

Konrad ZAJKOWSKI <sup>1</sup>  
Stanisław DUER  
Dominik ŁYSKOJC

### **REGULACJA PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ SILNIKA W SAMOCHODZIE ELEKTRYCZNYM W ASPEKTCIE MINIMALIZACJI PRZEPIĘĆ KOMUTACYJNYCH**

*W artykule dokonano przeglądu możliwych metod regulacji prędkości obrotowej silników elektrycznych stosowanych w samochodach elektrycznych. Omówiono przebiecia powstające wskutek komutacji w obwodzie silnika. Dokonano analizy przebieć i metod ich redukcji towarzyszących procesowi załączania, wyłączenia i regulacji prędkości silnika. Przedstawiono rozwiązania stosowane przez kilku producentów i omówiono sposoby poprawy istniejących rozwiązań.*

*Ze względu na duże prądy w obwodzie, przekładające się na duże przebiecia na indukcyjnościach, zagadnienie jest ważne i uzasadnione ekonomicznie.*

### **ADJUSTING SPEED ELECTRIC MOTOR IN THE CAR IN THE ASPECT MINIMIZATION SWITCHING SURGES**

*The paper reviews the possible methods for speed control of electric motors used in electric cars. Discussed due to switching overvoltages in the motor circuit. An analysis of surges and their method of reduction accompanying the process of switching and control engine speed. Are solutions used by several manufacturers and discussed ways to improve existing solutions.*

*Due to the large currents in the circuit, is reflected in the large surges in the inductance, the issue is important and economically justified.*

## **1. WSTĘP**

Nowoczesne pojazdy napędzane silnikiem elektrycznym zaopatrzone są w instalację wysokoprądową niskonapięciową zasilającą główny silnik roboczy. Komutacja dużych prądów skutkuje powstaniem niebezpiecznych przebieć w obwodzie z indukcyjnością. Przebiecia mają niekorzystny wpływ na działanie pozostałych obwodów i elementów składowych pojazdu. Mogą doprowadzić do uszkodzenia uzwojeń silnika i podzespołów

---

<sup>1</sup>wszyscy: Politechnika Koszalińska, Zakład Zastosowań Elektroniki i Elektrotechniki,  
ul.Racławicka 15-17, 75-620 Koszalin, tel. 94-3478426  
e-mail: konza@tu.koszalin.pl, stduer@tu.koszalin.pl

elektronicznych. Zjawiska przepięć towarzyszą tu załączaniu, wyłączaniu jak również w pewnych rozwiązaniach regulacji prędkości obrotowej.

Problem przepięć szczególnie zauważalny jest przy odbiornikach o charakterze indukcyjnym współpracujących z elementami elektronicznymi w układzie sterowania.

## 2. ANALIZA MOŻLIWYCH ROZWIĄZAŃ

Ze względu na łatwość magazynowania i wytwarzania energii w ogniwach elektrochemicznych, podstawową energią w pojeździe elektrycznym jest prąd stały. Przy zastosowaniu silników prądu stałego nie występują straty energii na przetwarzaniu DC/AC.

### 2.1 Silnik wykonawczy prądu stałego

Wśród możliwych zastosowań w napędzie głównym pojazdu elektrycznego prądu stałego należy wymienić silnik obcowzbudny, szeregowy, bocznikowy i szeregowo-bocznikowy. Oczywiście pewne typy z wymienionych silników są bardziej zalecane od pozostałych przy takim typie obciążenia. Niemniej wybrany typ rzutuje na możliwe sposoby regulacji prędkości obrotowej.

W silniku bocznikowym zmiany momentu obciążającego nie wpływają na wartość strumienia głównego, zatem występuje tu mała zależność prędkości obrotowej od momentu obciążenia. Przy obciążeniu tego silnika momentem znamionowym  $M_N$ , jego prędkość obrotowa  $n_N$  jest o 2÷5% mniejsza niż prędkość przy biegu jałowym  $n_0$ .

