

*Nowa generacja obudów przyszłością wysokonapięciowych  
modułów IGBT.*

*HITACHI wprowadza „Next High Power Density Dual - nHPD<sup>2</sup>”*

Ciągłe doskonalenie elementów półprzewodnikowych mocy w celu poprawy sprawności układów, przy jednoczesnej potrzebie stabilizacji sytuacji rynkowej, to wyzwanie nowoczesnego świata energoelektroniki. Projektanci systemów oraz producenci elementów półprzewodnikowych nieustraszenie rzucają wyzwanie prawom fizyki, aby poprawić sprawność przekształtników mocy. Ośrodki badawczo rozwojowe na całym świecie pracują codziennie, aby wprowadzić na rynek innowacyjne rozwiązania. Innowacyjne podejście jest także niezbędne w kwestii obudów modułów HV. Potrzeba globalnej standaryzacji oraz chęć osiągania wyższych sprawności zmotywowały Hitachi Ltd do przedstawienia rewolucyjnej obudowy Next High Power Density Dual - nHPD<sup>2</sup>. Hitachi udostępniła nową koncepcję jako open source.

Hitachi Europe Ltd.

Tłumaczenie: Markel Sp. z o.o.

## **Wstęp**

HITACHI od wielu lat wnosi wkład w rozwój przemysłu przekształcania energii elektrycznej poprzez ciągłe doskonalenie wysokonapięciowych modułów IGBT. Przy istniejącej technologii obudów IHM seria modułów F Hitachi oparta o nową generację struktury krzemowej przyniosła poprawę sprawności nawet do 20%, ale wynik ten można jeszcze poprawić. nHPD<sup>2</sup> od HITACHI jest wprowadzany na rynek jako dostępny dla wszystkich, nielicencjonowany standard obudów dla wysokonapięciowych modułów IGBT.

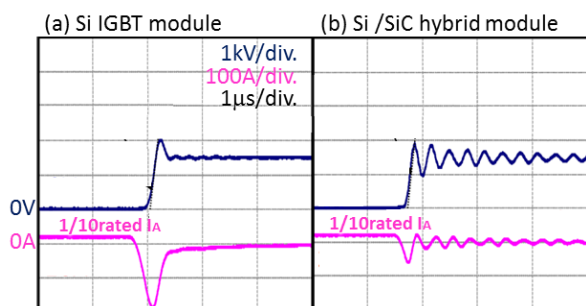


Nacisk rynku przekształtników mocy jest obecnie odczuwalny w całym łańcuchu dostaw półprzewodników.

Rynek wymaga zaspokojenia potrzeb zgodnych z prawem Moore'a, które można określić jednym słowem – więcej. Więcej efektywności. Więcej konkurencyjności. Więcej kompaktowych rozwiązań. Potrzeby te, dzięki bliskim relacjom z klientami oraz pracy zespołowej, zawsze mogą być zaspokojone.

Pierwszym bardzo ważnym krokiem w procesie poprawy parametrów półprzewodników są badania nad udoskonalaniem struktur krzemowych. Jest to temat wielu ogólnoświatowych konferencji potwierdzających postępy w tym temacie. Nowe technologie związane z szerokością pasma zabronionego (WBG), takie jak węgiel krzemu (SiC), czy azotek galu (GaN) są gorącymi tematami już od kilku lat. Światowi producenci, w tym także Hitachi, ciągle inwestują w badania oraz zapowiadają nowe produkty oparte o technologię WBG. Ale zawsze jest jakieś "ale". Podstawowe zalety tych technologii, zwłaszcza WBG, są zwykle przedstawiane na poziomie struktury. Jak przenieść korzyści z zastosowania nowych materiałów półprzewodnikowych na poziom urządzenia? Oscylacje, przebiecia [Rysunek 1

