

# Finezja wielkich mocy

*Sterowanie dużymi prądami to zadanie niebanalne, wymagające od projektanta układu dużej wiedzy i doświadczenia. Każdy, nawet najmniejszy błąd może mieć poważne konsekwencje.*

Najnowsze urządzenia energoelektryczne, takie jak silniki czy falowniki wymagają coraz bardziej precyzyjnego sterowania dużymi prądami lub napięciami. Duża dokładność regulacji daje możliwość natychmiastowej reakcji na zaistniałe wydarzenia. Pozwala to urządzeniu na szybkie niwelowanie skutków nagłych zmian mechanicznych czy też elektrycznych występujących po stronie obciążenia. Ponadto, precyzyjna regulacja napięcia przemiennego i przesunięcia fazy pomiędzy prądem a napięciem, umożliwia zaawansowaną kontrolę urządzeń wykonawczych. Przykładem może być popularne ostatnio sterowanie wektorowe, które usprawnia korzystanie z silników prądu przemiennego, zmniejszając ich awaryjność, a nawet zużycie energii elektrycznej.

## Półprzewodniki sterujące

Elementami półprzewodnikowymi, które pozwalają na przełączanie dużych prądów są tyrystory. Mają niewielkie wymiary, są odporne na wstrząsy i charakteryzują się niewielkim spadkiem napięcia w trakcie przewodzenia. Mają też wady – gdy już przewodzą, nie da się ich wyłączyć poprzez zmniejszenie napięcia sterującego. Z tego względu nie nadają się do wielu zastosowań i w praktyce do swobodnego sterowania prądami o dużym natężeniu wykorzystuje się obecnie głównie dwa inne typy podzespołów półprzewodnikowych – tranzystory MOSFET i IGBT. Te pierwsze mają nieco dłuższą historię – opracowano je w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku, zastępując w wielu aplikacjach tranzystory bipolarne w obszarze dużych mocy. IGBT to połączenie obu tych technologii – od strony bramki można je sterować napięciowo, tak jak tranzystory MOSFET, a po stronie wyjściowej mają cechy typowe dla tranzystorów bipolarnych. IGBT charakteryzują się mniejszym spadkiem napięcia w trakcie przewodzenia oraz większym napięciem przebicia niż

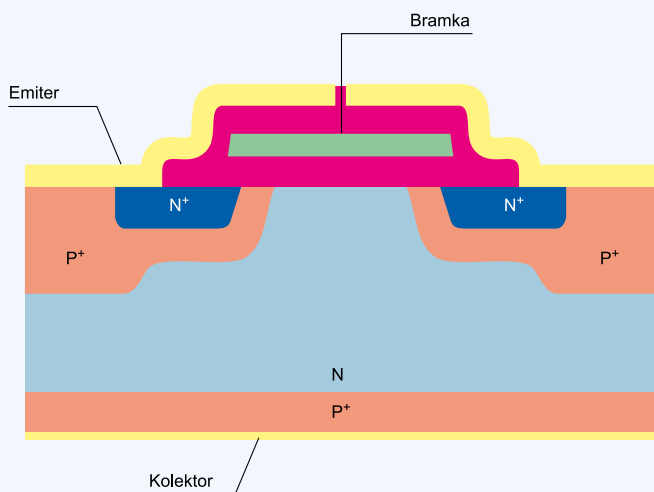
porównywalne tranzystory MOSFET. Właściwość ta wynika z ich budowy, która została opisana w ramce.