Silnik szeregowy charakteryzuje się znacznym momentem obrotowym zwłaszcza przy niewielkiej prędkości obrotowej. Przy małym obciążeniu prędkość obrotowa może osiągać niebezpiecznie dużą wartość.

Prędkość obrotową silników prądu stałego możemy regulować przez: zmianę strumienia  $\Phi_{ja}$  – regulacja bocznikowa, zmianę rezystancji  $R_{ra}$  – regulacja szeregową i przez zmianę napięcia zasilającego  $U$ .

Metody rezystancyjne wprowadzają dodatkowe straty na ciepło. Rezystancje wprowadzone w obwód twornika przenoszą duże wartości prądu, zatem komutacje w tym obwodzie są szczególnie narażone na przepięcia. Ponadto przy stosowaniu metody rezystancyjnej, sprawność układu napędowego maleje w miarę zmniejszania prędkości kątowej.

Prąd magnesujący w obwodzie wzbudzenia jest na ogół mały, a straty w rezystorze regulacyjnym w metodzie bocznikowej są niewielkie, więc sprawność regulacji jest wysoka. Wadą tej metody jest ograniczony zakres regulacji (regulacja w górę - prędkość kątowa rośnie przy zmniejszaniu strumienia). Niedopuszczalną wadą tej metody jest zjawisko rozbiegania się maszyny przy wprowadzeniu przerwy w obwód magneśnicy. Pojazd w trakcie kolizji i uszkodzeniu obwodu sterującego strumieniem  $\Phi_{ja}$ , zamiast zatrzymać się, zacząłby zwiększać prędkość. Komutacje w obwodzie magneśnicy charakteryzują się małą wartością prądu w obwodzie lecz dużą wartością indukcyjności uzwojenia.

Podsumowując powyższe rozważania najbardziej optymalnym rozwiązaniem w pojeździe elektrycznym jest zastosowanie silnika szeregowego (duży moment przy rozruchu).

## REGULACJA PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ SILNIKA W SAMOCHODZIE ELEKTRYCZNYM

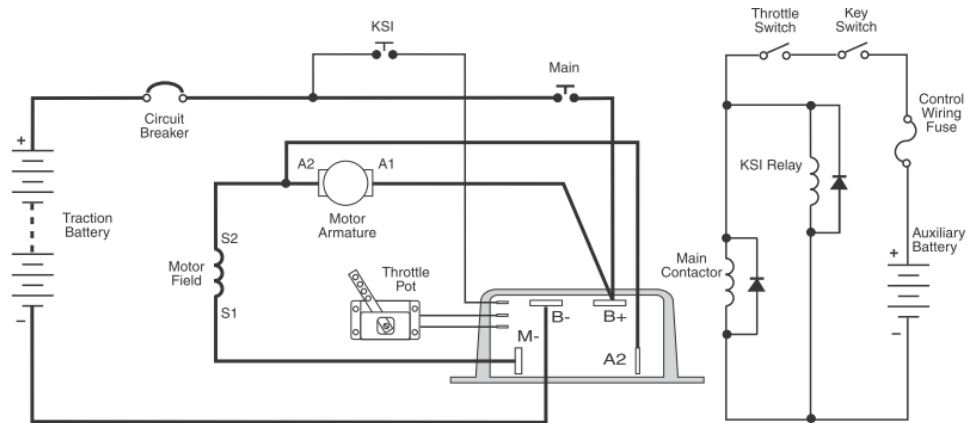
---



*Rys.1. Silnik prądu stałego (14kW, szczyt 30kW, 84V, waga 11kg) firmy LEMCO D-135 przeznaczony do napędu w samochodzie elektrycznym*

W silniku szeregowym prędkość kątową można regulować przez zbocznikowanie wirnika, zmianę napięcia zasilającego i zmianę rezystancji szeregowej  $R_{ra}$ . Wszystkie metody regulacji w tym silniku wymagają ingerencji w obwód wysokoprądowy. Zbocznikowanie wirnika sprowadza się również do komutacji w obwodzie wysokoprądowym.

