



ODDZIAŁYWANIE PRĄDÓW TELLURYCZNYCH NA RUROCIĄGI CHRONIONE KATODOWO

INTERACTION OF TELLURIC CURRENTS ON PIPELINES WITH CATHODIC PROTECTION

Hanna Matus

GAZ-SYSTEM S.A.

Słowa kluczowe: korozja, prądy telluryczne, aktywność słońca, rurociąg
Keywords: corrosion, telluric currents, solar activity, pipeline

Streszczenie

Zmienne pola elektromagnetyczne będące źródłem aktywności słonecznej wpływają na kształtowanie pola geomagnetycznego Ziemi, które może być przyczyną zjawisk elektrycznych w obiektach metalowych, między innymi w rurociągach. Prądy telluryczne, podobnie jak prądy pochodzące z trójfazowej trójprądowej trakcji elektrycznej, utrudniają wykonanie pomiarów dla oceny skuteczności ochrony katodowej rurociągu. W referacie przedstawiono problemy związane z oceną oddziaływań prądów tellurycznych na gazociągi chronione katodowo oraz przeanalizowano potencjalne zagrożenia korozją wywołaną tymi prądami.

Summary

A variable electromagnetic field being the source of solar activity affects the geomagnetic field of Earth and can be the cause of electric phenomena in metal objects, amongst others in pipelines. Telluric currents, similarly to currents from DC electric tractions, hinder performing of measurements for assessment of pipeline cathodic protection effectiveness. In the lecture problems have been presented connected with assessment of telluric current interactions on pipelines with cathodic protection, also potential corrosion hazards caused by these currents have been analysed.

1. Aktywność słońca

Ziemia leży wewnątrz rozciąglej atmosfery słonecznej, którą tworzy emitowany nieustannie przez Słońce w przestrzeń planetarną, tzw. wiatr słoneczny, złożony z cząstek energetycznych i pola magnetycznego. Przed jego zgubnym wpływem Ziemia jest chroniona przez ziemskie pole magnetyczne zwane magnetosferą. Czasami zjawiska eksplozji na Słońcu są tak gwałtowne, że magnetyczna tarcza ochronna Ziemi nie wystarcza. Wówczas odczuwane są negatywne skutki aktywności słonecznej.

Istnieją dwa typy eksplozji na Słońcu, rozbłyski oraz koronalne wyrzuty materii (Coronal Mass Ejection – CME). Podczas rozbłysku dochodzi do eksplozji plazmy, wyzwala się gigantyczna energia, ma miejsce promieniowanie gamma i X, a naładowane cząstki przyspieszają do prędkości bliskiej prędkości światła. Rozbłyski te wpływają na ziemską atmosferę powodując jej dodatkową jonizację.

Podczas CME wyrzucane są w przestrzeń międzyplanetarną ogromne fragmenty korony słonecznej. Obłoki wyrzuconej materii często pędzą z prędkościami ponad 1000 km/s, a ich masa przewyższa 10^{16} g. Jeżeli taki wyrzut skierowany jest w stronę Ziemi, może na niej generować silne burze geomagnetyczne, których najbardziej znanym obserwowalnym przejawem są zorze polarne. CME dociera w okolice Ziemi, w zależności od początkowej prędkości, w czasie od 1 do 4 dni. Ziemskie pole magnetyczne znosi się z polem unoszonym przez CME, magnetosfera ziemska traci działanie ochronne a energetyczne cząstki mogą swobodnie do niej wnikać. Strumienie cząstek generują prądy elektryczne, które zakłócają ziemskie pole magnetyczne.

2. Badania aktywności słońca

Nie potrafimy przewidywać aktywności słońca na więcej niż kilka dni naprzód. Od momentu zarejestrowania burzy magnetycznej przez satelitę ACE (*Advanced Composition Explorer*), który jest umiejscowiony w punkcie odległym od Ziemi o 1,6 miliona kilometrów, do chwili, gdy dotrze ona do ziemi, upływa zaledwie 20 minut.

W grudniu 1995 r. NASA do obserwacji słońca i badania CME wysłała satelitę SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*). Na jego pokładzie pracują obecnie dwa koronografy pozwalające obserwować koronę słoneczną w odległości od 1,5 do 30 promieni słonecznych od centrum Słońca.

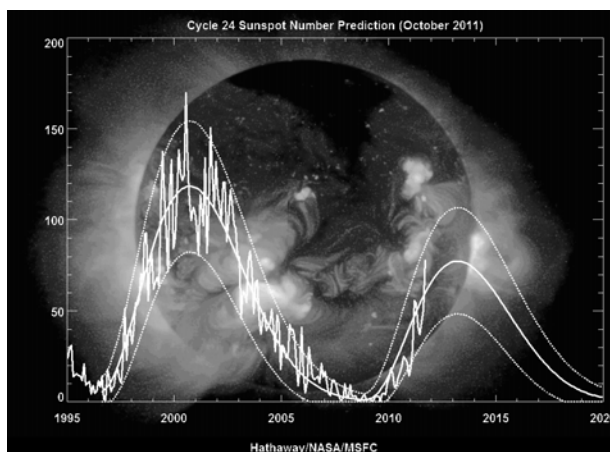
Dwa satelity NASA umieszczone na orbicie w listopadzie 2010 dostarczają prawie kompletny obraz drugiej strony powierzchni słońca, co pozwala bardziej precyzyjnie określać przewidywane drogi CME.

