



TROCHĘ HISTORII OCHRONY KATODOWEJ

A BIT OF HISTORY OF CATHODIC PROTECTION

Marian Hanasz

L.Instruments s.c.

Słowa kluczowe: historia, korozja, prądy błądzące, ochrona katodowa
Keywords: history, corrosion, stray currents, cathodic protection

Streszczenie

Gdy ludzkość dowiedziała się, czym są metale, zaczęto ich używać do realizacji coraz bardziej wyszukanych celów. Wytwarzano coraz cenniejsze wyroby metalowe, warte starań o zapewnienie długiej użyteczności. Dzięki rozwojowi elektryki i elektrochemii poznano elektrolityczny charakter korozji metali i zaczęto jej przeciwdziałać. Badania uszkodzeń podziemnych rurociągów wywołanych przez prądy upływające z szyn kolei elektrycznych doprowadziły do powstania katodowej ochrony przed korozją.

Summary

When humanity learnt about metals and their properties, it started using them to achieve more and more complex goals. Manufactured metal wares increased in value, and therefore were worth preserving. Thanks to developments in electricity and electrochemistry, the nature of metal corrosion was discovered and methods of preventing it refined. Research on underground pipelines defects caused by currents leaking from electric railway tracks lead to the creation of theory and practice of cathodic protection.

1. Czasy zamierzchłe

Ochrona katodowa przed korozją istnieje i rozwija się jako emanacja nauk przyrodniczych. Korzystamy w niej z osiągnięć elektryki i elektrochemii używając narzędzi, jakie na współczesnym poziomie rozwoju gospodarczego oferuje elektrotechnika, elektronika i informatyka. Czterdziesta rocznica formalnej integracji polskich specjalistów ochrony katodowej to dobra okazja, by ocenić dorobek w tej dziedzinie. Spójrzmy, jak było kiedyś, może uda się lepiej ocenić wyzwania współczesne.

Człowiek działa w kręgu swych możliwości, umiejętności i chęci. W epoce kamiennej nie znał metali w postaci czystej, chociaż stykał się z ich rudami. Gdy wpadł na pomysł pozyskania metalu przez obróbkę cieplną, w historii cywilizacji zaczęła się epoka brązu (ok. XX wieku p.n.e.), a potem żelaza (ok. XII wieku p.n.e.). Metale były czymś rzadkim. Przypisywano im własności magiczne. Złoto kojarzono ze słońcem i bogami; miedź miała własności ochronne; żelazo zwalczało demony; szaroczarny ołów, brzydki i trujący, działał szkodliwie. Wyrabiano z nich biżuterię i inne ozdoby. Używano ich ze względów prestiżowych, ale doceniano zalety praktyczne. Jak podaje Herodot, w Babilonie „było sto bram, wszystkie ze spiżu” (VI wiek p.n.e.) [1]. Brąz i żelazo okazały się przydatne nie tylko do produkcji broni i narzędzi: Nabuchodonozor kazał zakuć króla judzkiego w podwójne spiżowe kajdany [2].

Wyroby metalowe były przedmiotem pożądania jak wszystko, co trudno dostępne i drogie. Elementarna ekonomia nakazywała utrzymywać je w dobrym stanie. Niewolnik dbał o miecz i pancerz swego pana, gospodyni czyściła miedziane naczynia kuchenne, drwał ostrzył siekiere. Wyjątkiem od tych zabiegów był i do dziś pozostał grynszpan szlachetny (śniedź, patyna). Ten produkt korozji atmosferycznej obiektów artystycznych wykonanych z brązu i miedzi (pomniki, kościelne dzwony, zabytkowe obróbki blacharskie itp.) ludzie sztuki uważają za walor.

Niektóre współczesne podręczniki podstaw elektrotechniki, sięgając w odległą przeszłość, powołują się na starożytnych Greków, którzy wprowadzili znali właściwości bursztynu, zwanego przez nich elektronem (*ηλεκτρον*), ale nie zdawali sobie sprawy z tego, że obserwują zjawisko z dziedziny elektrostatyki. Nie wiedzieli, że ma to coś wspólnego z wyładowaniami atmosferycznymi. Uważali je za zdarzenia metafizyczne, którymi rządził gromowładny Zeus (*Ζεύς*). Nie czuli potrzeby, by je badać naukowo, nie mieli zresztą ku temu narzędzi. N. b. interpretowane jako ogniwa galwaniczne przedmioty, znajdowane w okolicach Bagdadu w latach 30. i później (datowane między VI a II wiekiem p.n.e.), archeologowie uważają za amulety [3], a nie „baterijki”.

Do budowy domów, okrętów, machin obłężniczych, maszynierii żurawi – jak Żuraw Gdański – a nawet mechanizmów zegarowych początkowo służyło drewno, lecz z biegiem lat w produkcji wyrobów bardziej wyrafinowanych, nie tylko broni, dzwonów i przedmioty zbytku, metale okazały się przydatniejsze. Uczni, artyści i rzemieślnicy konstruowali coraz mniejsze, bardziej poręczne instrumenty muzyczne, mechanizmy zegarowe i maszynierie w rodzaju pozytywek i napędów teatrów lalkowych, jak ten, który pojawia się w „Dziadku do orzechów” (XVIII wiek). Zgodnie z prawami rynku popyt stymulował rozwój hutnictwa i przemysłu metalowego.

2. Powstają nauki ścisłe

Już w początkach naszej ery Chińczycy znali właściwość igły magnetycznej i używali jej w nawigacji. Po tysiącu lat dotarła do Europy. Kompas umożliwił doniosłe odkrycia geograficzne i wzbudził zainteresowanie angielskiego uczonego Williama Gilberta, który badając własności magnetyczne ciał, uznał glob ziemski za wielki magnes (1600 r.). Gilbert użył też w znaczeniu współczesnym słowa „elektryczność” i wyraził pogląd, że wiąże się ze swoistym „wyciekami” (*effluvium*) ciała naelektryzowanego, co dziś można uznać za pierwszą obserwację pola elektrycznego. Przedstawił również koncepcję zjawiska polaryzacji [4]. Tak zaczęła się nauka o elektryczności, dzisiejsza „elektryka”.

