

# SEW o falownikach o prosto i zrozumiale



Autor: Stanisław Nawracaj, SEW EURODRIVE  
Źródło: Miesięcznik "Napędy i Sterowanie"

Niniejszy artykuł przeznaczony jest dla czytelników, którzy nie posiadają większego doświadczenia z napędami zasilanymi poprzez falowniki a z tych czy innych przyczyn muszą i na ten temat osiąść pewne kompendium wiedzy. Ograniczymy się więc do opisu podstaw zagadnienia - swoistego "pierwszego stopnia wtajemniczenia". Jeśli jednak zdarzy się, że i znawcy tematu znajdą wyjaśnienia czy interpretacje których wcześniej nie znali, sprawi to autorom niniejszego artykułu dodatkową satysfakcję.

Punktem wyjścia do skrótowego opisu zasad funkcjonowania napędów z falownikami niech będzie przypomnienie paru właściwości, jakimi charakteryzują się silniki indukcyjne. Mianowicie:

- prędkość obrotowa takich silników zależy od częstotliwości napięcia zasilającego (czyli od czynnika zewnętrznego) oraz od liczby par biegunów (czyli od sposobu, w jaki zaprojektowano i nawinięto uzwojenie stojana ). Wartość napięcia zasilania ma również wpływ na obroty ale w praktyce nieznaczny w stosunku do dwóch pierwszych czynników. Wnioskujemy od razu: o ile na kształt napięcia podanego na silnik możemy mieć wpływ, to z liczbą par biegunów i parametrami uzwojenia musimy się już tylko pogodzić.

$$n_1 = 60 \cdot f / p,$$

gdzie:

$n_1$  - prędkość obrotowa pola elektromagnetycznego w silniku

$f$  - częstotliwość napięcia zasilającego (Hz)

$p$  - liczba par biegunów stojana

$$n = n_1 \cdot (1 - s)$$

gdzie:

$n$  - prędkość obrotowa silnika asynchronicznego (obr /min)

$s$  - poślizg silnik

- moment wytwarzany przez silnik indukcyjny będzie niezmienny, jeśli zachowana zostanie stała wartość prądu w uzwojeniu oraz stała wartość strumienia elektromagnetycznego w pakiecie blach stojana i wirnika. O ile z prądem sprawa jest zwykle zrozumiała, to pojęcie "stałości strumienia" już nie. Aby nie wnikać zbyt głęboko, a tym samym, coraz mniej zrozumiale w teorię zagadnienia uznajmy, za pewnik, że strumień elektromagnetyczny w silniku zależy od trzech czynników: częstotliwości napięcia, wartości skutecznej napięcia oraz parametrów uzwojenia. Generalnie pozostanie on niezmienny, jeśli zachowany zostanie stały stosunek wartości skutecznej napięcia zasilania do częstotliwości tegoż napięcia.

$$F = c \cdot U / f$$

gdzie:

$F$  - strumień elektromagnetyczny

$c$  - współczynnik proporcjonalności

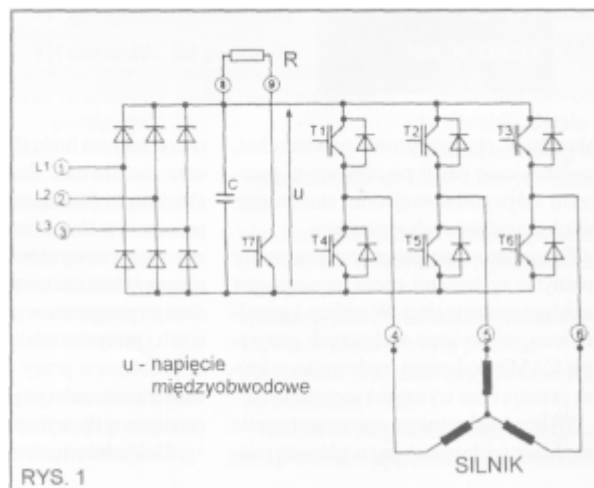
$U$  - wartość skuteczna napięcia

$f$  - częstotliwość napięcia.

Jest to wprawdzie "zgrubne przybliżenie" ale to właśnie na nim falowniki zrobiły tak oszałamiającą karierę! Czego bowiem wymagamy od falowników najczęściej? Właśnie umożliwienia nam regulacji prędkości obrotowej silnika przy zachowaniu stałości momentu napędowego.

