



UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNO-PRZYRODNICZY  
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH  
W BYDGOSZCZY

**ZESZYTY NAUKOWE  
SCIENTIFIC JOURNAL  
266**

**ELEKTROTECHNIKA**

**ELECTRICAL  
ENGINEERING**

**18**

BYDGOSZCZ – 2016

REDAKTOR NACZELNY  
prof. dr hab. inż. Józef Flizikowski

REDAKTOR NACZELNY SERII  
dr inż. Marta Kolasa

OPRACOWANIE TECHNICZNE  
mgr Patrycja Fereni-Morzyńska

© Copyright  
Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego  
Bydgoszcz 2016

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany  
ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych,  
kopiujących, nagrywających i innych bez pisemnej zgody  
posiadacza praw autorskich.

Praca powstała przy wsparciu projektu  
„Realizacja II etapu Regionalnego Centrum Innowacyjności”  
współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego  
w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego  
Województwa Kujawsko-Pomorskiego na lata 2007-2013

ISSN 0209-0570

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego  
ul. ks. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz, tel. 52 3749482, 3749426  
e-mail: [wydawucz@utp.edu.pl](mailto:wydawucz@utp.edu.pl) <http://www.wu.utp.edu.pl>

---

Wyd. I. Nakład 60 egz. Ark. aut. 3,8. Ark. druk. 3,7.  
Zakład Małej Poligrafii UTP Bydgoszcz, ul. ks. A. Kordeckiego 20

## Contents

1. Ryszard Roskosz, Sławomir Cieślik – Profesor Alfons Hoffmann – autorytet Polaka i elektryka – współtwórca polskiej elektroenergetyki Artykuł przeglądowy .....	5
2. Małgorzata Dutka – Examples of modern energy conversion .....	25
3. Tadeusz Szczepański – Analysis of direct current cable breakdowns concerning Swedish – Polish link including failure preventing proposals .....	43
Lista recenzentów – Reviewers list .....	59





UNIwersytet Technologiczno-Przyrodniczy  
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH W BYDGOSZCZY  
ZESZYTY NAUKOWE NR 266  
ELEKTROTECHNIKA 18 (2016) 5-24

PROFESOR ALFONS HOFFMANN  
– AUTORYTET POLAKA I ELEKTRYKA –  
WSPÓŁTWÓRCA POLSKIEJ ELEKTROENERGETYKI  
ARTYKUŁ PRZEGLĄDOWY

Ryszard Roskosz<sup>1,2</sup>, Sławomir Cieślak<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk  
ryszardroskosz@wp.pl; rroskosz@ely.pg.gda.pl

<sup>2</sup>Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy  
Wydział Telekomunikacji, Informatyki i Elektrotechniki  
Al. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz  
slawcies@utp.edu.pl

*Streszczenie:* W artykule przedstawiono sylwetkę Alfonsa Hoffmanna, wybitnego inżyniera, pioniera i współtwórcę systemu elektroenergetycznego w Polsce, działacza społecznego i państwowego. W czasie studiów w Królewskiej Politechnice w Gdańsku i później czynnie wspierał polskość, propagując język, muzykę i folklor. Dyplom inżyniera elektryka otrzymał w roku 1911, po czym zdobywał praktykę w przemyśle niemieckim. W 1918 roku jako członek Podkomisariatu Naczelnej Rady Ludowej organizował polską administrację Pomorza. Od 1920 roku budował elektrownie w Gródku i Żurze, utworzył połączony system elektroenergetyczny Pomorza, elektryfikował Gdynię, promował korzystanie z energii elektrycznej poprzez produkcję sprzętu grzejnego i szkolenie użytkowników. Po wyzwoleniu Alfons Hoffmann przystąpił do odbudowy ze zniszczeń wojennych i uruchamiania elektrowni wodnych na Raduni oraz w Dychowie na Bobrze. W roku 1949 ze względów politycznych został odsunięty od prac o strategicznym znaczeniu dla elektroenergetyki Polski. Od końca 1949 roku wykładał na Politechnice Gdańskiej i pracował w Biurze Studiów Gospodarki Wodnej Polskiej Akademii Nauk. Profesor Alfons Hoffmann pracował do ostatnich dni swojego życia. Spoczywa na cmentarzu Srebrzysko w Gdańsku Wrzeszczu.

Słowa kluczowe: Alfons Hoffmann, pionierzy elektroenergetyki, historia elektrotechniki

## 1. WPROWADZENIE

W czerwcu 2015 roku odbyło się w Gdańsku I Sympozjum Historii Elektryki [6, 7]. Wybór terminu konferencji oraz Politechniki Gdańskiej jako miejsca obrad był związany z wybitnym Polakiem Alfonsem Hoffmannem, który decyzją Zarządu Głównego Stowarzyszenia Elektryków Polskich oraz decyzją Walnego Zgromadzenia Delegatów

Polskiego Towarzystwa Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej, w 130-lecie urodzin został patronem roku 2015. Obchody Roku Hoffmanna zostały zainaugurowane 19 marca 2015 r. w Uniwersytecie Technologiczno-Przyrodniczym w Bydgoszczy.

W Polsce od wielu lat prowadzone są działania mające na celu upamiętnienie wybitnych, niezwykłych polskich elektryków. Obejmują one zarówno naukowców, jak i pionierów elektroenergetyki oraz przemysłu elektrotechnicznego. Formy upamiętniania zasłużonych elektryków są różne. Są oni patronami kolejnych lat, ogłaszanych przez SEP i PTETiS, patronami szkół oraz oddziałów SEP. Ich imionami nazywane są ulice i place. Opracowywane są monografie historyczne i artykuły wspomnieniowe. Popularną formą upamiętnienia są tablice pamiątkowe. Kilka tablic pamiątkowych poświęcono twórcom systemu elektroenergetycznego Pomorza prof. Alfonsowi Hoffmannowi. Jedną z pierwszych znajduje się w Grudziądzu na budynku, w którym Profesor się urodził.

W 2015 roku minęło 110 lat, kiedy Alfons Hoffmann przekroczył progi Królewskiej Politechniki i jako jeden z pierwszych Polaków rozpoczął w roku 1905 studia na Wydziale Budowy Maszyn i Elektrotechniki politechniki w Gdańsku (ówczesnej Königlich-Preussische Technische Hochschule), które ukończył w 1911 roku. Po wojnie, w latach 1949-1957 Alfons Hofmann ponownie znalazł się w murach Politechniki Gdańskiej, gdzie pracował na Wydziale Elektrycznym w Katedrze swojego wychowanka prof. Kazimierza Kopeckiego.

Symposium Historia Elektryki otworzył oraz zgromadzonych w zabytkowym audytorium E1 Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej uczestników i zaproszonych gości powitał przewodniczący Komitetu Organizacyjnego prof. Dariusz Świsulski. W czasie uroczystości inauguracyjnej zostały wręczone zasłużonym osobom medale i wyróżnienia Stowarzyszenia Elektryków Polskich. Medal im. prof. Alfonsa Hoffmanna odebrali: prof. Leon Swędrowski oraz prof. Ryszard Roskosz (fot. 1).



Fot. 1. Medale im. Prof. A. Hoffmanna odbierają: prof. Leon Swędrowski (z lewej) oraz prof. Ryszard Roskosz (z prawej), wręcza Prezes SEP Piotr Szymczak (fot. Eligiusz Pawłowski)

Po uroczystej inauguracji rozpoczęła się I sesja „Alfons Hoffmann patronem roku”, którą prowadził przewodniczący Komitetu Naukowego Sympozjum prof. Jerzy Hickiewicz. Referaty o działalności i zasługach Alfonsa Hoffmanna, pioniera i twórcy systemu elektroenergetycznego na Pomorzu oraz wybitnego działacza społecznego i narodowego wygłosili: prof. Dariusz Świsulski i prof. Jacek Marecki. Niestety ze względu na chorobę, na Sympozjum nie mógł przybyć mgr inż. Tadeusz Domżański, wybitny znawca i propagator działalności oraz dorobku Alfonsa Hoffmanna. Uczestnicy Sympozjum przygotowali, podpisali i przesłali do Niego list z życzeniami szybkiego powrotu do zdrowia.

Ważnym wydarzeniem Sympozjum było uroczyste odsłonięcie tablicy poświęconej prof. Alfonsowi Hoffmannowi, umieszczonej w wejściu głównym do budynku Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Inicjatorem powstania tablicy był Tadeusz Domżański – długoletni prezes Oddziału Bydgoskiego SEP. Autorką projektu tablicy jest Dobrochna Surajewska – gdańska artysta rzeźbiarz. Wykonanie projektu i odlewu było współfinansowane przez Oddział Gdański, Oddział Bydgoski im. Alfonsa Hoffmanna i Oddział Toruński im. Mariana Hoffmanna Stowarzyszenia Elektryków Polskich. W czasie uroczystości odsłonięcia tablicy pamiątkowej prof. Alfonsa Hoffmanna, dziekan Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, prof. Leon Swędowski, przedstawił sylwetkę Profesora i Jego związek z Politechniką Gdańską. Znamionym wyrazem oddającym historię współpracy profesorów Kopeckiego i Hoffmanna jest to, że tablica pamiątkowa prof. Alfonsa Hoffmanna (fot. 2) umieszczona została naprzeciwko tablicy pamiątkowej prof. Kazimierza Kopeckiego w budynku głównym Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG. Tablica pamiątkowa została odsłonięta przez: prorektora Politechniki Gdańskiej prof. Kazimierza Jakubiuka, dziekana Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG prof. Leona Swędrowskiego, Prezesa SEP dr. inż. Piotra Szymczaka, współpracownika prof. Alfonsa Hoffmanna prof. Jacka Mareckiego oraz syna Mariana, a wnuka Alfonsa Hoffmanna mgr. inż. Tomasza Hoffmanna (fot. 3).

Profesor Alfons Hoffmann jest dobrze znany w środowisku elektryków, ale szczególnie młodym adeptom „sztuki elektrycznej” warto przedstawić bliżej Jego sylwetkę jako elektryka, społecznika i Polaka.



Fot. 2. Tablica pamiątkowa prof. Alfonsa Hoffmanna [7]



Fot. 3. Uroczyste odsłonięcie tablicy pamiątkowej prof. Alfonsa Hoffmana w wejściu do budynku Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (od dołu: P. Szymczak, J. Marecki, K. Jakubiuk, L. Swędrowski, T. Hoffmann, R. Roskosz i D. Świsulski) [7]

## 2. ALFONS HOFFMANN DO ROKU 1918

Alfons Hoffmann urodził się 12 listopada 1885 r. w Grudziądzu w rodzinie o głębokich tradycjach patriotycznych [1, 3, 5, 8]. Ród Hoffmannów wywodzi się z Czerska (pogranicze Borów Tucholskich i Kaszub). Jego najbliższymi kuzynami byli m.in.: ks. Stanisław Hoffmann (proboszcz i działacz pomorskiego Liskowa), nauczyciel Jan Hoffmann (organizator szkolnictwa polskiego w pow. Chojnickim w latach 1918-1920) a także ks. dr Bolesław Domański (proboszcz z Zakrzewa, prezes Związku Polaków w Niemczech, urodzony na Kaszubach, w Przytarni koło Wiela). Alfons Hoffmann uczęszczał w rodzinnym mieście, w latach 1895-1905, do pruskiego Królewskiego Gimnazjum typu humanistycznego. Od roku 1900 był stypendystą Towarzystwa Pomocy Naukowej dla Młodzieży Prus Zachodnich w Chełmnie. Po zdaniu matury (1905 r.) zapisał się na Wydział Maszynowy i Elektrotechniki Politechniki Gdańskiej (Königliche Technische Hochschule zu Danzig (fot. 4).

W okresie studiów Alfons Hoffmann rozpoczął aktywną działalność społeczną na Politechnice Gdańskiej i na Pomorzu, m.in. wspierał polskość, propagując język polski, muzykę i folklor. Zakładał ogniska śpiewacze w Kartuzach, Wejherowie i Gdańsku. Kształcił dyrygentów w terenie. Przy chórze *Lutnia* założył w roku 1908 *Polski Komitet Kostiumowy* zaopatrujący teatry ludowe w polskie stroje regionalne i historyczne (siermięgi, kontusze i stroje góralskie – fot. 5). Z wypożyczalni strojów teatralnych korzystały następujące zespoły: „Lutnia” w Chmielnie, Luzinie, Sianowie, Sierakowicach, Skarszewach i Sopocie, „Halka” w Gowidlinie, „Cecylia” w Kartuzach i Kielnie, „Symfonia” w Linii i „Słowiczek” w Przdokowie [1].





Fot. 4. Königlich Technische Hochschule zu Danzig (Gdańsk, 1905 r.) [9]



Fot. 5. Student Alfons Hoffmann w kostiumie historycznym (1910 r.) [9]



Fot. 6. Alfons Hoffmann w okresie pobytu w Niemczech, Westfalia (1914 r.) [9]

W 1910 roku Hoffmann zorganizował *Gdański Związek Kaszubskich Kół Śpiewających*. Organizował przedstawienia teatralne, koncerty i występy z polskimi tańcami narodowymi. Natomiast w 1907 roku został na Politechnice Gdańskiej przewodniczącym polskiego kółka studenckiego oraz członkiem Polskiego Towarzystwa Gimnastycznego *Sokół*. Jako student drugiego roku został dyrygentem chóru *Lutnia* w Gdańsku. W swoich „Wspomnieniach z pierwszych lat skoordynowanego ruchu śpiewaczego

na Pomorzu” tak opisuje to wydarzenie [1]: *Studia techniczne rozpocząłem w roku 1905 i w krótkim czasie stałem się „przypadkowo” dyrygentem „Lutni” gdańskiej, co zadecydowało o moim niemałym udziale w życiu śpiewaczym Pomorza i w systematycznym organizowaniu kół pomorskich w związkach. A było to tak: Podczas misji w kościele św. Józefa w Gdańsku w roku 1906 zaintonował kaznodzieja pieśń „Święty Boże”. Ponieważ organista Niemiec (nazywał się Lewandowski) nie znał tej pieśni pozwolił mi, bym akompaniował na organach, co mi się udało z takim powodzeniem, że polscy śpiewacy będący na chórze „napadli” mnie biednego studenta wprost na chórze i prosili, bym przejął dyrygenturę „Lutni”. Chór ten od dłuższego czasu był bez dyrygenta, gdyż ostatni dyrygent, Niemiec, zawodowy kapelmistrz (i pijak), nie znający ani słowa polskiego, stał się jako dyrygent niemożliwym. W owym czasie istniały co prawda inne towarzystwa polskie w Gdańsku, np. „Jedność”, ale dopiero ruchliwa „Lutnia”, biorąca udział ze śpiewem, grą amatorską i baletem niemal we wszystkich polskich uroczystościach i zabawach, dała nowy rytm i nowe życie Polonii Gdańskiej, z dużym poparciem inteligencji polskiej, tak materialnym jak ideowym. Na zewnątrz promieniowała „Lutnia” nie tylko na przedmieścia gdańskie, ale nawet na całe północne Kaszuby, urządzając wycieczki. A gdy ze śpiewem polskim maszerowaliśmy przez okoliczne miejscowości: Wrzeszcz, Oliwę, Sopot, Gdynię... dochodziły głosy z publiczności niemieckiej – „Ten chór prowadzi student polski”.*

Za polską działalność patriotyczno-społeczną Alfons Hoffman stracił w 1910 roku stypendium cesarskie, przyznane mu za wyróżniające wyniki na studiach, wówczas przyszło mu z pomocą Chełmińskie Towarzystwo Pomocy Naukowej.

Dyplom inżyniera elektryka otrzymał w 1911 roku za obronioną pracę dyplomową na temat elektryfikacji Sopotu, po czym rozpoczął pracę zawodową w dużych zakładach przemysłu elektrotechnicznego w głębi Niemiec. Najpierw w Akwizgranie, potem na Pomorzu w elektrowni wodnej Koronowo a następnie w Berlinie. Będąc w Niemczech wszędzie szukał rodaków i możliwości uczestniczenia w działalności organizacji polonijnych.

Pracując w Akwizgranie dojeżdżał do polskich towarzystw śpiewaczych w Westfalii (fot. 6), a później w Berlinie uczestniczył w pracach polskiego chóru „Harmonia” oraz wykładał matematykę, fizykę i elektrotechnikę w Polskim Towarzystwie Przemysłowców i Stowarzyszeniu Metalowców. Ponadto organizował dokształcające kursy zawodowe dla polskich elektrotechników oraz będąc członkiem Zarządu „Sokoła” na okręg berliński, prowadził ćwiczenia i wykłady dla tutejszej Polonii. Aby uniknąć poboru do wojska niemieckiego, w latach 1914-1916 pracował jako kierownik małej elektrowni w Koronowie. W tym czasie opiekował się również chórem kościelnym, a wśród flisaków nad Brdą organizował wycieczki, spotkania i koncerty. Będąc w Berlinie w 1917 r., brał udział w organizacji Obchodów 100-lecia śmierci Tadeusza Kościuszki. Na zlocie Gniazd Sokolich na stadionie w Berlinie w 1918 r., zaprezentował pokaz polskich tańców narodowych 100-osobowego zespołu, korzystającego z kostiumów gdańskich. Wspominając wydarzenia z okresu swojej działalności prof. Hoffmann napisał: *„Co mnie najbardziej wzruszało i upewniało przed pierwszą wojną światową, że Polska powstanie, to był ten czar i entuzjazm, który budziła polska pieśń w każdym sercu Polaka i dawała – świadomie czy podświadomie – wiarę w przyszłą wolność Polski”.*

W czasie pobytu w Berlinie Alfons Hoffmann (fot. 8) był aktywnym członkiem Towarzystwa Śpiewaczego „Harmonia”. Tam poznał swoją przyszłą żonę poznaniankę Marię Radecką (fot. 7), z którą wziął ślub 11 września 1921 roku w kościele Matki Boskiej Bolesnej w Poznaniu. Po ślubie Hoffmannowie zamieszkali w Toruniu przy ul. Adama Mickiewicza, mieli również dom w Osiu (fot. 9). Maria urodziła w Toruniu dwoje dzieci: syna Mariana (1922-2010) oraz córkę Janinę (1925-1944).

