

# Kompatybilność elektromagnetyczna w układach napędowych

Trudno sobie wyobrazić współczesne sterowane układy napędowe stosowane w automatyce bez energoelektronicznych przetwornic częstotliwości (falowników). Sterowanie prędkością obrotową silnika za pomocą urządzeń energoelektronicznych ma niewątpliwie wiele zalet, ale też nie należy zapominać o negatywnych skutkach. Prawda jest taka, że falowniki i inne urządzenia energoelektroniczne z modulacją szerokości impulsów (PWM, Pulse Width Modulation), zbudowane najczęściej na mostkach tranzystorowych IGBT, mogą stanowić bardzo groźne źródło emisji zaburzeń przewodzonych i promieniowanych, jeśli są nieprawidłowo zainstalowane i dobrane. Dlatego tak ważna jest świadomość problemów EMC w układach napędowych oraz sposoby ich eliminacji.

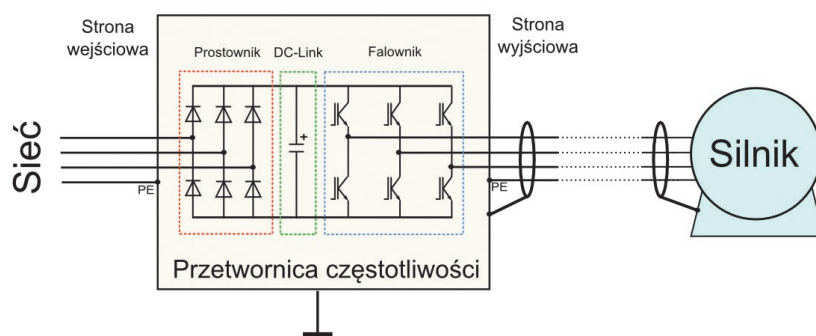
Układ napędowy o regulowanej prędkości zbudowany jest z przetwornicy częstotliwości (falownika), silnika oraz przewodów łączących. Ponieważ głównym źródłem zaburzeń jest falownik, aspekty związane z kompatybilnością elektromagnetyczną należy rozpatrywać z punktu widzenia wejścia (czyli od strony zasilania) i wyjścia falownika (od strony silnika). Ilustruje to rysunek 1. Warto też zwrócić uwagę, że normy dotyczące EMC koncentrują się wokół wejścia falownika (normy dotyczące emisji RF i harmonicznych oraz odporności), natomiast zjawiska związane z wyjściem falownika, choć nie są wprost powiązane z żadną normą EMC, są nie mniej istotne z punktu widzenia kompatybilności elektromagnetycznej oraz niezawodności.

Wśród negatywnych zjawisk powiązanych ze stroną wejściową falownika należy przede wszystkim wymienić emisję zaburzeń do sieci zasilającej.

Zaburzenia generowane są w szerokim zakresie częstotliwości. Przede wszystkim są to zaburzenia o częstotliwościach radiowych RFI (Radio Frequency Interferences) będących wielokrotnością częstotliwości przełączania tranzystorów IGBT. Są to zaburzenia o częstotliwościach od setek kHz aż po kilkadziesiąt MHz. Najlepszym sposobem eliminacji zaburzeń RFI oddawanych do sieci jest ich tłumienie za pomocą pasywnych filtrów RFI. Ważne jest, aby filtr był zainstalowany fizycznie jak naj-

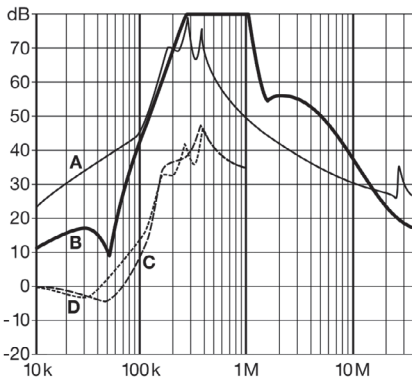
bliżej falownika, najlepiej na wspólnej i dobrze uziemionej płaszczyźnie montażowej. Firma Schaffner produkuje szeroką gamę filtrów dedykowanych do falowników. Na rysunku 2 pokazany jest przykładowy filtr trójfazowy oraz jego topologia wraz z charakterystyką tłumienia w funkcji częstotliwości.