W 1785 r. Coulomb sformułował prawo o wzajemnym oddziaływaniu ładunków, a wkrótce potem Volta, korygując współczesnego mu Galvaniego, zauważył, że udko żaby nie jest generatorem elektryczności, lecz jej wskaźnikiem – „galwanskopem” i około 1797 r. sformułował szereg napięciowy metali. Swój „stos galwaniczny”, który dziś uznajemy za pierwsze ogniwo elektryczne, zademonstrował Napoleonowi Bonaparte [5].

Elektrolityczne źródło napięcia Volty stało się dogodnym narzędziem elektrolizy. Poznanie jej mechanizmu umożliwiło wyodrębnianie składników pierwotnych („pierwiastków”) z ciał złożonych („związków”). Zauważono też odwrotny proces elektrolityczny, w którym z kilku składników generowane są związki chemiczne, a także fakt, że skutkiem takiego procesu jest korozja. Dzięki tym spostrzeżeniom w r. 1812 Davy postawił hipotezę, że zachodzi związek między procesami elektrycznymi i chemicznymi i zastosował elektrody stalowe i cynkowe w roli anod galwanicznych do zabezpieczenia miedzianego poszycia okrętów w wodzie morskiej (1824 r.). Następnie jego uczeń Faraday przedstawił współzależność czynników chemicznych i elektrycznych (1834 r.). Powstała elektrochemia.

W wieku pary i elektryczności zapotrzebowanie na metale rosło. Ze stali budowano coraz więcej okrętów, nowych machin (maszyna parowa, parowóz) i coraz doskonalszych broni dla coraz większych armii. Stal zaczęto stosować w budownictwie, w którym epoka kamienna przetrwała do połowy XIX wieku: budowle z kamienia wznoszono w starożytności, kamień porywał w niebo gotyckie katedry, do dziś cenimy kamień i cegłę jako materiały budowlane. Jeszcze w pierwszej połowie XVIII wieku pokrycie miedzią Pałacu pod Blachą w Warszawie uznano za ekstrawagancki kaprys magnata. W sto lat później budowano już mosty stalowe, tory kolejowe, a za chwilę powstała wieża Eiffla i stalowe drapacze amerykańskie.

Produkcji półwyrobów stawiano coraz wyższe wymagania. Aby je spełnić stosowano coraz doskonalsze procesy technologiczne. Ceny produktów końcowych rosły. Kosztowne konstrukcje i obiekty warto było utrzymywać w dobrym stanie, chroniąc je przed korozją za pomocą powłok zabezpieczających: malarskich, galwanicznych i ogniowych, których właściwości poznawano metodą prób i doświadczeń. Nakładanie ich też nie było za darmo.

3. Prądy, które błądzą w ziemi

Zawód inżyniera we współczesnym znaczeniu istniał już w drugiej połowie XIX wieku. Słowo „inżynier” pochodzi od łacińskiego *ingenium*, które kiedyś oznajmiało geniusz, dziś już tylko twórczą inteligencję. Dzięki osiągnięciom fizyki i elektryki ówczesni twórczy inżynierowie wymyślili maszyny elektryczne, generatory i silniki, a w 1879 r. jeden z nich zaprezentował w Berlinie pierwszy elektryczny pociąg. Inżynier nazywał się Werner von Siemens. Trakcja elektryczna szybko znalazła zastosowanie w tramwajach, kolejach górskich i podziemnych. Niebawem zauważono (1892 r., Niemcy), że od toru kolejowego będącego prze-

wodem powrotnym prądu trakcyjnego, zgodnie z prawem Kirchhoffa odgałęziają się do ziemi prądy powodujące uszkodzenia podziemnych rurociągów gazu, którego wtedy zaczęto używać do oświetlenia, i wodociągów, stopniowo zastępujących wiadra i studnie [6, s. 174]. W r. 1898 stwierdzono elektrolityczny charakter tej korozji, której fizyczną przyczyną była styczność z ziemią torów kolejowych z jednej strony, a rurociągów z drugiej. Masy metalu w elektrolitycznym środowisku ziemi stawały się elektrodami, a płynący między nimi prąd jonowy zgodnie z prawem Faradaya porrywał cząsteczki metalu.

W USA zmierzono napięcie między szynami a rurociągiem rzędu 10 V i prądy od 30 do 450 A i dla wyrównania potencjałów zastosowano połączenie wyrównawcze (drenaż prosty), co jednak okazało się szkodliwe i wobec tego użyto w rurociągach łącz izolujących. Uznano to za środek korzystniejszy. W 1900 r. w Zurichu stwierdzono uszkodzenia wodociągu w rejonie stacji zasilającej kolej górską. Nie ulegało wątpliwości, kto odpowiada za awarię. Zarząd kolei na swój koszt ułożył nowy kabel powrotny [6, s. 176].

W związku z narastającą liczbą uszkodzeń poszukiwano środków zaradczych. Już w 1856 r. inspektor telegrafu Frischen przedstawił na posiedzeniu Hanowerskiego Stowarzyszenia Architektów i Inżynierów referat „Ochrona żelaza przed utlenianiem, tak w powietrzu, jak i w wodzie, przez elektryczność galwaniczną” [6, s. 178]. Może niektórzy niemieccy inżynierowie go przeczytali, bo ochronę katodową zaleciła jako remedium Zjednoczona Komisja Prądów Ziemi, w której uczestniczyli gazownicy i wodociągowcy z jednej strony, a elektrotechnicy i tramwajarze z drugiej (1907 r.). Wykonując dla niej badania Besig i Goldschmidt zastosowali po raz pierwszy elektrodę Zn/ZnSO₄. Wkrótce potem w Wielkiej Brytanii McCollum opracował elektrodę Cu/CuSO₄. W r. 1909 Geppert (Niemcy) opatentował metodę ochrony katodowej z prądem zewnętrznym.