W październiku 2011 roku NOAA (Amerykańska Administracja do spraw Oceanów i Atmosfery) uruchomiła program komputerowy, który pozwala określić, kiedy dany CME dotrze do Ziemi. Na stronach internetowych (<http://www.sec.noaa.gov/>) NOAA publikuje dane bieżące i historyczne na temat okresów aktywności energetycznej słońca. NOAA podaje między innymi wartość indeksu K, który informuje o poziomie burz magnetycznych i lokalnych zakłóceniach pola magnetycznego Ziemi. Wartości indeksów K uzyskane z 13 obserwatoriów rozmieszczonych w różnych miejscach na Ziemi służą do określenia indeksu aktywności kosmicznej Kp (Kp – indeks planetarny). Indeks Kp wyrażany jest w skali quasi-logarytmicznej i jest wskaźnikiem opisującym średnią lokalną aktywność geomagnetyczną z 3 godzin (indeks ten jest liczbą z zakresu 0–9. Przy $k > 5$ mówi się o burzy magnetycznej, $k=9$ to burza ekstremalnie silna). Indeks, który jest liniowo zależny od intensywności pola

magnetycznego, jest indeks A oraz wielkość zmian pola magnetycznego wyrażone w nano Teslach (nT), mierzone między innymi w Boulder (USA). Spadek pola magnetycznego podczas najintensywniejszych burz może osiągnąć wartość 400 nT.

Intensywność pola magnetycznego mierzą magnetometry rozmieszczone w licznych obserwatoriach na całym świecie. W Polsce badania prowadzone są między innymi w Obserwatorium Geofizycznym Instytutu Geofizyki PAN w Belsku oraz w Obserwatorium Geofizycznym Instytutu Geofizyki PAN w Helu. Głównym zadaniem Obserwatorium jest wykonywanie ciągłych obserwacji elementów naturalnego ziemskiego pola magnetycznego, czyli prowadzenie tzw. służby magnetycznej. W ramach tej służby prowadzone są ciągłe rejestracje zmian elementów X, Y, Z i F pola magnetycznego.

Na rysunku 1 pokazano ostatni pełny cykl aktywności słonecznej i aktualny, który zaczął się w 2009 roku. Ta prognoza wyładowań słonecznych wykonana przez NASA wskazuje na spodziewane wystąpienie maksimum cyklu w lipcu 2013 r. Będzie to prawdopodobnie najślabszy cykl w ciągu ostatnich 100 lat.



Rys. 1. Wykres aktywności słońca przedstawiający ostatni cykl 11-letni

3. Wpływ aktywności słońca na działalność człowieka

Najbardziej jaskrawym przykładem oddziaływania pogody kosmicznej jest wpływ działalności słońca na satelity, promy kosmiczne i samoloty latające na dużych wysokościach. W dużej mierze pozbawione są ochrony ziemskiej magnetosfery, co naraża je na poważne uszkodzenia, głównie z powodu uderzających wysokoenergetycznych cząstek, powstających w czasie rozbłysków. Innym przykładem jest oddziaływanie słońca na radiokomunikację, w tym na telefony komórkowe. Podczas silnych burz magnetycznych, które powodują zmiany gęstości jonosfery, komunikacja radiowa może być utrudniona, a czasem nawet niemożliwa.

Najpoważniejszy wpływ pogody kosmicznej na działalność człowieka polega na zakłóceniach na ogromną skalę w przesyłaniu energii elektrycznej. Za najgorszą w skutkach uznaje się awarię elektroenergetyczną w Quebec w Kanadzie w dniu 13 marca 1989 roku, kiedy sześć milionów ludzi zostało pozbawionych prądu. To wydarzenie spowodowało też większy nacisk na prognozowanie pogody kosmicznej.

Ryzyko wpływu burz geomagnetycznych na system elektroenergetyczny występuje na obu półkulach, w wielu krajach, również o umiarkowanej szerokości geograficznej. Związane z nimi uszkodzenia urządzeń elektroenergetycznych zanotowano ostatnio w Stanach Zjednoczonych, RPA i w Europie (w Szwecji, Anglii, Finlandii).

4. Zjawisko powstawania prądów tellurycznych

Cząstki słoneczne przybywające na Ziemię powodują nagłe zmiany jej pola magnetycznego (pole geomagnetyczne). To zmieniające się pole magnetyczne wytwarza pole elektryczne, które powoduje przepływ ładunków elektrycznych w ziemi i w metalowych sieciach naziemnych, takich jak rurociągi, linie elektroenergetyczne i kable telekomunikacyjne. Przepływy prądów indukowanych geomagnetycznie (*geomagnetically induced currents – GIC*) powodują nietypowe zakłócenia w funkcjonowaniu łączności, rurociągów, sygnalizacji kolejowej i systemów elektroenergetycznych.

Okresowość prądów GIC zmienia się w znacznym zakresie, lecz zwykle jest to rząd kilku minut. Na te przebiegi nakładają się mikropulsacje o różnej częstotliwości. Prądy GIC zwykle mają częstotliwość mniejszą od 0,1 Hz, można je zatem traktować podobnie jak prąd błędzący upływający z trójfazy elektrycznej prądu stałego.

Prądy GIC, zwane prądami tellurycznymi, płyną w ziemi na bardzo długich odcinkach, w nocy najczęściej w kierunku biegunów, a w dzień w kierunku równika. Rurociąg biegnący zarówno równoleżnikowo jak i południkowo, szczególnie posiadający dobrą powłokę izolacyjną może być poddany oddziaływaniu prądów tellurycznych, co objawia się w różnych miejscach znacznymi zmianami potencjału względem ziemi. Potencjał zmienia się w funkcji czasu wskutek rotacji Ziemi, obrotu Słońca, jedenastoletniego cyklu słonecznego i burz słonecznych.

Wartość skuteczna zaindukowanego prądu GIC zależy od szeregu czynników, z których najistotniejszymi są:

- wartość indeksu K,
- struktura geologiczna Ziemi (większy potencjał będzie indukowany w terenie o dużej rezystywności, niż w terenie o niskiej rezystywności),
- długość rurociągu,
- rezystancja przejścia,
- rezystancja wzdłużna,
- położenie geograficzne w stosunku do biegunów magnetycznych,
- położenie geograficzne w stosunku do wybrzeża morskiego.