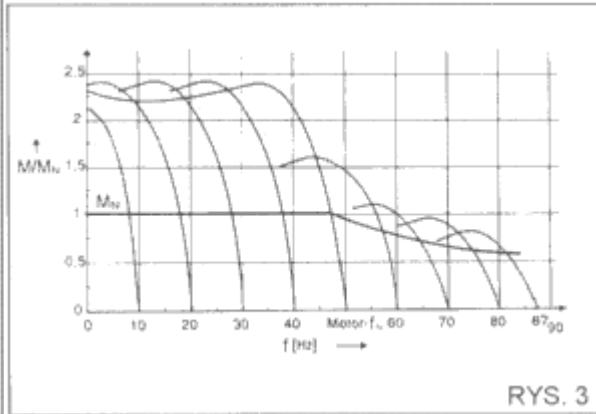
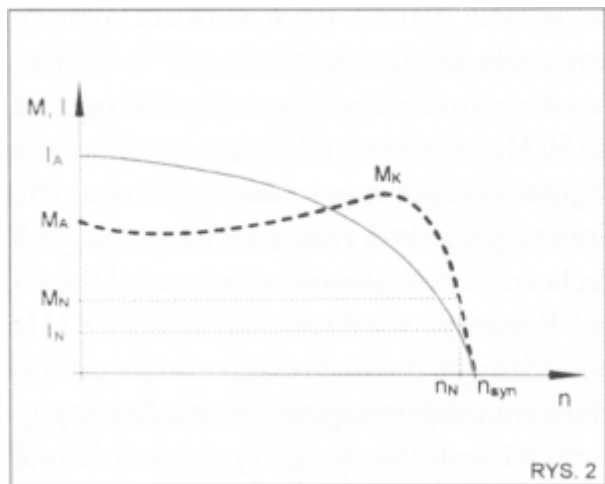
Wniosek: możemy zmieniać prędkość obrotową silnika indukcyjnego zachowując stałość momentu napędowego jeśli zasilimy ten silnik ze źródła mogącego zmieniać częstotliwość "f" ale zawsze proporcjonalnie do wartości skutecznej napięcia "U". Przykładowo: jeśli silnik w znamionowych warunkach wymaga zasilenia napięciem 3 x 400 V / 50 Hz i jego znamionowe obroty wyniosą wówczas np. 1460 obr/min to stosunek  $U/f=400V/50Hz=8V/Hz$ . Jeśli teraz chcielibyśmy zmniejszyć obroty pięciokrotnie, to: pięciokrotnie musi zostać zmniejszona częstotliwość oraz, pięciokrotnie zmniejszona wartość skuteczna napięcia.

Czyli:  $f = 50 \text{ Hz} / 5 = 10 \text{ Hz}$  oraz  $U=400V/5=80V$ . Stosunek  $U/f$  wynosić będzie teraz :  $80/10 = 8V/Hz$  czyli warunek spełniony. I to jest właściwie sedno jeśli chodzi o funkcjonowanie prostych falowników. Oczywiście użytkownik falownika nie ustawia każdorazowo tych dwóch wielkości (U oraz f) samodzielnie. Najczęściej za pomocą wybranego sygnału sterującego zadaje się żadaną wartość częstotliwości lub wręcz obrotów a resztą - wartością napięcia, różnego rodzaju kompensacjami itp. - zajmie się wspomniany falownik samodzielnie. Schemat przykładowego falownika małej i średniej mocy przedstawiamy na rys. 1.



To, czy silnik winien być połączony w gwiazdę czy trójkąt jest bardzo ważne i zajmiemy się tym tematem osobno. Zauważyć jeszcze należy, że w trakcie hamowania napędzonych wcześniej wirujących lub toczących mas (o pewnej energii kinetycznej) nastąpi zawsze zwrotny przepływ tej energii. Silnik staje się generatorem i wytworzy prąd płynący do falownika poprzez diody zwrotne mostkujące tranzystory stopnia mocy. Nastąpi w związku z tym wzrost napięcia międzyobwodowego U na kondensatorze C. Aby nie dopuścić do zbyt dużego wzrostu tego napięcia musi być w takich aplikacjach zastosowany swego rodzaju "zawór bezpieczeństwa". Jest nim tzw. Bremschopper - tranzystor mocy rozładowujący kondensator C poprzez specjalny opornik hamulcowy. W rezultacie powoduje to przemianę zwróconej z układu napędowego energii kinetycznej na energię cieplną wytraconą na tymże oporniku. Bremschopper może być zintegrowany z falownikiem (tak jest np. w falownikach firmy SEW EURODRIVE typu MOVITRAC 31C czy MOVIDRIVE) lub jako dodatkowy podzespół dołączany do napięcia międzyobwodowego. Opornik hamulcowy zawsze dołączamy z zewnątrz.

