

UTRZYMANIE URZĄDZEŃ ENERGOELEKTRONICZNYCH INSTALOWANYCH NA STATKACH W ŚWIETLE ZASAD I ZALECEŃ

MAINTENANCE OF POWER ELECTRONIC DEVICES INSTALLED ON SHIPS IN THE LIGHT OF THE PRINCIPLES AND RECOMMENDATIONS

Adam MUC

a.muc@we.am.gdynia.pl

Piotr MYSIAK

p.mysiak@we.am.gdynia.pl

Andrzej KASPROWICZ

a.kasprowicz@we.am.gdynia.pl

Uniwersytet Morski w Gdyni
Wydział Elektryczny
Katedra Automatyki Okrętowej

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono analizę stanu i możliwości wykorzystania urządzeń energoelektronicznych i napędów elektrycznych na statkach. Omówiono zagadnienia związane z projektowaniem wielopulsowych prostowników dużej mocy, które stanowią jedno z bardziej popularnych urządzeń energoelektronicznych stosowanych na jednostkach pływających. Przedstawiono problemy związane z eksploatacją urządzeń energoelektronicznych w sieci miękkiej. Następnie przeprowadzono badanie symulacyjne wybranych układów prostowników. Celem badania było pokazanie na przykładzie prostownika, konsekwencji wyboru konstrukcji urządzenia energoelektronicznego na przebiegi napięć i prądów w sieci miękkiej. Ponadto omówione zostały problemy dotyczące urządzeń elektromagnetycznych oraz zagadnienia związane z przepisami i zaleceniami dotyczącymi ich projektowania i eksploatacji. Właściwy dobór konstrukcji urządzenia energoelektronicznego danego typu oraz przestrzeganie zasad i przepisów zapewnia zwiększenie sprawności urządzeń i jakości przetwarzanej energii oraz obniża ich negatywny wpływ na pozostałe urządzenia i sieć.

SUMMARY

The paper presents an analysis of the state and possibilities of using power electronics and electric drives on ships, and in particular, in ship engine room. Problems related to the operation of power electronics in the soft network are presented. The issues related to the design of multi-pulse high power rectifiers are discussed, which is one of the most popular power electronics devices used on vessels. Then a simulation study of selected rectifier circuits was carried out. The purpose of this study was to show the effect of selecting a power electronics design on the waveforms of the voltages and currents in a soft network on the rectifier example. Also discussed are main electromagnetic device problems and issues related to regulations and recommendations for their design and operation. Proper selection of the type of the power supply design and observance of the rules and regulations ensures the efficiency of the equipment and the quality of the energy being processed and reduces their negative impact on the remaining equipment and network.

Słowa kluczowe: urządzenia energoelektroniczne, napęd elektryczny, maszynownia, przekształtniki dużej mocy, kondycjonowanie energii elektrycznej

Key words: power electronics, electric drive, engine room, high power converters, electricity conditioning