Napięcia telluryczne indukowane w rurociągu można obliczać stosując równania linii przesyłowej o rozłożonym źródle zasilania (DSTL). Wielkość napięcia tellurycznego V_t jest nie tylko funkcją kierunku i wielkości pola magnetycznego, lecz także bezpośrednio zależy od długości rurociągu i rezystancji przejścia. Analiza oddziaływań prądów tellurycznych przeprowadzona przez Botelera [1] w zastosowaniu do nowoczesnych rurociągów o dobrych powłokach, świadczy o tym, że oddziaływanie prądów tellurycznych jest może bardziej szkodliwe niż pierwotnie przypuszczano, zwłaszcza jeśli chodzi o długie rurociągi na wysokich szerokościach geograficznych.

5. Wpływ prądu tellurycznego na rurociągi chronione katodowo

Wpływ prądów tellurycznych na rurociągi uważano kiedyś za rzecz wyjątkową i tylko pewien problem podczas oceny działania ochrony katodowej. Ogólnie uważano oddziaływanie prądów tellurycznych bardziej za utrudnienie w czasie pomiarów niż za poważne zagro-

żenie korozyjne. Zwykłą praktyką operatorów rurociągów było przerywanie badań do chwili, gdy ustawały zakłócenia telluryczne. Ponieważ buduje się coraz więcej rurociągów w wyższych szerokościach geograficznych i w gruntach o większej rezystywności, stosując powłoki wyższej jakości, obecnie rozważa się możliwość powstawania ubytków korozyjnych podczas wpływu prądu tellurycznego z rurociągu.

W literaturze brak informacji na temat korozyjnych uszkodzeń rurociągów wskutek oddziaływania prądów tellurycznych, lecz badania wykonane przez niektórych operatorów mogą świadczyć o pewnym ryzyku korozji z tego powodu [1]. W studium *Telluric and Ocean Current Effects on Buried Pipelines and Their Cathodic Protection Systems* [1] przeanalizowano aktualną i historyczną wiedzę w zakresie zagrożeń spowodowanych prądami tellurycznymi. Stwierdzono, że napięcia indukowane pochodzenia geomagnetycznego są większe w rurociągach o wysokiej jakości powłoki, ponieważ poziom napięcia indukowanego jest wprost proporcjonalny do rezystancji powłoki. Dodatkowym czynnikiem powodującym wzrost zagrożenia prądami tellurycznymi jest wzrost aktywności tellurycznej przedstawianej przez indeks A (tj. > 60 nT).

W 1971 r. poddano analizie rurociąg chroniony katodowo w Północnej Norwegii pod kątem potencjalnego korozyjnego zagrożenia ze strony prądów tellurycznych [1]. Przez okres 2–3 miesięcy korelowano czas trwania i wielkość potencjałów bardziej dodatnich od kryterium – 850 mV (względem elektrody Cu/CuSO₄) z szybkością korozji w funkcji danych potencjałowych otrzymanych podczas prób laboratoryjnych. Na tej podstawie sformułowano wniosek, że korozja od prądów tellurycznych w strefach zorzy polarnej jest w przybliżeniu tej samej wielkości jak zwykła korozja w gruncie.

W 1986 roku Seager [1] wykonał badania rurociągu naftowego o długości 522 km, chronionego katodowo, znajdującego się w Kanadzie między 55°N a 70°N szerokości geomagnetycznej. Podczas badań używał małych, stalowych elektrod symulujących, zainstalowanych w punktach pomiarowych na całej długości gazociągu. Odłączając elektrodę symulującą od rurociągu wyznaczał potencjał wolny od spadku napięcia IR , powodowany przez ochronę katodową i prąd telluryczny. W wyniku przeprowadzonych badań Seager doszedł do wniosku, że korozja związana z działaniem prądów tellurycznych może powodować perforację rury w niedopuszczalnie krótkim czasie.

Również Martin [1] informował o korozji powodowanej przez prądy telluryczne na gazociągu o długości 515 km w północno-wschodniej Australii, gdzie kryterium ochrony katodowej było spełnione, lecz sondy korozyjne wskazywały szybkość korozji powyżej 0,01 mm/rok. Na tych chronionych katodowo rurociągach szybkość korozji była ostrożnie szacowana jako 0,04 mm/rok dla średnio 300 zjawisk tellurycznych podobnej wielkości każdego roku. Wpływ prądu tellurycznego z elektrody symulującej ma miejsce natychmiast, gdy potencjał załączeniowy staje się bardziej dodatni od potencjału wyłączeniowego, jak widać na rys. 3–2. Potencjał E_{OFF} obliczono używając potencjał E_{ON} i stosując współczynnik obliczony przez iloczyn prądu elektrody symulującej przez uprzednio zmierzoną rezystancję elektrody symulującej w stosunku do ziemi. Przez około 1/3 rejestracji prąd płynął z elektrody symulującej, co powodowało wyraźną depolaryzację. Wartość gęstości prądu była porównywalna z gęstością prądu szczytowego.

6. Oddziaływania prądów tellurycznych na krajowe gazociągi przesyłowe

Oddziaływania prądów tellurycznych są również widoczne na krajowych sieciach przesyłowych. Wpływ prądów GIC na rurociągi chronione katodowo omówiono na przykładzie

dwóch gazociągów. Jeden z nich o długości około 130 kilometrów został wybudowany pod koniec lat 90 tych. Gazociąg ma układ równoleżnikowy i jest poddany oddziaływaniom prądów błędnych, pochodzących z trójfazowej prądu stałego. Rezystancja przejścia odcinków gazociągu między punktami prądowymi kształtuje się między $5 \times 10^5 \Omega \text{m}^2$ a $10^7 \Omega \text{m}^2$, co świadczy o dobrej jakości izolacji gazociągu, ale nie pozbawionej defektów. Gazociąg jest ciągły elektrycznie i odseparowany przy pomocy monobloków od uziemionych obiektów gazowniczych. Gazociąg jest położony w gruntach o zmiennej rezystywności. Przeważają grunty nisko i średniooporowe, ale występują też lokalnie grunty wysokooporowe, o rezystywności przekraczającej $1000 \Omega \text{m}$.

