



mgr inż.  
Maciej Zarzycki,  
PSE SA



mgr inż.  
Jacek Barański,  
Laboratorium  
Automatyki  
i Zabezpieczeń,  
Instytut Energetyki

## Prądy indukowane geomagnetycznie – realne zagrożenie dla systemów elektroenergetycznych czy naukowa ciekawostka?

### Streszczenie

Zjawisko prądów indukowanych geomagnetycznie (tzw. prądy GIC) powodowanych przez burze słoneczne dało o sobie znać już w XIX w., wywołując efekty, których na ówczesny stan wiedzy nie dało się wytłumaczyć. Aktualnie doskonale wiemy, co powoduje powstawanie prądów GIC, jednak nie jesteśmy w stanie dokładnie przewidzieć skali zagrożenia, z jakim przyjdzie się mierzyć urządzeniom wrażliwym na ich oddziaływanie. Burze słoneczne mogą być zagrożeniem dla systemów elektroenergetycznych, co opisano na przykładzie blackoutu w Quebecu i Malmö. W KSE zainstalowane są rejestratory mierzące przepływ prądów GIC na kilku transformatorach sieciowych. Pokazano przykładowe rejestracje zmierzone w trakcie trwania groźnej burzy słonecznej, a we wnioskach końcowych sformułowano rekomendacje mające na celu zminimalizowanie szkodliwego wpływu prądu GIC na urządzenia w systemie elektroenergetycznym.

### Wprowadzenie

Największą elektrownią w naszym układzie planetarnym jest Słońce. Ta gigantyczna kula plazmy, wewnątrz której zachodzą reakcje syntezy termonuklearnej, w ciągu zaledwie sekundy traci ok. 4,2 mln ton swojej masy na produkcję energii, której transport odbywa się za pośrednictwem fotonów poprzez promieniowanie. Moc promieniowania Słońca jest tak duża, że jakby jego całość dotarła do Ziemi, to w półtorej sekundy zagotowałyby się każda cząsteczka wody na naszej planecie [1]. Do Ziemi dociera jednak ułamek tej mocy, dodatkowo odbijany w kosmos przez górne warstwy atmosfery i przez nią pochłaniany. W ziemskiej energetyce energia ze Słońca może być wykorzystywana do konwersji fototermicznej i fotochemicznej, do termolizy wody, a w przypadku wież solarnych lub paneli fotowoltaicznych – bezpośrednio do produkcji energii elektrycznej. Słońce, mimo wszelkich dobrodziejstw, jakie jego istnienie przynosi dla życia na Ziemi, stanowi również zagrożenie dla funkcjonowania nowoczesnych społeczeństw korzystających z osiągnięć współczesnej cywilizacji, takich jak energia elektryczna, systemy GPS, telewizja satelitarna, telekomunikacja bez-

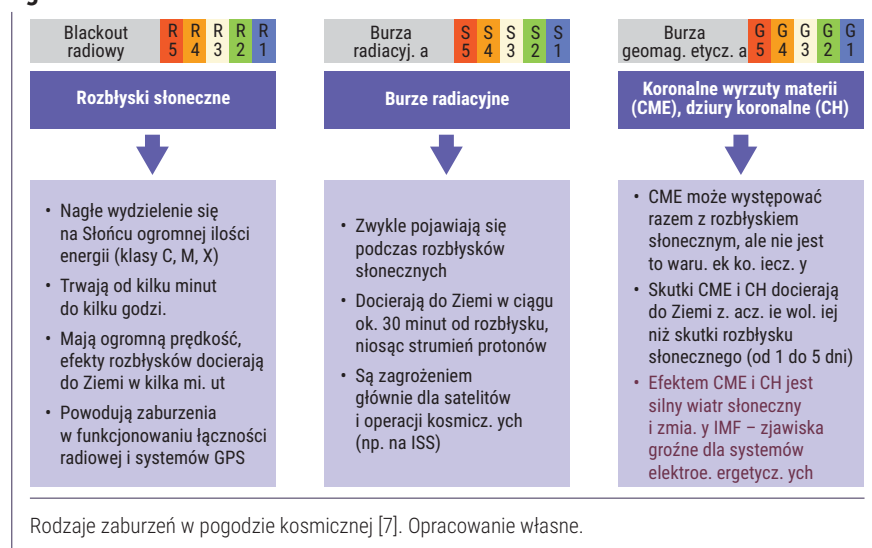
przewodowa. W ustawie [2] infrastrukturę krytyczną opisuje się jako „systemy oraz wchodzące w ich skład powiązane ze sobą funkcjonalnie obiekty, w tym obiekty budowlane, urządzenia, instalacje, usługi kluczowe dla bezpieczeństwa państwa i jego obywateli oraz służące zapewnieniu sprawnego funkcjonowania organów administracji publicznej, a także instytucji i przedsiębiorców”. Jeden z systemów infrastruktury krytycznej opisanej wyżej polega na zaopatrzeniu w energię, surowce energetyczne i paliwa. Skutki zjawisk zachodzących na Słońcu mogą mieć szkodliwy wpływ na działanie infrastruktury krytycznej w postaci prądów indukowanych geomagnetycznie pojawiających się w sieciach elektroenergetycznych.

### 1. Pogoda kosmiczna i związane z nią zagrożenia dla infrastruktury krytycznej

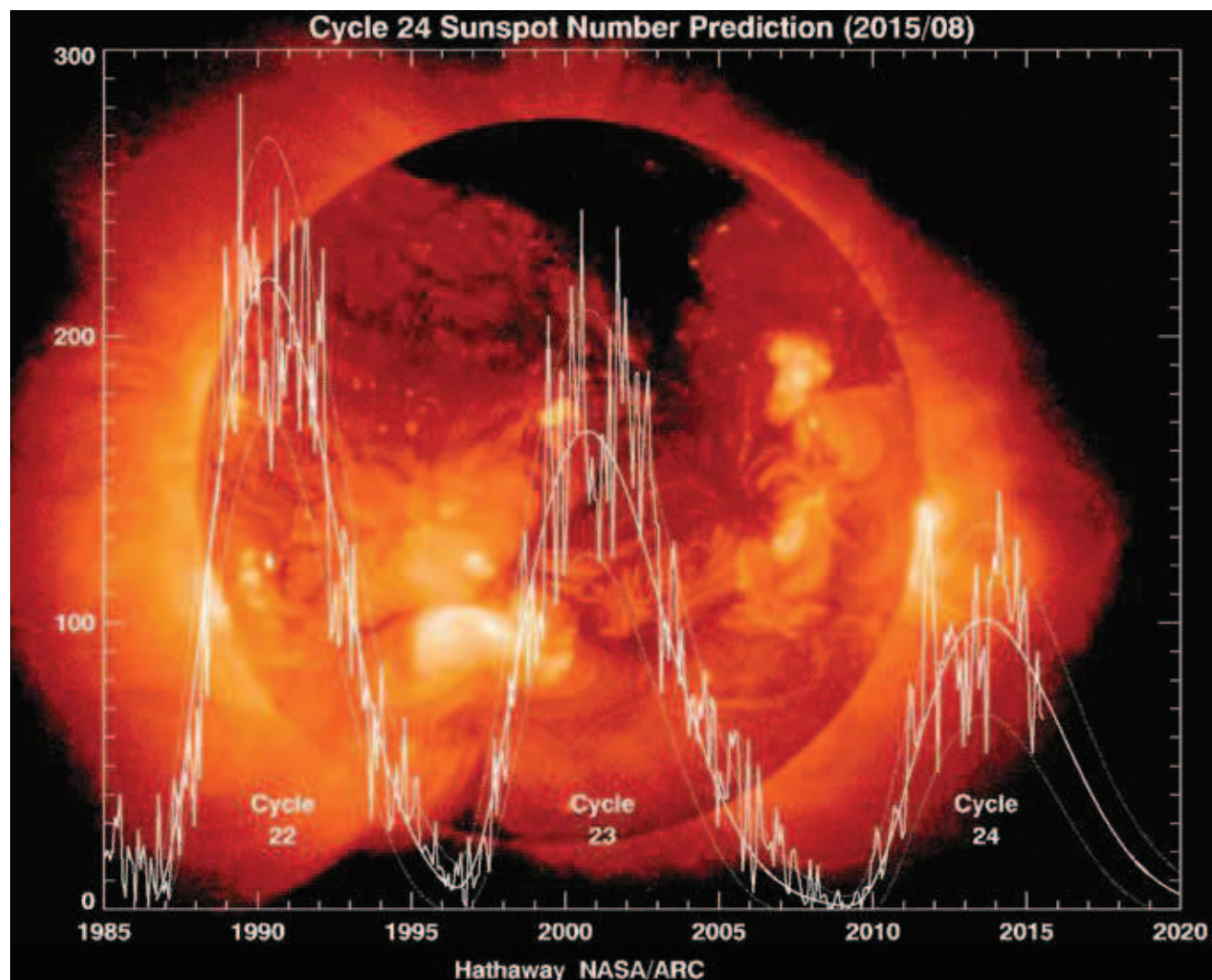
Skutki oddziaływań pogody kosmicznej i związanego z nimi zjawiska prądów indukowanych geomagnetycznie (tzw. prądy GIC – Geomagnetically Induced Currents) dały o sobie znać już u zębów nowoczesnego społeczeństwa korzystającego z szybkiej komunikacji i rozwijającego ją na dalekie odległości. Telegraf elektryczny Morse’a wynaleziony w 1844 r. był

bardzo prostym urządzeniem i właśnie ta prostota była kluczem do jego sukcesu. Nadajnik i odbiornik były połączone tylko za pomocą jednego przewodu. Transmisja była bardzo szybka i niezawodna, a przesył komunikatu odbywał się za pomocą słynnego alfabetu nazwanego nazwiskiem odkrywcy tego sposobu przesyłania wiadomości. Rozwijające się wówczas Stany Zjednoczone bardzo szybko wykorzystwały drzemiący w tym wynalazku potencjał i do końca XIX w. istniało tam już prawie pół miliona kilometrów sieci telegraficznej. Jednak nikt nie spodziewał się, że wydarzenia mające miejsce ok. 150 mln kilometrów od Ziemi mogą mieć wpływ na działanie tego nowego sposobu komunikacji na odległość. Skutek wydarzeń na Słońcu i ich wpływ na funkcjonowanie przesyłu

Rysunek 1



Rysunek 2



Cykl aktywności słonecznej [9].



→ danych za pomocą telegrafu został zaobserwowany już we wrześniu 1859 r., gdy efekt potężnego rozbłysku słonecznego dotarł do powierzchni Ziemi, powodując rozległe awarie w funkcjonowaniu transmisji telegraficznej. Odnotowywano również przypadki samozapłonu linii oraz sytuacje, w których mimo wyłączenia baterii zasilających linie transmisyjne, można było nadal przesyłać komunikaty [3]. Zdarzenia te były spowodowane zaindukowaniem się prądów GIC. W tym czasie również pojawiły się zorze polarne, które były widoczne nawet na 20. stopniu szerokości geograficznej w Afryce Północnej czy Ameryce Środkowej. Ogół tych zdarzeń został nazwany efektem Carringtona – od nazwiska angielskiego astronoma, który zaobserwował dużą grupę plam słonecznych, będąc jednocześnie świadkiem rozbłysku słonecznego. Skutki tego rozbłysku dotarły do Ziemi po ok. 17,5 godziny, powodując przypadki opisane powyżej [4]. Było to pierwsze odczuwalne zdarzenie i zetknięcie się z pogodą kosmiczną, która wpłynęła na życie ludzi – szczęśliwie dopiero na początku drugiej rewolucji przemysłowej, podczas której elektryczność nie była tak bardzo rozpowszechniona.