(b)]; szpilki napięciowe; wysokie  $dv/dt$ ; interferencja elektromagnetyczna. Wszystkie te zjawiska fizyczne powodują, że całkowite spodziewane zyski w normalnych warunkach pracy i przy danych założeniach projektowych zaczynają słabnąć. Np. w przypadku napędu trakcyjnego maksymalna wartość  $dv/dt$  izolacji uzwojenia silnika wynosi 4-6kV/ $\mu$ s. Z tego powodu przełączanie elementów półprzewodnikowych nowej generacji, które może osiągnąć poziom 10kV/ $\mu$ s musi być kontrolowane (spowalnianie wyłączania oraz załączania tranzystorów). Prowadzi to jednak do powiększenia strat mocy. Dla zobrazowania potencjalnego wzrostu  $dv/dt$  podczas odzyskiwania zdolności zaporowych diody SiC na rysunku 1 zostały porównane przebiegi diod silikonowej oraz SiC o napięciu 3.3kV w standardowej obudowie 130mm x 140mm IHM. Bez wątpliwości można stwierdzić wzrost  $dv/dt$  z 30kv/us do 40kv/us przy zastosowaniu diody SiC.



[Rysunek 1 – Porównanie przebiegów przy odzyskiwaniu zdolności zaporowych diod Si oraz SiC w obudowie IHM  $L\sigma=400nH$ ,  $T_j=25^\circ C$ . K. Ogawa, et al. "Traction inverter that applied SiC Hybrid module", PCIM 2011]

nHPD2 to swoista tabula rasa w kwestii obudów HV-IGBT. Pierwszy projekt został przygotowany przez HITACHI na początku 2013 roku. Głównym celem tego projektu było rozwiązanie problemów wykorzystania zalet nowych generacji struktur nie tylko w przypadku krzemu (Si), ale przede wszystkim materiałów takich jak SiC. Nowa obudowa powinna przynosić korzyści zarówno producentom działającym w strefie BWG jak i tym, którzy

produkują w oparciu o struktury krzemowe.

Koncepcja nowej generacji obudowy powinna spełniać założenia gęstości mocy oferowane dotychczas przez IHM i jednocześnie przynosić korzyści pod względem wydajności niezależnie od technologii struktury. Dodatkowo, założenie udostępnienia projektu jako open source, przyczynia się do standaryzacji dla wszystkich producentów półprzewodników oraz zwiększeniu konkurencyjności. Podejście open source było warunkiem koniecznym, aby w krótkim czasie udostępnić nową technologię szerokiemu spektrum klientów oraz przyspieszyć dalszy rozwój produktu. W takiej sytuacji konsumenci i producenci dążą do wspólnego celu, jakim jest wprowadzenie nowego standardu obudowy. Standardu, który chcą stosować, ponieważ spełnia ich oczekiwania i przynosi korzyści zarówno techniczne, jak i ekonomiczne. Głównym założeniem podejścia open source było uniknięcie monopolizacji rynku w początkowym etapie istnienia produktu.

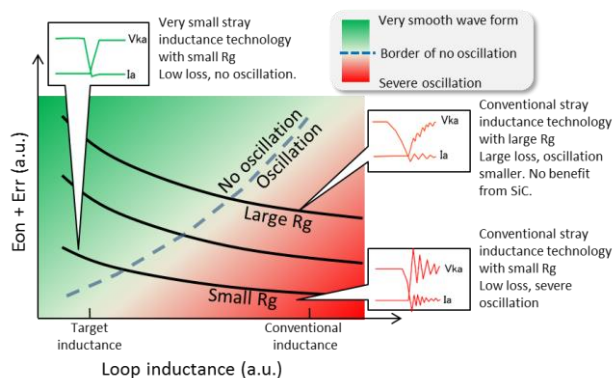
### Osiągnięcie indukcyjności wewnętrznej mniejszej niż 10nH

Kluczowe znaczenie dla elementów półprzewodnikowych takich jak SiC ma niska wartość indukcyjności. Ulepszanie współczesnych technologii obudów IHM poprzez dokładne symulacje oraz prace nad rozkładem wewnętrznym są bardzo ważne w całym procesie udoskonalania elementów półprzewodnikowych.