4. Pierwsze przepisy

Pionier trakcji elektrycznej w Polsce Roman Podoski (1873–1954) opublikował w r. 1922 *in extenso* przekład przepisów niemieckiej Zjednoczonej Komisji Prądów Ziemi [7]. Wprawdzie nie podał w nim oznaczenia normy, ani roku wydania, niewątpliwie jednak jest to tekst pierwszej w tej sprawie normy VDE 0190 z 1910 r. [6, s. 176].

W oparciu o doświadczenia zebrane sto lat temu, prawie wyłącznie na terenie miast, gdzie blisko sąsiadowały z sobą tory tramwajowe i gołe (nieizolowane) podziemne rurociągi wodne i gazowe, za jedyną przyczynę uszkodzeń rurociągów uznano prądy błądzące i przepisy tylko ich dotyczyły. Oddziaływanie prądów błądzących należało oceniać na podstawie obliczeń uwzględniających obciążenie średnioroczne przy rozkładowym ruchu pociągów. Uwzględniono w ten sposób fakt, że rozтворzenie metalu doprowadzające do uszkodzenia rurociągu musi być skutkiem oddziaływania trwającego odpowiednio długo [7, §3], [8, s. 271 i n.]. Wymagano, by tor szynowy był „doskonałym i pewnym przewodnikiem” [7, §2] na wzór toru idealnego o przewodności nieskończenie wielkiej. W takim torze nie byłoby różnicy napięć i żaden prąd by nie odpływał.

W torze rzeczywistym różnica napięć miała być mała. Znane parametry toru rzeczywistego (liczba szyn, przekrój, długość, materiał) umożliwiały obliczenie rezystancji wzdłużnej. Należało tak rozmieścić punkty przyłączenia do torów kabli powrotnych, aby obliczony spadek napięcia między dwoma dowolnymi punktami sieci powrotnej, przy którym „uszkodzenia rur pozostaną w dozwolonych granicach” nie przekroczył w mieście 2,5 V. Poza miastem dopuszczono spadek napięcia 1 V/km. Siłą rzeczy zakładano milcząco, że prąd odgałęzia się

od toru do gruntu jednorodnego, o stałej rezystancji właściwej. Rezystancję przejścia szyny-ziemia (swoistą izolację) należało zapewnić jak największą. Odległość „części rurowej” od toru w żadnym razie nie mogła być mniejsza niż 1m; zalecano dużo większą. Jako odległość bezpieczną wskazywano 200 m [8, s. 272]. Dla poprawy sytuacji należało stosować „zewewnętrzne kamienne rury (i) murowane studzienki” i/lub „włączenie (...) izolujących kawałków w przewody gazowe” [7, §4]. Najwidoczniej zauważono już wpływ polaryzacji elektrod pomiarowych na wynik pomiaru potencjału i zalecono używanie „niepolaryzujących elektrod kontaktowych” [8, s. 278].

Ze względu na uszkodzenia rur za wielkość miarodajną przepisy wskazywały gęstość prądu, którą przy $0,75 \text{ mA/dcm}^2$ należało uważać za groźną. Zalecano jej wyznaczenie drogą pomiaru przy użyciu „ramki Habera”, zakopanej w ziemi na spodziewanej drodze przepływu prądu.

5. Co na to w Polsce

Własne poglądy Podoski przedstawił w 1922 r. w pracy „Tramwaje i koleje elektryczne” [8]. Kładł nacisk na to, że prądów błądzących nie da się całkowicie wyeliminować, że nawet nie można przewidzieć ich rozkładu i że właśnie dlatego należy je ograniczać [8, s. 258 i n.]. Skrytykował angielskie zalecenia dotyczące utrzymywania dopuszczalnego spadku napięcia w szynach na poziomie 7 V i francuskie – 5 V. Przepisy niemieckie (2,5 V i 1 V/km) uważał za właściwe.

Już wtedy zauważył, że nie zawsze trakcja elektryczna jest przyczyną uszkodzeń. „Woda, zawarta w ziemi, z rozpuszczonymi w niej solami, kwasami i alkaliarni, stanowi elektrolit (...). Te sole, kwasy i alkalia jednak mogą i same, bez prądu elektrycznego, nadgryzać rury.” „Niejednokrotnie (...) tam, gdzie w ogóle kolei elektrycznych nie było, oraz w czasie unieruchomienia kolei, nieraz bardzo nawet silne prądy płyną od rur do ziemi i na odwrót” [8, s. 260]. Ten rodzaj korozji najwidoczniej go jednak nie zainteresował, nie próbował nawet go nazwać. Ze względu na problem odpowiedzialności cywilnej za uszkodzenia urządzeń podziemnych wskazał jak rozpoznać prądy pochodzenia trakcyjnego (szybkie i częste zmiany wartości) [8, s. 261].

Skargi gazowników i wodociągowców mogły utrudnić rozwój trakcji elektrycznej w Polsce, więc z pozycji uznanego arbitra Podoski podkreślał ekonomiczną stronę zagadnienia: zarządy kolejowe muszą ponosić koszty w celu dochowania wymaganego w przepisach spadku napięcia. Jednocześnie zwracał uwagę na „wartość rur ułożonych w ziemi oraz niebezpieczeństwa, jakie by mogły powstać w razie upływu wody i gazu, spowodowanego uszkodzeniami tych rur” [8, s. 262].

W latach dwudziestych ubiegłego wieku do obiektów podziemnych dołączyły kable telefoniczne zastępując wcześniejsze linie napowietrzne i sprawa uszkodzeń elektrolitycznych nasiliła się ze względu na szczególną podatność ołowianych powłok kabli na roztwarzanie. Jednak propozycje przepisów międzynarodowych przedstawione przez Międzynarodowy Komitet Doradczy dla Telefonii Dalekosiężnej odrzucono (1927 r., Como), w czym znaczną rolę odegrał uznany w kraju i za granicą autorytet Podoskiego. Rozbieżność poglądów i interesów z trakcyjnikami była zbyt duża.

