



OCHRONA ELEKTROCHEMICZNA
OCENA AKTUALNEGO STANU NA PRZEŁOMIE WIEKU

ELECTROCHEMICAL PROTECTION
THE PRESENT STATE AT THE TURN OF THE CENTURY

Wojciech Sokółski

Polski Komitet Elektrochemicznej Ochrony przed Korozją
przy Zarządzie Głównym Stowarzyszenia Elektryków Polskich

Słowa kluczowe: ochrona elektrochemiczna, stan aktualny i perspektywy rozwoju
Keywords: electrochemical protection, present state, development

Streszczenie

Omówiono aktualny stan rozwoju elektrochemicznej ochrony przed korozją na świecie i w Polsce. Przeanalizowano zagadnienia związane z postępem wiedzy oraz rozwoju technologicznego ochrony przeciwkorozyjnej w odniesieniu do konstrukcji podziemnych i podwodnych. Wskazano główne kierunki i nowe zastosowania ochrony elektrochemicznej oraz na tym tle krytycznie oceniono udział polskiej myśli technicznej w tworzeniu nowych rozwiązań technicznych. Omówiono konieczne kroki jakie należy podjąć w związku z integracją z Unią Europejską i wskazano na rolę w tym zakresie Polskiego Komitetu Elektrochemicznej Ochrony przed Korozją SEP.

Summary

The present state has been discussed of electrochemical anticorrosion protection in the World and in Poland. Problems have been discussed connected with progress of knowledge and technological development of anticorrosion protection of underground and underwater structures. The main directions and new applications of electrochemical protection have been indicated and on this basis the participation of Polish scientists in the formation of new technological solutions has been critically evaluated. Necessary steps have been described to be undertaken in connection with integration with the European Union and the role indicated in this scope of the Polish Committee of Electrochemical Anticorrosion Protection.

Wprowadzenie

Koniec wieku jest okazją do podsumowań i refleksji. W szczególności skłania do tego jednoczesny przełom tysiąclecia. Dokonuje się tego we wszystkich dziedzinach życia, ocenia postęp cywilizacji, również w technice. W zakresie korozji przegląd taki w Polsce dokonany został w latach 1998-99 w ramach programu badawczego-zamawianego PBZ 013-12 pt. „Badania nad opracowaniem systemu walki z korozją w Polsce na tle tendencji światowych”. Problematyka ochrony elektrochemicznej dla potrzeb tego programu opracowana została przeanalizowana w Zakładzie Korozji Morskiej Instytutu Morskiego przez interdyscyplinarne grono specjalistów z całej Polski.

Ochrona elektrochemiczna jest jedną z szeregu technologii ochrony przeciwkorozyjnych materiałów konstrukcyjnych, urządzeń i aparatów metalowych. Cechuje się przede wszystkim tym, że do jej realizacji wykorzystywany jest stały prąd elektryczny. Ponieważ w wyniku przepływu prądu przez granicę faz metal/środowisko występuje zjawisko polaryzacji elektrochemicznej, technika ta bezpośrednio ingeruje w przebieg procesów korozyjnych, czym w zasadniczy sposób różni się od metod barierowych, np. wszelkiego rodzaju powłok ochronnych. Dzięki temu może być ona stosowana do wszystkich typów korozji przebiegających z mechanizmem elektrochemicznym, a więc oprócz korozji ogólnej, także do kontaktowej, elektrolitycznej, wżerowej, szczelinowej, międzykryształicznej, naprężeniowej itd., przy skuteczności sięgającej 100%.

Niestety technologia ochrony elektrochemicznej ma poważne ograniczenia, które w znaczący sposób rzutują na możliwości jej wykorzystania. Jest nim przede wszystkim konieczność istnienia przy zabezpieczanej powierzchni odpowiednio grubej warstwy środowiska elektrolitycznego, przez którą musi przepływać prąd ochronny. Z tego powodu stosuje się ją jedynie do elementów stalowych zanurzonych w wodach naturalnych, w ziemi, wewnątrz aparatury i urządzeń napełnionych mediami przewodzącymi prąd elektryczny, ostatnio także w betonie. Kolejnym ograniczeniem jest brak możliwości bezpośredniej oceny skuteczności ochrony elektrochemicznej, ponieważ zabezpieczana powierzchnia metalowa nie jest widoczna i zazwyczaj nie jest łatwo dostępna, co powoduje, że do jej prawidłowego stosowania, uzyskania wymaganej skuteczności oraz prowadzenia niezbędnej kontroli niezbędna jest wysoce specjalistyczna wiedza i wiarygodny personel techniczny.

Na podstawie literatury fachowej i analizy ilości firm zajmujących się ochroną elektrochemiczną w krajach rozwiniętych technicznie można ocenić, że udział tej technologii wśród wszystkich innych metod i środków walki z korozją kształtuje się tam na poziomie kilkunastu procent, co znacznie przewyższa zainteresowanie tą technologią w Polsce. Niewątpliwie sytuacja ta spowodowana jest brakiem odpowiedniej wiedzy wśród polskich inżynierów, chociaż w niektórych dziedzinach - np. ochrony magistralnych rurociągów gazowych i naftowych - stosowanie jej jest obligatoryjne.

W technologii ochrony elektrochemicznej wyróżnia się ochronę katodową i anodową. O ile pierwszą z nich stosuje się już blisko 100 lat w odniesieniu do jednostek pływających, rurociągów i kabli podziemnych, to ochronę anodową próbuje się wykorzystać do ochrony aparatury chemicznej w silnie utleniających mediach zaledwie od ponad dwudziestu lat. W czasie swojego rozwoju technologie te udoskonalono i rozprzestrzeniono na nowe dziedziny zastosowań. Niektóre z nich zostały także współcześnie dostosowane do ogólnego postępu cywilizacyjnego - z wykorzystaniem techniki komputerowej i satelitarnej włącznie.

Ochrona katodowa, ze względu na sposób jej realizacji, niemal od samego początku zaliczana była do dziedziny elektrotechniki. Nie pomnę na elektrochemiczny rodowód tej metody ochrony przeciwkorozyjnej - wytyczne, normy i przepisy jej dotyczące, zarówno na świecie jak również i w Polsce, były tworzone w większości przez gremia elektryków.

Również obowiązujące do obligatoryjnego stosowania polskie normy (norma arkuszowa PN-90/E-05030.00÷10 dot. wymagań, badań i nazewnictwa w zakresie ochrony katodowej) są normami elektrycznymi.

Wymóg stosowania ochrony katodowej narzuca Prawo budowlane w postaci rozporządzeń Ministra Przemysłu i Handlu jedynie w odniesieniu do wysokociśnieniowych rurociągów stalowych transportujących gaz oraz paliwa płynne i ropę naftową. Stan ten niestety nie odzwierciedla światowego poziomu wiedzy i istniejących możliwości technicznych w odniesieniu do całej gospodarki, ani w stosunku do międzynarodowych wymagań ochrony środowiska naturalnego.

Zakres stosowania technologii ochrony elektrochemicznej

O ile rozpowszechnienie ochrony katodowej na świecie można szacować już na blisko milion instalacji i tyleż chronionych tą techniką obiektów, to zastosowanie ochrony anodowej - w jej klasycznej formie - dotyczy zapewne zaledwie tysiąca urządzeń w przemyśle chemicznym. Przeliczenie tych wielkości na chronioną powierzchnię nie jest możliwe, ponieważ w większości przypadków instalacje ochrony elektrochemicznej nie są powtarzalne. Na przykład na rurociągach miejskiej infrastruktury podziemnej zasięg działania ochrony katodowej z pojedynczej instalacji może nie przekroczyć kilkudziesięciu metrów, podczas gdy na rurociągu magistralnym może sięgać nawet stu kilometrów. Rynek ochrony elektrochemicznej nie jest duży i ma tendencję samo ograniczającą się - raz wykonana sprawnie działająca instalacja wymaga wymiany często dopiero po kilkunastu latach. Jego rozwój zależy w największej mierze od nowych inwestycji oraz wprowadzeniu nowych zastosowań tej technologii.

Podobnie jak na świecie w Polsce w znaczącym wymiarze stosuje się technologie ochrony katodowej w gospodarce morskiej i do rurociągów podziemnych. Pomimo tego jej zakres wykorzystania jest stosunkowo mały i ogranicza się głównie do jednostek pływających oraz rurociągów magistralnych gazowych i naftowych. Można szacować, że ilość tych instalacji w Polsce nie jest jeszcze większa od 2.000.

Ochrona anodowa w Polsce nie przekroczyła wymiaru technologii prototypowej, stąd zakres i znaczenie ekonomiczne tej techniki są niewielkie. Nie będzie także tutaj omówiona.

Ochronę katodową w zależności od sposobu pozyskiwania do ochrony stałego prądu elektrycznego dzieli się na:

- ochronę za pomocą anod galwanicznych (protektorów),
- ochronę z wykorzystaniem zewnętrznego źródła prądu, oraz
- drenaże elektryczne.

Z punktu widzenia mechanizmu i ogólnej zasady działania na procesy korozyjne techniki te zasadniczo nie różnią się między sobą. O ich wyborze często decydują względy ekonomiczne. Drenaże elektryczne służą w pierwszym rzędzie do eliminowania szkodliwego oddziaływania na podziemne i podwodne konstrukcje prądów błądzących i dlatego zagadnienia te zostaną omówione oddzielnie.

Rurociagi podziemne

Ochrona katodowa rurociągów rozwinęła się w latach trzydziestych bieżącego stulecia w USA. W Europie, poza wcześniejszymi próbami eliminowania prądów błądzących, jej rozkwit rozpoczął się w okresie powojennym. W Polsce rozpoczęto ją szerzej stosować w latach sześćdziesiątych dla rurociągów magistralnych i pancerzy kabli dalekosiężnych.

Obecnie gazociągi wysokiego ciśnienia obok ropociągów i rurociągów produktów naftowych należą w Polsce do konstrukcji, na których ochrona katodowa jest najpowszechniej

stosowana [1]. Sieć gazociągów przesyłowych wysokiego ciśnienia licząca około 17.500 km, jest objęta ochroną katodową w blisko 95%. Transport ropy naftowej i produktów ropopochodnych jest realizowany przy pomocy sieci rurociągów dalekosiężnych o łącznej długości ok. 2500 km również objętych ochroną katodową nieomal w całości. Średni wskaźnik zagęszczenia istniejących stacji ochrony katodowej wynosi ok. 12,5 na kilometr dla gazociągów i ok. 19 na kilometr dla naftociągów.

Wszystkie nowobudowane gazociągi przesyłowe wyposaża się w ochronę katodową, zgodnie z wymaganiem: „gazociągi stalowe powinny być zabezpieczone przed korozją zewnętrzną przez jednoczesne zastosowanie powłok ochronnych izolacyjnych i ochrony elektrochemicznej” w Rozporządzeniu Ministra Przemysłu i Handlu z dnia 14.11.1995 w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać sieci gazowe. Przepisy te stosuje się „przy projektowaniu, budowie, przebudowie i rozbudowie sieci gazowych, służących do przesyłania i rozprowadzania paliw gazowych”. Tak więc wymóg stosowania ochrony elektrochemicznej dotyczy również nowobudowanych sieci dystrybucyjnych średniego i niskiego ciśnienia. Wymóg ten w praktyce nie zawsze jest przestrzegany. W odniesieniu do ropociągów obowiązuje Rozporządzenie Ministra Przemysłu i Handlu z dnia 30.08.1996 w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać bazy i stacje paliw płynnych, rurociągi dalekosiężne do transportu ropy naftowej i produktów naftowych i ich usytuowanie.

Istniejąca sieć dystrybucyjna gazociągów w olbrzymiej większości nie jest chroniona katodowo, ponieważ nie więcej niż 3% tej sieci, liczącej łącznie około 57.000 km, jest objętych taką ochroną. Należy oczekiwać zmiany tej sytuacji, nie tylko dlatego że na nowych odcinkach sieci dystrybucyjnej ochrona będzie coraz częściej instalowana, lecz także w wyniku obejmowania ochroną katodową istniejącej sieci stalowej, zamiast jej rutynowej wymiany na sieć polietylenową, jak to się często dzieje dzisiaj.

W systemie przesyłowym gazu pracują także inne urządzenia i armatura, które powinny być objęte ochroną katodową. Ani jedna z 20 tłoczni nie posiada takiego zabezpieczenia przeciwkorozyjnego. Część tłoczni jest elektrycznie odcięta od gazociągów przesyłowych za pomocą monobloków izolujących. Spośród około 4.000 stacji redukcyjno – pomiarowych, pojedyncze mają zainstalowaną autonomiczną ochronę katodową. Jej realizacja jest kłopotliwa ze względu na istniejące połączenia rurociągów z uzienieniami roboczymi urządzeń elektrycznych. Na nowobudowanych 5 dużych tłoczniach gazu na gazociąg tranzytowy przewidziana została ochrona katodowa urządzeń podziemnych.

