

Dariusz **ZACZYK**
Marcin **FICE**

UKŁAD DYSTRYBUCJI MOCY W POJEŹDZIE HYBRYDOWYM

Streszczenie. W artykule przedstawiono problemy związane z poprawnym zaprojektowaniem instalacji elektrycznej pojazdu z napędem hybrydowym (spalinowo- elektrycznym). Pokazana jest topologia układu i uzyskane wyniki - stabelaryzowane parametry wielkopiętrowej instalacji elektrycznej pojazdu hybrydowego. W artykule opisano najważniejsze elementy prac projektowych, w tym bilans mocy, dobór zabezpieczeń, dobór przekrojów przewodów, wyznaczenie punktu pracy wentylatora oraz układ soft startu silnika elektrycznego. W podsumowaniu odniesiono się do praktycznego wykorzystania uzyskanych wyników obliczeniowych.

Słowa kluczowe: pojazd hybrydowy, szeregowy napęd hybrydowy, dystrybucja mocy, silnik elektryczny z magnesami trwałymi.

1. WPROWADZENIE

W szeregu prowadzonych prac związanych z napędem pojazdu lądowego (samochód osobowy, samochód specjalistyczny, pojazd wojskowy itp.) zarówno na świecie, jak i w kraju poszukiwane są rozwiązania pozwalające na maksymalne wykorzystanie źródeł energii – elektrycznej czy napędu spalinowego. Wśród wielu stosowanych rozwiązań wdrożonych do praktyki coraz powszechniejsze stają się pojazdy z napędami hybrydowymi [1], [2], [3] spalinowo-elektrycznymi. W realizowanym projekcie [4] „Wielozadaniowy, inżynierski pojazd z napędem hybrydowym” akronim WIPH, wykorzystany został również napęd hybrydowy. W zastosowanym rozwiązaniu przyjęto hybrydowy układ szeregowy.

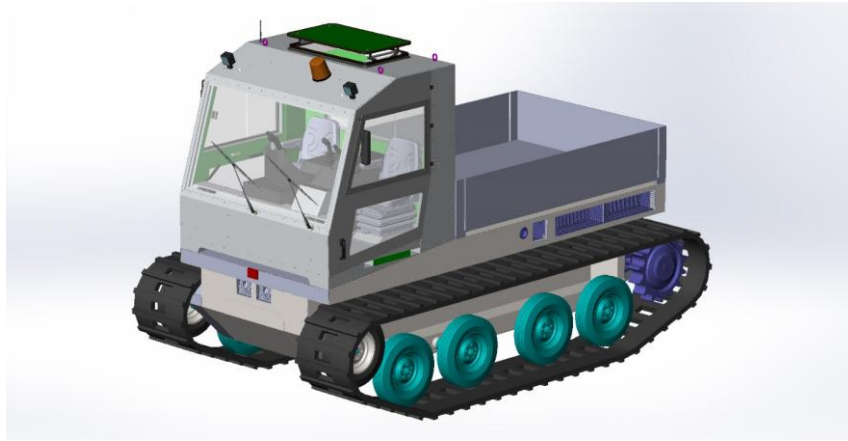
Do napędu pojazdu służą dwa silniki elektryczne o mocy ciągłej 70 kW i mocy maksymalnej 120 kW każdy. W układzie tym zastosowano silniki PMSM (silniki synchroniczne z magnesami trwałymi), które charakteryzują się dużą sprawnością oraz bardzo dobrym stosunkiem mocy do masy. Zastosowanie w pojeździe niewielkich silników o dużej mocy konieczne było ze względu na przyjętą masę całkowitą pojazdu wynoszącą 6000 kg i chęcią uzyskania najlepszych właściwości trakcyjnych.

W układzie jezdny pojazdu zastosowano gąsienice metalowo-gumowe (docelowo przewidziano polimerowe), które są napędzane silnikami elektrycznymi poprzez dwie przekładnie planetarne z gwiazdami napędowymi. Przekładnie planetarne ze względów bezpieczeństwa wyposażono w hydrauliczny, pasywny hamulec bezpieczeństwa. Jako główne źródło energii zastosowano silnik spalinowy EURO 5 o mocy 150 kW osiąganą przy 3000 obr./min. Silnik ten wykorzystywany jest do napędu generatora elektrycznego o mocy ciągłej 150 kW i mocy maksymalnej 225 kW, który poprzez falownik ładuje baterię akumulatorów stanowiącą źródło zasilania elektrycznych silników napędowych.

Jednym z głównych założeń projektu jest praca pojazdu w dwóch konfiguracjach:

- autonomiczne podwozie zdalnie sterowane;
- podwozie z zabudowaną kabiną zawierającą wbudowane elementy sterujące.

Na rys. 1 pokazano wirtualny projekt pojazdu hybrydowego.