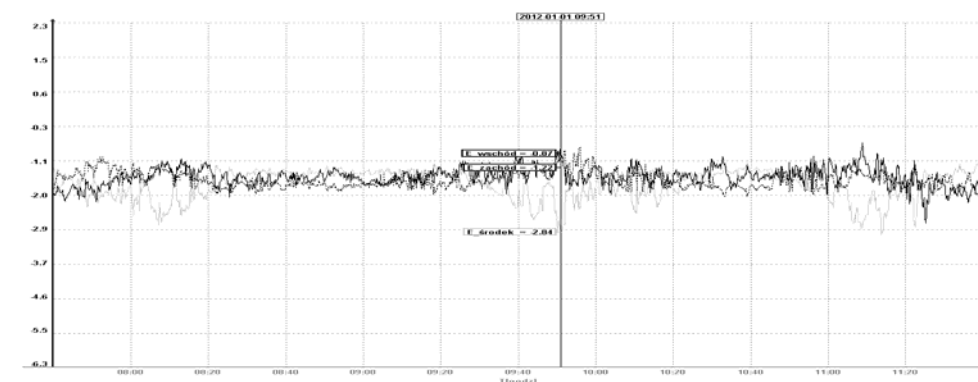
Ochrona katodowa gazociągu została zrealizowana przy pomocy 2 automatycznych stacji ochrony katodowej (SOK), współpracujących z uziomami głębokimi. SOK zostały usytuowane na końcach gazociągu, na terenie obiektów gazowniczych. Obie stacje ochrony katodowej pracują przy sumarycznym prądzie około 220 mA.

Zarejestrowane na gazociągu prądy błędne wywołują znaczne zmiany potencjału konstrukcji na całej trasie gazociągu. Z uwagi na duże wahania potencjałów gazociągu automatyczne stacje ochrony katodowej początkowo pracowały w trybie potencjostatycznym, tj. przy stałej wartości potencjału w punkcie drenażu SOK. Zmieniający się dynamicznie prąd błędny zmieniał zapotrzebowanie prądowe gazociągu i przy przekroczeniu wartości potencjału sterującego pracą SOK powodował wyłączenie SOK. W efekcie dochodziło do niedochronienia w obszarach znacznie oddalonych od źródła polaryzacji katodowej. Koniecznym stała się zmiana trybu pracy SOK na galwanostatyczny, tj. przy stałym prądzie polaryzacji katodowej. Przy tym trybie pracy na prąd ochrony katodowej nakłada się prąd błędny powodując w jednych miejscach nadmierną polaryzację, a w miejscach wypływu prądu błędnego, osłabienie potencjału.

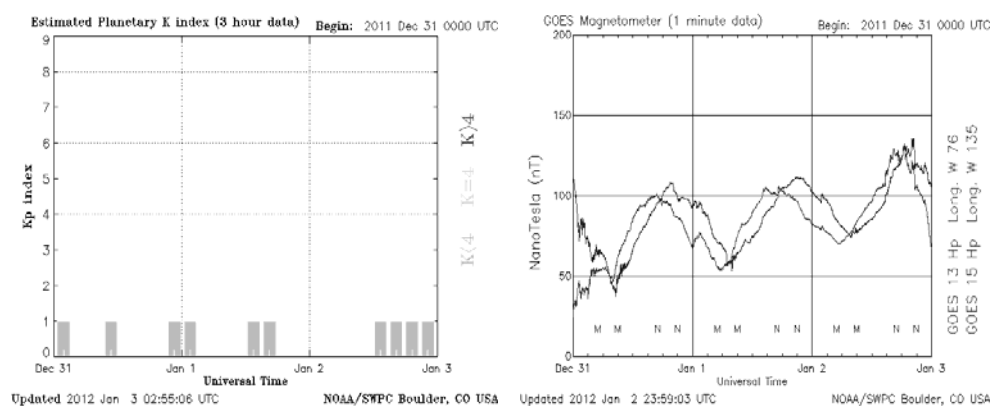
Na początku eksploatacji gazociągu zostały wykonane pomiary dla ogólnej oceny ochrony przeciwkorozyjnej. Ocena ta polegała na analizie potencjału wyłączeniowego zarejestrowanego w punktach pomiarowych na trasie gazociągu oraz analizie korelacji potencjału gazociągu i napięcia gazociąg – szyny na skrzyżowaniu z torami. Wartości potencjału wyłączeniowego były uśredniane w różnych okresach czasu: godzinnym, kilkugodzinnym i całodobowym w zależności od intensywności wahań. Korelacje na skrzyżowaniu z torami nie dawały jednoznacznych wyników potwierdzających zagrożenie oddziaływaniem prądów błędnych. Pomiary spadku napięcia w gazociągu wykonane w punktach prądowych po obydwu stronach torów wykluczały możliwość wpływu i wypływu prądów błędnych w odległości kilku kilometrów od torowiska.

Pomiary oddziaływań prądów błędnych na gazociągu przyczyniły się do ujawnienia innego źródła zakłóceń potencjału, a mianowicie wpływu i wypływu prądów tellurycznych z gazociągu. Oddziaływania te można obserwować dzięki zdalnemu monitoringowi, który w sposób ciągły rejestruje wartości potencjału gazociągu na zespołach zaporowo – upustowych. Prądy telluryczne są widoczne nawet podczas bardzo słabej aktywności słońca. Na rys. 2 pokazano zarejestrowane w dniu 01.01.2012 wartości potencjału przy monoblokach na wschodnim i zachodnim końcu gazociągu oraz na środku gazociągu. W tym dniu indeks zaburzenia pola geomagnetycznego K wahał się od 0 do 1 (rys. 3). Ponieważ na gazociąg oddziałują również prądy błędne pochodzenia trakcyjnego, trudno oddzielić od siebie te zakłócenia i niezależnie ocenić skutki ich działania. Na wykresie widać wahania potencjału w przedziale od $-0,85 \text{V}$ do -3V (wzgl. Cu/CuSO_4). Przy małej aktywności prądów tellurycznych wartości potencjału na końcach gazociągu (E_{zach} i E_{wsch}) pozostają między sobą w fazie,

a zmiany potencjału w części środkowej gazociągu (E_{sr}), pozostają w przeciwfazie do pozostałych zarejestrowanych wielkości.

