

Maciej KOZAK\*, Radosław GORDON\*

## **EKSPERYMENTALNE BADANIA ZJAWISKA EMISJI AKUSTYCZNEJ W MONOLITYCZNYCH TRANZYSTORACH**

Przedmiotem wielu badań prowadzonych w energoelektronice są metody diagnostyczne określające stan sprawność pracujących elementów półprzewodnikowych.

Jak każdy materiał stały półprzewodniki wytwarzają fale sprężyste w przypadku zmiany stanu z przewodzenia na blokowanie i odwrotnie. Na podstawie obserwacji można zaobserwować korelację pomiędzy przełączeniami pojedynczego tranzystora IGBT a emisją sygnału akustycznego. Zapisu emisji akustycznej dokonano za pomocą szerokopasmowego czujnika EA. Sygnał został przetworzony za pomocą karty wejściowej AD ze wzmacniaczem i zarejestrowany na komputerze PC. Zebrane dane zostały wyeksportowane do pliku, co umożliwiło dalsze przetwarzanie otrzymanych danych. Celem badania było określenie tła sygnału emisji akustycznej pochodzącej od sprawnego, przełączającego tranzystora IGBT i przygotowanie wzoru odpowiedzi w dziedzinie częstotliwości. Wyniki analizy zostaną wykorzystane jako punkt odniesienia dla dalszych badań wczesnych stadiów uszkodzenia pracujących elementów półprzewodnikowych.

SŁOWA KLUCZOWE: IGBT Modules, IGBT Transistor, Acoustic Emission.

### **1. WSTĘP**

#### **1.1. Cel i obiekt badań**

Podstawowym warunkiem stawianym współczesnym układom energoelektronicznym i elektronicznym pracującym w systemach wymagających niezawodności jest możliwość wczesnego wykrywania uszkodzeń. Uzależnienie funkcjonowania dużej części społeczeństw od urządzeń elektrycznych powoduje iż ich awarie są, w najlepszym wypadku, uciążliwą niedogodnością ale w przypadku urządzeń istotnych dla ciągłości zasilania mogą być groźne. Poza dbałością o jakość urządzeń oraz ich konserwację, ważnym czynnikiem jest ich diagnostyka i jak najwcześniejsze wykrywanie uszkodzonych modułów i części.

---

\* Akademia Morska w Szczecinie

Idealnym przypadkiem byłoby przewidywanie awarii danego urządzenia z zapasem czasu wystarczającym na podjęcie działań zaradczych.

Z tego powodu w Akademii Morskiej w Szczecinie podjęto badania nad stworzeniem systemu diagnostycznego urządzeń energoelektronicznych, opartego na czujnikach emisji akustycznej. Jako pierwszy obiekt badań wybrano tranzystory monolityczne IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor – Tranzystor bipolarny z izolowaną bramką)[1].

## **1.2. Zastosowania tranzystorów IGBT**

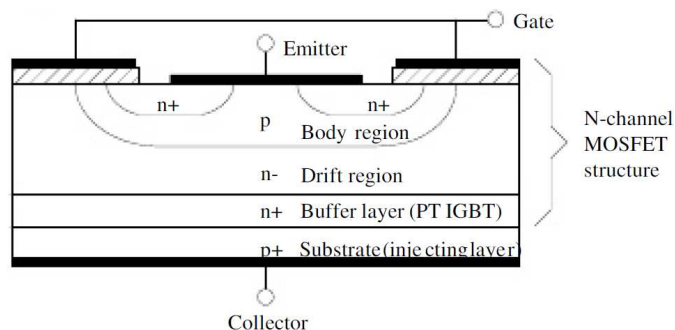
Tranzystory IGBT pracują w układach przełączających i charakteryzują się dużymi napięciami i prądami przełączania, a co za tym idzie moce na nich wydzielane są znaczne. W niektórych sytuacjach jest to przydatne i ułatwia badania tych układów. Sensory pomiarowe nie muszą charakteryzować się dużą czułością, a zjawiska zachodzące w tego typu półprzewodnikowych przyrządach mocy w stosunku do mniejszych elementów (diody, tranzystory średnich mocy) są łatwiejsze do zarejestrowania. Dzięki pracy w dwustanowych układach przełączających, istotne do pomiaru i badań są dwa stany pracy tranzystora IGBT: włączony i wyłączony podczas gdy inne są niepożądane.