Późniejszy Kongres Międzynarodowego Związku Przedsiębiorstw Tramwajowych, Kolei Dojazdowych i Przedsiębiorstw Autobusowych (1930, Warszawa) przyjął zalecenia zbliżone do treści przepisów niemieckich. Należało więc obliczać teoretyczne spadki napięcia w torach

„w założeniu zupełnej izolacji szyn od ziemi”, ponieważ upływających do ziemi prądów nie umiano obliczyć ani zmierzyć. W komunikacie Kongresu zamieszczono uwagę, z którą dziś trudno się zgodzić, że zmierzone napięcie szyny-obiekt podziemny „nie pozwala nie tylko wnioskować o natężeniu prądów błędzących, ale nawet o ich kierunku” [9].

6. Pierwsza polska norma

Na podstawie własnych badań w miastach całej Polski i w oparciu o przepisy niemieckie, Podoski opracował pierwsze polskie „Wskazówki ochrony urządzeń metalowych znajdujących się w ziemi od działania elektrolitycznego prądów błędzących”, które wraz z dodatkowymi wyjaśnieniami ukazały się (bez charakteru obowiązującego) jako norma PNE/27–1932 [10]. Dopuszczalny obliczony spadek napięcia miał wynosić jak u Niemców 2.5 V i 1 V/1km toru (§5), lecz dopuszczalna gęstość prądu 1mA/dcm² była wyższa niż w przepisach niemieckich (0,75 mA/dcm²), a w pewnych okolicznościach można ją było podnieść (§2). Bezpieczną odległością rurociągów od torów miało być nadal 200m, ale w przypadku kabli tylko 50 m, mimo łatwo roztwarzalnej powłoki ołowiowej. Jako uzasadnienie podano, że kable układa się w piasku lub w kanałach betonowych.

„Wskazówki” rozstrzygały sprawę kosztu ewentualnych dodatkowych środków ochrony: miała je ponieść strona, która wykona swoją instalację jako druga (§3). Kwestia rezystancji szyny-ziemia – poza uwagami, że powinna być wysoka – została pominięta. Autor na podstawie swych badań twierdził, że obliczenia na niej oparte do niczego nie prowadzą [10, s. 40].

Wyrównywanie potencjałów między szynami a obiektem podziemnym nazywano drenowaniem. Miano na myśli drenaż prosty, który został dopuszczony niechętnie, „w pewnych specjalnych przypadkach”, aczkolwiek to „powinno by być bezwzględnie zabronione” [10, s. 52]. Odradzano stosowanie na rurociągach farby lub „cienkich owinięć” izolujących, które po kilku miesiącach „poczynają pękać i odskakiwać, tworząc ogołocone i niechronione miejsca”, w których zwiększona siłą rzeczy gęstość prądu może szybko wywołać uszkodzenie. Jako właściwsze uważano grube warstwy izolujące w rodzaju juty nasyczonej bitumicznie i papieru smołowego (§8).

W zakończeniu „Wskazówek” znalazło się szczere przyznanie, że w sprawach prądów błędzących wiele kwestii wymaga wyjaśnienia i dlatego formułowanie ścisłych przepisów jest przedwczesne [10, s. 54]. Jako próba stworzenia podstaw porozumienia między stronami o przeciwstawnych interesach „Wskazówki” PNE/27–1932 na długie lata ukształtowały poglądy w dziedzinie ochrony obiektów podziemnych przed korozją. Ale nie była to ochrona katodowa w rozumieniu współczesnym.

7. Osiągnięcia światowe

Tymczasem w 1928 r. w Nowym Orleanie von Kuhn zauważył, że prócz prądów błędzących pochodzenia tramwajowego przyczyną korozji są prądy pochodzenia galwanicznego o gęstości około 0,15 mA/cm² i dowiódł, że można je skompensować zewnętrznym prądem ochrony katodowej przy potencjale żeliwnego rurociągu wynoszącym -0,85 V w stosunku do elektrody Cu/CuSO₄ [6, s.183 i 184]. Problemem było niezbędne w tym celu źródło prądu stałego. Mimo to w USA już w latach 30. wprowadzono pierwsze stacje ochrony katodowej, a w następnych dziesięcioleciach na setkach kilometrów tras gazociągów dalekosiężnych, izolowanych nowymi, trwalszymi powłokami, ochronę katodową stosowano rutynowo.

W Europie w latach 30. zastosowano pierwsze drenaże proste na kablu dalekosiężnym w Mediolanie, a pierwszą stację ochrony z prądem zewnętrznym na rurociągu w Belgii.

Na większą skalę osiągnięcia amerykańskie dotarły do Europy dopiero po wojnie. W latach 50. zabezpieczono katodowo w Niemczech wszystkie gazociągi wysokiego ciśnienia. Wtedy też zauważono też niszczące oddziaływanie prądu przemiennego o częstotliwości 16⅓ stosowanego na kolejach w Niemczech, Szwajcarii i Szwecji [12, s. 50].

8. Za żelazną kurtyną

Po II wojnie światowej polscy inżynierowie uruchamiali w kraju tramwaje i odbudowywali zakłady wodociągowe, gazowe i telefoniczne. Na terenie warszawskiego węzła kolejowego zaczęły jeździć pociągi elektryczne. W latach 50. zelektryfikowano kolej podmiejską w Trójmieście. Elektryfikacja PKP ruszyła na całego, a z nią wróciły problemy prądów błędzących. Na uszkodzenia szczególnie były narażone różnego rodzaju kable kolejowe, leżące tuż przy torach.

Problemem rezystancji szyna-ziemia, istotnego składnika obwodu elektrycznego, w którym prądy błędzące działają na obiekty podziemne, zajął się Jan Podoski, syn profesora Romana Podoskiego. W 1947 r. po powrocie z Anglii został kierownikiem zakładu trakcji elektrycznej w Głównym Instytucie Elektrotechniki w Warszawie. Zorganizował wtedy badania poligonowe na terenie politechniki, a pomiary kontrolne na linii Warszawa-Otwock. W grudniu 1949 r. prace te zostały przerwane, ponieważ pod zarzutem szpiegostwa został aresztowany i skazany na 8 lat więzienia [11, s. 232 i n.].