Na przestrzeni kolejnego stulecia Słońce również dawało o sobie znać. W kablu atlantyckim łączącym Szkocję z Nową Fundlandią podczas burzy magnetycznej w marcu 1940 r. odnotowano napięcie sięgające 2,6 kV. Burza ta spowodowała przerwy w dostawie energii elektrycznej w Nowej Anglii, Nowym Jorku, Pensylwanii, Minnesocie. Blackout w Kanadzie 13 marca 1989 r. spowodowany był bardzo groźną burzą słoneczną. 6 milionów osób było przez 9 godzin pozbawionych energii elektrycznej. Tego samego roku w czerwcu doszło do katastrofy kolejowej w wyniku eksplozji rurociągu gazowego. Zniszczeniu uległa część transsyberyjskiej sieci kolejowej, spłonęły dwa pociągi pasażerskie, śmierć poniosło ok. 500 osób [5]. Podejrzuje się, że do tragedii przyczyniły się uszkodzenia rurociągu spowodowane przez burze geomagnetyczne. 30 października 2003 r. prądy GIC spowodowały blackout w Malmö w Szwecji, 50 tysięcy ludzi było przez ok. 50 minut pozbawionych energii elektrycznej. Zagrożenie jest realne, ale aż do dzisiaj nie zarejestrowano równie potężnego zjawiska jak efekt Carringtona, dwa pomniejsze opisano bardziej szczegółowo w dalszej części artykułu. Z raportu [6] można się dowiedzieć, jakie skutki na terenie USA miałyby efekt Carringtona, gdyby wystąpił w dzisiejszych czasach. Doszłoby do kaskadowych wyłączeń linii przesyłowych, uszkodzeń wielkiej liczby transformatorów blokowych i sieciowych, zapanowałby chaos komunikacyjny ze względu na braki sygnału od satelit telekomunikacyjnych, GPS, przestałaby działać bankowość i finanse. Utrudniony, wręcz niemożliwy byłby transport lotniczy. Raport podaje, że straty w samych tylko Stanach Zjednoczonych osiągnęłyby wielkość prawie 2 bilionów dolarów, a odbudowa systemu elektroenergetycznego trwałaby kilka-kilkanaście miesięcy. Wszystko to przez jedno wydarzenie na najbliższej nam gwiazdzie będącej głównym kreatorem pogody kosmicznej w naszym układzie planetarnym.

### 1.1. Opis pogody kosmicznej i burz geomagnetycznych

Pogoda kosmiczna to ogół zjawisk zachodzących w przestrzeni kosmicznej mogących mieć wpływ na naszą planetę. Słońce nieustannie wpływa na życie na Ziemi, a niektóre ze zjawisk zachodzących na nim mogą jednak być groźne i niebezpieczne bezpośrednio dla ludzi, jak i dla nowoczesnych systemów przesyłowych energii elektrycznej, gazu czy informacji. Wyróżnia się trzy główne składowe pogody kosmicznej, opisane na **rys. 1**. Każde z tych zaburzeń jest groźne dla infrastruktury krytycznej. Z kolei burze geomagnetyczne mogą powodować uszkodzenia długich ciągów przesyłowych zbudowanych z materiału przewodzącego, uziemionego na obu końcach.

Słońce charakteryzuje się 11-letnim cyklem aktywności (**rys. 2**), podczas którego zmienia się liczba plam słonecznych na jego powierzchni. Nie sposób jednak przewidzieć, kiedy będą miały miejsce zjawiska opisane na **rys. 1** – może to mieć miejsce w minimum, jak i w maksimum aktywności Słońca. Każdy rodzaj zaburzenia ma swoją skalę zagrożenia, ustaloną przez NASA/NOAA. Np. burze geomagnetyczne mają skalę od G1 do G5, gdzie G1 to mała burza słoneczna, a G5 – bardzo groźna. Najbardziej niebezpiecznym zjawiskiem bezpośrednio

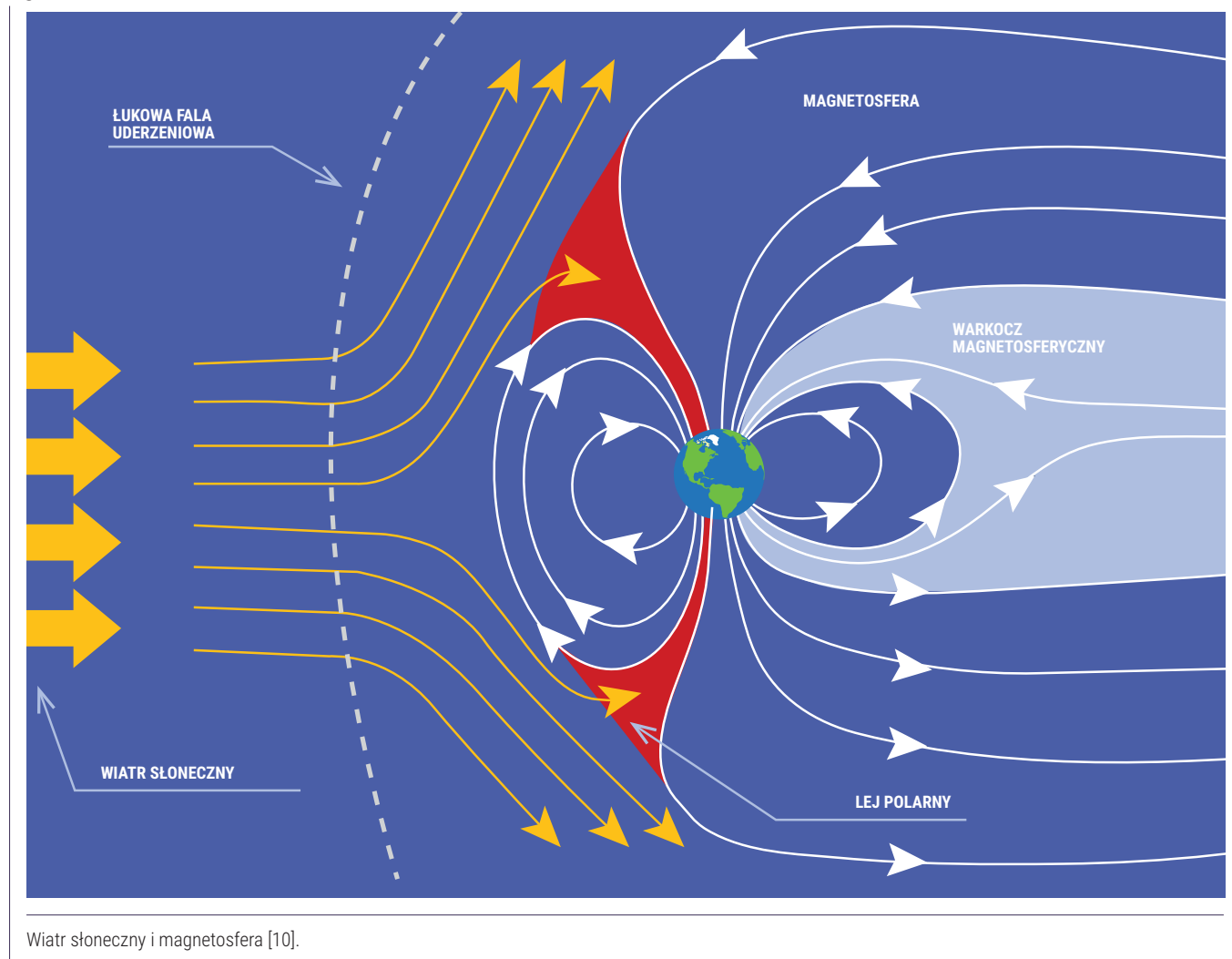
dla człowieka przebywającego w przestrzeni kosmicznej jest burza radiacyjna, gdyż wysokoenergetyczne cząstki emitują zabójcze dla organizmów żywych promieniowanie jonizujące. Tych efektów udało się nieświadomie uniknąć podczas misji Apollo 16 i 17. W przerwie między tymi misjami, 2 sierpnia 1972 r., miała miejsce potężna i długotrwała erupcja na Słońcu, która spowodowała ponadtygodniową, bardzo groźną burzę radiacyjną [8]. Gdyby astronauta znaleźli się w tym czasie w przestrzeni kosmicznej w strumieniu tych cząstek, umarliby w męczarniach po kilkunastu godzinach. Dlatego też ludzkość, planując eksplorację kosmosu lotami na Księżyc czy na Marsa, musi uwzględniać możliwość wystąpienia śmiertelnego zagrożenia ze strony Słońca nawet kilka razy do roku. Burze geomagnetyczne to zaburzenia ziemskiego pola magnetycznego wywołanego wiatrem słonecznym. Ziemskie pole magnetyczne, zwane magnetosferą, chroni naszą planetę przed wiatrem słonecznym i oddziaływaniem międzyplanetarnego pola magnetycznego (IMF – Interplanetary Magnetic Field). Wiatr słoneczny to strumień elektrycznie naładowanych cząstek wypływających w sposób ciągły z korony słonecznej. IMF natomiast jest to pole magnetyczne Słońca, niesione poprzez wiatr słoneczny w przestrzeń kosmiczną (**rys. 3**).

Nie zawsze jednak magnetosfera jest na tyle silna, by mogła w zupełności chronić Ziemię przed wiatrem słonecznym. Niekiedy na Słońcu dochodzi do potężnych eksplozji, jak koronalne wyrzuty materii (CME – Coronal Mass Ejection), które wyrzucają z wielką prędkością ogromne fragmenty korony słonecznej w przestrzeń kosmiczną. W momencie, gdy pola magnetyczne magnetosfery i IMF są przeciwnie skierowane, może nastąpić zjawisko rekoneksji w głównej części magnetosfery [11]. W takim wypadku oba pola magnetyczne przenikają się i w zależności m.in. od prędkości wiatru słonecznego – wywoływane są burze geomagnetyczne, których efekty, głównie na wysokich szerokościach geograficznych, można obserwować w postaci zórz polarnych. Burze geomagnetyczne wywołują również przepływ prądów GIC.

