

Adres: Politechnika Wrocławska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych  
ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, tel. 71 3202954, e-mail: jan.zawilak@pwr.edu.pl

## Modele rozwoju infrastruktury ładowania pojazdów elektrycznych

**prof. dr hab. inż. Grzegorz Benysek**

W Polsce trwa dyskusja na temat modelu rozwoju infrastruktury ładowania pojazdów elektrycznych. Pojawiają się różne propozycje, które w największym skrócie można sprowadzić do trzech modeli:

**Model rozproszony** w ramach którego budowane są punkty ładowania (na jedną lokalizację przypada jeden bądź kilka punktów ładowania AC i/lub DC) usytuowane w centrach i innych częściach miast np. przy galeriach handlowych, w hotelach itp. Pytanie jakie można sobie zadać dotyczy tego w jakim stopniu infrastruktura ta jest i będzie w przyszłości (w miarę wprowadzania na rynek nowych modeli pojazdów elektrycznych) wykorzystywana (ile ładowań przypada na jeden terminal, jaka energia jest przekazywana podczas statystycznej sesji ładowania) i czy odpowiada ona na realne oczekiwania użytkowników pojazdów elektrycznych? Pytania te wydają się być uzasadnione, ponieważ operatorzy infrastruktury ładowania bardzo często budują punkty ładowania, które ze względu na uwarunkowania techniczne pojazdów elektrycznych mogą być wykorzystywane co najwyżej w 50 % - mam tutaj na myśli jednowyjściowe terminale AC o mocy 22 kW.

Spróbujmy więc znaleźć odpowiedź na pytanie dotyczące efektywności funkcjonującej już w naszym otoczeniu rozproszonej infrastruktury ładowania? Jeden z operatorów stacji ładowania podał informacje obejmujące liczbę terminali ładowania którymi aktualnie zarządza, liczbę cykli ładowania jaką zarejestrował w ciągu ostatniego roku, wolumen sprzedanej energii oraz średni czas trwania sesji ładowania terminala AC i DC. Z udostępnionych danych wynika, że terminal ładowania działający w sieci operatora, w 2020 roku (bez podziału na AC czy DC) statystycznie był wykorzystywany co dwa dni (co dwa dni miał miejsce jeden cykl ładowania), podczas jednego cyklu ładowania średnio dostarczana była energia rzędu 14 kWh (6,4 kWh/terminal/dzień). Biorąc pod uwagę powyższe oraz średni czas trwania sesji AC i DC, średnia moc ładowania wyniosła 4,5 kW dla terminali AC i 28 kW dla terminali DC. Analizując dane tego samego operatora za 2019 rok przytoczone wcześniej współczynniki przedstawiają się następująco: terminale (bez podziału na AC i DC) statystycznie były wykorzystywane co 1,5 dnia i podczas jednego cyklu ładowania średnio dostarczana była energia rzędu 13,5 kWh (8,9 kWh/terminal/dzień) a średnia moc ładowania wyniosła 13 kW dla terminala AC i 27 kW dla terminala DC. Można sobie więc zadać pytanie, czy przy takich współczynnikach wykorzystania punktów ładowania, dostępnej mocy i wolumenie sprzedanej energii przedsięwzięcie może być ekonomicznie uzasadnione? Czy winę za taki stan rzeczy można rzucić tylko na panującą pandemię i wciąż niewielką liczbę pojazdów? A może strukturalnie model ten jest mało wydajny i w konsekwencji niewspółmiernie drogi zarówno na etapie inwestycyjnym jak i utrzymania?

Model polegający na budowie HUB'ów ładowania (na wzór stacji tankowania paliw). HUB ładowania należy rozumieć jako miejsce w którym kierowca pojazdu elektrycznego 24/7 ma do swej dyspozycji kilka/kilkanaście terminali szybkiego i ultraszybkiego ładowania, w którym podczas ładowania (trwającego w zależności od typu pojazdu kilkanaście/kilkadziesiąt minut) niezależnie od pory doby może skorzystać z usług gastronomicznych, bądź na wzór saloników na lotniskach w komfortowych warunkach sprawdzić @maile, popracować itp. Przy czym w przypadku HUB'ów ładowania powinien obowiązywać odwrócony – w stosunku do stacji tankowania – model zachowania kierowcy: przyjeżdżam – rozpoczynam proces ładowania – korzystam z infrastruktury HUB'a (konsumuję/pracuję/odpoczywam) i jednocześnie samochód jest ładowany – płacę – odjeżdżam. Dzięki takiemu podejściu, naładowanie wybranych modeli pojazdów dostępnych nawet obecnie trwa tyle samo czasu ile zatankowanie samochodu spalinowego.