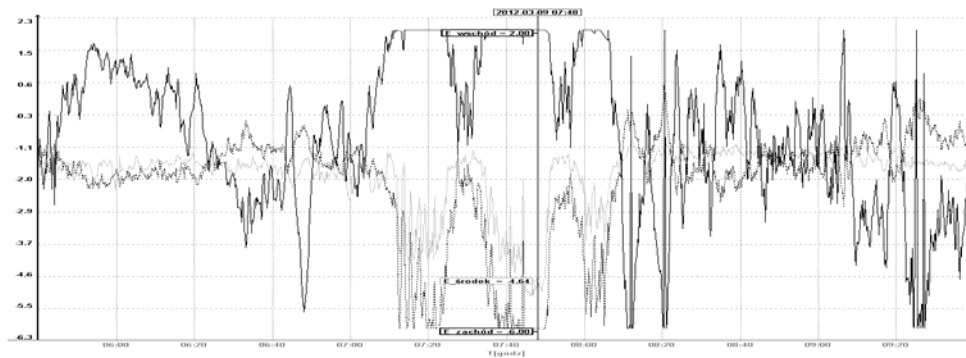


Rys. 2. Wykres potencjału gazociągu E_{zach} , E_{wsch} i E_{sr} w czasie niewielkich oddziaływań prądów tellurycznych w dniu 01.01.2012

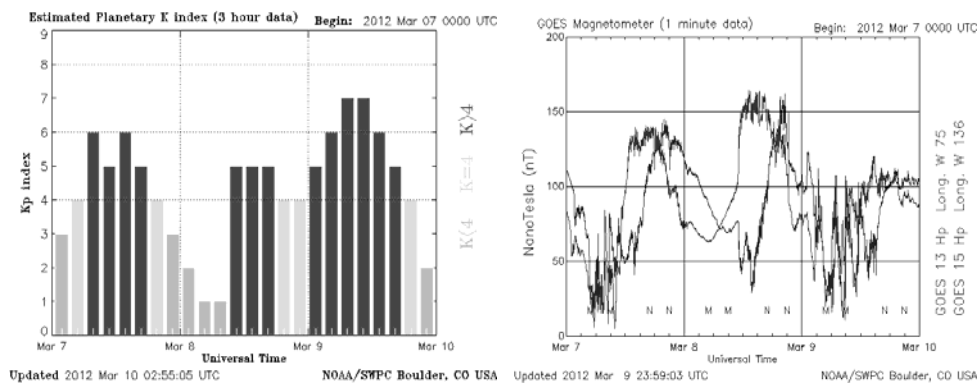


Rys. 3. Indeks K oraz wartość natężenia pola magnetycznego (nT) w czasie niewielkich oddziaływań prądów tellurycznych w dniach 31.12.2011- 02.01.2012 – publikacja NOAA

Intensywność zmian potencjału gazociągu zdecydowanie zmienia się podczas większej aktywności słonecznej. Rys. 4 przedstawia przebieg potencjału gazociągu zarejestrowanego podczas burzy magnetycznej, która miała miejsce w dniu 09.03.2012, kiedy indeks zaburzenia pola geomagnetycznego K osiągnął wartość $K=7$ (rys. 5). Analogicznie jak w poprzednim przypadku na wykresie pokazano rejestracje potencjałów w trzech miejscach: na wschodzie, na zachodzie i w środkowej części gazociągu. Na wykresie widać wahania potencjału w przedziale od $+2V$ do $-6V$ (wzgl. $Cu/CuSO_4$), zgodnie z zakresem pomiarowym zastosowanych przetworników. Rzeczywiste wartości potencjałów mogą być wyższe lub niższe od zarejestrowanych przez system monitoringu. Wartości potencjału na końcach gazociągu (E_{zach} i E_{wsch}) tym razem pozostają w przeciwfazie.



Rys. 4. Wykres potencjału gazociągu E_{zach} , E_{wsch} i E_{sr} w czasie silnych oddziaływań prądów tellurycznych w dniu 09.03.2012

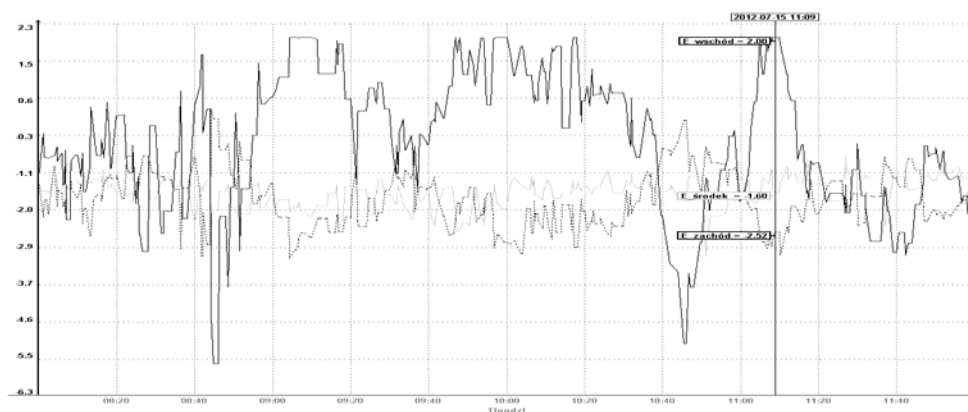


Rys. 5. Indeks K oraz wartość natężenia pola magnetycznego (nT) w czasie burzy magnetycznej w dniach 07.03.2012 - 09.03.2012 – publikacja NOAA

