**Omelian Płachtyna, Roman Żarnowski,**
**Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz**

# WIELOPOZIOMOWY FALOWNIK W ZASTOSOWANIU DO SILNIKA INDUKCYJNEGO LUB AUTONOMICZNEJ PRĄDNICY INDUKCYJNEJ ALBO SYNCHRONICZNEJ

## MULTILEVEL INVERTER APPLIED TO MOTOR DRIVE OR TO INDUCTION OR SYNCHRONOUS GENERATOR

**Abstract:** In the paper a multilevel inverter for purpose in a supply of induction motor or in generation of autonomous, self-excited induction generator voltage is presented. The inverter allows elimination of the most significant harmonics $5^{th}$ and $7^{th}$ and other, up to $10^{th}$. In the case of motor supply in the system are not used summing transformers and thanks to the phase shifting of voltages the system is favourable in respect of harmonics in current drawn by transformer from the utility grid. The system in purpose of autonomous generator is soft for recipients of electrical energy and for the generator drive. In this case the inverter allows elimination influence of $6^{th}$, $18^{th}$, and $30^{th}$ harmonics from voltages and currents, what allows to avoid oscillations of the shaft torque.

## Wstęp

Od chwili rozpowszechnienia się prądu przemiennego jako nośnika energii elektrycznej, podstawowym źródłem wytwarzającym tę energię były generatory synchroniczne (turbogeneratory, hydrogeneratory). Cechą charakterystyczną tych układów było utrzymywanie stałej prędkości obrotowej generatora przez układ napędowy [56]. Taka sytuacja jest możliwa w przypadku wykorzystania do napędu generatorów turbin cieplnych oraz układów wykorzystujących energię spadku wody. W przypadku innych napędów, spełnienie wymagań dotyczących stałości prędkości obrotowej może być trudne lub wręcz niemożliwe. Ostatnio, w związku z rozwojem energetyki opartej na niekonwencjonalnych źródłach energii, pojawiła się znaczna liczba małych elektrowni wodnych i wiatrowych pracujących zarówno przy stałej, jak i zmiennej prędkości obrotowej wału. Stochastyczne parametry odnawialnych źródeł energii stwarzają dodatkowe problemy z zapewnieniem odpowiedniej jakości energii elektrycznej, pozyskiwanej z tych źródeł.

W zależności od zastosowanego rodzaju generatora (synchronicznego lub asynchronicznego) elektrownie z grupy tzw. małej energetyki charakteryzują się nieco odmiennymi cechami. Człon energoelektroniczny występujący pomiędzy generatorem a obciążeniem stanowi interfejs sieciowy. Generator z interfejsem pracujący autonomicznie, lub inaczej autonomiczną prądnicę indukcyjną, w dalszej części oznaczono API.

W projektowaniu API z układami przekształtnikowymi o strukturze falownikowej na ogół nie ma problemu z zapewnieniem stałej wartości napięcia wyjściowego i jego częstotliwości, natomiast można zauważyć pewną tendencję, to jest zmierzanie do wyeliminowania wyższych harmonicznych z napięcia wyjściowego. Polega to na poprawie kształtu krzywej napięcia tak, aby wyeliminować najbardziej znaczące harmoniczne lub harmoniczne określonego rzędu. W układach falownikowych bez PWM sprowadza się to do takiego sterowania łącznikami, aby uzyskać krzywą napięcia w postaci krzywej schodkowej o określonej liczbie schodków i określonych poziomach napięcia poszczególnych schodków. W układach falownikowych z PWM odbywa się to poprzez stosowanie określonej modulacji szerokości impulsów [1, 3, 8]. W ostatnich latach pojawiły się rozwiązania łączące te dwa sposoby, tj. podstawowa krzywa napięcia ma kształt schodkowy, natomiast dla poszczególnych stopni stosuje się dodatkowo modulację PWM [6, 7].

Znane są również rozwiązania, w których odpowiedni kształt krzywej napięcia wyjściowego przekształtnika, stanowiącego interfejs wyjściowy API, uzyskuje się zarówno poprzez odpowiednie kształtowanie fali napięcia, jak i stosowanie filtracji [2].