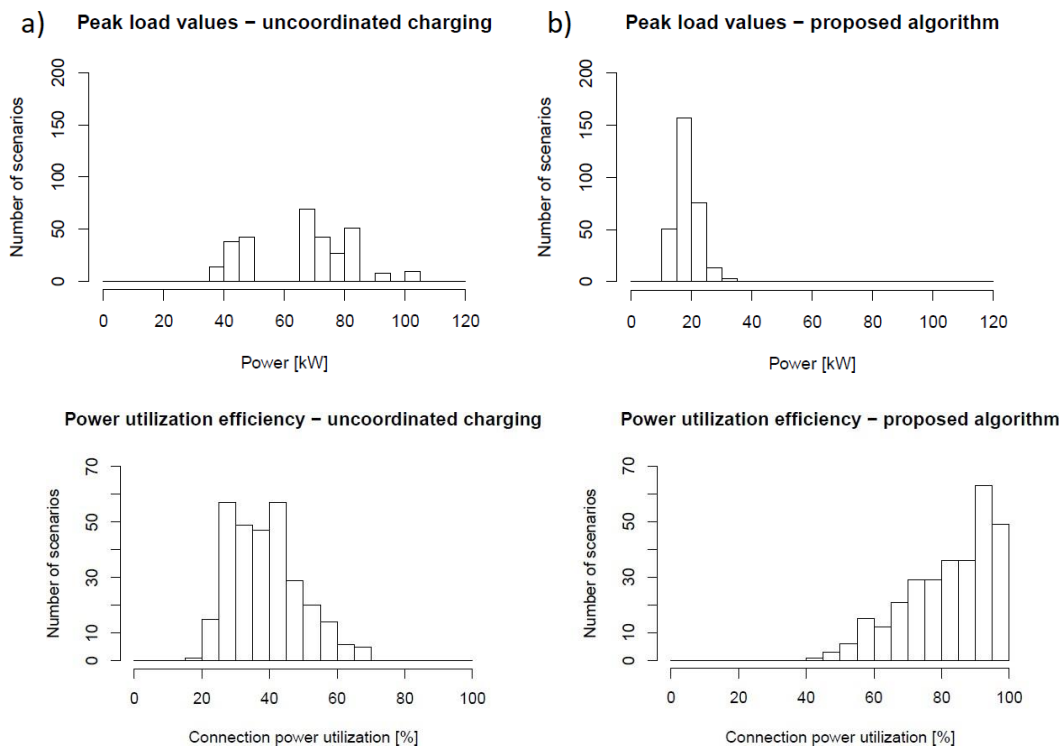
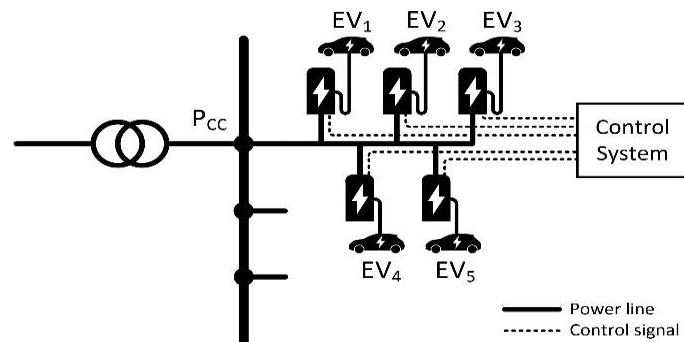
Większość posiadaczy samochodów elektrycznych to kierowcy, którzy swoje doświadczenia/przyzwyczajenia wynieśli z rynku samochodów spalinowych i naturalnym jest, że oczekują znanych sobie rozwiązań, które oferują HUB'y ładowania. W chwili obecnej niedaleko Zielonej Góry, działa jedyny HUB oferujący opisane wcześniej usługi: szybkie i ultraszybkie ładowanie, dostępną 24/7 ofertę gastronomiczną, salonik VIP, TV, WiFi itp. Analizując dane dotyczące efektywności pracy HUB'a można powiedzieć, że każdy terminal CHAdeMO w ciągu roku pracował średnio przez 2.300 h/a (ok. 2.130 ładowań/terminal/a) i podczas jednego cyklu ładowania średnio była dostarczana energia rzędu 22 kWh (128 kWh/terminal/dzień). Porównując dane dot. efektywności pracy infrastruktury rozproszonej widać jednoznacznie, że pomimo panującej pandemii i relatywnie niewielkiej liczby pojazdów elektrycznych efektywność pracy HUB'a jest kilkunastokrotnie lepsza.



*Źródło: Ekoenergetyka*

**Model polegający na budowie garażowych i parkingowych punktów ładowania.** W marcu 2020 roku w życie weszła Dyrektywa EPBD 2018/844 (która dotyczy zarówno budynków mieszkalnych – remontowanych i nowych – oraz budynków użyteczności publicznej) w myśl której budynki mieszkalne powinny być przygotowane, bądź wręcz wyposażone w infrastrukturę ładowania pojazdów elektrycznych. W przypadku budynków użyteczności publicznej, Dyrektywa mówi o zabezpieczeniu 20 proc. miejsc parkingowych pod infrastrukturę ładowania pojazdów elektrycznych. Podobnie jak wcześniej, przy okazji omawiania tego modelu powinniśmy znaleźć odpowiedź na pytanie, czy infrastruktura garażowa/parkingowa jest dostosowana do profilu zachowania przeciętnego kierowcy pojazdu elektrycznego, czyli innymi słowy na ile jest użyteczna? Gdyby pod uwagę wziąć fakt, iż 85 % dziennego przebiegu samochodów osobowych w Europie to dystans poniżej 60 km który przekłada się na codzienne zużycie na poziomie 17 kWh, wówczas taki ubytek energii z jednofazowej instalacji 16 A można uzupełnić w ciągu ok. 5 h. Z tego też względu infrastruktura ta powinna być rozwijana tam gdzie pracujemy bądź mieszkamy. Dodatkowym bonusem związanym z doładowaniem pojazdu w domu jest to, że uzupełnienie energii jest możliwe w czasie trwania strefy nocnej (od 22 do 6), gdy ceny energii dla taryf dwustrefowych są niższe. Z rozwojem infrastruktury, szczególnie garażowej (domowej) wiąże się niebezpieczeństwo niekontrolowanego wzrostu obciążenia szczytowego systemu elektroenergetycznego (w godzinach popołudniowych i wieczornych).

Można temu przeciwdziałać, np. blokując proces ładowania w określonych godzinach bądź implementując lokalne (domowe, parkingowe) systemy magazynowania energii współpracujące z lokalnymi instalacjami OZE i nadrzędnymi systemami zarządzania procesem ładowania. Stosując tego typu rozwiązania – wallbox + magazyn + OZE – będziemy w stanie zwiększyć udział niskoemisyjnej energii a zarazem zmniejszyć zapotrzebowanie na moc i energię systemową. W zależności od pory roku, rola magazynu ulegnie zmianie: latem magazyn będzie ładowany ze źródła OZE, natomiast zimą będzie ładowany poza szczytem, małą mocą z sieci systemowej. Warty uwagi są również systemy, które bez uszczerbku na jakości świadczonych usług realizują funkcje dynamicznego zarządzania procesem ładowania. Badania m.in. autora publikacji pokazują, że dzięki takiemu podejściu (przy niezmiennym poziomie mocy umownej) o połowę można zwiększyć liczbę obsługiwanych pojazdów (z gwarancją odbioru o określonej godzinie naładowanego pojazdu).



*Źródło: Ekoenergetyka*

Nie bez znaczenia jest również fakt, iż system zarządza procesem ładowania w ten sposób, aby uzupełnianie energii odbywało się najmniejszym możliwym prądem (zwiększając tym samym żywotność baterii). Znaczący potencjał z punktu widzenia bilansowania systemu elektroenergetycznego dżemie w technologii V2G, która wyszła już z etapu demonstracji. Stosując podejście statystyczne już ok. 6 mln. samochodów elektrycznych, których baterie na potrzeby usług systemowych będą wykorzystywane w 10 % SOC (założona pojemność użyteczna baterii to 70 kWh) ma potencjał regulacyjny rzędu 30 GWh. Jednak trzeba pamiętać – aby technologia V2G mogła się rozwijać, potrzebne są zarówno zmiany regulacyjne po stronie sektora elektroenergetycznego jak i opracowanie modelu biznesowego dla właścicieli pojazdów.