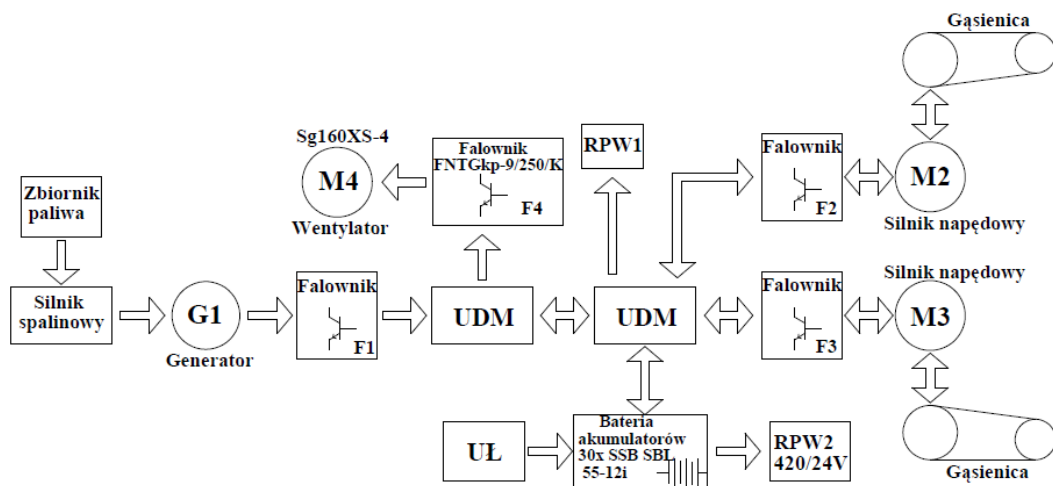


Rys. 1. Pojazd inżynierski z napędem hybrydowym

Szerzej konstrukcja pojazdu WIPH opisana jest w artykule [5], do którego odsyłamy zainteresowanych czytelników. Jednym z ważniejszych zagadnień prowadzonych prac [4] jest poprawne zaprojektowanie układu dystrybucji mocy, uwzględniające skrajne, niekorzystne parametry eksploatacyjne, co jest głównym przedmiotem niniejszego artykułu.

2. STRUKTURA UKŁADU DYSTRYBUCJI MOCY BUDOWANEGO POJAZDU

Układ napędowy pojazdu stanowi spalinowo - elektryczny układ hybrydowy o strukturze szeregowej pokazany na schemacie blokowym - rys. 2. Do wyjść układów mocy podpięte są równolegle dwa falowniki odpowiadające za zasilanie elektrycznych silników napędowych. Silniki napędowe pracują w reżimie pracy prądnicowej podczas hamowania rekuperacyjnego pojazdu i wykonywania manewru skrętu pojazdu z obrotem gąsienic w różnych kierunkach (obrót w miejscu). Nadmiar energii powstałej w wyniku odzysku energii podczas hamowania, jak i w trakcie postoju pojazdu, w wyniku pracy generatora elektrycznego poprzez układ dystrybucji mocy (UDM) przekazywany jest do baterii akumulatorów.



Rys. 2. Schemat blokowy wielozadaniowego inżynierskiego pojazdu o napędzie hybrydowym (opracowanie własne)

Bateria akumulatorów składa się z ogniw kwasowo-ołowiowych SSB SBL 55-12i. Pojemność baterii akumulatorów wynosi 55Ah i jest kompromisem pomiędzy masą, a maksymalnym możliwym do uzyskania prądem rozładowania podczas pracy w trybie czysto elektrycznym. Praca układu napędowego generuje straty energii, które powodują nagrzewanie się komponentów układu. Nadmierny wzrost temperatury urządzeń mógłby powodować ich uszkodzenie. Za utrzymanie temperatury układu na dopuszczalnym poziomie odpowiada centralny układ chłodzenia. Jest to układ aktywny z wymuszonym przepływem powietrza przez chłodnicę wypełnioną czynnikiem chłodzącym. Za wymuszenie przepływu powietrza odpowiada wentylator napędzany przez trójfazowy klatkowy silnik indukcyjny zasilany z falownika. Dodatkowo w układzie dystrybucji mocy zainstalowano układ ładowania postojowego (UŁ) z sieci jednofazowej o napięciu 230V oraz rozdzielnicę potrzeb własnych (RPW1) oraz (RPW2).

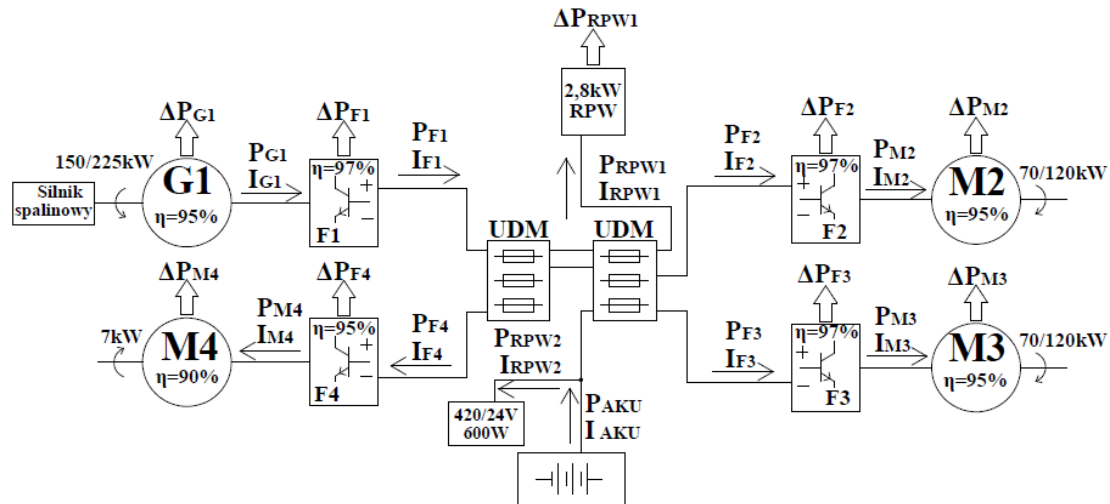
3. BILANS MOCY W UKŁADZIE NAPĘDOWYM

Przy projektowaniu instalacji elektrycznej szczególną uwagę zwrócono na maksymalną moc silników napędowych, jaką należy zapewnić w celu realizacji założonych cykli jazdy pojazdu. Istotne było ustalenie wartości napięć zasilania poszczególnych elementów obwodu elektrycznego, tak aby zapewnić maksymalną dopuszczalną wartość napięcia zasilania instalacji elektrycznej w ten sposób, by mieściła się w przedziale napięć dopuszczalnych dla wszystkich urządzeń w instalacji, i jednocześnie ograniczyć prąd maksymalny w obwodzie akumulatorów. W tym przypadku przyjęto maksymalne napięcie instalacji o wartości 410V DC.