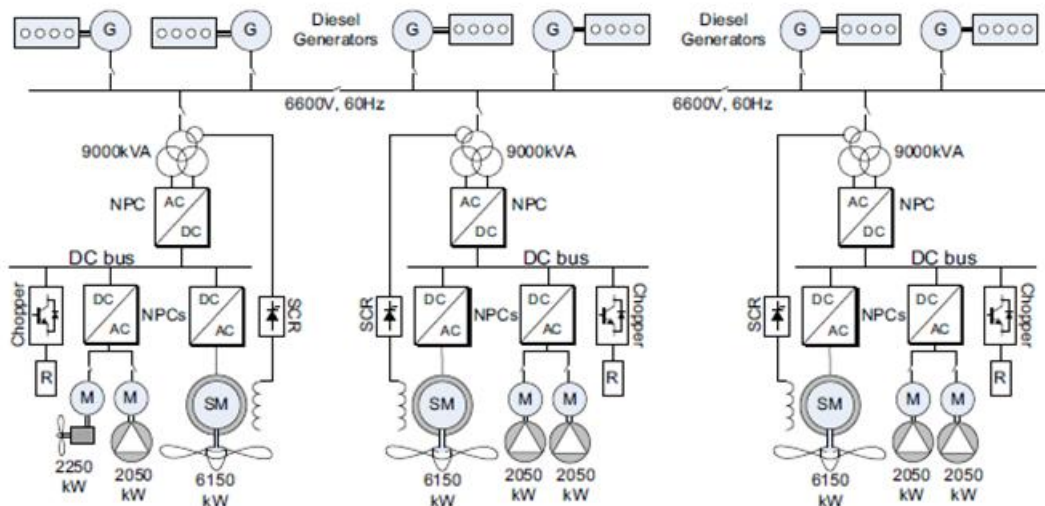
WSTĘP

Obecnie coraz szerzej i częściej na statki wkraczają wysoce wyspecjalizowane układy energoelektroniczne. Pojawiają się one również tam, gdzie do tej pory bezkonkurencyjnym rozwiązaniem były układy spalinowe. Dotyczy to szczególnie napędów głównych statku. Analiza eksploatacyjna wykazała, że w wielu przypadkach stanowią one lepsze rozwiązanie niż stosowane dotychczas rozwiązanie klasyczne z silnikiem spalinowym. Poza tym układ napędowy z silnikiem elektrycznym wraz z układem zasilania charakteryzuje się znacznie wyższą sprawnością w całym zakresie mocy wyjściowej oraz prędkości obrotowej. Równocześnie, z trendem zastępowania silnika spalinowego elektrycznym następuje rozdzielanie wytwarzania energii na kilka prądnic w celu podniesienia niezawodności systemu napędowego.

Spalinowe zespoły prądotwórcze z generatorami synchronicznymi wytwarzają energię elektryczną dla potrzeb elektrycznego układu napędowego. W zależności od mocy układu napędowego napięcie wyjściowe generatorów waha się od 3,3 kV przez 6,6 kV, a ostatnio nawet 11 kV. Wysokie napięcie wyjściowe generatorów stosowane jest w celu obniżenia wartości prądu przy dużych mocach, którego zmniejszenie ułatwia procesy łączeniowe oraz ogranicza straty. To wysokie napięcie nie jest bezpośrednio wykorzystywane do zasilania urządzeń. Jest ono prostowane. Do tego celu stosowane są niesterowane prostowniki dużej mocy. Pracują one w różnych układach połączeń przy wysokim napięciu wejściowym i wyjściowym. W niektórych rozwiązaniach, na wyjściu generatorów stosowane są transformatory trójfazowe obniżające napięcie. Jednocześnie stosowane układy połączeń transformatorów umożliwiają uzyskiwanie przesunięć fazowych napięć zasilających prostowniki wielopulsowe. Prostowniki te zapewniają lepsze wygładzenie napięcia stałego, które jest źródłem zasilania falowników. Falowniki natomiast, zasilają silniki prądu przemiennego napędu głównego, sterów strumieniowych itp. Dobrze wygładzone napięcie stałe mniej odbija się na pracy zasilanych układów. W celu zapewnienia bezpieczeństwa rozdzielnice - główne na statkach, dzielone są na co najmniej dwie sekcje. Zapewnia to redundancję układów zasilania.

Najczęściej do zasilania silników głównych statku stosowane są układy falowników napięcia z Modulacją Szerokości Impulsów (ang. *Pulse Width Modulation*). W przypadku

mniejszych mocy, gdy na szynach jest napięcie 440 V, mogą to być falowniki dwupoziomowe. Dla napięć na poziomie kilowoltów powszechnie stosuje się falowniki wielopoziomowe. Charakteryzują się one wysokim stopniem skomplikowania oraz złożonym sterowaniem. Przykładowy schemat głównego elektrycznego układu napędowego przedstawiono na rysunku 1.



Rys 1. Schemat przykładowego głównego elektrycznego układu napędowego statku
 Źródło: Kouro i in. (2010).

Generatory dostarczają napięcia 6,6 kV. W układzie występują transformatory obniżające napięcie, które następnie jest prostowane i zasila falowniki wielopoziomowe typu NPC (ang. *Neutral Point Clamped*). Regulowanym napięciem wyjściowym falownika zasilane są silniki napędu głównego. Z wykorzystaniem podobnych falowników zasilane są inne urządzenia dużej mocy na statku (Kouro i inni, 2010).

Końcowym elementem napędu statku jest silnik elektryczny dużej mocy. Obecnie stosowane są trzy rodzaje silników prądu przemiennego. Jako podstawowy występuje silnik synchroniczny. Wymaga on jednak dodatkowego źródła napięcia stałego dla układu wzbudzenia. Są to silniki wolnoobrotowe o prędkości znamionowej 150 – 250 obr/min i bardzo dużej mocy rzędu kilku megawatów.



Rys 2. Widok wykonania a) morskiego przemiennika częstotliwości i b) Silnik elektryczny napędu głównego statku

Źródło: Javaid i in. (2015).

Falowniki zasilające te silniki dają możliwość sterowania prędkością obrotową od zera do prędkości znamionowej ze znamionowym momentem elektromagnetycznym. Mała znamionowa prędkość obrotowa silnika pozwala natomiast wyeliminować przekładnię z układu napędowego, która charakteryzuje się dużymi rozmiarami i wagą oraz jest jednym z bardziej zawodnych elementów w torze napędowym. Ponieważ falowniki umożliwiają płynną regulację prędkości obrotowej od zera do znamionowej w układzie napędowym stosuje się śruby ze stałym ustawieniem łopat. Równie istotną kwestią jest krótki wał napędowy łączący silnik ze śrubą (Javaid i inni, 2015).