Tranzystory IGBT są najczęściej stosowane w falownikowych układach napędowych np. do sterowania prędkościami silników klatkowych [2] ale też w systemach falowników sieciowych [4]. Powszechność zastosowań oraz badania prowadzone na świecie [3] w kontekście stosowania tranzystorów bipolarnych pokazują ważność poruszanego zagadnienia.

## **1.3. Budowa tranzystora IGBT**

Idea budowy tranzystora IGBT powstała przez potrzebę ograniczenia prądu przełączania w tranzystorach BJT (Bipolar Junction Transistor) i skrótowo, jest połączeniem tranzystora BJT i tranzystora MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor) w jednej strukturze. Tranzystor IGBT posiada zalety niskiego napięcia przełączania (MOSFET) i przewodzenia dużych prądów i napięć (BJT) [1]. W strukturze IGBT oba te tranzystory są wyraźnie do wyodrębnienia, co przedstawiono na rysunku 1.

Modułowa budowa tranzystora IGBT powoduje powstawanie dodatkowych pojemności i indukcyjności pasożytniczych, które w czasie ładowania odpowiadają za kształt fali akustycznej [5]. Kolejnym czynnikiem generującym falę akustyczną są zmiany temperaturowe wewnątrz struktury krzemowej wywołane znacznym prądem płynącym przez złącza oraz połączenia doprowadzające [6].

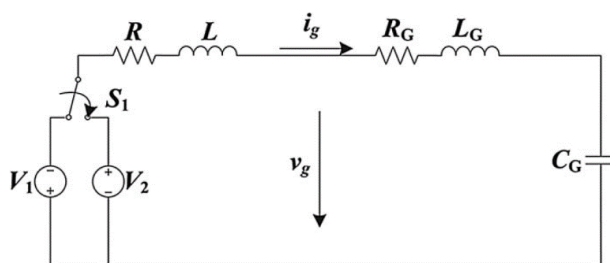


Rys. 1. Przekrój tranzystora IGBT o kanale typu N [1]

Na uproszczonym schemacie bramki tranzystora IGBT, zaznaczono impedancje wejściowe. Mogą one mieć znaczny wpływ na kształt emitowanej przez tranzystor fali akustycznej. Aby wyznaczyć wpływ parametrów pasożytniczych na wartość prądu bramki i przełączania trzeba rozwiązać równanie różniczkowe drugiego rzędu

$$LC \frac{d^2 i_g(t)}{dt^2} + RC \frac{di_g(t)}{dt} + di_g(t) = 0 \quad (1)$$

gdzie  $L$  i  $R$  – sumaryczna indukcyjność i rezystancja bramki,  $C$  – suma pojemności bramki,  $i_g(t)$  prąd bramki [7].



Rys. 2. Uproszczony schemat zastępczy bramki tranzystora IGBT [7]

gdzie:

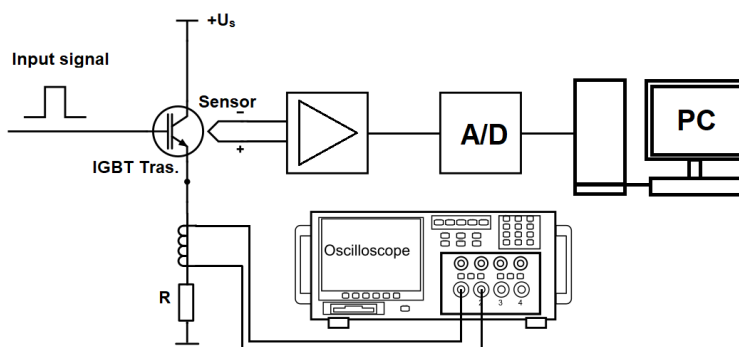
- $C_G$  – oznacza pojemność pasożytniczą bramki,
- $R_G$  – oznacza rezystancję wewnętrzną wyprowadzeń,
- $L_G$  – indukcyjność wewnętrzną wyprowadzeń,
- $R$  – rezystancja zewnętrzna min. wyprowadzeń,
- $L$  – całkowitą indukcyjność wyprowadzeń.