Po warunkowym zwolnieniu w 1954 r., już jako profesor Politechniki Warszawskiej, ukończył badania i opublikował wyniki. Potwierdziły one zależność rezystancji szyna-ziemia od warunków miejscowych i zmienność w czasie, w zależności od nawilżenia w granicach od 0,8 do 51,2 Ω/km , natomiast nie wyjaśniały zjawisk towarzyszących korozji obiektów podziemnych [12, tabl. 2]. W swoim sprawozdaniu autor wspominał o zauważonych, niezależnych od prądów błędzących, różnych potencjałach ziemi, potwierdzających informacje francuskie o „istnieniu napięć ziemnych” [12, s. 53]. W pewnym miejscu nazwał zaobserwowane zjawisko „tellurycznym”, lecz z kontekstu należy wnosić, że nie miał na myśli prądów tellurycznych (od łacińskiego *tellus* – ziemia) w dzisiejszym rozumieniu tego pojęcia [12, s. 80]. W sprawozdaniu nie ma mowy o polaryzacji elektrod pomiarowych.

Wcześniej, w r. 1951 Roman Podoski wychodząc naprzeciw potrzebom rozwijającej się elektryfikacji PKP, opublikował uaktualnione wydanie swej pracy z przed trzydziestu lat p.t. „Trakcja elektryczna”. I on zauważał, że „w ziemi powstają działania polaryzacyjne i prądy przez nie wywołane”. Roztworzenie, które nie pochodziło od prądów błędzących uważał za „normalne zużycie” [13, s. 266] i nadal się nim nie zajmował. Podtrzymał zasadę dopuszczalnego spadku napięcia 2,5 V i 1 V/km.

W swoich rozważaniach nadal brał pod uwagę tylko rurociągi nieizolowane [13, s. 274]. Uważał, że roztworzona „znaczna ... ilość metalu rozłożona równomiernie na kilkanaście tysięcy metrów przewodów rurowych byłaby bez większego znaczenia. Skoncentrowana natomiast na małej długości może spowodować znaczne osłabienie rur.” [13, s. 264]. Powołał się tu na negatywne doświadczenia Azerbejdżańskiego Instytutu Przemysłowego w sprawie stosowania na rurach „pokostów i owinięć izolacyjnych”: 32 rodzaje pokostów nie wytrzymały 10000 godzin, 33 „owinięcia” 14000 godzin. [13, s. 277]. N.b. dokładnie te same liczby podał w przedwojennych „Wskazówkach” z powołaniem publikacji amerykańskiego *Bureau*

of Standards [10, s. 50]. To nie pomyłka, ani żart. Można się domyślać, że w r. 1951 źródła amerykańskie były źle widziane. Wzmianka o Azerbejdżanie być może była ukłonem w stronę władzy, która łaskawie oceniała publikacje odwołujące się do źródeł w ZSSR. Ta sama władza trzymała wtedy w więzieniu jego syna.

9. Przepisy i obowiązki

Lata planu sześcioletniego (1950–1955) i wojny koreańskiej (1950–1953) stały się w Polsce pasmem udręki, o którym nie miejsce tu wspominać, trzeba jednak wskazać, że przyczyniały się do tego niesłychane trudności materiałowe. Dotyczyło to również pozyskiwania materiałów kolorowych. Nazywano je „deficytowymi”. Wywarło to fatalne piętno na polskiej elektrotechnice: próbowano stosować aluminiowe druty nawojowe w maszynach elektrycznych, w instalacjach niskiego napięcia obowiązywały przewody aluminiowe, w trakcji elektrycznej próbowano wprowadzić aluminiowy drut jezdny z „duszą” stalową.

Walczone ze wszystkim, więc należało też „walczyć” z korozją obiektów podziemnych, która coraz bardziej dawała się we znaki elektryfikowanej kolei, łączności i miejskim wodociągom. W związku z tym Państwowa Komisja Planowania Gospodarczego (PKPG), po centralnym Komitecie partii i ministerstwie bezpieczeństwa trzeci najważniejszy organ w kraju, w 1953 r. wydała zarządzenie wprowadzające „Instrukcję o zapobieganiu i zwalczaniu korozji elektrolitycznej powodowanej prądami błędzącymi” [14]. Jej staranność i rzeczowość świadczy o przygotowaniu przez fachowców, a nie, jak to wtedy bywało, przez partyjnych ideologów.

Zgodnie z dotychczasowymi poglądami zalecono przyjęcie średniorocznej gęstości prądu upływu. Zgodnie ze „Wskazówkami” jako maksymalną dopuszczalną ustalono wartość 1 mA/dcm^2 . Zastrzeżono jednak, że pomiar mniejszej wartości nie znaczy, iż ochrona jest wystarczająca (§4). Dopuszczalny spadek napięcia nadal wynosił 2.5 V i 1 V/km , z wyjątkami w których w pewnych okolicznościach można było dopuścić 2 V/km , a na kolei i w tramwajach na wydzielonym torowisku nawet $4,5 \text{ V/km}$ (§7).

Przyznano, że powłoki izolacyjne podnoszą rezystancję przejścia obiektów podziemnych, lecz zalecano ich stosowanie tylko w strefach katodowych, a nie w anodowych (§8.5), gdzie punktowe uszkodzenie izolacji mogło powodować roztworzenie metalu. Jako bierną ochronę zalecano kanalizację dla kabli. Kolektory podziemne uważano za „całkowitą ochronę”, jednak tylko dla obiektów o dużym znaczeniu. Drenaż prosty został zakazany. Dopuszczono drenaż „za pomocą specjalnej aparatury”, nie nazwano go jeszcze polaryzowanym. Dopuszczono również ochronę katodową za pomocą „specjalnego źródła prądu”, którego stosowanie w Polsce, w czasach, gdy nie wynaleziono jeszcze diod krzemowych mocy, było zupełną iluzją [14, § 9]. Podkreślono, że oba urządzenia zwiększają upływ prądu z szyn. Dziś egzotycznie brzmi informacja, że źródłem prądów błędzących mogą być sieci energetyczne prądu stałego [14, §3.2], ale np. w Poznaniu pochodziło z nich wtedy 90% prądów błędzących, a w Bydgoszczy 85% [15, s. 25].