Na tle omówionego wyżej zakresu zastosowania ochrony katodowej, wykorzystanie tej techniki do innych rurociągów stalowych są w zasadzie marginalne. Zaledwie na kilku stalowych magistralnych wodociągach i kolektorach zrzutowych ścieków istnieją sprawnie funkcjonujące systemy ochrony katodowej (np. International Paper w Kwidzynie, Zakłady Sodowe „Mątwy” w Inowrocławiu, „Zachem” w Bydgoszczy, MPWiK w Koszalinie), o łącznej długości zaledwie kilkuset kilometrów.

W końcu lat 70-tych ochroną katodową objęto szereg odcinków magistralnych sieci ciepłowniczych w kilku dużych miastach. Zadaniem wdrożonych wówczas systemów była ochrona rurociągów ciepłowniczych w pianobetonie przed szkodliwym oddziaływaniem prądów błądzących. Obecnie nie stosuje się tego rodzaju izolacji ciepłochronnej, została wyparta przez rurociągi preizolowane w tworzywach sztucznych.

Rurociągi podmorskie

Podmorskie rurociągi są z reguły dość dokładnie odizolowane od środowiska wodnego, za pomocą różnych wielowarstwowych systemów powłokowych. Aby zapobiec ewentualnym zagrożeniom korozyjnym, stosuje się na tego typu rurociągach ochronę

katodową za pomocą anod galwanicznych, zazwyczaj w kształcie pierścienia. Realizuje się ją już podczas budowy rurociągu, przed opuszczeniem budowanego odcinka rurociągu na dno morza. Takie anody pierścieniowe umieszcza się na rurociągu co około 100–200 m. Masa anod galwanicznych powinna być obliczona na cały przewidywany czas eksploatacji rurociągu, ponieważ wymiana anod jest tu praktycznie niemożliwa.

W Polsce przemysł wydobywczy z dna morskiego dopiero się rozwija i ochrona rurociągów podmorskich jest sprawą przyszłościową. Poza krótkimi odcinkami rur ułożonych na dnie morza i rzek oraz basenów portowych ochrona katodowa z zewnętrznym źródłem prądu nie jest stosowana.

Pancerze kabli telekomunikacyjnych

Ołowiane pancerze kabli i znajdujący się na nich oplot z taśmy stalowej (pancerz) mogą być eksploatowane w warunkach ziemnych z zastosowaniem ochrony katodowej przez wiele lat. Stosuje się ochronę za pomocą protektorów magnezowych lub instalacje z zewnętrznym źródłem prądu.

W Polsce, w latach 60-tych powołane zostały w telekomunikacji służby przeciwkorozyjne, których zadaniem było wykonanie i utrzymanie w ruchu instalacji ochrony katodowej na wszystkich kablach międzymiastowych. Znałe były przypadki utrzymywania w ten sposób w eksploatacji przez wiele lat kabli jeszcze z okresu przedwojennego.

Rozwój technologii, który wyeliminował ołowiane pancerze kabli i wprowadził jako powłoki tworzywa sztuczne, a później również światłowody, spowodował, że zainteresowanie technologią ochrony katodowej w telekomunikacji, zarówno w Polsce jak i na całym świecie wyraźnie zmalało. Należy oczekiwać, że będzie ono dalej się zmniejszać i w niedługim okresie czasu utrzymywanie w ruchu istniejących instalacji ochrony katodowej okaże się zbędne.

W podobnej sytuacji znalazła się telekomunikacja wojskowa i kolejowa.

Infrastruktura podziemna

Podziemna infrastruktura miejska i przemysłowa to gęszcz rurociągów i kabli o różnym przeznaczeniu, wykonanych w różnym okresie i z różnych materiałów, to także podziemne i podwodne konstrukcje żelbetowe. Wzajemne ich oddziaływanie, zwłaszcza w obecności prądów błądzących, sprawia, że awarie korozyjne zdarzają się w tych warunkach dość często. Są one zazwyczaj uciążliwe technicznie, zaś grozę sytuacji potęguje zazwyczaj brak niezbędnej w czasie napraw dokumentacji technicznej. Usuwanie awarii jest niezwykle kłopotliwe i kosztowne.

Jedyną skuteczną techniką ochrony infrastruktury podziemnej jest ochrona katodowa, która pozwala na zmniejszenie negatywnych skutków korozji bez potrzeby wymiany i renowacji obiektów podziemnych. Stosowanie jej jest bardzo trudne i kosztowne, ale każde inne działania techniczne są znacznie mniej efektywne. Sądząc z tonu literatury specjalistycznej zainteresowanie ochroną infrastruktury stale na świecie narasta.

W Polsce dobrym przykładem dbałości o podziemny majątek jest Elektrownia OPOLE, gdzie wdrożony został kompleksowy system ochrony katodowej całej infrastruktury podziemnej elektrowni.

Orurowania i studnie

Jednym z typowych zastosowań ochrony katodowej szeroko wykorzystywanym w przemyśle wydobywczym jest zabezpieczenie zewnętrznych powierzchni orurowań odwiertów i studni głębinowych. Charakterystycznym zagrożeniem jest tu makroogniwo korozyjne występujące pomiędzy górną i dolną częścią rury. Z punktu widzenia technologicz-

nego odmienna jest w tym przypadku technika pomiarowa skuteczności ochrony katodowej, ponieważ istnieje tylko do jednego końca rury.

W Polsce ani jeden otwór kopalniany, wydobywczy gazu czy ropy naftowej nie jest objęty ochroną katodową. Jedynie na jednym z 4 istniejących podziemnych magazynów gazu jest zainstalowana ochrona katodowa, która obejmuje orurowania otworów magazynowych oraz gazociągi złożowe. Na budowanych obecnie podziemnych magazynach gazu przewidziane jest zastosowanie ochrony katodowej.

W latach 80-tych z dużym sukcesem zastosowano 50 indywidualnych instalacji ochrony katodowej orurowań i filtrów ze stali ocynkowanej studni odwadniających kopalnię odkrywkową KWB „Bełchatów”. Występująca wcześniej korozja filtrów ok. 300 m pod ziemią uniemożliwiała prawidłowe funkcjonowanie systemu odwadniającego kopalni.

Do ciekawych zastosowań ochrony katodowej konstrukcji pionowych należy zaliczyć także prototypową instalację zabezpieczenia obudowy tubingowej szybu w KGHM w Lubinie z wykorzystaniem rur mrożeńiowych w charakterze anod.

Zbiorniki podziemne i naziemne

Zbiorniki całkowicie zakopane w ziemi lub posadowione na powierzchni ziemi nadają się idealnie do realizacji ochrony katodowej. W krajach rozwiniętych, głównie w USA, za sprawą Agencji Ochrony Środowiska, ochrona katodowa zbiorników paliwowych jest uznana za jedną z najlepszych technik eliminowania procesów korozji i niebezpiecznych wycieków. W tym zakresie wydane są odpowiednie wytyczne i normy. Dla obiektów istniejących jest to jedyna dopuszczona metoda ochrony przeciwkorozyjnej, umożliwiającą dalszą eksploatację tych zbiorników.

W Polsce niestety tego typu podejścia nie ma. Obserwuje się natomiast rozwój baz paliwowych i budowę podziemnych zbiorników na gaz (LPG). Szereg zbiorników tego rodzaju jest chronionych katodowo, mimo, że nie jest to wymagane przepisami (Rozporządzenie Ministra Przemysłu i Handlu z dnia 30.08.1996 w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać bazy i stacje paliw płynnych, rurociągi dalekosiężne do transportu ropy naftowej i produktów naftowych i ich usytuowanie - nie wymaga stosowania ochrony katodowej). Już pod koniec lat 60-tych wdrożono system ochrony katodowej zbiorników paliwowych na lotniskach wojskowych. W związku z taką sytuacją należy dążyć do nowelizacji rozporządzenia i wprowadzenia wymogu ochrony katodowej zbiorników zarówno podziemnych, jak również den zbiorników naziemnych w bazach paliwowych i rafineriach.

Istotną trudnością przy realizacji ochrony katodowej zbiorników podziemnych jest konieczność spełniania przez instalację jednocześnie wymagań bezpieczeństwa pożarowego, elektrycznego oraz kryteriów ochrony przeciwkorozyjnej.

Konstrukcje hydrotechniczne

Ochrona katodowa podwodnych elementów stalowych konstrukcji hydrotechnicznych (nabrzeży, ścianek szczelnych, pirsów itp.) powszechnie stosowana jest na całym świecie. Ostatnio w portach i stocznjach zagranicznych, jak i w polskich, wprowadzana jest częściej niż dawniej ochrona elektrochemiczna powierzchni ścianek szczelnych oraz pirsów [2]. Przewidując wprowadzenie w przyszłości ochrony katodowej ścianki, należy dokonać w czasie jej budowy połączenia elektrycznego wszystkich grodzic. Ochronę katodową powierzchni ścianki szczelnej w pasie strefy wodnej można przeprowadzić stosując ochronę za pomocą galwanicznych anod cynkowych lub aluminiowych lub też ochronę zasilaną z zewnętrznego źródła prądu. Wybór jednego z tych sposobów powinien opierać się na wynikach analizy techniczno-ekonomicznej realizacji ochrony w danych warunkach. W analizie tej powinno się

brać pod uwagę aktualny stan techniczny ścianki, przewidywany czas jej dalszej eksploatacji i sposób użytkowania nabrzeża lub basenu.

Do podpierania różnego rodzaju nadwodnych konstrukcji hydrotechnicznych w portach i stoczniach, stosuje się powszechnie rurowe pale stalowe, wbijane w dno basenu. Długości tych pali w strefie wodnej wynoszą od 5 do 20 m, a ich średnice od 0,3 m do ponad 2 m. Tylko w nielicznych przypadkach pale są wbijane i eksploatowane jako pojedyncze, najczęściej obiekt jest podparty na licznych zespołach pali, liczących nawet do kilkudziesięciu sztuk, wbitych stosunkowo blisko siebie. Najstarsze, ale eksploatowane jeszcze, podpory palowe złożone są na ogół z pali niemalowanych. Konstrukcje hydrotechniczne, budowane w Polsce na początku lat siedemdziesiątych i później, oparte były na palach stalowych częściowo lub całkowicie pokrytych powłokami farb bitumiczno-epoksydowych, nakładanych na powierzchnie pali przed ich wbiciem. W ostatnich kilku latach na nowych budowach w Polsce stosowane bywają pale z wykonaną fabrycznie powłoką wielowarstwową. W każdym przypadku konstrukcji palowej należy stosować ochronę katodową powierzchni w strefie wodnej. Oczywiście w każdym z wymienionych przypadków należy stosować inne jakościowo i ilościowo rozwiązanie projektowe ochrony katodowej. Zazwyczaj zadawające rezultaty mogą być osiągnięte za pomocą galwanicznych anod cynkowych lub aluminium. Niestety, zakres zrealizowanych systemów ochrony katodowej tego typu konstrukcji hydrotechnicznych jest dalece mniejszy od zadawalającego [3].

Konstrukcje podwodne morskich platform wiertniczych lub wydobywczych są chronione najczęściej za pomocą anod galwanicznych, chociaż znane są także i inne rozwiązania. Anody są mocowane w czasie budowy platformy na lądzie. Ponieważ wymiana anod galwanicznych na nowe, w przypadku ich zużycia w czasie eksploatacji platformy, jest zbyt trudna technicznie, więc projektuje się i stosuje anody o takich wymiarach i w takiej liczbie, aby uzyskać ochronę przeciwkorozyjną podwodnej konstrukcji do chwili zakończenia eksploatacji platformy, tj. na okres nawet 25 lat. W Polsce eksploatowana jest aktualnie tylko jedna platforma wiertnicza przez przedsiębiorstwo „Petrobaltic”. Nie jest wykluczone, że dziedzina ta rozwinie się w niedalekiej przyszłości.

Jednostki pływające i doki

Podwodne części poszycia kadłubów statków morskich, wraz z pasem wodnicy, chroni się przed korozją metodami elektrochemicznymi. Ochrona ta, w niemal wszystkich przypadkach spotykanych w praktyce żeglugowej, jest ochroną uzupełniającą działanie ochronne powłok malarskich na podwodnej części poszycia kadłuba statku. Ochroną katodową obejmuje się równocześnie płetwę sterową, a niekiedy również płyty śruby napędowej. Stosowane są dwa systemy ochrony katodowej kadłuba, które są równorzędne pod względem osiąganych rezultatów ochrony przeciwkorozyjnej:

- ochrona za pomocą anod galwanicznych umieszczonych na podwodnej powierzchni poszycia kadłuba i na płetwie sterowej,
- ochrona za pomocą anod nieroztwierzalnych umieszczonych na podwodnej części poszycia kadłuba statku i zasilanych ze stacji ochrony katodowej znajdującej się na statku.