Aby właściwie zaprojektować instalację elektryczną, dobierając odpowiednie przekroje przewodów, osprzęt i zabezpieczenia, dokonano szczegółowej analizy układu i określono wartości prądów płynących w obwodzie w różnych warunkach pracy. Bilans mocy przygotowano dla pracy układu napędowego w warunkach znamionowych, mocy maksymalnej oraz w trybie czysto elektrycznym. Na tej podstawie określono wartości wkładek topikowych zabezpieczeń prądowych oraz przekroje przewodów. Dodatkowo wyznaczono spadki napięcia w instalacji i porównano z normą PN-S-76021, co potwierdziło właściwy dobór przekroju przewodów.

Dla potrzeb bilansów mocy narysowano uproszczony schemat blokowy instalacji elektrycznej pojazdu – rys. 3, na którym naniesiono oznaczenia poszczególnych obwodów wyszczególnionych w tablicach (1), (2), (3). Szczegółowe obliczenia znajdują się do wglądu w pracy inżynierskiej [6].

Do obliczenia prądów w poszczególnych obwodach DC dla pracy hybrydowej przyjęto napięcie w instalacji 410 V a dla pracy czysto elektrycznej – 300 V.



Rys. 3. Schemat bilansu mocy przedstawiający parametry (P - moc, I – prąd, η - sprawności) układu (opracowanie własne)

4. DOBÓR ZABEZPIECZEŃ

Realizowany projekt - demonstrator technologii - poddany zostanie wielu badaniom i testom. Dla zagwarantowania w miarę bezawaryjnej pracy oraz przyjaznej obsługi w instalacji elektrycznej wysokonapięciowej zastosowano szereg układów zabezpieczających.

W tabelicy przedstawiono wartości nominalne (N), maksymalne (MAX) oraz przy pracy w trybie tylko elektrycznym (ELE) pojazdu dla wybranych torów prądowych (opisanych indeksami na rysunku 3).

Tablica. 1. Dobór wartości zabezpieczeń obwodów pojazdu

Tor prądowy	P_N [kW]	I_N [A]	P_{MAX} [kW]	I_{MAX} [A]	P_{ELE} [kW]	I_{ELE} [A]	Zabezpieczenie	Zadziałanie
$P_{G1}; I_{G1}$	86	131	143	219	0	0	-	-
$P_{F1}; I_{F1}$	83	202	139	337	0	0	FWH-200B	$t_{I_{MAX}} \geq 200s$
$P_{M4}; I_{M4}$	7,8	19	7,8	19	0	0	-	-
$P_{F4}; I_{F4}$	8,2	20	8,2	20	5	19	FWH-35B	Zwarcie
$P_{M2}; I_{M2}$	74	113	126	194	25,3	39	-	-
$P_{F2}; I_{F2}$	76	185	130	317	26	87	FWH-200B	$t_{I_{MAX}} \geq 200s$
$P_{M3}; I_{M3}$	74	113	126	194	25,3	39	-	-
$P_{F3}; I_{F3}$	76	185	130	317	26	87	FWH-200B	$t_{I_{MAX}} \geq 200s$
$P_{AKU}; I_{AKU}$	81	197	135	328	57	191	NH-SI 3 160A GG AC690V AK	$t_{I_{MAX}} \geq 130s$
$P_{RPW1}; I_{RPW1}$	2,9	7,1	3,65	8,9	0	0	DCM 8A/600Vdc	Zwarcie
$P_{RPW2}; I_{RPW2}$	0,6	1,46	0,6	1,46	0	0	Z-SLS-B 2A	Zwarcie

Wszystkie zabezpieczenia zostały dobrane na podstawie charakterystyk czasowo prądowych wkładek bezpiecznikowych [7], [8], [9]. Dobre zabezpieczenia wytrzymują wartość prądu znamionowego dla pracy S1.

5. DOBÓR PRZEKROJU PRZEWODÓW

Równie istotnym elementem prac przy projektowaniu instalacji elektrycznej jest właściwy dobór przekrojów przewodów zastosowanych w instalacji. Dobór przekroju przewodów należało wykonać w taki sposób, aby dla prądu płynącego długotrwale (I_N) został spełniony warunek:

$$I_N < K_P * I_{DD}$$

gdzie: I_N - Wartość prądu obliczeniowego długotrwałego,
 K_P - Współczynnik korekcyjny wynikający z warunków ułożenia przewodów (0,70 dla trzech żył; 0,80 dla dwóch żył, uwzględniając również niekorzystny wpływ podwyższonej temperatury),
 I_{DD} - Długotrwała obciążalność przewodów odczytana z tabel producenta.

W tabelicy 2 przedstawiono dobór przekroju przewodów w pojeździe dla pracy ciągłej i dla krótkotrwałego przeciążenia (maksymalnie 20 s) mocą maksymalną. Ze względu na duże wartości prądów płynących w obwodach układu napędowego i zastosowanie przekształtników energoelektronicznych oraz z uwagi na niewielkie odległości układów sterowania i urządzeń niskonapięciowych, przy doborze przewodów wieloprądowych kierowano się również wymaganiami kompatybilności elektromagnetycznej EMC. Z tego względu w instalacji zastosowano przewody ekranowane RADOX 4 GKW-AX 1800V MM S, EMC [10].