Po stronie wejściowej, oprócz wymienionych wcześniej zaburzeń RFI, występuje emisja harmonicznych prądu do sieci. Wynika to z faktu, że większość falowników od strony



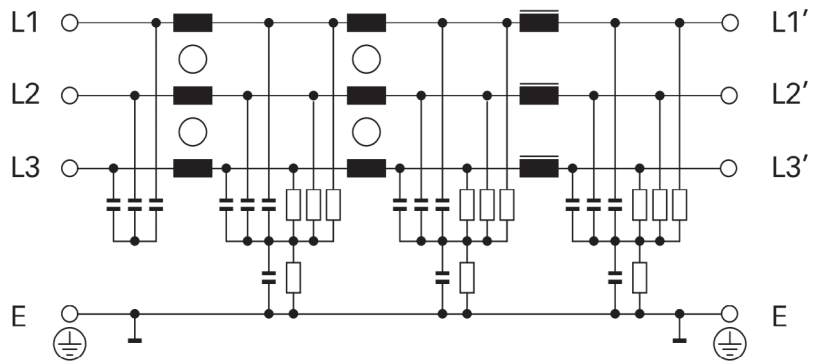
Rys. 1

Schemat blokowy współczesnego napędu elektrycznego sterowanego z przetwornicy częstotliwości



Rys. 2

Przykładowy filtr wejściowy RFI do falowników zasilanych trójfazowo, model Schaffner FN3359-1000-99, A: sym. 50Ω/50Ω, B: asym. 50Ω/50Ω, C: sym. 0,1Ω/100Ω, D: sym. 100Ω/0,1Ω



wejścia jest widziana przez sieć jako prostownik obciążony pojemnością (falowniki mają dużą pojemność w obwodzie pośredniczącym, tzw. DC-Link). Przykładowo sieć zasilająca widzi falownik z rysunku 1 jako mostek 6-pulsowy obciążony pojemnością, zatem generuje harmoniczne  $6n \pm 1$ , gdzie  $n$  oznacza liczbę naturalną, czyli harmoniczne 5., 7., 11., 13., itd. Należy zwrócić uwagę, że jest to zupełnie inne pasmo częstotliwości niż zaburzenia RFI, zatem elementy redukujące poziom harmonicznych są również zupełnie inne.

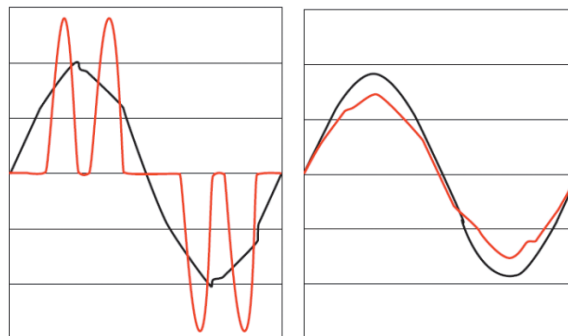
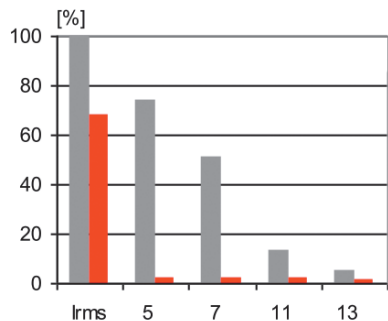
Najprostszym i najtańszym, ale często niewystarczającym elementem redukującym poziom harmonicznych prądu jest dławik sieciowy. Dławik „wygładza” impulsy prądu pobierane z sieci i tym samym redukuje współczynnik THDi. Jednak o wiele lepszą filtrację harmonicznych prądu uzyskuje się za pomocą specjalnych filtrów harmonicznych. Ze względu na sposób działania filtry harmonicznych możemy podzielić

na pasywne i aktywne. Filtry pasywne wykorzystują fakt, że kształt prądu pobierany z sieci przez dany typ falownika jest znany i stały. Zatem filtr pasywny jest zaprojektowany w taki sposób, aby w odpowiednich przedziałach czasowych gromadził i oddawał energię eliminując w ten sposób harmoniczne prądu. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowy filtr pasywny ECOSine. Filtry pasywne są bardzo skuteczne i relatywnie tanie, ale niestety można je wykorzystywać tylko w ściśle określonych aplikacjach. W pozostałych aplikacjach należy stosować filtry aktywne, które mają możliwość skompensowania dowolnie odkształconego prądu oraz możliwości adaptacji do zmieniających się obciążeń. Filtry aktywne w uproszeniu są falownikiem, który generuje i „wstrzykuje” do sieci taki prąd korekcyjny, aby wypadkowy prąd pobierany z sieci był sinusoidalny. Przy okazji filtry aktywne mogą również



poprawić współczynnik mocy biernej i symetryzować prądy pobierane przez obciążenie.