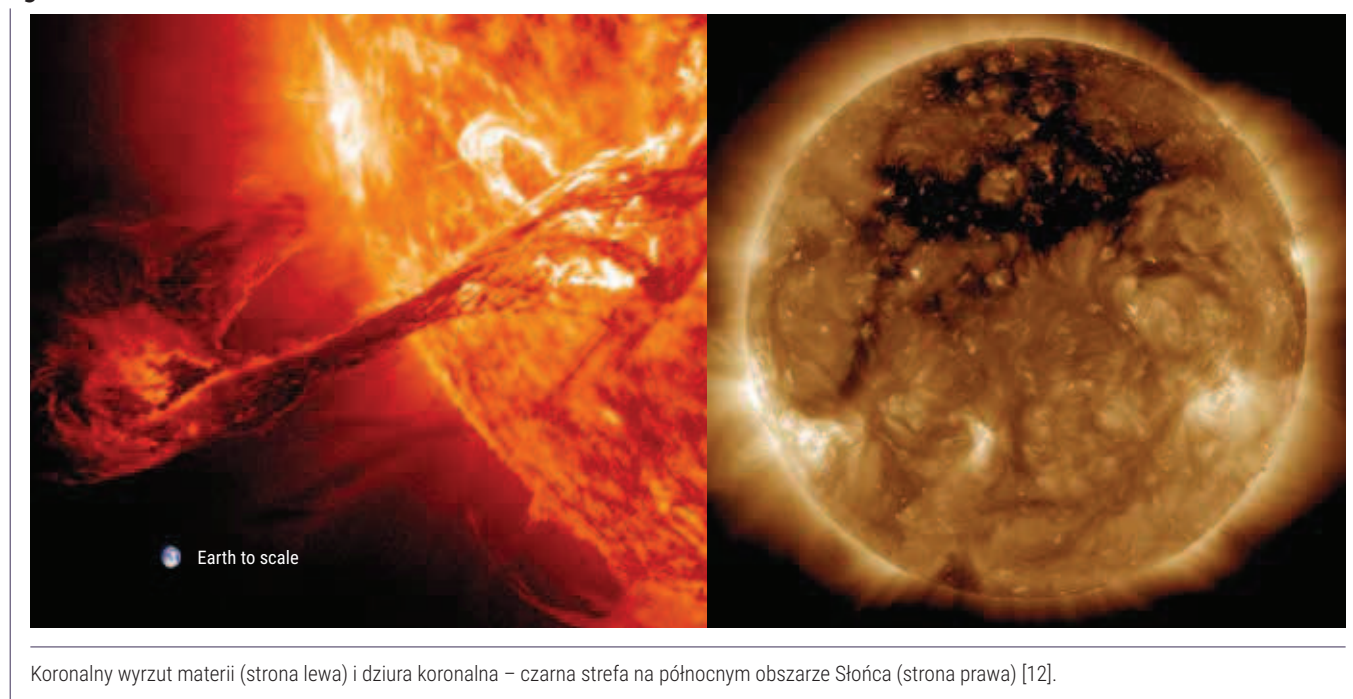
### 1.2. Zdarzenia i zjawiska na Słońcu powodujące powstawanie prądów GIC

Według naukowców głównymi źródłami zaburzeń geomagnetycznych na Ziemi są koronalne wyrzuty materii i dziury koronalne (**rys. 4**).

Rysunek 3



Rysunek 4

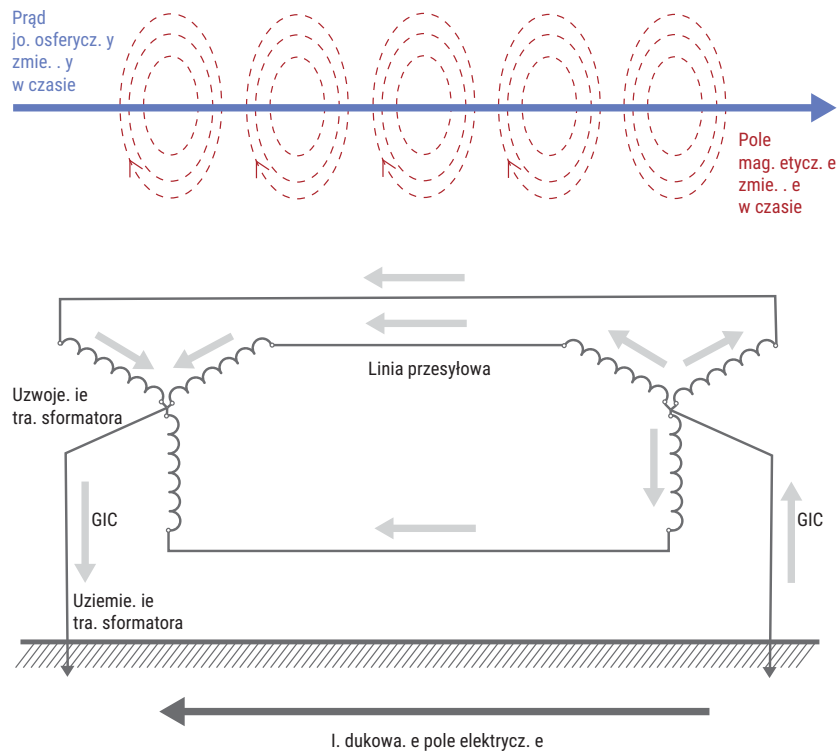


→ Rysunek 5



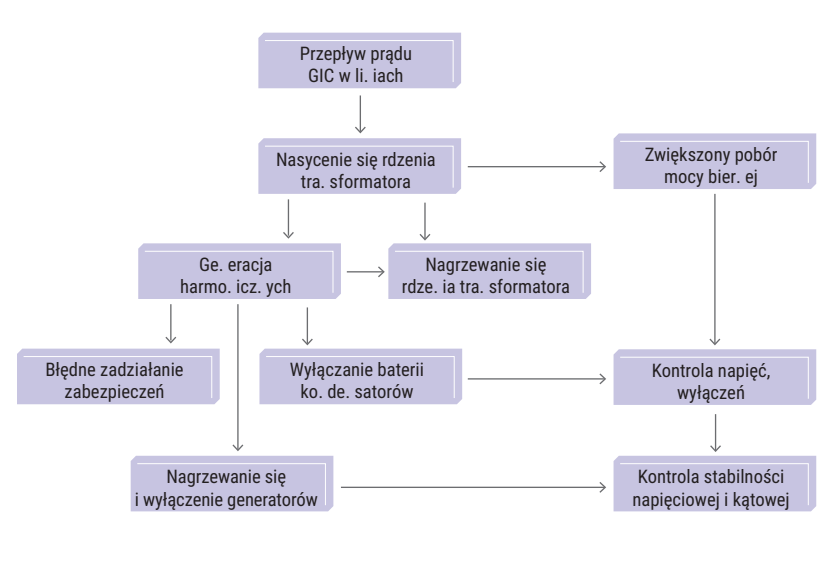
Interakcje między zjawiskami na Słońcu a Ziemią. Źródło [14].

Rysunek 6



Schemat indukowania się prądów GIC w systemach elektroenergetycznych [15].

Rysunek 7



Efekty prądów GIC w systemach elektroenergetycznych [14]. Opracowanie własne.

CME zawierają ogromne ilości naładowanych cząstek, którym przebycie odległości od korony słonecznej do Ziemi zajmuje pomiędzy 14 a 96 godzin. W trakcie tego zjawiska część korony słonecznej odrywa się od Słońca i jest wyrzucana w przestrzeń kosmiczną. Natomiast dziury koronalne (CH – Coronal Holes) są to otwarte przestrzenie pola magnetycznego Słońca, z których wiatr słoneczny złożony z tych cząstek „ucieka” w przestrzeń kosmiczną. Cząstki te zawierają m.in. elektrony oraz jony, które w zderzeniu z ziemską jonosferą są zdolne do produkowania prądów jonosferycznych [13]. Prądy te mogą osiągać wartość nawet kilku milionów amperów, zaburzają one magnetosferę w czasie. Zmiany te w połączeniu z występującą na obszarze Ziemi zróżnicowaną rezystywnością gruntu (np. tereny skaliste mają większą rezystywność w porównaniu np. do terenów podmokłych), powodują zaindukowanie się potencjału przy powierzchni ziemi (ESP – Earth Surface Potential, mierzone w V/km). Wyższy potencjał będzie na terenach skalistych, a niższy – na terenach podmokłych. Potencjał ten, łącząc za pomocą długich ciągów przesyłowych uzziemionych po obu końcach, spowoduje przepływ prądu o charakterze stałoprądowym (o bardzo niskiej częstotliwości). Prąd ten zwany jest właśnie prądem indukowanym geomagnetycznie. Zjawisko to może wystąpić w systemach elektroenergetycznych (liniach przesyłowych, transformatorach), gazociągach, kablach, liniach kolejowych. **Rys. 5** obrazuje proces powstawania prądów GIC.

### 1.3. Wpływ GIC na urządzenia w SEE

Proces indukowania się prądów GIC w systemach, których oddalone od siebie uzziemione punkty są ze sobą połączone przewodnikiem, w tym przypadku linią przesyłową, prezentuje **rys. 6**.

Szczegółowy wpływ prądu GIC na sieci elektroenergetyczne przedstawia **rys. 7**.

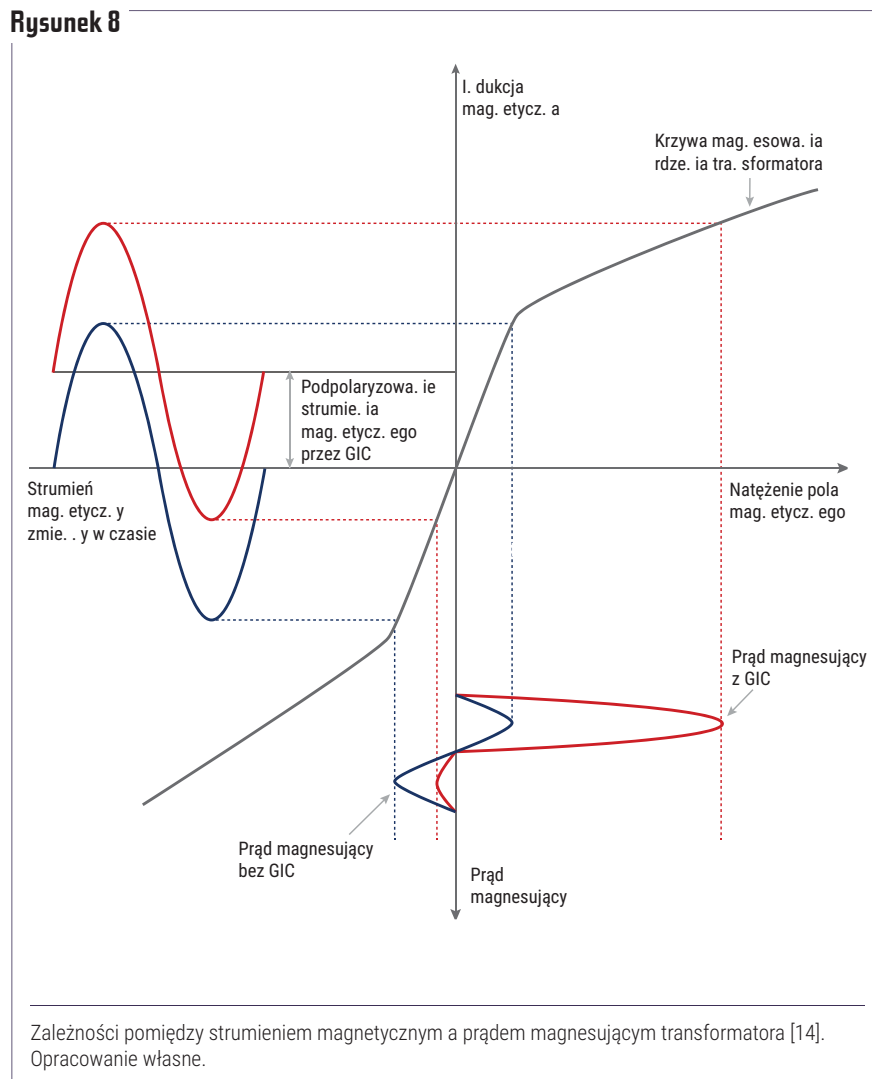
Głównym zagrożeniem jest nasycenie się rdzenia transformatora w półokresie zmieniającego się strumienia magnetycznego w czasie z powodu jego podpolaryzowania pochodzącego z prądu GIC (**rys. 8**).