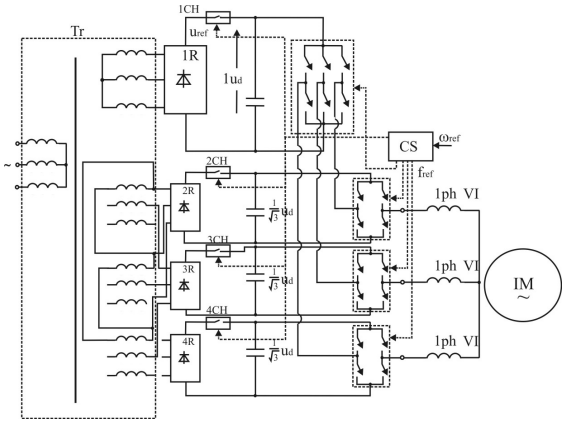
Z przytoczonych rozważań wynika, że w układach API z przekształtnikami jakość generowanej energii elektrycznej jest określona głównie przez zastosowany przekształtnik. W wyniku prowadzonych prac badawczych nad API, w której w falowniku kaskadowym do sumowania napięć użyto transformatorów powstała nowa koncepcja falownika wielopoziomowego, jako interfejsu do takich API.

## Układ falownika sześciopoziomowego

Schemat zaproponowanego [4, 9] układu przedstawiono na rys. 1. Posiada on strukturę trójfazowego kaskadowego falownika napięcia, który nie generuje wyższych harmonicznych do dziesiątego rzędu włącznie. Układ jest zasilany czterema napięciami stałymi, z których pierwsze ma wartość względną równą **1** i zasila, poprzez równoległą baterię kondensatorów falownik trójfazowy, a pozostałe trzy napięcia, o wartości względnej równej $\mathbf{1}/\sqrt{\mathbf{3}}$ każde, zasilają, poprzez równoległe trzy baterie kondensatorów, trzy jednofazowe falowniki napięcia. Napięcia falowników jednofazowych są dodawane do napięć fazowych falownika trójfazowego, a wyjście z układu, w postaci napięcia trójfazowego, stanowią wyjścia jednofazowych falowników napięcia, oznaczone A, B, C. Aby uzyskać stabilizację napięcia wyjściowego zastosowano cztery przekształtniki impulsowe (*chopper*).

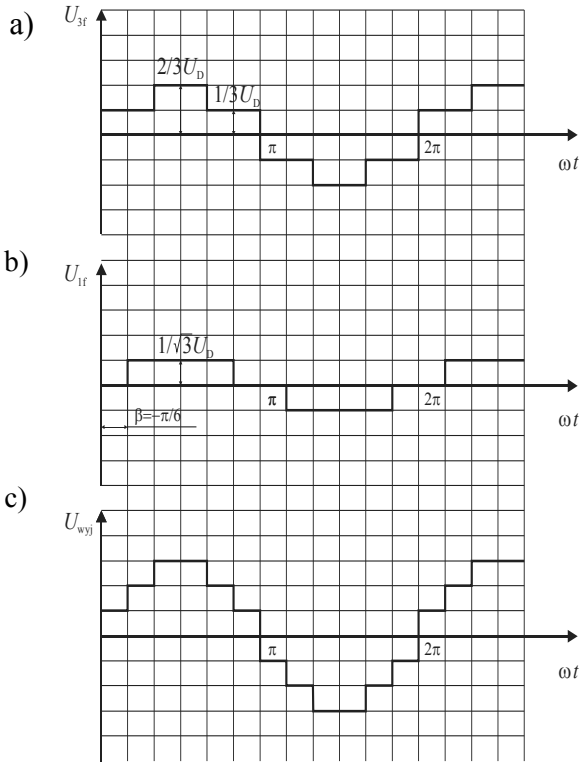
Kąt przesunięcia fazowego między napięciami odpowiadających sobie faz uzwojenia zasilającego falownik trójfazowy i każdego z trzech pozostałych względem tego pierwszego wynosi 30° elektrycznych.

Trójfazowy falownik napięcia kształtuje napięcie fazowe, które w przedziale kątów $0 \div \pi$ przebiega następująco: w przedziale $0 \div \pi/3$ napięcia mają wartość $1/3\ u_d$, w przedziale $\pi/3 \div 2\pi/3$ napięcia mają wartość $2/3\ u_d$, w przedziale $2\pi/3 \div \pi$ napięcia mają wartość $1/3\ u_d$. Dla kątów większych od $\pi$ funkcja przebiega antysymetrycznie.