„Instrukcja” nałożyła obowiązek pozyskiwania opinii na temat stosowanych systemów ochrony opinii w Instytucie Elektrotechniki lub na Politechnice Warszawskiej. Do chwili publikacji „Instrukcji” były to jedyne ośrodki naukowe zajmujące się tą problematyką.

10. Nowe zespoły badawcze

Do zwalczania korozji zobowiązano przedsiębiorstwa trakcyjne oraz te, które eksploatowały sieci kablowe lub rurociągowe [14, § 10]. Rozwój elektryfikacji PKP w latach 60. i następnych spowodował rosnące zainteresowanie tymi problemami. Międzyresortowa komisja pracowała nad projektem nowelizacji normy PNE/27–1932: „Przepisy ochrony podziemnych urządzeń metalowych przed korozją elektrolityczną powodowaną przez prądy błędzące”. Tytuł sugerowałby, że może rozpoznawano wtedy również inne przyczyny korozji elektrolitycznej.

W nowelizacji normy podtrzymywano zasadę obliczania średniorocznego spadku napięcia, lecz dla torów nie zasypanych podsypką dopuszczono wyższą wartość: 3 V/km [15, s. 45]. Zwraca uwagę postulat „posługiwanie się mapą rozkładu potencjałów sieci szynowej”, natomiast dziwi zezwolenie na sytuowanie obiektów podziemnych w odległości zaledwie 0,5 m od szyn [15, s. 48]. Dopuszczano stosowanie drenażu lub ochrony katodowej, zabraniając „bezpośredniego” połączenia, co oznaczało zakaz drenażu prostego [15, s. 49]. Projekt normy nie został opublikowany. Może specjaliści z poza grona trakcyjników mieli inne zdanie.

Poza Instytutem Elektrotechniki (mgr inż. Władysław Dziuba) i Politechniką Warszawską (prof. dr inż. Jan Podoski) powstały nowe zespoły badawcze. W Instytucie Łączności ochroną kabli telekomunikacyjnych zajęła się doc. dr Olimpia Skiba-Rogalska, elektrochemik, i inż. Jerzy Bralewski; w Centralnym Ośrodku Badań i Rozwoju Techniki Kolejnictwa specjalista telekomunikacji mgr inż. Tadeusz Puchalski badał kable kolejowe; w Instytucie Gospodarki Komunalnej działał inż. Jerzy Ostaszewicz. Kolejno dołączały inne ośrodki.

Nadążanie za postępem osiągnięć zagranicznych w socjalizmie skutecznie utrudniały zamknięte granice. Z braku krajowej literatury kształcenie specjalistów było bardzo utrudnione, trudno więc przecenić znaczenie pracy Władysława Dziuby i Jerzego Ostaszewicza „Prądy błędzące”, gdy ukazała się w 1955 r. Nadal obowiązywała „Instrukcja” z 1953 r. i gęstość prądu 1 mA/dcm², lecz autorzy cytowali również przepisy „radzieckie”, które wymagały 0,75 mA/dcm², a dla kabli nawet tylko 0,15 mA/dcm² [15, s. 20]. Dopuszczalne spadki napięcia w sieci szynowej autorzy przyjmowali zgodnie z „Instrukcją” (2,5 V, 1 V/km, w pewnych przypadkach nawet 4,5 V/km) [15, s. 48]. W ziemi ciągle istniały „rury metalowe niez izolowane od ziemi” [15, s. 28].

Novum stanowił szeroki program pomiarów potencjału obiektu podziemnego względem ziemi i względem sąsiednich obiektów metalowych, pomiaru napięcia obiektu badanego względem szyn i potencjału szyn względem ziemi. Niestety ówczesne przyrządy pomiarowe nie dawały możliwości obserwacji zależności między mierzonymi wielkościami [15, s. 54 i n.]. Cenną nowością było wyraźne zalecenie stosowania elektrod niepolaryzujących w celu „wylimitowania wpływu siły elektromotorycznej na styku metal – ziemia”.

Znaczna część pracy została poświęcona obliczaniu – według metod „nauki radzieckiej” – przepływu prądów błędzących do obiektów podziemnych [15, s. 59 i n.]. Obliczenia, mimo założeń upraszczających, które podważały zaufanie do wyników, były skomplikowane, ale w czasach, gdy wszystko należało zaplanować z góry, praktyczna wartość obliczeń polegała na tym, że powołując się na „podstawy naukowe” można było odpowiednio wcześniej „wstawić do planu” środki ochrony, które inaczej byłyby „nie do zdobycia”.

Dużo uwagi autorzy poświęcili drenażowi. Podtrzymali opinię o szkodliwości drenażu prostego, lecz zarazem na podstawie doświadczeń kolei ZSSR wskazali zalety drenażu polaryzowanego i wzmocnionego [15, s. 112]. Zaprezentowali też własne rozwiązanie z zaworem

w postaci prostownika selenowego (nie znano jeszcze diod krzemowych) i stycznikiem, niezbędnym ze względu na niewielką obciążalność prostownika [15, s. 109 i n.]. Przedstawili ideę stacji ochrony katodowej (SOK), zwracając uwagę, że w przeciwieństwie do drenażu stacja działa bez przerwy, przez co „całkowicie zabezpiecza przed korozją ziemną” [15, s. 116], co świadczyłoby, że myślano o ochronie nie tylko przed oddziaływaniem prądów błędzących. Wśród omawianych środków ochrony dość egzotycznie brzmi, być może zaczerpnięta ze skarbca „nauki radzieckiej”, wzmianka o nakładaniu na obiekt chroniony „filtre elektronowym” (taśma gumowa z proszkiem grafitowym) [15, s. 119].