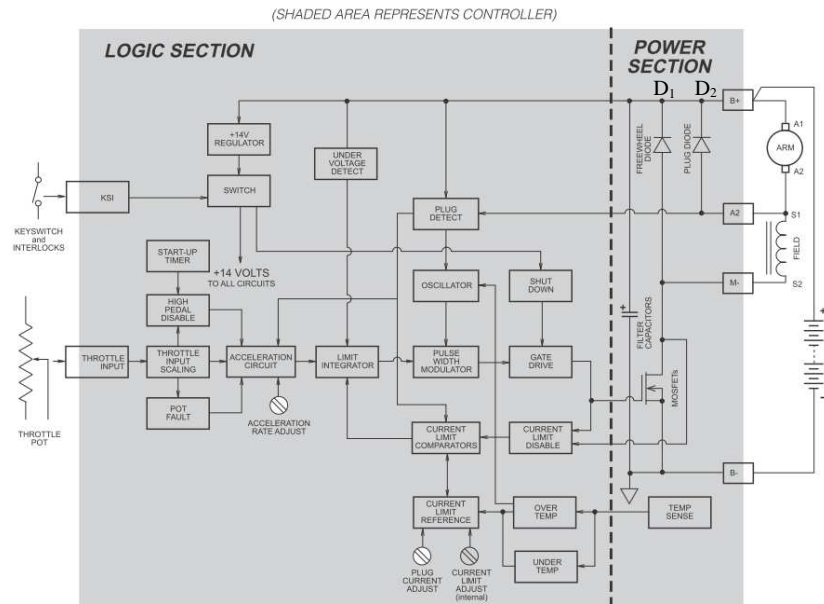
Metody zmiany wartości rezystancji w obwodzie wysokoprądowym oprócz problemów komutacyjnych, pogarszają sprawność regulacji. Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie kluczenia ze zmianą współczynnika wypełnienia (PWM). Zwiększa się przez to sprawność regulacji lecz kosztem zwiększenia wpływu stanów nieustalonych. Przykładowo sterownik firmy Curtis (72÷120V, 550A w impulsie, 375A /5 min, 225A /1 godz.) kluczuje w obwodzie wysokoprądowym silnika DC z częstotliwością do 15 kHz.



Rys.2. Schemat połączeń sterownika Curtis z silnikiem szeregowym DC

Jak widać efektywna regulacja prędkości w silniku DC w samochodach elektrycznych wymaga komutacji w głównym obwodzie zasilania. Dotyczy to zarówno metod opartych na zmianach wartości rezystancji, jak i PWM.

Komutacje powodują powstawanie przepięć, które szczególnie niekorzystnie wpływają na pracę urządzeń elektronicznych. Regulator CURTIS PMC w członie wykonawczym wykorzystuje tranzystor MOSFET.



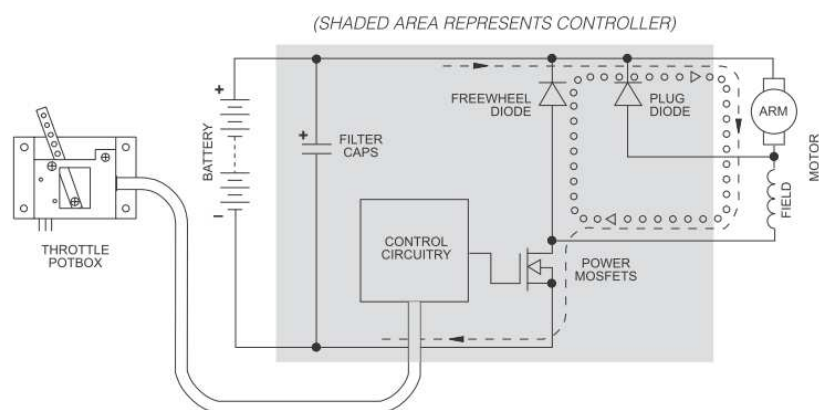
Rys.3. Diagram blokowy połączeń kontrolera Curtis PMC 1204/1205