Konstruktorzy przetwornic energoelektronicznych podczas procesu projektowania ciągle stają przed problemem kompromisu. Jednym z głównych problemów na poziomie komponentów półprzewodnikowych jest dobór wartości rezystora bramkowego ( $R_g$ ) względem indukcyjności obwodu.

Rysunek 2 pokazuje wpływ wartości rezystora bramkowego na straty przy załączaniu tranzystora IGBT oraz straty diody przy odzyskiwaniu zdolności zaporowych. Przy niskiej wartości  $R_g$  obliczona

sprawność jest najwyższa. Przy standardowym module IHM oscylacje mogą być zmniejszone jedynie przez podniesienie wartości rezystora  $R_g$ , co jednak spowoduje powiększenie strat łączeniowych. Zastosowanie obudowy  $n\text{HPD}^2$  z jej naturalnie niższą indukcyjnością wewnętrzną pozwala konstruktorom założyć niższe wartości  $R_g$  unikając oscylacji przy jednoczesnym zachowaniu niskiego poziomu strat łączeniowych. Ważną kwestią jest, aby unikać prostego porównywania wartości katalogowych indukcyjności rozproszonych bez uwzględnienia ostatecznych wartości oscylacji. Wartości  $R_g$  dla modułów IHM muszą być utrzymywane na wyższym poziomie aby sprostać wymaganiom stawianym w regulacjach EMI.



[Rysunek 2 – Kompromis wartości  $R_g$  oraz pętli indukcyjności]

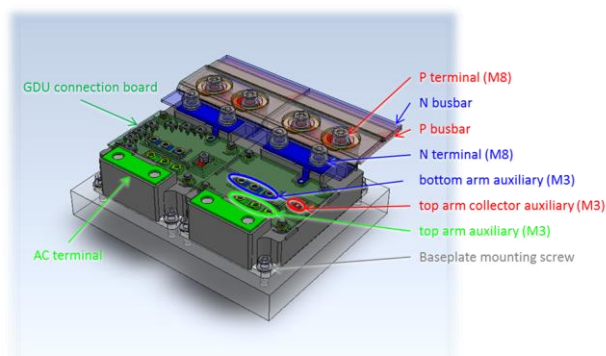
Zmniejszenie indukcyjności układu i zastosowanie zaawansowanych algorytmów sterowania może doprowadzić do wyeliminowania oscylacji ale ma to wpływ na koszty systemu oraz powoduje zwiększenie strat układu sterowania negując wcześniejsze korzyści. Biorąc pod uwagę charakterystyki przełączania SiC z zerowymi stratami odzyskiwania zdolności zaporowych, oscylacje stają się jeszcze większym zagrożeniem. Ważne jest, aby pamiętać o całkowitych stratach systemu a nie koncentrować się na korzyściach punktowych, takich jak na przykład niskie  $E_{on}$ . Wyższa wartość indukcyjności przy niskim  $R_g$  zmniejszy  $E_{on}$ , jednak poprzez zwiększone oscylacje łączne straty będą znacznie wyższe. Staranny dobór indukcyjności obudowy

oraz  $R_g$  daje lepszy bilans strat mocy całego układu, czyli wyższą sprawność.

### Rozkład wewnętrzny

Wyposażony w parę zacisków P i N na jednym z krótszych boków obudowy i terminal sieciowy po stronie przeciwnej  $n\text{HPD}^2$  zapewnia wiele zalet konstrukcyjnych i wygodę obsługi.

Dzięki oddzieleniu linii DC i AC podłączenie komponentów i podzespołów systemu jest znacznie prostsze. Nowa obudowa oferuje użytkownikowi możliwość projektowania bardziej kompaktowych konstrukcji przekształtników oraz daje większe możliwości optymalizacji połączeń kondensatorów DC-link i obciążenia (rysunek 3).