*Rys. 1. Wielopoziomowy falownik w zastosowaniu do silnika indukcyjnego*

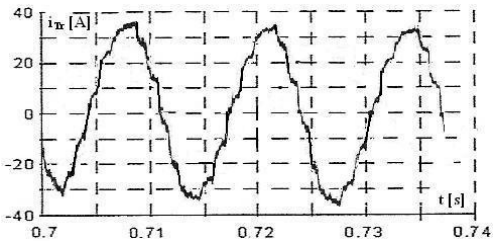
W przedziale kątów $0 \div \pi$ każdy z jednofazowych falowników napięcia kształtuje napięcia o następującym przebiegu: w przedziale $0 \div \pi/6$ napięcia mają wartość 0, w przedziale $\pi/6 \div 5\pi/6$ napięcia mają wartość $\mathbf{1}/\sqrt{\mathbf{3}}\ u_d$, w przedziale $5\pi/6\pi$ napięcia mają wartość 0. Dla kątów większych od $\pi$ funkcje przebiegają antysymetrycznie tak, jak to przedstawiono na rys.2.



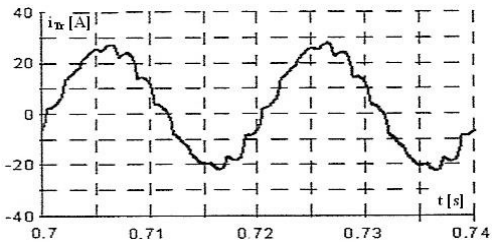

*Rys. 2. Przebiegi napięć wyjściowych odpowiednio z falownika 3-fazowego – a) i falowników jednofazowych – b) oraz napięcie wyjściowe falownika – c)*

Wynik wybranych badań symulacyjnych dla napędu przedstawionego na rys.1 pokazano na rys. 3. Na rys. 3a przedstawiono falę prądu fazowego stojana, a na rys 3b falę prądu pobieranego z sieci przez transformator zasilający.

a)




b)




*Rys. 3. Prądy odpowiednio silnika i transformatora. Prąd fazowy silnika –a), prąd fazowy w uzwojeniu pierwotnym transformatora sieciowego –b)*

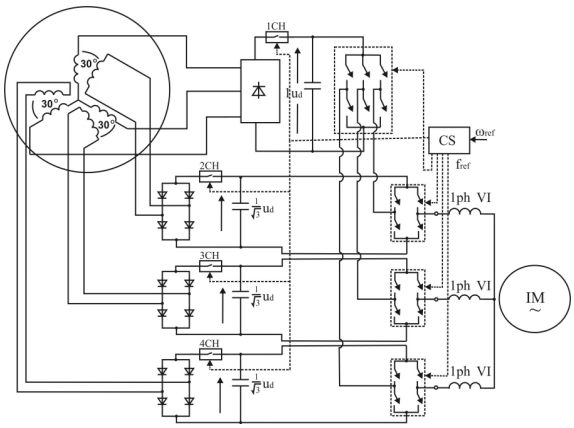
## API z beztransformatorowym trójfazowym wielopoziomowym falownikiem napięcia

Układ trójfazowego generatora (asynchronicznego, synchronicznego) [5] z kaskadowym falownikiem napięcia (rys. 4) może stanowić źródło napięcia bez wyższych harmonicznych do rzędu dziesiątego włącznie.

Charakterystyczną cechą układu jest to, że generator posiada dwa uzwojenia trójfazowe, z których jedno jest skojarzone w gwiazdę, a uzwojenia fazowe drugiego uzwojenia trójfazowego są separowane, o zwojnościach pozostających w stosunku **1** : $\mathbf{1/\sqrt{3}}$ i osiach jednoimiennych faz obu uzwojeń przesuniętych o 30°. Generator zasila odpowiednio napięciem o wartości względnej **1** poprzez prostownik i równoległą baterię kondensatorów falownik trójfazowy, a napięciem o wartości względnej $\mathbf{1/\sqrt{3}}$ każde, poprzez równoległe trzy baterie kondensatorów, trzy jednofazowe falowniki napięcia. Jednofazowe falowniki napięcia dodają swoje napięcia do wyjściowego napięcia fazowego falownika trójfazowego, a wyjście z układu, w postaci napięcia trójfazowego, stanowią wyjścia oznaczone A, B, C jednofazowych falowników napięcia.