Zjawisko to powoduje generację wyższych harmonicznych, ryzyko przegrzania transformatora i zwiększony pobór mocy biernej. Wyższe harmoniczne mogą powodować błędne zadziałanie zabezpieczeń, wyłączenia kondensatorów oraz przegrzewanie się i wyłączenie generatorów. W systemie może nastąpić zwiększony

pobór mocy biernej, co prowadzić może do zachwiania stabilności napięciowej, a w konsekwencji do kaskadowego wyłączenia linii przesyłowych i blackoutu.

O tym, że zagrożenie prądami GIC jest poważne, świadczy chociażby informacja w dokumencie [16] o szkodliwym wpływie burz geomagnetycznych na działanie amerykańskiej infrastruktury przesyłowej. Ponadto NERC (Północnoamerykańska Rada Niezawodności Elektroenergetycznej) utworzył nawet specjalną grupę roboczą, której zadaniem jest dogłębne przestudiowanie zjawiska GIC na terenie USA, zdefiniowanie ryzyka i potencjalnych zagrożeń dla systemu elektroenergetycznego oraz opracowanie środków zaradczych przeciwdziałających skutkom prądu GIC w sieci elektroenergetycznej [17]. Barack Obama pod koniec swojej kadencji podpisał rozkaz wykonawczy [18] (tzw. Executive Order), w którym zawarto m.in. rozkazy odnośnie do przewidywania i detekcji zdarzeń na Słońcu mających wpływ na infrastrukturę krytyczną, plany i programy niezbędne do wczesnego ostrzegania sektora publicznego i prywatnego w związku z zagrożeniem spowodowanym pogodą kosmiczną, opracowanie planów redukcji ryzyka oraz odbudowy infrastruktury. W styczniu tego roku reaktywowana została Komisja ds. EMP przy Pentagonie w celu m.in. wydania rekomendacji i złożenia raportu we wrześniu tego roku do Kongresu USA w sprawie zagrożeń związanych ze skutkami impulsu elektromagnetycznego. W raporcie z 2008 r. szacowano koszt zabezpieczeń transformatorów sieciowych przed skutkami prądu GIC na ok. 3,95 miliarda dolarów. Ponadto oszacowano, że prawdopodobnie przed całkowitym blackoutu uchronić mogą dodatkowe zabezpieczenia m.in. na transformatorach blokowych czy rozdzielczych, a koszt takiej operacji wyceniono dodatkowo na kilkaset milionów dolarów [19]. W Europie operatorzy sieci przesyłowej zrzeszeni w ENTSO-E również poświęcili uwagę temu problemowi. Komitet R&D w 2012 r. opublikował dokument [20], w którym m.in. zalecano pracę nad narzędziami mogącymi śledzić różne scenariusze rozplądów i natężeń prądu GIC oraz rekonfiguracji topologii sieci, by zminimalizować skutki wywołane jego przepływem, lepsze zrozumienie wpływu prądu GIC na transformatory (szkodliwy wpływ nagrzewania się kadzi) oraz generacji wyższych harmonicznych prądu i napięcia. Rekomendowano również kontynuację współpracy z ośrodkami

Rysunek 8



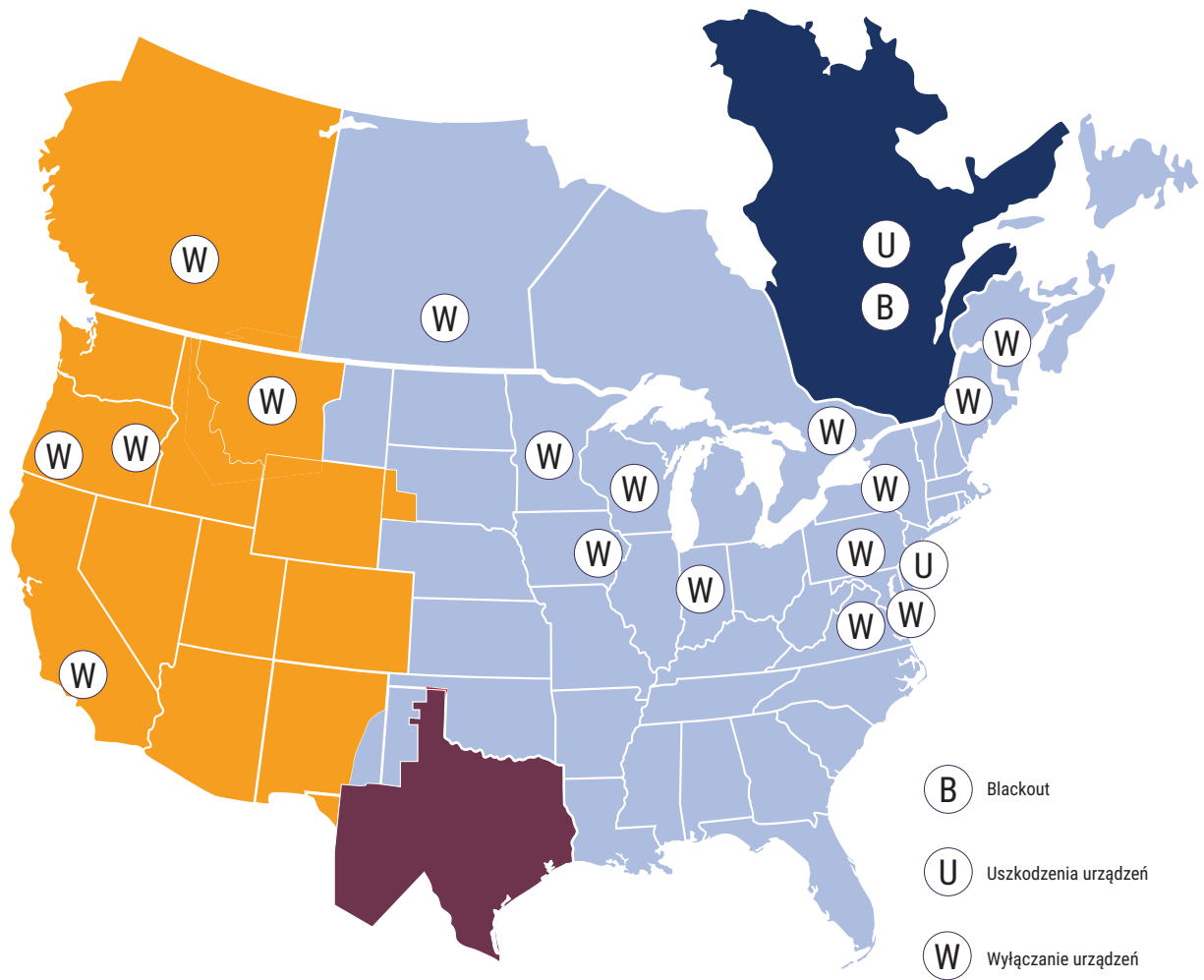
oraz projektami monitorującymi wpływ burz geomagnetycznych (Solar Shield, Sunburst, EURISGIC, NERC i Instytutem Meteorologii w Wielkiej Brytanii).

#### 1.4. Możliwy wpływ dużych wartości prądów GIC na urządzenia w SEE – zdarzenia w Quebecu i Malmö

Burze geomagnetyczne już nieraz wyrządziły mniejsze lub większe szkody operatorom sieci przesyłowych. W artykule tym nie poruszano problematyki prądów powodujących korozję rurociągów gazowych, co też jest istotnym zagadnieniem przy rozpatrywaniu szkód wywoływanych przez prądy indukowane geomagnetycznie. W przypadku prądów GIC ich duże wartości spowodowały istotne straty w Quebecu i w Malmö.

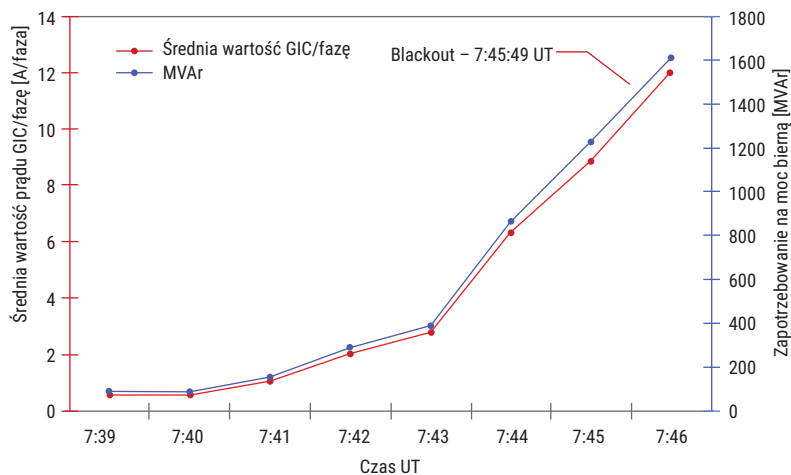
13 marca 1989 roku około pierwszej w nocy w prowincji Quebec miały miejsce dość silne zaburzenia geomagnetyczne. Operator sieci przesyłowej był w stanie odpowiednio szybko zareagować, aby utrzymać poziom napięcia w sieci. Jednak o godzinie 2.45 skutkiem bardzo groźnej burzy słonecznej była generacja wyższych harmonicznych w sieci i siedem kompensatorów statycznych uległo wyłączeniu w bardzo krótkim czasie. Spowodowało to wyłączenie jednej linii 735 kV, a to skutkowało automatycznym odstawieniem się dwóch bloków w elektrowni wodnej La Grande 4 (utrata ok. 620 MW). Następnie wyłączyły się kolejne cztery linie w sieci przesyłowej La Grande wraz z dwoma transformatorami blokowymi w La Grande 4, powodując kompletne odcięcie tej sieci przesyłowej od sieci Hydro-Quebec. Generacja w całym La Grande wynosiła 9400 MW, więc częstotliwość w Hydro-Quebec gwałtownie spadła. Zadziałała automatyka podczęstotliwościowa, odstawione zostały większe odbiory, jednak było to za mało, by skompensować →

→ Rysunek 9



Obszary dotknięte skutkami burzy geomagnetycznej z 13 marca 1989 r. [22].

Rysunek 10



Średnia wartość prądu GIC na transformatorach w Hydro-Quebec i zapotrzebowanie systemu na moc bierną w trakcie blackoutu 13 marca 1989 roku [23].

tak dużą utratę generacji [21]. W rezultacie nastąpiło odcięcie reszty systemu od miasta Montreal i Quebec, czego skutkiem był blackout w tym regionie (rys. 9).