Zmiany prądu bramki  $i_g(t)$  odpowiadają impulsom wyzwalającym falę mechaniczną. Dane potrzebne do obliczeń można uzyskać od producenta tranzystora lub w nocie katalogowej

## 2. UKŁAD POMIAROWY

Elementem badanym eksperymentalnie był tranzystor IRG4BC40S firmy International Rectifier. Jest to tranzystor czwartej generacji IGBT o szerokim zakresie napięć przełączających i prądzie przewodzenia do 200 A w impulsie. W obudowie jest tylko tranzystor IGBT, bez diody zwrotnej oraz innych dodatkowych modułów zabezpieczających. Struktura półprzewodnikowa tranzystora zamknięta jest w obudowie typu TO-220AB [8].

Przy pomocy cieczy sprzęgającej [9], do obudowy badanego tranzystora, przyklejono czujnik emisji akustycznej firmy WS Alfa firmy Physical Acoustics. Przed wykonaniem badań eksperymentalnych przeprowadzono kalibrację układu zgodnie z zaleceniami producenta [10].



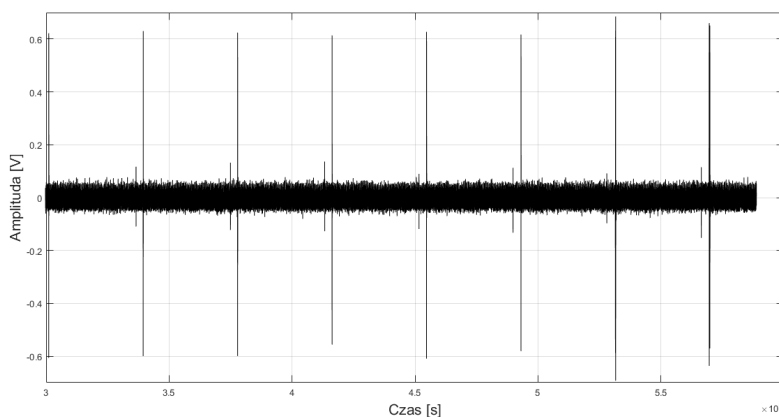
Rys. 3. Schemat układu pomiarowego do badania zjawisk emisji akustycznej w tranzystorze IGBT

Do wzmocnienia sygnału posłużył wzmacniacz szeroko pasmowy, którego wyjście zostało połączone z dwudziestoczerobitowym przetwornikiem analogowo-cyfrowym. Przetwornik został podłączony za pomocą złącza USB do komputera PC. Do zapisu i wstępnej obróbki został wybrany program Audacity. Program ten ma szerokie możliwości zapisu oraz wstępnej obróbki sygnału. W tym przypadku został on użyty jako moduł konwertujący zarejestrowany sygnał do pliku typu WAV (Wave form Audio format), popularnego formatu zapisu dźwięku. Wyeksportowany w postaci WAV plik następnie został poddany obróbce w programie Matlab. Przełączanie tranzystora uzyskano poprzez sterowanie sygnałem z generatora JC5603P oddzielonego przez przełącznik i separator optyczny. W czasie procesu badania do bramki było podane napięcie bliskie 0 V w stanie niskim oraz 10 V przy przejściu w stan wysoki. Kolektor badanego tranzystora został obciążony opornikiem dużej mocy, a prąd płynący kolejno przez układ zasilania, tranzystor i rezystor do masy był mierzony za pomocą oscyloskopowej sondy cęgowej podłączonej do oscyloskopu GwInstek GDS-2074.