Zadajmy sobie pytanie na temat zasadności rozwijania infrastruktury w danym modelu? Który z modeli jest najlepiej dopasowany do oczekiwań rynku, najtańszy zarówno na etapie inwestycyjnym jak i utrzymania, gwarantuje największą przepustowość i najmniejszą presję w zakresie wymaganej mocy przyłączeniowej? Wydaje się, że pytania te mają sens, szczególnie w aspekcie działań producentów samochodów wprowadzających do swej oferty coraz to nowe pojazdy elektryczne i zapowiadających systematyczną wymianę modeli ze spalaniem wewnętrznym na pojazdy stricte elektryczne. Co więcej, rozbudowując infrastrukturę ładowania pod uwagę powinniśmy brać również aspekty techniczne chociażby z punktu widzenia baterii montowanych w pojazdach. Rozwój technologii bateryjnych w zakresie gęstości energii jak i intensywności ładowania/rozładowania jest tak znaczący, że w chwili obecnej nawet producenci kojarzeni z markami popularnymi montują baterie umożliwiające ładowanie prądami rzędu 2-3C (tym samym znacznie skracając czas ładowania). Poza tym w osobowych pojazdach elektrycznych montowane są już pakiety bateryjne o pojemnościach, które 7-8 lat temu były montowane w autobusach elektrycznych. Z tych względów jak najszybciej powinniśmy

znaleźć model rozwoju infrastruktury ładowania, który będzie nie tylko efektywny kosztowo i wydajny, który będzie w stanie sprostać zmianom technologicznym zachodzącym na rynku pojazdów elektrycznych ale przede wszystkim będzie odpowiadał oczekiwaniom kierowców. W przeciwnym przypadku budowana bardzo często ze środków podatnika infrastruktura będzie bezużyteczna i de facto będzie hamowała rozwój rynku pojazdów elektrycznych w Polsce.

Spróbujmy odpowiedzieć na pytanie, czy infrastruktura ładowania budowana w modelu rozproszonym odpowiada na oczekiwania rynku (kierowców)? Postawmy się w roli kierowcy nie mającego dostępu do „domowego/parkingowego gniazdka” i dojeżdżającego do pracy samochodem elektrycznym. Jakie jest prawdopodobieństwo, że w sąsiedztwie miejsca pracy będzie wybudowany ogólnodostępny terminal ładowania AC bądź DC, lub jest wolna przestrzeń pod jego budowę w przyszłości? Jeśli w ciągu dnia nie uda mi się naładować samochodu to czy po pracy co kilka dni będę miał ochotę/siłę pojechać np. do centrum miasta, galerii handlowej bądź w inne miejsce, aby spędzić godzinę-dwie (lub więcej) by doładować/naładować swój samochód? Zostawiając mój samochód elektryczny w galerii handlowej, aby przy okazji zakupów naładował się, będę zmuszony bądź wydłużyć mój pobyt (ze względu na niezakończony proces ładowania lub niewystarczającą ilość dostarczonej energii) lub choć na chwilę przerwać zakupy (aby po zakończonym ładowaniu uniknąć opłat za dostęp do terminala ładowania). Oczywiście nie dbając o koszty mogę kontynuować zakupy, jednak wówczas pojawi się pytanie o efektywność wykorzystania infrastruktury ładowania. A jeśli w galerii handlowej nie ma wolnych miejsc ładowania i będę zmuszony naładować mój pojazd z terminala ulicznego – co wówczas począć ze sobą? A co w przypadku, gdy przyjeżdżam do danego miasta z trasy, z niskim poziomem naładowania (bardzo często zdarza się, że na miejsce dojeżdżam z SOC na poziomie 8-10%)? Jak często zdarzy się, że miejsce docelowe mojej podróży jest w bliskim sąsiedztwie punktu ładowania i o mocy umożliwiającej naładowanie pojazdu w czasie załatwiania spraw i dzięki temu nie będę zmuszony dodatkowo korzystać ze środków komunikacji miejskiej bądź taksówki? Praktyka pokazuje, że niezależnie od faktu przyjazdu do miasta ekologicznym pojazdem ze względu na ograniczenia infrastruktury rozproszonej i tak istnieje konieczność poruszania się taksówką, która w najlepszym wypadku jest hybrydowa.

W związku z tym mam jedną zasadniczą wątpliwość, czy naprawdę chcemy modelu w którym to samochód elektryczny będzie determinował nasze zachowania? Przecież większość posiadaczy samochodów elektrycznych to kierowcy którzy swoje doświadczenia/przyzwyczajenia wynieśli z rynku samochodów spalinowych i naturalnym jest, że oczekują znanych rozwiązań: przyjeżdżam, ładuję, płacę i odjeżdżam. Czy łatwiej i taniej nie będzie wybudować HUB'y ładowania, które oprócz usług szybkiego/ultraszybkiego ładowania zapewnią miejsce w którym kierowca w komfortowych warunkach będzie mógł oczekiwać na zakończenie procesu ładowania?

Czy możliwa jest odpowiedź na pytanie dotyczące liczby HUB'ów ładowania jaka musi powstać, aby przepustowością zrównoważyć np. wszystkie stacje benzynowe największego krajowego operatora zarządzającego ok. 1.800 stacjami i sprzedającego w ciągu godziny ok. 800.000 litrów paliwa? Oznacza to, że przy średnim spalaniu na poziomie 8l/100 km operator ten w ciągu godziny zapewnia zasięg rzędu 10 mln. km. Załóżmy, że HUB ładowania składa się z ośmiu, dwuwysciovych stanowisk o mocy 700 kW każde. Przy dobowym współczynniku wykorzystania wynoszącym 50 %, jedno stanowisko w ciągu godziny jest w stanie naładować (od 5 % SOC do 80 % SOC) dwa pojazdy klasy Porsche Taycan, czyli dostarczyć ok. 154 kWh/stanowisko/h (czas ładowania Porsche Taycan od 5 % SOC do 80 % SOC z terminala o mocy co najmniej 270 kW wynosi 22,5 minuty). Uwzględniając powyższe oraz przyjmując, że urealnione zużycie energii pojazdów elektrycznych wynosi 28 kWh/100 km, w ciągu godziny jeden HUB ładowania (przy 50. % dobowym współczynniku wykorzystania) jest w stanie zapewnić zasięg rzędu 4.400 km. Oznacza to, że niecałe 2.300 HUBów ładowania (18.400 stanowisk o mocy 700 kW każde) ma przepustowość 1.800 stacji benzynowych.

A jak to porównanie będzie wyglądało w przypadku terminali AC o mocy 22 kW? Ładowanie od 0 % SOC do 100 % SOC pojazdu tej samej klasy jak poprzednio (Porsche Taycan) trwa ok. 9 h. Przy 50. % współczynniku wykorzystania jeden terminal AC o mocy 22 kW w ciągu doby jest w stanie dostarczyć ok. 112 kWh/terminal/doba czyli jest w stanie zapewnić zasięg na poziomie 16,7 km/h. Oznacza to, że ok. 600.000 terminali AC o mocy 22 kW, pracujących z dobowym współczynnikiem wykorzystania na poziomie 50 % zapewni przepustowość 1.800 stacji benzynowych. W przypadku ładowania od 0 % SOC do 80 % SOC ok. **400.000 terminali AC o mocy**

**22 kW zapewni przepustowość 1.800 stacji benzynowych.** Czyli zapotrzebowanie na moc dla 400.000 terminali wyniesie 8,8 GW.