Następowały kolejne wyłączenia, jednak już o mniejszej skali. Podczas tych wydarzeń zanotowany został znaczny wzrost zapotrzebowania systemu Hydro-Quebec na moc bierną w bardzo krótkim czasie, rzędu 1200 MVar w ciągu zaledwie 4 minut, a średnie wartości prądu GIC na transformatorach na fazę wyniosły w szczycie 12 A (rys. 10). Wszystko to trwało niespełna 3 minuty i prawie 6 milionów ludzi odczuwało skutki tego wydarzenia przez 9 godzin, w trakcie których udało się przywrócić 83% systemu [23]. Niemniej jednak szkody były spore, trzy transformatory blokowe (jeden transformator blokowy w elektrowni jądrowej Salem w Pensylwanii) oraz jeden dła-

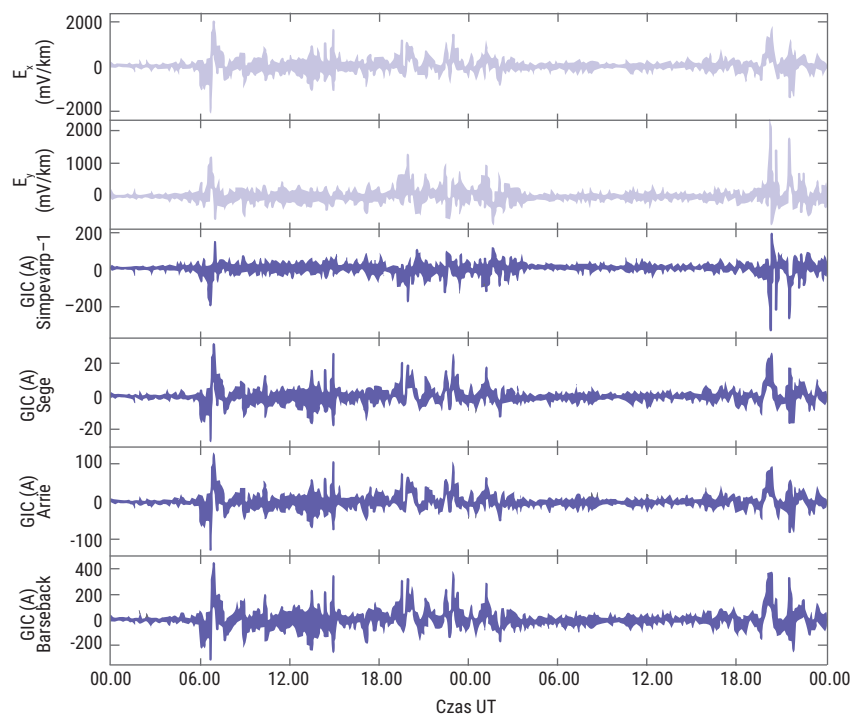
wik trzeba było poddać poważnym naprawom. Kompensatory statyczne SVC wymagały drobniejszych napraw i musiały być przez jakiś czas wyłączone z ruchu.

Z kolei blackout w Malmö, mający miejsce 30 października 2003 r., jest najlepiej zarejestrowanym blackoutedem, który został spowodowany przez burzę geomagnetyczną. Bardzo groźna burza geomagnetyczna spowodowała m.in. konieczność zmian trasy lotów samolotów z powodu zwiększonego poziomu promieniowania jonizującego w wyższych warstwach atmosfery, oraz utratę japońskiego satelity ADEOS-II wartego 600 mln dol. Najbardziej odczuwalnym skutkiem tej burzy był blackout w Malmö. Około 50 tysięcy osób zostało pozbawionych energii elektrycznej do 50 minut, 20 pociągów miało opóźnienie o pół godziny, a strata na blackoucie wyniosła ok. 0,5 mln dolarów [24]. Trwająca w okresie od 29 do 31 października bardzo groźna burza geomagnetyczna wywołała zaindukowanie się sporych wartości ESP oraz przepływ prądów GIC powyżej 200 A, czyli powyżej 60 A na fazę. **Rys. 11** przedstawia estymowane wartości ESP oraz prądu GIC w transformatorach na stacjach w Simpevarp, Sege, Arrie, Barseback. Wartość prądu dla stacji w Simpevarp wyliczona na kilka minut przed wystąpieniem blackoutu wyniosła ponad 300 A.

Niespotykana dotąd duża aktywność geomagnetyczna spowodowała zakłócenia w działaniu szwedzkiego systemu elektroenergetycznego. Kilka linii i transformatorów zostało wyłączonych przez zabezpieczenia nadprądowe, które miały czułe nastawy na 3. harmoniczną. W większości przypadków wyłączone elementy przywrócono do pracy w czasie nie dłuższym niż 5 minut. Jednak zdarzyły się sytuacje, w których potrzeba było od 25 do 90 minut, by po wcześniejszej inspekcji włączyć je z powrotem do sieci. **Tab. 1** prezentuje sekwencję zdarzeń w szwedzkim systemie elektroenergetycznym podczas trwania tej burzy geomagnetycznej.

Szacuje się, że ekstremalna burza słoneczna może zaistnieć mniej więcej cztery razy w ciągu jednego, jedenastoletniego cyklu słonecznego. Powyższe przykłady pokazują, że efekty zjawisk zachodzących na Słońcu mają wymierne skutki na funkcjonowanie systemów elektroenergetycznych i w skrajnych przypadkach mogą prowadzić do wyłączania zasilania dużych aglomeracji i skupisk ludzkich, tymczasowo paraliżując istotną składową infrastruktury krytycznej.

**Rysunek 11**



Dwa górne wykresy przedstawiają wyliczone wartości ESP składowej x i y na terenie południowej Szwecji, a kolejne cztery prezentują wyliczone wartości prądu GIC w okresie 29–30 października 2003 r. [25].

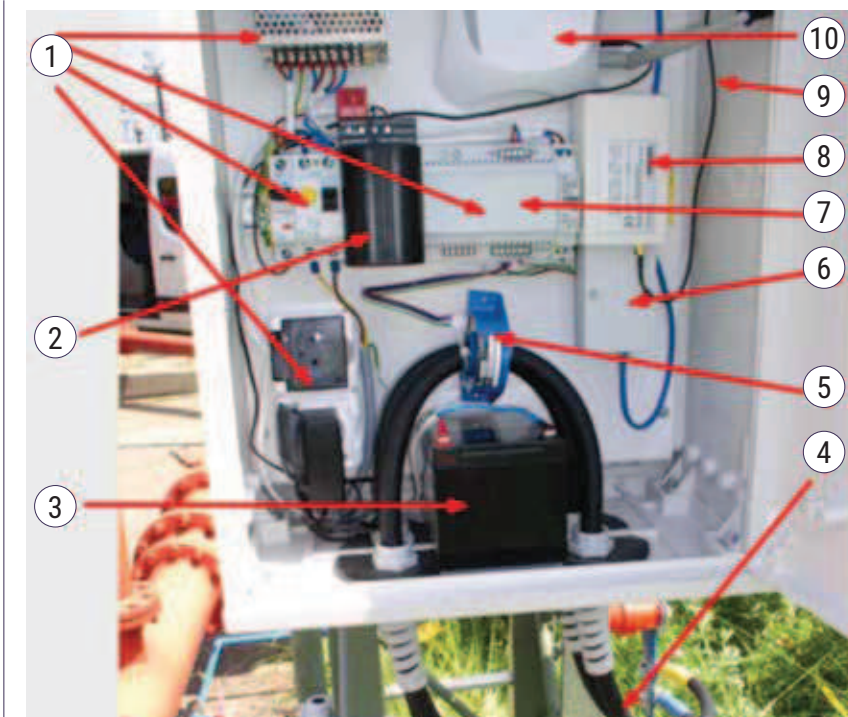
**Tabela 1. Sekwencja zdarzeń w szwedzkim systemie elektroenergetycznym w trakcie bardzo groźnej burzy geomagnetycznej w dniach 29–30 października 2003 r. [24]**

29 października 2003 r.	
Czas UT	Rodzaj zaburze. ia
6.11	Wyłączenie awaryjne linii 220 kV w rozdzielni elektrownianej, utrata 140 MW (wyłączenie bloku)
6.12	Wyłączenie awaryjne linii 130 kV oraz 400 kV (Hemsjo-Karlshamn) – wyłączenie linii 400 kV spowodowało zaburzenia w imporcie mocy z Polski do Szwecji na połączeniu HVDC rzędu 300 MW
7.00	Zanotowano wysokie temperatury na transformatorze blokowym w elektrowni jądrowej zlokalizowanej na południu Szwecji
30 października 2003 r.	
Czas UT	Rodzaj zaburze. ia
19.55	Wyłączenie awaryjne transformatora 400/220 kV
20.03	Transformator 400/130 kV powoduje przeciążenia w sieci 130 kV
20.03	Wyłączenie awaryjne transformatora 130/10 kV
20.07	Wyłączenie awaryjne linii 130 kV w Malmö powoduje blackout dotyczący 50 tysięcy mieszkańców
20.08	Wyłączenie awaryjne dwóch linii 130 kV





→ Rysunek 12



Budowa układu pomiarowego.

Rysunek 13



Wpięcie układu pomiarowego w punkt zerowy transformatora.

## 2. Opis rejestratorów mR3pGIC

### 2.1. Budowa układu pomiarowo-rejestrującego mR3pGIC

Na potrzeby rejestracji prądów indukowanych geomagnetycznie w Laboratorium Automatyki i Zabezpieczeń Instytutu Energetyki zostały opracowane i wykonane specjalne układy pomiarowe mR3pGIC.

Budowę układu rejestrującego przedstawiono na rys. 12, na którym widoczne są: przewody prądowe (4), przekładnik prądowy LEM (5) przenoszący zarówno składową stałą DC, jak i zmienną AC prądu, układy zasilania (1), podgrzewacz/osuszacz (2), akumulator do podtrzymania pracy w przypadku utraty zasilania (3), a także właściwy rejestrator mierzący i zapamiętujący wyniki mR3p (8) wyposażony w odbiornik GPS (przewód anteny – 9). Całość uzupełniono o tor transmisji danych, który składa się z konwertera RS232-Ethernet (6), routera (10) i modemu telefonii komórkowej (niewidoczny na zdjęciu).

Rejestrator mR3p wyposażony jest w trzy kanały pomiarowe separowane galwanicznie, działające w oparciu o 24-bitowe przetworniki ADC typu sigma-delta, moduł GPS, Bluetooth oraz kartę pamięci microSD, na której zaimplementowany jest system plików.

Za podstawowy cel postawiono rejestrację prądów wolnozmiennych płynących z punktu zerowego do ziemi, do czego wykorzystano pierwszy kanał rejestratora. Pozostałych dwóch kanałów użyto do rejestracji wartości skutecznej składowej AC (przetwornik TRMS – 7) oraz temperatury panującej wewnątrz skrzynki rejestratora.

Pomiary rejestrowane są w plikach jednodniowych ze zmiennym krokiem próbkowania. Krok wolny nastawiony na próbkowanie np. co 10 minut (wartość uśredniona) pozwala na rejestrację przebiegów wolnozmiennych, gdy nie dochodzi do przekroczenia wartości progowej. Z chwilą przekroczenia te same wartości aż do momentu jej ustąpienia przebiegi są rejestrowane z ustawionym krokiem szybkim, np. co jedną sekundę. Pozwala to na powstawanie małych, a przez to łatwych w interpretacji plików danych, które dzięki zastosowaniu torowi transmisji można pobrać zdalnie z komputera operatora systemu pomiarowego. Pliki mają format, który daje się łatwo interpretować w Excelu.

Na rys. 13 przedstawiono sposób zamontowania układu pomiarowego wpiętego w bednarkę wyprowadzającą punkt zerowy transformatora.