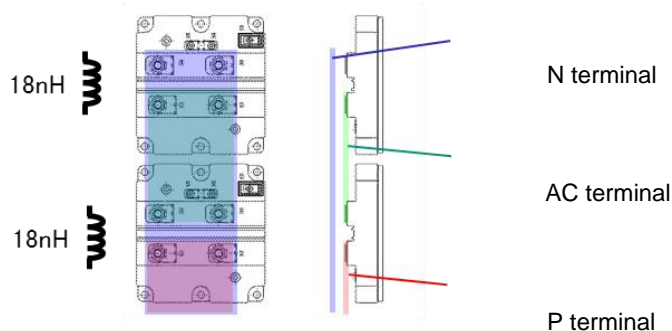


[Rysunek 3 – Realizacja układu jednofazowego z wykorzystaniem dwóch modułów  $n\text{HPD}^2$  LV450]

Koncepcja modułu podwójnego pozwala na redukcję gabarytów urządzenia do 75% na każdą fazę. Tradycyjnie koncepcja ta jest realizowana przez połączenie szeregowo modułów jak na rysunku 4.

Standaryzacja wymiarów obudowy zarówno dla modułów niskiego napięcia (LV) jak i wysokiego napięcia (HV) umożliwia standaryzację projektów technicznych związanych z mechaniką urządzenia. Takie podejście pozwala na redukcję kosztów początkowych projektu zwiększenie efektywności procesu produkcji i magazynowania. Łącząc szeroki zakres klas

napięciowych we wspólnej obudowie rozbudowa systemu może być sprowadzona do dołączania równolegle modułów w celu zwiększenia mocy wyjściowej. Ułatwione magazynowanie, montaż oraz serwis przynoszą jednoznaczne korzyści dla produktu i zwiększają jego konkurencyjność na rynku.



[Rysunek 4 – Realizacja gałęzi falownika z wykorzystaniem modułu MBN1000E33E2]

Porównanie indukcyjności zostało przedstawione na rysunku 5. Lewa strona tabeli dotyczy tradycyjnego formowania gałęzi przekształtnika poprzez użycie dwóch pojedynczych modułów IGBT w obudowie IHM (800A lub 1000A). W tym przypadku indukcyjności rozproszone wynoszą 18nH (10nH dla najnowszej serii F modułów Hitachi). W linii fazy natomiast całkowita indukcyjność wynosi 36nH. Po prawej stronie przedstawiono wyniki dla nHPD2 o indukcyjności rozproszonej modułu na poziomie 10nH. Rozwiązanie to posiada ekwiwalentną indukcyjność na poziomie zaledwie 5nH (10nH / 2). Jest to znacząca redukcja wartości o 75%. Dzięki optymalizacji topologii i podejściu modułowemu (łączenie równoległe) można osiągnąć zadawalające parametry prądowe przekształtnika.

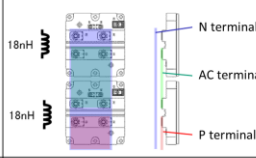
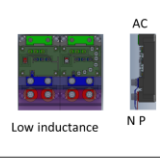
Dodatkowy wysiłek skoncentrowany na projektowaniu optymalnej struktury wewnętrznej modułu zapewnił zrównoważony rozptył prądów bez negatywnych skutków zmniejszenia znamionowych, bezpiecznych obszarów pracy dla górnych i dolnych tranzystorów, czy zmniejszonej odporności terminali na obciążenia

temperaturowe.

Skrajne pozycjonowanie terminali P i N oraz ich umiejscowienie względem AC zostało dokładnie przemyślane, aby zminimalizować indukcyjności rozproszenia, ograniczyć potencjalne negatywne skutki podłączenia systemu bus-bar oraz zachować zgodne z normami odległości i odstępy przy pozostawieniu rozsądnej powierzchni [6000mm<sup>2</sup>] na górnej powierzchni obudowy nHPD<sup>2</sup> dla bezpośredniego przymocowania sterownika bramkowego w czterech różnych, dedykowanych pozycjach.