Teraz jeszcze przypomnijmy sobie charakterystyki mechaniczne silnika indukcyjnego przy zasilaniu bezpośrednio z sieci oraz ze źródła spełniającego warunek stałości U/f: rys. 2 i 3.



Otóż wynika z nich, że dla każdej częstotliwości z zakresu, w którym spełniony jest warunek stałości U/f, charakterystyka mechaniczna ma ten sam kształt, jest tylko stosownie do tejże częstotliwości przesuwana wzdłuż osi częstotliwości. Poczynając od punktu, gdzie nie możemy już zapewnić stałości stosunku U/f - dzieje się tak, gdy falownik generuje napięcie o wartości równej zasilającemu z sieci i dalej zwiększać może tylko samą częstotliwość - każda "następna" charakterystyka jest niższa od poprzedniej. Jest to obszar tzw. osłabionego strumienia.

Moment krytyczny silnika zasilanego ze źródła o stałej wartości napięcia i wzrastającej tylko częstotliwości maleje z kwadratem tejże częstotliwości.

$$M_k = k \cdot 1/f^2$$

gdzie:

M<sub>k</sub> - moment krytyczny

f - częstotliwość napięcia

k - współczynnik proporcjonalności.

Moment znamionowy M<sub>N</sub> silnika również nie pozostanie w tym obszarze niezmienny: będzie on maleł odwrotnie proporcjonalnie do wzrostu tejże częstotliwości - oczywiście do chwili zrównania się z "gwałtowniej" malejącym momentem krytycznym.

$$M_N = k_N \cdot 1/f$$

gdzie:

M<sub>N</sub> - moment znamionowy

f - częstotliwość

k<sub>N</sub> - współczynnik proporcjonalności.

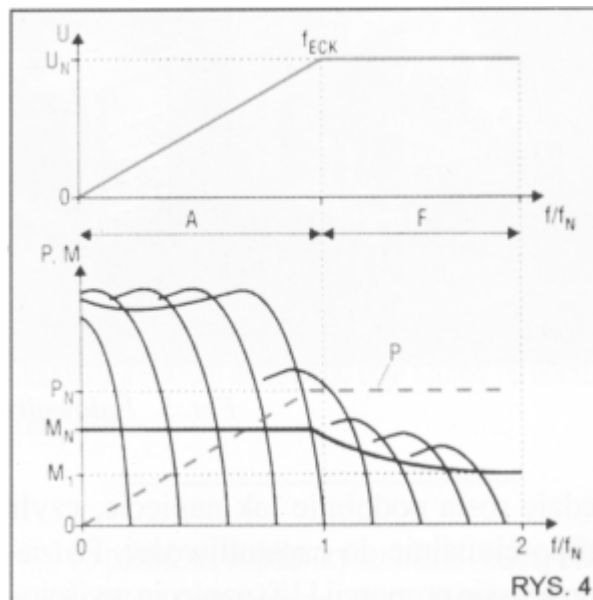
Częstotliwość, od której napięcie wyjściowe falownika przestaje wzrastać (wskutek osiągnięcia wartości napięcia zasilania z sieci) nazwana będzie częstotliwością załomu

i oznaczana będzie  $f_{ECK}$ . Zwracamy uwagę, że częstotliwość ta nie zależy od wartości napięcia zasilania.

Zobaczmy teraz, jakie są dalsze współzależności pomiędzy mocą, napięciem i momentem przy zastosowaniu falownika w wybranych typowych układach połączeń. Założenie: Usieci = 3 x 400 VAC

$$f_{ECK} = 50 \text{ Hz}$$

W pierwszym przypadku przyjmijmy, że mamy do czynienia np. z silnikiem o mocy  $P_N$ , napięciu 3X230Δ/400Y V i częstotliwości 50 Hz. Łączymy taki silnik w gwiazdę i zasilamy poprzez falownik posiadający moc równą mocy silnika (prąd znamionowy silnika równy jest prądowi znamionowemu falownika). Przy zmianach częstotliwości na wyjściu falownika otrzymamy zależności jak na rys. 4.



