

## Koncepcja układu zasilania i sterowania prototypowego trójkołowego pojazdu elektrycznego

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono koncepcyjną wersję prototypowego pojazdu opartego na zasilaniu czysto-elektrycznym. Przedstawione zostały główne zalety oraz wady takiego rozwiązania. Rozszerzająca się ochrona środowiska kierunkuje rozwój branży automotive w stronę jak najmniejszej emisji toksyn do otoczenia. Jednocześnie wymagane jest zapewnienie użytkownikowi możliwości do pokonania żądanej trasy bez konieczności postoju. Ze względu na ograniczenia techniczne rozpatrywane zagadnienie dotyczy się pojazdu przeznaczonego do ruchu miejskiego niemuszającego pokonywać dalekich tras.

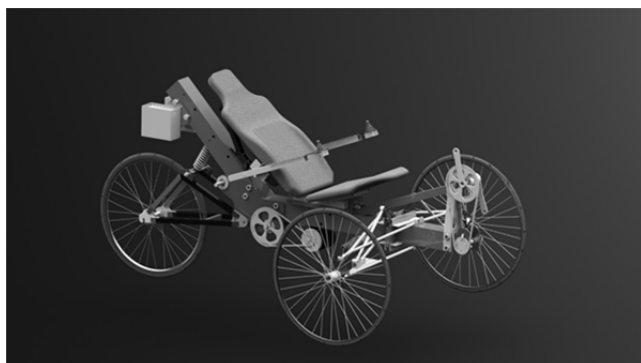
**Abstract:** The article presents a conceptual version of a prototype vehicle based on purely electric power. The main advantages and disadvantages of such a solution were presented. Expanding environmental protection is driving the development of the automotive industry towards the lowest possible emission of toxins to the environment. At the same time, it is required to provide the user with the opportunity to overcome the desired route without stopping. Due to technical limitations, the issue in question concerns a vehicle intended for urban traffic that does not have to travel long distances. (The concept of power supply and control system of a prototype three-wheeled electric vehicle)

**Słowa kluczowe:** Pojazd elektryczny, napęd elektryczny, maszyny elektryczne

**Keywords:** Electric vehicle, electric drive, electric machines

### Wstęp

Pojazdy elektryczne w obecnych czasach nie są niczym zaskakującym. Coraz częściej słyszy się o gigantycznych korporacjach w branży automotive kładących nacisk na rozwój elektro-mobilności. Wyścig techniczny między producentami ma na celu umożliwienie użytkownikowi bezproblemowe korzystanie z systemów sterowania, układu napędowego oraz pokonywanie dalekich tras w miarę możliwości.



Rys.1. Projekt prototypowy pojazd wykonany przez studentów Pcz



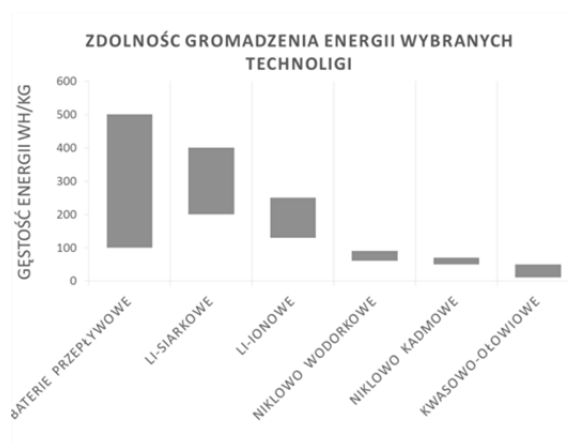
Rys.2. Prototypowy pojazd wykonany przez studentów Pcz

Budowa takich pojazdów jest obciążona wieloma problemami – chociażby pojemność baterii akumulatorów

czy masy własnej całego pojazdu. Opierając się na aktualnych badaniach głównym kierunkiem budowy koncepcyjnego pojazdu będzie dobór maszyn typu BLDC lub PMBLDC. Problem doboru odpowiednich układów napędowych spowodowany jest zachowanie możliwie niskiej masy w stosunku do całego pojazdu. Proporcjonalnie do wzrostu ciężaru spada sprawność takich maszyn. Głównym aspektem takiego pojazdu ma być kompaktowość oraz wygoda.