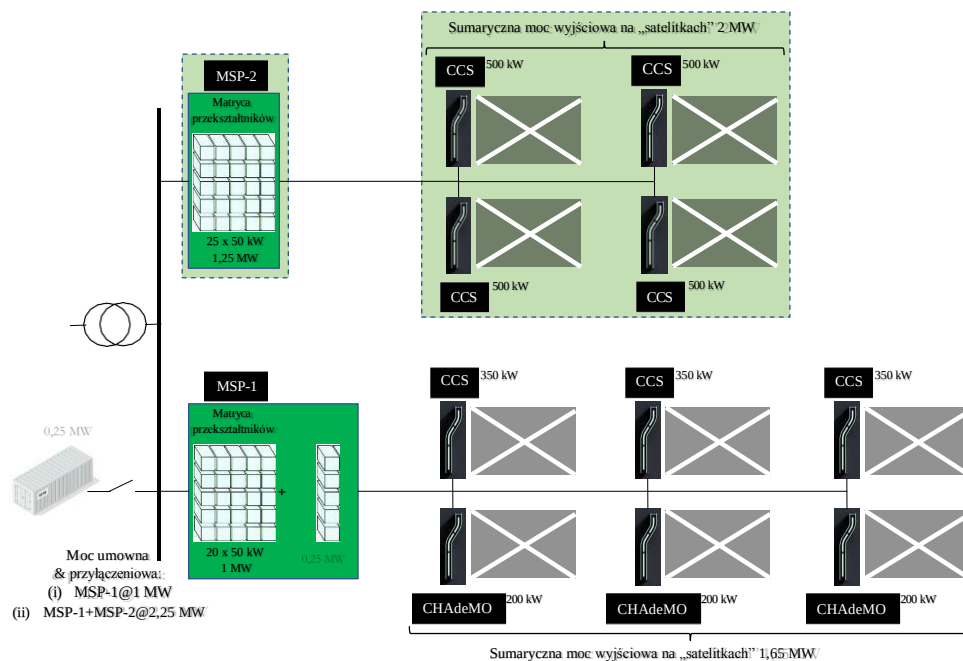
Można zarzucić, że porównanie obu modeli rozwoju infrastruktury ładowania (rozproszonego i scentralizowanego) na przykładzie niszowego Porsche Taycan jest pozbawione sensu i faworyzuje HUB'y ładowania. Uważam jednak, że infrastruktura ładowania powinna być budowana nie na tu i teraz ale z kilkunastoletnią perspektywą pracy tak, aby niezależnie od postępu technologicznego jaki dokonuje się m.in. w zakresie parametrów baterii, pogorszeniu nie ulegały świadczone usługi ładowania. Jak wspominałem wcześniej rozwój technologii baterijnych w zakresie gęstości energii jak i intensywności ładowania/rozładowania jest tak znaczący, że już w chwili obecnej producenci popularnych marek montują baterie umożliwiające ładowanie prądami rzędu 2-3 C a w perspektywie mamy prądy ładowania na poziomie 4-5C i gęstości energii o kilkaset procent przewyższające obecnie dostępne. Jak na tak zdefiniowane zmiany technologiczne przystosowane są HUB'y ładowania? Zaproponowany HUB (składający się z ośmiu, dwuwyjściowych stanowisk o mocy 700 kW) jest w stanie współpracować (bez pogorszenia jakości świadczonych usług ładowania) z pojazdami o mocach ładowania rzędu 350 kW i więcej (do 700 kW). Dla 50. % dobowego współczynnika wykorzystania stanowiska o mocy 700 kW, gdy teoretyczny pojazd ładujemy mocą 350 kW (ładując od 5 % SOC do 80 % SOC) w ciągu godziny jesteśmy w stanie dostarczyć 350 kWh/stanowisko (87,5 kWh/pojazd) co przekłada się na zasięg na poziomie 10.000 km/HUB/h. Oznacza to, że **1.000 HUB'ów jest w stanie zrównoważyć 1.800 stacji benzynowych** operatora mogącego pochwalić się największym wolumenem sprzedawanego w kraju paliwa. Zapotrzebowanie na moc dla tysiąca HUB'ów wyniesie 5,6 GW. Powyższe dane wskazują, że w miarę rozwoju technologii baterijnych (w miarę zwiększania mocy ładowania) efektywność wykorzystania HUB'ów będzie wzrastała.

Kolejnym aspektem na jaki należy zwrócić uwagę porównując oba modele rozwoju jest przestrzeń wymagana pod rozbudowę infrastruktury ładowania. Szacuje się, że jedno stanowisko ładowania AC to ok. 15 m<sup>2</sup>, co dla 600.000 terminali przekłada się na 900 ha (600 ha w przypadku 400.000 terminali AC) jakie musimy znaleźć w polskich miastach kosztem miejsc parkingowych. Jeśli infrastruktura ładowania nie będzie rozwijana kosztem miejsc parkingowych to czy pod budowę nie będą przeznaczane mniej zurbanizowane obszary miast? Pytanie „co zrobić ze sobą podczas ładowania” pozostanie więc nadal aktualne. Z kolei powierzchnia HUB'a ładowania (obejmująca

16 miejsc postojowych, plac manewrowy, powierzchnię pod centralny terminal wraz z infrastrukturą energetyczną oraz część gastronomiczną) wynosi ok. 650 m<sup>2</sup>. Oznacza to, że całkowita powierzchnia jaką należy zabezpieczyć pod budowę 1.000 HUB'ów wynosi ok. 65 ha. A co z kosztami dzierżawy/zakupu miejsc pod setki tysięcy punktów ładowania, z zapewnieniem niezawodności i obsługą techniczną rozproszonej infrastruktury ładowania i w końcu kosztami przyłączy?

Skąd na to wszystko wziąć energię i moc? Szacuje się, że 100. % udział pojazdów elektrycznych w transporcie kołowym średnio przekłada się na 20. % wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną danego kraju – w przypadku Polski mówimy o dodatkowych 30 TWh/a zielonej energii jaką należy wyprodukować. Przy równomiernym rozłożeniu zapotrzebowania na energię pomiędzy energetykę słoneczną (PV@15TWh) a wiatrową (EW@15TWh), musielibyśmy zainstalować moce wytwórcze rzędu 15 GW@PV i 4 GW@EW. Oczywiście inną kwestią, wykraczającą poza zakres tego materiału są techniczne możliwości podłączania OZE do systemu elektroenergetycznego i związane z tym koszty. Jeśli chodzi o moc jaką należy zabezpieczyć na potrzeby rozwoju infrastruktury ładowania, wydaje się, że ze względu na fakt, iż znaczący udział w usługach ładowania będzie odgrywała infrastruktura garażowa/parkingowa – która ma duży potencjał w zakresie zmniejszania zapotrzebowania na moc – HUB'ów ładowania, które będą w stanie zaspokoić potrzeby rynku będzie mniej niż obecnych stacji paliw. Docelowo w skali kraju można mówić o liczbie nie przekraczającej 1.000, która dla zaproponowanej konfiguracji przekłada się na ok. 5,6 GW mocy. Jednakże i w przypadku rozwiązań scentralizowanych (HUB'y) istnieje cały szereg rozwiązań mogących przyczynić się do znacznego (kilkudziesięcioprocentowego) zmniejszenia zapotrzebowania na moc. Można tutaj mówić o matrycowych systemach ładowania umożliwiających dynamiczne przydzielanie mocy ładowania na poszczególne wyjścia jak i o systemach magazynowania energii.