Widzimy, że przy obciążeniu silnika stałym momentem (prąd pobierany przez silnik pozostaje w tym zakresie obrotów niezmienny) moc układu będzie rosła podobnie jak napięcie, czyli proporcjonalnie do częstotliwości. Po załamaniu się proporcji  $U/f$  (napięcie wyjściowe z falownika osiąga swój maksymalny poziom i jest równe napięciu sieci) moc przestaje rosnąć a moment silnika zaczyna maleć. Silnik będzie więc coraz szybszy, ale dysponował będzie coraz mniejszym momentem. Załamanie się proporcji pomiędzy napięciem a częstotliwością w tym przypadku nastąpi przy 50 Hz - czyli częstotliwością załomu  $f_{ECK}$  równa będzie znamionowej częstotliwości silnika. W niektórych falownikach (jak np. MOVITRAC) częstotliwość  $f_{ECK}$  jest parametrem, który należy ustawiać przy pierwszym uruchomieniu. W innych - jak np. MOVIDRIVE - wystarczy tylko podać znamionową wartość napięcia i częstotliwości silnika dla wybranego sposobu połączeń. Falownik sam wyliczy wówczas wartość  $f_{ECK}$  - nawet wówczas, gdy nie będzie ona równa częstotliwości znamionowej silnika. Nieco dalej opiszemy przypadki, kiedy to może nastąpić.

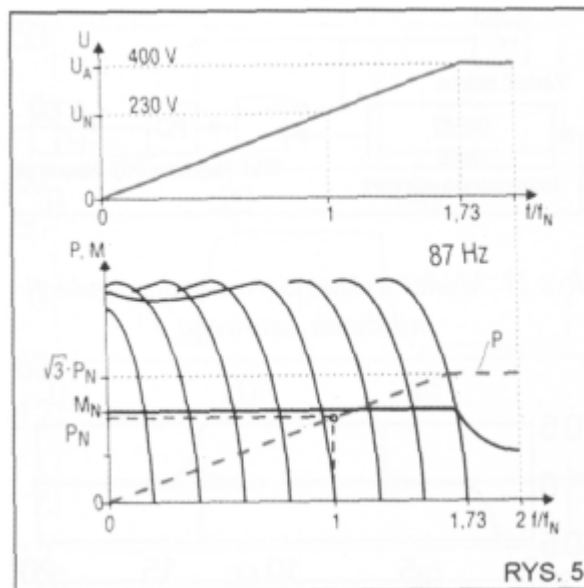
Jaki morał z powyższego przykładu? Jest ich kilka - oto niektóre z nich :

- przyłączeniu silnika 230V/400 V w gwiazdę należy ustawić  $f_{ECK} = 50$  Hz
- regulacja obrotów możliwa praktycznie "w dół" - ponad obroty znamionowe można jedynie w ograniczonym zakresie (praktycznie do ok. 70 Hz). Powyżej moment silnika spada tak znacząco, że silnik przestaje być użyteczny.
- moc silnika wzrasta liniowo z obrotami aż do częstotliwości  $f_{ECK}$  - tu osiąga wartość znamionową i dalej pozostaje już na tym poziomie. Oznacza to, że jeśli obniżamy prędkość jakiegoś napędzanego urządzenia, lecz napędzamy dalej ze stałym momentem (np. napęd windy) to rzeczywiście obniżamy zużycie energii. Jeśli obniżamy za pomocą falownika obroty np. pompy, to oszczędności są jeszcze większe, ponieważ ze spadkiem obrotów zmniejsza się też (z kwadratem!) moment obciążenia - czyli pobierany przez silnik prąd. Jeśli z kolei zmniejszymy prędkość układu jezdnego to... nie zaoszczędzimy wiele, ponieważ taki układ potrzebuje większość mocy na rozpęd lub wyhamowanie a moc potrzebna na pokrycie oporów tocnych przy stałej prędkości jest procentowo niewielka. Ale być może ze względu na możliwość ustawienia falownikiem łagodnego rozpędu wystarczyłby mniejszy silnik niż ten, który musi rozpędzić jakiś ciężki wózek przy bezpośrednim zasileniu z sieci?