## REGULACJA PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ SILNIKA W SAMOCHODZIE ELEKTR3793

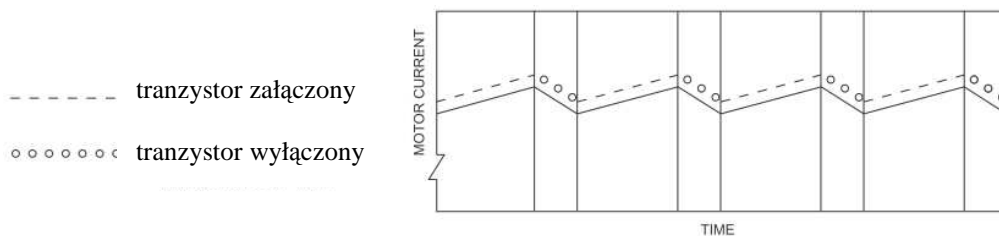
Zabezpieczenie przeciwprzepięciowe w sterowniku Curtis (rys.3) stanowią dwie diody w członie POWER SECTION.

W czasie kiedy tranzystor jest w stanie wyłączonym, prąd płynący przez silnik zamyka się przez diodę  $D_1$  połączoną równolegle z silnikiem.

Równolegle z baterią połączony jest kondensator filtrujący pulsacje napięcia zasilającego. Dioda  $D_2$  zabezpiecza obwód twornika podczas hamowania silnika szeregowego. Opisany przypadek ilustruje rysunek rys.4.

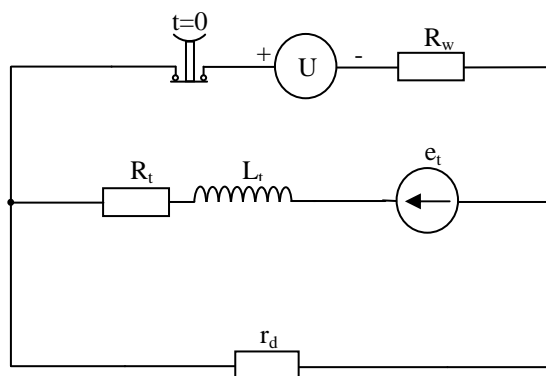


Rys.4. Droga prądu w członie wykonawczym sterownika



Rys.5. Przebieg prądu płynącego przez silnik

Zastosowanie diody jednokierunkowej umożliwia rozładowanie energii zgromadzonej w polu magnetycznym indukcyjności silnika. W pierwszym przybliżeniu model diody przedstawiono w postaci rezystancji, oczywiście innej dla kierunku przewodzenia i zaporowego. Przyjęto liniowy model silnika o parametrach:  $L$ ,  $R$ ,  $e$ . Źródło przedstawiono jako:  $U$  i  $R_w$ . W chwili czasu  $t \geq 0$  obowiązuje więc model z rys.6.



Rys.6. Schemat badanego modelu silnika z rezystancją diody

gdzie:

$$e_t = \begin{cases} E_t & t \leq 0 \\ E_t \cdot e^{-\beta t} & t > 0 \end{cases} \quad (1)$$