### 2.2. Oprogramowanie układu pomiarowo-rejestrującego

Do obsługi rejestratorów mR3p napisano specjalny program mRgui umożliwiający:

- nawiązanie komunikacji ze zdalnym komputerem operatora systemu pomiarowego;
- kalibrację przekładników;
- nastawy czasu rejestracji i częstotliwości próbkowania;
- oglądanie przebiegów i odczytu pomiarów w czasie rzeczywistym;
- pobieranie plików z wcześniejszymi rejestracjami bez konieczności przerywania zapisu rejestracji bieżącej.

## 3. Rejestratory mR3pGIC w KSE

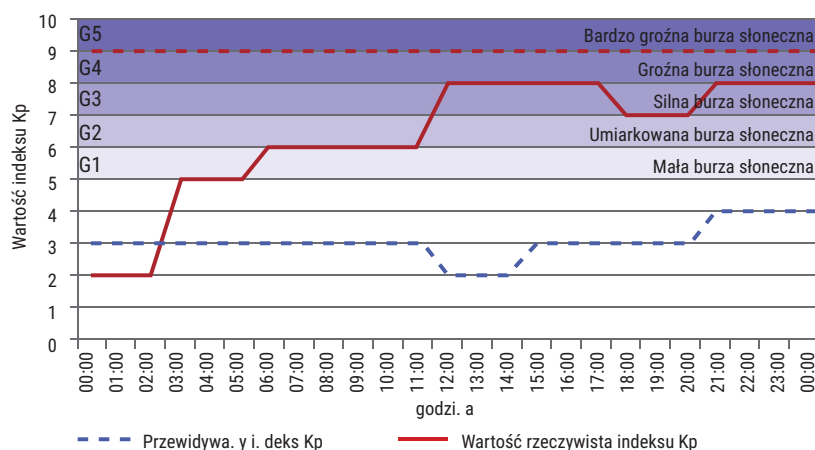
### 3.1. Przykładowe wartości zarejestrowanych prądów GIC w KSE i ich związek z burzami geomagnetycznymi

Rejestratory prądów GIC działają w KSE już od kilku lat, zbierając na bieżąco dane o prądach wolnozmiennych w kilku rozdzielniach, w których są transformatory.

Najciekawszym przypadkiem w okresie, od kiedy się notuje te wartości, były prądy GIC zarejestrowane 17 marca 2015 r. W tym dniu miała miejsce groźna burza słoneczna, najgroźniejsza w 24 cyklu aktywności Słońca. Burza wywołana była przez koronalny wyrzut materii, który nastąpił w trakcie rozbłysku słonecznego średniej klasy M1.6 w dniu 16.03.2015 r. Międzyplanetarny indeks aktywności kosmicznej Kp osiągnął maksymalną wartość 8 w godzinach 12.00–18.00 UT i 21.00–24.00 UT (13.00–19.00 i 22.00–1.00 czasu polskiego). Wartość ta wskazuje na intensywne zmiany pola magnetycznego. Indeks Kp natomiast jest quasi-logarytmiczną wartością i określa zmiany najbardziej zakłóconej składowej pola magnetycznego liczonej jako średnia z wartości K z 13 obserwatoriów zlokalizowanych na obu półkulach Ziemi. Jego wartość zamyka się w granicach  $\langle 0;9 \rangle$  [15]. Im wyższe szerokości geograficzne, tym większe zakłócenia. Predykcja indeksu Kp jest bardzo trudna ze względu na brak urządzeń mogących przewidzieć w sposób dokładny i z odpowiednim wyprzedzeniem prędkość, gęstość i kierunkowość magnetyczną wiatru słonecznego, który dotrze do Ziemi. Na **rys. 14** pokazana jest wartość rzeczywistego i przewidywanego indeksu Kp na dzień 17.03.2015 r.

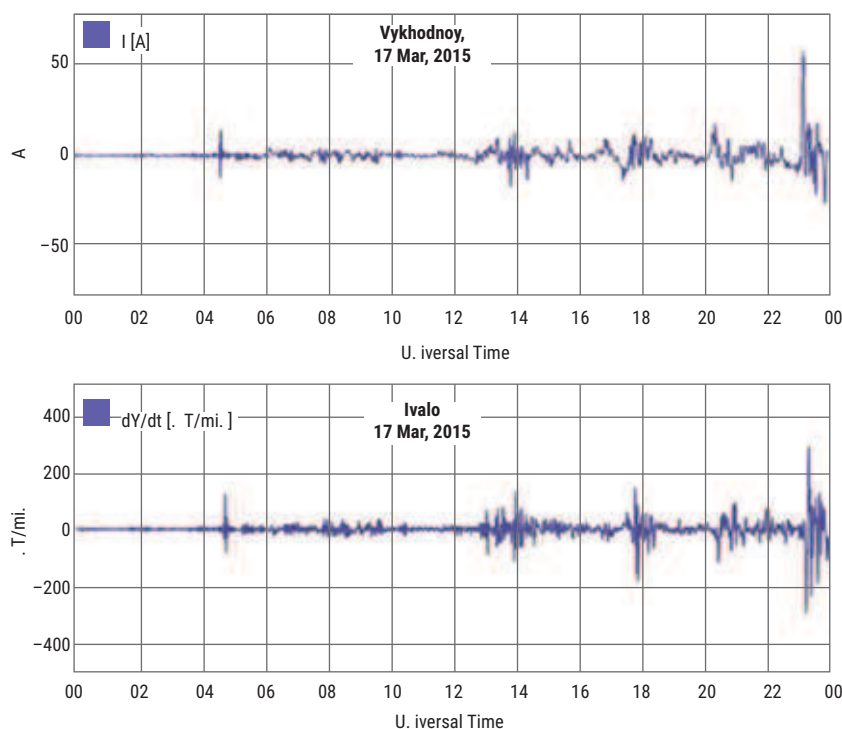
**Rys. 15** prezentuje zaindukowanie się prądu GIC w stacji Vykhodnoy (Rosja – 68.83°N, 33.08°E). Zaindukowany prąd osiągnął wartość ponad 50 A, przy bardzo intensywnych zmianach pola magnetycznego w czasie ( $dY/dt$ ) rzędu 400 nT/min w stacji Ivalo (Finlandia – 68.56°N, 27.29°E). PSE SA ma możliwość rejestracji składowych stałych prądów w uzemieniach kilku transformatorów w KSE. Na **rys. 16, 17, 18** przedstawiono wartości z urządzeń rejestrujących zainstalowanych na transformatorach w stacjach Dunowo (DUN-TR2), Lublin (LSY-TR2), Tucznowa (TCN-TR2) dla dnia, w którym wystąpiła groźna burza geomagnetyczna. Na przedstawionych charakterystykach, zwłaszcza dla pomiarów z transformatorów w SE Dunowo i Lublin, widać, że nastąpił wzrost składowej stałej między godz. 17.30 a 18.00 UT. W Polsce po godz. 17.30 UT nastąpiła nagle i gwałtowna zmiana pola geomagnetycznego (**rys. 19 i 20**) spowodowana burzą geomagnetyczną. Przełożyło się to na wzrost prądu GIC do wartości 6 A w przewodzie zerowym transformatora DUN-TR2. Wartości prądu GIC powyżej abs (2,5) A utrzymywały się ok. 6 minut. Na transformatorze LSY-TR2 zmierzona wartość prądu GIC osiągnęła

Rysunek 14



Przewidywane i rzeczywiste wartości współczynnika Kp 17 marca 2015 r.

Rysunek 15



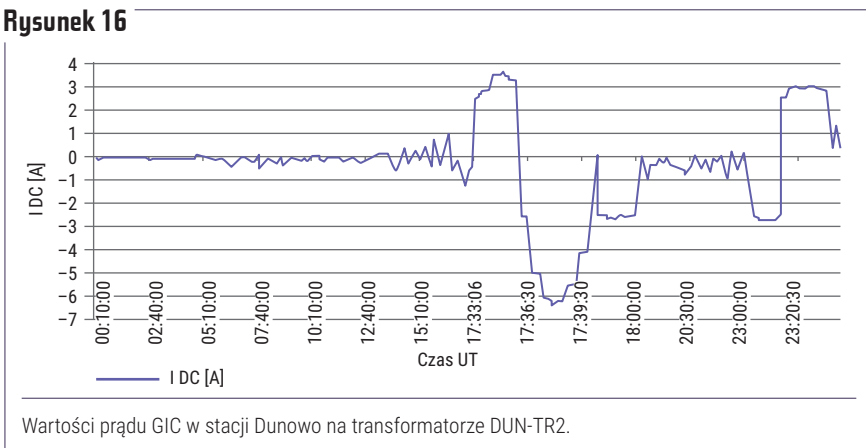
Wartości prądu GIC w stacji Vykhodnoy (Rosja) i zmian pola geomagnetycznego w stacji Ivalo (Finlandia) w trakcie groźnej burzy słonecznej 17 marca 2015 r. [26].

również wielkość rzędu 6 A. Obydwie maksymalne wartości zarejestrowano ok. godziny 17:40 UT (18:40 czasu polskiego). Prąd GIC płynący przez transformator TCN-TR2 wyniósł w tym czasie ok. 2,5 A.

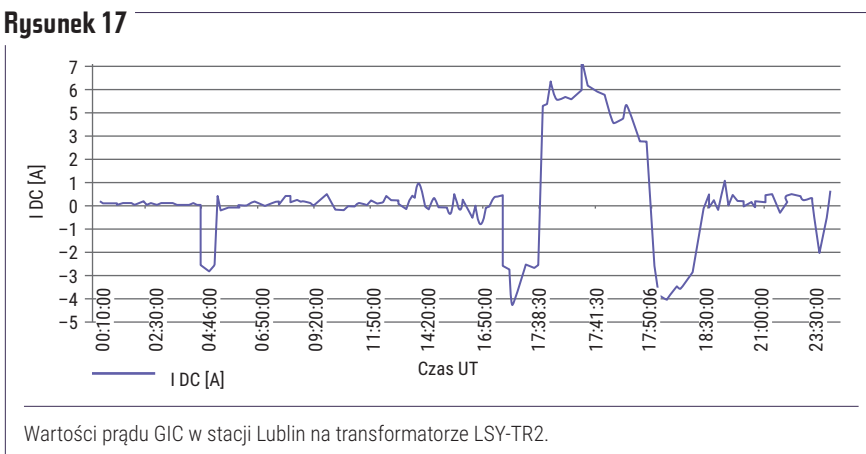
W trakcie trwania groźnej burzy słonecznej nie odczytano żadnych informacji o wyłączeniach awaryjnych. Ponadto, porównując wartości zarejestrowane w KSE z wartościami zmierzonymi/wyliczonymi podczas zdarzeń w Quebecu i Malmö, można dojść do wniosku, że są one wręcz pomijalne dla zaobserwowanego zdarzenia. Maksymalna zarejestrowana wartość prądu GIC w tym samym czasie na transformatorze w stacji Vykhodnoy wyniosła prawie dziesięciokrotnie więcej niż na transformatorze DUN-TR2.