Negatywne zjawiska zachodzące na wyjściu falownika (między falownikiem a silnikiem) są często bagatelizowane, ponieważ nie są one bezpośrednio przedmiotem norm EMC, zwłaszcza norm dotyczących emisji zaburzeń do sieci. Jest to jednak poważny błąd, ponieważ zjawiska te mają kluczowe znaczenie dla niezawodności całego układu napędowego i kompatybilności elektromagnetycznej z innymi urządzeniami. Poniżej w skrócie zostały opisane podstawowe problemy, z jakimi można się spotkać, projektując lub instalując układ napędowy.



Rys. 3

Filtry pasywne ECOSine firmy Schaffner („Bez filtru” szare słupki, „Z filtrem ECOSine” czerwone słupki) oraz kształt prądu pobieranego z sieci z filtrem i bez filtra harmonicznych („Prąd” linie czerwone, „Napięcie” linie czarne)

Konieczność minimalizacji strat mocy w falowniku powoduje, że czasy przełączeń tranzystorów IGBT są bardzo krótkie, co skutkuje stromościami narastania napięcia rzędu  $dv/dt = 12 \text{ kV}/\mu\text{s}$ . W zależności od silnika dopuszczalna wartość stromości napięcia na uzwojeniu powinna być  $<1 \text{ kV}/\mu\text{s}$  (według VDE0503 powinno być  $0,5\text{-}1 \text{ kV}/\mu\text{s}$ ). W przypadku krótkich kabli duża stromość napięcia  $dv/dt$  pokazana na rysunku 4 oddziałuje bezpośrednio na izolację uzwojeń silnika tworząc tzw. gorące punkty (hot spots), co przekłada się na znaczne skrócenie żywotności izolacji.

Duże  $dv/dt$  powoduje również kolejny problem, którym są przepięcia na końcu długiego kabla silnikowego. Przy rozważanych wysokich częstotliwościach przełączania impulsów PWM, kabel silnikowy ma charakter pojemnościowy z uwagi na pojemności pasozytnicze między żyłą a ekranem. Powoduje to, w powiązaniu z małą indukcyjnością wzdłużną, przepięcia na zaciskach silnika, przyczyniając się do uszkodzenia izolacji uzwojeń.

Innym problemem jest fakt, że prąd silnika zasilany z falownika nie jest czystą sinusoidą i zawiera pewne harmoniczne. Przyczyniają się one do powstania dodatkowych strat magnetycznych w silniku i wzrostu temperatury, co przekłada się na pogorszenie niezawodności.

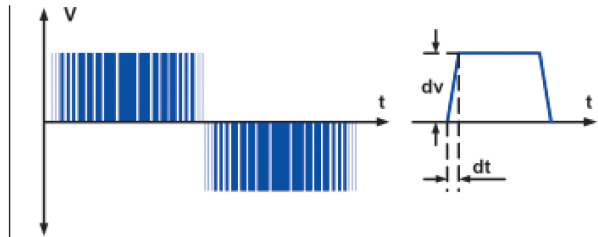
Warto też pamiętać, że wysokie częstotliwości PWM w napięciu silnika powodują również powstawanie prądów płynących przez wał i łożyska silnika. Prądy te powodują wysuszenie smaru

w łożyskach oraz mikrowyładowania uszkadzające powierzchnie toczne łożysk. W skrajnych przypadkach, przy nieprawidłowym uziemieniu silnika, żywotność łożysk może się skrócić do zaledwie kilku godzin!

W aplikacjach związanych szczególnie z wentylacją i klimatyzacją nie bez znaczenia jest problem pisków silnika przenoszących się przez dukty wentylacyjne. Przyczyną tego zjawiska jest również PWM falownika pracujący z dużą częstotliwością oraz zjawisko magnetostrykcji.