Przyjmując rezystancję diody w kierunku zaporowym  $r_d \rightarrow \infty$  obowiązuje równanie oczkowe:

$$r_d I(s) + E(s) + I(s)[R_t + sL_t] - L_t I_0 = 0, \quad (2)$$

gdzie transformata wyrażenia (1):

$$E(s) = \frac{E_t}{s + \beta}, \quad (3)$$

oraz warunki początkowe dla  $t=0$  (stan początkowy układu):

$$I_0 = \frac{U - E_t}{R_t + R_w}. \quad (4)$$

Przekształcając równanie (2) otrzymuje się:

$$I(s) = \frac{L_t I_0}{R_t + r_d + sL_t} - \frac{E_t}{(s + \beta)(R_t + r_d + sL_t)} = I_0 \frac{1}{s + \alpha} - \frac{E_t}{L_t} \frac{1}{(s + \alpha)(s + \beta)} \quad (5)$$

gdzie:

$$\alpha = \frac{R_t + r_d}{L_t}. \quad (6)$$

REGULACJA PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ SILNIKA W SAMOCHODZIE ELEKTR3795

Przekształcenie odwrotne równania (5) w dziedzinie czasu:

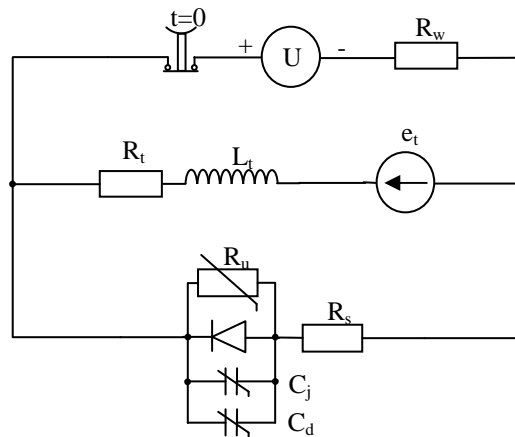
$$i(t) = \frac{U - E_t}{R_t + R_w} e^{-\alpha t} - \frac{E_t}{\beta L_t - R_t - r_d} \left[ e^{-\frac{R_t + r_d}{L_t} t} - e^{-\beta t} \right] \quad t \geq 0 \quad (7)$$

natomiast napięcie:

$$U_d(t) = \underbrace{r_d \frac{U - E_t}{R_t + R_w} e^{-\alpha t}}_{U_I} - \underbrace{\frac{E_t r_d}{\beta L_t - R_t - r_d} \left[ e^{-\frac{R_t + r_d}{L_t} t} - e^{-\beta t} \right]}_{U_{II}} \quad (8)$$

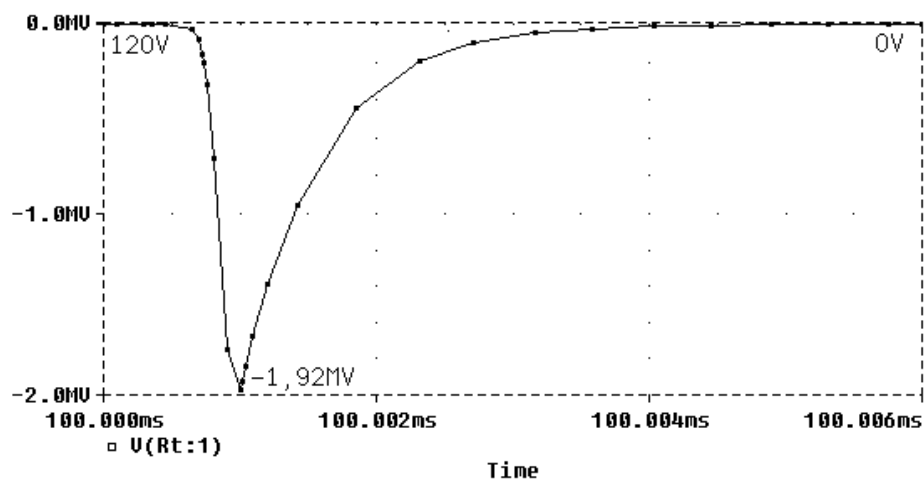
Widać zatem, że napięcie  $U_d$  składa się z dwóch członów  $U_I$  i  $U_{II}$ . Znak tego równania zależy więc od  $r_d$  i  $t$ . Otrzymane równanie (8) jest funkcją uwikłaną ze względu na  $r_d = f(U_d)$ .