Silnik ze źródłem zasilania połączony jest kablami elektrycznymi. Daje to dużą swobodę rozmieszczenia tych urządzeń w siłowni, a przez to lepiej wykorzystywana jest dostępna przestrzeń. Właściwe rozmieszczenie urządzeń oraz sam silnik elektryczny zmniejszają hałas oraz wibracje (rysunek 2).

Nieco tańszym rozwiązaniem jest zastosowanie silnika asynchronicznego w miejsce synchronicznego. Charakteryzuje się on prostszą konstrukcją, dużą niezawodnością i mniejszym kosztem. Natomiast pozostałe elementy układu napędowego nie ulegają zmianie.

Stosowane są również silniki synchroniczne z magnesami trwałymi (ang. *Permanent Magnet Synchronous Motor*). Jest to jednak rozwiązanie najdroższe ze względu na zastosowanie magnesów trwałych z materiałów ziem rzadkich.

Główny napęd elektryczny, niezależnie od zastosowanego silnika, charakteryzuje się dużą podatnością na sterowanie, która wpływa na uzyskanie bardzo dobrej manewrowości statku. Występuje również małe prawdopodobieństwo całkowitej utraty mocy napędowej ze względu na stosowaną redundancję. Elektryczny układ napędowy charakteryzuje

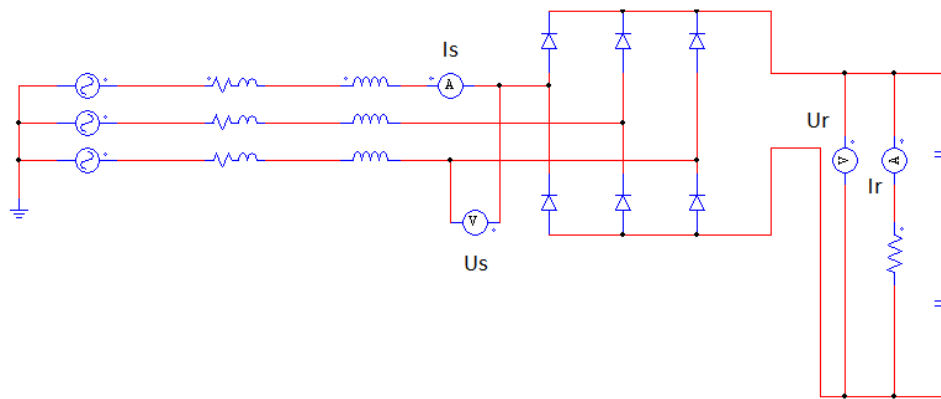
się również dużą dynamiką i dużym momentem rozwijanym już przy małej prędkości obrotowej silnika (Javaid i inni, 2015).

Niestety w celu osiągnięcia powyższych celów musiała zostać zastosowana bardzo zaawansowana technologia. Powoduje to wysokie koszty wdrożenia. Przy pracy przekształtników dużej mocy pojawiają się problemy związane z zakłóceniami emitowanymi do sieci. W maszynach zasilanych przekształtnikowo generowane są wyższe harmoniczne momentów. Od strony wyjścia przekształtników występują skokowe zmiany napięcia o dużej stromości dU/dt . Stanowi to poważne zagrożenie dla izolacji silnika. Pojawiają się również tzw. prądy łożyskowe wywołujące wżery w bieżniach łożysk. Prowadząc na dłuższą metę do uszkodzenia. Wymaga to stosowania specjalnych konstrukcji zapobiegających temu zjawisku. Wyższe harmoniczne prądu pojawiające się podczas pracy urządzeń energoelektronicznych pociągają za sobą konieczność stosowania odpowiednich kabli zasilających silniki oraz stosowanie filtrów biernych jak też układów aktywnych poprawiających kształt prądu pobieranego z sieci okrętowej AFE (ang. *Active Front End*) (Kouro i inni, 2010; Javaid i inni, 2015).

1. BADANIE SYMULACYJNE PROSTOWNIKÓW WIELOPULSOWYCH

Jednym z najczęściej stosowanych urządzeń energoelektronicznych na statkach są prostowniki, które wykorzystuje się jako układy zasilające lub jako przekształtniki AC/DC wykorzystywane przez inne urządzenia energoelektroniczne - jak falowniki. Niesterowane prostowniki diodowe są powszechnie używane ze względu na ich niewielki koszt, dużą niezawodność i niski poziom emisji zaburzeń elektromagnetycznych. Mimo prostej konstrukcji tradycyjnych prostowników 6-pulsowych, konstrukcje prostowników wielopulsowych bywają bardzo złożone i wymagają skomplikowanych układów sterowania. Zwiększanie więc liczby pulsów przez komplikowanie konstrukcji prostownika skutkuje polepszeniem kształtu napięć i prądów na jego wyjściu, ale do pewnego momentu. Zasada ta nie wykazuje przyrostu linowego, ponieważ zwiększanie liczby pulsów powyżej 32 nie jest już adekwatne do uzyskiwanych efektów jakościowych.