### 3. POMIARY I WYNIKI

Możliwość zaobserwowania zjawiska emisji akustycznej w modułach z tranzystorami dowiedziono we wcześniejszych publikacjach [11, 2]. Ponieważ dotychczasowe pomiary i ich rejestracja w Akademii Morskiej odbywały tylko za pomocą oscyloskopu, dalsza obróbka była utrudniona. Jednak sama obserwacja sygnału wyjściowego i niewielka ingerencja w sygnał z czujnika dała badającym wiedzę jak wygląda on bez strat i zniekształceń bądź filtrów, które zostały zastosowane w obecnym układzie pomiarowym. Sygnały zarejestrowane po przetworzeniu i bezpośrednio na oscyloskopie różniły się od siebie. Głównym powodem był brak odpowiedniego wzmocnienia źródłowego sygnału (zastosowany w tym badaniu wzmacniacz jest zintegrowany z przetwornikiem analogowo-cyfrowym i nie mógł być podłączony do oscyloskopu). Pomiary polegały na zapisie około 15 sekundowej próbki z pracującego tranzystora.

Na kolektor tranzystora było podawane napięcie ( $U_s$ ) z przedziału 5 do 20 V co wymuszało na złączu kolektor emiter oraz na rezystancji prąd o wartościach od 1,5 do 2,2 A. Następnie na generatorze następowała zmiana częstotliwości ( $f_s$ ) przełączania tranzystora od 1 Hz do 100 Hz prostokątnym sygnałem z generatora. Dla każdej wybranej wartości częstotliwości były powtarzane te same wartości napięć.

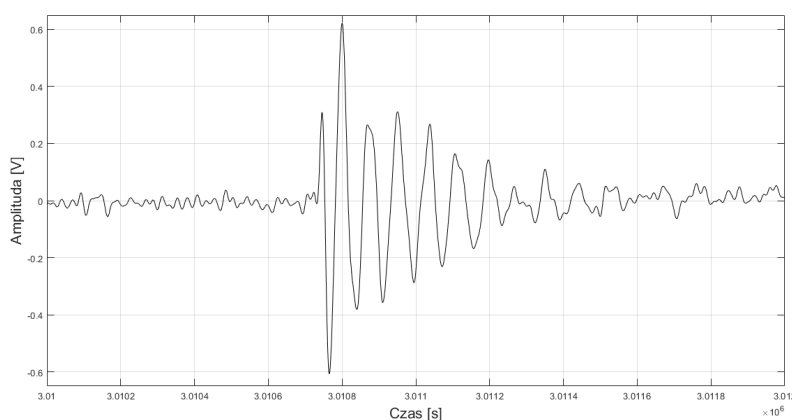


Rys. 4. Wygenerowany sygnał EA przedstawiony na wykresie w Matlabie

Kolejnym etapem było uzyskanie sygnału w dziedzinie czasu i zapis na komputerze. Sygnał z sensora został poddany wzmocnieniu a następnie zdigitalizowany. Pomiary zostały zarejestrowane do pliku za pomocą programu Audacity, który wygenerował odpowiednie pliki WAV.

Następnym krokiem było wczytanie pozyskanych pliku danych do Matlab'a w celu dalszej obróbki. Dzięki skrypcowi przetwarzanie plików udało się

w znacznym stopniu zautomatyzować. Rysunek 4 przedstawia wycinek ok 4 sekundowego zapisu przełączania tranzystora napięciem z generatora fali prostokątnej  $U_p=10\text{ V}$  o częstotliwości zmian  $f_s=1\text{ Hz}$ , układ zasilono  $20\text{ V}$  co wymusiło prąd o wartości  $2\text{ A}$  w momencie przewodzenia. Pomiar prądu obarczony był znacznym błędem, ponieważ był mierzony za pomocą sondy oscyloskopowej. Zaobserwowane co  $0,5$  sekundy impulsy, są w rzeczywistości falami emisji akustycznej powstałymi podczas zmiany stanu pracy tranzystora z zaporowego na przewodzenia i  $0,5$  sekundy później z przewodzenia na zaporowy.



Rys. 5. Pojedynczy obraz fali akustycznej w tranzystorze IGBT (opracowanie własne)

Dzięki obróbce w Matlabie zawężono zakres czasu i powiększono co pozwoliło na rejestrację momentu przełączenia tranzystora IGBT co przedstawiono na rysunku 5. Sinusoida gasnąca to efekt odbić impulsu od różnych ośrodków wewnątrz struktury tranzystora. Porównując ten wykres z innymi przypadkami emisji akustycznej krzywa otrzymana w dziedzinie czasu może być opisana jednym z równań przedstawiających falę emisji akustycznej.