Marian Hoffmann w 1950 roku obronił pracę dyplomową na Wydziale Elektrycznym Politechniki Gdańskiej, a od roku 2016 Oddział Toruński Stowarzyszenia Elektryków Polskich nosi Jego imię. Natomiast córka profesora Hoffmanna – Janina – zginęła w Powstaniu Warszawskim.



Fot. 7. Maria Radecka (Berlin, 1917 r.) [9]



Fot. 8. Alfons Hoffmann (Berlin, 1917 r.) [9]



Fot. 9. Alfons Hoffmann z rodziną przed swoim domem w Osiu (1930 r.) [9]



Alfons Hoffmann w końcu 1918 roku wrócił do Gdańska, gdzie organizował polską administrację na Pomorzu. Jako członek Podkomisariatu Naczelnej Rady Ludowej działał na rzecz przyłączenia Pomorza i Gdańska do Polski. Wchodził także z ramienia Polski w skład komisji ustalającej granicę między Polską a Wolnym Miastem Gdańsk.

### 3. WSPÓŁTWÓRCA POLSKIEGO SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO W OKRESIE MIĘDZYWOJENNYM



Fot. 10. Alfons Hoffmann podczas budowy elektrowni wodnej w Gródku (1922 r.) [9]

Od 1920 roku z ramienia Pomorskiego Urzędu Wojewódzkiego w Toruniu, inżynier Alfons Hoffmann zajmował się elektryfikacją Pomorza [3, 5]. Projektował i budował elektrownie oraz sieci, utworzył połączony system elektroenergetyczny Pomorza i Poznańskiego, elektryfikował Gdynię, wprowadzał pionierskie rozwiązania techniczne, promował korzystanie z energii elektrycznej poprzez szkolenia, ale również przez produkcję sprzętu grzejnego. Latem 1920 roku Alfons Hoffmann z ramienia władz polskich prowadził budowę elektrowni „Gródek” nad Czarną Wodą. Dzięki wielkiemu wysiłkowi, pierwszą turbinę uruchomiono już 24 grudnia 1923 roku w obecności prezydenta prof. Stanisława Wojciechowskiego. Natomiast trzeci turbozespół, w obecności prezydenta prof. Ignacego Mościckiego, uruchomiono 6 sierpnia 1927 roku. Pierwszymi odbiorcami energii elektrycznej z elektrowni Gródek byli mieszkańcy Świecia i okolicznych miejscowości.

Jeszcze podczas budowy elektrowni w Gródku, w roku 1922 Alfons Hoffmann (fot. 10) opracował plan elektryfikacji całego Pomorza, tzw. „Mały Plan Gródka”, oparty na wykorzystaniu 23 elektrowni oraz sieci przesyłowej o napięciu 60 kV, łączącej główne źródła zasilania. W planie tym przewidywano budowę dziewięciu nowych elektrowni wodnych, m.in. Żur, Tleń i Tzew.

W związku z koniecznością elektryfikacji portu gdyńskiego, Alfons Hoffmann w roku 1927 przystąpił do budowy nowej elektrowni w Żurze [2, 5].

Jednocześnie wybudowano 140 km linię elektryczną o napięciu 60 kV z „Gródka” i „Żuru” do Gdyni. Projekty poszczególnych obiektów elektrowni powstały pod kierownictwem inż. Hoffmanna i prof. Pomianowskiego. Budowa składała się z kilku zasadniczych elementów: zapory ziemno-glinianej spiętrzającej o ponad 15 m wody rzeki Wdy, kanału roboczego o długości 850 m, tzw. zlewu wodnego oraz leżącej o 15,2 m niżej hali maszyn, czyli głównego obiektu produkującego energię elektryczną. W celu transportu materiałów budowlanych i urządzeń wybudowano 5 km linię kolejki wąskotorowej z Żuru do stacji kolejowej w Osiu. Prace przy budowie – co było wów-



czas nowością – prowadzono na trzy zmiany, w tym w nocy przy świetle reflektorów. Przy budowie, w szczytowym okresie prac, zatrudnionych było około 1500 osób, w większości mieszkających w okolicy. Mieszkańcy okolicznych miejscowości oraz pracownicy budowanych elektrowni darzyli inż. Hoffmanna ogromnym szacunkiem i uznaniem, o czym świadczy fragment zatytułowany „Inżynier Hoffmann a światło w leśniczówce” z opowiadania „Oskar – leśniczy z Wydry. Opowieść o ojcu”, napisana przez syna leśniczego Oskara Vogta [4]:

*„Epokowym zdarzeniem w historii leśniczówki Wydry, które wywarło znaczący wpływ na warunki życia, a nawet na późniejsze losy jej mieszkańców, było spotkanie leśniczego Oskara Vogta z budowniczym elektrowni w Żurze inż. Alfonsem Hoffmannem, jesienią 1927 roku. ...*

*... Na ponad czterokilometrowym odcinku prawego brzegu Wdy, budowa zbiornika wodnego i zamykającej go zapory prowadzona była na terenach lasu Leśnictwa Wydry. Z ramienia Lasów Państwowych leśniczy Oskar Vogt brał udział w wytyczaniu linii brzegowej przyszłego zbiornika, a następnie kierował usuwaniem krzewów i drzew z obszaru zalewu. ... W toku realizacji tych zadań leśnych Oskar nieraz spotykał się z inż. Alfonsem Hoffmannem, który kierował projektem, a potem realizacją całego zadania inwestycyjnego. Obaj panowie przypadli sobie do gustu, zaprzyjaźnili się, choć stosowny dystans został na zawsze zachowany. Ojciec nie zwracał się nigdy inaczej, niż per "panie inżynierze". Zaczęli razem spędzać czas również pozasłużbowy. Ojciec wspominał mi, jak to oprowadzał inżyniera Hoffmanna po różnych ciekawszych obszarach Leśnictwa Wydry, jak zimą 1927 roku polowali razem na kaczkę nad zatopionymi potem brzegami Wdy. W spotkaniach tych rozmowa schodziła często ze spraw służbowych na różne inne tematy życia codziennego. W toku którejś z tych rozmów inż. Hoffmann napomknął, że w obecnym miejscu swego zakwaterowania służbowego nie ma wygodnych warunków do pracy i wypoczynku. Oskar się nie zastanawiał, w swoich decyzjach często był bezpośredni, żywiołowy, impulsywny. Zaprosił inżyniera do zamieszkania w leśniczówce. Miejsca jest dość, opału na zimę nie zabraknie, a wyżywienie i obsługa też się znajdzie. O zapłacie oczywiście nie ma mowy. Nie będzie to wynajem. Leśniczy przecież może przyjmować gości.*

*Inżynier Hoffmann propozycję Oskara przyjął bez większego wahania. Zima 1927/1928 roku była ostra. A budynek leśniczówki murowany, ciepły, pokój wygodny i blisko do miejsca realizowanej budowy. Zamieszkał w dużym pokoju ogrzewanym piecem kaflowym na pierwszym piętrze leśniczówki, z dwoma oknami, wychodzącymi na rzekę i budowaną za nią elektrownię. Inżynier mieszkał i pracował w leśniczówce od późnej jesieni 1927 roku do wiosny 1929 roku, dopóki nie otrzymał zakwaterowania w budowanym właśnie pensjonacie elektrowni. Zaprzyjaźniony jednak już z mieszkańcami leśniczówki, często do niej zaglądał. Chyba w rewanżu za gościnę przy świecach i lampach naftowych w długie jesienne i zimowe wieczory, inż. Hoffmann postanowił leśniczówkę Wydry zelektryfikować! Wystąpił sam z kosztorysem ofertowym do Nadleśnictwa Szarlata, ale otrzymał stamtąd odpowiedź odmowną. Nadleśnictwo nie miało środków na taki luksus. Zresztą samo tonęło w nocnych ciemnościach. Inne leśniczówki na całym Pomorzu też nie miały elektrycznego światła i Wydry, choć są tak blisko budowanej elektrowni – też go mieć nie muszą! Oburzył się Hoffmann na taką ciemnotę argumentów i postanowił, że w takim razie sfinansuje zelektryfikowanie leśniczówki Wydry ze środków realizowanej inwestycji. Jak postanowił, tak zrobił. Sam wykonał projekt techniczny linii doprowadzającej energię od elektrowni oraz instalacji licznika i sieci elektrycznej w obiektach leśniczówki. Światło otrzymały wszystkie pomieszczenia*

*parteru, piętra i piwnicy budynku mieszkalnego, wszystkie pomieszczenia budynku dla inwentarza oraz punkty świetlne nad gankiem na podwórku przed domem mieszkalnym i przed budynkiem inwentarza w podwórzu gospodarczym. W każdym pomieszczeniu zainstalowany był włącznik, punkt świetlny i jedno gniazdko wtykowe dla dodatkowego odbiornika prądu. Już latem 1929 roku stanęły słupy linii elektrycznej w polu, jesienią zainstalowano przewody linii doprowadzającej i sieci odbioru prądu, a z chwilą uruchomienia pierwszej turbiny Elektrowni Żur 22 grudnia 1929 roku, światła elektryczne rozświetliły też zabudowania leśniczówki Wydry! To dopiero były Święta! Była to wówczas pierwsza i jedyna na Pomorzu, a być może nawet w całej Polsce, leśniczówka oświetlona światłem elektrycznym. Nie dziw zatem, że osiągnięcia tego zazdrościli Oskarowi wszyscy jego koledzy – leśnicy. I zapewne nie tylko oni”.*

Po zakończeniu budowy elektrowni w Żurze, w uruchomieniu turbin w dniu 15 lutego 1930 roku, uczestniczył prezydent Rzeczypospolitej Polskiej prof. Ignacy Mościcki (fot. 11). Otwarcie tej elektrowni było głównym elementem uroczystości związanych z 10-leciem powrotu Pomorza do Polski. Żur stał się wtedy największą elektrownią w kraju, stanowiącą wraz z Gródkiem, rdzeń systemu energetycznego Pomorza. Ów rdzeń wspomagany był przez elektrownie parowe w Grudziądzu, Toruniu, później także w Gdyni.



Fot. 11. Uruchomienie elektrowni wodnej w Żurze z udziałem Prezydenta Mościckiego (15.02.1930 r.) [9]

W wyniku budowy elektrowni powstał sztuczny zbiornik o powierzchni 440 ha i długości około 12 km, zwany Zalewem Żurskim. Przyczyniło się to do rozwoju turystycznego gminy Osiek, a w szczególności Tlenia. Jeszcze w latach 30. XX w. zaczęły tam powstawać hotele i ośrodki wypoczynkowe. Dzięki temu Tleń stał się prawdziwą turystyczną perłą Borów Tucholskich. Jego uroki krajobrazowo-turystyczne popularyzował w okresie międzywojennym Alfons Hoffmann poprzez organizowanie obozów dla harcerzy oraz zjazdów i wycieczek dla członków Stowarzyszenia Elektryków Polskich (fot. 13) oraz Związku Elektrowni Polskich (fot. 12), a także poprzez tworzenie kół kajakowych, które urządzały spływy Brdą, Drwęcą, Wisłą, Wdą oraz po jeziorach Szwajcarii Kaszubskiej. W najciekawszych zakątkach Zalewu Żurskiego zbudowano specjalne przystanie, wokół niego zaś wytyczono trasę spacerową zwaną „Promenadą Hoffmanna”.



Fot. 12. Zjazd Kierowników Elektrowni Wodnych województwa Pomorskiego (w pierwszym rządzie od prawej (z kapeluszem w ręku) Alfons Hoffmann, czwarty (chłopiec) Marian Hoffmann, Żur-Osie, 1931 r.) [9]



Fot. 13. Wycieczka członów Stowarzyszenia Elektryków Polskich po zalewie Żurowskim (Żur, 1935 r.) [9]

Mieszkając przez wiele lat w Toruniu (fot. 14), Alfons Hoffmann dzięki swoim dzieciom – synowi Marianowi i córce Janinie (fot. 15) – został na samym początku lat 30. włączony w działania Związku Harcerstwa Polskiego [8]. Mimo wielu zajęć związanych z pracą zawodową i społeczną w wielu organizacjach znajdował czas na działalność na rzecz dzieci i młodzieży.

W 1932 roku był założycielem i prezesem Koła Przyjaciół Harcerstwa w Toruniu, funkcjonującego przy Szkole Ćwiczeń i Państwowym Seminarium Nauczycielskim. Działał na rzecz uzyskania przez drużyny i zuchów koniecznego sprzętu obozowego, pomagał w organizacji zlotu Pomorskiej Chorągwi Harcerstwa w 1932 roku w Garczy-

nie k. Kościerzyny oraz Międzynarodowego Zlotu Skautów Wodnych nad jeziorem Garczyn. Dbał o powszechność stroju harcerskiego, wzbogaconego chustami z haftem kaszubskim. Organizował wycieczki i obozy toruńskich harcerzy w pobliżu Gródka i Osia w Borach Tucholskich (fot. 16), nad morzem i w górach. Hoffmann był zwolennikiem wychowywania młodzieży w duchu katolickim i narodowym, protestował przeciwko upolitycznianiu harcerstwa.



Fot. 14. Rodzina Hoffmannów (Toruń, lata 30. ub.w.) [9]



Fot. 15. Marian i Janina Hoffmann (lata 30. ub.w.) [9]





Fot. 16. Alfons Hoffmann wśród harcerzy (Bory Tucholskie, lata 30. ub.w.) [9]

Alfons Hoffmann jako obywatel Torunia (fot. 17) uczestniczył w bogatym życiu kulturalnym miasta. Był członkiem Towarzystwa Naukowego w Toruniu; 19 lutego 1929 roku brał udział w uroczystości odsłonięcia tablicy pamiątkowej na domu rodzinnym Mikołaja Kopernika, ufundowanej z inicjatywy Stowarzyszenia Techników w Toruniu, którego był aktywnym członkiem. Patronował również śpiewactwu pomorskiemu, w latach 1937-1938, jako prezes Pomorskiego Związku Śpiewaczego, zainicjował zbieranie dokumentów i materiałów do opracowania historii ruchu śpiewaczego na Pomorzu.



Fot. 17. Maria i Alfons Hoffmannowie z córką Janiną (Toruń, lata 30. ub.w.) [9]

Alfons Hoffmann był wielkim propagatorem grzejnictwa elektrycznego i stosowania energii elektrycznej w gospodarstwach domowych [3, 5]. W latach 1932-1933 zbudował w Gródku Fabrykę Grzejników Elektrycznych o doskonałej jakości, która produkowała kuchenki domowe, bojler, grzejniki i żelazka elektryczne oraz duże kuchnie elektryczne. Fabryka w Gródku zatrudniała ponad 400 pracowników. Organizowane były salony pokazów grzejnictwa elektrycznego z kursami przygotowywania potraw, na których instruktorką była jego żona Maria.

W okresie międzywojennym Alfons Hoffmann prowadził aktywną działalność w Stowarzyszeniu Elektryków Polskich [5]. W roku 1921 założył Toruńskie Koło SEP i w latach 1921-1931 był jego pierwszym prezesem. Obok działalności w tym oddziale, Alfons Hoffmann był również zaangażowany w prace Zarządu Głównego SEP. W roku 1937 został wybrany na prezesa SEP na kadencję 1937-1938. Z Jego inicjatywy X Walny Zjazd SEP w dniach 26-30 lipca 1938 r. odbył się w Gdyni, częściowo na Bałtyku na MS Piłsudski (fot. 18 i 19). Zjazd otworzył prezydent RP Ignacy Mościcki. Również po wojnie brał udział w pracach SEP, zarówno w Oddziale Gdańskim, jak również na forum krajowym. W 1959 roku uczestniczył w Jubileuszowym Zjeździe 40-lecia SEP, a w 1961 roku na XIV Zjeździe SEP w Szczecinie otrzymał najwyższą godność w Stowarzyszeniu – tytuł członka honorowego SEP.