W polskiej gospodarce morskiej, począwszy już od lat sześćdziesiątych, stosowano ochronę katodową kadłubów statków towarowych, pasażerskich, rybackich i technicznych, na bardzo szeroką skalę. Ochroną tą objęto prawie wszystkie statki Polskiej Żeglugi Morskiej, Polskich Linii Oceanicznych, statki armatorów rybackich: trawlerów-przetwórn i baz, a także statki floty technicznej. W latach 1965 – 1985 zrealizowano blisko 300 projektów ochrony katodowej dla różnych typów statków (statki bliźniacze, budowane w seriach, były chronione według takiej samej dokumentacji projektowej).

Instalacje ochrony katodowej poszycia kadłuba statków morskich z zastosowaniem zewnętrznego źródła prądu wykonuje się na małych statkach jako układ dwu-anodowy umieszczony w części rufowej kadłuba, a na większych (dłuższych) kadłubach statku jako układ cztero-anodowy, z anodami na rufie i dziobie (po lewej i prawej burcie), zasilanymi z jednej lub dwóch niezależnych stacji ochrony katodowej. Trzon płetwy sterowej oraz wał napędzający śrubę łączy się elektrycznie kadłubem.

Opisana metoda ochrony katodowej z zewnętrznym źródłem prądu jest na świecie stosowana dość szeroko, zwłaszcza na statkach dużej nośności. W polskiej flocie morskiej stosowana jest ta metoda ochrony katodowej tylko na nielicznych statkach, mimo że polskie stocznie realizują, na zlecenia armatorów, instalacje ochrony katodowej tak z elementów produkcji krajowej jak i elementów oferowanych przez firmy zagraniczne (stacje ochrony katodowej, anody, elektrody pomiarowo-sterujące, ekrany izolujące i inne elementy).

Wśród interesujących oryginalnych polskich rozwiązań związanych z ochroną katodową statków jest system jednoczesnego uzyskiwania maksymalnego natężenia prądu w obwodzie ochrony katodowej śruby przy zachowaniu znikomej różnicy potencjałów wał – kadłub, co osiąga się przy zastosowaniu szczotek grafitowych ślizgających się bezpośrednio po powierzchni wału oraz automatycznego źródła kompensującego spadek napięcia na zestyku tych szczotek z wałem.

W stoczniach eksploatowane są doki suche, doki pływające oraz urządzenia podnoszące statki (podnośniki pontonów i urządzenia do pionowego podnoszenia statków). Baseny pionowych podnośników statków są obramowane stalowymi ściankami szczelnymi. W tych basenach jest zatapiający i wynurzający stalowy ponton lub inna konstrukcja nośna podnośnika. W przypadku pływającego podnośnika pontonów, część konstrukcji nośnej oraz dno i burty pontonu nośnego są stale zanurzone w wodzie.

Powierzchnie wymienionych konstrukcji mogą i powinny być chronione elektrochemicznie w części stale zanurzonej w wodzie morskiej. W przypadku eksploatacji doków w morskich wodach słonawych (Morze Bałtyckie) najbardziej opłacalne jest stosowanie ochrony katodowej zasilanej z zewnętrznego źródła prądu, z anodami nieroztwierzalnymi usytuowanymi pod doki. W przypadku małych obiektów, takich jak pionowe podnośniki statków, można uznać za uzasadnione zastosowanie ochrony galwanicznej. Ochronę galwaniczną projektuje się zwykle na okres 10–15 lat. Ochrona doków pływających w Gdańskiej Stoczni Remontowej stosowana jest od szeregu lat (niestety nie na wszystkich obiektach).

Konstrukcje żelbetowe

Ochronę katodową konstrukcji żelbetowych w odniesieniu do elementów stale zanurzonych w wodzie i zakopanych stosuje się od szeregu lat analogicznie jak dla konstrukcji stalowych, dopasowując do tego jedynie kryteria ochrony.

Zupełnie nową technologią ochrony katodowej jest zabezpieczenie prętów stalowych w środowisku betonu (cieczy porowej), a więc w przestrzeni konstrukcji kontaktującej się z powietrzem. W uprzemysłowionych krajach świata coraz szerzej jest stosowany ten rodzaj ochrony katodowej stalowego zbrojenia betonu [4]. W przypadku budowli drogowych w USA chronionych jest już ponad 350.000 m², we Włoszech – 110.000 m², podobnie w Anglii i Japonii. W Stanach Zjednoczonych prekursorem ochrony katodowej budowli drogowych była Federalna Agencja Autostrad; po pierwszych pozytywnych próbach przeprowadzonych w 1978 r. rozpoczęto ogólnokrajowy program, w rezultacie którego do 1986 r. zrealizowano 300 instalacji ochrony katodowej płyt jezdnych istniejących mostów i wiaduktów. Z kolei Włosi jako pierwsi zaczęli stosować ochronę katodową zbrojenia na nowo budowanych konstrukcjach drogowych w Alpach Wysokich, wychodząc z założenia, że jeżeli budowla

będzie eksploatowana w warunkach skażenia betonu chlorkami, to tańsze jest zainstalowanie ochrony katodowej na etapie jej budowania. Względy ekonomiczne oraz wymóg zapewnienia bezpieczeństwa ludziom były przyczyną wytypowania ochrony katodowej jako optymalnego zabezpieczenia żelbetowej obudowy Eurotuneu.

Ochronę katodową realizuje się przez polaryzację stalowego zbrojenia za pomocą zewnętrznego źródła prądu stałego, którego ujemny biegun podłączony jest do zbrojenia, zaś dodatni – do anody umieszczonej na powierzchni budowli lub pod 2-2,5 cm warstwą natryskanego betonu. Opracowanych jest już kilka dodatkowych odmian systemów ochrony: prewencja katodowa, realkalizacja betonu oraz ługowanie chlorków.

Krajowe unormowania prawne nie przewidują konieczności stosowania ochrony katodowej stalowego zbrojenia betonu. Mało tego – w przypadku betonu zwykłego dopuszczają 2% dodatek chlorku wapnia! Efektem istniejących przepisów i świadomości projektantów jest co najwyżej stosowanie ochrony materiałowo-strukturalnej oraz powierzchniowej, przy całkowitym wyeliminowaniu ochrony katodowej.

Na dzień dzisiejszy w Polsce nie została zrealizowana ani jedna instalacja tej nowoczesnej metody zabezpieczenia przed korozją. Za sprawę pilną należy uważać potrzebę opracowania odpowiednich wytycznych, przeprowadzenie prób poligonowych i wdrożenie tej techniki w krajowym budownictwie.

Koszt i znaczenie strategiczne budowli żelbetowych wymagają poważnego potraktowania zagadnień związanych z zabezpieczeniem ich przed korozją i znalezienia odpowiednich środków finansowych na realizację proponowanych w niniejszym opracowaniu działań.

Zbiorniki i rurociągi - ochrona od strony wewnętrznej, oczyszczalnie ścieków

Stalowe naczynie napełnione środowiskiem elektrolitycznym jest idealnym obiektem do realizacji ochrony elektrochemicznej, ponieważ umieszczenie w tym naczyniu elektrody pomocniczej nie stanowi żadnej trudności, podobnie jak uzyskanie równomiernego rozkładu prądu na chronionym obiekcie. Tak jest oczywiście dla obiektów prostych, np. zbiorników wody pitnej czy zasobników wody ciepłej.

Ochrona katodowa zbiorników i ładowni statków napełnionych stale lub okresowo wodą morską jest obecnie powszechnie stosowana, w dużym zakresie także w Polsce, tak w przypadku zbiorników pokrytych ochronnymi powłokami malarskimi, jak i zbiorników niemalowanych. Stosuje się tu wyłącznie ochronę katodową za pomocą cynkowych lub aluminiumowych anod galwanicznych, a w niektórych wyjątkowych przypadkach, stosowane są również protektory magnezowe. Podobną ochronę wprowadza się do okresowo balastowanych ładowni masowców i zbiornikowców.

Ciekawym zastosowaniem ochrony katodowej jest zabezpieczenie przed korozją wewnętrznych powierzchni rurociągów wielkośrednicowych. Prototypowa instalacja testowana była już w pod koniec lat 60-tych wewnątrz rur opadowych Elektrowni Szczytowo-Pompowej „Żydowo”, gdzie zastosowano anody lokalne, a ostatnio z powodzeniem zrealizowany został projekt tego rodzaju ochrony z anodą centralną w obiegu chłodzącym Elektrowni „Łaziska”.

Innym zastosowaniem ochrony katodowej, wdrażanej w Polsce od szeregu lat jest zabezpieczenie od strony wewnętrznej stalowych zbiorników i komór w przemysłowych oraz komunalnych oczyszczalniach ścieków. Zastosowano co najmniej kilkanaście tego typu instalacji dla różnej konfiguracji oczyszczalni. Dodatkową zaletą polaryzacji katodowej okazało się znacznie mniejsze zatykanie otworów w rusztach napowietrzających, co w znaczący sposób podnosiło wydajność natleniania i przedłużało okres pomiędzy przestojami.

Wymienniki ciepła, obiegi wodne

W wymiennikach ciepła największe zagrożenie korozyjne występuje w rejonie den sitowych i korpusów, co spowodowane jest zwykle korozją kontaktową wynikającą z różnych materiałów stosowanych w tych urządzeniach - z konieczności, ponieważ o ich konstrukcji decydują parametry wymiany ciepła. Z tego też powodu elementy te zazwyczaj nie posiadają żadnego zabezpieczenia powłokowego. Jak wykazała praktyka w tego rodzaju obiegach wodnych jedynie skuteczną ochronę przeciwkorozyjną można osiągnąć w drodze polaryzacji katodowej. W przemyśle stosuje się tysiące wymienników ciepła, w których możliwe jest wydłużenie ich żywotności za pomocą ochrony katodowej. Niektórzy producenci wymienników zaopatrują je w anody galwaniczne, które szybko się zużywają i następnie nie są wymieniane na nowe. System ochrony z zewnętrznego źródła prądu z zastosowaniem nowoczesnych anod tytanowych pokrytych aktywnymi tlenkami z pozytywnym rezultatem przetestowany został w Elektrociepłowni „Zerań”.

Natomiast zarówno na statkach armatorów polskich, jak i na statkach zagranicznych była i jest stosowana systematycznie ochrona katodowa komór wodnych chłodziń. W latach osiemdziesiątych opracowano w kraju system ochrony katodowej chłodziń z zastosowaniem aluminiowych anod galwanicznych. Opracowano i wdrożono do produkcji w Zakładach Metalurgicznych Trzebinia aluminiowe anody, o konstrukcji, wymiarach i kształtach przystosowanych do ochrony komór wodnych, wszystkich typowych chłodziń stosowanych na polskich statkach. Ostatnio opracowano i wypróbowano na statku nowy system ochrony katodowej komór wodnych chłodziń okrętowych, z zastosowaniem zewnętrznego źródła prądu. Opracowany system wydaje się atrakcyjny, szczególnie w przypadku statku, na którym pracuje kilka chłodziń dużych rozmiarów. System pozwala na samoczynne (bez nadzoru) osiąganie odpowiedniego poziomu polaryzacji komór wodnych chłodziń oraz na wieloletnią pracę instalacji ochrony katodowej, bez konieczności wymiany anod.

Na mniejszych obiektach, ale za to w znaczącej ilości (kilkadziesiąt instalacji) zastosowano ochronę katodową do zasobników ciepła i ochrony obiegów wodnych na osiedlach mieszkaniowych. Cechą tego rozwiązania jest zastosowanie rozтворzalnych anod aluminiowych i wprowadzenie do obiegu ciepłej wody gospodarczej nieznacznej ilości jonów glinowych, które przeciwdziałają korozji rur stalowych ocynkowanych. Metoda stosowana była w kilku miastach polskich.

Instalacje przemysłowe

Wszędzie tam, gdzie materiał metalowy ulega zniszczeniu korozyjnemu a konstrukcja polaryzuje się katodowo i posiada ciągłość elektryczną można stosować ochronę elektrochemiczną. Takie podejście spowodowało, że możliwość zastosowania omawianego rodzaju ochrony została sprawdzona w szeregu rozmaitych przypadkach, np. we wnętrzu pomp i zasuw, w różnego rodzaju reaktorach chemicznych.