Ponieważ sam sygnał w dziedzinie czasu niesie dla obserwatora mało informacji następnym krokiem było przetransformowanie sygnału do innej postaci. Najczęściej używanym przekształceniem jest przejście z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości. Tym przekształceniem może być przekształcenie oparte na transformacie Fouriera, tym przypadku FFT (Fast Fourier Transform) czyli szybkiej transformacie Fouriera (2).

Jest ona praktyczniejsza od DFT (Discrete Fourier Transform) gdyż wymaga mniej obliczeń, przez to jest implementowana w wielu urządzeniach pomiarowych jako prosty analizator widma częstotliwości. Widmo otrzymane z zapisanego, piętnastosekundowego pliku WAV przedstawiono na rysunku 6.

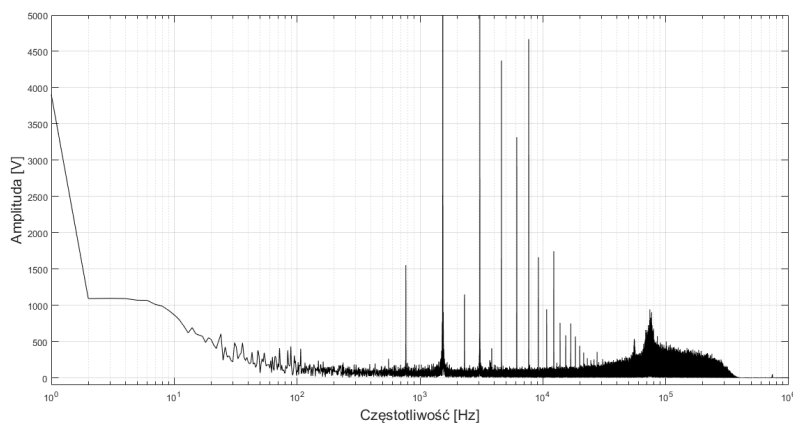
$$X_k = \sum_{n=1}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N} nk} \quad k = 0, \dots, N-1. \quad (2)$$

gdzie:

$X_k$  – dyskretna transformata Fouriera,

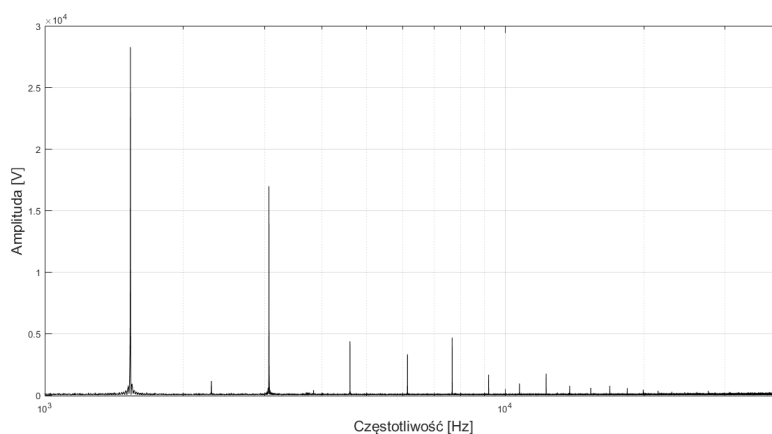
$N=2^k$  – długość spróbkowanego sygnału,

$k$  – to pewna liczba naturalna [12].

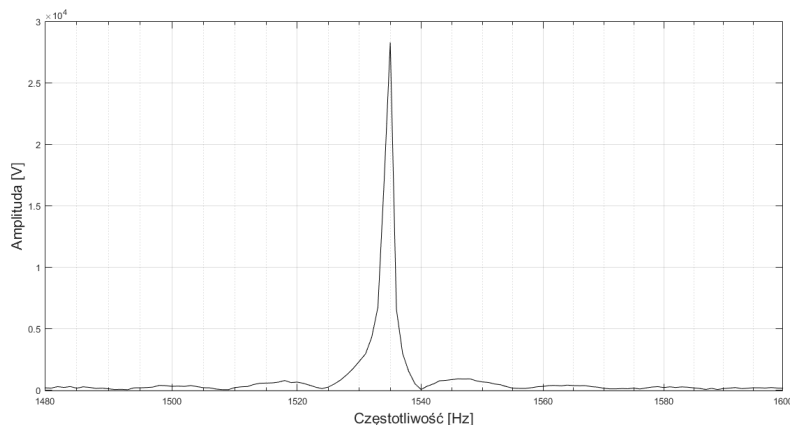


Rys. 6. Widmo częstotliwościowe zapisanego sygnału (opracowanie własne)