Przeanalizujmy teraz drugi przykład.

$$f_{ECK} = 87 \text{ Hz}$$

Silnik z przykładu pierwszego łączymy tym razem w trójkąt. Ponieważ silnik tak połączony wymaga większego prądu ( $I_{\Delta} = 1.73 \cdot I_Y$ ) musimy zmienić falownik i zastosować egzemplarz przynajmniej o jeden typoszereg mocniejszy. W samym falowniku przestawiamy teraz  $f_{ECK}$  na wartość 87 Hz (jeśli to był np. MOVITRAC 31C) lub podajemy dane silnika jako 3x230V/50 Hz (jeśli to był np. MOVIDRIVE).



Na rys. 5 zauważymy, że przy takim ustawieniu falownika przy częstotliwości  $f=50$  Hz napięcie wynosi 230 V - czyli wartości znamionowe dla silnika połączanego w trójkąt. A zatem zmieniając częstotliwość od zera do 50 Hz osiągamy takie same możliwości regulacyjne jak w przykładzie pierwszym. Sprawa jest jednak znacznie ciekawsza, jeśli zechcemy częstotliwość zwiększać. Dlaczego? Ponieważ w zakresie od 50 Hz do 87 Hz

posiadamy w dalszym ciągu możliwość zachowania stałej proporcji pomiędzy napięciem a częstotliwością! Tym razem morał będzie taki, że posiadamy możliwość napędu ze stałym momentem aż do 87 Hz. Niech nas jedynie nie przerazi fakt, że potraktujemy silnik napięciem 400 V podając go na fazę, podczas gdy znamionowa wartość napięcia fazowego wynosi jedynie 230 V. Sama wysokość napięcia nie jest tu groźna - znaczenie ma fakt, że napięcie 400 V zostanie podane przy częstotliwości 87Hz a nie 50Hz. Mnemotechnicznie sprawa wygląda tak: silnik jako duża indukcyjność posiada impedancję proporcjonalną do częstotliwości (pamiętamy:  $X_L = 2\pi fL$ ). Jeśli zatem podamy na taką indukcyjność podwyższone napięcie ale przy podwyższonej jednocześnie częstotliwości to nie spowodujemy zwiększenia wartości prądu. Zatem jeśli prąd nie wzrośnie to i powodów do obaw o silnik nie ma. A obroty ponadznamionowe? Tak, tu trzeba zachować umiar i nie stosować powyższej techniki do silników o jednej parze biegunów - ich prędkość wzrosła by wówczas do ok. 5000 obr/min. Zalecamy silniki głównie czterobiegunowe. Ich prędkość wzrośnie wówczas do ok. 2500 obr/min ale trzeba być pewnym, że producent dopuszcza takie obroty. W przypadku silników SEW EURODRIVE tak - nawet do 3600 obr/min. Stosowane przez SEW łożyska są dla silników z dwoma parami biegunów są identyczne jak w silnikach z jedną parą biegunów. A jedne i drugie silniki są jednocześnie przystosowane do pracy w strefach częstotliwości 60 Hz (np. w USA).