Do celów symulacyjnych przyjęto charakterystykę diody aproksymowaną rezystancją szeregową i upływem, oraz pojemnością międzyzłączową. Klucz tranzystorowy potraktowano jak idealny wyłącznik z rezystancjami  $0\Omega$  przy załączeniu, oraz  $\infty$  przy wyłączeniu. Komutacja następuje po czasie 100ms.

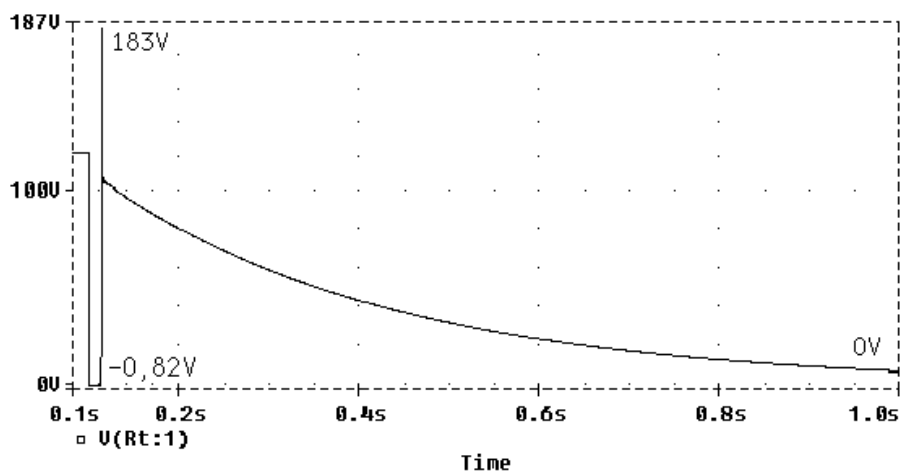


Rys.7. Schemat badanego modelu z diodą rzeczywistą

W symulacji przyjęto parametry diody odpowiadające diodzie mocy, oraz wartości przykładowe:  $U=120V$ ,  $E_0=110V$ ,  $R_w=0.2$ ,  $R_t=1.8\Omega$ ,  $L_t=0.3H$ .



Rys.8. Teoretyczny przebieg napięcia na odbiorniku bez zabezpieczającej diody (nie uwzględniając zjawisk łukowych zachodzących na wyłączniku)



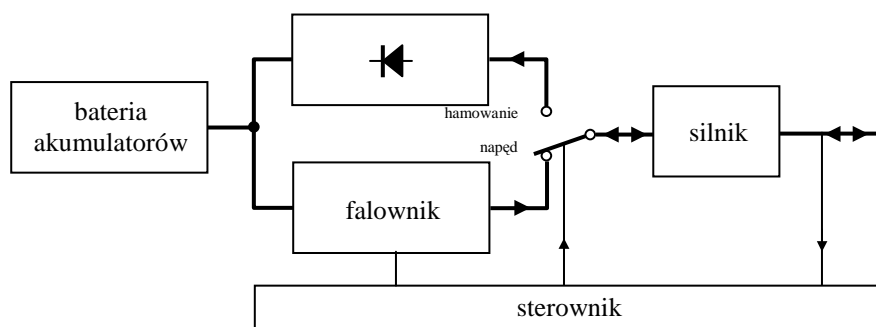
Rys.9. Przebieg napięcia na silniku z diodą zabezpieczającą

Warunkiem prawidłowego zabezpieczenia przeciwprzepięciowego w tym przypadku jest umiejscowienie diody blisko elementów ochraniających na krótkich przewodach. Wprowadzenie dodatkowych indukcyjności na przewodach doprowadzających (dioda zabezpieczająca daleko od elementów ochraniających) spowoduje pogorszenie ochrony.