Fot. 18. Rodzina Hoffmannów przy nabrzeżu z cumującym m/s Piłsudski w porcie w Gdyni (1938 r.) [9]

Kolejnym nurtem działalności społecznej Alfonsa Hoffmanna była praca w Związku Elektrowni Polskich, trwająca nieprzerwanie od roku 1921 do 1939. W latach 1925/1926 i 1927/1929 był wiceprezesem, a w 1929/1930 prezesem tego Związku. Ponadto działał w komisjach Związku: Ustawodawczej oraz Miar Elektrycznych.



Fot. 19. Maria i Alfons Hoffmannowie z kpt. Mamertem Stankiewiczem na Zjeździe SEP (Bałtyk, MS Piłsudski, 1938 r.) [9]

W końcu 1938 roku Alfons Hoffmann został dyrektorem Śląskich Zakładów Elektroenergetycznych „*Ślązel*”. Podobnie jak na Pomorzu, tak i na Śląsku inżynier Alfons Hoffmann wkładał wiele wysiłku w sprawy polskiej elektroenergetyki, który miał na celu szybkie uniezależnienie jej od energetyki niemieckiej. Rozpoczął intensywną rozbudowę Zakładów i przedstawił wizję budowy nowoczesnego koncernu zarządzanego przez personel polski o najwyższych kwalifikacjach.

#### 4. OKRES PRACY W LATACH 1939-63

Po wybuchu wojny we wrześniu 1939 roku Alfons Hoffmann ścigany przez okupanta znalazł się w Lublinie, a potem we Lwowie [3, 5]. We Lwowie, który w tym czasie był pod okupacją sowiecką, pracował jako konstruktor w Spółdzielni Pracy Elektrogrzejnictwa oraz w Ukrkomenergo. Po zajęciu Lwowa przez Niemców w roku 1941 przedostał się do Warszawy, gdzie ukrywał się pod przybranym nazwiskiem Alfred Hamerski w Międzyzlesiu koło Warszawy, u swojego przyjaciela dyrektora Fabryki Aparatów Elektrycznych Kazimierza Szpotańskiego. Do roku 1944 pracował tam jako kierownik kuźni i blacharni. W czasie okupacji aktywnie działał w ruchu oporu, wraz z kolegami ze Stowarzyszenia Elektryków Polskich, dla Delegatury Rządu na Kraj, opracował plan elektryfikacji Polski do roku 1956, pod kryptonimem „Projekt Z i sprawy organizacyjne”. Projekt ten został wykorzystany po wojnie przez Centralny Zarząd Energetyki w Warszawie. Alfons Hoffmann w czasie swojego pobytu w okupowanej Warszawie brał również udział w pracach normalizacyjnych XI Komisji Linii Napowietrznych SEP, która działając pod przewodnictwem H. Tamawskiego opracowała projekt normy „Linie elektryczne napowietrzne prądu silnego”.

Pod koniec wojny do Warszawy przybyła z Krakowa jego żona wraz z córką Janiną, która jako 19-letnia sanitariuszka powstania zginęła śmiercią męczeńską w szpitalu powstańczym przy ul. Długiej, spalonym wraz z rannymi przez Niemców. Po upadku powstania, jako Alfred Hamerski, został wywieziony na przymusowe roboty do Szczytnej k. Kłodzka.

Po wyzwoleniu Alfons Hoffmann powrócił na Pomorze i przystąpił do odbudowy ze zniszczeń wojennych i uruchamiania elektrowni wodnych. W latach 1945-1949 kierował odbudową elektrowni Bielkowo i Łapino na rzece Raduni oraz w Dychowie na Bobrze. Kształcił wówczas, z budowy turbin wodnych i hydrologii, kierowników i maszynistów siłowni wodnych całej Polski na kilkutygodniowych kursach w Żurze i Straszynie.

Przy odbudowie kraju pracował do końca lat czterdziestych, ponieważ ze względów politycznych ówczesne władze odsunęły go od prac o strategicznym znaczeniu dla rozwoju elektroenergetycznego Polski. Tylko w niewielkim stopniu wykorzystano jego fachowe umiejętności i zdolności organizacyjne. Od końca 1949 roku pracował w Zakładzie Elektroenergetyki Politechniki Gdańskiej u prof. Kazimierza Kopeckiego, który chętnie zatrudnił swojego dawnego dyrektora z Gródka. W tym czasie Alfons Hoffmann swoją aktywność oraz zdolności poświęcił nauce i dydaktyce prowadzonej w murach uczelni, w której studiował i prowadził wśród mieszkańców Pomorza działalność w czasie pruskiego zaboru. W latach 1949-1955 wykładał studentom to, co znał najlepiej z teorii i praktyki: elektrownie, projektowanie sieci elektrycznych oraz grzejnictwo elektryczne. Organizował wycieczki techniczne do elektrowni wodnych na rzece Wdzie w Gródku i Żurze oraz do elektrowni na rzece Raduni.

Alfons Hoffmann był również ekspertem technicznym Zjednoczenia Energetycznego Okręgu Bydgosko-Toruńskiego ds. budowy elektrowni wodnej w Koronowie. Z inicjatywą zbudowania stopnia wodnego Koronowo wystąpił już w końcu lat dwudziestych. Jako dyrektor „Gródka” zlecił opracowanie projektu prof. Karolowi Pomianowskiemu z Politechniki Warszawskiej.



Fot. 20. Profesor Alfons Hoffmann (Gdańsk, 1958 r.) [9]

Po osiągnięciu wieku 70 lat, w 1955 roku zakończył zajęcia dydaktyczne, natomiast prowadził dalej działalność naukowo-badawczą [3, 5]. W 1953 roku rozpoczął pracę jako generalny projektant w Biurze Studiów Gospodarki Wodnej, a potem jako kierownik Zakładu Konstrukcji Wodnych i Śródlądowych w Instytucie Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku. Tam też w 1957 roku otrzymał tytuł profesora nadzwyczajnego (fot. 20 i 21). Został członkiem Komitetu Gospodarki Wodnej oraz Komitetu Elektryfikacji Polski PAN. Opracował Kataster 24 rzek Pomorza, badania modelowe dla zapory i elektrowni wodnej w Solinie na Sanie oraz układów chłodzenia elektrowni cieplnych.

Po przejściu na emeryturę w końcu 1958 roku pracował nadal zawodowo i społecznie, opracował m.in. koncepcję ogrzewania akumulacyjnego dla odbudowującego się zamku-muzeum w Malborku. Dla przedsiębiorstwa Hydroprojekt w Warszawie opracował kataster teoretycznych zasobów sił wodnych w Polsce, a wraz z synem Marianem (specjalistą w dziedzinie energetyki wodnej) – kataster technicznych zasobów wszystkich większych krajowych rzek. Wystąpił z koncepcją budowy elektrowni szczytowo-pompowej na Jezio-



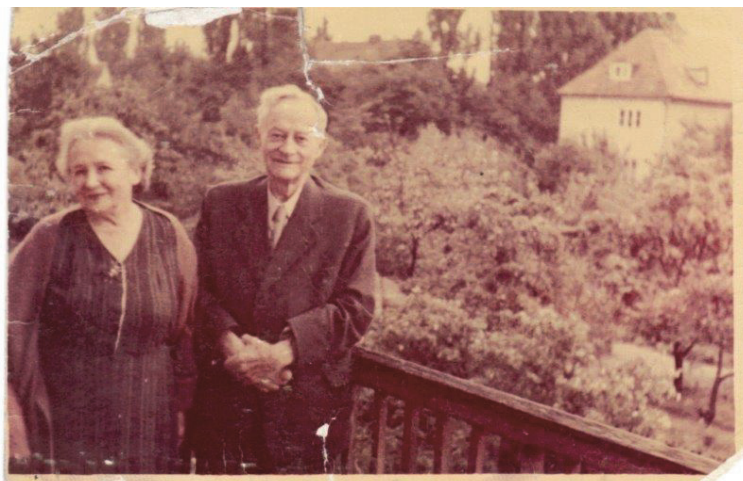
rze Żarnowieckim – Elektrownia Wodna Żarnowiec zrealizowana została w latach 1973-1983 i jest największą w Polsce elektrownią szczytowo-pompową.



Fot. 21. Profesor Alfons Hoffmann z żoną Marią na wycieczce (lata 60. ub.w.) [9]

Hoffmann był autorem wielu prac naukowych i patentów. Odznaczony został Złotą Odznaką z Wieńcem Laurowym Zjednoczenia Polskich Zespołów Śpiewaczych i Instrumentalnych, Złotą Odznaką NOT i SEP, Złotą Odznaką Miasta Gdańska, Złotym Krzyżem Zasługi oraz Krzyżem Oficerskim Orderu Odrodzenia Polski.

Profesor Alfons Hoffmann (fot. 22) po ciężkiej chorobie zmarł 30 grudnia 1963 roku, został pochowany na cmentarzu Srebrzysko w Gdańsku-Wrzeszczu, w kwaterze zasłużonych profesorów Politechniki Gdańskiej. Spoczywa w grobie rodzinnym, obok swojej żony Marii, syna Mariana i symbolicznych prochów córki Janiny (fot. 23).



Fot. 22. Profesor Alfons Hoffmann z żoną Marią (Gdańsk, sierpień 1963 r.) [9]

Kondukt pogrzebowy prowadził ordynariusz Chełmiński ks. biskup Kazimierz Kowalski. Młodszy koledzy Profesora z Politechniki Gdańskiej Bolesław Pyszora i Tomasz Biernacki tak napisali o Nim: „Pogrzeb jego był wielką manifestacją i hołdem złożonym temu zasłużonemu synowi Ziemi Pomorskiej, nie tylko przez Państwo i świat naukowy, ale całe społeczeństwo pomorskie. Odszedł, ale pozostawił pamięć doskonałego praktyka, zamilowanego naukowca i człowieka prawego, poświęcającego całe swoje życie pracy dla ukochanej Ojczyzny. ... Odszedł od nas człowiek odznaczający się nie tylko wybitnymi kwalifikacjami naukowymi, znakomity organizator, popularyzator wiedzy, wielki działacz społeczny i gorący bojownik polskości Pomorza, ale przede wszystkim Człowiek kryształowego charakteru, nieskazitelnej prawości i dobroci oraz głębokiej kultury”.

Wdzięczne społeczeństwo Pomorza nie zapomniało o Profesorze. W wielu miejscach, w których żył i tworzył, odsłonięte zostały tablice pamiątkowe [6, 7]: w Grudziądzu na domu, w którym się urodził i w Bazylice Mniejszej, w Bydgoszczy – w Domu Technika NOT, w elektrowniach Gródek i Bielkowo, w Toruniu – na budynku, w którym powstało pierwsze Koło Elektrotechników Polskich oraz w Jego Alma Mater – Politechnice Gdańskiej. Są ulice jego imienia: w Bydgoszczy, Grudziądzu, Gródku, Straszynie, Toruniu, aleje w Żurze i Tleniu. Jest patronem szkoły w Gródku.



Fot. 23. Grób rodzinny profesora Alfonsa Hoffmanna, Gdańsk, 2016 r. (fot. Ryszard Roskosz)

Profesor Alfons Hoffmann żyje nadal w naszej pamięci jako jeden z najwybitniejszych Polaków z Pomorza, współtwórca polskiej elektroenergetyki. Nie doczekał wolnej, niepodległej Polski, ale zostawił nam testament zawarty w słowach Hymnu Pomorza:

*Ziemia Pomorska kraju dogi  
Nie wydarł nam Cię wróg  
Bo nas od wieków w walce srogiej  
Wiódł zew, Ojczyzna Bóg.  
Polsko, Ojczyzno Matko Święta  
Dla Ciebie dzierżym tu straż  
Jest w nas wytrwania moc zaklęta  
A wiara to puklerz nasz.*

Podziękowanie

Autorzy dziękują mgr. inż. Tomaszowi Hoffmannowi, wnukowi Profesora, za udostępnienie zdjęć z albumu rodzinnego prof. Alfonsa Hoffmanna, które zostały wykorzystane w tym artykule.

LITERATURA

- [1] Borzyszkowski J., 1988. Prof. inż. Alfons Hoffmann – działacz społeczny i niepodległościowy Pomorza. Praca zbiorowa, Zasłużeni dla Polskiej Elektryki. SEP O. Bydgoski, Gdański, Toruński.
- [2] Chudecki M., 2016. Elektrownie wodne w Gródku i Żurze – cenne elementy krajobrazu kulturowego Wdeckiego Parku Krajobrazowego. Wydawnictwo Unitex Sp. z o.o. Bydgoszcz.
- [3] Domżański T., 2015. Prof. Alfons Hoffmann (1885-1963). Wybitny pionier polskiej elektroenergetyki i elektrotermii. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej 44.
- [4] Fogt A., 2016. Oskar leśniczy z Wyder (<http://parki.kujawsko-pomorskie.pl>, dostęp 15.09.2016 r.).
- [5] Świadectwo pamięci – wspomnienie o profesorze Alfonsie Hoffmannie, 2002. Materiały Seminarium, Zakład Energetyczny Toruń – Bydgoszcz.
- [6] Świsulski D., 2015. Upamiętnienie polskich elektryków. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej 44.
- [7] Świsulski D., 2016. I Sympozjum Historia Elektryki, Spektrum, lipiec – sierpień (7-8), s. 33-41.
- [8] Zuba L., 1988. Życiorys i działalność prof. inż. Alfonsa Hoffmanna. Praca zbiorowa, Zasłużeni dla Polskiej Elektryki. SEP O. Bydgoski, Gdański, Toruński.
- [9] Fotografie z albumu rodzinnego prof. Alfonsa Hoffmanna w zbiorach wnuka Tomasz Hoffmanna.

PROFESSOR ALFONS HOFFMANN,  
AUTHORITY OF POLE AND ELECTRICIAN –  
CO-FOUNDER OF POLISH POWER INDUSTRY

REVIEW

Summary

The paper presents the profile of Alfons Hoffmann, an outstanding engineer, pioneer and co-founder of the power system in Poland, the activist of society and state. During his studies at the King's Higher Education Technical School in Gdansk and later he actively supported the Polish identity, promoting the Polish language, music and folklore. Diploma in electrical engineering he received in 1911, after which he gained practice working in German industry. In 1918, as a member of the Subcommissioner of Supreme People's Council he organized the building hydroelectric power plants in Gródek and in Żur, also he has created a connected power system of Pomerania, worked on electrification of Gdynia,

promoted the use of electricity through the production of heating equipment and training users. After the II WW, the engineer Alfons Hoffmann started to rebuild from the devastation of war hydroelectric power plants on the river Radunia and Dychów on the Bóbr. In 1949, for political reasons, he have been slid from work with strategic importance for Polish power industry. Since the end of 1949, he started to taught at the Gdansk University of Technology and work in the Office of Water Management Studies of Polish Academy of Sciences. Professor Alfons Hoffmann has been working until the last days of his life. He Rests in the Srebrzysko cemetery in Gdansk-Wrzeszcz.

Keywords: Alfons Hoffmann, pioneers of electric power, history of electrical engineering

## EXAMPLES OF MODERN ENERGY CONVERSION

Małgorzata Dutka

University of Technology and Life Science  
Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz  
gosia\_dutka@onet.eu

*Summary:* The article presents examples of modern methods of electrical energy processing and transmission. Nowadays, not only is renewable energy important but also the everyday wireless transmission of it. The article describes the photovoltaic cell as a renewable energy source, and applications of photovoltaic modules depending on materials they are made of what influences their efficiency. The example of the plane Solar Impulse illustrates photovoltaic modules application. The second part of the article is devoted to the mechanism and applications of wireless energy transmission without physical contact between the source and load objects. An idea of transmission energy using magnetic coupling resonance between two objects, when energy loss is minimised, was used in the project WiTricity, developed at MIT.

Keywords: efficiency, photovoltaic panels, wireless energy transmission, magnetic coupling resonance

### 1. INTRODUCTION

A term “electrical energy production” refers to obtaining energy from natural resources and its conversion into electrical energy. In this context a word “production” is not a precise expression because it is only conversion of energy, which is enclosed in energy resources (fuels) or energy connected with the forces of nature, into electrical energy. As primary sources of energy we could classify chemical substances, heat from the inside of the Earth, solar radiation and gravity forces connected with planetary motion. From the ecological point of view modern technology strives for obtaining energy from renewable sources. An important aspect of using renewable sources, classification of which is presented in Fig. 1, is efficiency of energy conversion process which directly influences investment profitability of every branch of power industry [5].

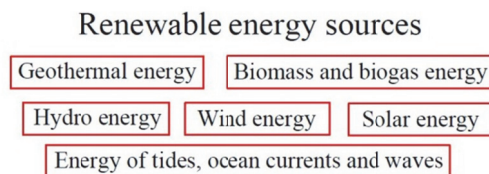


Fig. 1. Renewable energy sources classification



Conversion of energy from different sources into electrical energy always occurs with loss caused for example by heat dissipation in the environment, friction or loss connected with field and electromagnetic wave dissipation. The issue of modern energy conversion is not only obtaining energy from renewable sources, as presented in the article efficient exploitation of solar energy in photovoltaic modules, but also energy transfer for mid-range distance without any loss in a wireless way, using magnetic coupling. In this case electrical energy converts into magnetic field energy.