## Wnioski

- przy takim zastosowaniu falownika wzrasta nam możliwość regulacji "w górę. Są jednak ograniczenia: utrzymując znamionowy moment obciążenia przy prędkości 87 Hz powodujemy pracę silnika przy obciążeniu mocą  $1.75P_N$  - patrz rys. 5.
- przykładowo silnik o mocy  $P = 3$  kW osiągnąłby wówczas moc  $P = 1.75 \times 3 \text{ kW} = 5,4$  kW - co przy długotrwałym obciążeniu mogłoby okazać się to dla tego silnika zgubne. SEW EURODRIVE deklaruje w takim wypadku dla swych silników możliwość długotrwałego obciążenia ale, tylko mocą silnika stojącego o stopień wyżej w typoszeregu - tu byłoby  $P = 4$  kW (a nie 5.4 kW). W praktyce oznacza to świadome zredukowanie momentu obciążenia przy wyższych obrotach (ponadznamionowych), co jednak i tak daje więcej, niż w przykładzie pierwszym. No i zawsze jest do dyspozycji krótkotrwała możliwość pracy "na pełnej mocy"
- zakres regulacji wzrasta, bo wzrasta całkowity obszar pracy ze stałym momentem. W większości jest to zaleta. Jednak np. przy napędach dynamicznych stanowi wadę bo wzrasta też czas rozpędu od zera do pełnej prędkości - jeśli jako pełną prędkość przyjmujemy 87 Hz.
- możliwość takiego użycia silnika istnieje jedynie wówczas, gdy silnik posiada uzwojenie 230/400 V - typowe dla mocy do ok. 5.5 kW. Silniki większe posiadają z reguły uzwojenie 400/690 V w celu umożliwienia zastosowania przełącznika "gwiazda-trójkąt" przy rozruchu. Silnik z takim uzwojeniem (400V/690 V) nie może być użyty zgodnie z opisem w przykładzie drugim. Będzie natomiast musiał być połączony w trójkąt, lecz w falowniku  $f$  musi zostać ustawiona na 50 Hz - tak jak w przykładzie pierwszym. Dlaczego? Ponieważ 400V/50Hz to znamionowe dane silnika a 400V to jednocześnie maksymalna wartość napięcia, jakie dostarcza nam sieć.

Generalnie pozostaje jeszcze problem chłodzenia silnika, jeśli jest on zasilony poprzez falownik. SEW EURODRIVE zaleca, aby przy braku obcego źródła chłodzenia silniki wg przykładu pierwszego (50 Hz) i zakresu regulacji 1 do 5 oraz silniki z przykładu drugiego (87Hz) i zakresu regulacji 1 do 10 przewymiarowywać o jeden typoszereg. Przykładowo silnik o mocy znamionowej  $P = 7,5$  kW winien być traktowany jak 5,5 kW. Jego większa masa umożliwia odprowadzenie ciepła nawet przy pogorszonych ze względu na wolniejsze obroty

wentylatora warunkach chłodzenia. Jeśli jednak sam przebieg pracy silnika nie powoduje obciążenia w sposób ciągły momentem znamionowym lecz mniejszym (a tak bywa najczęściej), wówczas można stosować silniki bez przewymiarowania.

$$f_{ECK} = ? \text{ Hz}$$

Pozostaje do omówienia jeszcze jeden przypadek : jeśli silnik jest "nietypowy" - np. szybkoobrotowe silniki do pił czy wibratorów. Przykładowo: znamionowe napięcie silnika wynosi  $3 \times 250 \text{ V}$  przy częstotliwości  $100 \text{ Hz}$ . Korzystając z definicji  $f_{ECK}$  oraz wykresu układamy prostą proporcję:  $250 \text{ V} / 100 \text{ Hz} = 400 \text{ V} / f_{ECK} \text{ Hz} \Rightarrow f_{ECK} = 160 \text{ Hz}$ . Tyle wynosi częstotliwość załomu , którą należy ustawić w falowniku (jeśli typ falownika tego wymaga). W nowszych typach falowników wystarczy tylko podać dane znamionowe silnika, czyli  $250 \text{ V}$  na  $50 \text{ Hz}$ . Zwracamy uwagę, że podanie częstotliwości załomu  $f_{ECK}$  umożliwia falownikowi ukształtowanie właściwej charakterystyki napięciowo-częstotliwościowej; nie oznacza natomiast , że na tej właśnie częstotliwości musi pracować silnik. Maksymalna częstotliwość pracy  $f_{MAX}$  może być zarówno wyższa jak i niższa od  $f_{ECK}$ .

Na zakończenie chcemy jeszcze przestrzec użytkowników bardzo starych silników indukcyjnych przed bezkrytycznym zastosowaniem falowników. Często stare typy izolacji uzwojeń - uległych w dodatku procesowi starzenia - nie wytrzymują zasilenia "poszarpanym" napięciem, jakie wytwarza każdy falownik. Świetny pomysł unowocześnienia starego napędu kończy się często pośpieszną wysyłką wspomnianego silnika do pobliskiego zakładu, w którym zostanie on przewinięty w jedyne kilkanaście godzin. A przecież tyle lat pracował bezawaryjnie! Bywa i tak - prawa fizyki są nieubłagane. O pechu można mówić dopiero wówczas , gdy zwarcie w takim silniku spowoduje dodatkowo uszkodzenie samego falownika...