Tabela. 2. Dobór przekroju poprzecznego przewodów

Tor prądowy	I_N [A]	I_{MAX} [A]	P_P [mm ²]	$K_P * I_{DD}$	$I_N < K_P * I_{DD}$	$I_{MAX} < K_P * I_{DD}$
G1 - F1	131	219	50	0,70*359A=251A	131A < 251A	219A < 251A
F1 - UDM	202	337	50	0,80*359A=287A	202A < 287A	337A > 287A
M4 - F4	19	19	4	0,70*67A=47A	19A < 47A	19A < 47A
F4 - UDM	20	20	4	0,80*67A=54A	20A < 54A	20A < 54A
M2 - F2	113	194	35	0,70*285A=200A	113A < 200A	194A < 200A
F2 - UDM	185	317	50	0,80*359A=287A	185A < 287A	317A > 287A
M3 - F3	113	194	35	0,70*285A=200A	113A < 200A	194A < 200A
F3 - UDM	185	317	50	0,80*359A=287A	185A < 287A	317A > 287A
Aku - UDM	197	328	50	0,80*359A=287A	197A < 287A	328A > 287A
RPW1- UDM	7,1	8,9	1,5	0,80*36=23,2A	7,1A < 23,2A	8,9A < 23,2A
RPW2 420/24V - Aku	1,46	1,46	1,5	0,80*36=28,8A	1,46A < 28,8A	1,46A < 28,8A

6. WYZNACZENIE SPADKÓW NAPIĘĆ NA PRZEWODACH

Kolejnym kryterium właściwego doboru przekroju przewodów instalacji jest wyznaczenie spadków napięć na przewodach. Im większy spadek napięcia, tym większe straty energii elektrycznej w układzie. Spadki napięć określa się jako wartość procentową napięcia odłożonego na rezystancji przewodu w stosunku do znamionowego napięcia

instalacji. Brak jest normy i wytycznych dla pojazdów elektrycznych i hybrydowych dotyczących spadków napięć w instalacji elektrycznej. Z tego powodu skorzystano z normy PN-S-76021 [14] (wg normy maksymalny spadek napięcia w obwodzie akumulatora wynosi 3,5% a dla innych obwodów 10%). W tabelicy 3 zamieszczono zestawienie wartości spadków napięć dla wartości znamionowej oraz maksymalnej prądu obciążenia.

Tablica. 3. Zestawienie spadków napięć w poszczególnych obwodach instalacji pojazdu

Tor prądowy	L [m]	U_N	$\Delta U\%$ dla I_N	$\Delta U\%$ dla I_{max}
$P_{G1}; I_{G1}$	6	3-f 400V AC $\cos\phi = 0,94$	0,11%	0,18%
$P_{F1}; I_{F1}$	8	410 VDC	0,27%	0,45%
$P_{M4}; I_{M4}$	9	289 V 3-f AC $\cos\phi = 0,81$	0,35%	0,35%
$P_{F4}; I_{F4}$	6	410 VDC	0,25%	0,25%
$P_{M2}; I_{M2}$	3	3-f 400V AC $\cos\phi = 0,94$	0,067%	0,11%
$P_{F2}; I_{F2}$	6	410 VDC	0,19%	0,32%
$P_{M3}; I_{M3}$	3	3-f 400 V AC $\cos\phi = 0,94$	0,067%	0,11%
$P_{F3}; I_{F3}$	6	410 VDC	0,19%	0,32%
$P_{Aku}; I_{Aku}$	8	410 VDC	0,26%	0,44%
$P_{BSC}; I_{BSC}$	6	410 VDC	0,23%	0,29%
$P_{Zas}; I_{Zas}$	6	410 VDC	0,05%	0,05%

Spadki napięć zawarte w tabelicy 3 wyznaczono na podstawie wzorów:

- spadek napięcia dla obwodów prądu stałego: [11]

$$\Delta U\% = \frac{2 * I * L * 100}{\sigma * U_N * s}$$

- spadek napięcia dla obwodów 3-fazowych prądu przemiennego: [11]

$$\Delta U\% = \frac{\sqrt{3} * I * L * \cos\phi * 100}{\sigma * U * s}$$

gdzie: $\Delta U\%$ - procentowy spadek napięcia na przewodzie,

σ - konduktywność dla przewodu miedzianego. Przyjmuje się wartość $58 \left[\frac{m}{\Omega * mm^2} \right]$,

U - napięcie znamionowe w układzie,

I - prąd płynący w obwodzie,

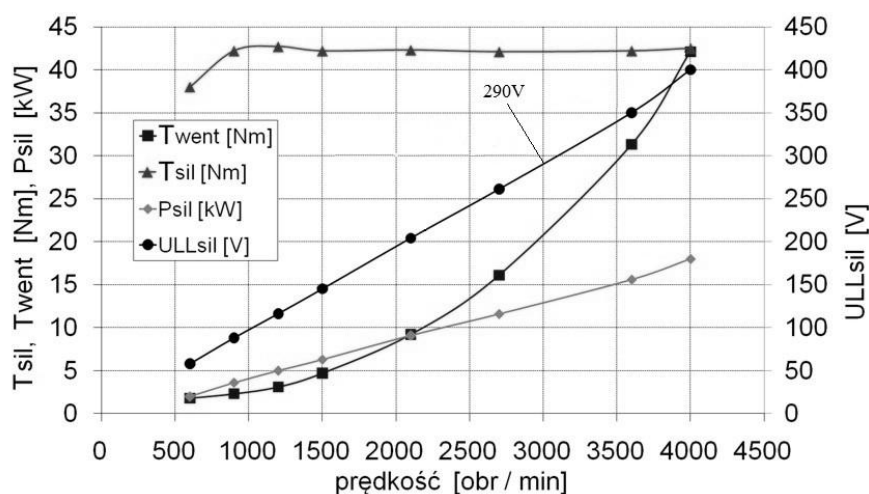
L - długość przewodu,

$\cos\phi$ - współczynnik mocy,

s - przekrój poprzeczny przewodu.