## 2. PHOTOVOLTAIC CELLS

### 2.1. CONSTRUCTION OUTLINE AND OPERATION PRINCIPLE

Depending on the type of semiconductor material used in the cell the following types of cells are distinguished: homogeneous semiconductors, which in case of lighting radiation increase electric conduction of the material, and heterogeneous semiconductors consisting of doping semiconductors forming p-n junction in which potential barrier is created as a result of photovoltaic effect occurrence. Depending on materials used in the junction construction various band gaps can be obtained. Photovoltaic effect can be described as an increase of an electron's energy level following the interception of a photon and, consequently, creating potential hill at the interface between two types of doping semiconductors (n-doping and p-doping) [1, 3, 5].

Photovoltaic cell consists of a number of layers as presented in Fig. 2. In the cell's structure, the following parts of the cell are shown: lower contact, then p-doping semiconductor, which is responsible for absorbing radiation, and n-doping semiconductor, which is transparent for solar radiation. The next layer is made of transparent conductive oxide (TCO), which combines antagonistic attributes. On the one hand, it is a good conductor but on the other, has high transparency for electromagnetic waves in a range of solar radiation. The outer layer of the cell is glass or plastic (PET – polyethylene terephthalate) which is at the same time the upper contact [7]. The efficiency of energy conversion depends on the amount of energy reflected and scattered in the upper cell layers. In order to consider the most efficient energy conversion in solar cells we should describe an equivalent circuit of a real cell and the following from it reasons of energy losses.

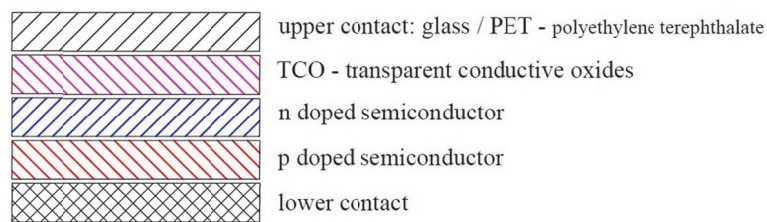


Fig. 2. Cross section through a photovoltaic cell with heterogeneous semiconductor [source: datasheet Konsorcjum ATS] [3]

Figure 3 shows a basic one-diode equivalent circuit [1]. The aim is for the biggest shunting resistance representing ways of current leakage along the edge of the cell, and

for the lowest possible series resistance representing resistances of contacts and particular layers of the cell. The ideal case is  $R_s \rightarrow 0$  and  $R_b \rightarrow \infty$ . In order to gain the maximum efficiency of a solar cell the optimal possible load resistance needs to be chosen. A narrow range of loads for maximum efficiency makes it necessary for solar cells to be equipped with load optimisation system depending on changing working conditions. Optimal load resistance is a quotient of voltage in maximum power point to current in the same point at a given moment, depending on irradiance and temperature. In order to achieve the biggest efficiency under constant load it is suggested to use Maximum Power Point Tracking Algorithm, as the voltage curve depends not only on temperature but also on irradiance. This regulator is equipped with a DC/DC converter and an algorithm of maximum power point tracking. Consequently, irrespective of the input voltage, the regulator ensures suitable power compatibility of the photovoltaic module, at the same time making the PV panel work with the best possible adjusted voltage and current transforming it into appropriate charging voltage by use of DC/DC voltage input/output filling factor, which is equivalent to a transformer voltage ratio in AC technology [5].

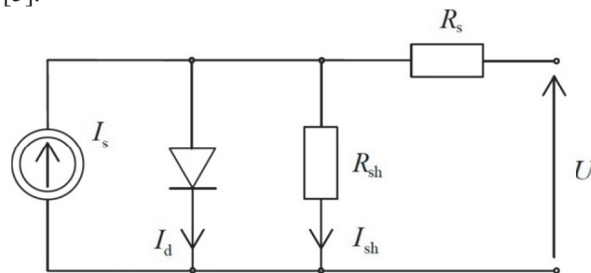


Fig. 3. One-diode equivalent circuit of photovoltaic cell [1]:  $I_s$  – solar current,  $I_d$  – diode current,  $I_{sh}$  – shunt resistance current,  $R_{sh}$  – shunt resistance,  $R_s$  – series resistance,  $U$  – load voltage

## 2.2. TEST STAND FOR PV PANELS

The test stand for measuring current-voltage characteristics and efficiency of solar modules is located in Renewable Energies Laboratory in the Institute of Electrical Engineering of J.J. Śniadecki University of Technology and Life Sciences in Bydgoszcz. Measuring instruments used in the tests were: ammeter, voltmeter, luxmeter and thermometer. The three tested modules included: an elastic monocrystalline silicon module ATS100-10654-FLEX of nominal power 100 W (Fig. 4), a monocrystalline silicon module with inflexible ground SFE.MF-6-225 of nominal power 255 W and a polycrystalline silicon module SFE F 50/12 FR of nominal power 50 W.



Fig. 4. Tested flexible panel with nominal power 100 W [source: datasheet Konsorejum ATS]

It should be noted that the unique construction of the flexible monocrystalline module enables its installation on irregular rugged surfaces without using any special load-bearing construction for example aboard yachts or roofs of electrical vehicles. These properties are ensured by using the structural layer made of TPT – polymer plaster, a shock-absorbing layer made of EVA – poly(ethylene-vinyl acetate) and covering layer made of PVDF – polyvinylidene fluoride – which is chemical-resistant (Fig. 5).

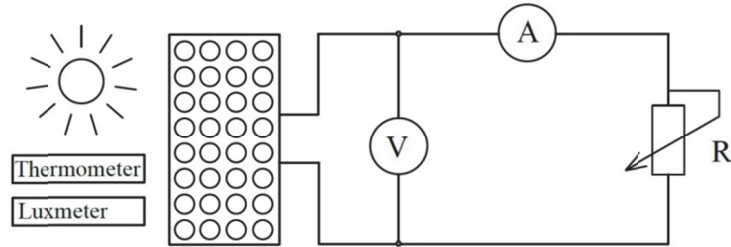


Fig. 5. Circuit used for testing efficiency of silicone photovoltaic panels

### 2.3. TEST METHODS

In order to determine current-voltage curve and module power curve, depending on the load, the circuit was connected as in Figure 5. The experiment was performed September 13, 2016, from 11:30 am to 12:00 am. There was full sun exposure and the sky was cloudless. Modules were placed parallel to the ground. Moreover, the temperature of modules surface was measured taking the mean value of the start and the end of experiment. Modules' surface heats up during measurements and efficiency could decrease in function of temperature. Resistance in the panel's circuit was controlled from 0 to 10000  $\Omega$ .

### 2.4. TEST RESULTS AND CONCLUSIONS

In Figures 6, 7 and 8 results from the research are presented as current-voltage curves and power curves of modules. Moreover, maximum power points (MPP) were read. Table 1 below presents results of the performed tests and calculations for silicon modules of the mono and polycrystalline structure.

Table 1. Test results

Type of module		Monocrystalline flexible	Monocrystalline	Polycrystalline
Maximum Power Point $P_{max}$	W	53.54	168.57	15.76
Fill Factor	%	75.38	68.02	87.79
Light intensity $E$	lx	74980	78970	78980
Surface area $S$	m <sup>2</sup>	0.524	1.460	0.292
Temperature of surface	°C	48	43	47
Optimal resistance $R_{op}$	$\Omega$	4.16	5.66	2.33
Efficiency $\eta$	%	13.62	14.62	6.83
Current density $J_{sc}$	A/m <sup>2</sup>	7.31	4.89	9.11
Maximum power on unit of surface	W/cm <sup>2</sup>	102.18	115.46	53.97



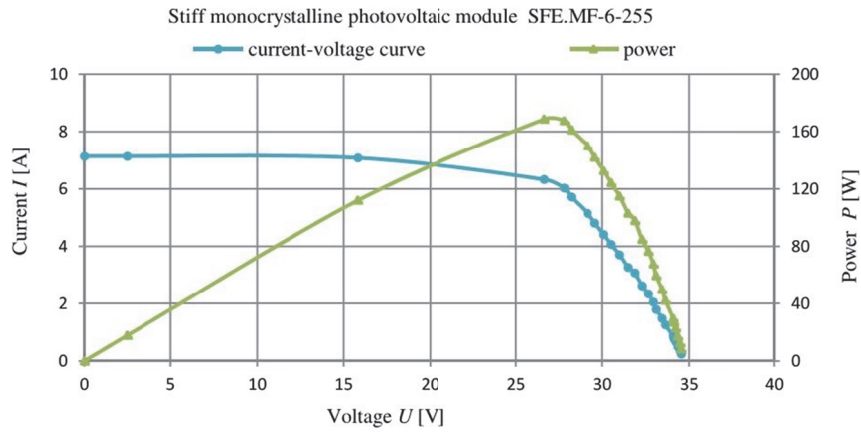


Fig. 6. Characteristics for flexible monocrystalline photovoltaic module

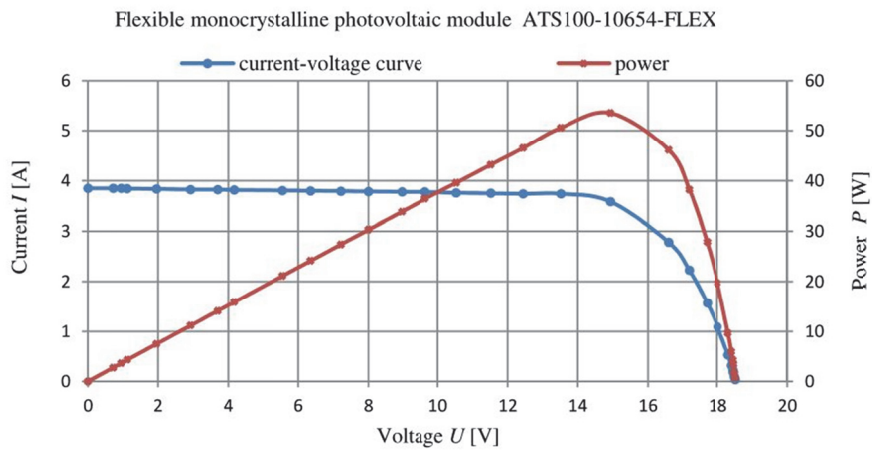


Fig. 7. Characteristics for stiff monocrystalline photovoltaic module

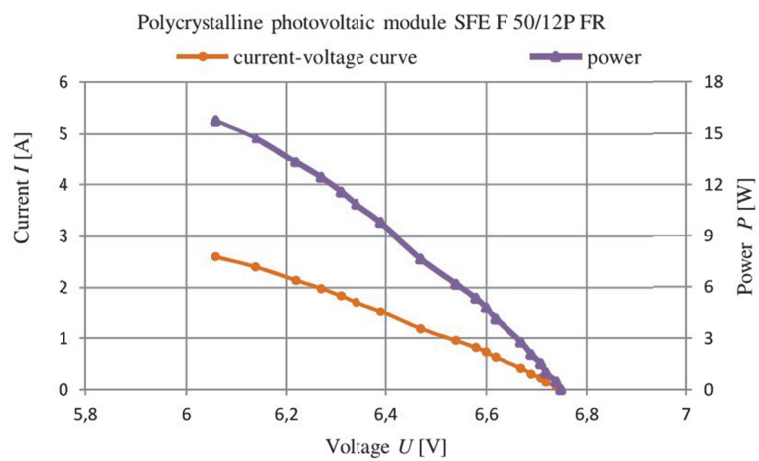


Fig. 8. Characteristics for polycrystalline photovoltaic module

It should also be noted that a stiff module weighs 19 kg, while a flexible module weighs only 1.35 kg. The calculated mass to 100 W power ratio has shown that the stiff module is 5.6 times heavier than the elastic one. The observed efficiency of the elastic module is only 1% lower than that of the inflexible module what points to very good properties of energy conversion of the flexible construction as compared to the rigid construction.

Measurements for all modules were made in similar exposure to sunlight conditions and module surface temperature. Moreover, every possible effort was made not to shade any part of the module. For polycrystalline module it was obtained power 15.76, but it could appear higher maximum power. The calculations were ran assuming converting coefficient for radiant flux (lm) to radiant power (W) as 0,01 for solar radiation [6]. The module Fill Factor is a quotient of maximum power to product of short-circuit current and open-circuit voltage [4]:

$$FF = \frac{P_{\max}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (1)$$

where:

- $FF$  – Fill Factor [-];
- $P_{\max}$  – maximum power [W];
- $U_{oc}$  – open-circuit voltage [V];
- $I_{sc}$  – short-circuit current [A].

For an ideal module the Fill Factor is equal 100%. The higher its value, the closer to rectangle the current-voltage curve is, and the cell maintains constant current at wider voltage range. The research has shown that the polycrystalline module has the highest fill factor.

Series and shunt resistance have a considerable influence over the Fill Factor. The bigger the series resistance and the smaller the shunt resistance, the more inclined cell current-voltage curve is (Fig. 9). Moreover, in the performed experiment larger resistance deviation occurrence of curves for rigid module than for flexible module was observed as the stiff module has lower Fill Factor and more inclined current-voltage characteristics (comparing Fig. 6 and Fig. 7).

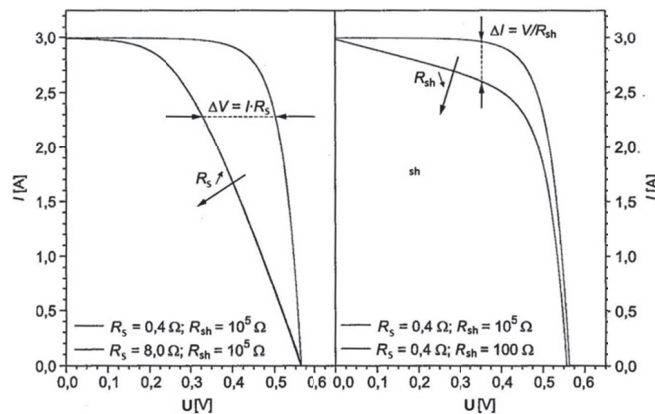


Fig. 9. Parasitic resistance (series  $R_s$ , shunt  $R_{sh}$ ) influence over cell fill factor [8]

Matching load resistance, in other words resistance corresponding to maximum power point, is quotient of maximum power point voltage and current in the same point. This load ensures maximum efficiency, but only in temporary insolation conditions. Matching load resistance is presented as [4]:

$$R_{\text{dop}} = \frac{U_m}{I_m} \quad (2)$$

where:

- $R_{\text{dop}}$  – matching load resistance [ $\Omega$ ];
- $U_m$  – maximum power point voltage [V];
- $I_m$  – maximum power point current [A].

In the course of experiments with panels of various nominal powers the matching load resistances also take different values. It has been noticed that the highest nominal power of module is, the larger matching load resistance.

Calculated efficiency is used for absolute comparison of the module. It is ratio between a module's maximum power and product of radiant intensity and surface area [4]:

$$\eta = \frac{P_{\text{max}}}{E \cdot S} \cdot 100\% \quad (3)$$

where:

- $\eta$  – efficiency [%];
- $P_{\text{max}}$  – maximum power [W];
- $E$  – radiant intensity [ $\text{W}/\text{m}^2$ ];
- $S$  – active surface area [ $\text{m}^2$ ].

It was observed that the rigid monocrystalline module, with slightly better parameters than the flexible one, achieved higher efficiency. On the other hand, the polycrystalline module, cheaper in production, ensures lower solar energy conversion to electric energy efficiency. The monocrystalline module is characterized by almost 100% of material purity and the polycrystalline module contains about 2% impurities which worsens its efficiency.

Short-circuit current density is also an important parameter of solar cells because it determines mechanic strength of material. It is ratio between short-circuit current and active surface area of module [4]:

$$J_{\text{sc}} = \frac{I_{\text{sc}}}{S} \quad (4)$$

where:

- $J_{\text{sc}}$  – short-circuit current density [ $\text{A}/\text{m}^2$ ];
- $I_{\text{sc}}$  – short circuit current [A];
- $S$  – active surface area [ $\text{m}^2$ ].

It was also observed that high short circuit current density was received by the flexible module, what means that it has high mechanic resistance to overheating, but the polycrystalline module has the highest density on account of its small nominal power.

In the experiment it was also noticed that the monocrystalline module ATS100-10654-FLEX after having been heated by solar radiation to temperature  $45^\circ\text{C}$  became more flexible and adjusting to surfaces than before measurements. Neither of the modules achieved their nominal currents, voltages or powers on account of high temperatures of the modules' surface and their horizontal arrangement.

## 2.5. PHOTOVOLTAIC CELLS – MATERIALS AND EFFICIENCY

One of major factors which determines photovoltaic conversion efficiency is the cell material type as every material has its own energy gap. As follows from numerous tests monocrystalline silicon panels achieve higher efficiency. In comparison of modules with rigid ground, the monocrystalline module shows over two times higher efficiency than the polycrystalline one but, as the modules display other parameters, these two types of PV modules cannot be directly considered. Influence of p-n junction material on efficiency was studied by the authors [1, 3, 5, 8]. The observed maximum efficiency is closely connected to energy gap width and its maximum is placed circa 1,4 eV (Fig. 10). Thus, the aim of the current research is to find materials with the gap close to that value. Junctions made of cadmium telluride and gallium arsenide are closest to these values. The proposed PV materials classification divides them into three generations depending on production techniques and year of production (Table 2). The first generation comprises modules with crystalline silicon cells including mono and polycrystalline silicon cells. In order to achieve maximum efficiency, on account of low absorption coefficient, a thick layer of absorber (from 100  $\mu\text{m}$ ) should be applied. Polycrystalline cells, junctions of which consist of many silicon crystals, display worse parameters but are cheaper [5].