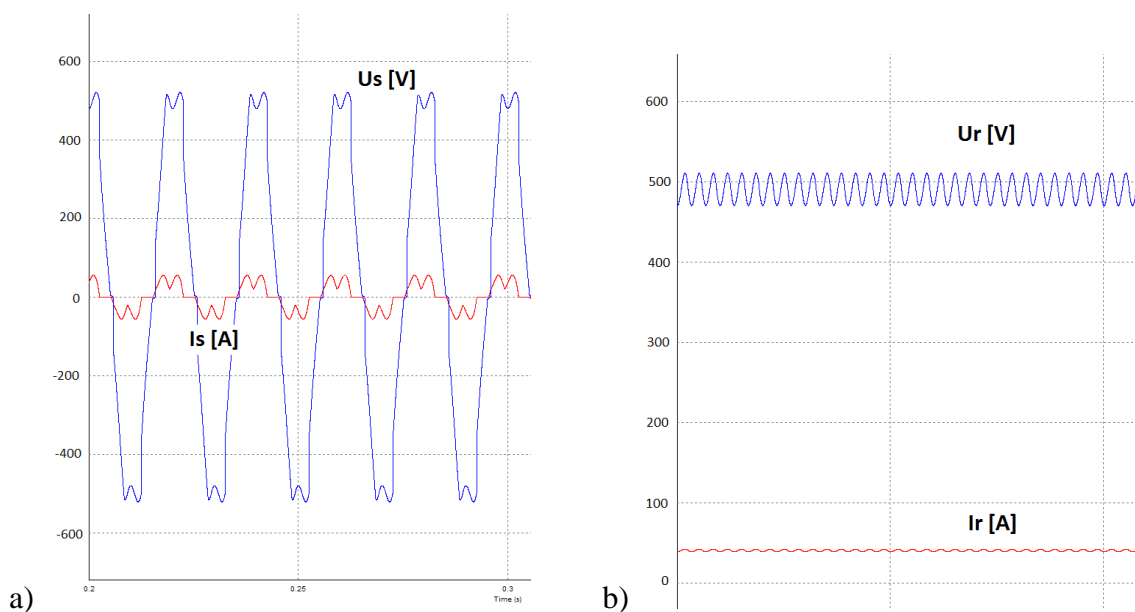
Na rysunkach od 3 do 6 przedstawiono przykładowe schematy układów energoelektronicznych o różnym poziomie skomplikowania oraz wyniki symulacji. Pierwszym układem badanym symulacyjnie jest klasyczny prostownik 6-pulsowy na moc 20 kW, który został podłączony do miękkiej sieci elektroenergetycznej (Rysunek 3).



Rys. 3. Schemat prostownika 6-pulsowego o mocy 20 kW podłączonego do sieci elektroenergetycznej 3-fazowej

Źródło: Opracowanie własne.

Między napięciami sieci a prostownikiem umieszczone zostały impedancje reprezentujące połączenia przewodowe w sieci, a sam prostownik obciążono rezystancyjnie. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe przebiegi napięć i prądów zarejestrowane na wejściu prostownika i na jego obciążeniu.



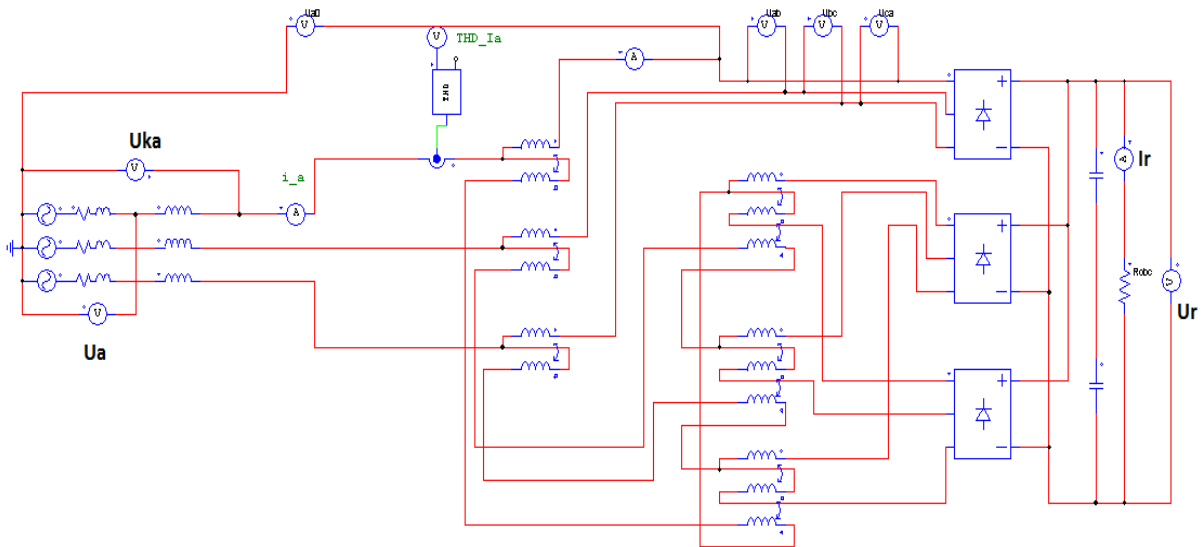
Rys. 4. a) Przebieg napięcia sieci (U_s) i prądu (I_s) na wejściu prostownika 6-pulsowego, b) Przebieg napięcia (U_r) i prądu (I_r) dla obciążenia podłączonego do prostownika 6-pulsowego