Nie bardzo wiadomo jak zakwalifikować technologię ochrony elektrochemicznej, w której dzięki polaryzacji katodowej (przesunięciu potencjału w kierunku ujemnym) hamuje się przebieg procesów korozji lokalnej (wżerowej, szczelinowej) stali odpornych na korozję i uzyskuje się trwały stan pasywny - czy do ochrony katodowej, ze względu na kierunek polaryzacji, czy do anodowej, ponieważ w rezultacie osiąga się charakterystyczny dla tej technologii stan pasywny na zabezpieczanej powierzchni. Tak rozumiana ochrona elektrochemiczna stali stopowych została zastosowana na przełomie lat 60-tych i 70-tych do zabezpieczenia przed skutkami pękania korozyjnego w wodzie morskiej. Od tego czasu prowadzono szereg badań nad zabezpieczeniem tą metodą stali stopowych głównie 304 (odpowiednik 1H19N9) i 316 w wodzie morskiej oraz w wodach technologicznych

zawierających jony chlorkowe, przed skutkami pękania korozyjnego, korozji szczelinowej i wżerowej. Do ochrony stosuje się głównie anody galwaniczne ze stali węglowej lub cynku. Przykładem są tu zastosowania takiej techniki w przemyśle papierniczym.

W Polsce opracowano i z powodzeniem wdrożono ochronę wykonanych ze stali odpornych na korozję filtrów bielarskich w International Paper w Kwidzynie.

Prądy błędzące

Prądy błędzące stanowią największe zagrożenie korozyjne dla podziemnych i podwodnych konstrukcji metalowych. Towarzysząca tym prądom korozja elektrolityczna jest przyczyną groźnych awarii korozyjnych rurociągów, pancerzy kabli, zbiorników i konstrukcji żelbetowych - całej infrastruktury podziemnej. Prądy błędzące odgałęziają się z obwodów roboczych. Szkodliwe są głównie prądy stałe przedostające się do ziemi z trakcji elektrycznych, urządzeń spawalniczych, galwanizerni czy akumulatorowni. Ze względu na powszechność występowania w aglomeracjach miejskich prądy błędzące wpływające z trakcyjnych obwodów powrotnych są przyczyną największych uszkodzeń korozyjnych.

Należy wyraźnie zaznaczyć, że problem prądów błędzących występuje z dużym nasileniem w krajach o silnie rozwiniętej sieci trakcji prądu stałego i stąd obecnie nie jest już problemem o zasięgu światowym [5]. Badania nad ochroną elektrochemiczną w krajach o przodującej technice ukierunkowane są na ochronę katodową przed korozją powodowaną innymi czynnikami, podczas gdy badania nad prądami błędzącymi i ochroną metalowych konstrukcji przed ich szkodliwym oddziaływaniem prowadzone są w węższym zakresie. Polska należy do krajów, w których problem zagrożenia prądami błędzącymi nadal występuje w szczególnej ostrości. Nakłada się na to szereg czynników:

- eksploatacja trakcji kolejowej i tramwajowej prądu stałego (zamiast prądu przemiennego),
- stosunkowo niska jakość izolacji przeciwkorozyjnych na istniejącej infrastrukturze konstrukcji podziemnych,
- brak uregulowań prawnych rozstrzygających odpowiedzialność za powstałe uszkodzenia spowodowane przez prądy błędzące, a także
- niewiedza i brak dyscypliny w wypełnianiu obowiązków wynikających z istniejących wytycznych i przepisów technicznych, których zadaniem jest minimalizacja szkodliwych oddziaływań prądów błędzących na konstrukcje podziemne.

Ocena zagrożenia korozją elektrolityczną

Oddziaływanie prądów błędzących na konstrukcje podziemne ma charakter losowy. Jest to zasadnicza trudność przy badaniu tych prądów, ponieważ do realizacji pomiarów niezbędna jest specjalna aparatura i technika pomiarowa.

Badania nad korozją elektrolityczną powodowaną prądami błędzącymi, kryteriami zagrożeń metalowych konstrukcji, metodami ochrony itp. prowadzone są w kraju od szeregu lat [6]. W Polsce opracowano, stosowaną obecnie w szeregu innych krajach, technikę badania prądów błędzących, tzw. metodę korelacyjną. Polega ona w najogólniejszym zarysie na rejestracji i późniejszej analizie zmian potencjału konstrukcji podziemnej w funkcji zmian napięcia pomiędzy badaną konstrukcją a źródłem prądów błędzących. W ciągu kilkunastu lat ulegała ona ciągłej modyfikacji, doczekała się także krajowej produkcji przyrządów pomiarowych przeznaczonych wyłącznie do jej realizacji. Obecnie wykorzystuje się mikroprocesorowe rejestratory prądów błędzących uzbrojone w nowoczesne oprogramowanie, znacznie ułatwiające wykonanie pomiarów oraz interpretację wyników. Istniejące na rynku rejestratory firm zachodnich, które mogłyby być zastosowane do pomiarów prądów błędzących, nie posiadają odpowiedniego oprogramowania, ponadto są bardzo kosztowne.

Natomiast kraje, w których problem prądów błądzących jest równie istotny (np. Rosja, Węgry, Czechy, Słowacja) rzadko prezentują w literaturze światowej swoje osiągnięcia w tej dziedzinie, a aparatura pomiarowa ich produkcji jest niedostępna na rynku krajowym.

Ze względu na skalę problemu dalsze kontynuowanie prac w omawianej dziedzinie jest konieczne i winno doprowadzić do ujednolicenia w skali kraju metod i środków oceny zagrożenia prądami błądzącymi, w tym stosowanej aparatury i oprogramowania. Celowe jest także podjęcie prac przygotowawczych do normalizacji metody korelacyjnej.

Warto w tym miejscu zwrócić uwagę na rodzący się powoli problem korozji wywoływanej przez prądy przemienne. Pochodzą one z różnych źródeł, zwykle z linii wysokiego napięcia. Mają szkodliwy wpływ przy odpowiednio dużej gęstości prądu (powyżej 20-30 A/m²), którą osiągać mogą w niewielkich uszkodzeniach współczesnych izolacji przeciwkorozyjnych na rurociągach. Im lepsza jakość pokryć ochronnych na rurociągach, tym zagrożenie to jest większe.

Metody ochrony przed prądami błądzącymi

Podstawową techniką, zmierzającą do ograniczenia szkodliwego oddziaływania prądów błądzących na konstrukcje podziemne jest ograniczenie do minimum upływu prądów błądzących z obwodów roboczych do ziemi. W odniesieniu do trakcji elektrycznych w Polsce obowiązuje - uznana do obligatoryjnego stosowania - PN-92/E-05024 „Ochrona przed korozją. Ograniczenie upływu prądów błądzących z trakcyjnych sieci powrotnych prądu stałego”. W stosunku do przygotowywanych unormowań europejskich norma polska jest bardziej rygorystyczna, ale wobec specyficznej sytuacji w Polsce ostrzejsze wymagania są konieczne. Z ubolewaniem należy odnotować, że norma ta, obejmująca działania profilaktyczne, nie jest w należyтым stopniu przestrzegana, zwłaszcza przez właścicieli transportu tramwajowego w miastach.

Kolejną metodą zmniejszenia ryzyka oddziaływania prądów błądzących jest stosowanie na nowych obiektach wzmocnionych i specjalnie wzmocnionych powłok izolacyjnych na konstrukcjach w rejonie potencjalnego oddziaływania prądów błądzących. Niestety zasady stosowania tej formy zabezpieczeń nie są w Polsce znormalizowane, co w konsekwencji uniemożliwia określenie odpowiedzialności za awarie korozyjne wywołane przez korozję elektrolityczną. Wydaje się, że wprowadzenie w przyszłości sprzężonej z normą PN-92/E-05024 normy nakładającej wymagania związane z eliminowaniem prądów błądzących przez użytkownika konstrukcji podziemnej w końcu rozwiąże ten problem.

Dla istniejących konstrukcji podziemnych oddziaływanie prądów błądzących ogranicza się za pomocą ochrony katodowej, a w szczególności techniki drenaży elektrycznych. W Polsce dopuszczony jest do stosowania drenaż polaryzowany i drenaż wzmocniony. W obu przypadkach następuje odprowadzenie prądów błądzących z konstrukcji podziemnej do źródła prądów błądzących (ujemnego bieguna zasilania trakcji).

Drenaże elektryczne stosowane są bardzo chętnie, często bez podejmowania działań profilaktycznych i ograniczenia wielkości upływu prądów błądzących z urządzeń powrotnych trakcji, co w konsekwencji wymusza zbędny przepływ prądów w ziemi i naraża niepotrzebnie inne konstrukcje podziemne.

Do oryginalnych polskich rozwiązań w tej dziedzinie należy zliczyć szeroko wdrożoną przełomie lat 70/80 ochronę sieci ciepłowniczych za pomocą drenaży wzmocnionych rekuperujących energię elektryczną. Po raz pierwszy w ostatnich latach zastosowano z powodzeniem ograniczenie prądów błądzących poprzez sekcjonowanie sieci powrotnej na terenie Elektrowni OPOLE.

Poziom technologiczny ochrony elektrochemicznej w Polsce

Rozwój technologii ochrony elektrochemicznej w Polsce odbywał się na podstawie wiedzy i doświadczeń światowych dostępnych poprzez literaturę specjalistyczną oraz kontakty osobiste. Z tego powodu stan technologiczny, przygotowanie do projektowania, wytwarzania podzespołów i budowy instalacji ochrony elektrochemicznej jest dobry. W niektórych zagadnieniach osiągnięcia krajowe nie są gorsze od standardów światowych. Niestety obecnie odbiorcy tej technologii (jak zresztą w wielu innych dziedzinach) nie mają zaufania do rodzimych osiągnięć i kierują się wzorcami zagranicznymi. Ponieważ rynek ochrony elektrochemicznej nie jest zbyt szeroki, działania takie zapewne w niedługim czasie zniweczą oryginalny polski dorobek w tej dziedzinie.

Poniżej omówiono zasadnicze elementy mające wpływ na technologię ochrony katodowej. Ochrona anodowa w tych rozważaniach, jako mało rozpowszechniona, została pominięta.

Kryteria ochrony katodowej

Brak możliwości bezpośredniej oceny skuteczności ochrony katodowej, wynikający z braku dostępu do zabezpieczanej powierzchni metalu, spowodował, że efekt ochronny ocenia się na podstawie tzw. kryterium ochrony. W charakterze kryterium najczęściej służy wartość lub zmiana potencjału chronionej powierzchni albo gęstość prądu ochronnego [7].

Podstawowe kryterium potencjałowe sformułowane zostało w latach trzydziestych i w takiej formie dotrwało w wielu przepisach i normach do dnia dzisiejszego. Nie zmieniły tego również opracowane na przełomie lat 50/60 podstawy kinetyki elektrodowej w odniesieniu do procesów korozyjnych, chociaż rozszerzenie zakresu zastosowania ochrony katodowej poza sferę konstrukcji podziemnych i podwodnych wymusił w tym względzie szereg modyfikacji.

Pomiar potencjału w warunkach terenowych przy polaryzacji katodowej chronionego obiektu obciążony jest błędem omowego spadku napięcia IR. Od lat 70-tych, kiedy zorientowano się w znaczeniu tego błędu, opracowano szereg technik zmierzających do jego wyeliminowania przy wykorzystywaniu potencjałowych kryteriów ochrony. Obecnie obowiązujące polskie normy nawiązują do tego okresu. Kolejną trudnością w latach 90-tych okazało się posługiwanie się kryteriami potencjałowymi dla obiektów posiadających wysokiej jakości izolacje przeciwkorozyjne, zaistniała bowiem potrzeba oceny spełniania tego kryterium nie na całej powierzchni obiektu a jedynie w dnach defektów w izolacji.

Równolegle od ponad 20 lat prowadzone są próby oceny skuteczności ochrony katodowej nie na chronionym obiekcie, a na próbce - połączonej jedynie z obiektem przewodem elektrycznym - wykonanej z takiego samego materiału i umieszczonej przy chronionej powierzchni. Celem tych prac było również określenie wartości potencjału próbki możliwie bez udziału omowego spadku napięcia IR. Koncepcja kryterium potencjałowego jest więc i w tym przypadku aktualna. Ostatnio sposób ten znajduje coraz więcej zwolenników.

Nieco odmienne podejście zostało zaprezentowane w projekcie normy europejskiej prEN 12954 „Ochrona katodowa zakopanych lub zanurzonych konstrukcji. Zasady ogólne”, w której zachowując ogólną koncepcję potencjałowych kryteriów ochrony przyjęto graniczną dopuszczalną wartość szybkości korozji równą 0,01 mm/rok. Pomimo braku konsekwencji jest to wyraźna wskazówka zmiany podejścia do kryteriów ochrony katodowej i próby określenia tzw. kryteriów kinetycznych.

Do oryginalnych osiągnięć polskich w omawianym zakresie jest próba weryfikacji kryteriów ochrony katodowej z wykorzystaniem elektrochemicznych i korozymetrycznych technik pomiaru szybkości korozji stali w warunkach rzeczywistych.

Metody pomiarowe

Stosowane w technice ochrony katodowej metody pomiarowe nierozdzielnie związane są z oceną jej skuteczności, tj. polegają w głównej mierze na badaniu warunku spełniania określonych kryteriów ochrony na całej chronionej powierzchni lub w określonych jej miejscach. Techniki te zmieniały się i rozwijały wraz z rozwojem techniki oraz koncepcji oceny kryteriów ochrony.