Praca z nHPD<sup>2</sup> przy wykorzystaniu modularnej koncepcji urządzenia (LV lub HV) pozwala na połączenie równoległe do pięciu modułów bez ograniczeń wynikających z obawy przekroczenia wartości prądu maksymalnego dla któregośkolwiek modułu. Biorąc pod uwagę ultra-niskie indukcyjności rozproszenia nHPD<sup>2</sup> łatwo można dojść do wniosku, że zmniejszenie indukcyjności rozproszonej na poziomie całego systemu może osiągnąć nawet 60% w porównaniu do tradycyjnego podejścia przy obudowach IHM.

Bez tak intensywnych prac w celu poprawy całkowitej indukcyjności rozproszenia nHPD<sup>2</sup> zalety technologii WBG byłyby po prostu zmarnowane.

	1 in 1 (Current)	2 in 1 (This study)
1 phase		
Module inductance	18nH x 2 = 36nH [Two MBN800E33E or MBN1000E33E2] 10nH x 2 = 20nH [Two MBN1200F33F]	10nH / 2 = 5nH 2 parallel LV400 <b>Reduction of 75%.</b>
Total inductance	100nH min including capacitance 84nH min including capacitance	33nH <b>Reduction of 61%</b>

[Rysunek 5 –Indukcyjność gałęzi technologii IHM vs. nHPD<sup>2</sup>]

### Koncepcja modułowa. Skalowalność. Wygoda.

nHPD<sup>2</sup> został zaprojektowany z myślą o koncepcji modułowej - możliwości łączenia równoległego oraz

zastosowania jednej obudowy dla szerokiego zakresu napięć. Ta koncepcja pozwala na łatwe skalowanie urządzeń i przynosi znaczące ograniczenie kosztów bezpośrednich. Dodanie do oferty typoszeregu przekształtników tej samej serii wymaga obecnie zastosowania całego zakresu wysokonapięciowych modułów IGBT. Chociaż wewnętrzne elementy półprzewodnikowe modułów mogą być takie same, to ze względu na parametry prądowe będą podzielone na 3 typy obudów. Wysiłki konstruktorów i praca inżynierów związana z kwalifikacją modułów oraz idące za tym koszty są potrójne przy tradycyjnym podejściu. Objawia się to końcową ceną rodziny przekształtników i zmniejszeniem konkurencyjności. Dodatkowe koszty generują różnice w zastosowanej klasie napięciowej. Podwyższenie napięcia szczególnie z 1200V do  $\geq 1700V$  lub z 3300V do  $\geq 4500V$  sprowadza się do totalnie innej koncepcji obudowy.

W procesie projektowania nowej serii przekształtników kwalifikacja modułów IHM HV-IGBT wymaga zdobycia i przetestowania kilku elementów z każdego typu. Wymaga to czasu, pieniędzy i dużego wysiłku.

Zrozumienie niedogodności oraz problemów związanych z dużą ilością obudów dla różnych prądów i napięć skłoniło projektantów prac nad nHPD<sup>2</sup>. Skalowalność układów przy wykorzystaniu tej koncepcji to główna zaleta nowej obudowy. Zakres klas napięciowych od 1200V do 6500V został podzielony tylko na 2 typy obudów: LV (1200V-3300V) i HV (3300V-6500V), zgodnych z wymogami norm odległościowych w energoelektronice i trakcji elektrycznej.

Jeśli klient potrzebuje większego prądu wyjściowego dodaje kolejny moduł nHPD<sup>2</sup> łącząc go równolegle w istniejącym układzie.

Jeśli wymagana jest wyższa klasa napięciowa można zastosować ten sam radiator, co przynosi dodatkowe oszczędności. Może okazać się, że nowe urządzenie

będzie wymagało jedynie zwiększenia klasy napięciowej elementów.

### **Wysoka gęstość mocy**

Rozpatrzmy użyteczną moc modułów nHPD<sup>2</sup>, których gabaryty są mniejsze niż średniej wielkości IHM w obudowie 94mm x 140mm. Mimo małych rozmiarów obudowy w nHPD<sup>2</sup> nie została zmniejszona moc użytkowa. Jest to podwójny moduł o wysokiej gęstości mocy. Przy wykorzystaniu najnowszych struktur Hitachi serii F oraz uwzględniając niskie wartości indukcyjności rozproszonych użytkowa moc nHPD<sup>2</sup> jest w rzeczywistości większa o prawie 10% w porównaniu do tradycyjnych modułów IHM.