Źródło: Ekoenergetyka

Jaki więc model rozwoju infrastruktury ładowania przyjąć w naszym kraju? Moim zdaniem powinniśmy pójść w kierunku modelu mieszanego, w którym rozwijana będzie zarówno infrastruktura w ramach HUB’ów ładowania (szybka/ultraszybka) budowanych zarówno wzdłuż szlaków komunikacyjnych jak i w miastach oraz infrastruktura garażowa/parkingowa (rozwijana w miejscach gdzie mieszkamy, pracujemy). W obu przypadkach powinny być implementowane rozwiązania zmniejszające zapotrzebowanie na moc (lokalne systemy magazynowania energii, matrycowe systemy ładowania, systemy zarządzania procesem ładowania) oraz energię (lokalna produkcja energii z OZE, bądź w przyszłości wykorzystanie wodoru). Uważam przy tym, że jest



Źródło: FlowGen

możliwa symbioza obu systemów. Całkiem realne jest, że z HUB’ów ładowania będą korzystali nie tylko kierowcy przyjeżdżający z innych miast, kierowcy taksówek, kurierzy i inni ale również kierowcy korzystający z infrastruktury garażowej/parkingowej którzy wybierają się w podróż, bądź ci którzy nie mieli czasu lub ochoty doładować swojego pojazdu (po prostu byli zmęczeni codziennym doładowywaniem swojego pojazdu). Ponieważ oba systemy będą nawzajem się uzupełniały, dlatego w zależności od udziału w rynku usług ładowania infrastruktury garażowej/parkingowej docelowa liczba HUB’ów (zaspakajająca oczekiwania kierowców) będzie mogła być kilkukrotnie mniejsza od liczby stacji tankowania jaką mamy obecnie w naszym kraju.

Opracował: prof. dr hab. inż. Grzegorz Benysek

Lista osób wybranych do Komitetu Elektrotechniki na lata 2024 – 2028

|                                        |                               |
|----------------------------------------|-------------------------------|
| 1 Brock Stefan                         | 16 Palka Ryszard              |
| 2 Cichon Andrzej                       | 17 Paszek Stefan              |
| 3 Demenko Andrzej                      | 18 Piróg Stanisław            |
| 4 Grzesiak Lech                        | 19 Rebizant Waldemar          |
| 5 Hanzelka Zbigniew                    | 20 Sikorski Andrzej           |
| 6 Idziak Paweł                         | 21 Sroka Ryszard              |
| 7 Jakubiuk Kazimierz                   | 22 Stryczewska Henryka Danuta |
| 8 Jarzyna Wojciech                     | 23 Strzelecki Ryszard         |
| 9 Kabziński Jacek                      | 24 Szeląg Wojciech            |
| 10 Kluszczyński Krzysztof              | 25 Wac-Włodarczyk Andrzej     |
| 11 Lubosny Zbigniew                    | 26 Wincenciak Stanisław       |
| 12 Łukaniszyn Marian                   | 27 Wojciechowski Rafał M.     |
| 13 Nadolny Zbigniew                    | 28 Zaporowski Bolesław        |
| 14 Najgebauer Mariusz                  | 29 Zawilak Jan                |
| 15 Orłowska-Kowalska Teresa Bronisława | 30 Zawirski Krzysztof         |

## STOPNIE NAUKOWE



**Dr inż. Milena Kurzawa Obwodowo – polowa analiza i synteza układów uzwojeń w systemach bezprzewodowej transmisji energii elektrycznej**

Promotor: - dr hab. inż. Rafał M. Wojciechowski, prof. PP,  
promotor pomocniczy: - dr inż. Łukasz Knypiński

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Marian Łukaniszyn - Politechnika Opolska,  
dr hab. inż. Mariusz Najgebauer, prof. Polit. Częstochowskiej

Stopień doktora nauk inżynieryjno - technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika i technologie kosmiczne nadała Rada Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej w dniu 15 listopada 2023 r.

W rozprawie omówiono modele numeryczne współcześnie stosowane w analizie i syntezie układów uzwojeń w systemach bezprzewodowej transmisji energii elektrycznej. W szczególności skoncentrowano się na modelach obwodowo – polowych, zwykle nazywanych modelami ekwiwalentnymi. Pierwsza część pracy obejmuje przegląd literatury dotyczący układów bezprzewodowej transmisji energii elektrycznej. Omówiono stosowane modele polowe, modele o parametrach skupionych oraz modele ekwiwalentne wykorzystujące obwody równoważne Foster'a i Cauera. W części głównej pracy Autorka zaprezentowała opracowane i wdrożone przez siebie metody analizy i syntezy układów z polem elektromagnetycznym za pomocą modeli ekwiwalentnych wykorzystujących obwody Foster'a i/lub Cauera. W tym celu opracowała: modele polowe zaimplementowane do autorskiego oprogramowania, metody wyznaczania wartości parametrów obwodów Foster'a i/lub Cauera oraz modele obwodowe. W pracy przeprowadzono analizę układów z polem

elektromagnetycznym zasilanych ze źródeł wyższych częstotliwości, tj. cewki solenoidalnej z koncentratorem pola oraz układu cewek sprzężonych magnetycznie. Zweryfikowano poprawność działania opracowanych algorytmów i procedur. W wyniku przeprowadzonych badań Autorka wykazała, że istnieje możliwość połączenia równoważnych obwodów Fostera i Cauera z modelami obwodowymi oraz modelami wykorzystującymi najnowsze wielostopniowe ujęcie metody elementów skończonych. Ponadto pokazała, że dzięki zastosowaniu modeli ekwiwalentnych istnieje możliwość przyspieszenia obliczeń symulacyjnych stanów pracy układów z polem elektromagnetycznym.



**Dr inż. Wojciech Rosiński *Behavior model and state of health diagnosis method for high temperature PEM fuel cells in the specific state with no active gases* (Model behawioralny oraz metoda diagnostyki stanu technicznego wysokotemperaturowych ogniw paliwowych typu PEM w stanie bez gazów aktywnych)**

Praca doktorska realizowana była na podstawie dwustronnej międzynarodowej umowy (*The agreement for an international jointly-awarded Phd program*) między Politechniką Gdańską (Gdansk University of Technology GUT) a Narodowym Uniwersytem Technicznym w Tuluzie, Francja (The Institute National Polytechnique of Toulouse INPT).

