W szafie ZD od strony minusowej została umieszczona sonda do pomiaru temperatury obudowy wybranej diody i jej radiatora w górnej jego części. Celem wyeliminowania niepożądanych naprężeń mechanicznych na styku dioda-radiator wszystkie połączenia modułów diodowych w szafie ZD, zostały wykonane przy pomocy elastycznych łączówek z pobielanej plecionki miedzianej. W szafie aparatu-pomiarowej, znajduje się boczny pomiarowy i sonda do pomiaru napięcia i prądu wyprostowanego oraz izolacyjna płyta z rozmieszczonymi elementami obwodów RC zabezpieczających diody od przepięć łączeniowych. Natomiast na przednich drzwiach tej szafy zamontowane zostało urządzenie pomiarowe MPZ-10 lub mierniki wskazówkowe. Prostownik diodowy może być realizowany w dwóch wykonaniach konstrukcyjnych (tab. 2).

Wykonana analiza potwierdza, iż dla omawianych zespołów prostownikowych zasilanych liniami o znacząco różnych maksymalnych wartościach mocy zwarciowej (3000 MVA – przy 110 kV i 300 MVA – przy 15 lub 20 kV) może być zastosowany taki sam prostownik diodowy o określonej wytrzymałości zwarciowej. Wynikiem tej analizy są przytoczone na rys. 17 i rys. 18 porównawcze symulacyjne przebiegi prądu zwarciowego odniesione do pojedynczej diody. Przy czym przebiegi –  $I_d$  dotyczą rzeczywistego prądu zwarcia zewnętrznego (na zaciskach prostownika) w diodzie, zaś  $I_z$  jego prądu zastępczego powodującego taki sam skutek cieplny dla złącza PN zastosowanej diody. Na rysunkach tych podana jest również deklarowana przez producenta dopuszczalna graniczna przeciążalność prądowa danej diody ( $I_{F(0V)}$ ). Z przytoczonych przebiegów wynika, że zastosowane w prostownikach diody dla obu zespołów prostownikowych wykazują wystarczającą odporność na zwarcia.

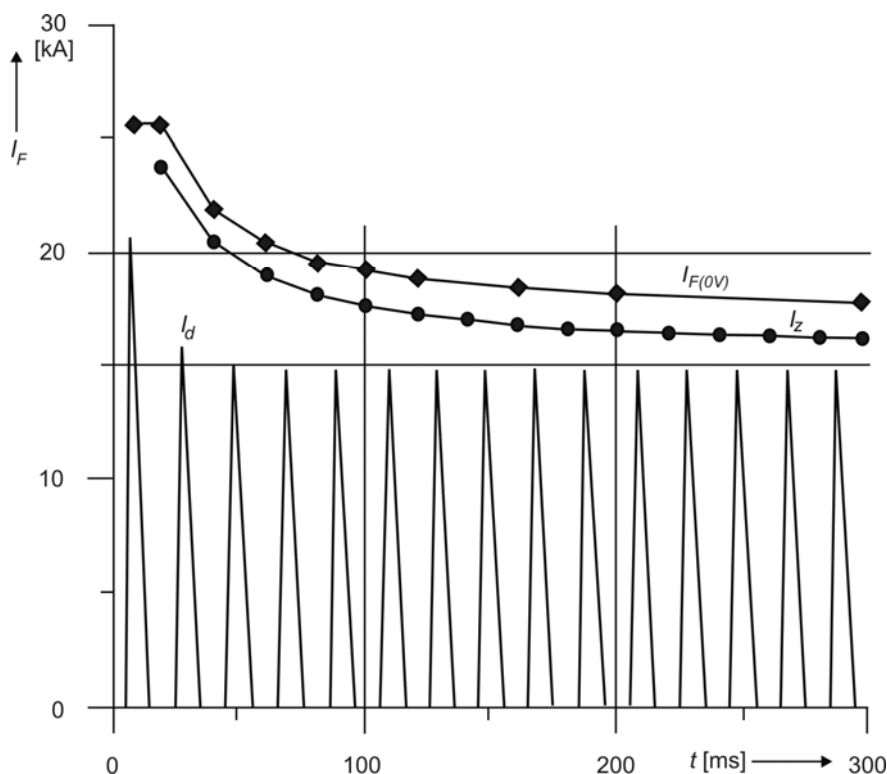
Na podstawie przeprowadzonych analiz techniczno-ekonomicznych dotyczących wyboru racjonalnego układu prostowniczego dla opracowanych nowych 12-pulsowych zespołów prostownikowych przeznaczonych dla trakcji kolejowej (3,3 kV DC) i miejskiej (660 V; 825 V DC) przyjęto, że prostowniki dla tych zespołów stanowić będą, w zależności od wielkości napięcia wyprostowanego, szeregowo lub równoległe połączenie dwóch niezależnych (zasilanych