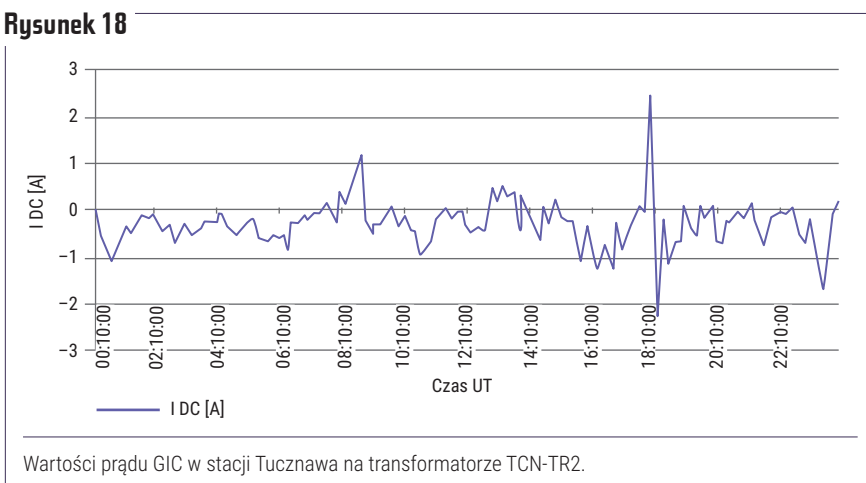
→ Rysunek 16



Rysunek 17



Rysunek 18



## Podsumowanie i wnioski końcowe

Nieprzewidywalność możliwości wystąpienia katastrofalnej burzy geomagnetycznej jest obecnie problemem, z którym muszą mierzyć się operatorzy sieci elektroenergetycznych krajów zlokalizowanych blisko ziemskich biegunów. Nie da się nawet zaprognozować, czy takie zdarzenie będzie miało miejsce w minimum czy maksimum 11-letniego cyklu słonecznego. Dzięki sondzie DSCOVR, umieszczonej na tzw. orbicie L1 (jest to punkt Lagrange'a, miejsce w przestrzeni, w którym obiekt o pomijalnej masie pozostaje w spoczynku względem Słońca i Ziemi), która rozpoczęła pracę 27 lipca 2016 r., mamy możliwość przewidywania strumienia cząstek wiatru słonecznego, prędkości wiatru słonecznego oraz zmian w międzyplanetarnym polu magnetycznym z wyprzedzeniem 15-60-minu-

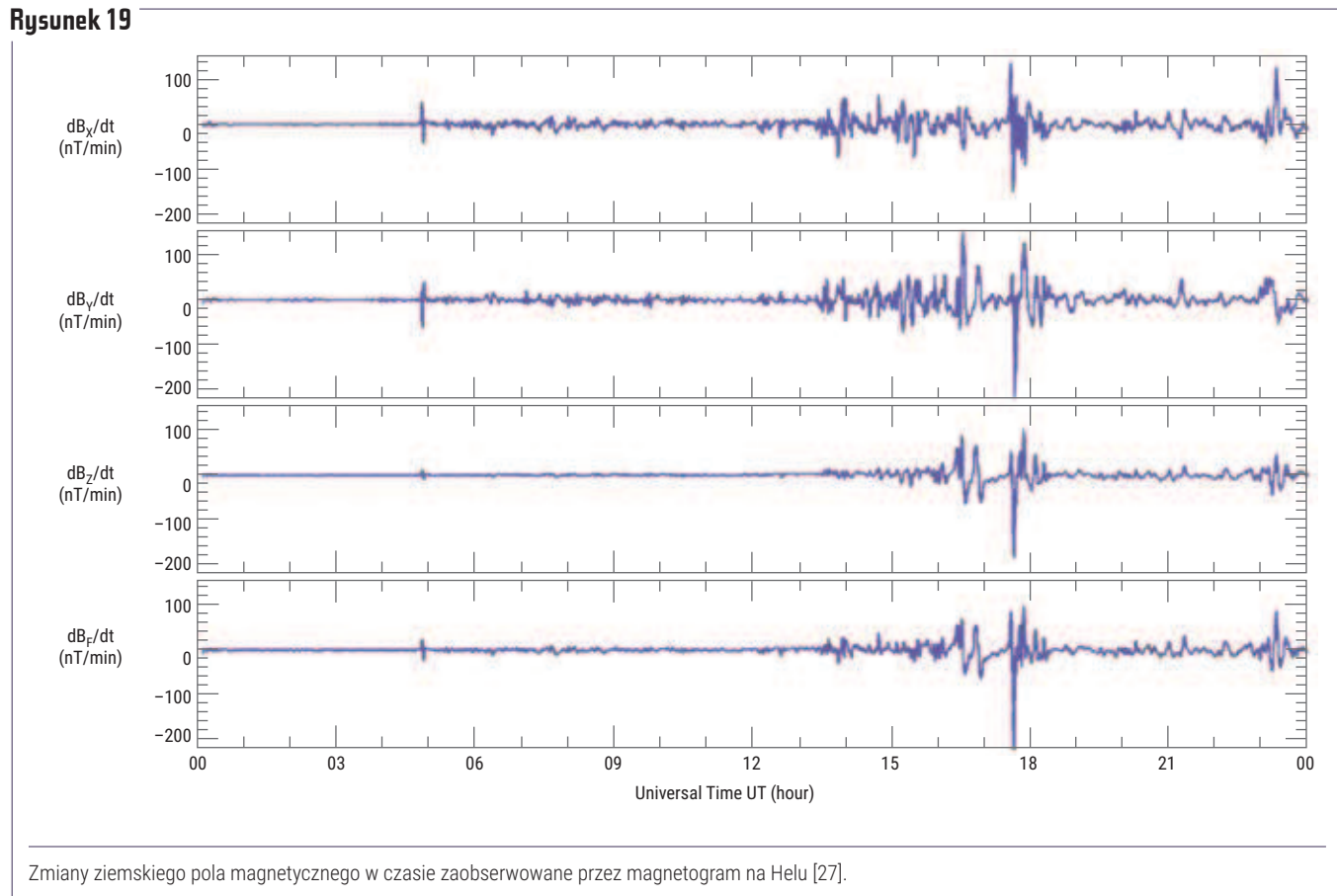
towym [28]. To wciąż niewiele, aby móc sprawnie zareagować i bezbłędnie skoordynować szereg skomplikowanych działań. Na szczęście tak potężne burze geomagnetyczne jak w roku 1859 nie zdarzają się zbyt często, a prawdopodobieństwo wystąpienia takiego wydarzenia w nadchodzącej dekadzie określono na ok. 12% [29]. Niemniej jednak oznacza to, że w przyszłości należy liczyć się z takim zagrożeniem. W szerokościach geograficznych, na których leży Polska, takie zagrożenie może być wręcz pomijalne, co wykazały również pomiary prądów GIC w KSE na przestrzeni ostatnich kilku lat. Problem głównie dotyczy krajów położonych na wysokich szerokościach geograficznych. W związku z tym zostały opracowane propozycje rozwiązań na poziomie eksploatacyjnym i operatorskim, mogące zminimalizować wpływ tego zagrożenia na systemy elektroenergetyczne (tab. 2).

Należy mieć jednak na uwadze, że np. dodatkowa rezystancja w zerze transformatora powoduje zmianę skuteczności uziemienia sieci, a kondensatory, choć skuteczniejsze, zmieniają wartości składowej zerowej prądu zwarcia i powodują powstawanie dodatkowych stanów nieustalonych.

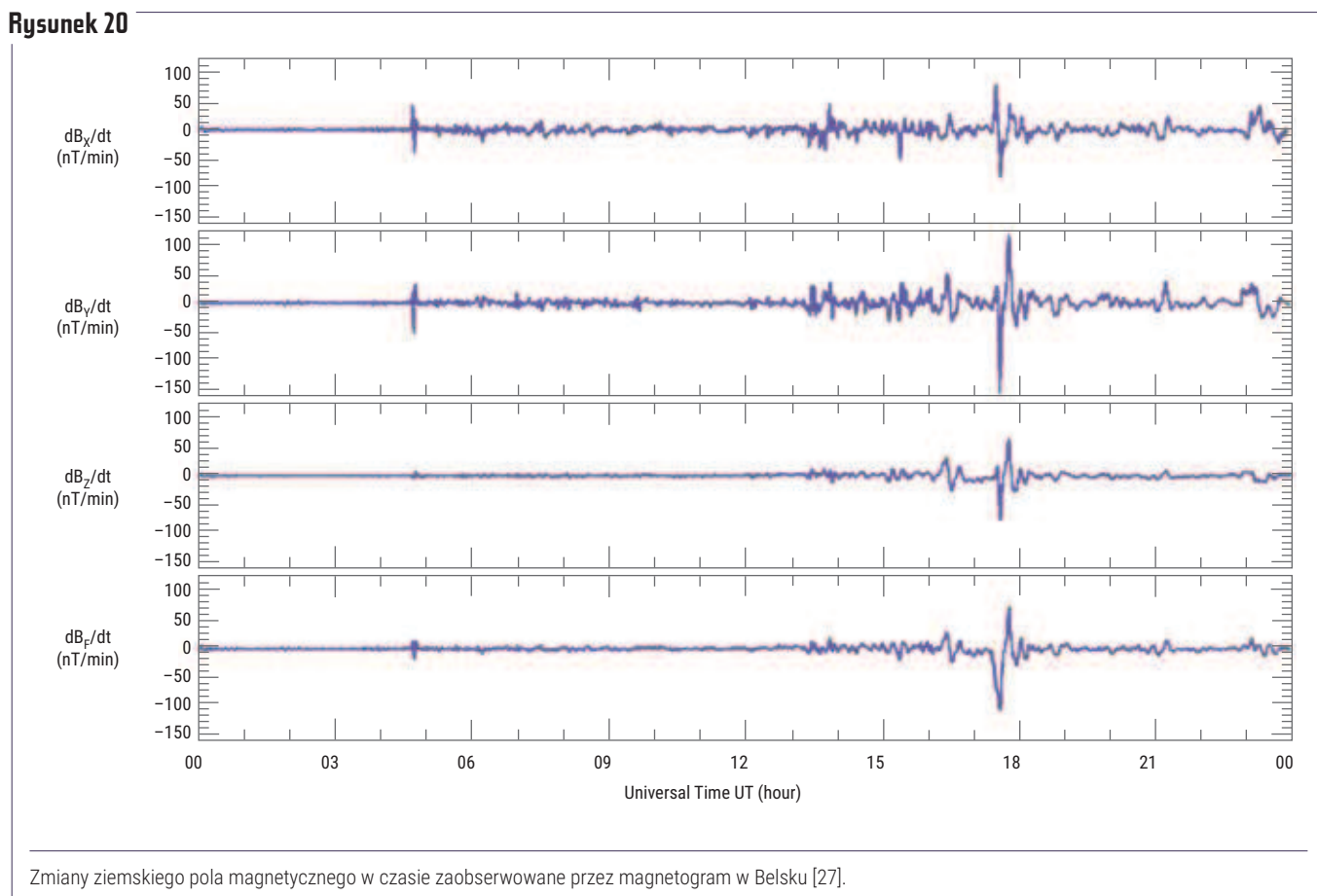
W trakcie kilkuletnich obserwacji indukowania się prądów GIC w KSE nie zaobserwowano zagrożeń dla bezpieczeństwa pracy sieci wynikającej z przepływu prądów indukowanych geomagnetycznie. Wartości prądów GIC były wręcz pomijalne, a największa ich wartość wystąpiła podczas groźnej burzy słonecznej 17 marca 2015 r. i wynosiła ok. 6 A, czyli na fazę przypadało ok. 2 A, co jest wartością nikłą. Nie wiemy jednak, jak zachowałyby się połączony system europejski w trakcie tak groźnej burzy, jaka miała miejsce w 1859 r. Zespół naukowców zrzeszonych w projekcie EURISGIC w 2012 r. opracował mapę najwyższych wartości prądu GIC wyliczonych na podstawie danych geomagnetycznych z października 2003 r., czyli z blackoutu mającego miejsce w Malmö, i nałożył je na uproszczoną sieć najwyższych napięć i stacje transformatorowe. Rys. 21 pokazuje wyestymowane wartości prądu GIC w stacjach transformatorowych dla dużej części Europy dla października 2003 r. (wartości geomagnetyczne zostały uwzględnione z dnia, gdy nastąpił blackout w Malmö).