### Koncepcja układu akumulatorów

Problem doboru akumulatorów oraz ładowania pojazdu jest najtrudniejszym elementem w tworzeniu pojazdów elektrycznych. Do tego przeprowadzona analiza rynku w poszukiwaniu najlepszych jakościowo oraz ciągle rozwijających się w tej dziedzinie technologii daje możliwość wyszukania odpowiednich do zastosowania banków energii. Klasyczne akumulatory kwasowo-olowiowe ze względu na swoją wagę i rozmiary coraz częściej są wypierane chociażby przez baterie Litowo-jonowe, które mogą osiągać pojemność nawet 10kWh umożliwiając podróżnemu przejazdu nawet do 150km. Dodatkowo zestawy banków energii, dlatego też dobór akumulatorów ma kluczowe znaczenie w ramach całej konstrukcji.



Rys.3. Wskazanie typów obecnych technologii dotyczących banków energii

Najlepszym rozwiązaniem technologicznym były by litowo-żelazowo-fosforanowa (Li-FePO<sub>4</sub>), łączy w sobie

zalety wysokiej wydajności prądowej, długiego czasu eksploatacji, dużej gęstości energetycznej oraz bezpieczeństwa. Są one rodzajem akumulatorów litowo-jonowych o dużej mocy. Ogniwa te mają większą odporność na niewłaściwe warunki eksploatacji od innych rozwiązań. Dzięki tej odporności często stosowane są w pojazdach elektrycznych i zdalnie sterowanych modelach. Ich najważniejszymi cechami są:

- Niskie samorozładowanie
- Duża pojemność
- Długa żywotność
- Brak efektu pamięciowego
- Szybki proces ładowania

### Dobór układu napędowego

Kierując się sprawnością całego pojazdu niezbędnym jest wykorzystanie jak najlepszych systemów napędu elektromechanicznego. Do tego często wykorzystywane są maszyny typu BLDC. Ze względu na budowę, która od pozostałych maszyn zachowuje dużą sprawność oraz moc w stosunku do masy własnej jednostki napędowej. Głównymi aspektami wykorzystania takich maszyn są:

- wysoka sprawność w stosunku do prędkości;
- szeroki zakres regulacji prędkości obrotowej;
- Niska masa w stosunku do mocy;
- wysoki moment obrotowy.

Do głównych wad zalicza się między innymi:

- stosunkowo wysoka cena do innych rodzajów maszyn napędowych;
- zastosowanie specjalistycznych układów sterowania.

Maszyny typu BLDC oraz PMLDC cechują się odpowiednio wysokim momentem obrotowym co jest jedną z zalet stosowania takiego rozwiązania w jednostkach napędowych. Przy zachowaniu niewielkiej masy całkowitej pojazdu może to przełożyć się na prędkość nie rzadko w granicach do 100km/h. Na moment obrotowy składa się wiele czynników takich jak siła tarcia, bezwładność czy chociażby opór obciążenia. Wykorzystując zależność momentu średniego można w łatwy sposób oszacować odpowiedni poziom parametru przy doborze odpowiedniej jednostki napędowej.

$$(1) \quad T_{RMS} = \frac{\sqrt{(T_p^2 + T_A + (T_L + T_F)^2 T_R + (T_J - T_L - T_F)^2 T_D)}}{(T_A + T_R + T_D)}$$