z oddzielnych uzwojeń transformatora prostownikowego) prostowników każdy o układzie mostka trójfazowego.



**Rys. 17. Prąd diody ( $I_{F(AV)} = 2500$  A) przy zwarciu zewnętrznym zespołu prostownikowego ZP-1,7/3,3 zasilanego z 110 kV przy mocy zwarciowej  $S_z = 3000$  MVA**

Oznacza to, że prostownik dla zespołu trakcji kolejowej (PKP – 3,3 kV) będzie się składał z dwóch szaf mostkowych zestawów diodowych połączonych szeregowo po stronie napięcia wyprostowanego i oddzielnej szafy aparatu-pomiarowej. Natomiast prostowniki dla zespołów trakcji miejskiej (tramwaj – ZP-1,2/0,66, metro – ZP-2,4/0,825) składają się z jednej szafy zawierającej dwa mostkowe zestawy diodowe połączone równolegle po stronie napięcia wyprostowanego. Przy czym połączenie to w odróżnieniu od innych producentów, posiada tylko jeden wspólny biegun ujemny, zaś bieguny dodatnie są niezależne i wyposażone w odpowiednie boczniki pomiarowe. Równoległe kojarzenie tych biegunów następuje dopiero w celce plusowej podstacji trakcyjnej. Rozwiązanie to pozwala kontrolować prąd poszczególnych mostków prostowniczych i korzystnie oddziałuje na równomierność rozkładu obciążenia między nimi.



**Rys. 18. Prądy diody ( $I_{F(AV)} = 2500 \text{ A}$ ) przy zwarciu zewnętrznym zespołu prostownikowego ZP-1,7/3,3 zasilanego z 15 kV lub 20 kV przy mocy zwarciowej  $S_z = 300 \text{ MVA}$**

Należy nadmienić, iż w zależności od wymagań zamawiającego omawiane prostowniki mogą być wyposażone w typowy układ tylko do pomiaru napięcia i prądu wyprostowanego (magnetoelektryczne mierniki tablicowe) lub elektroniczny MPZ-10, który dodatkowo mierzy również temperaturę obudowy wybranej („najgorętszej”) diody i jej radiatora, a ponadto może pełnić szereg dodatkowych funkcji zabezpieczających, sterowniczych i informacyjnych dla głównej dyspozytorni.

We wszystkich opracowanych i wykonanych prostownikach trakcyjnych jest zastosowany system naturalnego chłodzenia powietrznego, a wolnostojące szafy mają dostęp obustronny i mogą być przyłączone od góry lub od dołu.