Promotorami byli:

dr hab. inż. Andrzej Wilk, prof. PGd.,

prof. Christophe Turpin - CNRS Research Director, Head of H2 activities, Laboratory LAPLACE, Toulouse, France

**Recenzenci:**

dr hab. inż. Mirosław Lewandowski, prof. Politechnika Warszawska,

dr hab. inż. Marek Pawełczyk, prof. Politechnika Świętokrzyska.

Stopień doktora nauk inżynieryjno - technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika i technologie kosmiczne nadała Rada Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Gdańskiej w dniu 16 stycznia 2024 r.

Rozprawa doktorska dotyczy opracowania metody diagnostyki tzw. wysokotemperaturowych ogniw paliwowych (ang. High temperature - proton-exchange membrane fuel cells HT-PEMFC) w określonym stanie termicznym przy braku w strukturze ogniwa gazów aktywnych (wodoru i tlenu). Oryginalnym podejściem w tej metodzie jest zasilanie tego ogniwa gazem neutralnym o określonym ciśnieniu i uzyskanie ustalonego stanu termicznego o określonej temperaturze, która jest rekomendowana do potrzeb diagnostyki. Brak gazów aktywnych powoduje, że reakcje chemiczne wewnątrz ogniwa paliwowego są szczątkowe i ogniwo takie może być z dobrym przybliżeniem analizowane jako obwód elektryczny zawierający zastępcze elementy zachowawcze (kondensatory) i dyssypatywne (reystory).

Autor przeprowadził szereg badań wysokotemperaturowych ogniw paliwowych HT-PEMFC bez gazów aktywnych polegających na następującej sekwencji zdarzeń:

- ✓ zasilaniu ogniwa źródłem prądowym - stan ładowania,
- ✓ samorozładowaniu się ogniwa do pewnej wartości napięcia – stan samorozładowania,
- ✓ wymuszonym rozładowaniu ogniwa z wykorzystaniem źródła prądowego do określonej wartości napięcia – stan wymuszonego rozładowania.

Metodę tę zdefiniowano pod angielską nazwą „Test Without Active Gases” – TWAG. Autor wyznaczył także parametry (ciśnienie azotu i temperatura ogniwa) rekomendowane do celów standaryzacji tego podejścia do potrzeb diagnostyki. Autor wyznaczył parametry procedury TWAG w celu jest standaryzacji do potrzeb diagnostyki i przyczynił się do znacznego rozwoju tej procedury.

Istotnym zadaniem tej pracy było także opracowanie modelu matematycznego ogniwa paliwowego do celów procedury TWAG. Autor opracował względnie uproszczone modele obwodowe ogniwa o stałej i nieliniowej pojemności z wykorzystaniem metody energetycznej Lagrange’a. Wykazano w pracy, że nawet przy modelu o dwóch stopniach swobody aproksymuje on z dużą zbieżnością pomierzone przebiegi napięcia. Wyznaczono także parametry obwodowe z wykorzystaniem funkcji celu opartej na metodzie najmniejszych kwadratów.

Przeprowadzono szereg badań eksperymentalnych z wykorzystaniem procedury TWAG polegających na emulacji następujących uszkodzeń:

- ✓ defekty mechaniczne membran (różne nacięcia membran),



- ✓ różne stężenia kwasu fosforowego w membranach za pomocą kontrolowanego wypłukiwania,
- ✓ emulowana degradacja elektrod ogniwa paliwowego.

Procedura TWAG wykazała stosunkowo dużą wrażliwość przebiegów napięcia na zaciskach ogniwa na skutek uszkodzeń mechanicznych membran. Wrażliwość na różne stężenia kwasu fosforowego jest obiecująca, ale wymaga dalszych prac badawczych. Badania wykazały, że w przypadku emulowanych degradacji elektrod procedura TWAG nie wykazuje odpowiedniej wrażliwości.



**Dr inż. Aleksander Jakubowski** *Energy efficiency of electric multiple units in suburban operation” (Efektywność energetyczna elektrycznych zespołów trakcyjnych w ruchu podmiejskim)*

Promotor: - dr hab. inż. Andrzej Wilk, prof. PGd.,

promotor pomocniczy: - dr inż. Sławomir Judek

Recenzenci:

dr hab. inż. Marek Pawełczyk, prof. Politechniki Świętokrzyskiej,

prof. dr hab. inż. Adam Szeląg z Politechniki Warszawskiej

Stopień doktora nauk inżynieryjno - technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika i technologie kosmiczne nadała Rada Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Gdańskiej w dniu 24 stycznia 2024 r.

Rozprawa dotyczy analizy energetycznej systemu szybkiej kolei miejskiej przy wykorzystaniu nowej generacji modeli bazujących na środowisku Matlab/Simulink.

Opracowano autorski model zelektryfikowanego systemu transportowego. Jego cechą jest nowatorska implementacja magistrali danych, umożliwiająca symulowanie złożonych zelektryfikowanych systemów transportowych przy zachowaniu wysokiej wydajności obliczeń. Ponieważ każdy z elementów składowych jest niezależnym modelem, jedynym ograniczeniem złożoności badanego systemu są dostępne zasoby komputera.

Przeprowadzono weryfikację dokładności modelu. Precyzję symulacji dynamiki ruchu pojazdu zaprezentowano dla elektrycznego zespołu trakcyjnego poruszającego się na referencyjnym odcinku linii kolejowej. Walidację strony energetycznej modelu przeprowadzono bazując na danych oraz wynikach dla sieci trolejbusowej w Pilźnie (Rep. Czeska). Osiągnięte wyniki potwierdziły skuteczność opracowanego modelu, gdzie rozbieżność obliczonego napięcia nie przekroczyła 2% względem pomiaru, a błąd prądu oraz końcowa różnica w bilansie energii zawarły się poniżej 5%.

Dokonano analizy energetycznej systemu transportowego Szybkiej Kolei Miejskiej w Trójmieście na odcinku linii 250 pomiędzy stacjami Gdańsk Śródmieście oraz Gdynia Redłowo. Obliczenia wykonano dla jednej doby pracy systemu, przy założeniu rozkładu jazdy dla dnia roboczego. Obliczone zużycie energii waha się w granicach 56,4 MWh, natomiast sprawność odzysku energii pomiędzy 25 a 26%.

## **Aktywność naukowa Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej w 2023 roku w zakresie systemów elektromechanicznych oraz układów napędowych**

### **Projekty badawcze:**

- Projekt europejski DORNA (Development of high reliability motor drives for next generation propulsion applications) (Rozwój niezawodnych napędów elektrycznych dla pojazdów kolejnej generacji).**

Kierownik projektu: dr hab. inż. Leszek Jarzębowicz, prof. uczelni.