11. Pojawiają się nowe konstrukcje i obiekty wymagające ochrony

Już w latach 50. zaczęto stosować powłoki termoutwardzalne jako osłony kabli. Początkowo wyobrażano sobie, że są to powłoki szczelne, a zatem niepodlegające oddziaływaniu prądów błędzących. Okazało się wkrótce, że jest inaczej, a to z powodu nieciągłości w wyniku wad produkcyjnych i uszkodzeń podczas montażu (na porowatość nie zwracano jeszcze uwagi). Było jasne, że kable nadal wymagają ochrony czynnej.

W połowie lat 50. uznano za korzystną dystrybucję ciepła wytwarzanego centralnie w miejskich elektrociepłowniach. Utworzone w tym celu miejskie sieci ciepłownicze już w latach 70. ulegały awariom korozyjnym. Podejrzenia, że ich pierwotną przyczyną były trakcyjne prądy błędzące okazały się nieuzasadnione, ponieważ degradację powodowała korozja wewnętrzna (agresywność wody sieciowej). Wykonane badania zwróciły jednak uwagę na prądy błędzące w ciepłociągach i potrzebę kontroli nad nimi. Stosowano głównie drenaż polaryzowany.

Odkrycia złóż gazu ziemnego w Polsce spowodowały rozwój gazociągów dalekosieżnych. Początkowo ochrona bierna ograniczona była do powłok bitumicznych, ale z biegiem lat wprowadzano izolację coraz wyższej jakości. W latach 70. wprowadzono w Gdańsku pierwsze instalacje ochrony katodowej, a w 1985 r. pierwsze drenaże polaryzowane na gazociągach średniego i wysokiego ciśnienia [16].

Motoryzacja (zapewne i względy wojskowe) przyczyniły się do wzrostu zapotrzebowania na paliwa płynne i budowy dalekosiężnego rurociągu naftowego na trasie: (ZSSR) – Adamowo – Płock – Schwedt (ówczesna Niemiecka Republika Demokratyczna), który został uruchomiony w 1963 r. Potem budowano kolejne rurociągi naftowe. Ze względu na środowisko stosowano bierną i czynną ochronę katodową, a kontrola nad nią w latach 90. została podniesiona do poziomu stałego monitoringu.

Równoległe rozwijał się przemysł stoczniowy i budownictwo portowe, co przyczyniło się do powstania w Trójmieście ośrodków, które zajęły się kinetyką procesów korozyjnych i innymi badaniami ogniwo korozyjnych, nie ograniczając się do problematyki trakcyjnych prądów błędzących.

12. Nowe normy

W 1966 r. problematyka prądów błędzących zostało przedstawione w nowym ujęciu w normie PN-66/E-05024 „Ochrona podziemnych urządzeń metalowych przed korozją powodowaną prądami błędzącymi. Wymagania i badania kontrolne” [17]. Opracowanie powstało wskutek „konieczności ujednoczenia wymagań technicznych” wynikających z zachodnich i sowieckich przepisów związków kolei i zarządów telekomunikacji. W przeciwieństwie do

przedwojennych „Wskazówek” PNE/27–1932 [10], ale podobnie jak „Instrukcja” z 1953 r. [14], norma została ustanowiona jako obowiązkowa.

Za przyczynę korozji elektrolitycznej wskazano w niej tylko źródła zewnętrzne, a więc prądy błądzące (1.3.5). Norma określiła strefę ich oddziaływania w granicach 1 km po obu stronach toru (1.3.8) i uznawała celowość pokryć izolujących (1.3.36). Podawała też definicje ochrony katodowej (1.3.40), potencjału ochrony (1.3.41), elektrody Cu/CuSO₄ (1.3.43), drenażu (1.3.45) i ochrony katodowej z prądem zewnętrznym (1.3.49).

Podtrzymano wymóg obliczania średniorocznego spadku napięcia, jednak tym razem za dopuszczalny uznano 1,25 V/km (2.2.2). Minimalna odległość od toru miała się zawierać w granicach 1 do 5 m (2.5.1). Nowe było żądanie osłon izolujących dla kabli i rurociągów. Po raz pierwszy w przepisach wprowadzono kryterium potencjałowe ochrony obiektu. Średni potencjał – w stosunku do elektrody Cu/CuSO₄ – dla stali i ołowiu z pokryciem izolacyjnym miał się mieścić w granicach -0,8 do -1,2 V, a ołowiu bez pokrycia -0,7 do -1,3 V (tabl. 3). Wskazano warunki stosowania drenaży (2.5.5.5), zakazano drenażu prostego (2.5.5.7), w pewnych warunkach dopuszczono stosowanie „anod reakcyjnych” (2.5.5.11). Pomiary potencjału należało wykonywać odczytując wskazania co 10” w ciągu 15’ (tramwaje) lub w ciągu 30’ (koleje) (3.6.6) ÷ (3.6.12). Załącznik zawierał schematy i opisy pomiarów kontrolnych.

Norma, podtrzymując wymagania dotyczące prądów błądzących, oddzielnie potraktowała problemy ochrony przed korozją obiektów podziemnych, zwróciła uwagę na obiektywne kryteria oceny stanu ich zagrożenia i wskazywała nowe środki ochrony. Pod nieco zmienionym tytułem następne wydanie z 1981 r. [18] objęło już tylko tematykę prądów błądzących. Dopuszczalny spadek napięcia nadal wynosił 1,25 V/km, lecz inaczej niż w poprzednim wydaniu dopuszczono w pewnych warunkach 2,5 V/km (2.2.2).