7. WYZNACZENIE PUNKTÓW PRACY SILNIKA GŁÓWNEGO WENTYLATORA

Zapewnienie w układzie zadanych przedziałów temperatury pracy w dużej mierze zależy od doboru punktu pracy silnika napędzającego wirnik wentylatora wymuszającego wymagane przepływy strumienia chłodzącego powietrza. Wentylator układu chłodzenia napędzany jest silnikiem indukcyjnym (SG160XS-4) klatkowym wykonanym na specjalne zamówienie przez Instytut KOMEL. Znamionowe napięcie zasilania silnika to 3x400 VAC, prędkość obrotowa znamionowa wynosi 4000 obr./min (przy częstotliwości napięcia 137 Hz), prąd znamionowy wynosi 35,6A, a moc znamionowa wynosi 18kW. Rysunek 4 przedstawia charakterystyki pracy zastosowanego silnika elektrycznego w całym zakresie prędkości obrotowej oraz charakterystykę zastosowanego wentylatora.



Rys. 4. Wykres przedstawiający parametry silnika elektrycznego przy sterowaniu z zachowaniem stałego stosunku U/f [12]

W projektowanym pojeździe napięcie pokładowe wynosi maksymalnie 420V DC. Z tego powodu konieczne było zastosowanie falownika z wejściem DC i możliwością pracy w szerokim zakresie napięć (300 – 420V DC). Zastosowano falownik (FNTGkp-9/500/V) skonstruowany specjalnie dla układu chłodzenia przez firmę ENEL [15]

Maksymalna wartość skuteczna napięcia międzyfazowego falownika wynosi:

$$U_{rms} = \frac{410}{\sqrt{2}} = 289,9 V$$

gdzie: U_{rms} - napięcie międzyfazowe (przewodowe).

Zgodnie z obliczeniami silnik wentylatora będzie zasilany napięciem 3x290VAC. Wiąże się to z obniżeniem jego prędkości obrotowej. Przy sterowaniu skalarnym, obniżając napięcie zasilania silnika należy zachować stały stosunek wartości napięcia zasilania do częstotliwości.

$$\frac{U}{f} = \frac{400}{137} = 2,92$$

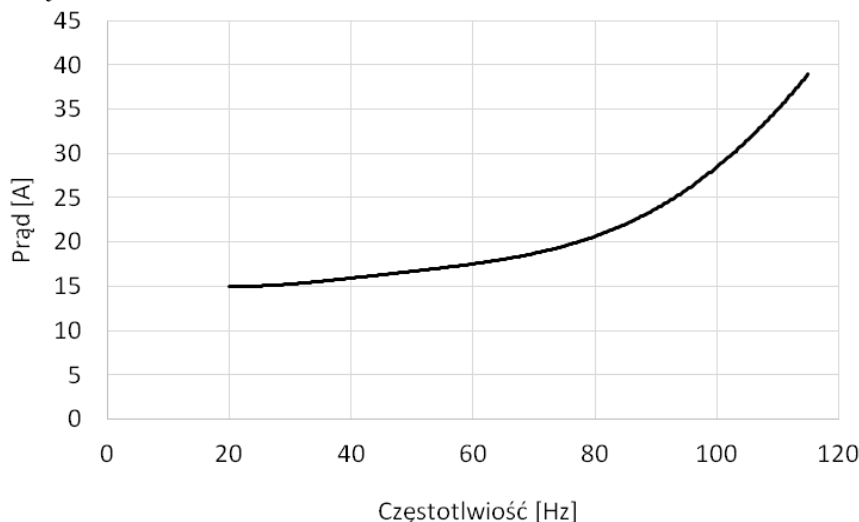
gdzie: U/f- Stosunek napięcia do częstotliwości. Częstotliwość dla napięcia zasilania w pojeździe wynosi 99,3 Hz.

Zgodnie z rys. 4 przy sterowaniu skalarnym prędkość silnika obciążonego wentylatorem układu chłodzenia dla napięcia 290 V wyniesie około 3000 obr./min. Moment maksymalny wytwarzany przez silnik wynosi 42 Nm, natomiast moment obrotowy wentylatora przy prędkości 3000 obr./min wynosi 22 Nm. Po przeliczeniu momentu obciążenia na moc:

$$P = M * \frac{2 * \pi * n}{60}$$

wentylator układu chłodzenia przy prędkości 3000 obr./min obciąża silnik elektryczny mocą ok. 7 kW. Oznacza to, iż występuje spory zapas momentu napędowego silnika. W obliczeniach bilansu mocy przyjęto wartość mocy silnika 7 kW.

W celu sprawdzenia poprawności funkcjonowania układu falownik-wentylator przeprowadzono pomiar prądu w funkcji częstotliwości generowanej przez falownik. Na rys. 5 przedstawiono zmierzoną charakterystykę. Przy około 110 Hz silnik pobiera prąd znamionowy rzędu 35 A.