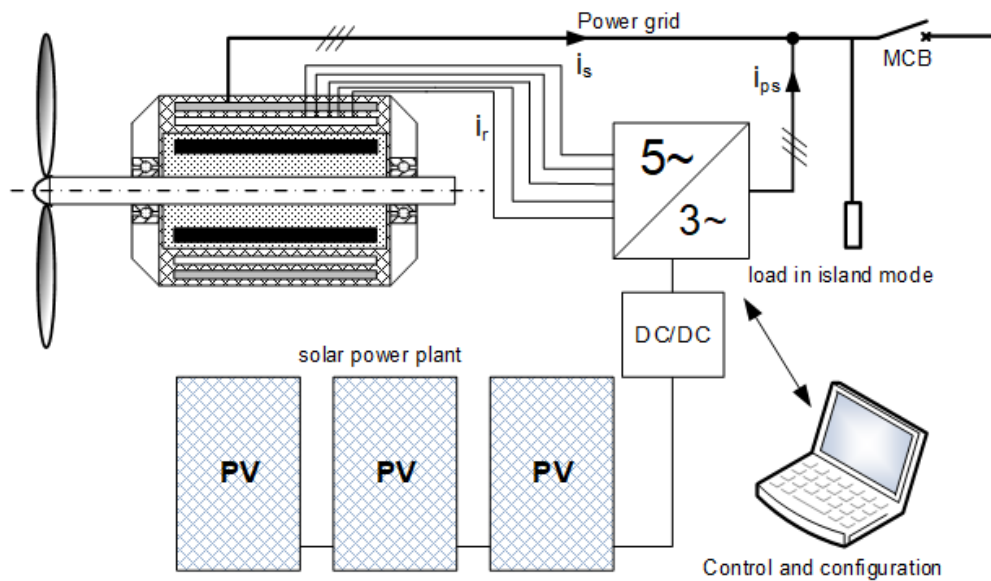
Projekt odpowiada na potrzeby przemysłu, skupiając 11 wiodących na świecie uniwersytetów i 5 wiodących na rynku firm, a także wykorzystuje najnowsze odkrycia technologiczne w nowych prototypach i nowych produktach. Badania prowadzone są w formie szkoleń i oddelegowań, a badacze zyskują nową wiedzę i umiejętności w zakresie energoelektroniki, elektrycznych układów napędowych, silników elektrycznych, zaawansowanych metod sterowania, czujników, komunikacji bezprzewodowej, gromadzenia danych i sztucznej inteligencji. Wyniki projektu obejmują nowe technologie i metody, nowe projekty podzespołów/systemów i narzędzia produkcyjne, nowe produkty i rynki, a także wykwalifikowanych inżynierów

i badaczy dostosowanych do potrzeb unijnego sektora transportu. W dłuższej perspektywie przyniesie to korzyści unijnej branży transportowej, wspólnotom badawczym UE i gospodarce UE.

**2. Projekt "Horizontal axis wind power plant with the low-speed multiphase brushless doubly-fed generator with dedicated power electronics". Projekt realizowany w ramach konkursu IDUB Ventus-Hydrogenii Gdansk Tech Program (grant no. DEC 3/2022/IDUB/VHR).**

Kierownik projektu: dr inż. Krzysztof Blecharz.

Głównym celem projektu jest opracowanie kompletnej elektrowni wiatrowej o poziomej osi obrotu bez przekładni mechanicznej z nowatorską konstrukcją niskoobrotowego generatora dwustronnie zasilanego bez magnesów trwałych (LR-BLDFIG), w którym wyeliminowane zostaną pierścienie ślizgowe jak pokazano schematycznie na rys.1. Nowa koncepcja bezszczotkowego generatora polega na zastosowaniu w obwodzie sterowania układu wielofazowego zasilanego przez dedykowany przekształtnik energoelektroniczny, natomiast obwód mocy generatora podłączony bezpośrednio do sieci zasilającej klasycznie wykonany jest w konfiguracji trójfazowej.



*Konfiguracja bezprzekładniowej elektrowni wiatrowej BLDFIG z modułami PV*

**3. Projekt „Wysokosprawnościowa turbina wiatrowa w oparciu o wolnoobrotowy bezprzekładniowy, wielofazowy dwustronnie zasilany generator indukcyjny”.**

Projekt finansowany przez NCBiR. Czas realizacji: 01.04.2023-01.02.2026.

Kierownik projektu: dr inż. Roland Ryndzionek.

Celem projektu jest opracowanie nowej konstrukcji wolnoobrotowego, bezszczotkowego generatora indukcyjnego, dwustronnie zasilanego oraz dedykowanego układu sterowania. Projekt wpisuje się w tematykę nowoczesnych bezszczotkowych generatorów elektrycznych, a zwłaszcza generatorów bez magnesów trwałych, które mają zastosowanie np. w farmach wiatrowych. W ramach projektu zbudowany zostanie prototyp generatora w wersji pięciofazowej wraz z przeprowadzeniem testów laboratoryjnych oraz syntetycznych.

**4. Projekt „Stanowisko do badań wysokoobrotowych generatorów wielofazowych, wraz z dedykowanymi układami energoelektronicznymi”.**

Projekt realizowany w ramach działalności statutowej Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG.

Kierownik projektu: dr hab. inż. Marcin Morawiec.

Celem projektu było opracowanie projektów i wykonanie wysokoobrotowych generatorów wielofazowych wraz z dedykowanymi układami energoelektronicznymi. W wyniku realizacji projektu zbudowano:

- generator 5 fazowy indukcyjny klatkowy –  $f_n=500$  Hz,
- generator 5 fazowy z magnesami trwałymi –  $f_n=250$  Hz,
- generator 3 fazowy indukcyjny klatkowy –  $f_n=250$  Hz,
- generator 3 fazowy indukcyjny klatkowy –  $f_n=500$  Hz.

## 5. Projekt „Stanowisko z wysokoobrotową maszyną zasilaną przekształtnikami wielopulsowymi”.

Projekt realizowany w ramach działalności statutowej Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG.

Kierownik projektu: prof. dr hab. inż. Ryszard Strzelecki.