## 14. DZIAŁALNOŚĆ NORMALIZACYJNA

Doświadczenia uzyskane w wyniku prowadzonych w Instytucie Elektrotechniki prac dotyczących badań właściwości zaworów rzęciowych i ich zastosowań jako prostowników zasilających podstacje trakcyjne – umożliwiły przy-



gotowanie pierwszych krajowych wymagań normalizacyjnych związanych z tymi urządzeniami. Od początku były brane pod uwagę postanowienia zaleceń międzynarodowych opracowanych przez Komitet Techniczny IEC22 (International Electrotechnical Commission) powołany w 1934 r. Wyłoniony w 1937 r. Podkomitet 22A do czasu swego rozwiązania w 1970 r. opublikował trzy kolejno nowelizowane zalecenia dotyczące prostowników rtęciowych. W tworzeniu tych zaleceń brali udział eksperci z IEL wnosząc uwagi.

Już w 1949 r. w Zakładzie Trakcji Elektrycznej opracowano „Tymczasowe przepisy na zespoły prostownikowe z zaworami rtęciowymi” wraz ze szczegółowym komentarzem [21]. Materiały te w znacznej mierze przyczyniły się do przygotowania projektu pierwszej krajowej normy PN-55/E-06071 „Zespoły prostownikowe z zaworami rtęciowymi. Przepisy ogólne”, która po znowelizowaniu w 1962 r. stanowiła podstawowy dokument regulujący produkcję i użytkowanie tych urządzeń do czasu wyeliminowania ich z eksploatacji przez prostowniki krzemowe.

W 1962 r. powołano w Instytucie Elektrotechniki Komisję Normalizacyjną ds. Przekształtników Energetycznych. Jej przewodniczącymi byli kolejno prof. Zygmunt Figurzyński z Politechniki Warszawskiej, doc. Jan Grygołajtys i doc. Jerzy Bagieński z IEL, zaś sekretarzem – mgr inż. Stefan Januszewski. Komisja działała do 1994 r.

W okresie wdrażania nowej techniki przekształtników półprzewodnikowych były równolegle prowadzone działania normalizacyjne zmierzające do opracowania wymagań konstrukcyjno-eksploatacyjnych dotyczących tych urządzeń. Prace prowadzono dwutorowo uczestnicząc w opiniowaniu projektów międzynarodowych zaleceń IEC z jednej strony a równocześnie przygotowano odpowiednie krajowe przepisy uwzględniające zaaprobowane postanowienia międzynarodowe [43]. Działania te z reguły były poprzedzane referatami normalizacyjnymi, w których szczegółowo omawiano najważniejsze problemy techniczne związane z wprowadzeniem prostowników krzemowych. Referaty były opiniowane przez producentów i użytkowników urządzeń przekształtnikowych. Tworzone w ten sposób Polskie Normy nie były zaskoczeniem wśród odbiorców i umożliwiały stopniowe płynne przejście do wykorzystywania nowej techniki półprzewodnikowej.

W miarę rozwoju własnych badań przyrządów półprzewodnikowych i ich wykorzystywania w układach przekształtnikowych powstała w 1965 r. norma branżowa BN-65/3041-01: „Diody półprzewodnikowe monokrystaliczne na prąd od 10 A. Wymagania i badania techniczne”, która po znowelizowaniu i modyfikacji została ustanowiona jako PN-74/E-82050 – „Elementy półprzewodnikowe. Krzemowe diody prostownicze na prąd nie mniejszy od 10 A. Ogólne wymagania i badania”. W następnym roku ustanowiono PN-75/E-82060 – Elementy półprzewodnikowe. Tyrystory. Ogólne wymagania i badania oraz

PN-75/E-06073 – „Przekształtniki półprzewodnikowe z komutacją zewnętrzną. Ogólne wymagania i badania”. Wszystkie wymienione normy opracowano w Instytucie Elektrotechniki z pełnym uwzględnieniem postanowień zawartych w publikacji IEC146 (1973) „Przekształtniki półprzewodnikowe” (Semiconductor converters). Do końca lat osiemdziesiątych. wymagania tych norm stanowiły podstawę oceny krajowej produkcji przekształtników półprzewodnikowych w tym przeznaczonych dla zastosowań trakcyjnych.