Do podstawowego już dzisiaj wyposażenia pomiarowego zaliczyć należy urządzenia synchronizujące wyłączanie szeregu instalacji ochrony katodowej, co umożliwia wykonanie pomiarów potencjałów bez wpływu omowego spadku napięcia IR. Wartość IR, początkowo traktowana jako błąd, obecnie wykorzystywana jest do szacowania jakości powłoki izolacyjnej na chronionych obiektach. Wyniki pomiarów analizowane są i gromadzone w odpowiednich bazach komputerowych. W chwili obecnej technika ta wykorzystywana jest coraz powszechniej w polskim gazownictwie.

W ostatnim okresie rozwinęły się, wraz ze zwiększeniem ilości obiektów zabezpieczonych wysokiej klasy powłokami izolacyjnymi, metody tzw. intensywne, których zadaniem jest określenie warunków ochrony katodowej w defektach izolacji. Badania takie wykonuje się w Polsce własnymi siłami. W krajach rozwiniętych przemysłowo stosuje się do tego celu również wysoce specjalistyczną aparaturę pomiarową, często sprzężoną z systemami satelitarnymi, które umożliwiają precyzyjną lokalizację w terenie. Urządzenia te chwilowo są zbyt drogie i nie są powszechnie stosowane, nie ulega jednak wątpliwości, że będą również niedługo stosowane w Polsce.

Anody galwaniczne

Najprostszy sposób realizacji ochrony katodowej polega na połączeniu chronionego obiektu z umieszczonym w tym samym środowisku protektorem - anodą galwaniczną.

Anody galwaniczne stosowane są do ochrony katodowej [8]:

- metalowych konstrukcji podwodnych,
- konstrukcji podziemnych (zewnątrzne powierzchnie rurociągów i zbiorników),
- wnętrza zbiorników stalowych napełnionych wodą lub wodnymi roztworami soli,
- obiegów wodnych (wewnętrzne powierzchnie rurociągów, wymienniki ciepła).

Jako materiał na anody cynkowe stosowany jest powszechnie w kraju i za granicą stop cynkowy wytworzony z bardzo czystego cynku, z bardzo małymi dodatkami aluminium i kadmu (Zn Al 0,2 Cd 0,05). W Polsce cynk stopowy na anody galwaniczne oraz odlewy anod różnego rodzaju i konstrukcji, produkowały od początku lat sześćdziesiątych Zakłady Metalurgiczne w Trzebinie. Producent ten wykonuje obecnie anody zgodne z wymaganiami odnośnie składu chemicznego, wymiarów, kształtów i konstrukcji określonych w PN-86/E-05030.05. Jakość tych anod była równorzędna, a nawet czasami lepsza od jakości anod cynkowych produkowanych przez firmy zagraniczne (np. angielskie, duńskie, norweskie czy włoskie) i oferowanych obecnie na naszym rynku. Asortyment anod (typów, wymiarów oraz konstrukcji anod) jest bardzo duży i całkowicie zaspokaja obecne potrzeby.

Na anody magnezowe stosowane są stopy magnezu z aluminium i cynkiem oraz z dodatkiem manganu, w ilości zależnej od czystości surowca magnezowego. Większość producentów anod magnezowych stosuje do ich odlewania stop o zawartości ok. 3 % Zn i ok. 6 % Al, z dodatkiem manganu w granicach 0,15–1,3 %. Anody magnezowe są w Polsce produkowane, już od kilkudziesięciu lat, w Zakładach Metalurgicznych w Trzebinie. W produkcji stosuje się obecnie wymagania PN-86/E-05030/05, co do składu stopu oraz kształtu i wymiarów anod. Ze względu na ograniczone możliwości techniczne, Zakład

w Trzebinie nie oferuje anod w tak bogatym asortymencie kształtów i wymiarów jak niektóre firmy zagraniczne np. BKL Alloys z Wielkiej Brytanii.

Anody aluminiowe produkowane są przez wiele firm, które stosują różne receptury składów chemicznych stopów. Jest to związane ze stosowaniem różnych stopowych dodatków aktywujących aluminiowy materiał anodowy, który bez tych dodatków lub z dodatkami niewłaściwie dobranymi, pod względem jakościowym i ilościowym, nie nadaje się do efektywnego stosowania w praktyce ochrony katodowej. W latach osiemdziesiątych opracowano w Polsce i wdrożono do produkcji w Zakładach Metalurgicznych w Trzebinie anody aluminiowe ze stopu $Al\ Zn\ 5\ Mg\ 1\ In\ 0,04$. Opracowując skład tego stopu miano na celu nie tylko uzyskanie aluminiowego materiału anodowego, który odznaczałby się dobrymi własnościami użytkowymi w środowisku wody morskiej o zasoleniu oceanicznym (3,5 %), ale również w stosunkowo nisko zasolonej wodzie bałtyckiej (zasolenie 0,7 %).

Ochronę katodową z zastosowaniem anod galwanicznych, na najszerszą skalę realizuje się w gospodarce morskiej, przy czym używa się prawie wyłącznie anod cynkowych lub aluminiowych. W ochronę katodową kadłuba, za pomocą galwanicznych anod cynkowych, wyposażano i wyposaża się niemal wszystkie statki polskich armatorów floty transportowej, rybackiej i technicznej. W ostatnim dziesięcioleciu część kadłubów statków była chroniona za pomocą anod aluminiowych (stopu aluminium aktywowanego indem). Anody te tylko w nielicznych przypadkach były produkcji krajowej, a na ogół importowano je z Danii, Norwegii lub Holandii (firmy BAC, Jotun Cathodic Protection, Material Metingen Europe). Tylko stosunkowo niewielka liczba zbiorników balastowych polskich statków była i jest chroniona za pomocą anod cynkowych. Na kilku zaledwie statkach armatorów polskich zastosowano ochronę katodową zbiorników balastowych za pomocą anod aluminiowych, produkcji krajowej lub z importu. W obiegach chłodzącej wody morskiej na statkach stosowano i w zasadzie stosuje się cynkowe anody instalowane w komorach wodnych,

Anody magnezowe stosowano do ochrony wnętrza zbiorników ciepłej wody gospodarczej i miejscowo do ochrony rurociągów, jak również do ochrony w komorach wodnych wymienników ciepła chłodzonych wodą rzeczna. Skala tych zastosowań była i jest względnie niewielka, w stosunku do potencjalnych możliwości zastosowań.

Obecnie wraz z rozpowszechnieniem wysokiej jakości powłok ochronnych, wzrasta i będzie wzrastał zakres wykorzystania anod galwanicznych do ochrony rurociągów podziemnych. Anody galwaniczne stosuje się do ochrony odcinków gazociągów o długości nawet kilkunastu kilometrów, stacji redukcyjno – pomiarowych i przykrytych ziemią zbiorników gazu płynnego. Chronione obiekty są odizolowane za pomocą złączy izolujących od konstrukcji uziemionych, niechronionych lub objętych ochroną prądem z zewnętrznego źródła.

Urządzenia - stacje ochrony katodowej

Centralnym elementem instalacji ochrony katodowej z zewnętrznym źródłem prądu jest stacja ochrony katodowej. Jest ona źródłem prądu stałego i ze względu na potrzebę lokalizacji stacji w różnych sytuacjach terenowych do pozyskiwania energii wykorzystuje się niemal wszystkie znane sposoby - od baterii słonecznych po źródła geotermiczne. Najczęściej są one zasilane z linii energetycznych prądu przemiennego [8].

Na gazociągach i naftociągach przesyłowych jest zainstalowanych ponad 1600 stacji ochrony katodowej. W większości są to diodowe mostki prostownicze zasilane napięciem 220V poprzez transformatory z odczepami służącymi do regulacji napięcia podawanego na prostownik. Moce tych urządzeń sięgają 1500 W przy znamionowych prądach wyprostowanych do 25A i napięciach wyjściowych do 60V.

Rurociągi wybudowane w ostatnim 10-leciu, wyposażone w termoplastyczne powłoki ochronne, potrzebują prądów ochrony katodowej nawet 3 rzędy wielkości mniejszych od prądów wymaganych przez rurociągi izolowane za pomocą powłok bitumicznych. W związku z tym instalowane są zasilacze prądu stałego dostarczające prądów poniżej 1 A, a najczęściej rzędu kilkudziesięciu lub kilku mA. Liczba tego rodzaju zasilaczy o mocy 1 lub kilku watów rośnie wraz z rozbudową sieci, zarówno przesyłowej jak i dystrybucyjnej.

Obok mostków diodowych i prostych zasilaczy prądu stałego, do ochrony gazociągów stosuje się stacje z automatyczną stabilizacją potencjału lub stacje utrzymujące stały prąd polaryzacji. Stacje takie są najczęściej instalowane w rejonach oddziaływania prądów błędzących. Liczba automatycznych stacji ochrony katodowej chroniących gazociągi przesyłowe i dystrybucyjne wynosi około 150. Starsze stacje są to urządzenia z diodowo – tyrystorowym układem mocy, nowsze - to przetwornice tranzystorowe wysokiej częstotliwości. Te ostatnie charakteryzują się wysoką sprawnością i wyrównanym przebiegiem sygnału wyjściowego w całym zakresie obciążenia.

Dla potrzeb gospodarki morskiej wykorzystuje się stacje ochrony katodowej dużej mocy: prądy wyjściowe sięgają nawet 200 A i więcej przy maksymalnych dopuszczalnym napięciu w wodzie do 24 V. Wykorzystując niskie przewodnictwo elektryczne wody konstruuje się anody o możliwie niskiej rezystancji przejścia co powoduje, że do realizacji ochrony można zastosować stacje o znacznie niższym napięciu, co znacznie poprawia sprawność instalacji. Na polskim rynku działa około 10 krajowych producentów stacji ochrony katodowej. Oferowane są różne rozwiązania konstrukcyjne i wszystkie potrzebne zakresy parametrów wyjściowych.

Drenaże elektryczne

Trakcje elektryczne PKP i tramwajowa (a także przemysłowa w województwie Śląskim), będące wyłącznie trakcjami prądu stałego generują prądy błędzące, które są przyczyną korozji elektrolitycznej podziemnych konstrukcji. Zły stan torowisk, brak ciągłości ciągów szynowych, niewystarczająca liczba kabli powrotnych, zmuszają użytkowników podziemnych rurociągów do stosowania drenaży elektrycznych. Stosowanie drenaży elektrycznych należy traktować jako ostateczność. Skuteczne odprowadzenie prądu błędzącego lub włączenie źródła prądu pomiędzy rurociąg a szynę powoduje bowiem zwiększenie prądu błędzącego w ziemi, który może zagrażać korozyjnie obcym konstrukcjom. Natężenia drenowanych prądów błędzących, zwłaszcza odgałęziających się z sieci powrotnej trakcji tramwajowej sięgają 200 – 300 A, a zdarzają się drenaże odprowadzające prądy przekraczające 350 A. Obecnie na gazociągach przesyłowych i dystrybucyjnych jest zainstalowanych około 200 drenaży elektrycznych z czego większość w województwach Śląskim i Małopolskim. Należy mieć nadzieję, że liczba ta nie będzie wzrastać. W strefach oddziaływania prądów błędzących należy, w miarę możliwości, dążyć do stosowania automatycznych stacji katodowych zamiast drenaży elektrycznych.

Na rynku działa kilku producentów drenaży elektrycznych, którzy zaspokajają krajowe potrzeby. Ponadto, drenaże polaryzowane są wykonywane we własnym zakresie przez niektóre zakłady gazownicze.

Anody

Prawidłowe działanie systemów ochrony katodowej z zewnętrznym źródłem prądu uzależnione jest w dużym stopniu od właściwego doboru materiałów anodowych i zastosowanych rozwiązań technicznych układów anodowych [9]. Większość awarii przemysłowych systemów ochronnych związana jest z różnymi uszkodzeniami układów anodowych.

W praktyce stosowane są anody wykonane z materiałów roztwarzalnych (złom stalowy, aluminium), trudno roztwarzalnych (grafit, żeliwo wysokokrzemowe, magnetyt, stopy ołowiu) oraz nieroztwarzalnych (warstewki platyny lub aktywnych tlenków metali na osnowie tytanu, niobu lub tantalu). Układy anodowe (uziomy) wykonuje się jako poziome i pionowe, płytkie i głębokie (półgłębokie). Liczba uziomów półgłębokich (do 15 m) i głębokich (poniżej 15 m) wzrasta, ponieważ zajmują one mniej terenu niż płytkie, co jest szczególnie istotne w związku z rozwojem ochrony katodowej sieci dystrybucyjnej w miastach.