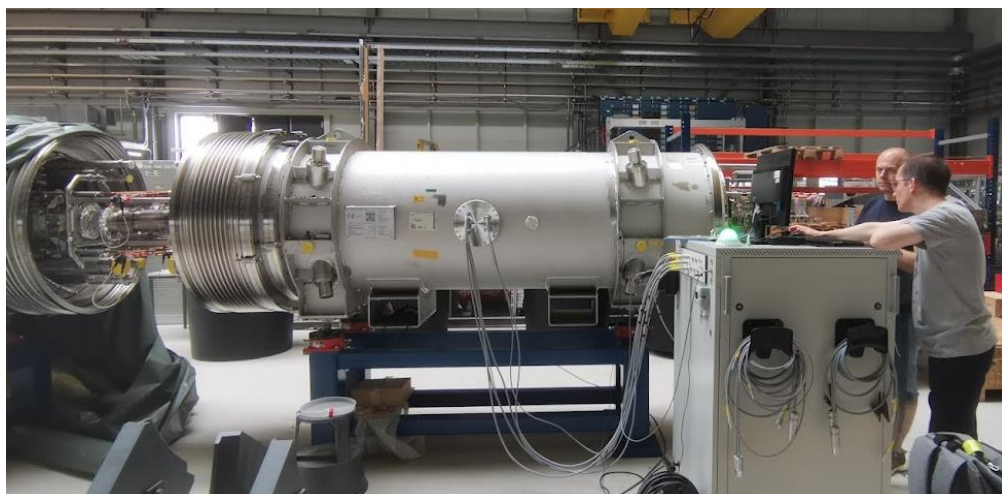
Projekt jest konsekwencją badań nad innowacyjnymi metodami modulacji dla przekształtników wielopulsowych z dławikami sprzężonymi. Stanowisko umożliwia badania nie tylko związane z modulacją i przekształtnikami wielopulsowymi, ale również badania samej maszyny wysokoobrotowej oraz całości jako układu napędowego i generacyjnego. Rdzeń stojana maszyny wykonano z blach elektrotechnicznych o grubości 0,1 mm. Częstotliwość znamionowa maszyny wynosiła 2 kHz, moc znamionowa 5 kW, liczba par biegunów 4, napięcie znamionowe 400 V, liczba faz uzwojenia stojana 3.

## 6. Kontynuacja projektu w ramach umowy trójstronnej o współpracy następujących instytucji:

- Facility for Antiproton and Ion Research in Europe GmbH (Darmstadt, Germany) - FAIR,
- Jagiellonian University in Kraków,
- Gdansk University of Technology

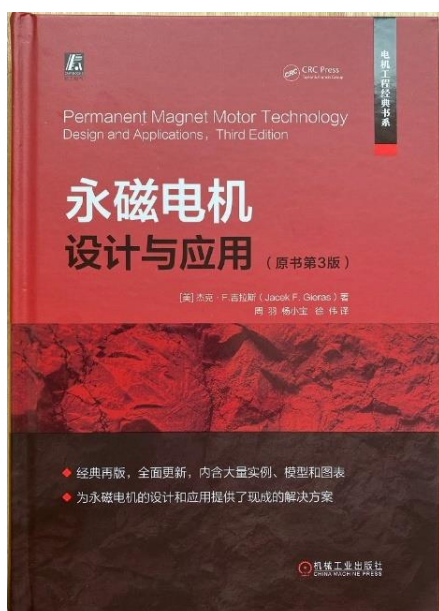
Kierownik projektu: dr hab. inż. Andrzej Wilk, prof. uczelni.

Zakres tej umowy obejmuje zaprojektowanie i wykonanie prototypowych urządzeń do diagnostyki elektromagnesów nadprzewodnikowych. Opracowano dwa prototypowe urządzenia: „Capacity Discharge System” i „Continuity & High Voltage System” do badań stanu izolacji uzwojeń, parametrów obwodowych uzwojeń i kontroli układów sensorowych elektromagnesów nadprzewodnikowych. Prace realizowane przez Wydział Elektrotechniki i Automatyki - wspierane przez Wydział Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki PG.



Elektromagnes nadprzewodnikowy podczas procesu diagnostycznego systemem „Continuity & High Voltage”

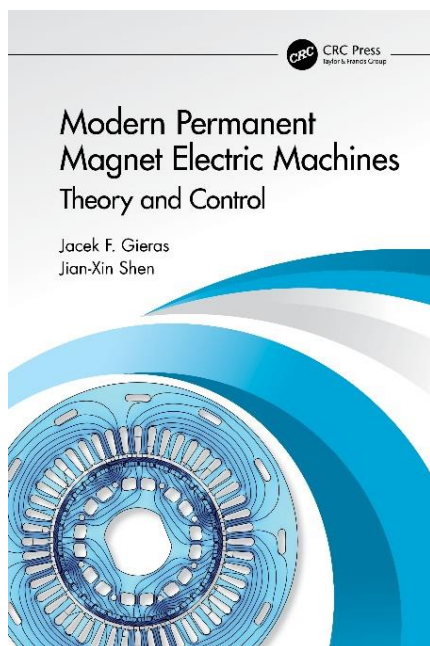
## NOWE KSIĄŻKI



Jacek F. Gieras, „Permanent magnet motor technology: design and application” (*Technologia maszyn o magnesach trwałych: Projektowanie i zastosowania*). Tłumaczenie na język chiński, Wydawnictwo China Machine Press, 2023.

Oryginał, 3 wydanie, opublikowany w 2010 roku przez CRC Press – Taylor and Francis Group

**Spis treści:** 1. Wprowadzenie, 2. Materiały i obwody magnetyczne o magnesach trwałych, 3. Analiza za pomocą metody elementów skończonych, 4. Silniki komutatorowe o magnesach trwałych, 5. Silniki synchroniczne o magnesach trwałych, 6. Silnik bezszczotkowy prądu stałego o magnesach trwałych, 7. Silnik o strumieniu osiowym (silniki tarczowe), 8. Silniki bezszczotkowe o dużej gęstości mocy, 9. Silniki wysokoobrotowe, 10. Silniki bezszczotkowe o konstrukcji specjalnej, 11. Silniki skończone, 12. Mikrosilniki, 13. Optymalizacja, 14. Eksploatacja, Załącznik A. Indukcyjność rozproszenia uzwojeń stojana prądu przemiennego, Załącznik B. Straty mocy w silnikach prądu przemiennego.



**Jacek F. Gieras, Jian-Xin Shen, „Modern permanent magnet electric machines: theory and control”** (*Nowoczesne maszyny elektryczne o magnesach trwałych: teoria i sterowanie*) CRC Press – Taylor and Francis Group, Boca Raton – London - New York, 2023.

**Spis treści:** 1. Podstawy magnetyzmu, 2. Materiały magnetyczne miękkie, 3. Magnesy trwałe, 4. Obliczenia obwodów magnetycznych o magnesach trwałych, 5. Maszyny komutatorowe o magnesach trwałych i ich sterowanie, 6. Silniki i napędy bezszczotkowe prądu stałego o magnesach trwałych i ich sterowanie, 7. Silniki i napędy synchroniczne o magnesach trwałych i ich sterowanie, 8. Silniki o strumieniu podłużnym oraz silniki o strumieniu poprzecznym (transverse flux motors), 9. Silniki wysokoobrotowe o magnesach trwałych.

<https://www.routledge.com/Modern-Permanent-Magnet-Electric-Machines-Theory-and-Control/Gieras-Shen/p/book/9780367610586>