Zaletą techniczną tej API jest brak stosowania transformatorów sumujących napięcia. Dzięki relacjom wartości i fazy dwóch napięć wyjściowych generatora, w jego momencie elektromagnetycznym nie powstają momenty od wyższych harmonicznych napięć i prądów rzędu 6, 18, 30 i dalsze, co eliminuje drgania momentu na wale. Układ jest, więc korzystny zarówno z punktu widzenia napędu generatora jak i odbiorców generowanej przez niego energii elektrycznej.

W przypadku prądnicy indukcyjnej układ powinien zostać uzupełniony o baterie kondensatorów wzbudzających przyłączonych równolegle do uzwojenia 3-fazowego i odpowiednio do uzwojeń jednofazowych.




*Rys. 4. Schemat API w przypadku prądnicy synchronicznej z falownikiem wielopoziomowym*

## Podsumowanie i wnioski końcowe

- najbliższymi wyższymi harmonicznymi w napięciu są 11., 13., 23., 25., 35. i 37.,
- współczynnik *THD* po odfiltrowaniu tych harmonicznych osiągnąłby korzystną wartość około 3,9%,
- układ jest przyjazny dla trójfazowego źródła energii elektrycznej, ponieważ praktycznie nie odkształca prądu pobieranego przez transformator zasilający,
- zaletą techniczną tego układu API jest brak stosowania transformatorów sumujących napięcia,
- dzięki relacjom wartości i fazy dwóch napięć wyjściowych generatora, w jego momencie elektromagnetycznym nie powstają momenty od wyższych harmonicznych napięć i prądów

rzędu 6, 18, 30 i dalsze, co eliminuje drgania momentu na wale,
- układ jest więc korzystny zarówno z punktu widzenia napędu generatora, jak i odbiorców generowanej przez niego energii elektrycznej,
- porównanie zaproponowanego układu z innymi źródłami zasilania energią elektryczną wykazało, że układ ten spełniałby wymagania norm [10], dotyczące jakości energii elektrycznej dla sieci niskiego napięcia, po odfiltrowaniu 11. i 13. harmonicznej napięcia.

## Literatura

[1]. Holmes D., G., Lipo T., A.: *Pulse width modulation for power converters.* J. Wiley Inc. Publication, 2003.

[2]. Nayar C. V. et al.: *Power Electronics for Renewable Energy Sources* [in:] Power Electronics Handbook, Rashid M. H. (Editor-in-Chieff), Academic Press 2001.

[3]. Nowak M., Barlik R.: *Poradnik inżyniera energoelektronika*. WNT, Warszawa 1998.

[4]. Plakhtyna O., Żarnowski R.: Zgłoszenie patentowe P.380141 *Układ trójfazowego kaskadowego falownika napięcia.* UPRP 10.07.2006.

[5]. Plakhtyna O., Żarnowski R.: Zgłoszenie patentowe P.380142 *Generator trójfazowy z kaskadowym falownikiem napięcia.* UPRP 10.07.2006.

[6]. Shavełkin A. A.: *Minimalizacja siłovych cepiej mnogourovnievych preobrazovatilej czastoty elektroprivodov sredniego napriazenia.* Techn. Elektrodinamika, Donieck 2005.

[7]. Skvarenina T. L.: *The Power Electronics Handbook.* Industrial Electronics Series CRC Press. Washington 2000.

[8]. Tunia H., Smirnow A., Nowak M., Barlik R.: *Układy energoelektroniczne – obliczanie, modelowanie, projektowanie.* WNT, Warszawa 1982.

[9]. Żarnowski R.: *Analiza i badania układu autonomicznej prądnicy indukcyjnej z kaskadowym falownikiem napięcia.* Rozprawa doktorska, Akademia Morska, Gdynia 2010.

[10]. PN-EN 50160:2002 *Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych.*

## Autorzy

Prof. dr hab. inż. Omelian Płachtyna
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
w Bydgoszczy, Instytut Elektrotechniki
Zakład Maszyn i Napędów Elektrycznych.
ul. prof. Sylwestra Kaliskiego 7
85-796 Bydgoszcz, Tel. (52)340 85 30
E-mail: plakht@utp.edu.pl.
Dr inż. Roman Żarnowski, U
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
w Bydgoszczy, Instytut Elektrotechniki
Zakład Maszyn i Napędów Elektrycznych
ul. prof. Sylwestra Kaliskiego 7
85-796 Bydgoszcz, Tel. (52)340 85 30
E-mail: zarnov@ by.home.pl.