W związku z wstąpieniem Polski do Unii Europejskiej przyjęta przez Polski Komitet Normalizacyjny zasada bezpośredniego tłumaczenia Norm Europejskich (EN), które w zakresie energoelektroniki są identyczne z odpowiednimi normami IEC i zatwierdzenia ich jako PN. W ten sposób powstała w 2002 r. norma PN-IEC 60146-1-1 „Przekształtniki półprzewodnikowe – Wymagania ogólne i przekształtniki o komutacji sieciowej – Część 1-1: Wymagania podstawowe”, która zastąpiła PN-75/E-06-73 i stanowiła podstawę opracowywania w Instytucie Elektrotechniki nowych konstrukcji półprzewodnikowych prostowników przeznaczonych do podstacji trakcyjnych kolejowych i komunalnych.

Jednak ogólna norma PN-IEC 60146-1-1 nie spełniała wszystkich wymagań stawianych kolejowym przekształtnikom trakcyjnym i na początku bieżącej dekady CENELEC opracował nową serię norm EN obejmującą aktualne wymagania związane z zastosowaniami kolejowymi. Dotyczą one energoelektronicznych przekształtników trakcyjnych (EN 50327 oraz EN 50328) i transformatorów trakcyjnych (EN 50329). Ostatnie modyfikacje trakcyjnych przekształtników krzemowych wykonanych w IEL uwzględniają postanowienia wspomnianych norm EN zweryfikowane w wyniku badań laboratoryjnych i eksploatacyjnych tych urządzeń.

---

## 15. PODSUMOWANIE

---

Wprowadzanie nowoczesnych przekształtników półprzewodnikowych do zasilania dołowych stacji trakcyjnych, stacji tramwajowych i kolejowych zostało dokonane wyłącznie w oparciu o prace krajowych ośrodków badawczo-wdrożeniowych równoległe z ówczesnym światowym rozwojem tej dziedziny energoelektroniki. Zelektryfikowanie ponad 11 tys. km linii kolejowych, tysiące kilometrów linii tramwajowych i górniczych było w znacznej mierze zasługą Instytutu Elektrotechniki, który przez cały okres swej sześćdziesięcioletniej działalności przywiązywał dużą wagę do pionierskich prac naukowo-badawczych związanych z rozwojem trakcji elektrycznej, a w szczególności źródeł jej zasilania w postaci początkowo prostowników rtęciowych a następnie krzemowych.

W wyniku tej działalności prowadzonej kompleksowo w Instytucie w latach 1958...1968 została przygotowana produkcja prostowników krzemowych dla podstacji trakcyjnych w Fabryce ELTA w Łodzi oraz w Mikołowskiej Fabryce Transformatorów w zakresie przewoźnych podstacji trakcyjnych dołowych opracowywanych w Zakładach Konstrukcyjno-Mechanizacyjnych Przemysłu Węglowego (obecny EMAG).

W ramach prac rozwojowych wykonane zostały zespoły eksperymentalne dla podstacji PKP o napięciu 3,3 kV oraz dla komunikacji miejskiej (tramwaje 660 V, metro 825 V), których szczegółowe badania laboratoryjne i eksploatacyjne umożliwiły określenie zasad konstrukcji trakcyjnych prostowników krzemowych, uwzględniających istniejące w kraju możliwości produkcyjne i wymagania krajowych użytkowników.

Kontynuowane w ostatnich latach działania zmierzają do uzasadnionej ekonomicznie modernizacji istniejących rozwiązań oraz podnoszenia poziomu technicznego współczesnych podstacji trakcyjnych przez wprowadzenie nowych racjonalnych projektów prostowników, ich badań i nadzoru tych urządzeń w okresie wstępnej eksploatacji. Z satysfakcją należy nadmienić, iż modernizowane krajowe prostowniki krzemowe odpowiadają wymaganiom norm międzynarodowych, są niezawodne i ekonomiczne w eksploatacji oraz zostały w pełni zaakceptowane przez użytkowników.