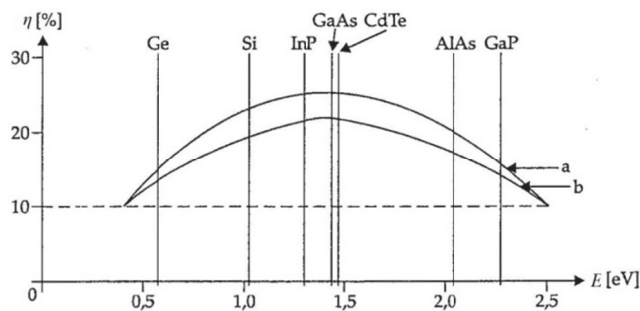


Fig. 10. Relationship between maximum theoretical efficiency and width of band gap for various materials [5]

The second generation includes thin-layer cells high production cost is compensated for by low material consumption. This group is represented by cadmium telluride (CdTe – p doped semiconductor) with cadmium sulphide (CdS) as donor material. Pure cadmium is a very toxic material, and thus the problems with recycling. Another second generation material is gallium arsenide (GaAs – p doped semiconductor) and InGaP – n doped semiconductor). On account of laying these materials on crystalline ground for example germanium, despite their high efficiency the cost of modules considerably increases. Moreover, it should be noted that chemical reagents, used in their production process, are toxic. Another group of thin-layer cells comprises CIS/CIGS, compounds of copper, indium, selenium and gallium characterised by high light absorption. Their advantage is the possibility of industrial printing manufacture. Thin-layer cells also include amorphous silicon cells (cherry-red colour) characterized by lack of method in the atoms lattice and having many structural defects the amount of which increases in the course of long-lasting illumination [7]. Their production cost is considerably lower, but due to structural defects, their efficiency is lower than that of their crystalline equivalents. The third generation of solar cells consists of polymer

(organic) and dye-sensitized cells. Their advantage is very low production cost, which is why they are subject to much research, however, they have relatively low efficiency and are sensitive to water vapour and oxygen. Dye-sensitized cells work in a way similar to the photosynthesis process. On the strongly uneven photo anode's surface the dye is adsorbed; the photo cathode is covered by catalytic substances. The electrodes are separated by liquid or solid electrolyte. In polymer cells energy conversion occurs using organic molecules and electroactive polymers [1, 3, 7].

Table 2. Comparison of materials' energy conversion efficiency in mass production

P-n junction material	Efficiency	Current applications
Polycrystalline silicon	11-17%	Photovoltaic installations in power stations and apartment buildings
Monocrystalline silicon	15-22%	
Amorphous silicon	5-9%	Installations with lower energy requirement
Gallium arsenide	25-30%	Satellite, space crafts, militaries Flexible grounds
Cadmium telluride	10-11%	
CIS / CIGS	12-17%	
Dye-sensitized cells	8-12	Facades of buildings
Polymer cells	4-7	under research

Higher efficiency is ensured by using multi-junction solar cells. Examples of these are amorphous silicon junctions: as single-junction they achieve efficiency of about 5% and as multi-junction display efficiency of about 8%. The difference follows from better absorption through particular layers of materials, where every layer is sensitive to different colour of solar radiation (range of electromagnetic wave length) [3].

The performed analysis has shown which materials ensure the highest energy conversion efficiency, but technical possibilities of manufacturing should also be taken into consideration. As follows from the data published in Photon International and global production is dominated by polycrystalline silicon modules, with monocrystalline silicon modules being the second most popular type (Fig. 11). Numerous tests have shown that lower efficiency modules excel on the market. On the one hand, the fact that renewable sources are used for energy production is positive, on the other, the highest the efficiency, the more profitable investment in photovoltaic installation is.

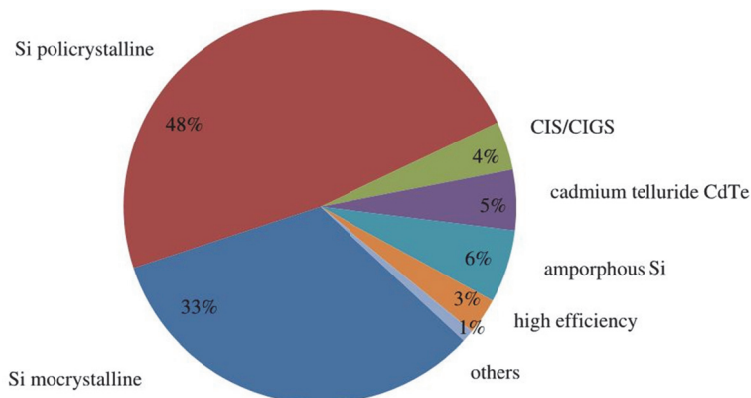


Fig. 11. Technology share in global production of solar panels [source: Photon International]

## 2.6. STRUCTURAL FACTORS INFLUENCING SOLAR CELLS EFFICIENCY

Solar cells' production in industrial conditions in comparison to lab conditions always shows a decline of cells' efficiency on account of mass scale of manufacturing and production time which directly influences the module price. Apart from p-n junction materials, there exist many factors affecting obtaining the highest module's efficiency. One of them is anti-reflection coating. A cell's quantum yield, a parameter which describes total short-circuit current and photons' flux density for certain wave length, is higher with anti-reflection coating. This layer more efficiently allows solar radiation to pass through to the absorber [1]. The thicker the layers over p-n junction, the less energy reaches the junction [5]. On the other hand, the thicker the junction, the higher cell's absorption capabilities. This feature is used in the above mentioned multi-junction cells [8]. As it was shown, on the basis of a cell's current-voltage curve its maximum power point can be determined. For every photovoltaic module this is maximum efficiency point, but it is ensured only for narrow loads range. A very important aspect with regard to the module as a whole is lighting of its entire surface area as in case of shading of a narrow section, especially in series connection of cells, the current-voltage curve is considerably deformed and the short-circuit current decreases. As a result, the cell becomes reversely polarised, what can cause flashover at voltage of about a few volts. In order to protect the module form efficiency decrease bypass diodes are applied. They are used mainly at higher voltage and in cells where the thin-layer technology is not applied because in these cells the drop of efficiency in case of shading is small. The module SFE.MF-6-255 consists of 60 series-connected cells and 3 by-pass diodes are used. Due to construction costs this solution is intended for industrial products. On the other hand, in case of high reliability requirements each cell is shunted. While selecting a module one should also take note of the efficiency decrease in case the module is made on nominal maximal voltage ranging from 24 V or 12 V DC. Moreover, the performed test have shown that monocrystalline flexible module's construction insignificantly lowers its efficiency but allows numerous new applications. One of them will be presented in the further part of article below treating about the project Solar Impulse. From the structural point of view a good method to improve conversion of solar energy efficiency is the application of the Solar Tracker system. It is a slave system with ability of biaxial module colocation in order to obtain the highest energy. This system is particularly effective during morning and evening hours, when altitude of the sun over the horizon is low and the angle of sunbeam incidence is decreasing in case of stationary panels. Summary the MPPT algorithm allows to gain 20% more energy than in stationary solutions [3].

## 2.7. ENVIROMENAL CONDITIONS INFLUENCING EFFICIENCY

Efficiency curve reaches saturation in function of irradiance, but a decrease is noted in function of temperature [1, 5]. The bigger and more constant irradiance, the higher efficiency of solar cell is. However, when the temperature is rising the cell is overheated and Joule-Lentz heat is emitted in series resistance. Moreover, in high temperatures oscillations of lattice are noticed impeding the charge flow and junction disappearance comes into effect because thermally-generated charge carriers have got enough energy to cross p-n junction in both directions.

The rate of efficiency drop in function of temperature is dependent on the cell material type (Fig. 12). The curve decrease is most gentle for cells based on cadmium, while the most popular silicon cells completely lose the capability to generate energy by 300°C.

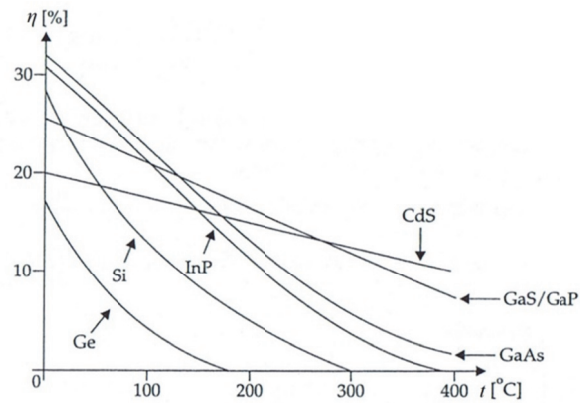


Fig. 12. Photovoltaic cells energy conversion efficiency in function of temperature [5]

### 3. SOLAR IMPULSE

#### 3.1. INTRODUCTION

A plane called Solar Impulse is one of the most modern applications of photovoltaics (Fig. 13). The main focus of this project is to show that if an airplane has succeeded to fly day and night without fuel, using only solar energy at high altitudes like 8500 m, the same clean energy can be used on the ground with the humankind faced with increasing consumption and request for electrical energy and decreasing deposits of fossil fuels.



Fig. 13. Solar Impulse 2 [10]

#### 3.2. HISTORY OF THE SOLAR IMPULSE PROJECT

An author of this project was Bertrand Piccard. An idea for a plane which can fly both day and night without fuel consumption, arose in 1999. After consultations with constructors and pilots the project started in November 2002 in Switzerland, and a prototype of Solar Impulse 1 (SI1) was presented 7 years later. Its wingspan was about 63 m and mass about 1500 kg. After successes achieved during daily flights in July 2010 a night flight was attempted. The success meant that the solar energy aggregated in accumulators allowed the aircraft to fly without extra fuel consumption and not emitting any pollution to the atmosphere. This event was a major step forward in the



history of the project supported by the European Commission and Parliament. With this auspice the first international Solar Impulse 1 flight between Brussel and Paris in 2011 was connected. A year later the plane performed its first intercontinental flight with a destination in Morocco. The distance covered in the flight was about 6 thousand km and the route ran over the Mediterranean Sea. In 2013 the project was also popularised overseas. The success of the first version of the aeroplane induced constructors to improve the machine; and thus the Solar Impulse 2 (SI2) was presented in 2014. After successful tests, which included a flight during 5 days and 5 nights from Nagoya in Japan to Kalaeloa in Hawaii, intensive preparations for the flight around the Earth started. In 2016 pilots managed to fly 40 thousand km around the world [10].

### 3.3. CONSTRUCTION

The ratio of wingspan to the plane weight is amazing as it is the first time people constructed a plane with as large a wingspan comparative to big passenger aircraft, with the weight that can be compared to the mass of a van.

The weight of construction is the fundamental parameter considered while calculating night energy consumption (Table 3). The lighter plane, the bigger energy saving. It should be also considered that every additional element for example in cockpit equipment results in an increase of battery mass. Thus, constructors endeavour to optimise the plane weight and eliminate unnecessary load. The secret of so small a mass lies in the materials used for construction: carbon fibre weighing  $25 \text{ g/m}^2$  which is three times lighter than paper, and alveolate foam in the form of a honeycomb. These materials are used to build fuselage, cockpit and spars. Strength of the construction and resistance to adverse outside conditions are among mechanical parameters for the construction, essential for cockpit insulation and, consequently, creating suitable living conditions for the pilot, and for motors or batteries clamping. Cockpit insulation is made of polyurethane foam and alveolate foam, while windows of high performance polycarbonate sheets derived from plastic.

Table 3. Solar Impulse Parameters [10]

Wingspan	m	72
Weight	kg	2 300
Number of solar cells	–	17 248
Number of propellers and batteries	–	4
Maximum flight time achieved	h	117 h 52 min
Maximum altitude	m	9 800
Average speed	km/h	75
Maximum recorded ground speed	km/h	216
Fuel consumption	l	0

The most important element is a layer of solar cells placed on the outer part of wings and fuselage. They are protected by plastic layer made with a resin base. The layer shields not only against adverse outside conditions such as ultraviolet radiation (particularly important at high daily altitudes of 8500 m) but also against water, and allows construction deformation without cells damage (Fig. 14).





Fig. 14. Photovoltaic panels installation on Solar Impulse wings [11]

The energy from solar cells, which convert solar energy into electrical energy, is transferred directly to engines. Obtaining mechanical energy is possible using brushless DC motors with sensorless position detection. The aircraft has 4 electric machines, each of them with power 17.4 KM (12.8 kW) [10]. If the produced energy is higher than the temporary demand of the airplane, it will be stored in 4 batteries, each of 86.5 Wh/kg density (density sum for the plane is 260 Wh/kg). They are insulated by high density foam, their total weight is about 633 kg and constitutes  $\frac{1}{4}$  of the total plane mass. The photovoltaic system consists of 17248 solar cells made of monocrystalline silicon, 135  $\mu\text{m}$  thick. We can compare these panels to the ATS100-10654-FLEX panel used in the research. They convert the total of 340 kWh per day and are placed on surface of about 269.5  $\text{m}^2$ . They achieve maximum efficiency of 22.7%, considerably higher than the presented above flexible panel, although it is optimised to mass and flexibility of panels. Each solar cell is tested 3 times before installation as constructors aim at aircraft's utmost reliability.

For energy saving purpose a flight cycle takes place during the day at the altitude of 8500 m and at night at 1500 m. Solar energy production is possible for 10 hours per day. From 6 am the aircraft gains altitude and motors turn at maximum power as the plane must create lift, but at the same time batteries are charged. At 6 pm the machine reaches its maximum altitude, the sun sets, motors throttle back as they do not receive energy from solar cells and the plane lowers its altitude for about 4 hours with negligible energy consumption. At 10 pm the pilot restarts motors supplied by energy stored in the batteries. At this stage velocity ranges from 45 to 90 km/h, while at maximum altitude it reaches the values ranging from 57 to 140 km/h [10].

## 4. WIRELESS ENERGY TRANSMISSION

### 4.1. INTRODUCTION

An idea of wireless energy transmission describes a practical and safe application of mutual influence of two objects with the same resonant frequency creating magnetic coupling. A basic requirement is that this influence should be strong and effective, at the same time however it should not have negative effects on humans and the environment. Nicola Tesla was already interested in the issue of wireless energy transmission, but not until 21<sup>st</sup> century has this problem been solved. The project WiTricity [2], initiated at the Massachusetts Institute of Technology, carries out first successful mass production of modules for wireless charging.

#### 4.2. PHYSICAL MODEL OF WIRELESS ENERGY TRANSMISSION

Magnetic coupling is considered the basis of the theory for wireless energy transmission. In the phenomenon magnetic field of one object has an effect on the other one thus inducing current in it. In this way energy is transmitted from source to device without physical contact between these objects. A necessary condition is however the occurrence of resonance phenomenon as this is the state in which energy can be transmitted with the highest efficiency. Regular magnetic coupling allows energy transfer with high efficiency (circa 60%) only for a few mm; to transmit at larger distances the magnetic field strength should be increased. Resonant magnetic coupling does not require this condition to be met. The phenomenon appears when the energy exchange between objects occurs by means of their varying or oscillating magnetic fields with natural approximately the same resonant frequencies. This described effect forms the basis for coupled mode theory (CMT) [2]. An advantage of this model is that magnetic field can wrap around the conductive obstacles between the power and charging device (Fig. 15).

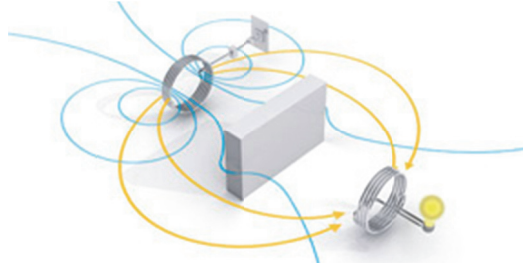


Fig. 15. Wireless energy transmission (blue curves – magnetic field, yellow curves – energy flow) [12]

The first successful experiment was performed in 2007 using two spiral coils with a diameter of about 30 cm, quality factor about 950 and frequency 9.9 MHz, as a result lighting of 60 – Watts bulb within the distance of 2 m was induced. Energy transfer efficiency during the measurement was between 40 and 60% [9].

#### 4.3. EFFICIENCY OF ENERGY TRANSMISSION

For wireless non-radiative mid-range energy transfer in contrast to simple magnetic induction for near field (described in the range around source for the centre of  $\lambda/2\pi$ ) resonant magnetic coupling is used described as magnetic wave mode where energy can transfer from one medium to another by tunnel transmitted form [9]. Regular magnetic coupling as magnetic induction usage has been utilised for a long time in order to send signals by means of electromagnetic field. For that reason using the same method to transfer energy could cause waves interference.