## 2.2 Silnik wykonawczy prądu przemiennego

Znane są rozwiązania napędów w pojazdach elektrycznych przy wykorzystaniu silników trójfazowych. Regulacja prędkości odbywa się tu poprzez zmianę częstotliwości przebiegu napięcia. Rozwiązanie takie umożliwia poprawę warunków regulacyjnych i zmniejszenie strat mocy. Zaletą jest tańszy i mniej awaryjny silnik, wadą natomiast konieczność stosowania przetwornicy częstotliwości i problemy z odzyskiem energii przy hamowaniu. Pomiędzy źródłem zasilania a silnikiem musi być umiejscowiony falownik ze zmienną częstotliwością.



Rys.10. Blokowy opis metody odzysku energii w silniku prądu przemiennego

Przykładowo polska firma z Pruszkowa Impact Automotive Technologies zdecydowała się na zastosowanie w pojeździe Re-Volt silnika prądu przemiennego (rys.11). Z powodu, że silnik prądu przemiennego dla regulacji częstotliwościowej ma stały moment przy zmianie prędkości kątowej takie rozwiązanie nie wymaga stosowania skrzyni biegów. Silnik dla Re-Volta przygotowała firma Komel natomiast pakiety akumulatorów litowo-polimerowych (złożone z ogniw firmy Kokam) dostarcza firma Wamtechnik.



Rys.11. Trójkołowy dwuosobowy pojazd elektryczny **Re-Volt** firmy Impact Automotive Technologies

W pojeździe elektrycznym firmy Impact Automotive Technologies zastosowano silnik synchroniczny z magnesami trwałymi sterowany wektorowo o mocy maksymalnej 11.6kW. Blok napędowy (rys.12) zawiera stałe przełożenie na tylne koło i nie posiada sprzęgła.



Rys.12. Blok napędowy pojazdu **Re-Volt** napędzający tylną oś

Falownik przekształca napięcie stałe na przemienne. Możliwe jest to poprzez komutacje w tranzystorach stopnia mocy. Komutacje zatem odbywają się znów w głównym obwodzie prądowym. Redukcja przepięć powinna być zatem analizowana zarówno przy napędzie opartym o silnik prądu stałego i przemiennego. Obydwa rozwiązania narażone są na uszkodzenia przy zepsutej lub źle dobranej ochronie przepięciowej.

### 3. WNIOSKI

Brak ochrony przepięciowej w pojeździe elektrycznym nowej generacji doprowadza do uszkodzenia elementów sterujących (przekroczone napięcie przebicia na rys.8). Przy wysokich cenach tych podzespołów stosowanie ochrony jest niezbędne. Warunkiem skutecznej ochrony przy prądzie stałym jest stosowanie szybkiej diody zabezpieczającej umiejscowionej w bezpośredniej bliskości z ochranianym członem układu. Przewody połączeniowe diody powinny być na tyle krótkie, aby nie wprowadzały dodatkowej indukcyjności. Poprawę ochrony przepięciowej uzyska się stosując równoległe z diodą kondensator filtrujący szybkie przebiegi przepięciowe (bibliografia [3]).

### 4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Łyskojć D., Duer S., Zajkowski K.: *Analiza możliwości wykorzystania silników elektrycznych w napędach pojazdów samochodowych*, XV Konf.Naukowo-Techn. ZKwE'2010, Poznań, 2010.
- [2] Zajkowski K., Duer S.: *Projekt diagnostyki silnikowej opartej na karcie pomiarowej analogowo-cyfrowej*. LOGISTYKA s.2469-2476, 2/2010, Poznań 2010.
- [3] Zajkowski K.: *Analiza stanu nieustalonego w obwodzie zawierającym silną nieliniowość*. LOGISTYKA s.2477-2485, 2/2010, Poznań 2010
- [4] Materiały reklamowe pojazdu Re-Volt
- [5] Instrukcja kontrolera Curtis PMC 1204/1205