Źródło: Opracowanie własne.

Analizując nawet tylko same przebiegi napięć i prądów na wejściu i wyjściu prostownika widać jego niekorzystne oddziaływanie na sieć miękką i obciążenie. Napięcie i prąd na wejściu prostownika powinno mieć charakter sinusoidalny, ale jak widać z rysunku 4a tak nie jest. Napięcie U_s i prąd I_s zawierają wyższe harmoniczne. Na rysunku 4b widać

natomiast, że napięcie na wyjściu nie jest idealnie wyprostowane, tylko ma charakter pulsacyjny.

W celu porównania konstrukcji i działania prostowników, na rysunku 5 przedstawiono kolejny schemat tego typu urządzenia na tę samą moc, ale tym razem 18-pulsowego.

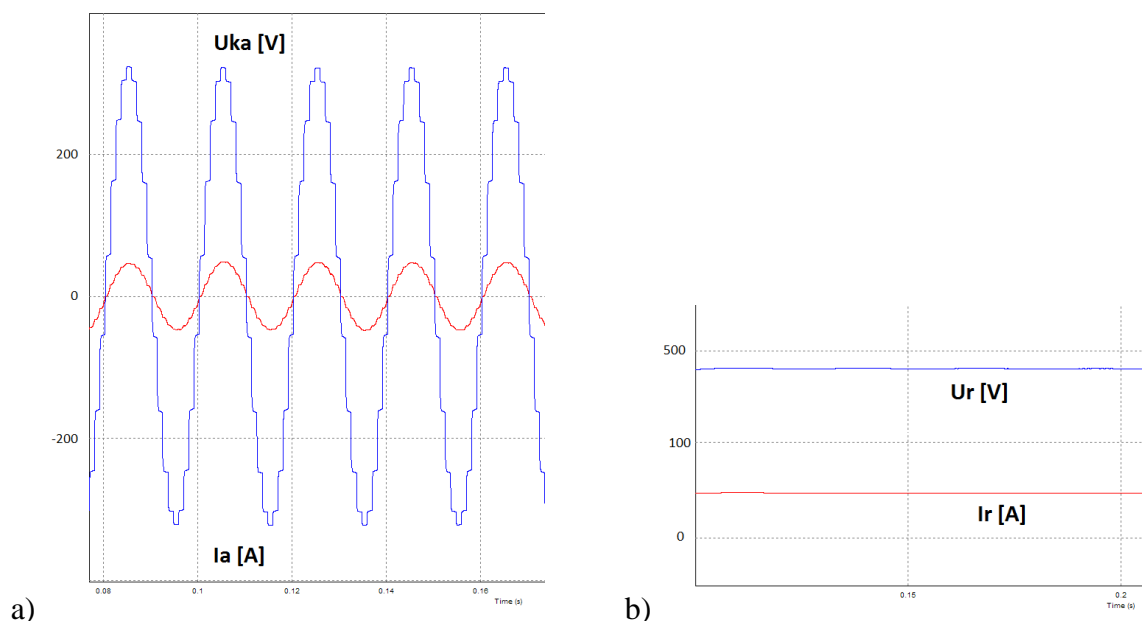


Rys. 5. Schemat prostownika 18-pulsowego o mocy 20 kW podłączonego do sieci elektroenergetycznej 3-fazowej

Źródło: Opracowanie własne.

Zasada działania prostownika osiemnastopulsowego polega na wytworzeniu trzech trójfazowych systemów napięć, przesuniętych względem siebie o 20° i zasilających sześciopulsowe prostowniki diodowe. Wzajemne przesunięcie systemów trójfazowych realizowane jest poprzez dławik wstępnego podziału prądu WPP i zestaw trójfazowych dławików sprzężonych TDS λ (Wasiluk i inni, 2007). Taka konstrukcja prostownika umożliwia radykalne ograniczenie wyższych harmoniczných prądów zasilania, głównie rzędów 5, 7, 11 i 13.