Z rys. 21 oraz przytoczonych wcześniej danych i wniosków wynika, że zagrożenie skutkami przepływu prądu GIC w KSE jest niewielkie, natomiast w krajach, które

Rysunek 19



Rysunek 20



→ Tabela 2. Propozycje rozwiązań mogących zminimalizować wpływ prądów GIC na działanie systemów elektroenergetycznych [30,31]

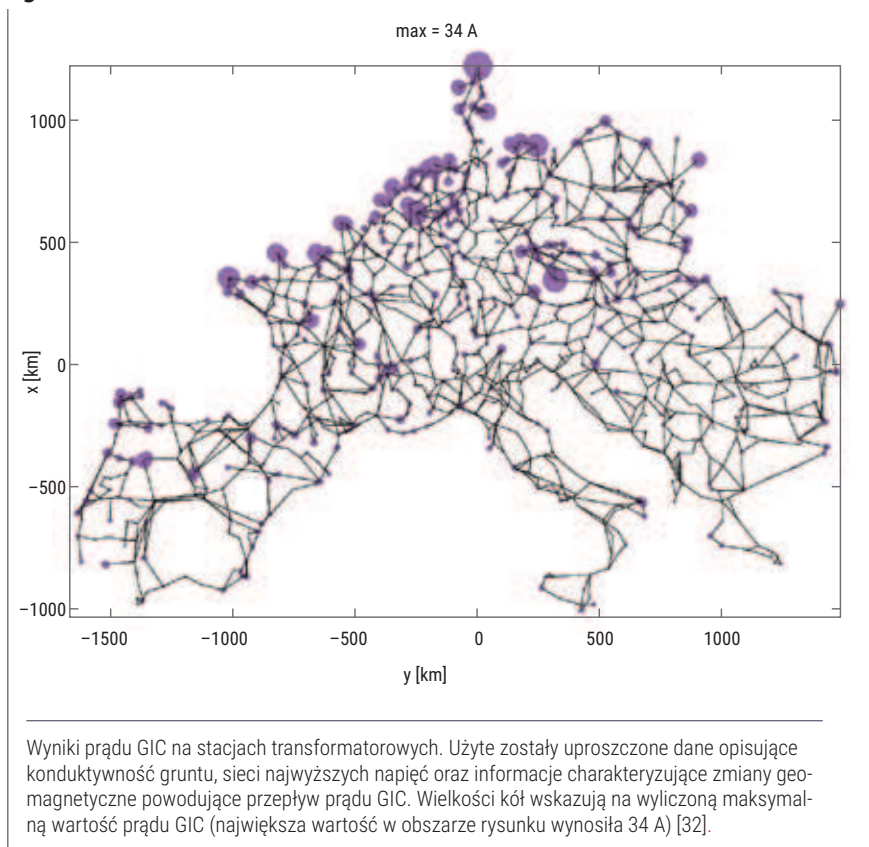
Eksplotacja	Działania operatorskie
Rezystor tłumiący w przewodzie zerowym transformatora	Zmiana generacji, zwiększenie rezerwy wirującej, uruchamianie większej liczby jednostek wytwórczych – lepsza możliwość kontroli mocy biernej
Kondensator blokujący w przewodzie zerowym transformatora	Zmiana/odwołanie wyłączeń planowanych/remontów elementów krytycznych dla zjawiska GIC (np. kondensatorów)
Moduł pojemnościowy z bypassem w przewodzie zerowym transformatora (bypass w stanie normalnym – załączony)	Zmiana topologii sieci
Kondensatory w każdej fazie w linii	Wymuszenie chłodzenia na transformatorach

tych prądów przez zera transformatorów może prowadzić do zwiększonego korodowania uziołów, co wymagałoby osobnych badań.

## Geomagnetically Induced Currents – real threat for power systems or scientific curiosity

The Geomagnetically Induced Currents (GIC) phenomena, caused by solar storms, triggered unknown effects in 19th century. Nowadays, it is much better understood what is inducing GIC, but it is still hard to predict the scale of the threat for the devices vulnerable to its effects. Article describes that solar storms can be a threat for TSOs, using blackouts at Quebec and Malmo as examples. There is a few GIC recorders in Polish Power System which constantly register the data regarding the GIC flow. Records measured during the severe geomagnetic storm in 2015 are shown and some recommendations regarding reducing the damaging effects of GIC for TSOs are also proposed. ■

Rysunek 21



zetknęły się z efektami tego zjawiska, stosowane są środki przeciwdziałające jego szkodliwym wpływom na urządzenia w SEE. Zagrożenie w skali globalnej istnieje, powodowało już duże szkody i konieczność kosztownych napraw oraz remontów. Jednak nie wszędzie na świecie należy się spodziewać tak poważnych skutków wywołanych tym kosmicznym zagrożeniem. Przy okazji badania prądów indukowanych geomagnetycznie zaobserwowano zwiększone wahanie prądów wolnozmiennych w transformatorze znajdującym się w Tucznawie, nawet w przypadku niewielkiej aktywności Słońca. Może to być związane z przepływem w skorupie ziemskiej tzw. prądów błądzących powstających wskutek nie zawsze dobrze domkniętej sieci powrotnej traktacji elektrycznej kolejowej lub tramwajowej, które są bogato rozwinięte na Śląsku. Przepływ

## Piśmiennictwo

- [1] [http://helio.astro.uni.wroc.pl/helio\\_sundescrip.html](http://helio.astro.uni.wroc.pl/helio_sundescrip.html), dostęp na maj 2017 r.
- [2] Dz.U. 2007 Nr 89 poz. 590, Ustawa z 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym
- [3] [http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2008/06may\\_carringtonflare](http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2008/06may_carringtonflare). Dostęp na maj 2017 r.
- [4] Cliver E.W. & Dietrich W.F.: *The 1859 space weather event revisited: limits of extreme activity*. J.Space Weather Clim., 2013, 3, A31.
- [5] Whitehouse D., *Słońce*, Prószyński i S-ka 2004.
- [6] Severe Space Weather Events: *U. dersta. di. g Societal a. d Eco. omic Impacts: A workshop report*, The National Academy of Sciences 2008.
- [7] *Space Weather Prepared. ess Strategy*, UK Cabinet Office – Department for Business Innovation & Skills, July 2015.
- [8] [http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2009/03jun\\_fakeastronaut/](http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2009/03jun_fakeastronaut/), dostęp na maj 2017 r.
- [9] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar\\_Cycle\\_Prediction.gif](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_Cycle_Prediction.gif).
- [10] <http://appinsys.com/globalwarming/earthmagneticfield.htm>, dostęp na maj 2017 r.
- [11] <http://apollo.astro.amu.edu.pl/PAD/index.php?n=Dybol.2012Art4>, dostęp na maj 2017 r.
- [12] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnificent\\_CME\\_Erupts\\_on\\_the\\_Sun](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnificent_CME_Erupts_on_the_Sun); [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coronal\\_Hole\\_Front\\_and\\_Center](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coronal_Hole_Front_and_Center).
- [13] Źródło – Multi-Disciplinary Issues, „*OECD/IFP Futures Project o. „Future Global Shocks” Geomag. etic Storms*”, January 2011.
- [14] NERC, *Effects of Geomag. etic Disturbances on the Bulk Power System*, February 2012.
- [15] Klimpel A., Lipko K., *Czy burze magnetyczne są groźne dla krajowej elektroenergetyki?*, Elektroenergetyka – współczesność i rozwój nr 3 (9)/2011.
- [16] *Report of the Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse (EMP) Attack*, Critical National Infrastructures, April 2008.
- [17] <http://www.americansecurityproject.org/nerc-geomagnetic-disturbance-events-gmd-reliability-standards-comments-due-soon/>, dostęp na maj 2017 r.
- [18] Barack Obama, Executive Order – Coordinating Efforts to Prepare the Nation for Space Weather Events, 13 October 2016.
- [19] <https://www.economist.com/news/world-if/21724908-huge-potential-impact-rich-countries-prolonged-loss-electricity-disaster>, dostęp na lipiec 2017 r.
- [20] Research and Development Committee – The Impact of The Solar Storms and Geomagnetically Induced Currents on Transmission Network, 22 February 2012.
- [21] [http://www.nerc.com/pa/Stand/Geomagnetic%20Disturbance%20Resources%20DL/NERC\\_1989-Quebec-Disturbance\\_Report.pdf](http://www.nerc.com/pa/Stand/Geomagnetic%20Disturbance%20Resources%20DL/NERC_1989-Quebec-Disturbance_Report.pdf), dostęp na maj 2017 r.
- [22] [http://aurora.fmi.fi/gic\\_service/english/about\\_ground\\_effects.html#reduction\\_of\\_the\\_effects](http://aurora.fmi.fi/gic_service/english/about_ground_effects.html#reduction_of_the_effects), dostęp maj 2017.
- [23] Kappenman J., *Geomagnetic Storms and Their Impacts on the U.S. Power Grid*, Metatech, January 2010.
- [24] Pulkkinen A. i inni, *Geomagnetic storm of 29-31 October 2003: Geomagnetic effects and their relationship to problems in the Swedish high-voltage power transmission system*, 3, S08C03, doi: 10.1029/2004SW000123.
- [25] Wik M., Pirjola R., Lundstedt H., Iljanen A., Wintoft P., Pulkkinen A., *Space weather event of July 1982 and October 2003 and the effects of geomagnetic disturbances on the Swedish technical system*, Annales Gophysicae 2009.
- [26] <http://eurisgic.org/>, dostęp na maj 2017.
- [27] <http://www.intermagnet.org/>, dostęp na maj 2017.
- [28] <https://www.nesdis.noaa.gov/content/dscovr-deep-space-climate-observatory>, dostęp na maj 2017 r.
- [29] Riley P., *The probability of occurrence of extreme space weather events*, Predictive Science, San Diego, California 23 February 2012.
- [30] Pulkkinen A., Balch C., Habib S., Policelli F., Ngwira C., Lordan R., Fugate D., Jacobs W., *Solar Storm GIC Forecasting: System Requirements*, <https://www.dhs.gov/sites/default/files/publications/Solar%20Storm%20GIC%20Forecasting-Solar%20Shield%20Extension%20-%20GIC%20Forecasting%20System%20Requirements-508.pdf>, dostęp na maj 2017.
- [31] Kappenman J., *Low Frequency Protection Concepts for the Electric Power Grid: Geomagnetic Effects and GIC and E3 HEMP Mitigation*, Goleta, California 2010.
- [32] Viljanen A., Pirjola R., Honkonen I., Thomson A., Clarke E., Wik M., Wintoft P., Wesztergrom V., Pracser E., Sakharov Y., Katkalov Y., Pulkkinen A., *EURISGIC: European Risk from Geomagnetic Effects*, EU 2012.