## IGBT czy MOSFET?

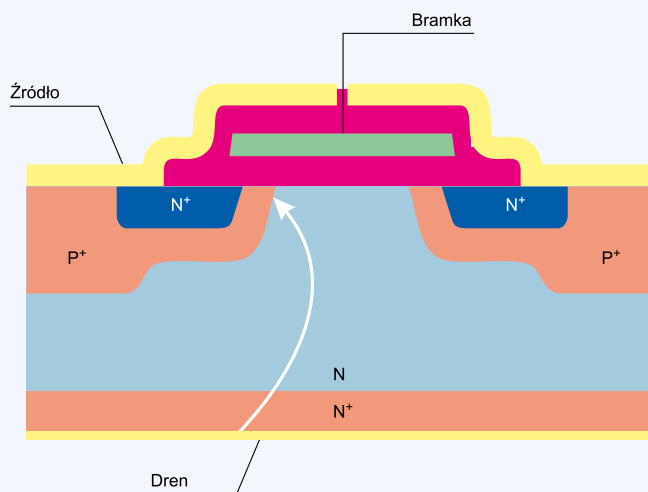
Starsze wersje tranzystorów IGBT były podatne na zatrząskiwanie się. Zjawisko to polega na utracie zdolności tranzystora do wyłączenia się za pomocą sygnału sterującego. Wynika ono z pojawienia się na tyle dużego prądu obciążenia, że przepływając przez strukturę zastępuje on ubytek prądu regulującego prąd kolektora, proporcjonalnego do napięcia na bramce IGBT. Gdy zaistnieje taka sytuacja zmniejszenie napięcia na bramce nie będzie powodowało zatkania tranzystora. Obecnie jednak dzięki postępowi technologicznemu zjawisko to w praktyce nie występuje. Problemem była też niegdyś reakcja na wzrost temperatury, która destabilizowała pracę tranzystora praktycznie uniemożliwiając równoległe łączenie elementów tego typu. Kwestia ta została rozwiązana poprzez zastosowanie technologii NPT (non-punch through), która polega na wykorzystaniu innej metody nakładania warstw półprzewodnikowych. W efekcie tych zmian tranzystory IGBT i MOSFET mają zbliżone parametry i cechują się tylko różnicami, które doświadczony projektant umie wykorzystać na swoją korzyść.

Oba typy elementów kieruje się do różnych obszarów zastosowań. W zależności od napięć występujących w danej aplikacji i częstotliwości przełączania prądów możliwe jest wskazanie preferowanej technologii elementu przełączającego. Generalnie, dla napięć powyżej 1 kV warto stosować tranzystory IGBT, które są bardziej odporne na przebicia i charakteryzują się niższymi stratami mocy przy dużych napięciach znamionowych. Poniżej 250 V dużo korzystniejsze jest użycie tranzystorów MOSFET. W zakresie napięć od 250 V do 1000 V wybór nie jest już taki oczywisty. Głównym kryterium powinna być wtedy częstotliwość, z jaką ma pracować dany układ. Dla częstotliwości, poniżej 20...30 kHz preferowane mogłyby być tranzystory IGBT, a dla częstotliwości powyżej 100 kHz – MOSFET. Pod uwagę powinien być także brany zakres i szybkość zmian obciążenia. Jeśli zmienia się ono w znaczący sposób, tj. często o ponad rząd wielkości, zaleca się zastosowanie tranzystorów MOSFET. Istotna jest również

Struktury obu elementów są do siebie dosyć podobne. Tranzystor IGBT jest zbudowany tak jak tranzystor n-MOS, z tym wyjątkiem, że zamiast obszaru drenu domieszkowanego n<sup>+</sup> wprowadzana jest warstwa p<sup>+</sup>, która służy jako kolektor powstającego w ten sposób tranzystora bipolarnego pnp. Tworzy się w ten sposób złączenie fragmentu tranzystora MOSFET i bipolarnego.



Rysunek 1. Przekrój przez strukturę tranzystora n-MOS



Rysunek 2. Przekrój przez strukturę tranzystora IGBT

moc rozpraszana przez tranzystor oraz dopuszczalna temperatura złącza. Gdy temperatura ta może przekraczać 100°C, warto zastosować tranzystory IGBT.

W związku z powyższym, typowe zastosowania układów IGBT to sterowanie silnikami, które wymaga krótkich impulsów prądowych przy niedużej częstotliwości, systemy zasilania bezprzewodowego, ze względu na małą zmienność obciążenia oraz spawanie. Tranzystory MOSFET są natomiast idealne do zasilaczy impulsowych pracujących na dużych częstotliwościach oraz w aplikacjach ładowania baterii. Pozostaje jednak obszar zastosowań, w którym napięcie na elemencie przełączającym jest wyższe niż 250 V ale nie przekracza 1 kV, a częstotliwość kluczowania mieści się w granicach od 30 do 100 kHz. W takich warunkach jednoznaczny wybór optymalnej technologii nie jest możliwy i konieczne jest rozważenie wszystkich pozostałych aspektów danej aplikacji.

### Tranzystory do zadań specjalnych

Specyfika zadań stawianych przed elementami przełączającymi wysokiej mocy pozwala skorzystać z nietypowych komponentów, wykonywanych w oparciu o innowacyjne technologie. Przykładem jednej z nich stosowanie węgla krzemu jako materiału podłożowego. Wykonane w ten sposób elementy charakteryzują się wyższym napięciem znamionowym niż typowe układy krzemowe i mogą pracować w wyższej temperaturze.