Na rysunku 6a przedstawiono przykładowe przebiegi napięcia (U_{ka}) i prądu (I_a) zarejestrowane na wyjściu sztucznej sieci, która stworzona została na potrzeby budowy prostownika 18-pulsowego. Natomiast na rysunku 6b przedstawiono przykładowe przebieg napięcia (U_r) i prądu (I_r) zarejestrowane na dołączonym do prostownika obciążeniu.



Rys. 6. a) Przebieg napięcia (U_{ka}) i prądu (I_a) na wejściu do sztucznej sieci elektroenergetycznej przed prostownikiem 18-pulsowym, b) przebieg napięcia (U_r) i prądu (I_r) dla obciążenia podłączonego do prostownika 18-pulsowego

Źródło: Opracowanie własne.

Przebiegi z rysunku 6a świadczą o znacznej poprawie napięcia i prądu wyjściowego, jaki uzyskany został na wyjściu prostownika 18-pulsowego. Podobną poprawę zaobserwowano dla napięcia i prądu zarejestrowanego na wejściu prostownika (Rysunek 6b).

2. WYBRANE PRZEPISY I ZALECENIA DOTYCZĄCE BUDOWY URZĄDZEŃ ENERGOELEKTRONICZNYCH

Urządzenia energoelektroniczne charakteryzują się złożoną konstrukcją, która obejmuje układ sterowania i często kilka obwodów o diametralnie różnych poziomach napięć i prądów. Ważnym elementem urządzenia jest również algorytm sterowania, który obecnie najczęściej realizowany jest przez mikroprocesory. W ogólnym przypadku, w każdym urządzeniu energoelektronicznym występuje przynajmniej jeden obwód energetyczny i elektroniczny (Barlik i Nowak, 1998; Mysiak, 2010).

Do obwodów energetycznych (głównych) oprócz szyn i przewodów łączących należy zaliczyć:

- odpowiednio połączony zestaw półprzewodnikowych przyrządów mocy, wyposażonych w zabezpieczenia przeciwzwarceniowe, przeciwprzepięciowe, odciążające i ewentualnie obwody komutacyjne;
- obwody wejściowe, zawierające transformator przekształtnikowy lub dławiki sieciowe, sprzężone elementy magnetyczne, aparaturę łączeniową (styczniki, wyłączniki), zabezpieczenia przeciwzwarceniowe i filtry przeciwzakłóceń;

- obwody pośredniczące o charakterze napięciowym (kondensatory) lub prądowym (dławiki);
- obwód wyjściowy, zawierający aparaturę łączeniową, filtry wyjściowe, bezpieczniki itp.

Do obwodów elektronicznych zalicza się obwody o małej mocy przeznaczone do sterowania, sygnalizacji, diagnostyki i pomiarów. W urządzeniach energoelektronicznych ważną funkcję pełni także system chłodzenia.

Projekt przekształtnika dużej mocy jest zadaniem kompleksowym (Barlik i Nowak, 1998; Mysiak, 2010). Konieczne jest uwzględnienie wszystkich wymagań i założeń odnośnie odbiornika, zasilania, warunków pracy samego urządzenia, ew. możliwości realizacji sterowania (PN-IEC 146-1-1; PN-IEC 146-1-2; PN-EN 61204). W szczególności należy zwrócić uwagę na:

- cechy nowości i spodziewane efekty (korzyści w stosunku do stanu obecnego, rozpoznanie tego stanu);
- podstawowe charakterystyki statyczne, dynamiczne (informacja od potencjalnego odbiorcy);
- warunki zasilania (sieć, baterie akumulatorów) i oddziaływanie na sieć w zakresie EMC;
- bezpieczeństwo i komfort pracy;
- warunki konserwacji i klimatyzacji (zakres temperatury pracy, wilgotność, wysokość n.p.m);
- niezawodność (wymagania aplikacji) (Mysiak, 2010; Mysiak i inni, 2016).

Istota projektowania sprowadza się do analizy założeń, wymagań, rozwiązań możliwych i opłacalnych w realnym stanie techniki. Poszukuje się optimum wg kryterium: koszty, niezawodność oraz waga i gabaryty.

Podstawowe zadania do rozwiązania, można sformułować następująco:

- dobór elementów i zabezpieczeń;
- projekt układu sterowania i monitoringu;
- projekt konstrukcyjny z uwzględnieniem warunków cieplnych i kompatybilności elektromagnetycznej.

W projektowaniu znajdują zastosowanie następujące metody inżynierskie:

- obliczanie analityczne na podstawie ogólnych wzorów;

- symulacje (dające rozwiązanie szczegółowe bez uogólniania);
- badania laboratoryjne.