Coupled mode theory creates a mathematical model, which circumscribes the phenomenon of wireless energy transmission. In respect of two magnetic coupled coils following equations for field amplitudes have been written [2]:

$$\begin{cases} \dot{a}_1 = -i(\omega_1 - i\Gamma_1)a_1 + i\kappa a_2 \\ \dot{a}_2 = -i(\omega_2 - i\Gamma_2)a_2 + i\kappa a_1 \end{cases} \quad (5)$$

where:

$\alpha_{1,2}$  – individual resonant frequencies;

$\Gamma_{1,2}$  – resonance widths due to the objects (losses connected with absorption, radiation);

$\kappa$  – coupling coefficient;

For exact resonance  $\omega_1 = \omega_2 \wedge \Gamma_1 = \Gamma_2$ . Energy transmission loss is lower when the coupling rate is much faster than the loss rate [2]. It implies that when  $\kappa/\sqrt{\Gamma_1\Gamma_2} \gg 1$ , loss is the smallest and energy will be effectively transferred in the course phenomenon referred to as strong coupling presented on the equivalent circuit of magnetic resonance circuit (Fig. 16).

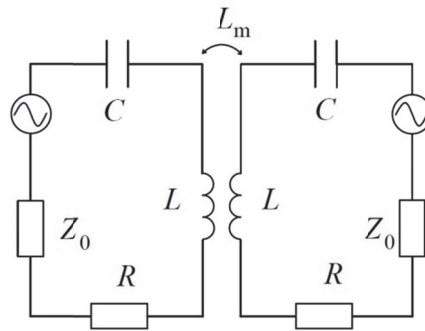


Fig. 16. Equivalent circuit of magnetic coupling coils, used for wireless energy transmission:  $L$  – resonant inductance,  $C$  – resonant capacity,  $R$  – resistance of resonant coil

Wireless energy transmission efficiency depends on many factors. One of them is the quality factor of resonance circuit – the highest the quality factor, the more effective the process. Moreover, maximum efficiency is achieved in the situation when both primary and secondary circuits are in resonance, and thus reactance of both circuits equals zero. To increase the distance between source and load we can increase resonance frequency, but at current standards, connected with ISM, which are radio bands internationally reserved for the use of radio frequency energy for industrial, scientific and medical purposes other than telecommunications, the upper limit is 13.65 MHz.

#### 4.4. WIRELESS CHARGING SYSTEM FOR MOBILE PHONES

Main elements of the system are resonant coils. The first coil is a source reached by the input signal modulated by controlled electronics by means of an amplifier to achieve the appropriate frequency. Then, the energy is transferred by magnetic field using magnetic resonance coupling with the second coil placed in a charging device module. In the receiving circuit alternating current is induced and rectified, then it turns directly to the charged device. Data communication is an important element of the system, where for example in module WIT 5000 [12] it is Bluetooth that engages digital electronic controls. This module is used for mobile phones charging (Fig. 17).

Energy transmission occurs by clearly defined frequency 6.78 MHz. At this frequency interaction with other metal elements is minimal and influence on human does not exceed norms [11].

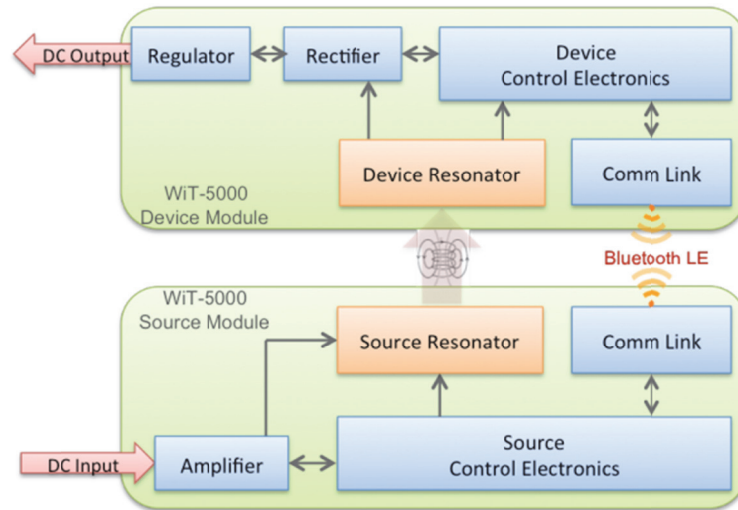


Fig. 17. Block diagram of modules WIT 5000 @MIT [11]

## 5. CONCLUSION

Modern energy conversion is characterised not only by using renewable energy sources in electrical energy production but also by its wireless transfer between source and devices. Photovoltaic technology and WiTricity are brought into general use, however, in both cases the main factor is efficiency of energy conversion because it directly influences investment profitability. Research results show that monocrystalline silicon panels achieve better efficiency than polycrystalline silicon panels, thus they should be considered a better investment. On the other hand, investment profitability also depends on constructions cost which could be higher for monocrystalline silicon. Wireless energy transmission technology aspires to replace cable lines in the future, but constructors are faced with the problem of limits to its power and range.

## BIBLIOGRAPHY

- [1] Jastrzębska G., 2013. Ogniw słoneczne: Budowa, technologia i zastosowanie. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności Warszawa.
- [2] Karalis K., Joannopoulos J.D., Soljacić M., 2008. Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer. *Annals of Physics* 323, 34-48.
- [3] Klugmann-Radziemska E., 2010. Fotowoltaiki w teorii i praktyce. Wydawnictwo BTC Legionowo.
- [4] Klugman-Radziemska E., 2006. Odnawialne źródła energii – przykłady obliczeniowe. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
- [5] Klugmann-Radziemska E., Klugmann E., 2005. Ogniw i moduły fotowoltaiczne oraz inne niekonwencjonalne źródła energii. Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko Białystok.

- [6] Krupczyński R. Badanie ogniwa fotowoltaicznego. Instrukcja do ćwiczenia laboratoryjnego. SGGW Warszawa.
- [7] Siuzdak K., Klein M., Szkoda M., 2014. Badania i rozwój technologii ogniw PV, „Czysta Energia”. Instytut Maszyn Przepływowych PAN Gdańsk.
- [8] Waclawek M., Rodziewicz T., 2011. Ogniwa słoneczne: wpływ środowiska naturalnego na ich pracę. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa.
- [9] Zhu B., Li J., Hu W., Gao X., 2015. Review of Magnetic Coupling Resonance Wireless Energy Transmission. International Journal of u- and e- Service, Science and Technology 8(3), 257-272.
- [10] <http://www.solarimpulse.com/> (access: 27.09.2016).
- [11] <http://witricity.com/> (access: 27.09.2016).

## PRZYKŁADY NOWOCZESNEJ KONWERSJI ENERGII

### Streszczenie

W artykule przedstawiono opis nowoczesnych metod przetwarzania i przesyłu energii elektrycznej. Obecnie ważną rolę odgrywa nie tylko odejście od konwencjonalnych na rzecz odnawialnych źródeł pozyskiwania energii, ale również praktyczny ze względów użytkowych bezprzewodowy sposób jej przesyłania. Jako źródło odnawialne zostało zaprezentowane ogniwo fotowoltaiczne oraz zastosowania modułu PV w zależności od parametrów uzyskanych na podstawie konkretnych materiałów, które determinują sprawność konwersji energii. Przykładem zastosowania modułów PV jest projekt Solar Impulse – samolotu „na słońce”. Drugą część pracy poświęcono mechanizmowi wykorzystania bezprzewodowego przesyłania energii bez wymagania fizycznego kontaktu dwóch przedmiotów. Pomysł przesyłania energii za pomocą pola magnetycznego między przedmiotami o określonej częstotliwości drgań własnych, pozwalających na zminimalizowanie strat energii, został wykorzystany w projekcie WiTricity, opracowanym przez naukowców z MIT.

Słowa kluczowe: sprawność, panele fotowoltaiczne, bezprzewodowe przesyłanie energii, rezonansowe sprzężenie magnetyczne



## ANALYSIS OF DIRECT CURRENT CABLE BREAKDOWNS CONCERNING SWEDISH – POLISH LINK INCLUDING FAILURE PREVENTING PROPOSALS

Tadeusz Szczepański

Polskie Sieci Elektroenergetyczne – Północ Spółka Akcyjna  
ul. Marszałka F. Focha 16, 85-950 Bydgoszcz  
tadeusz.szczepanski@pse.pl

*Summary:* The return cable on the SwePol Link has been introduced as an alternative forced by environmentalists due to lack of social acceptance of other solutions. This is why in the proposed solution water and earth have been replaced by two return cables, although from a technical point of view such a solution is less effective. In eight summary cases the faults were caused by electrical failures in the cable in the sea and were located between ten and twenty kilometers from the Polish shore and triggered by disturbances in the northern part of the Polish power grid. In this situation it has been suggested to analyze and introduce one or two solutions shown below which may significantly limit the effects and lower the costs caused by return cable faults: a) assembly of additional surge arresters, b) return to electrodes – lack of return cables, c) “partial” electrodes working with one return cable, d) operation of the link only with grounding on converter stations. To sum up it needs to be stated that: a relatively cheap way of protecting return cables against electrical failures is installing surge arresters in the cabinet located next to the cable container on the Polish shore, from the suggested preventive measures it seems reasonable to introduce the above mentioned solutions a) and d) simultaneously, as both of them are simple solutions which require neither considerable financial expenditure nor authorizations and may quickly show the expected results.

Keywords: return cable, undersea link, electrode

### 1. CONSTRUCTION OF THE MAIN CABLE AND THE METHOD OF LAYING

The main cable type  $1 \times 2100 \text{ mm}^2$  FCTLV 450 kV DC MIND with copper core conductor has an oil impregnated paper insulation and lead alloy sheath containing cadmium [2, 7]. The outer diameter of the cable is 135 mm, of which the copper core conductor is 53 mm. To increase flexibility of the cable, the core conductor is not solid, but consists of a number of copper strands.

Each strand with individually selected shape is compressed with each other so that the core cross section area is over 99 percent. The rest of cable is build from various layers of insulation, hermetic coating and protective armoire. One meter of the cable weighs 67 kg. The structure of main cable shown on Fig. 1.



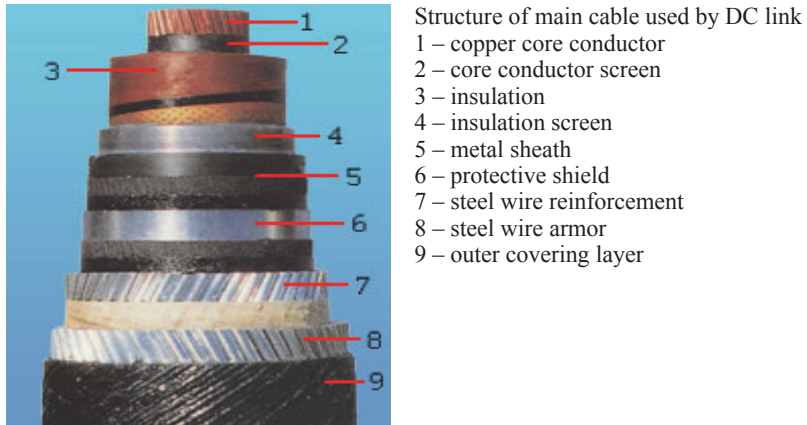


Fig. 1. Structure of main cable [2]

The in the sea, cable consists of four section (connected by three cable joints mounted on the ship) and it is placed on the bottom of the Baltic Sea (Fig. 2) at the depth not exceeding 100 meters (dug in sea mud about 1 meter or lied on a rocky bottom).

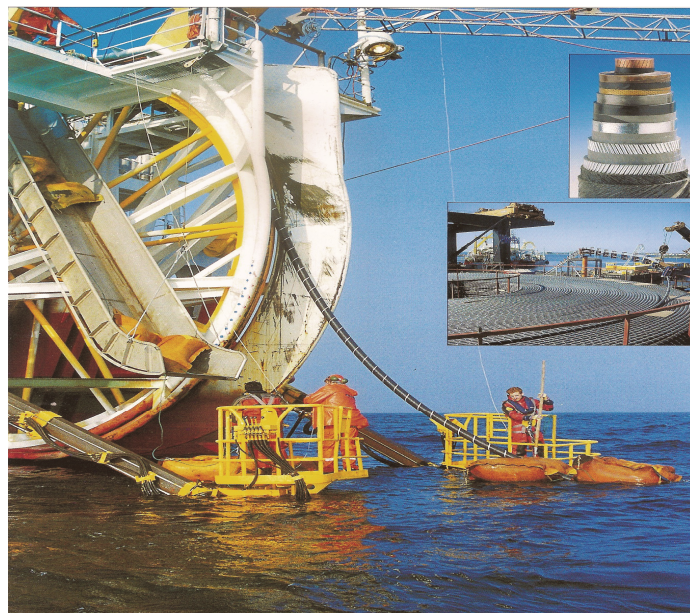


Fig. 2. Lying the main cable and the return cables in the on the sea bottom [8]

Main cable and the return cables are lied with a distance from each other due to the heat emission that occurs during power transmission. In the shallow waters the main cable is lied with a distance of 5-10 meters from the return cables and in the deeper waters with a distance of 20-40 meters. On the Polish land the main cable 12 km long consists of 24 sections 500 meters each with a weight of approximately 38 tons ( single cable section shown on Fig. 3).





Fig. 3. 500 meters section of main cable ready for laying in the ground at the Polish side [own source]

## 2. THE METHOD OF LAYING THE RETURN CABLES

The return cables are made with insulation from cross-linked polyethylene withstanding 20 kV [2]. The 2 km land part in Sweden (effectively grounded) and the 256 km subsea part consists of two parallelly joined cables type 630 mm<sup>2</sup> FXTV 20 kV DC XLPE with copper core conductor (laid with a distance to each other from 0 to 20 cm). One meter of the cable weighs 10.5 kg. The 12 km Polish land part consists of one cable type 1100 mm<sup>2</sup> FXLJ 20 kV DC XLPE with copper core conductor.

Last 500 meter sections of main and return cables are located under Polish shore in two cable culverts with a diameter of 40 cm each and a cooling system inside. All the SwePol Link HVDC connection cables were produced by ABB High Voltage Cables plant in Swedish Karlskrona.

## 3. REASON FOR USING RETURN CABLES

Solution of return cables on the Sweden – Poland link appeared as an alternative forced by ecologists. The decision on laying the return cables was made only at the stage of laying the main cable. In the original projects the construction of an anode and cathode was assumed, and the electrical circuit was supposed to be closed through the earth. In the proposed solution water and earth were replaced by the return cable; however, from a technical point of view, this solution is worse as the efficiency of the whole connection is lower (it is sufficient to build electrodes of proper low resistance values when closing the circuit through the ground, and the ground resistance practically equals zero). At the time of making the decision to lay the return cable there was no cable with a cross section of at least 1100 mm<sup>2</sup> and insulation strength of 20 kV on the

market that would be suitable for laying at the bottom of the Baltic Sea. It was decided to lie two cables at the marine section with a cross section of 630 mm<sup>2</sup> each, and to lie one cable at the Polish land section with a cross section of 1100 mm<sup>2</sup>, all with an insulation strength of 20 kV. The first failure of the return cable showed the relevance of the decision to lay two return cables; in a failure scenario the damaged cable is disconnected and the other operates under the maximum connection load of 473 MW [1, 4, 5, 6].

#### 4. CABLE DAMAGE

The defectiveness of the cables especially in the beginning of their work was one of the main reasons for the relatively high operating failure of the Sweden-Poland link. Breakdowns of the cable along the subsea section had happen repeatedly caused by various reasons. In principle we can classify defect reasons into electrical and mechanical.

Throughout the history of the link a total of 12 cable failures were reported, including 11 damages of the return cable and one of HVDC cable. The repair time depends from the type of failure and the availability of resources necessary to complete the work. It can take several days to several months. A list of all cable failures concerning the Sweden – Poland link are shown in Table 1.

Table 1. Cable damage from 2000 till 08.2013 [12]

No.	Date	Type of damage	Location of damage	Repair time [h]
Failure 1	27.02.2001	electrical damage to cable XL5-S8	internally in culvert 245 m from the Polish seashore	692.9
Failure 2	12.04.2001	electrical damage to cable XL5-S6	internally in culvert 370 m from the Polish seashore	299.4
Failure 3	16.07.2001	electrical damage to cable XL5-S8	internally in culvert 583 m from the Polish seashore	297.9
Failure 4	17.08.2001	electrical damage to cable XL5-S8	internally in culvert 646 m from the Polish seashore	652.3
Failure 5	11.11.2001	mechanical damage to cable XL5-S6 by fishermen	60160 m from the Polish seashore within the area of Słupsk Sandbank	628.1
Failure 6	05.12.2001	mechanical damage to cable XL5-S6 by ship's anchor	8410 m from the Polish seashore	7.2
Failure 7	16.07.2002	electrical damage to cable XL5-S6	7900 m from the Polish seashore	487.3
Failure 8	10.08.2002	electrical damage to cable XL5-S6	8550 m from the Polish seashore	168.6
Failure 9	06.09.2002	electrical damage to cable XL5-S6	10000 m from the Polish seashore	356.5
Failure 10	09.10.2002	electrical damage to cable XL5-S1 (main cable)	64560 m from the Polish seashore	1456.7
Failure 11	17.01.2003	electrical damage to cable XL5-S6	7460 m from the Polish seashore	2887.2
Failure 12	15.10.2012	unexplained damage to cable XL5-S8	8007 m from the Polish seashore	876.6

The collected data concerning the Swedish – Polish link show that the total disturbance time caused by cable damage from its launch day in year 2000 amounts to 8927.6 hours. Graphical illustration of the above, distributed between auto tripping and operator's shutdown over the period 2000-2012 shown on Fig. 4. From the illustrated graph you can see that the biggest disturbance occurred in 2001 and 2003 – mainly due to several failures of the return cables as well as the failure of the main cable.