W każdym przypadku zachodzące procesy elektrodowe na anodzie powodują zakwaszenie środowiska przyanodowego. Stąd wymagana jest m.in. odporność materiałów anodowych na oddziaływanie utleniających, zakwaszonych środowisk korozyjnych. Z innych wymagań należy wymienić m.in.:

- niskie zużycie w wyniku przepływu jednostkowego ładunku elektrycznego,
- trwałość przy wysokich obciążeniach prądowych,
- małą polaryzację anodową niezależnie od zachodzących reakcji elektrodowych,
- stałą i niską rezystancję rozprywu prądu podczas długookresowej eksploatacji,
- dobrą wytrzymałość mechaniczną,
- brak wrażliwości na rodzaj charakterystyki prądowej układów zasilających.

Roztwarzalne anody stalowe (złomowane szyny) stosowane są w kraju sporadycznie, m.in. w ochronie katodowej stalowych ścian szczelnych nabrzeży stoczni i portów.

Trudno roztwarzalne anody grafitowe były stosowane w krajowych instalacjach w początkowym okresie wdrażania ochrony katodowej. Obecnie produkowane są wg nowych opracowań w Zakładach Elektrode Węglowych w Raciborzu. Do tej pory w krajowych instalacjach ochrony katodowej stosowane są głównie anody z żeliwa wysokokrzemowego. Większość z nich wykonywana jest ze stopu zawierającego dodatkowo 4-5% chromu. Ten składnik stopowy zwiększa trwałość anod w środowiskach zawierających jony chlorkowe. Z uwagi na obecność chromu ich stosowaniu coraz częściej sprzeciwiają się służby ekologiczne. Anody z żeliwa wysokokrzemowego są oferowane, w wystarczająco szerokim asortymencie, przez jednego krajowego wytwórcę (Zakłady Chemiczne Sarzyna w Nowej Sarzynie).

W połowie lat osiemdziesiątych zapoczątkowane zostało wykorzystywanie elastycznych polimerowych anod kablowych. Tego rodzaju anody, ułożone wzdłuż chronionych rurociągów w niewielkiej od nich odległości zapewniają w miarę równomierny rozkład prądu polaryzującego, znaczne ograniczenie energochłonności instalacji, a także eliminację oddziaływań interferencyjnych w obrębie skupisk miejskich i zakładów przemysłowych. Próby wytwarzania anod z przewodzących polimerów podjęto w Polsce w Fabryce Kabli w Bydgoszczy.

Dla ważnych technologicznie obiektów wskazane jest stosowanie rozwiązań zawierających nieroztwarzalne anody na osnowie chemicznie odpornych metali, takich jak tytan, niob lub tantal. W kraju anody z platynowanego tytanu stosowane są m.in. w ochronie katodowej statków, aparatury przemysłu celulozowego oraz podziemnych obiektów na terenie zakładów przemysłowych z rozbudowaną infrastrukturą. Coraz częściej w ochronie katodowej wykorzystywane są anody tytanowe pokryte warstewką aktywnych tlenków metali grupy platynowców. W kraju łańcuchy tego typu anod (importowanych) zastosowano w ochronie katodowej powierzchni wewnętrznej rurociągów wielkośrednicowych wody chłodzącej. Krajowym dostawcą tego typu anod jest SPZP „Corropol” w Gdańsku.

W ochronie katodowej podziemnych konstrukcji metalowych anody zwykle nie umieszcza się bezpośrednio w gruncie, ale otacza dobrze przewodzącą zasypką opartą na rozdrobnionych materiałach węglowych. Zadaniem zasypki jest przede wszystkim obniżenie

rezystancji rozprywu prądu z anody do gruntu, zwiększenie żywotności anody i stałe odprowadzanie gazowych produktów reakcji anodowych. W praktyce wykorzystuje się różne materiały węglowe, m.in. koksy hutnicze, kalcynowane koksy naftowe, rozdrobniony elektrografit oraz wióry węglowe (pochodzące z produkcji elektrod węglowych). W Polsce taką zasypkę można kupić jako produkt handlowy. Niestety materiałem wykorzystywanym powszechnie na zasypki jest w olbrzymiej większości koks metalurgiczny, gdyż jest tańszy.

W dotychczasowych krajowych rozwiązaniach systemów ochrony katodowej kadłubów okrętowych z zewnętrznym źródłem prądu wykorzystywane były anody ze stopu ołów-srebro [10]. Głównymi wadami tego materiału jest znaczna masa wymagana do konstrukcji anody oraz dość niska dopuszczalna gęstość prądu – 320 A/m². Anody te zostały wyparte przez tytan pokryty warstwą aktywną (platyna, mieszanina tlenków rutenu, irydu i innych pierwiastków). Celowym wydaje się rozpowszechnienie w Polsce technologii wytwarzania nowych materiałów anodowych dla okrętownictwa. Warto dodać, że anody tego typu w formie siatek wykorzystywane są do ochrony konstrukcji żelbetonowych.

Jak z powyższego przeglądu wynika w Polsce istnieje praktycznie dostęp do wszystkich oferowanych na świecie materiałów anodowych. Należy zwrócić uwagę na fakt, że materiały wytwarzane w kraju w mniejszych seriach nie mają konkurencyjnej ceny na silnych rynkach światowych.

Punkty pomiarowo-kontrolne

Chroniona katodowo podziemna konstrukcja musi być dostępna do pomiarów elektrycznych, na podstawie których ocenia się jej skuteczność ochrony. Połączenie z podziemną konstrukcją musi być wytrzymałe mechanicznie i sprawne elektrycznie, czyli musi być wykonane przy użyciu kabla połączonego w sposób pewny i niskoomowy ze ścianką rurociągu lub zbiornika. Obecnie żyły kabli łączy się ze stalową ścianką konstrukcji metodą lutowania twardego lub miękkiego, względnie lutowania (spawania termitowego). Lutowanie twarde może być wykonywane automatycznie z wykorzystaniem ciepła łuku elektrycznego (metoda pin brazing). Techniki spawania termitowego (cadwelding, thermowelding) oraz pin brazing są coraz powszechniej stosowane. Kilka krajowych firm oferuje usługi w tej dziedzinie. Połączenia żył kabli ze ścianką konstrukcji są następnie szczelnie izolowane przy użyciu różnego rodzaju zestawów materiałów termoplastycznych. Drugie końce kabli są wprowadzane na listwy zaciskowe w słupkach ustawianych na powierzchni ziemi w pobliżu chronionych konstrukcji. Na rynku są oferowane słupki w postaci prefabrykatów betonowych z zamykanymi wnękami oraz różnego rodzaju słupki z tworzyw sztucznych. Te ostatnie są coraz chętniej stosowane, ponieważ są lekkie i estetyczne.

Opisane sposoby wykonania punktów pomiarowych rozpowszechniły się w ciągu ostatnich kilku lat. Poprzednio, a zwłaszcza w latach 60-tych i 70-tych punkty pomiarowe były wykonywane w sposób nie gwarantujący poprawności pomiarów. Słupki, zwłaszcza betonowe i zwłaszcza te, które ustawiono na terenach upraw rolniczych były niszczone i usuwane. Wiele gazociągów będących w eksploatacji od 10 – 20 lat jest praktycznie pozbawionych możliwości wykonywania pomiarów kontrolnych ochrony katodowej z uwagi na brak punktów pomiarowych. Prace w zakresie uzupełnienia punktów pomiarowych podejmuje się aktualnie na niektórych gazociągach.

Elektrody odniesienia i sondy pomiarowe

W punktach kontrolno-pomiarowych umieszcza się w ziemi, w pobliżu badanej konstrukcji podziemnej stałe elektrody odniesienia (pomiarowe). W ochronie katodowej

podziemnych konstrukcji stosuje się prawie wyłącznie siarczano-miedziowe elektrody odniesienia. W wodzie morskiej wykorzystywane są elektrody cynkowe i chlorosrebrne.

W rejonach oddziaływania prądów błędzących oraz przepływu prądów wyrównawczych pomiędzy obszarami chronionej konstrukcji spolaryzowanymi do różnych wartości potencjałów, a także we wszystkich innych miejscach, gdzie zachodzi potrzeba wiarygodnej oceny skuteczności ochrony katodowej, ograniczenie błędów pomiaru potencjału osiąga się stosując sondy pomiarowe i stałe elektrody odniesienia. Sonda tworzy z elektrodą odniesienia zintegrowaną konstrukcję, względnie obydwa elementy instaluje się oddzielnie w pobliżu chronionej konstrukcji. Sonda pomiarowa (elektroda symulacyjna) będąca jednostronnie zaizolowaną płytką stalową o określonej powierzchni (np. 1 cm² lub 10 cm²) imituje defekt w powłoce ochronnej konstrukcji.

Pomimo tego, że stałe elektrody odniesienia są oferowane przez krajowych i zagranicznych producentów, podobnie jak sondy pomiarowe, ich wybór musi być poprzedzony zebraniem opinii o wyrobach, ponieważ nie są one sobie równoważne.

Złącza izolujące

Złącza izolujące, głównie w postaci prefabrykowanych monobloków instalowanych głównie pod ziemią, są nieodzownymi elementami, które umieszcza się w celu rozdzielenia galwanicznego elementów rurociągów, co ułatwia lub niekiedy umożliwia ich efektywną ochronę katodową. Liczba instalowanych monobloków rośnie i będzie nadal wzrastać w związku z koniecznością izolowania chronionych katodowo gazociągów od odcinków niechronionych, uziemionych lub chronionych za pomocą innych urządzeń ochrony. Skuteczna ochrona katodowa gazowych sieci dystrybucyjnych wymaga ich odizolowania od uziemionych sieci i instalacji wodociagowych. Odizolowanie to realizuje się za pomocą monobloków lub wkładek izolacyjnych na gazowych przyłączach domowych.

Monobloki w pełnym zakresie ciśnień i średnic są oferowane przez krajowych przedstawicieli producentów niemieckich i włoskich, niektóre typy monobloków są też produkowane przez krajowych wytwórców.

Monobloki są kosztowne. Równie kosztowna jest wymiana monobloku uszkodzonego w wyniku przebicia elektrycznego spowodowanego uderzeniem pioruna lub przepięciem będącym skutkiem oddziaływania linii elektroenergetycznej wysokiego napięcia. Dlatego monobloki, nawet te instalowane pod ziemią, winny być zabezpieczone, np. za pomocą iskierników ochronnych instalowanych bezpośrednio na monobloku.

Monitorowanie ochrony katodowej

Zasadniczym powodem wprowadzania systemów monitorowania pracy instalacji ochrony katodowej jest umożliwienie obserwacji stanu technicznego lub parametrów pracy urządzeń bez potrzeby angażowania do tego celu czasu specjalisty i pracy sprzętu (transport). Dla rurociągów magistralnych, na dużych przestrzeniach eliminuje się w ten sposób także błędy lub nieuczciwość personelu dokonującego przeglądy instalacji. W niektórych systemach wyniki pomiarów są rejestrowane i stanowią dokumentację pracy chronionego rurociągu.

W stosowanych systemach zdalnego monitorowania pracy instalacji ochrony katodowej wyróżnia się ze względu na metodę przesyłania informacji zasadnicze cztery sposoby transmisji danych:

- liniami telefonicznymi (przewodami metalowymi, światłowodami),
- drogą radiową,
- rurociągiem, wykorzystując go jako przewodnik elektryczny,
- drogą akustyczną w wodzie (hydrofony).

Na świecie stosowanych jest szereg systemów gromadzenia danych (zdalnego wykonywania pomiarów) oraz przesyłania ich do centrum komputerowego. Nadeżają za postępem techniki. Stosuje się obecnie systemy wykorzystujące telefonię komórkową, rozproszone sieci komputerowe (SCADA) i łączność satelitarną. Zazwyczaj monitoruje się podstawowe parametry instalacji ochrony katodowej (potencjał, natężenie prądu ochrony), czasami tylko fakt działania instalacji. Znane są systemy aktywne, umożliwiające zdalną regulację parametrów ochrony.

W Polsce nie ma opracowanego żadnego własnego systemu monitorowania instalacji ochrony katodowej. Pewne załączki takiego systemu już od dawna działały w Przedsiębiorstwie Eksploatacji Rurociągów Naftowych „Przyjaźń” w Płocku. Wykorzystywały istniejący system telemechaniki. Podobnie systemy takie wykorzystuje się dla potrzeb ochrony katodowej również w gazownictwie. Wykonywane były także próby transmisji danych drogą radiową. Mały system działał w Porcie Handlowym w Gdyni, gdzie monitorowana jest praca instalacji ochrony katodowej na falochronach.

Można spodziewać się w tym zakresie pewnego postępu, ponieważ budowany aktualnie gazociąg tranzytowy Jamał - Europa Zachodnia będzie wyposażony w system SCADA, w którym przewidziane jest monitorowanie wszystkich instalacji ochrony katodowej oraz pomiary potencjałów w wybranych punktach gazociągu.