Na rynku pojawiają się także specjalne wersje tranzystorów mocy – MOSFETów oraz IGBT, przy czym postęp technologiczny w tych drugich jest obecnie szybszy. Powstają specjalizowane konstrukcje IGBT, które charakteryzują się wyjątkowo dobrymi parametrami z punktu widzenia konkretnych aplikacji. Przykładem mogą być bardzo szybkie tranzystory IGBT, które nadają się do kluczowania z częstotliwością rzędu 50...60 kHz, a w rezonansie nawet do 100 kHz. Szybkość ta jest osiągnięta kosztem pozostałych parametrów, ale pozwala na stopniowe wypieranie tranzystorów MOSFET z takich obszarów zastosowań, jak np. wirówki. Większość obecnie produkowanych struktur IGBT dużej mocy określa się mianem układów piątej generacji. Są one wytwarzane tylko przez kilka firm na świecie, takich jak np. Mitsubishi Electric i Infineon, a wykorzystywane przez wiele innych koncernów do budowy kompletnych tranzystorów i modułów tranzystorowych w obudowach. Najnowsze z modułów zawierają coraz więcej dodatkowych podukładów. Dostępne są np. takie, które mają dodatkowe wyjście napięciowe o wartości proporcjonalnej do przewodzonego prądu. Istnieją również tranzystory scalone z kompletnym układem sterującym bramką, wraz z obwodami zabezpieczającymi przed przeciążeniem albo z mostkiem prostowniczym (tzw. moduły PIM) oraz pojedynczym tranzystorem. Pozwalają one np. w jednej obudowie zmieścić cały konwerter napięć wraz z układem korekcji współczynnika mocy lub wyprodukować jednolity falownik trójfazowy.

Popularność modułów, szczególnie tych elektroizolowanych, stale rośnie, co wynika to z faktu, że są one bardzo wygodne w użyciu. Coraz większa liczba klientów poszukuje elementów połączonych w układy w postaci zwartych modułów zawierających po kilka pojedynczych tranzystorów. Najczęściej zawierają one od jednej do trzech par połączonych tak, aby tworzyły razem stopień przełączający. Dostępne są także wykonania, w których tranzystory połączone są w układzie półmostkowym lub pełnomostkowym w wersjach jedno lub trójfazowych. Rozwiązania te mogą być wykorzystane do praktycznie dowolnych aplikacji, w których dokonuje się konwersji mocy, a fakt, że stanowią one jednolitą całość, która nie wymaga łączenia ani montażu jest atrakcyjnym czynnikiem zachęcającym do ich zakupu.

### Chłodzenie półprzewodników mocy

Stosowanie modułów elektroizolowanych ma jeszcze jedną ważną zaletę. Pozwala na wykorzystanie dowolnych systemów chłodzenia bez obawy o izolację elektrod od radiatora. Coraz większa integracja

tranzystorów i postępująca miniaturyzacja pociąga za sobą konieczność zwiększenia skuteczności chłodzenia podzespołów mocy. Okazuje się, że chłodzenie powietrzem, nawet zimnym, o dużym przepływie wymuszonym nie jest już wystarczające, a koszty najnowszych instalacji tego typu są bardzo duże ze względu na ogromną ilość metalu zużywanego na radiatory. Z tego względu w energoelektronice wysokich mocy coraz częściej stosuje się instalacje chłodzenia wodnego. Pomimo obaw, ich popularność rośnie, gdyż w obecnie stanowią jedyne rozwiązanie problemu odbierania nadmiaru ciepła. Korzyści płynące z zastosowania tego typu rozwiązania wynikają z faktu, że rozmiar klasycznego radiatora jest wielokrotnie większy niż bloku wodnego, jaki wystarczy do schłodzenia tego samego modułu elektroizolowanego. Co prawda instalacja wodna wymaga dodatkowo chłodziarki (tzw. *chillera*), pomp i rur, ale w przypadku chłodzenia kilku elementów za pomocą jednego zamkniętego obiegu wodnego koszty dodatkowych urządzeń szybko się zwracają, a rozmiar całego systemu elektrycznego znacznie maleje.

### Podsumowanie

Nowoczesne energoelektroniczne przyrządy półprzewodnikowe pozwalają na pracę z coraz wyższymi napięciami, większymi prądami oraz umożliwiają szybszą reakcję na sygnały sterujące. Ich koszt raczej nie spada, ale technologie powiązane z półprzewodnikami, takie jak instalacje chłodzenia oraz budowa zintegrowanych konstrukcji modułowych pozwala zmniejszyć sumaryczną cenę nowoczesnych instalacji wielkiej mocy.

Marcin Karbowniczek, EP