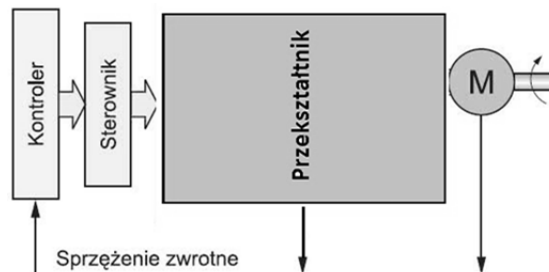
gdzie:  $T_p$  - max moment obr.;  $T_L$  - moment oporowy obciążenia;  $T_J$  - moment z bezwładnością;  $T_F$  - siła tarcia;  $T_A$  - przy prędkości rosnącej;  $T_D$  - przy prędkości malejącej;  $T_R$  - przy prędkości stałej.

Dodatkowo częstym aspektem przy doborze maszyn w pojazdach jest możliwość odzyskiwania energii podczas hamowania. Umieszczone w piastach jednostki napędowe pozwalają na dostarczenie dodatkowych pokładów mocy podczas zwalniania. Hamowanie rekuperacyjne w zakresie pracy do jakiego będzie przeznaczony koncepcyjny pojazd (ruch miejski) umożliwi dodatkowo doładowanie pojazdu oraz przejazd około 10% więcej trasy niż w przypadku standardowych zastosowaniach. Systemy KERS stosowane są chociażby w bolidach formuły 1 które z odzysku energii dają dodatkową moc do wykorzystania w tym przypadku na krótkich kilkusekundowych doładowaniach.

### Układ sterowania

Coraz częściej spotykane w układach sterowania są sterowniki mikroprocesorowe. Daje to możliwość łatwej modyfikacji całego układu lub dodawania na bieżąco innych funkcji systemowych. Otwartość na zmiany daje użytkownikowi możliwość płynnej analizy stanu systemu oraz kontrolę nad całym pojazdem. W układzie sterowania

w przypadku wykorzystania w jednostce napędowej maszyn typu BLDC niezbędne jest wykorzystanie czujników Halla oraz odpowiadających im detektorów. Dzięki nim na bieżąco do systemu sterowania przekazywana jest informacja o położeniu wirnika. Zastosowanie specjalistycznych zestawów czujnikowych oraz detektorów wiąże się z nakładami finansowymi jednak wykluczenie z maszyny komutatora ze szczotkami powoduje wydłużenie żywotności silnika pozbawiając go iskrzenia oraz możliwości przeskoku mikrowyładowań na uzwojenia.



Rys.4. Przykładowe rozwiązanie układu sterowania

### Układ ładowania

Aktualnym oraz prężnie rozwijanym sposobem ładowania akumulatorów w bateriach małej pojemności jak i większych jest ładowanie bezprzewodowe. Wszystkie odbywa się wykorzystując zjawisko indukcji elektromagnetycznej pomiędzy cewkami – nadawczą i odbiorczą. Rozwiązanie w przypadku ładowania indukcyjnego pojazdów wiąże się z problemami technicznymi. Konieczność przesyłania energii o wysokiej mocy wymaga stworzenia odpowiednich układów nadawczych oraz odbiorczych w pojeździe co wpływa na zwiększenie masy oraz może sprawiać problemy ze względu na gabaryty. W przypadku ładowania pojazdu niezbędne dodatkowo jest stworzenie infrastruktury umożliwiającej korzystanie z tego systemu. Koncepcyjne rozwiązanie ma umożliwić wjazd pojazdu na płytę indukcyjną i po zaparkowaniu system ma rozpoznać cewkę odbiorczą i wykonać czynności przesyłowe. W takim przypadku niezbędne jest zachowanie odpowiednich warunków aby sprawność przesyłu była najlepsza. Wynika to ze wzoru:

$$(2) \quad \eta = \frac{k^2 \cdot Q_1 \cdot Q_2}{(1 + \sqrt{1 + k^2 \cdot Q_1 \cdot Q_2})^2}$$

gdzie:  $k$  - współczynnik sprzężenia między cewkami,  $q_1; q_2$  - dobroć cewek

Obecnie technologia oparta na ładowaniu bezprzewodowym daje możliwości osiągnięcia sprawności na poziomie nawet 80% co pozytywnie wróży na przyszłe rozwiązania techniczne. Dodatkową zaletą takiego ładowania jest brak elementów które by na siebie mechanicznie oddziaływały. Co za tym idzie nie zużywają się tak szybko.