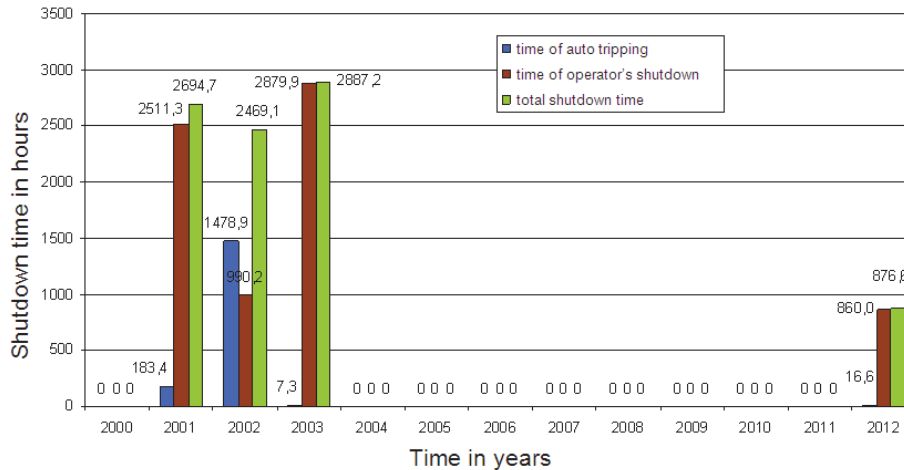


Fig. 4. Time of disturbance caused by auto tripping, operator's shutdown and total shutdown time through years 2000-2012

#### 4.1. MAIN CABLE

Failure of the main conductor near the first joint from the Polish side was caused by electrical insulation damage. Precise expertise of the damage section showed that during the cable laying process on the sea bottom, cable insulation has been damaged so severely that it's failure was only a matter of time. The damaged cable could be repaired by only one of three (available at that time) cable lying ships. The repair of the damaged cable was performed after it had been taken out from the sea, and a new, nearly 200 meter long cable, had been laid and connected so as to recover the cable previous structure – external diameter of the new joint is to be equal to the diameter of the repaired cable. The repair works were carried out in sterile conditions – a hermetic tent. Since the nearest cable lying ship 'Sea Spider' was in the Philippines at that time, the beginning of the repair was a few weeks delayed as the ship needed time to arrive.

#### 4.2. RETURN CABLES

Failures of the return cable have occurred due to both mechanical and electrical factors.

Mechanical factors include those which are connected with anchors of ships (once) and fishing nets (once). However, since the beginning of its operation, the SwePol Link has most frequently been damaged by electrical factors caused by the disturbance in the northern part (close to the station) of the Polish power grid 400 kV and 110 kV and were transferred by a converter onto the direct current side (called DC).

Repair of the return cable is shown in Fig. 5.

a)



b)



Fig. 5. Repair of the damaged return cable: a) the moment of taking out the cable from the water  
b) electrically damaged strands of a return cable [own source]

Damage of the Swedish – Polish Link return cable took place on the 15th of October 2012, and was the eleventh one throughout its operation history, the tenth one was reported almost 10 years ago). Previous incidents took place in the years 2001-2003, and it was the period of warranty. The causes of the last damage of the return cable have not been established yet, though the insulation breakdown of was certainly of electrical cause.

According to the ABB laboratory manager, inspection of the cable performed on 15.10.2012, in the laboratory in Karlskrona proved that the damage was caused by a metal saw or another similar tool – the cut was visible from outside and it reached as deep as the core conductor layer. Microscopic analyses revealed traces of a saw.

It was concluded that the cut was most likely made by some person from outside with the use of a hand metal saw (Fig. 6a and 6b).



Fig. 6a. The return cable damaged on the Swedish – Polish Link, image 1 [own source]



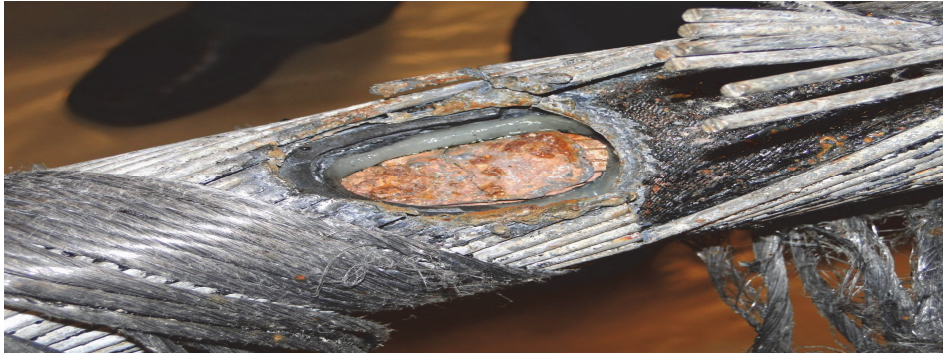


Fig. 6b. Return cable damaged on 15.10.2012 on the Sweden – Poland Link, image 2 [own source]

The procedure used during return cable failure repair by the Swedish – Polish Link is always similar. The first step is to establish which cable has been damaged. It can be performed after detaching (in the beginning, two cables outgoing in the sea) from connection bar in the cabinet near the container on the Polish side and measuring their insulation using mega ohmmeter – cable with a damaged insulation will have definitely lower resistance. If it is so, then it is possible to use portable locator e.g. (Murray Bridge), to find the place of the potential damage which sometimes may require, the so called burning by a special generator. So performed initial localization of the damaged spot has to be confirmed from the Swedish side (after reconnecting the return cables in the cabinet near the container on the Polish side and opening two disconnectors on the Swedish side) using a second portable locator, being provided by Stemo station. After receiving a confirmation that such test was performed in such a way – the damage localization procedure is stopped and only the undamaged return cable is connected back to operation though with limited power, up to 473 MW. After entering the above information to the MACH 2 system the Swedish – Polish transmission system is ready to operate and the system generates the ‘RFO’ information.

Once the cable damaged is located it is necessary to fetch a properly equipped repair ship (having on-board 300 meters of new and undamaged raw cable to prepare the so called ‘insertion’). Detailed location of the damaged place is performed by an acoustic method, after connecting an electrical impulse generator to the detached cable acoustic waves determine the damaged area. The exact place of damage is located by using a microphone installed on a small wooden boat pulled by 300 meter long hemp rope, along the damaged section of the cable (to avoid boat signal interference). After the exact place is found it is marked with a buoy. A specialized ship arrives at the spot and a diver goes down under water to get directly to the place of damage using his eyes and hands. Further procedures depend on the type of the bottom. If the bottom is muddy the mud needs to be removed, if it is rocky it is easy to cut the cable and take it out of the water. After cutting out the damaged part of the cable, its first end is connected through a joint with the new, at least 100-300 meter long cable section then the second end of the cable is connected through the second joint to the end of the new section [4, 10].

## 5. ANALYSIS OF RETURN CABLES FAILURES

Since return cables are most likely to undergo damage, in this article a detailed analysis of only return cables has been made.

In eight cases the cause of failure was related to electrical damage close to the Polish shore. They were induced by disturbances within the northern part of the Polish power grid 400 kV & 110 kV.

The direct causes of the return cable failure were overvoltage in the grid, sudden switch offs, resulting in the current reduction to zero in a very short time. It was the direction of the electrical energy transmission which was prior and the cable was damaged only when the energy was transmitted in the Poland direction (converter operates then as an inverter). When the direction of the energy transmission was from Poland (then a converter works as a rectifier), such a disruption was also affecting the link (recorded by the DC station) but it never caused any damage to the cable [4, 10, 12].

The discussed case responds to a long link, opened on its end, which has been shown in the form of a simplified scheme in Fig. 7. This phenomenon is related with the law of energy conservation; before the damage the static voltage on the return cable is low and its maximal value is 2.52 kV (for current 1330 A). Then the overvoltage wave moves along the cable and it is reflected in the place where the wave resistance changes (in the node connecting the return cables) which causes her expansion in the sea part near the Polish coast. Such high voltage results in cable insulation damage.

In this case the Swedish side of the return cables was absolutely safe from the influence of the electrical disruptions, due the fact that the return cable conductor was grounded here.

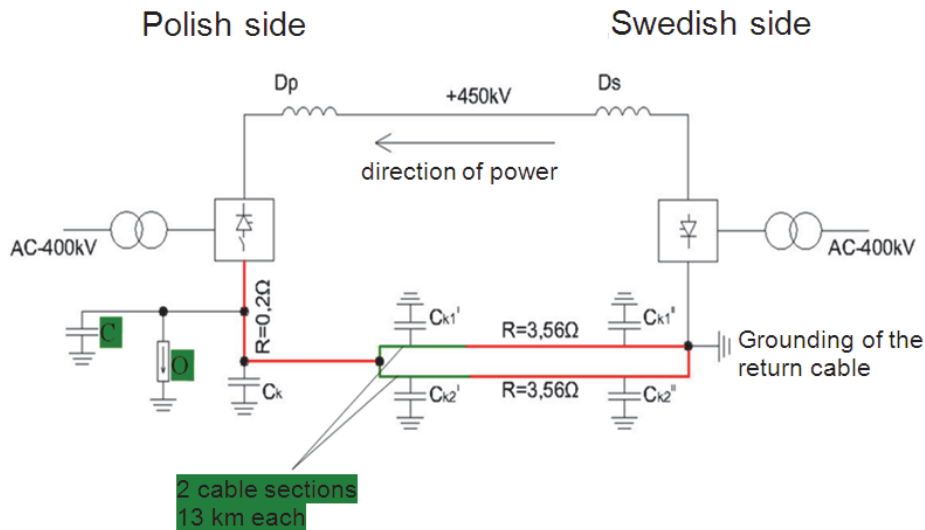


Fig. 7. Electrical scheme of the Swedish – Polish HVDC interconnection system explaining the surge mechanism concerning the return cable

- Problems related to return cable damage ended after 2003 when:
- on the Polish sea side, both return cables were replaced with new ones, over a distance of 13 km, marked in the figure by green color, with the changed electric field pattern (a screen over to the conductor was made of a five times thicker material, thanks to which a better distribution of the electrical field was obtained what increased its resistance to the occurring switching overvoltage),
  - surge arresters operating on the Polish side were modernized (thanks to which the ignition voltage was reduced from 22 kV to 11 kV), marked in the figure as O, and the capacity of the connected capacitor battery was increased, which in the figure is marked as C, reducing steepness of the overvoltage increase,
  - the impact of disruptions harmful to the link was decreased in the external Polish grid by smoothing steepness of the impulse increase which ignite the thyristors,
  - in places in which the cable is laid on subsea rocks, concrete panels were added, e.g. for protection against fishing nets,
  - preventatively, institutions responsible for safety of the Baltic Sea Area were reminded of the Swedish – Polish cable layout (in order to protect for example from ship anchors).

## 6. PROTECTION OF RETURN CABLES AGAINST DAMAGE

Having in mind the so far gained experience, the author of this article proposes to analyze and maybe implement one or two of the below presented technical solutions which can significantly reduce occurrence of return cables failures, their effects and repair costs.

### a) mounting additional surge arresters

In fact, the solutions preventing from the return cable damage can be applied almost solely in case of failures caused by electrical disruptions. Mechanical damage is rare, on the average, every fifth failure is caused by mechanical factors, and it can occur at any kilometer of the cable, especially the sections where it is laid directly on a rocky sea bottom.

The simplest solution to reduce the return cable failure caused by electrical disruptions involves installation surge arresters near the Polish coast in a place where the return cable enters from the DC station in Wierzbienin and is connected with two cables going to the sea connecting Stemo station (where the resistance wave is changed, that is, in the electrical node which is situated in a cable cabinet near the container, on the Polish side). Surge arresters should be matched according to the discharge capacity app. 30 kA, that is  $3 \times 10$  kA, and operating voltage 11 kV (similar to Wierzbienino station), obligatorily equipped with activation counters. The grounding of surge arresters and all the screens of return cables should be connected with a new designed grounding reaching resistance lower than  $5 \Omega$ . Fig. 8 shows the area particularly vulnerable to failure.

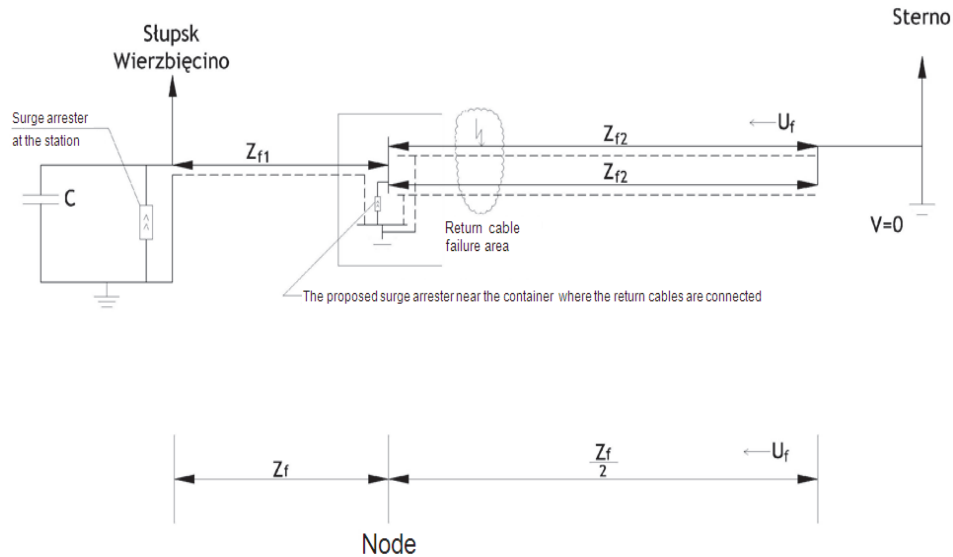


Fig. 8. The return cable failure area in the Swedish – Polish link

#### b) coming back to electrodes – no return cables

One of the solutions that can be implemented for protection of return cables involves using a cathode and anode for closing the electrical circuit through earth, separately or additionally. Absence of return cables would automatically eliminate the problems connected with cables breakdowns, though it might provoke ecological protests.

At present, in the area of the Baltic Sea, there are nine links in use and only the Swedish – Polish link has return cables, because using return cables in links is not common worldwide.

The proposal of the article author is to consider returning back to replacement of return cables with water and earth, through implementation of electrodes, according to the primary project. At the beginning it was assumed that both grounding electrodes will be placed in the sea in the distance of 12 km from the shore. Location of the grounding electrode was established after discussions and agreements with the institutions involved in sea lain administration. The proposed exact location of the grounding electrode on the Polish side is shown in Fig. 9 [1].

The main problem concerning the impact of an grounding electrode on the sea environment is flow of electric current in the water near electrode. For this reason an electrode, to be used for discharging electrical current into the water, is required to have an appropriately large area [1].

Using a return cable for closing the electric circuit in the Swedish – Polish link causes total losses of nearly 3%. If no return cable was used and the electric circuit was closed only through earth, energy losses while full transmission would be reduced to 2% that means when we have 600 MW power transfer we lose 6 MW.



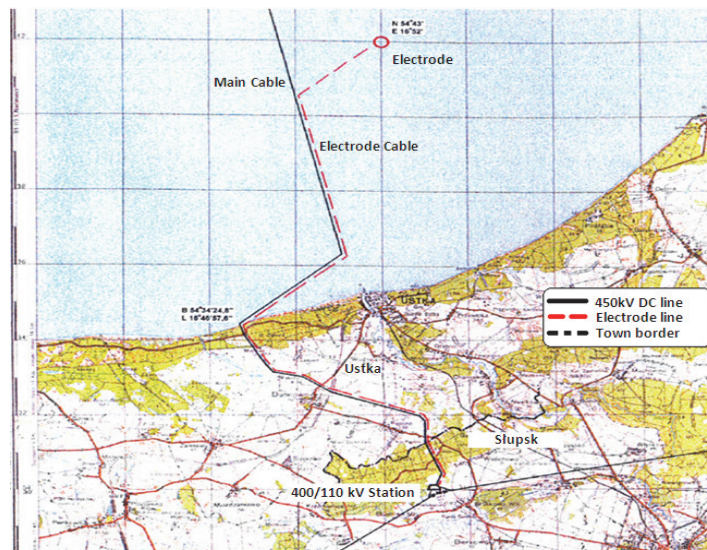


Fig. 9. Route of the cable line near the Polish coast [1]

According to the primary project, an electrode receiving electrons was to be built on the Swedish side. In the water, near the anode small amounts of chlorine would be extracted [1]. The primary project assumed constructing a cathode, that is an electrode which releases electrons returning to the anode. The technical solution for the sea electrode (cathode), provided by the project, is shown in Fig. 10. The 500 meters diameter of the cathode would make the current density on the electrode surface not higher than  $0.5 \text{ mA/cm}^2$ , which would ensure its operation without negative impact on the environment. Three separate connections and six internal cross-arms guarantee safe operation of the electrode even if it is partially damaged. The above mentioned electrode should be laid on the sea bottom and protected from being lifted by load elements placed on its circumference (every 20 meters) and on internal joints.