Projektowanie, wykonawstwo, eksploatacja

Ze względu na specyfikę ochrony elektrochemicznej do jej rozwoju niezbędne jest silne zaplecze naukowo-techniczne. W Polsce problematyką ochrony elektrochemicznej zajmowały się i zajmują następujące instytuty naukowo-badawcze oraz wyższe uczelnie:

- Instytut Łączności w Warszawie,
- Instytut Elektrotechniki w Warszawie,
- Instytut Górnictwa Naftowego i Gazownictwa w Krakowie,
- Instytut Morski w Gdańsku,
- Centrum Techniki Okrętowej w Gdańsku,
- Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa w Warszawie,
- Instytut Kształtowania Środowiska w Krakowie,
- Politechnika Gdańska,
- Politechnika Poznańska,
- Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.

Ponadto przy Zarządzie Głównym Stowarzyszenia Elektryków Polskich funkcjonuje Polski Komitet Elektrochemicznej Ochrony przed Korozją, stanowiący naukowo-doradczy organ tej organizacji. Sekcję ochrony elektrochemicznej powołało także PSK.

Projekty ochrony katodowej gazociągów przesyłowych, orurowań otworów magazynowych oraz tłoczní gazu wykonuje prawie wyłącznie Biuro Studiów i Projektów Gazownictwa Gazoprojekt S.A. we Wrocławiu. Przedsiębiorstwo to ma wdrożony system jakości i wykonuje opracowania profesjonalnie, zgodnie ze współczesnym stanem wiedzy w dziedzinie ochrony przeciwnkorozyjnej.

Projekty ochrony katodowej mniejszych obiektów, sieci dystrybucyjnych, zbiorników itp. wykonywane są zarówno przez duże jak i przez inne mniejsze biura projektowe. Nie zawsze firmy te posiadają wystarczające przygotowanie fachowe. Prace projektowe są obecnie również oferowane przez firmy zagraniczne, które wchodząc na rynek oferują niskie ceny, ale nie koniecznie opracowania na odpowiednim poziomie technicznym. Projekty dot. ochrony katodowej w gospodarce morskiej wykonywane są między innymi przez Instytut Morski i Biuro Projektów „Projmors” w Gdańsku. Dla potrzeb innych zastosowań ochrony

katodowej – ze względu na niewielki ich zakres – opracowania projektowe wykonywane są przez różne wyspecjalizowane zespoły specjalistów.

Na rynku ochrony katodowej w Polsce działa bardzo wielu wykonawców, począwszy od wyspecjalizowanych w ochronie katodowej firm korozyjnych, poprzez brygady robót antykorozyjnych dużych firm budujących rurociągi, aż do firm specjalizujących się jedynie w wykonawstwie instalacji elektrycznych. Konkurencja na rynku jest dość duża, co owocuje generalnie coraz wyższym poziomem wykonawstwa. Obecnie prawie nie spotyka się niefachowo, czy niezgodnie z dokumentacją wykonanych instalacji ochrony katodowej. Firmy wykonawcze inwestują w sprzęt i narzędzia, szkołą pracowników, często proponują własne rozwiązania inżynierskie.

W miarę rozpowszechniania ochrony katodowej, jej eksploatacja staje się coraz większym problemem. Przykładowo służby przeciwkorozyjne w Okręgach i Zakładach Gazowniczych są najczęściej zbyt słabe kadrowo, aby móc prawidłowo prowadzić eksploatację wszystkich instalacji ochrony katodowej. Obszary obsługiwane przez poszczególne służby są często bardzo duże, dojazdy pochłaniają czas i są kosztowne. Kontrola pracy instalacji sprowadza się najczęściej do odczytania parametrów wyjściowych stacji ochrony katodowej i zmierzenia potencjału gazociągu w punkcie drenażu. W przypadku gazociągów eksploatowanych od wielu lat, posiadających bitumiczne powłoki izolacyjne a przy tym często zagrożonych oddziaływaniem prądów błądzących, tego rodzaju kontrola eksploatacyjna jest niewystarczająca.

Eksploatacja ochrony katodowej nowych gazociągów posiadających wysokiej jakości powłoki izolacyjne jest łatwiejsza, ale tylko pozornie, wymaga bowiem większego przygotowania fachowego służby przeciwkorozyjnej. Kontrola skuteczności ochrony katodowej sprowadza się praktycznie do kontroli stanu powłoki izolacyjnej. Każda nieszczelność powłoki znajduje odbicie w zmianie wartości prądu ochrony katodowej.

Firmy mniejsze, eksploatujące pojedyncze instalacje, np. eksploatujące podziemne magazyny gazu, względnie zbiorniki gazu płynnego, nie dysponują własnymi służbami przeciwkorozyjnymi. Muszą więc zlecać eksploatację firmom specjalistycznym, których nie jest wiele, a poziom usług niektórych z nich pozostawia wiele do życzenia. Należy przypuszczać, że w niedalekiej przyszłości, m.in. w związku ze zmianami strukturalnymi w Polskim Górnictwie Naftowym i Gazownictwie, eksploatację ochrony katodowej gazociągów przesyłowych przejmą wyspecjalizowane firmy na zasadzie świadczenia usług. Firmy te powstaną na bazie firm istniejących, do których przejdą pracownicy, sprzęt i aparatura, obecnych służb przeciwkorozyjnych. Należy więc w niedalekiej przyszłości oczekiwać w Polsce powstania kilku silnych ośrodków, które zajmować się będą fachową eksploatacją i nadzorem istniejących systemów ochrony katodowej.

Normalizacja ochrony elektrochemicznej w Polsce

Pierwsza polska norma opracowana została w 1932 r. na zamówienie Ministerstwa Robót Publicznych przez Komisję Prądów Błądzących przy Stowarzyszeniu Elektryków Polskich. Dotyczyła ona sposobów ograniczania wpływu prądów błądzących z obwodów powrotnych traktacji tramwajowych w celu możliwie dużego ograniczenia uszkodzeń urządzeń podziemnych powodowanych przez korozję elektrolityczną. Pierwsza w okresie powojennym norma z zakresu ochrony katodowej powstała w 1966 r. i stanowiła bazę dla opracowanej w roku 1971 i znowelizowanej w roku 1990 normy arkuszowej PN-90/E-05030 [11].

W związku z reorganizacją i zmianą zasad funkcjonowania Polskiego Komitetu Normalizacyjnego zmieniło się zasadniczo podejście do zakresu wykorzystywania przepisów technicznych. Stosowanie ich nie jest obligatoryjne. Wyjątkiem są normy uznane do

obowiązkowego stosowania poprzez wydanie odrębnych rozporządzeń. Normy z zakresu ochrony katodowej rurociągów znalazły się na tej liście.

Niestety postanowienia obowiązujących norm dotyczą jedynie podstawowych warunków technicznych, jakim powinna odpowiadać technologia ochrony katodowej. Wymagania postawione w tych normach są już nieco przestarzałe, niektóre z nich powinny być obecnie znacznie zmodyfikowane. Żadna z powyższych norm nie nakazuje stosowania ochrony katodowej, reguluje natomiast ogólne kanony tej technologii. Jedynie walka z prądami błędzającymi wydaje się być jednoznacznie zakwalifikowana do czynności obowiązkowych.

Znowelizowane niedawno Prawo Budowlane również nie określa w sposób nakazowy stosowanie ochrony przeciwkorozyjnej. Ochrona katodowa uznana została za obowiązkowo stosowaną technologię ochrony przeciwkorozyjną jedynie w odniesieniu do magistralnych gazociągów i naftociągów. Wyraźnie odczuwa się brak nakazu stosowania ochrony katodowej w odniesieniu do podziemnych i naziemnych stalowych zbiorników paliwowych. O ile w odniesieniu do rurociągów obowiązek ten podyktowany był kiedyś niebezpieczeństwem wybuchu w przypadku wystąpienia przecieków gazu czy produktów naftowych, to nie ulega wątpliwości, że obecnie czynnikiem równie ważnym stała się ochrona środowiska naturalnego, a wobec tego zabezpieczenie zbiorników, znacznie bardziej rozproszonych i zlokalizowanych nie rzadko w aglomeracjach miejskich, jest jednakowo istotne.

Uwarunkowania międzynarodowe, nakazujące wprowadzenie w najbliższym czasie w Polsce Norm Europejskich powoduje, że podjęcie obecnie prac nad nowelizacją własnych aktów prawnych mija się z celem. Nieco wyższy poziom techniczny krajów europejskich, zarówno w zakresie technologii jak i stosowanych materiałów, może być przyjęty w Polsce z pewnymi problemami. Będą one potęgowane już wyraźnie zarysowującymi się trudnościami ze zrozumieniem nowych metod technicznych i organizacyjnych związanych z niektórymi nowoczesnymi koncepcjami budowy oraz eksploatacji ochrony katodowej, zwłaszcza rurociągów z bardzo dobrą izolacją przeciwkorozyjną, czy konstrukcji żelbetowych. Pewną trudność stanowić może także niedopracowana terminologia elektrochemicznej ochrony przed korozją.

Adaptacja norm europejskich do stosowania w Polsce, zgodnie z przyjętą procedurą, polega na możliwie wiernym przetłumaczeniu zatwierdzonych przez CEN dokumentów. W zakresie elektrochemicznej ochrony przed korozją do kolejnej fazy zatwierdzenia przez Komitet Europejski powinno zbliżyć się kilka norm, które przeszły złożony proces normalizacyjny. Natychmiast po ich uchwaleniu powinien rozpocząć się więc w Polsce proces ich adaptacji/harmonizacji. Jest więc już najwyższy czas na to, aby się odpowiednio do tego przygotować.

Pewne prace w tym zakresie podjął Polski Komitet Elektrochemicznej Ochrony przed Korozją przy Zarządzie Głównym SEP. Przygotowywana jest aktualizacja normy dotyczącej nazewnictwa, ponieważ tylko w ten sposób możliwe będzie w jednolity sposób przetłumaczenie dokumentów opracowanych w CEN i zatwierdzenie ich przez Polski Komitet Normalizacyjny. Udostępniono także całemu środowisku zajmującemu się problematyką ochrony elektrochemicznej niektóre wstępnie przetłumaczone dokumenty robocze, celem możliwie szybkiego zapoznania się z nowymi wymaganiami norm. Na tle zarysowanych powyżej problemów normalizacji elektrochemicznej ochrony przed korozją uwidacznia się statutowa rola Polskiego Komitetu Elektrochemicznej Ochrony przed Korozją SEP, którego zadaniem w najbliższym czasie będzie aktywne współuczestniczenie w procesie normalizacji tej technologii przy współpracy z Polskim Komitetem Normalizacyjnym. Należy mieć również nadzieję, że uda się także wnieść swój wkład w tym zakresie na poziomie europejskim.

Przewidywane kierunki rozwoju, kierunki dalszych działań

Pomimo tego, że zasady ochrony elektrochemicznej znane są od wielu lat obserwuje się nieustanny rozwój tej technologii. Doskonalone są metody pomiaru i podzespoły istniejących rozwiązań technicznych systemów ochrony katodowej. Wykorzystuje się nowe osiągnięcia nauki, stosuje nowe materiały, wdraża postęp techniczny. Poszukuje się nowych zastosowań ochrony katodowej. Do nasycenia potrzeb rynku jest jeszcze bardzo daleko.

Stosowane od niedawna nowe jakościowo powłoki na konstrukcjach podziemnych wywołały potrzebę dokonania kolejnego, znaczącego postępu w technologii ochrony katodowej. Pociąga to za sobą konieczność weryfikacji kryteriów ochrony, opracowania nowych źródeł prądu, zasad pomiarów terenowych, modyfikacji wszystkich podzespołów. Jednocześnie nowy rodzaj izolacji na konstrukcjach podziemnych stworzył nowe problemy związane z oddziaływaniem linii energetycznych wysokiego napięcia, zabezpieczeń przed przepięciami, współdziałania instalacji ochrony katodowej z uziemieniami energetycznymi. Konieczne jest jak najszybsze rozwiązanie tych problemów.

W ślad za rozwijającą się na świecie technologią ochrony katodowej konstrukcji żelbetowych, również w Polsce konieczne będzie dołożenie starań do możliwie szybkiego wdrożenia jej do działalności przemysłowej. Jeśli to nie nastąpi swoje oferty zrealizują firmy zagraniczne.

Obecnie w Polsce nie jeszcze skryształizowanych planów zagospodarowania zasobów ropy naftowej na Morzu Bałtyckim, trwają jeszcze poszukiwania i dokumentowanie zasobów. Jest jednak bardzo prawdopodobne, że w najbliższych latach zagadnienia te staną się aktualne w polskiej gospodarce morskiej. Konieczne wtedy będzie opanowanie techniki ochrony katodowej rurociągów podmorskich oraz platform wiertniczych.