Rys. 5. Charakterystyka prądu silnika w funkcji częstotliwości napięcia zasilającego silnika wentylatora głównego SG160XS-4 (opracowanie własne)

8. UKŁAD SOFT STARTU

Silniki elektryczne w układzie napędowym pojazdu są zasilane za pomocą nowoczesnych przekształtników energoelektronicznych. Falowniki te posiadają duże pojemności na wejściu zasilania, których wartości określone są w kartach katalogowych. W przypadku załączenia pełnego napięcia wystąpi przepływ prądu wynikający z zależności:

$$i_c(t) = C \frac{du_c(t)}{dt}$$

gdzie: $du_c(t)$ - przyrost napięcia na kondensatorze,
 dt - czas w którym nastąpił przyrost.

Występowanie powyższych prądów mogłoby mieć niekorzystny wpływ na styki łączników w czasie komutacji i powodować ich nadpalanie oraz mogłoby prowadzić do

uszkodzenia linii zasilającej. Aby ograniczyć prąd rozruchowy falowników, zastosowano prosty układ soft startu umożliwiający ograniczenie wartości prądu rozruchowego. Układ taki można zbudować wykorzystując do tego celu rezystor o odpowiedniej mocy włączony szeregowo w obwód źródła napięcia i falowników. Układ soft startu zastosowany w pojeździe będzie składał się z rezystora mocy pozwalającego na ograniczenie maksymalnego prądu rozruchowego do wartości około 20A, oraz ze styczników półprzewodnikowych, które pozwolą na całkowite wyeliminowanie przepięć łączeniowych, ponieważ pozbawione są zjawiska komutacji.

Aby dobrać wartość rezystora rozruchowego, posłużono się prawem Ohma:

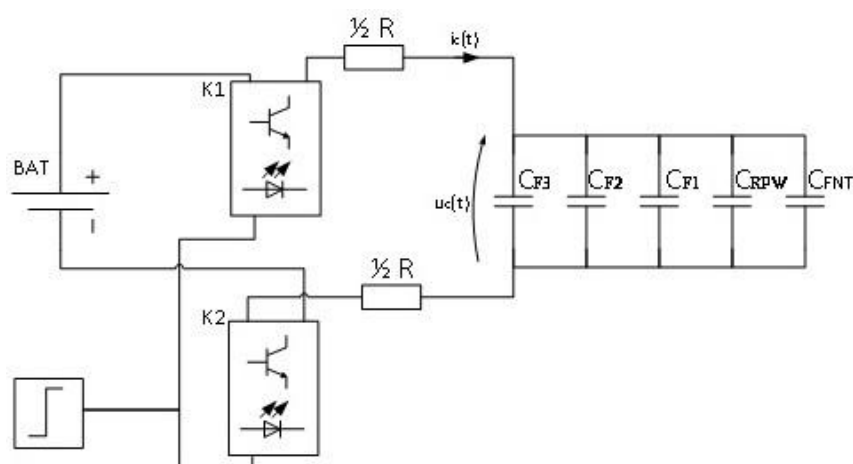
$$R = \frac{U}{I} = \frac{410}{20} = 20,5 \Omega$$

gdzie: R - wartość rezystancji rezystora,
 U_N - napięcie znamionowe instalacji,
 I - dopuszczalny prąd w obwodzie.

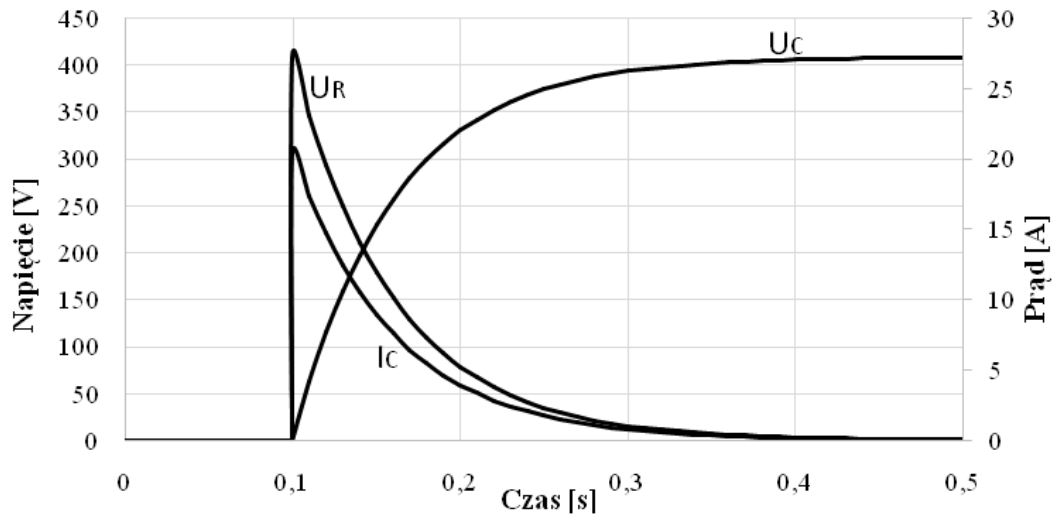
Wymagany rezystor powinien mieć wartość 20,5 Ω . Jednakże z powodu niestandardowej wartości rezystancji zastosowano rezystor 20 Ω . Wyznaczono maksymalną wartość prądu w obwodzie soft startu:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{410}{20} = 20,5 A$$