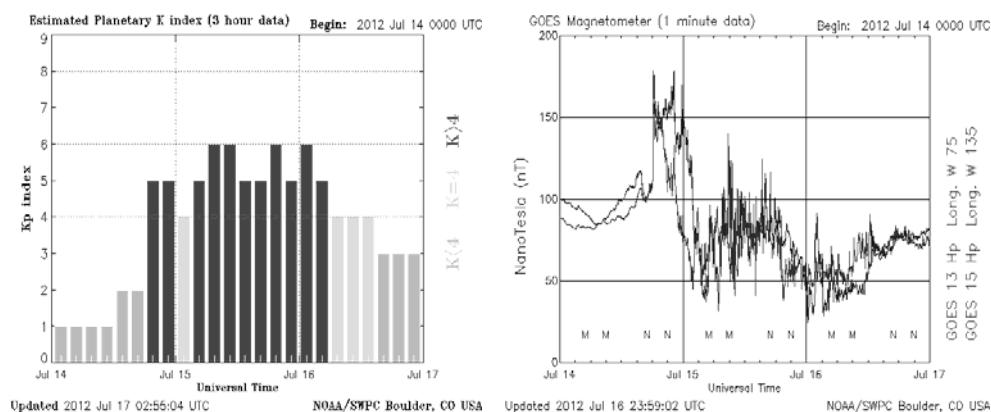
Na podstawie przytoczonych rejestracji potencjału, podczas oddziaływań tellurycznych można zaobserwować zjawisko odwrotnej biegunowości potencjału na przeciwległych końcach gazociągu. Jeżeli na jednym końcu gazociągu potencjał zmienia wartość w kierunku bardziej dodatnim w stosunku do potencjału wywołanego polaryzacją katodową (wypływ prądu), to na drugim końcu potencjał przyjmuje wartości bardziej ujemne (wpływ prądu) i odwrotnie. Duże zmiany wartości potencjału gazociągu, w dłuższej perspektywie czasu, mogą mieć negatywny wpływ na gazociąg. Trudno jednak na chwilę obecną postawić jednoznaczną diagnozę skutków oddziaływań tellurycznych. Rejestracja potencjału poprzez system zdalnego monitoringu daje tylko możliwość obserwowania skali problemu. System zdalnego monitoringu rejestruje wartości potencjału gazociągu w ściśle określonych miejscach, nie rejestruje natomiast spadków napięć w gazociągu, które są podstawą do obliczenia rzeczywistych wielkości płynącego prądu.

Prądy błądzące, zarówno te pochodzące z trakcji elektrycznej prądu stałego jak również prądy telluryczne, zakłócają pomiary potencjału wyłączeniowego gazociągu. W celu umożliwienia oceny skuteczności ochrony katodowej, w wielu punktach pomiarowych na trasie gazociągu zainstalowano czujniki korozymetryczne oraz elektrody symulujące. Czujniki korozyme-

tryczne umożliwiają bezpośrednią ocenę szybkości korozji w warunkach rzeczywistych działania ochrony katodowej, zakłóceń tellurycznych i oddziaływań prądów błędzących. Dotychczasowe wyniki szybkości korozji są poniżej dopuszczalnego kryterium 0,01 mm/rok. Niepokojące mogą być skutki bardzo ujemnych potencjałów, jakie zarejestrowano podczas oddziaływań tellurycznych, gdyż taka sytuacja może prowadzić do odspojenia powłoki gazociągu. Jak dotychczas nie odnotowano na gazociągu żadnych uszkodzeń korozyjnych, a cały gazociąg został niedawno zbadany przy pomocy inteligentnego tłoka magnetycznego.



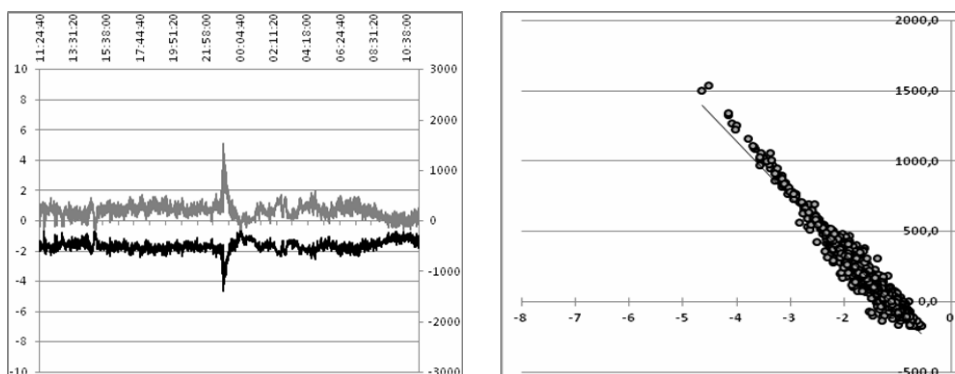
Rys. 6. Wykres potencjału gazociągu E_{zach} , E_{wsch} i E_{sr} w czasie silnych oddziaływań prądów tellurycznych w dniu 15.07.2012