Prowadzone w Instytucie Elektrotechniki prace przyczyniły się do tego, że przeprowadzona w Polsce elektryfikacja głównych linii kolejowych a także modernizacja i rozwój systemów zasilania komunikacji miejskiej zostały dokonane w oparciu o krajową myśl techniczną.

Autorzy pragną być przekonani, że ich artykuł uchroni od zapomnienia szereg istotnych osiągnięć związanych z rozwojem krajowej trakcji elektrycznej i będzie przyczynkiem do historii polskiej elektryki.

## LITERATURA

1. Jakubowski J.L.: Dziesięciolecie Instytutu Elektrotechniki. Przegląd Elektrotechniczny 1954, nr 8, str. 309-312.
2. Jabłoński A.: Przekształtniki ręcione w Polsce. Przegląd Elektrotechniczny 1957, nr 1/2, str. 2-3.
3. Grygołajtys J.: Zastosowanie prostowników do przetwarzania energii elektrycznej dużej mocy. Stan, potrzeby i kierunki rozwoju. Pierwsza Krajowa Narada Elektroniki PAN, Warszawa, 11-14 listopad 1958.
4. Januszewski S.: Prace nad zaworami półprzewodnikowymi w Instytucie Elektrotechniki. PAN – Materiały Pierwszej Krajowej Narady Elektroniki. Warszawa, 11-14 list. 1958.

5. Januszewski S.: Prostownik germanowy 75 kW, 250 V dla stacji trakcyjnych dołowych. Przegląd Elektrotechniczny 1961, nr 12.
6. Grygołajtys J., Wdowiak J.: Kierunki rozwojowe przekształtników ręciovych. Przegląd Elektrotechniczny 1957, nr 1-2, str. 3-17.
7. Grygołajtys J.: Zasady działania i eksploatacji prostowników ręciovych. Wyd. Komunikacyjne, Warszawa 1955.
8. Winiarski B., Wdowiak J.: Perspektywy rozwoju układów energoelektronicznych. Przegląd Elektrotechniczny 1976, nr 12.
9. Januszewski S., Wdowiak J.: Prostowniki krzemowe na podstacjach trakcyjnych prądu stałego. Sesja Naukowa z okazji XX-lecia Instytutu Elektrotechniki. Sekcja Trakcji Elektrycznej (zbiór referatów). Warszawa 1966, s. 51-78.
10. Januszewski S., Zymmer K.: Energoelektronika. Przegląd Elektrotechniczny 1994, nr 10, str. 242-248.
11. Januszewski S., Kociszewska-Szczerbik M., Świątek H., Zabłocki Z., Zymmer K.: 45 lat badań przyrządów energoelektronicznych w Instytucie Elektrotechniki. Prace Instytutu Elektrotechniki 2001, zeszyt 209, s. 87-140.
12. Januszewski S., Zymmer K.: Zakład Przekształtników Mocy w publikacji „50 lat Instytutu Elektrotechniki”. Wyd. Książkowe Instytutu Elektrotechniki, Warszawa 1996.
13. Januszewski S., Świątek H.: Miernictwo tyrystorowe. WNT, Warszawa, wyd. I – 1976, wyd. II – 1984.
14. Januszewski S., Świątek H.: Miernictwo półprzewodnikowych przyrządów mocy. WKiŁ, Warszawa, 1996.
15. Wdowiak J.: Wyznaczenie przeciążalności prądowej krzemowych diod mocy. Prace Instytutu Elektrotechniki, 1969, zeszyt 58, s. 79-127.
16. Świątek H.: Urządzenia kontrolno-pomiarowe do badania wybranych parametrów półprzewodnikowych przyrządów mocy. Prace Instytutu Elektrotechniki 1991, zeszyt 168.
17. Januszewski S., Świątek H., Zymmer K.: Consequences of internal short circuits in very high power converters. Proc. of ISIE'96, June 1996, Warsaw, vol 1 pp. 519-524.
18. Januszewski S., Kociszewska-Szczerbik M., Świątek H., Świątek G.: Semiconductor Device Failure in Power Converter Service Conditions. EPE Journal 1998 nr 3-4 pp. ..
19. Januszewski S., Kociszewska-Szczerbik M., Pytlak A., Świątek H., Zymmer K.: Wpływ uszkodzeń półprzewodnikowych przyrządów mocy na bezpieczeństwo urządzeń energoelektronicznych. Prace Instytutu Elektrotechniki, 1999, zeszyt 203, str. 215-234.
20. Januszewski S., Klamka J.: Pierwsze polskie germanowe diody mocy i ich rola rozwoju krajowych urządzeń energoelektronicznych. Elektronika 1991, nr 2, str. 13-15.
21. Grygołajtys J., Januszewski S., Ośluk R., Wdowiak J.: Zespoły prostownikowe z diodami krzemowymi na podstacjach trakcyjnych prądu stałego. Symposium PAN-AGH „Problemy Nowoczesnej Trakcji Elektrycznej”, 39-71, Kraków 24-27 paźdz. 1968.
22. Januszewski S.: Prostownik germanowy 75 kW, 250 V dla stacji trakcyjnych dołowych. Przegląd Elektrotechniczny 1961 nr 12, s. 515-516.
23. Januszewski S., Szczucki F.: Automatyczna przewoźna stacja prostownikowa dla trakcji dołowej. Przegląd Elektrotechniczny 1965, nr 7.
24. Lisowski K.: Małogabarytowe wyłączniki szybkie prądu stałego. Prace Instytutu Elektrotechniki 1965, zeszyt 42.
25. Januszewski S., Szczucki F.: 25 lat eksploatacji automatycznych przewoźnych stacji prostownikowych w polskim górnictwie. Przegląd Elektrotechniczny nr 10-11, 1990.