Wymienione wyżej problemy na wyjściu falownika można skutecznie minimalizować lub nawet całkowicie wyeliminować stosując odpowiednie elementy filtrujące bezpośrednio na wyjściu falownika.

Najprostszym elementem wyjściowym jest dławik  $dv/dt$ . Jego zadaniem jest ograniczenie  $dv/dt$ , czyli stromości narastania napięcia w impulsach PWM. Przekłada się to na polepszenie warunków pracy izolacji



Rys. 4

Napięcie modulowane metodą PWM na wyjściu falownika i pojedynczy impuls napięcia

silnika, jednak ciągle napięcie na silniku jest silnie odkształcone.

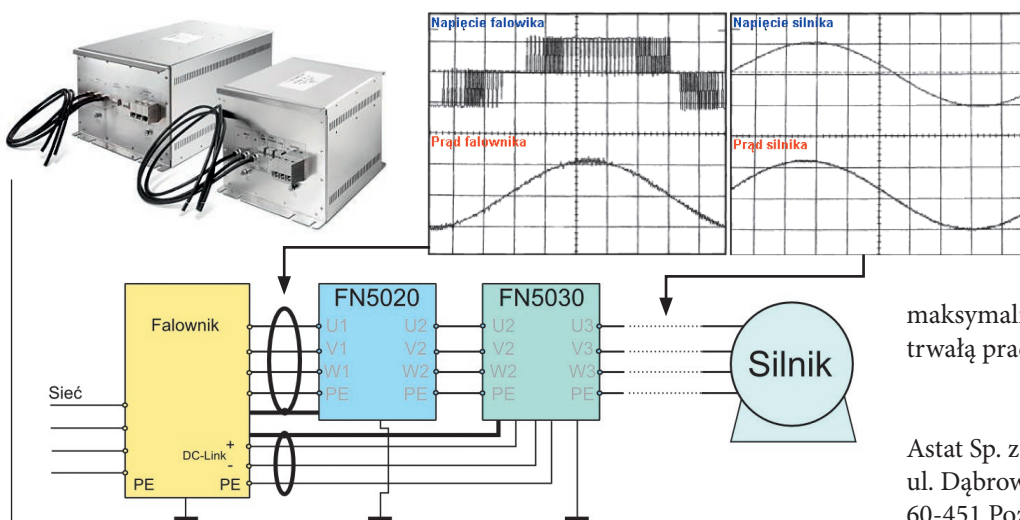
O wiele lepsze efekty uzyskuje się, stosując filtry sinusoidalne. Te pasywne struktury LC przekształcają napięcie PWM w sinusoidę, dzięki czemu wszystkie wymienione wyżej zjawiska są minimalizowane. Firma Schaffner posiada rozwiązania opcjonalnych modułów do filtrów sinusoidalnych tłumiących zaburzenia asymetryczne, które pozwalają zasilać z falownika silnik zwykłymi nieekranowanymi przewodami tak, jakby był zasilany bezpośrednio z sieci. Przykład takiego rozwiązania przedstawiono na rysunku 5.

Obowiązujące normy nakazują stosowanie elementów redukujących emisję zaburzeń, które w aplikacjach napędowych są szczególnie dokuczliwe. Ścisłe przestrzeganie norm nie daje nam jednak gwarancji dużej niezawodności i trwałości całego układu napędowego. Tam, gdzie niezawodność jest kluczowym parametrem,

konieczne jest (oprócz obowiązkowych dziś wejściowych filtrów RFI i dławików) zastosowanie elementów wyjściowych, jak dławiki  $dv/dt$  lub filtry sinus. Tylko w taki sposób zapewnimy maksymalną niezawodność i długotrwałą pracę.

mgr inż. Marcin Jurga  
Product manager

Astat Sp. z o.o.  
ul. Dąbrowskiego 441  
60-451 Poznań  
tel. 61 848 88 71  
info@astat.com.pl  
www.astat.com.pl



Rys. 5

Układ napędowy z kompletem filtrów sinusoidalnych na wyjściu falownika (symetryczny FN5020 i asymetryczny FN5030 podłączony do DC-Link)