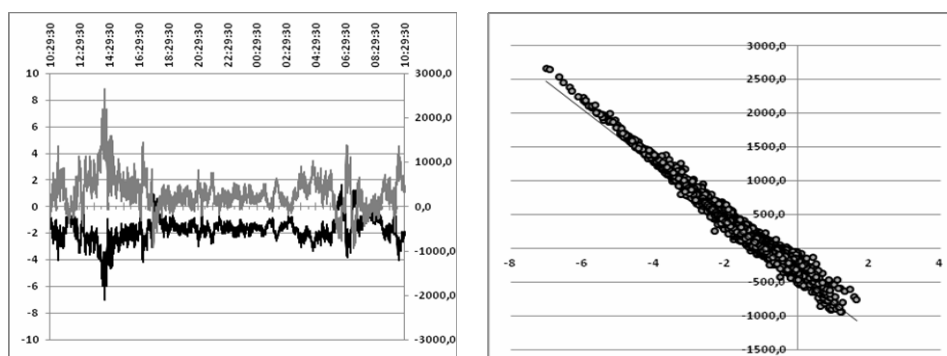
Rys. 7. Indeks K oraz wartość natężenia pola magnetycznego (nT) w czasie burzy magnetycznej w dniach 14.07.2012 - 16.07.2012 – publikacja NOAA

Na rys. 8 i 9 przedstawiono wykresy 24 godzinnych rejestracji potencjału stalowej płytki czujnika korozymetrycznego E_p [V] (linia koloru czarnego) oraz prądu płynącego w obwodzie płytka czujnika – gazociąg I_p [μ A] (linia koloru szarego). Obok wykresów zamieszczono korelacje wartości E_p i I_p . Rys. 8 dotyczy rejestracji wykonanej 3 kwietnia 2012 r. podczas słabej aktywności słońca. Rys. 9 dotyczy rejestracji wykonanej 16.04.2012, przy średniej aktywności słońca ($K=4$). Poprzedniego dnia miała miejsce burza magnetyczna o indeksie $K=6$.

Porównując ze sobą obydwie zamieszczone korelacje widać nie tylko większe wahania wartości potencjału i prądu czujnika korozymetrycznego podczas oddziaływania prądów tellurycznych, ale również większą upływność prądu z powierzchni czujnika. Na podstawie uzyskanych rejestracji oszacowano wielkość procentowego wypływu prądu z płytki czujnika. Upływność ta wzrosła z 5,5% do 15%.



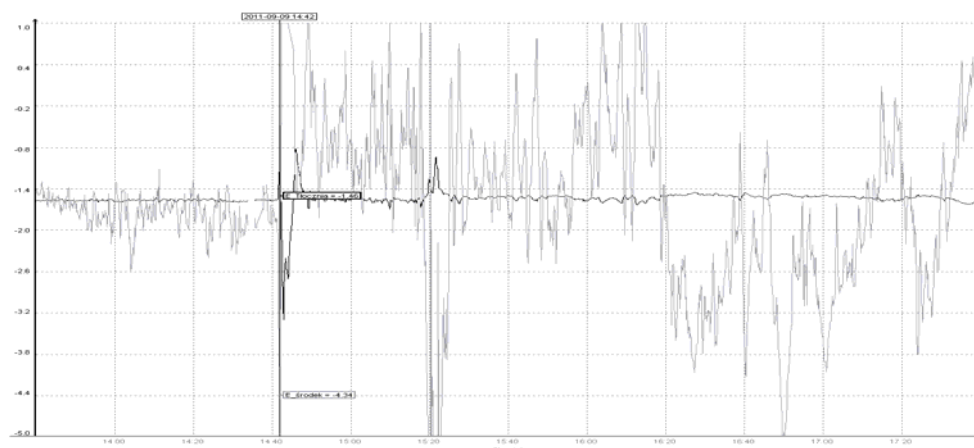
Rys. 8. Wykres potencjału E_p [V] i I_p [μ A] oraz korelacja tych wartości w punkcie oddalonym o 10 km od monobloku wschodniego; rejestracja podczas słabych oddziaływań prądów tellurycznych w dniu 03.04.2012 (indeks K = 1)



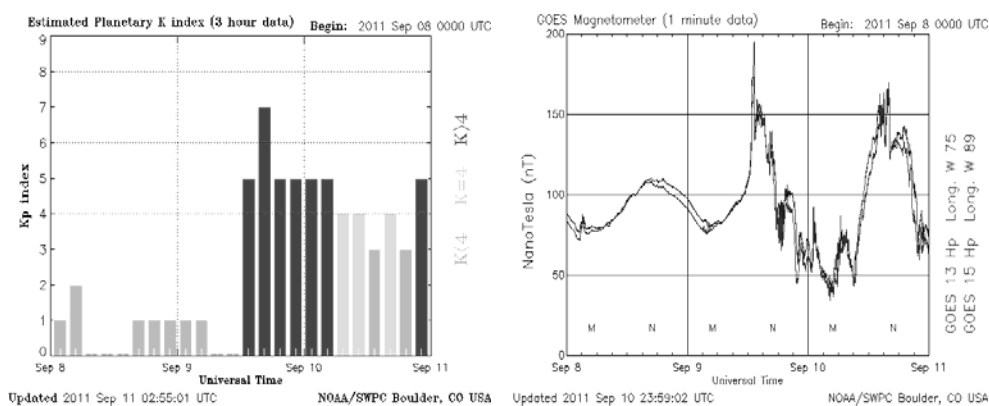
Rys. 9. Wykres potencjału E_p i I_p [μ A] oraz korelacja tych wartości w punkcie oddalonym o 10 km od końca monobloku wschodniego; rejestracja podczas średnich oddziaływań prądów tellurycznych w dniu 06.07.2012 (indeks K = 4)

Poza zakłóceniami potencjału prądy telluryczne przyczyniły się do uszkodzenia iskiernika zainstalowanego przy monobloku na wschodnim końcu gazociągu. Monoblok ten oddziela elektrycznie część liniową od uziemionej tłoczni gazu. Zarówno gazociąg i orurowanie tłoczni posiadają niezależną ochronę katodową, co jest podyktowane różnym zapotrzebowaniem prądowym tych obiektów. Uszkodzenie iskiernika miało miejsce 9 września 2011 r. Magnetometry zarejestrowały w tym czasie nagły wzrost natężenia pola magnetycznego, które osiągnęło wartość bliską 200 nT (rys. 11). Prąd, który popłynął przez uszkodzony iskiernik spowodował nagłą zmianę potencjału gazociągu po obydwu stronach monobloku. Zmienił się również rozptyw prądu na części liniowej gazociągu, co w konsekwencji przyczyniło się do

gwałtownej zmiany napięcia SOK oddalonego o 130 km, pracującego w trybie galwanostatu. Na wykresie (rys. 10) przedstawiono rejestrację potencjału po obydwu stronach monobloku. Zdarzenie miało miejsce około godz. 14.50.