26. Korzycki E.: Nowy przekształtnik diodowy 5 MW/3 kV o pulsacji 12-faz. dla potrzeb PKP. Materiały konferencyjne; TRAKO – 1978 r.
27. Korzycki E.: Przekształtniki diodowe o pulsacji 12-faz. dla trakcji kolejowej. Dopuszczalne przeciążalności prądowe oraz wytrzymałości zwarciove. Materiały konferencji naukowej – Problemy Rozwoju Trakcji Elektrycznej w Polsce. Warszawa, 9-10 list. 1983 r.
28. Korzycki E.: Metoda graficznego określania przeciążalności prostowników diodowych. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 98, 1978.
29. Korzycki E.: Przekształtniki diodowe 12-fazowe dla potrzeb trakcji elektrycznej PKP. Zalety oraz wynikające nowe zagadnienia techniczne. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 136, 1985.
30. Korzycki E.: Informacje i obliczenia dotyczące odkształcenia krzywej napięcia w liniach zasilających trakcyjne przekształtniki diodowe. Materiały konferencyjne CNTK – Jakość Energii Elektrycznej dla Zasilania Trakcji PKP, Warszawa, 23.11.1989 r.
31. Korzycki E.: Ocena wpływu podstacji trakcyjnych z przekształtnikami diodowymi na odkształcenie krzywej napięcia w energetycznych liniach zasilających. Materiały Międzynarodowej Konferencji Naukowej – Jakość Energii Elektrycznej (Politechnika Łódzka), Spała, 25-27.09.1991 r.
32. Korzycki E.: Przekształtnik diodowy do zasilania sieci trakcyjnej I linii metra w Warszawie. Metroprojekt – Informacja generalnego projektanta Nr 25, Warszawa 1989 r.
33. Korzycki E.: Urządzenia wygładzające dla podstacji trakcyjnych PKP wyposażonych w przekształtniki diodowe o 12-faz. pulsacji napięcia wyprostowanego. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 145, 1987 r.
34. Korzycki E., Sakowicz S.: Analiza awaryjnych stanów pracy rezonansowych urządzeń wygładzających na podstacjach trakcyjnych PKP. Materiały X Jubileuszowej Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2002 (PK), Zakopane-Kościelisko, 24-26.10.2002 r.
35. Korzycki E., Sakowicz S., Świątek H., Zymmer K.: Zespoły prostownikowe 12-pulsowe do podstacji trakcyjnych PKP zasilanych średnim napięciem. Technika Transportu Szynowego, Nr 3-4, 2002 r.
36. Korzycki E., Świątek H., Zymmer K.: Porównanie nowych rozwiązań 12-pulsowych zespołów prostownikowych dla kolejowych podstacji trakcyjnych linii szybkiego ruchu. Materiały X Sympozjum – Podstawowe Problemy Energoelektroniki i Elektromechaniki PPEE'2003. Gliwice-Wiśła 7-10.12.2003 r.
37. Korzycki E., Świątek H., Zymmer K.: Trakcyjny zespół prostownikowy z jednostopniową transformacją napięcia 110/3 kV. Materiały VIII Sympozjum – Podstawowe Problemy Energoelektroniki i Elektromechaniki PPEE'99 (Politechnika Śląska), Gliwice – Wiśła 22-25.03.1999 r.
38. Korzycki E., Sakowicz S.: Analiza wpływu sposobu zasilania trakcyjnych zespołów prostownikowych na wybrane ich parametry. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej – Oddziaływanie Trakcji Elektrycznej na Środowisko (PK) Zakopane – Kościelisko 14-16.10.1999 r.
39. Korzycki E., Sakowicz S.: Analiza porównawcza wybranych układów przekształtnikowych do zasilania trakcji elektrycznej PKP. Materiały konferencyjne – EPZ'200, Energoelektronika na Przełomie Wieków, Rozwój Konstrukcji i Zastosowanie Przemysłowe (IEL), Warszawa-Międzyzlesie, 16-17.05.2000 r.
40. Korzycki E., Skonieczny S.: Urządzenie pomiarowe MPZ-10 jako element sterowniczo-zabezpieczający trakcyjnych zespołów prostownikowych. Materiały IX Sympozjum – Podstawowe Problemy Energoelektroniki i Elektromechaniki PPEE'2000, Gliwice – Wiśła, 11-14.12.2000 r.