Kompleksową realizację projektu można podzielić na cztery fazy:

1. Formułowanie celu i założeń.
2. Projekt wstępny.
3. Projekt szczegółowy prototypu, budowa i badania.
4. Doskonalenie produktu w fazie serii prototypowej i w normalnej eksploatacji.

Kluczowym problemem rozwiązywanym w trakcie projektowania jest dobór elementów i zespołów w taki sposób, aby temperatura w poszczególnych zespołach nie przekraczała dopuszczalnej, wynikającej z właściwości fizycznych materiałów, z których są zbudowane (Wasiluk i inni, 2007; Barlik i Nowak, 1998).

Przepisy i zalecenia dotyczące budowy urządzeń energoelektronicznych, zwłaszcza w zakresie ochrony przeciwporażeniowej, koordynacji izolacji i stopnia ochrony obudów, wynikają z ogólnych norm odnoszących się do większości urządzeń elektrycznych (PN-IEC 60364-5-51; PN-IEC 60364-5-53; PN-IEC 664-1). Każde urządzenie elektryczne musi być tak wykonane i zainstalowane, aby podczas eksploatacji zarówno w stanie normalnej pracy, jak i w stanach awaryjnych na dostępnych dla obsługi elementach i częściach tego urządzenia nie wystąpiło napięcie, które mogłoby stanowić jakiegokolwiek zagrożenie porażeniowe. W przypadku urządzeń energoelektronicznych dotyczy to obudowy przekształtnika (konstrukcji szafy) i układu obciążenia zasilanego z tego urządzenia. Za niebezpieczne są uznawane napięcia przemienne o wartościach skutecznych wyższych niż 25 V i napięcia stałe przekraczające 60 V.

Zgodnie z ogólnymi zasadami ochrony od porażen w urządzeniach energoelektronicznych stosuje się ochronę podstawową, ochronę przy uszkodzeniu oraz ochronę równoczesną, czyli środek ochrony wzmocnionej (PN-IEC 60364-5-51; PN-IEC 664-1) Do szczególnych wymagań odnoszących się do urządzeń energoelektronicznych należy zaliczyć konieczność umieszczenia części przewodzących prąd w obudowie o stopniu ochrony nie niższym niż IP20. Drzwi obudowy powinny być zamykane na klucz i wyposażone w wyłączniki wyłączające przekształtnik z sieci po ich otwarciu.

Środki ochrony pośredniej (dodatkowej) muszą spełniać swoje zadanie w razie uszkodzenia izolacji roboczej i w razie pojawienia się napięcia na osłonach urządzenia. Ich działanie polega albo na szybkim samoczynnym wyłączeniu urządzenia, albo na obniżeniu napięcia dotykowego na dostępnych przewodzących częściach urządzenia

do wartości niestwarzającej zagrożenia porażeniowego. Obowiązująca norma (PN-IEC 60364-5-51), jako zasadniczy środek ochrony dodatkowej zaleca szybkie wyłączenie napięcia dotyku, zastępujące dotychczas stosowane zerowanie i uziemienie.

Spełnienie wymogu ochrony przed tzw. dotykiem pośrednim w odniesieniu do urządzeń energoelektronicznych, jest związane ze stosowaniem wyłączników przeciwporażeniowych, różnicowo-prądowych, miejscowych połączeń wyrównawczych i dodatkowej izolacji uzupełniającej izolację roboczą. Obudowy, których elementy są odseparowane podwójną izolacją galwaniczną od części przekształtnika przewodzących prąd nie wymagają stosowania dodatkowych środków ochrony od porażen.

Gwarantowane przez wytwórcę poprawne działanie urządzenia energoelektronicznego jest możliwe przy spełnieniu odpowiednich warunków. Dotyczą one przede wszystkim środowiska, w którym to urządzenie ma pracować, jakości linii zasilającej oraz poziomu zakłóceń elektromagnetycznych, oddziałujących na przekształtnik. Jednocześnie urządzenie energoelektroniczne nie powinno być uciążliwe w eksploatacji, a w szczególności nie powinno wpływać ujemnie na pracę innych urządzeń technicznych, przede wszystkim elektrycznych. Wzajemne dopasowanie urządzenia energoelektronicznego do warunków środowiskowych i technicznych jest nazywane kompatybilnością. Rozróżnia się przy tym kompatybilność środowiskową (techniczno-klimatyczną), kompatybilność z linią zasilającą i kompatybilność elektromagnetyczną. Prawidłowo zaprojektowane urządzenie, powinno spełniać wszystkie wymagania kompatybilnościowe w wymienionym zakresie (PN-IEC 146-1-1; PN-EN 61204; PN-IEC 60364-5-51).