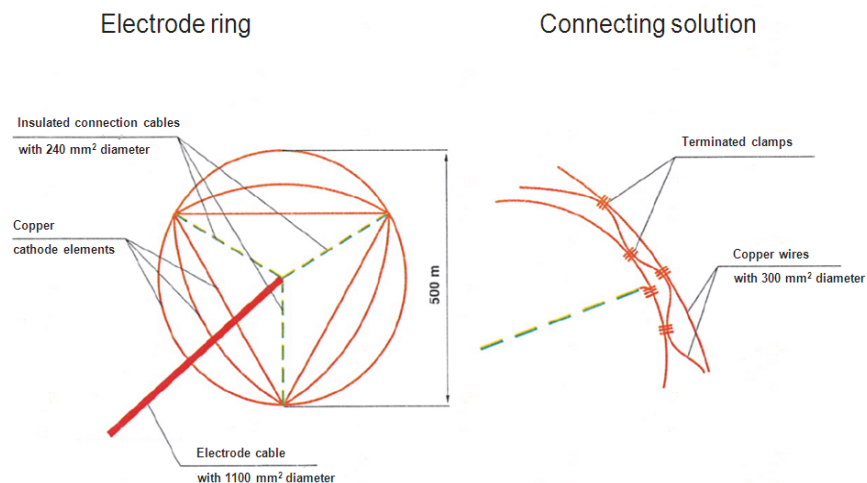


Fig. 10. Proposed technical solution of the grounding electrode (cathode) [1]

Substantial differences in the design of both electrodes determine that it is not possible to change their functions, that a cathode cannot work as an anode.

**c) “partial” electrodes operating with one return cables**

In case one of the return cables failed, a compromise solution providing full transmission of power through the Swedish – Polish Link could be implemented by installing ‘partial’ anodes. In order to provide full transmission of electrical power, that is 600 MW, the current flowing through electrodes needs to be equal 1330 A. In case of damage to one of the two return cables, the power is determined to be only 473 MW, that gives us a current value of 1048 A. If electrodes (anode and cathode) were designed only for the current value being a difference between the above mentioned currents, that is 1330 A and 1048 A, then if failure occurs with electrodes for the current of nearly 290 A, it would be possible to continue full power transfer. The attached electric circuit would have to be equipped with a resistor serial connected to ‘partial’ electrodes which would limit the current to the above given current value (parameters of such resistor are:  $R = \text{around } 12,5 \Omega$ ,  $P = \text{around } 1 \text{ MW}$  and  $I_{\max} = 290 \text{ A}$ ). In practice, it involves a need to construct electrodes (anode and cathode) with an area of only 22% of the primarily designed ‘full’ electrode. Normally the link can run operating with return cables, and in case of a failure, of one of them, after localization and detachment (not longer than 3 hours), it would be possible to immediately connect to the new built ‘partial’ electrodes with series connected resistor and continue with full power transfer.

Link operating with one return cable (without the above presented solution) results in daily loss for each of the link co-owners.

**d) operation of the link only with grounding at converter stations**

The Sweden-Poland link with a limited transmission can also operate with own station groundings which according to construction law have a resistance of at least *approx.*  $0.5 \Omega$ .

This means that in the event of a failure of one return cable full power transmission would be possible over the other return cable and permanent station grounding (i.e. grounding grids). The Swedish side of the link with a permanently earthed return cable is virtually ready for that operation. The Polish side of the link requires connection of the grounding grid with a special resistor limiting the current to a maximum of 290 A and the disconnecting switch to be closed in the event of a failure of one of the return cables. Resistor parameters:  $R = \text{approx. } 13 \Omega$ ,  $P = \text{approx. } 1 \text{ MW}$  and  $I_{\max} = 290 \text{ A}$ .

Possible operation of the Sweden-Poland link solely with own groundings and two damaged return cables would be possible with a power of 127 MW only, as presented above.

## 7. ENVIRONMENTAL IMPACT OF THE TRANSMISSION SYSTEM

In the DC transmission system between Sweden and Poland the following aspects of environmental impact should be considered [1]:

- in the vicinity of cable:
  - Magnetic field.
- in the vicinity of converter station:
  - Electric field,
  - Noise,
  - Radio and television electric interference.

The cable line is the source of the magnetic field in the transmission system between Sweden and Poland. The magnetic field in terms of environmental impact is comparable with the Earth's natural magnetic field.

With a rated current of 1330 A in the cable vicinity within the distance of 6 m the magnetic field does not exceed  $50 \mu T$ , while in direct contact with a copper conductor it is slightly more than  $250 \mu T$ . This means that when compared to the permissible level of  $40\,000 \mu T$ , recommended by the World Health Organization, it is negligibly small; this phenomenon has no impact on living organisms. The distribution of the above-mentioned field over the high-voltage DC cable passing a 1330 A current is shown in Fig. 11 [1].

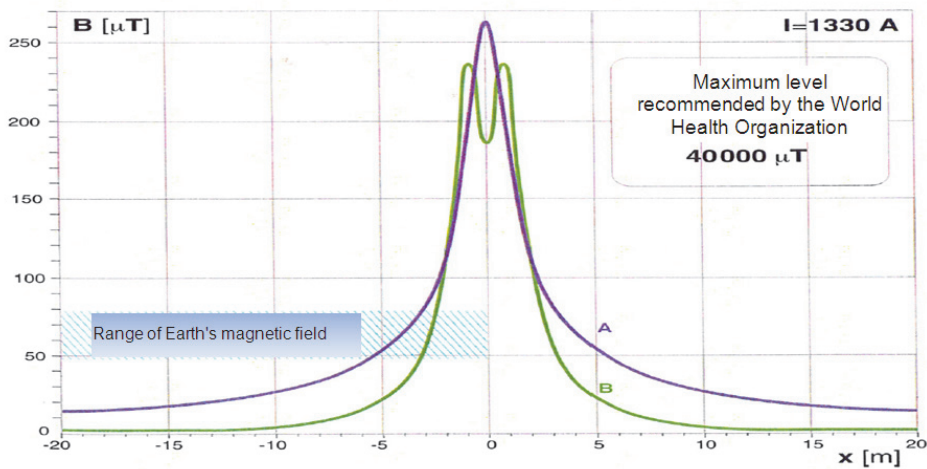


Fig. 11. Magnetic field surrounding the DC cable line [1]; A, B – magnetic field distribution over one and two high-voltage lines at the ground level (cable buried 1 m deep)

Fig. 12 shows changes magnetic field induction corresponding to the distance from the cable. Even at the distance of 0.5 m from the cable the magnetic field does not reach values which would raise concerns.

In the surroundings of the DC station a constant magnetic field is generated. Its source is the electric charge appearing on the live wires (conductors) and the spatial charge located around these wires. The constant electric field generated by the DC system will be practically present within a distance no more than several meters from the station fencing, and the field strength will be comparable with the strength of the natural electric field amounting on average to 0.13 kV/m. This phenomenon has no negative impact on living organisms [1].

The noise generated in the converter station by converter transformers is audible within a distance of not more than 200 m from the fence. The noise level at the fence does not exceed 50 dB. Fig. 13 presents the noise level occurring in the natural human environment. Considering that there is no residential housing in the direct vicinity of Wierzbiecin station the impact of the station is negligibly small [1].

Electrical discharges on the DC transmission system conductors might be a source of radio and television interference in the surroundings of the station. The range of interference is small, virtually imperceptible within a distance of over a dozen the natural environment [1].

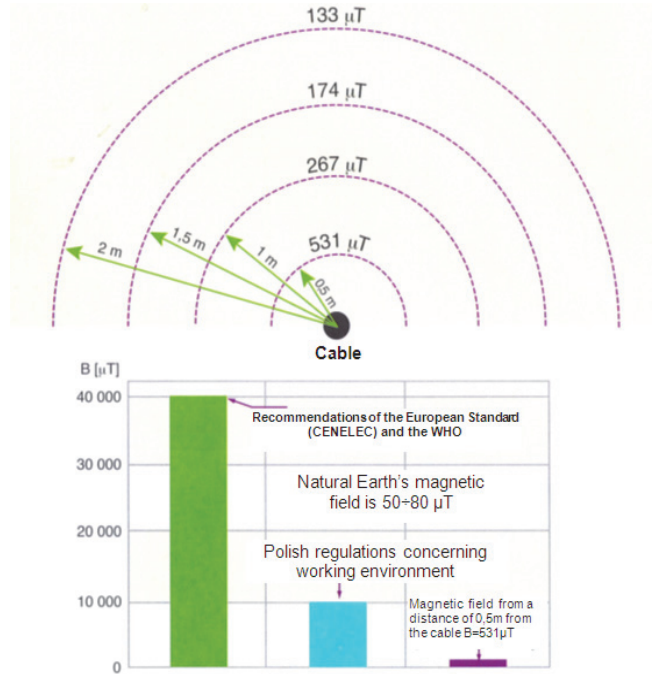


Fig. 12. Magnetic field surrounding cable with current  $I = 1330 \text{ A}$  [1]

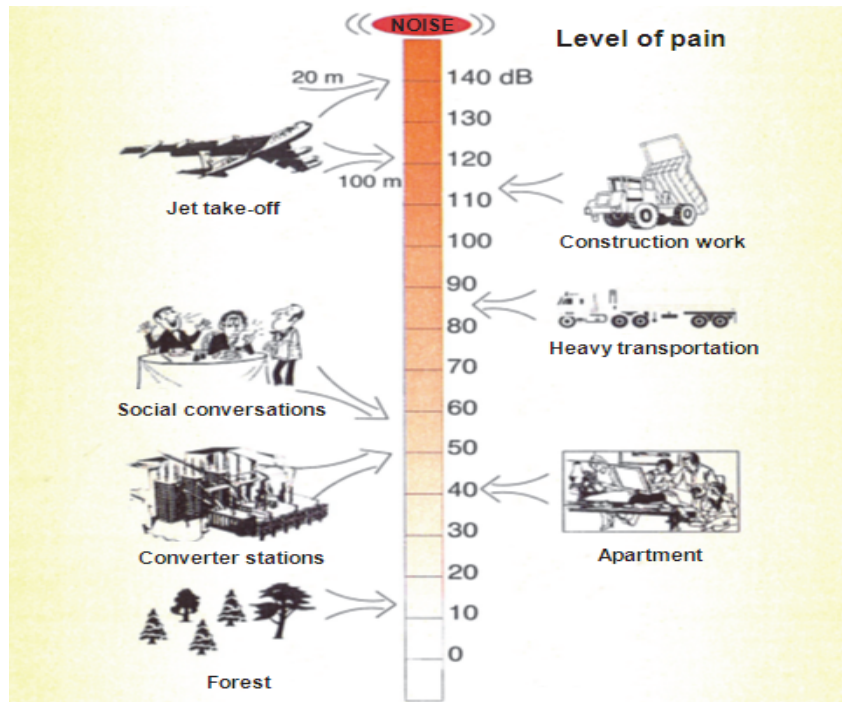


Fig. 13. Comparison of noise levels in kilometers from the station [1]

## 8. SUMMARY

Generally speaking:

- the damage to the return cables of the Sweden – Poland link is mostly caused by electrical failures in the cable in the sea located between ten and twenty kilometers from the Polish shore
- past works involving partial replacements of return cable segments, expansion of surge arresters and correction of thyristors electric field grading significantly increased – at low cost – the protection of the return cables
- a relatively cheap way of protecting return cables against electrical failures is installing surge arresters in the cabinet located next to the cable container on the Polish shore
- the proposal for resigning from return cables in the Sweden-Poland connection requires recognition and a feasibility study
- in the case of lack of approval or protest of ecologists against resigning from the return cables it seems reasonable to consider the proposal of building so called "partial" electrodes
- the adverse impact of the connection, fitted with return cables or not, to the natural environment cannot be confirmed
- the given figures of particular parameters at items a), b), c) and d) were estimated values; possible application of particular methods requires their precise determination by the designer; however, the estimated values don't significantly differ from precise figures of proposed remedial measures
- from the suggested preventive measures it seems reasonable to introduce the above mentioned solutions a) and d) simultaneously, as both of them are simple solutions which require neither considerable financial expenditure nor authorizations and may quickly show the expected results.

## BIBLIOGRAPHY

- [1] Argasińska H. i in. 1997. Układ przesyłowy 450 kV prądu stałego Szwecja – Polska a środowisko. AKCEPT-ART Katowice, Warszawa.
- [2] Dokumentacja projektowa stacji elektroenergetycznej 400/110 kV Słupsk wykonana w zespole projektowym pod kierunkiem J. Sadowskiego. ABB, Oddział Stacji i Systemów Elektroenergetycznych Kraków, 1999.
- [3] Dokumentacja stacyjna: Wytyczne SwePol Link dotyczące: Bezpieczeństwa, Jakości, Ochrony środowiska naturalnego, Prowadzenia ruchu, Utrzymania stacji przekształtnikowych, Utrzymania urządzeń sterujących i zabezpieczających i Wyciąg z księgi utrzymania (EBR) dla stacji. SwePol Link AB, 1999.
- [4] Kamrat W., Szczepański T., 2009. Sieci przesyłowe najwyższych napięć. Gdańskie dni elektryki – SEP Oddział Gdańsk, Wydawca DOM TECHNIKA Gdańsk.
- [5] Kamrat W., Szczepański T., 2009. Wybrane zagadnienia budowy i eksploatacji sieci przesyłowych najwyższych napięć. Kongres Elektryki Polskiej, Warszawa, 2-4 września 2009, Przegląd Elektrotechniczny 11.
- [6] Lubośny Z., 2009. Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym. Warszawa.



- [7] Madajewski K., 1998. Materiały przygotowane przez Instytut Energetyki Oddział w Gdańsku na seminarium szkoleniowe w zakresie systemów przesyłowych prądu stałego HVDC, Gdańsk.
- [8] Materiały informacyjne PSE-Północ Sp. z o.o. Bydgoszcz, 2001.
- [9] Szczepański T., 2012. Analiza niezawodności wysokonapięciowych łączy prądu stałego. Praca Doktorska na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, Gdańsk.
- [10] Szczepański T., 2007. O eksploatacji połączenia stałoprądowego Polska – Szwecja w latach 2001-2006. Wokół Energetyki 3.
- [11] Szczepański T., 2002. Wysokonapięciowe połączenie prądu stałego Szwecja – Polska. Materiały VIII Symposium „Energoelektronika w nauce i dydaktyce”, Bydgoszcz, 26-28 września 2002.
- [12] Źródłowe materiały do oceny niezawodności łączy prądu stałego, Bydgoszcz 2000-2012 (niepublikowane).

## ANALIZA AWARYJNOŚCI KABLI PRĄDU STAŁEGO W ŁĄCZU SZWECJA – POLSKA ORAZ PROPOZYCJA ICH OCHRONY PRZED USZKODZENIAMI

### Streszczenie

W opracowaniu przeanalizowano problem kabli przesyłowych stosowanych w wysokonapięciowym układzie przesyłowym prądu stałego Szwecja – Polska. Omówiono stosowane w łączy kable, podano przyczyny stosowania kabli powrotnych oraz sposoby ograniczenia ich awarii. Kabel powrotny w łączy Szwecja – Polska pojawił się jako alternatywa wymuszona przez ekologów. Z powyższego powodu w wykonanym rozwiązaniu zastąpiono wodę i ziemię dwoma kablami powrotnymi, chociaż z punktu widzenia technicznego wprowadzone rozwiązanie daje niższą sprawność. W dziesięciu z dwunastu dotychczasowych uszkodzeń kabli (w tym jedenaście w kablach powrotnych) przyczynami awarii były przebicia elektryczne izolacji kabla w morzu, w odległości kilkunastu kilometrów od polskiego brzegu, spowodowane przede wszystkim zakłóceniami w północnej części polskiego systemu elektroenergetycznego. Mając na uwadze występujące awarie kabli powrotnych, autor proponuje przeanalizowanie i zrealizowanie jednego lub dwóch z czterech opisanych w pracy rozwiązań, które mogą istotnie ograniczyć skutki i koszty naprawy uszkodzeń kabli.

Słowa kluczowe: kabel powrotny, łączy Szwecja – Polska, elektroda

**Lista recenzentów prac opublikowanych w 2016 roku**  
**Reviewers list publication published in 2016**

Waldemar Kamrat (Politechnika Gdańska)  
Aleksandra Rakowska (Politechnika Poznańska)  
Dariusz Świsulski (Politechnika Gdańska)  
Piotr Szymczak (Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie)  
Waldemar Dołęga (Politechnika Wrocławska)  
Mirosław Miszewski (Stowarzyszenie Elektryków Polskich – oddział bydgoski).