Harmonizacja przepisów i przygotowania do zjednoczenia z Unią Europejską przybliżają Polskę do szeregu nowych zagadnień związanych z ochroną środowiska. Nie ulega wątpliwości, że sytuacja ta spowoduje zwiększenie zainteresowania instalacjami ochrony katodowej, przede wszystkim w odniesieniu do zbiorników paliwowych.

W związku z wydzieleniem przesyłu gazu ze struktury PGNiG S.A., największego polskiego odbiorcy technologii ochrony katodowej, powinny powstać, częściowo na bazie istniejących służb przeciwkorozyjnych, firmy usługowe prowadzące eksploatację ochrony katodowej gazociągów przesyłowych, tłoczni gazu i podziemnych magazynów gazu. W związku z restrukturyzacją PGNiG S.A. i powstaniem spółek dystrybucyjnych, należy również oczekiwać, że ze względów ekonomicznych będą one zainteresowane utrzymaniem, przynajmniej części istniejącej stalowej sieci dystrybucyjnej, zamiast ją wymieniać na polietylenową. Będzie to wymagało objęcia tej sieci ochroną katodową.

Reasumując można stwierdzić, że stosowanie ochrony katodowej wymaga wiedzy, doświadczenia, dobrego wyposażenia technicznego i fachowego wykonania poszczególnych elementów składowych obwodu ochronnego. Stąd można prognozować, że dalszy rozwój technologii będzie możliwy poprzez:

- wprowadzenie wymogu profesjonalnego projektowania, wykonawstwa i nadzoru instalacji ochrony katodowej,
- opracowanie systemów certyfikacji poszczególnych materiałów, wyrobów, usług, firm i specjalistycznej kadry inżynieryjno-technicznej,
- opracowanie systemu szkolenia i podnoszenia kwalifikacji służb technicznych i inżynieryjnych zajmujących się problematyką wdrażania ochrony katodowej.

Wśród działań, które należy podjąć w Polsce w celu usprawnienia i upowszechnienia stosowania ochrony elektrochemicznej we wnioskach programu PBZ 013-12 wymienione zostały między innymi następujące prace:

W zakresie przedsięwzięć merytorycznych:

- A. Przeprowadzenie szerokiej analizy techniczno-ekonomicznej stosowania ochrony katodowej konstrukcji pokrytych nowoczesnymi powłokami izolacyjnymi oraz opracowanie wytycznych budowy i eksploatacji instalacji ochrony katodowej w nowych warunkach.
- B. Wprowadzenie jednolitego systemu monitorowania pracy instalacji ochrony katodowej w całym systemie polskich rurociągów magistralnych. Opracowanie jednolitych zasad dokumentowania zagrożeń korozyjnych i funkcjonowania systemów ochrony katodowej.
- C. Wdrożenie systemów ochrony katodowej paliwowych i gazowych zbiorników podziemnych oraz den zbiorników naziemnych.
- D. Wdrożenie systemów ochrony katodowej konstrukcji żelbetowych (płyt mostowych, estakad, konstrukcji wsporczych lądowych i morskich).
- E. Opracowanie i wdrożenie wytycznych upowszechnienia ochrony katodowej infrastruktury podziemnej w aglomeracjach miejskich i przemysłowych.
- F. Uruchomienie krajowej produkcji anod aluminiowych, posiadających dobre własności użytkowe, zarówno w wodzie bałtyckiej, jak i oceanicznej.
- G. Zasadnicze poszerzenie dotychczasowego zakresu stosowania ochrony katodowej podwodnych stalowych obiektów hydrotechnicznych.
- H. Wprowadzenie na wszystkich polskich statkach (szczególnie średniej i dużej nośności) układów ochrony katodowej śrub napędowych z jednoczesnym zabezpieczeniem przed korozją i elektroerozją w łożyskach wału śrubowego i korbowego.
- I. Wprowadzenie na wszystkich polskich statkach morskich poprawnie funkcjonujących zabezpieczeń przed korozją w obiegach wody chłodzącej, przez zastosowanie systemu ochrony katodowej.

W zakresie przedsięwzięć organizacyjnych:

- A. Prowadzenie systematycznych szkoleń i podnoszenie poziomu wykształcenia technicznego nadzoru technicznego instalacji i systemów ochrony katodowej dla wszystkich zastosowań tej technologii.
- B. Przystąpienie do procesu wprowadzania systemów jakości poprzez atestację wyrobów, firm i personelu technicznego.
- C. W związku z oczekiwaną potrzebą rozwoju technologii, w szczególności w odniesieniu do konstrukcji żelbetowych:
 - powołanie jednostek dydaktycznych zajmujących się szkoleniem projektantów budowli w zakresie ochrony elektrochemicznej, nadawaniem uprawnień projektowych, atestacją elementów instalacji ochronnych oraz firm wykonawczych,
 - szkolenie inspektorów oceniających stan korozyjny budowli żelbetowych (przemysłowych, drogowych, hydrotechnicznych),
 - wydawanie uaktualnianych biuletynów informacyjnych, zawierających najnowsze światowe osiągnięcia w dziedzinie ochrony katodowej zbrojenia betonu, wytyczne postępowania, wykazy uprawnionych biur projektowych (projektantów) i wykonawców, przykłady właściwego i nieprawidłowego wykonawstwa itp.
- D. Analogiczne działania jak w p. C dla zastosowań ochrony katodowej do zbiorników paliwowych podziemnych i naziemnych.
- E. Opracowanie zasad wprowadzania ochrony katodowej infrastruktury podziemnej oraz współpracy przy eliminowaniu zagrożeń wywołanych prądami błądzącymi na terenach aglomeracji miejskich i przemysłowych.

W zakresie przedsięwzięć prawnych:

- A. Nowelizacja Rozporządzeń Ministra Gospodarki dot. Prawa budowlanego w zakresie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać sieci gazowe oraz bazy paliwowe w aspekcie wprowadzenia wymagań stosowania ochrony katodowej zbiorników.
- B. Wprowadzenie systemu egzekwowania realizacji wymagań norm uznanych do obligatoryjnego stosowania.
- C. Uznanie wzorem innych dziedzin norm z zakresu ochrony katodowej jednostek pływających i konstrukcji hydrotechnicznych jako obowiązujących obligatoryjnie.
- D. Opracowanie wspólnych wymagań i zaleceń związanych z bezpieczną eksploatacją systemów ochrony katodowej i innych urządzeń elektrycznych na konstrukcjach podziemnych.
- E. Pilne zharmonizowanie norm krajowych z normami europejskimi oraz wprowadzenie obowiązku ich stosowania.
- F. Wprowadzenie obowiązkowego uzgadniania projektów konstrukcji podziemnych i podwodnych, a także budowli żelbetowych w zakresie zabezpieczeń przeciwkorozyjnych.
- G. Ustalenie przepisów normatywnych, obligatoryjnie obowiązujących wszystkie podmioty prawne działające w gospodarce morskiej, dotyczące stosowania ochrony katodowej na polskich statkach morskich, w gospodarce portowej i stoczniowej oraz w służbach morskich. Przepisy te powinny być zgodne z istniejącymi w europejskich krajach morskich

W zakresie kierunków nowych badań:

- A. Studia nad procesami korozyjnymi występującymi w defektach nowoczesnych powłok izolacyjnych w różnych warunkach środowiskowych i przy różnej polaryzacji katodowej.
- B. Opracowanie nowoczesnych metod sterowania pracą instalacji ochrony katodowej z uwzględnieniem „inteligentnej” reakcji na zakłócenia zewnętrzne,
- C. Opracowanie współczesnych podzespołów do zdalnego monitorowania pracy instalacji ochrony katodowej.
- D. Opracowanie oprogramowania do nadzoru pracy systemów ochrony katodowej obiektów rozproszonych z wykorzystaniem sieci komputerowych.
- E. Prowadzenie badań i studiów nad nowymi zastosowaniami ochrony katodowej oraz doskonalenie kryteriów oceny jej skuteczności.
- F. Dalsze doskonalenie metod oceny zagrożenia korozją wywołwaną przez prądy błądzące zarówno w warunkach lądowych jak i morskich oraz opracowywanie i wdrażanie skutecznych metod ochrony.
- G. Ocena możliwości poprawienia parametrów elektrochemicznych i użytkowych materiałów anodowych.
- H. Badania nad wpływem ochrony katodowej na ograniczenie szybkości korozji w strefie przemiennego zanurzenia, falowania i rozbryzgów (na konstrukcjach hydrotechnicznych).
- I. Badania nad możliwością i sposobami zastosowania cienkich (drutowych) anod polaryzujących, zasilanych z zewnętrznego źródła prądu, do ochrony katodowej ścianek szczelnych, nabrzeży oraz dużych zespołów pali podpierających budowle hydrotechniczne.
- J. Studia nad polepszeniem własności użytkowych i istotnym potaniem urządzeń oraz elementów układów ochrony katodowej na statkach, w portach i w stoczniach.
- K. Opracowanie aluminium stopu anodowego, o dobrych własnościach użytkowych, produkowanego z tanich surowców wyjściowych m. in. z niezbyt czystego surowca aluminium (aluminium A1 lub A0 wg PN).
- L. Wybór lub ewentualnie opracowanie skróconych metod testowych, przydatnych do szybkiej kontroli jakości dostarczanych anod aluminium i stwarzających możliwość

- trafego przewidywania zachowania się aluminium stopu anodowego w rzeczywistych układach galwanicznej ochrony katodowej konstrukcji.
- M. Zbadanie możliwości zastosowania nowych aluminium materiałów anodowych do galwanicznej ochrony katodowej konstrukcji podziemnych.
 - N. Doskonalenie przyrządów i techniki pomiarowej prądów błędzących dla potrzeb pomiarów w rejonach infrastruktury miejskiej, przemysłowej i stoczniowo-portowej.
 - O. Opracowanie nowoczesnych metod diagnostyki zagrożenia korozyjnego oraz aktualnego stanu korozyjnego, w szczególności w odniesieniu do poszczególnych typów budowli żelbetonowych ze uwzględnieniem nieniszczących technik elektrochemicznych,
 - P. Doskonalenie technologii ochrony katodowej zbrojenia betonu w zakresie kryteriów ochrony, czujników, elementów instalacji ochronnych, opracowanie programów komputerowych do analizy danych pomiarowych,
 - Q. Badania zależności: wiek budowli – stan korozyjny – możliwość zastosowania ochrony katodowej (dla różnych typów budowli).

Literatura cytowana

- [1]. M. Markiewicz: Ochrona katodowa w górnictwie naftowym i gazownictwie, Opracowanie dla PBZ 013-12, Kraków 1999.
- [2]. A. Stankiewicz, Sz. Malinowski, J. Nowatkowski: Technologia ochrony katodowej konstrukcji i urządzeń morskich. Aktualny stan w kraju i postulaty rozwoju, Wydawnictwa Wewnętrzne Instytutu Morskiego, Nr 5510, Gdańsk 1999.
- [3]. W. Sokółski: Raport końcowy z realizacji PBZ 007-10 „Ustalenie zagrożenia korozyjnego i opracowanie metod przedłużenia żywotności morskich konstrukcji hydrotechnicznych”, Instytut Morski, Gdańsk 1999.
- [4]. W. Bohdanowicz: Ochrona katodowa budowli żelbetonowych, Opracowanie dla PBZ 013-12, Gdańsk 1999.
- [5]. J. Kozłowski, W. Machczyński: Rozwój i wdrażanie nowoczesnych technik pomiarowych w dziedzinie prądów błędzących, Politechnika Poznańska, 1999.
- [6]. W. Sokółski: Prądy błędzące. Korozja elektrolityczna i metody jej zwalczania. Opracowanie dla PBZ 013-12, Gdańsk 1999.
- [7]. W. Sokółski: Zasilanie i monitorowanie ochrony katodowej, Opracowanie dla PBZ 013-12, Gdańsk 1999.
- [8]. A. Stankiewicz, Sz. Malinowski, J. Nowatkowski: Technologia elektrochemicznej ochrony przed korozją metalowych konstrukcji podwodnych i podziemnych za pomocą anod galwanicznych. Aktualny stan w kraju i postulaty rozwoju. Wydawnictwa Wewnętrzne Instytutu Morskiego, Nr 5509, Gdańsk 1999.
- [9]. J. Walaszkowski: Anody w ochronie katodowej z zewnętrznym źródłem prądu, Opracowanie dla PBZ 013-12, Gdańsk 1999.
- [10]. A. Poniewierska, A. Narożniak-Luksza, J. Birn, P. Domżałicki: Opracowanie danych dotyczących ochrony katodowej nowych jednostek w stocznich produkcyjnych, CTO, Raport techniczny Nr RO-99/T-120, Gdańsk 1999.
- [11]. W. Sokółski: Proces normalizacji technologii ochrony elektrochemicznej w Europie i w Polsce, Ochrona przed Korozją, 43, (3), 64 (2000).