Ładowanie indukcyjne jest jednym z wiodących trendów technicznych stale rozwijanych w celu usprawnienia procesów korzystania z przesyłu energii. W przypadku ładowania pojazdów elektrycznych z wykorzystaniem tej metody jest to skomplikowane zagadnienie, ze względu na ilość energii, którą cały system ma przesłać oraz rozmiary. Najbardziej optymalnym rozwiązaniem w takim przypadku wydaje się być ze strony technicznej zamontowanie w:

- Stacjach ładowania - cewki nadawczej umieszczonej w płycie parkingowej,
- Pojeździe - cewki odbiorczej w podwoziu pojazdu.

Problematyka doboru cewek związana jest z uwzględnieniem rozmiarów całego systemu, określenia

mocy do przesyłania oraz zagrożeń związanych z możliwością uszkodzenia podczas standardowej jazdy.

Rozpatrując przesył energii bezprzewodowo należy wziąć pod uwagę przede wszystkim kształt, rozmiary oraz odstęp między cewkami. Te parametry bezpośrednio wpływają na współczynnik sprzężenia między cewkami. Wpływa to bezpośrednio na cały układ z zależności

$$(3) \quad k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

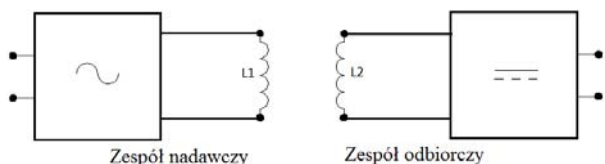
gdzie  $k$  - współczynnik sprzężenia,  $M$  - indukcyjność wzajemna,  $L_1, L_2$  - Indukcyjności własne cewek.

Dobroć cewki jest drugorzędny aspekt do zachowania. Jest to parametr, który opisuje gromadzoną energię do strat. Opisywana wzorem

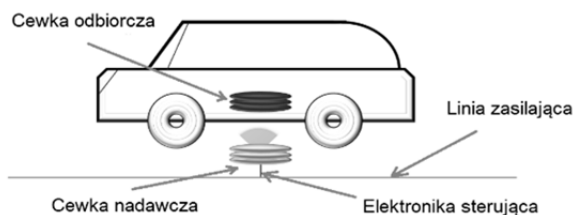
$$(4) \quad Q = \frac{|XL|}{R}$$

przy czym  $XL$  - reaktancja cewki,  $R$  - rezystancja cewki.

Zachowanie parametrów na wyższym poziomie pozwala na ograniczenie strat w całym układzie które w obecnych technologiach dopracowane są na poziomie sprawności do około 80%.



Rys.5. Uproszczona wersja rozwiązania układu sterowania



Rys.6. Rozmieszczenie poszczególnych elementów składających się na bezprzewodowy przesył energii

Konceptyjnie pojazd posiada możliwość podjazdu na specjalnie przygotowaną płytę indukcyjną i podczas postoju system ma przekazać energię do zespołów odbiorczych. Każdy obiekt pod względem technicznym oraz wszystkimi parametrami należy rozpatrywać indywidualnie ze względu na specyficzne różnice w układzie napędowym lub zastosowania konkretnych podzespołów akumulatorowych.

W zależności od dedykowanego przeznaczenia parametry potrzebne dla indukcyjnego ładowania mogą znacząco od siebie odbiegać. W tym miejscu warto jednak nadmienić, że poziom strat przy naszym założeniu nie może przekroczyć progu 25% energii przesyłanej do pojazdu.