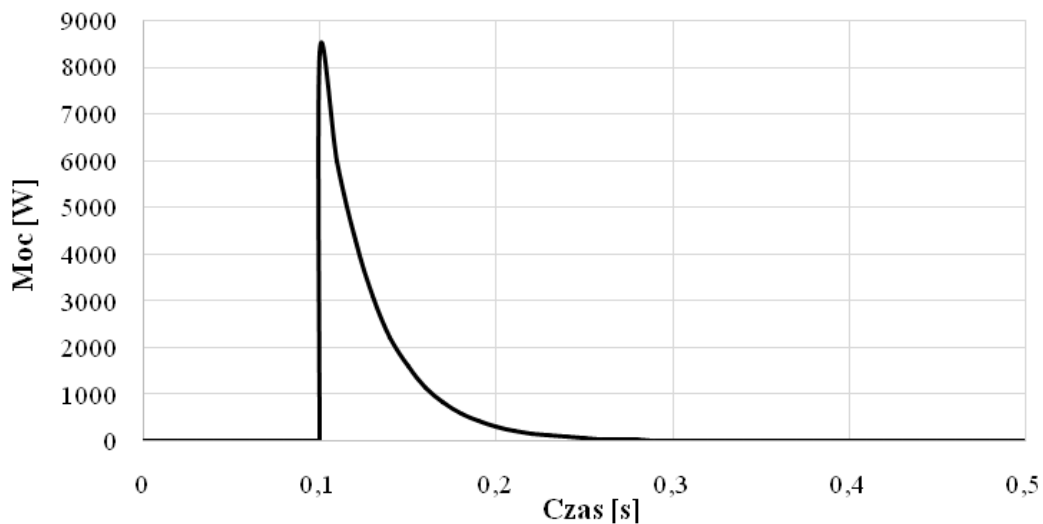
Dla potwierdzenia słuszności obliczeń oraz do oceny mocy wydzielonej na rezystorach przeprowadzono symulację prądu ładowania falowników, napięcia na źródle i napięcia na falownikach. Symulacja ta przeprowadzona została w programie Matlab Simulink [16] wg schematu pokazanego na rysunku 6. Układ ten składa się ze źródła napięcia stałego 410V (BAT), dwóch styczników półprzewodnikowych CRYDOM - SSC800-25-12 – SSR (K1 i K2), dwóch rezystorów soft start, trzech falowników układu napędowego, jednego falownika FNT Gkp-9/500/V układu chłodzenia, przetwornicy RPW. Na rys. 7 pokazano przebiegi napięcia dla wszystkich pojemności oraz przebieg prądu a na rys. 8 moc wydzieloną na rezystorach układu soft start.



Rys. 6. Model układu soft start (opracowanie własne)



Rys. 7. Przebiegi napięć na rezystorach i kondensatorach oraz prądu rezystorów obwodu soft start (opracowanie własne)

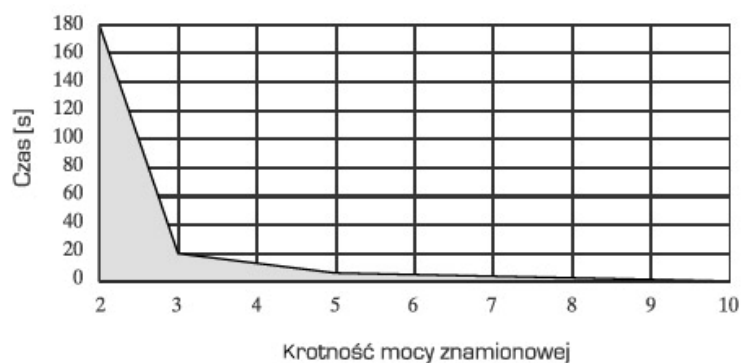


Rys. 8. Przebieg mocy na rezystorach obwodu soft start (opracowanie własne)

Maksymalna moc w układzie osiąga wartość około 8,2 kW, wydzielona energia w rezystorach wynosi około 3 kJ. Moc rezystora została dobrana tak, aby nie uległ on uszkodzeniu wskutek przegrzania

$$P = I^2 * R$$

Przy zastosowaniu dwóch rezystorów: $R=10 \Omega$ $P=600 \text{ W}$ połączonych szeregowo uzyskamy rezystancję $R=20 \Omega$ oraz moc $P=1200 \text{ W}$. Oznacza to że rezystor będzie przeciążony około 7-krotnie, a przy takiej mocy rezystor zgodnie z rys. 9 może pracować około 4 s.



Rys. 9. Przykładowa charakterystyka przeciążalności rezystorów [13]

Wyspecyfikowano rezystory ograniczające Royal Ohm HEWRB0J0100600.

9. PODSUMOWANIE

Wykonane obliczenia, symulacje oraz bilanse mocy stanowiły podstawę do praktycznej realizacji dokumentacji technicznej w projekcie WIPH, która w kolejnej fazie jest wykonywana fizycznie w demonstratorze technologii. Sporządzono bilans mocy dla różnych trybów pracy układu oraz określono wartości prądów płynących w poszczególnych obwodach instalacji. Są to istotne dane, które umożliwiły przeprowadzenie doboru kabli energetycznych o odpowiednich parametrach umożliwiających poprawną, bezawaryjną i przede wszystkim bezpieczną pracę całego układu.

Ponieważ w pojeździe, oprócz obwodów wieloprądowych, występują również niskonapięciowe układy sterowania, przy doborze przewodów kierowano się także wymaganiami kompatybilności elektromagnetycznej EMC. W związku z tym w układzie napędowym zastosowano przewody ekranowane.

Wyznaczono punkt pracy silnika indukcyjnego wentylatora, z którego wynika, iż przy zastosowaniu badanego wentylatora pozostaje spory zapas momentu napędowego silnika, co w razie konieczności pozwoli na zastosowanie większego wentylatora bez konieczności modyfikacji układu napędowego. Dodatkowo wyznaczono parametry sterowania silnikiem indukcyjnym klatkowym, co pozwoli na ewentualne obniżenie jego mocy, w przypadku mniejszego zapotrzebowania na moc układu chłodzenia.