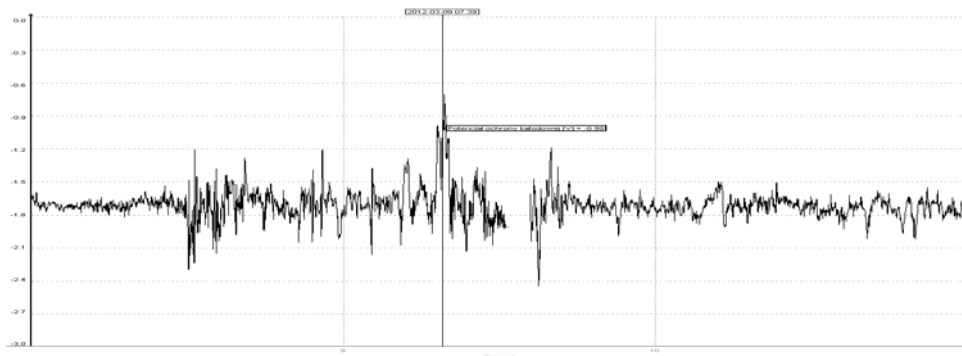


Rys. 10. Wykres potencjału gazociągu E_{wsch} i $E_{tlocznia}$ w czasie silnych oddziaływań prądów tellurycznych w dniu 09.09.2011, które spowodowały uszkodzenie iskiernika zainstalowanego na monobloku wschodnim



Rys. 11. Indeks K oraz wartość natężenia pola magnetycznego (nT) w czasie burzy magnetycznej w dniach 08.09.2011 - 10.09.2011 – publikacja NOAA

Oddziaływania prądów tellurycznych dotyczą nie tylko gazociągów w bardzo dobrej izolacji. Zaobserwowano je również na gazociągu w izolacji bitumicznej, której rezystancja przejścia wynosi około $9 \times 10^3 \Omega m^2$. Opisywany gazociąg o średnicy DN700 i długości około 147 km ma również przebieg równoleżnikowy i jest odseparowany elektrycznie od uziemionych tłoczni gazu. Wahania potencjału zostały zarejestrowane w punkcie drenazu stacji ochrony katodowej, usytuowanej około 3km od monobloku wschodniego. SOK na tym gazociągu pracują w trybie galwanostatu. Prąd telluryczny nakłada się na prąd polaryzacji katodowej wywołując zakłócenia potencjału w granicach -0,8 V do -2,4 V (rys. 12).



Rys. 12. Rejestracja potencjału gazociągu w izolacji bitumicznej poprzez system monitoringu SOK, podczas dużych oddziaływań prądów tellurycznych w dniu 09.03.2012

7. Podsumowanie

Z punktu widzenia operatorów rurociągów przesyłowych ważne jest poznanie mechanizmów towarzyszących przepływowi prądów tellurycznych oraz ustalenie wpływu aktywności tellurycznej na prędkość korozji rurociągu. Można to osiągnąć porównując ze sobą wartości potencjałów i prądów oraz szybkości korozji, zarejestrowane za pomocą czujników korozymetrycznych. Pomiaru te należy wykonywać zarówno przy małej jak i przy dużej aktywności magnetycznej słońca. Silne burze magnetyczne trwają na tyle krótko, że mogą nie mieć znaczącego wpływu na szybkość korozji. Poważne znaczenie może mieć długotrwała aktywność telluryczna przy indeksie $K \leq 5$. Przy tego typu pomiarach bardzo przydatny jest zdalny monitoring z punktów pomiarowych na gazociągu.

Prądy telluryczne, podobnie jak prądy pochodzenia trakcyjnego, mogą utrudniać wykonanie pomiarów dla oceny ochrony katodowej rurociągu. Nie jest wykluczone, że dotychczas mierzone w trakcie aktywności tellurycznej parametry, zwłaszcza przy niskich indeksach K , mogły być czasem nieświadomie przypisane trakcyjnym prądom błądzącym. Przed przystąpieniem do pomiarów, zwłaszcza do długotrwałych pomiarów intensywnych, należałoby zapoznać się z prognozą aktywności słońca. Przy dużych zakłóceniach wyniki pomiarów mogą nie być wiarygodne.

Przeciwdziałanie prądom tellurycznym jest bardzo trudne. Praca SOK w trybie potencjostatycznym nie zawsze przynosi oczekiwane rezultaty. Na etapie projektowania rurociągów przesyłowych o dużych średnicach powinno się uwzględnić możliwość oddziaływań tellurycznych i sekcjonować rurociągi za pomocą monobloków. Im dłuższy odcinek rurociągu i lepsza izolacja, tym większa podatność rurociągu na zakłócenia prądami tellurycznymi.

Literatura

- [1] Boteler D.H., Trichtchenko L., Gummow R.A., *Telluric and Ocean Current Effects on Buried Pipelines and Their Cathodic Protection Systems*, studium badawcze na zlecenie Pipeline Research Council International, listopad 2002.
- [2] Klimpel A., Lipko K., *Czy burze magnetyczne są groźne dla krajowej energetyki*, „Elektroenergetyka” 2011, nr 3(9).
- [3] Ferris T., *Sun struck*, National Geographic, czerwiec 2012.
- [4] <http://www.sec.noaa.gov/>.