Wysokość prążków widmowych odpowiada amplitudzie składowych sinusoid. Ponieważ sygnał emisji akustycznej miał wyższą amplitudę od zakłóceń, w tym przypadku łatwo go zidentyfikować i określić w jakim zakresie częstotliwości zawiera się emisja przełączania tranzystora. Rysunek 7 i rysunek 8 przedstawiają zawężone pasmo częstotliwości.



Rys. 7. Widmo częstotliwościowe wyodrębnionego pasma dla EA (opracowanie własne)



Rys. 8. Harmoniczna o najwyższej amplitudzie (opracowanie własne)

Takie ręczne zawężenie pasma można porównać do działania filtra pasmowego. Przy odpowiednim algorytmie można wyodrębnić dowolne pasma częstotliwości. Filtr taki można zrealizować cyfrowo obrabiając sygnał np. w Matlabie. Po odcięciu nieinteresujących nas częstotliwości można sygnał przetwarzać dalej używając innych transformat lub wrócić do dziedziny czasu z odsumionym sygnałem w dziedzinie czasu.

Pozostałe częstotliwości z rysunku 7, tzn. niższe jak na rysunku 8, czyli mniej jak 1kHz oraz wyższe jak 20kHz są to zakłócenia oraz częstotliwości i ich harmoniczne związane np. z częstotliwością przełączania generatora.

#### 4. WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów wykonanych na pojedynczym elemencie półprzewodnikowym, ale przeprowadzone badania objęły również inne częstotliwości jak i zmiany napięć. Założeniem niniejszego artykułu było przedstawienie możliwości przetworzenia sygnału otrzymanego w dziedzinie czasu do dziedziny częstotliwości. Celem tego zabiegu było odnalezienie wzorca sygnału przełączania prawidłowo pracującego tranzystora. Za wzorec uznano obraz fali gasnącej w widmie częstotliwościowym. Cel założonych badań został osiągnięty i stanowi podstawę do dalszych prac. Na parametry widma częstotliwościowego sygnału emisji akustycznej ma wpływ przełączane napięcie i prąd, natomiast częstotliwość przełączania, jeżeli jest w granicach pracy tranzystora, nie powinna mieć wpływu.

Użycie szybkiej transformaty Fouriera ukazało, iż nawet przy niewielkiej wartości napięcia zasilania lub pomiaru o mniejszej dokładności można wyznaczyć wzorec przełączania w dziedzinie częstotliwości, praktycznie nie znając przebiegu sygnału w dziedzinie czasu. Wyraźne odczyty pozyskano przy napię-



ciu zasilania układu rzędu 5 V, gdy badany tranzystor może przełączać napięcia dochodzące do 600 V.

Wartości napięcia użytych w badaniach były stosunkowo niskie jak dla tego typu tranzystora zatem następne badania będą prowadzone przy wyższych napięciach przełączanych oraz większych wartościach prądów. Niedogodnością w tym przypadku będzie znaczna ilość ciepła generowana na złączu oraz niewiadomy wpływ (tłumienie) radiatora na propagację fal emisji akustycznej i w efekcie końcowym pomiaru. Problemem może być również konieczność zastosowania pasywnych metod chłodzenia, gdyż metody aktywne wytwarzają dodatkowe wibracje mechaniczne a co za tym idzie fale sprężyste. Idealnym przypadkiem było by zawężenie wzorca przełączania do takiego stopnia, aby dodatkowe zakłócenia, takie jak aktywne chłodzenie, były odfiltrowane. Jednym z propozycji jest zastosowanie dwóch identycznych sensorów pracujących różnicowo z założeniem, że jeden mierzy sygnał źródła z otoczeniem, a drugi samo otoczenie. Istnieje wówczas możliwość filtracji zakłóceń otoczenia w aparacie matematycznym lub za pomocą układów konwencjonalnych, czyli różnicowego wzmacniacza operacyjnego.