41. Korzycki E., Świątek H., Zymmer K.: Nowe 12-pulsowe trakcyjne zespoły prostownikowe dla linii 3 kV DC szybkiego ruchu. Technika Transportu Szynowego nr 9, 2004.
42. Zymmer K.: Zagrożenia zwarciove i przetężeniowe półprzewodnikowych przyrządów energoelektronicznych. Prace Instytutu Elektrotechniki, 2004, zeszyt 219, s. 1-115.
43. Januszewski S.: Zagadnienia normalizacji półprzewodnikowych przyrządów mocy i urządzeń energoelektronicznych. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 119, 1981.

*Rękopis dostarczono, dnia 26.07.05 r.*

## 60 YEARS OF THE ELECTROTECHNICAL INSTITUTE'S CONTRIBUTION TO WORK RELATED TO SUPPLYING THE D.C. TRACTION NETWORK WITH POWER

S. JANUSZEWSKI, E. KORZYCKI,  
H. ŚWIĄTEK, K. ZYMMER

**ABSTRACT** *The paper describes the work conducted at the Electrotechnical Institute in the range including rectifier sets intended for power supply sets for railway, urban and mine traction and mercury rectifiers used in the fifties and early sixties of the last century. There the next versions of technical solution of rectifiers carried out basing on silicon power diodes were presented. The contribution of the Electrotechnical Institute to developing and testing the properties of silicon power diodes produced in our country and also used in traction rectifiers. The co-operation of the Electrotechnical Institute with the national industry at developing and putting into production the subsequent versions of traction – type rectifier sets is discussed. Participation of the coworkers of the Institute at developing national standards concerning principles of designing and operating the electric equipment of the traction substations is presented.*