Związane jest to z koncepcją ergonomicznego pojazdu, w momencie zwiększenia pręgu pojazd stałby się ciężki w eksploatacji, a stratami prawdopodobnie obciążony zostałby w tym momencie odbiorca.

### Podsumowanie

Biorąc pod uwagę rozwój techniczny oraz rozwiązania które coraz częściej pojawiają się z różnych stron świata możliwe jest że niebawem pojazdy czysto-elektryczne pojawią się na drogach. Rozwój maszyn elektrycznych o nowe technologie oraz wynalazki prowadzą do wyparcia starych układów. Niegdyś spalinowe jednostki napędowe były czymś czego pragnął świat – dziś działania na rzecz ochrony środowiska dają silny nacisk na ograniczanie w miarę możliwości toksyn chociażby z samochodów. Rozwój automatyki w branży automotive również pozwala na szerszą możliwość zastosowań oraz przyjazne użytkownikowi korzystanie z systemu. Kompaktowe akumulatory które są w stanie pomieścić energię wielkości kilku kW są już wielkości niewielkiej paczki mieszczącej się pod siedzeniem kierowcy. Prężny rozwój techniki umożliwi wprowadzenie do infrastruktury miejskiej niewielkich pojazdów a w przyszłości być może na rzecz czysto-elektrycznych napędów zostaną wyparte hybrydowe oraz spalinowe jednostki w komunikacji miejskiej. A odpowiednie rozmieszczenie płyt indukcyjnych zapewni nieograniczony zasięg samochodom.

**Autorzy:** inż. Kacper Szymanek, *Studenckie Koło Naukowe Napędów i Maszyn Elektrycznych, Politechnika Częstochowska*, E-mail: [cappek00@gmail.com](mailto:cappek00@gmail.com); inż. Bartłomiej Mielczarek, *Studenckie Koło Naukowe Napędów i Maszyn Elektrycznych, Politechnika Częstochowska*, E-mail: [marcoo.mielczarek95@gmail.com](mailto:marcoo.mielczarek95@gmail.com); inż. Tomasz Sikora, *Studenckie Koło Naukowe Napędów i Maszyn Elektrycznych, Politechnika Częstochowska*, E-mail: [sipioncy@gmail.com](mailto:sipioncy@gmail.com); dr hab. inż. Marek Lis *Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny*, E-mail: [lism@el.pcz.czest.pl](mailto:lism@el.pcz.czest.pl)

### LITERATURA

- [1] Domoracki A., Krykowski K.: *Silniki BLDC - Klasyczne metody sterowania*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne NR 72/2005, Politechnika Śląska, Gliwice.
- [2] Dziadecki A., Szklarski L., Strycharz J., Jaracz K.: *Automatyka napędu elektrycznego*, WAGH, Kraków, 1996.
- [3] Krykowski K.: *Silnik PM BLDC w napędzie elektrycznym - analiza, właściwości, modelowanie*, Monografia, Gliwice 2011
- [4] Krzemiński Z.: *Bezczujnikowy napęd z silnikiem bezszczotkowym prądu stałego*, Politechnika Gdańska, 2002.
- [5] Krakowski M., *Elektrotechnika teoretyczna - pole elektromagnetyczne*, PWN, Warszawa, 1995.
- [6] Rawa H., *Elektryczność i magnetyzm w technice.*, PWN, Warszawa, 1994
- [7] Griffiths D. J., *Podstawy elektrodynamiki*, PWN, Warszawa, 2006, Wydanie drugie
- [8] Morawski T., Gwarek W., *Pola i fale elektromagnetyczne*, WNT, Warszawa, 1998.
- [9] Sadiku M. N. O., *Numerical techniques in electromagnetics*, CRC Press LLC, 2001
- [10] Zygmunt Piątek, Paweł Jabłoński, *Podstawy teorii pola elektromagnetycznego*