W celu uniknięcia przepięć komutacyjnych podczas uruchamiania obwodu elektrycznego, wyposażono go w moduł soft startu. Dobór rezystorów soft startu przeprowadzono metodą obliczeniową. W celu weryfikacji poprawności obliczeń sporządzono symulację układu.

Wyznaczono spadki napięć na przewodach silnoprądowych, z których wynika, iż spełniają one normy dla instalacji elektrycznych pojazdów samochodowych. Ze względu na brak odpowiednich norm i wytycznych dla spadków napięć pojazdów elektrycznych przyjęto normę PN-S-76021 [14]. Jest to norma dotycząca instalacji elektrycznych pojazdów samochodowych.

Pojazd WIPH wyposażony jest w nowoczesne komponenty elektryczne posiadające szereg wbudowanych zabezpieczeń oraz czujników temperatury na bieżąco monitorujących pracę układu, co wpływa korzystnie na jego bezpieczeństwo oraz bezawaryjną pracę.

Projekt [4] przewiduje w końcowym etapie jego realizacji przeprowadzenie badań zakładowych oraz prób trakcyjnych demonstratora technologii. Pozwoli to zweryfikować

wykonane prace teoretyczne (analizy, obliczenia, symulacje) na obiekcie fizycznym - demonstratorze technologii w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych (teren otwarty).

10. LITERATURA

- [1] Szumanowski A.: Pojazdy ekologiczne - przyszłość samochodów hybrydowych. <http://www.iinte.edu.pl/PM75/sesja4.pdf>, [Dostęp: 5 maja 2015].
- [2] <http://www.toyota.pl/hybrid-innovation/index.json>, [Dostęp: 5 maja 2015].
- [3] http://militarium.net/index-phpooptioncom_contentviewarticleid79polskie-autonomiczne-podwozie-gsienicowe-z-napdem-hybrydowymcatid7polskie-projektyitemid9/, [Dostęp: 5 maja 2015].
http://www.kms.polsl.pl/zastosowanie_badan_w_praktyce.php?p=zb1, [Dostęp: 5 maja 2015].
<http://www.militaryrok.pl/index.php/pojazdy-gsienicowe/954-autonomiczna-i-hybrydowa.html>, [Dostęp: 10 maja 2015].
- [4] Wielozadaniowy, inżynierski pojazd z napędem hybrydowym. I Konkurs Programu Badań Stosowanych. Umowa nr PBS1/A6/15/2013. NCBIR. Warszawa, styczeń 2013.
- [5] Mężyk A., Klein W., Czapla T., Skowron K., Grabania M.Ł.: Pojazd gąsienicowy z napędem hybrydowym. Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe (38), nr 3/2015 s. 65-79 OBRUM sp. z o.o. Gliwice, wrzesień 2015.
- [6] Zaczyk D.: „Projekt instalacji elektrycznej pojazdu hybrydowego”. Praca dyplomowa – inżynierska wykonana pod kierunkiem dr inż. Marcina Fice. Wydział Elektryczny. Politechnika Śląska w Gliwicach. Gliwice 2014.
- [7] http://cooper-bussmann.com/products/North-American-High-Speed-fuses/FWH-500V-North-American-High-Speed-Fuse_94.html#.VADjMWO4Gtc, [Dostęp: 8 sierpnia 2014].
- [8] http://www.efen.com.pl/efen/katalogi/01_N.pdf, [Dostęp: 8 sierpnia 2014].
- [9] http://www.cooperindustries.com/content/dam/public/bussmann/Electrical/Resources/product-datasheets-a/Bus_Ele_DS_2038_DCM.pdf, [Dostęp: 8 sierpnia 2014].
- [10] <http://www.aste.pl/>, [Dostęp: 8 sierpnia 2014].
- [11] <http://www.prs.pl/dzialalnosc-badawczo-rozwojowa/programy-obliczeniowe.html>, [Dostęp: 8 sierpnia 2014].
- [12] Pistelok P., Czaja T.: Silnik klatkowy jako napęd wentylatora w trudnych warunkach pracy. Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych KOMEL. Katowice 2011.
- [13] Katalog DACPOL Sp. z o. o. wydanie 16.
- [14] PN-S-76021:1998/Az1:2001. Instalacja elektryczna pojazdów samochodowych. Wymagania i metody badań.
- [15] http://www.enel-automatyka.pl/o_firmie.htm, [Dostęp: 8 sierpnia 2014].
- [16] <http://www.mathworks.com/products/simulink/>, [Dostęp: 5 maja 2015].

ELECTRIC POWER DISTRIBUTION SYSTEM IN A HYBRID VEHICLE

Abstract. The paper presents problems associated with proper design of an electrical system of a vehicle with a hybrid propulsion system (internal combustion + electric). Topology of the system is shown along with results obtained: tables of parameters of a high current electrical system of a hybrid vehicle. The paper describes major components of the design work, including power balance, safeguards, wire cross sections, determination of the working point of a fan and soft start system for the electric motor. In conclusion, reference is made to the practical application of the calculation results.

Keywords: hybrid vehicle, series hybrid drive, power distribution, electric motor with permanent magnets

W artykule wykorzystano wyniki projektu „Wielozadaniowy, inżynierski pojazd z napędem hybrydowym” finansowanym ze środków NCBIR w Warszawie – w ramach I Programu Badań Stosowanych – umowa PBS1/A6/15/2013.