To nowe wydanie [18] było skutkiem ukazania się w 1977 r. odrębnej normy PN-77/E-5030. „Ochrona przed korozją. Ochrona katodowa” w dwóch częściach [20] i [21], która objęła nie tylko kwestie przeciwdziałania prądom błądzącym, lecz także agresywności korozyjnej środowiska [20, 1.3.1], żądała ochrony przed korozją dla każdej konstrukcji metalowej [20, 3.1] i w pewnych warunkach wymagała stosowania stacji katodowych [20, 3.4.3]. Podawała też szereg wskazówek praktycznych, m. in. wymagała odległości od torów 5 do 10 m [21, 2.3.2], klasyfikowała pokrycia izolacyjne konstrukcji w ziemi [21, tabl. 2] oraz nakazywała stosowanie stalowych rur ochronnych [21, 2.5.2]. Znamienne jest, że wśród autorów trakcyjnicy byli teraz w mniejszości.

13. Lata przełomu

Koniec lat 80. to przełom nie tylko w polskim życiu politycznym. W kulturze, nauce, technice i oczywiście w dziedzinie ochrony katodowej dostępne stały się osiągnięcia światowe, współczesna technika, zagraniczne ośrodki badawcze i ich publikacje. Pojawiły się nowego rodzaju obiekty wymagające ochrony, inne przestały mieć znaczenie (kable telekomunikacyjne). Wstąpienie Polski do Unii Europejskiej (2004) otworzyło wrota konkurencji międzynarodowej, wprowadziło nowe zasady normalizacji technicznej, oceny jakości budowy, eksploatacji obiektów i kwalifikacji personelu. Pojawiły się nowe wyzwania.

Bibliografia

- [1] Herodot, *Dzieje (Ἱστορία)*, Wyd. Zakład Narodowy im. Ossolińskich, 2006, Ks. *Klio*, 179.
- [2] *Pismo Święte Starego i Nowego Testamentu*, Wyd. Pallotinum, 1980. Jr 52, 11.
- [3] Paszthory E., *Electricity Generation or Magic? The Analysis of an Unusual Group of Finds from Mesopotamia*, Przekład (wg) *Antike Welt* 16(1), 1985, s. 3–12.
- [4] Gilbert W., *De magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure*, London 1600 (wg) *Encyclopaedia Britannica*. Encyclopaedia Britannica, Ltd.
- [5] Cianfanelli N., *Alessandro Volta muestra su pila eléctrica ante Napoleón Bonaparte en 1800*, Muzeum Fizyki i Nauk Przyrodniczych, Florencja.
- [6] Walter von Baeckmann und 7 Mitautoren, *Messtechnik beim kathodischen Korrosionsschutz*, Expert Verlag, 7044 Ehningen bei Böblingen, 1982.
- [7] *Przepisy wraz z wyjaśnieniami dla ochrony rur wodociągowych i gazowych od szkodliwego wpływu prądów kolei elektrycznych o prądzie stałym, używających szyn jako przewodu*. Opr. Wydział Prac Komisji Prądów Ziarnych, Niemieckiego Związku Fachowców Gazowych i Wodociągowych, Niemieckiego Związku Elektrotechników i Związku Zarządów Niemieckich Kolei Miejskich i Podmiejskich. (Ing. Besig, Reg. Baumeister a.D. Buchbaum, Baurat W.H. Lindley, Obering. Dr. Michalke, Obering. Otto) (w:) [8, s. 266–280].
- [8] Podoski R., *Tramwaje i koleje elektryczne*, t. 1, Warszawa 1922.
- [9] Podoski R., *Prądy błędzące*, Przegląd Elektrotechniczny, 1928, s. 121–122 i 145–148; XXII Kongres Międzynarodowego Związku Przedsiębiorstw Tramwajowych, Kolei Dojazdowych i Przedsiębiorstw Autobusowych, Podoski R., *Prądy błędzące i ochrona od ich działań elektrolitycznych*, Przegląd Elektrotechniczny, 1930, s. 597–603.
- [10] PNE/27–1932. *Wskazówki ochrony urządzeń metalowych znajdujących się w ziemi od działania elektrolitycznego prądów błędzących*. Dodatek. *Prądy błędzące (Wyciąg z referatu prof. R. Podoskiego)*, Wyd. Stowarzyszenie Elektryków Polskich.
- [11] Podoski J., *Zbyt ciekawe czasy*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1991.
- [12] Podoski J., *Badania oporu doziemnego torów kolejowych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej nr 21, „Elektryka” nr 12, 1956.
- [13] Podoski R., *Trakcja elektryczna*, t. 1, Wydawnictwa Komunikacyjne, Warszawa 1951.
- [14] Zarządzenie Przewodniczącego PKPG nr 8 z 23 stycznia 1953 – *Instrukcja o zapobieganiu i zwalczaniu korozji elektrolitycznej powodowanej prądami błędzącymi*, Biuletyn PKPG 1953, nr 2.
- [15] Dziuba W., Ostaszewicz J., *Prądy błędzące*, Wydawnictwa Komunikacyjne, Warszawa 1955.
- [16] Fiedorowicz M., Jagiełło M., *Zagadnienie ochrony przeciwkorozyjnej rurociągów izolowanych w świetle doświadczeń Pomorskiego Okręgowego Zakładu Gazownictwa*, V Krajowa Konferencja Pomiary Korozyjne w Ochronie Elektrochemicznej, Jurata 1998.
- [17] PN-66/E-05024 *Ochrona podziemnych urządzeń metalowych przed korozją powodowaną prądami błędzącymi. Wymagania i badania kontrolne*.
- [18] PN-81/E-05024 *Ochrona przed korozją. Ograniczenie upływu prądów błędzących z trakcyjnych sieci powrotnych prądu stałego*.
- [19] PN-92/E-05024 *Ochrona przed korozją. Ograniczenie upływu prądów błędzących z trakcyjnych sieci powrotnych prądu stałego*.
- [20] PN-77/E-5030/00 *Ochrona przed korozją. Ochrona katodowa. Wspólne wymagania i badania*.
- [21] PN-77/E-5030/01 *Ochrona przed korozją. Ochrona katodowa. Ochrona metalowych konstrukcji podziemnych*.