3. PODSUMOWANIE

Jak w każdej dziedzinie techniki, również w rozwijającej się dynamicznie elektrotechnice, stosowanie różnego rodzaju norm warunkuje spełnienie wyżej wymienionych wymagań. Do końca marca 2011 r. normalizacją w obszarze elektryki, częściowo elektroniki i elektrotechniki zajmował się SEL, czyli Sektor Elektryki. Dnia 1 kwietnia 2011 r. po wyodrębnieniu z Sektora Elektryki (SEL) tematyki dotyczącej elektrotechniki został powołany Sektor Elektrotechniki (SET), który prowadzi 9 Komitetów Technicznych.

W ostatnich latach zostały wprowadzone w normalizacji polskiej bardzo poważne zmiany, polegające w szczególności na ścisłym powiązaniu normalizacji krajowej z normalizacją międzynarodową i europejską (Nartowski, 2004). Zmiany te są bezpośrednio związane z członkostwem Polski w Unii Europejskiej. Normalizacja jest szerokim działaniem

o skali światowej. Warunkuje ona rozwój gospodarczy i jest ściśle powiązana z postępowaniem technicznym i jego upowszechnianiem.

Znajomość parametrów i właściwości elementów tworzących przekształtnik oraz zasad działania układów przekształtnikowych w połączeniu z informacjami dotyczącymi funkcjonowania podzespołów i struktur sterowania oraz charakterystyk i właściwości obiektów zasilanych z przekształtników stanowi warunek konieczny dla prawidłowego zaprojektowania i konstrukcji określonego urządzenia energoelektronicznego, należytej jego eksploatacji i sprawnego usuwania uszkodzeń. W celu stworzenia w pełni sprawnego i dobrze skonstruowanego aparatu czy urządzenia, niezbędne jest uwzględnienie posiadanej wiedzy i umiejętności dotyczących technologii konstrukcji zarówno poszczególnych podzespołów, takich jak przekształtnik, układ sterowania lub obwody towarzyszące (zabezpieczenia, filtry), jak i przede wszystkim odpowiedniego połączenia tych podzespołów w całość, aby spełniły w rzeczywistych warunkach użytkowania dokładnie zaplanowaną funkcję.

LITERATURA

- Barlik, R. Nowak, M. (1998). *Poradnik inżyniera energoelektronika*, Warszawa: WNT.
- Javaid, U. Dujic, D. van der Merwe, W. (2015). *MVDC marine electrical distribution: Are we ready?*, *Industrial Electronics Society*, Referta wygłoszony na: IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE, Yokohama, Japan, DOI: 10.1109/IECON.2015.7392201, E-ISBN: 978-1-4799-1762-4, USB-ISBN: 978-1-4799-1761-7.
- Kouro S., Malinowski M., Gopakumar K., Pou J., Franquelo L. G., Wu B., Rodríguez J., Pérez M. A., Leon J. I. (2010). *Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters*, Referta wygłoszony na: IEEE Transactions on Industrial Electronics (Vol.: 57, Issue: 8, Aug. 2010) pp. 2553 – 2580, DOI: 10.1109/TIE.2010.2049719, ISSN: 0278-0046, E-ISSN: 1557-9948.
- Mysiak, P. (2010). *Wielopulsowe prostowniki diodowe z dławikami blokującymi wyższe harmoniczne prądu*, Gdynia: Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni.
- Mysiak, P. i inni. (2016). *Experimental Test Results of the 150kVA 18-Pulse Diode Rectifier with Series Active Power Filter*, Referat wygłoszony na: CPE-POWERENG'2016, 6th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 10th International Conference on Compatibility and Power Electronics, Bydgoszcz.
- Nartowski, Z. (2004). *Normalizacja w Elektryce*, Biuletyn Techniczny Oddziału Krakowskiego SEP, nr 24.
- PN-IEC 60364-5-53 *Aparatura łączeniowa i sterownicza*.
- PN-IEC 60364-5-51 *Dobór i montaż wyposażenia elektrycznego. Postanowienia ogólne*.
- PN-IEC 664-1 *Koordynacja izolacji w instalacjach niskiego napięcia z uwzględnieniem odstępów izolacyjnych powietrznych i powierzchniowych dla urządzeń*.

PN-IEC 146-1-1 *Przekształtniki półprzewodnikowe. Przekształtniki o komutacji sieciowej. Wymagania ogólne.*

PN-IEC 146-1-2 *Przekształtniki półprzewodnikowe z komutacją zewnętrzną. Ogólne wymagania i badania.*

PN-EN 61204 *Zespoły prostownikowe bezpieczne. Ogólne wymagania i badania.*

The guide of Marine Frequency Converters. Siemens AG, Automation and Drives. Large Drives. Marine Equipment. Postfach 4743. 90441 NÜRNBERG. FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY. www.siemens.com.

Wasiluk, W. i inni, 2007, *Poradnik inżyniera elektryka* T. 1, 2, WNT, Warszawa.