Rozważając pojedynczą gałąź falownika [Rysunek 5] oraz porównując równość (i) dla MBN1200F33F i (ii) dla LV450, możemy obliczyć oraz porównać całkowite gęstości mocy w odniesieniu do odpowiednich specyfikacji  $R_{th(j-a)}$  powyższych modułów:

$$(i) \quad 1200A \times 2 / (135 \times 285) = 0.0623A/mm^2$$

$$(ii) \quad 450A \times 2 \times 2 / (188 \times 140) = 0.0684A/mm^2$$

Z powyższego porównania wynika, iż nHPD<sup>2</sup> gwarantuje większą wydajność mocy w przekształtniku dwupoziomowym niż porównywalny moduł IHM.

### **Sterownik bramkowy**

Projekt sterownika bramkowego został przeprowadzony na drodze konsultacji. Zgodnie z informacjami zwrotnymi od zespołów projektowych naszych klientów odpowiedzialnych za budowanie własnych sterowników oraz producentów driverów doszliśmy do wniosku, że możliwe są różne poziomy integracji sterownika. Od prostej opartej o technologię MOS z prostymi zabezpieczeniami realizowanymi za pomocą elementów dyskretnych, aż po sterownik o wysokim stopniu integracji wykorzystujący dostępną przestrzeń

montażową na górnej części modułu.

Możliwość łączenia modułów równolegle, jeden przy drugim oraz niskie tolerancje wymiarów obudowy nHPD<sup>2</sup> zapewniają możliwość zastosowania pojedynczej GDU PCB. Jest to możliwe nawet przy układzie 5 zrównoległych modułów. Możliwość zamontowania drivera przy użyciu czterech stałych terminali zapewnia trwałe połączenie odporne na drgania i wibracje (zgodnie z IEC) niezależne od pozycji falownika w urządzeniu. Dodatkowe styki pomocnicze zwiększają maksymalną bezpieczną masę całkowitą zamontowanego układu sterowania do 250 gramów na moduł.

### **Wnioski**

nHPD<sup>2</sup> oferuje rynkowe rozwiązanie o wysokiej wydajności mocy zarówno dla standardowych struktur krzemowych jak i nowych technologii materiałowych WBG. Zastosowane zaawansowane techniki symulacyjne, jasne cele stawiane na poziomie systemu a nie elementu oraz jednoznacznie określona polityka open source przyczynią się do zwiększenia korzyści wprowadzenia nowej technologii.

Możliwość modułowego projektowania urządzeń, standaryzowane obudowy dla klas napięciowych 1200V-6500V, 75% niższe indukcyjności, do 10% większe gęstości mocy (w porównaniu do IHM) to główne zalety nHPD<sup>2</sup>. Nowa koncepcja obudowy pozwala na łatwe przeniesienie zalet z nowych technologii WBG na układy, w których wykorzystane były struktury Si bez konieczności zmiany całego projektu urządzenia.

Próbki nHPD<sup>2</sup> będą dostępne w Hitachi Europe Limited od listopada 2014. Serię początkową będą tworzyły 2 moduły: 900A 1700V (LV900), 450A 3300V (LV450). W późniejszym czasie pojawi się także 225A 6500V (HV225).

Inni producenci proszeni są o bezpośredni kontakt w sprawie dostępności nHPD<sup>2</sup>. nHPD<sup>2</sup> jest

nielicencjonowaną, darmową i ogólnie dostępną technologią HITACHI.

### **Kontakt:**

*MARKEL Sp. z o.o.*

*ul. Okulickiego 7/9 05-500 Piaseczno,*

*tel. 22 428 10 29, tel./fax. 22 716 76 81*

*email: [markel@markel.pl](mailto:markel@markel.pl)*