Inną drogą jest zastosowanie innych przekształceń matematycznych, które są stosowane w emisji akustycznej, a w tym przypadku nie były jeszcze testowane.

Zastosowany sensor EA był czujnikiem szerokopasmowym jednak po uprzednim określeniu pasma częstotliwości, w którym pracuje tranzystor należy zastosować sensor selektywny. Dzięki temu przewiduje się, że dzięki temu zabiegowi otrzymany sygnał będzie mniej narażony na zakłócenia i szumy.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań wykonanych z użyciem tranzystora IRG4BC40S podczas we wcześniejszych badaniach testowany był inny typ tranzystora, którego struktura również wykazywała emisję sygnału akustycznej co pozwala na porównanie wyników i będzie stanowiło podstawę do poszukiwania cech wspólnych emisji sygnału tła.

## LITERATURA

- [1] Baliga B. J., *The IGBT Device Physics, Design and Applications of the Insulated Gate Bipolar Transistor*, Elsevier Inc., 2015.
- [2] Gordon, R., Influence of chosen parameters on electrical machines bearings exploitation. 58<sup>th</sup> International Conference of Machine Design Departments – ICMD 2017, Prague 2017, pp. 94–99, Czech University of Life Sciences Prague.
- [3] Karkkainen T., Talvitie J., Kuisma M., Hannonen J., Strom J., Mengotti E., Silventoinen P., Acoustic Emission in Power Semiconductor Modules – First Observations, *IEEE transactions on power electronics*, vol. 29, november 2014.
- [4] Kozak M., Initial Excitation Issues of Synchronous Generator with VSI Inverter in Varying Rotational Speed Operation, *Zawieacie, MAPE 2018*, volume 1, issue 1.
- [5] Bejger, A., Kozak, M., Gordon, R., Acoustic Emission Of Monolithic IGBT Transistors. *Symso 2017*, Szczecin.

- [6] Nagl B., Czerny B., Lederer M., Khatibi G., Thoben M., Nicolics J., Experimental investigation of transient electrical, thermal and mechanical behavior of IGBT inverter modules during operation, ISPSD, Kanazawa, Japan 2013.
- [7] Luowei Zhou S., Sun, P., 2013 Monitoring Potential Defects in an IGBT Module Based on Dynamic Changes of the Gate Current IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 28, no. 3, March 2013.
- [8] National Rectifier Datasheet PD - 91454B to IRG4BC40S.
- [9] Bejger A., Zastosowanie fal sprężystych emisji akustycznej do diagnozowania układów wtorkowych okrętowych silników spalinowych. Wyd. FOTOBIT, Kraków 2012.
- [10] Keprt J., Benes P., Determination of Uncertainty in Calibration of Acoustic Emission Sensors, 4<sup>th</sup> International Conference on NDT, Chania Greece, 2007.
- [11] Gordon R., Dreas A., Detection Of Acoustic Emission In Semiconductors, MAPE 2018 Zawiercie, ISBN 978-83-65265-25-8.
- [12] Fortuna Z, Macukow B., Wąsowski J., Metody numeryczne. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1993, ISBN 83-204-1551-9.

#### **EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF MONOLITHIC IGBT TRANSISTOR ACOUSTIC EMISSION PHENOMENA**

The diagnostic methods leading to determine the condition of working semiconductor components (power transistors etc.) are on the focus of many recent researches. As any solid material the semiconductors are generating elastic waves in the case of changing conductivity state. Based on the results of experimental research, a correlation can be observed between the transition between the on and off states of a single IGBT transistor and the emitted acoustic signal. Acquisition of acoustic emission signals was obtained by using a wide band acoustic emission sensor. The received signal initially was prepared by AD input card with amplifier and were recorded by computer software. Acquired data were exported the to a file, which enabled further processing of the measured signals. The aim of the study was to determine the acoustic emission background signal coming from switching IGBT transistor and preparation of frequency response pattern. The results of analysis will be used as a reference point for a further investigation of early-stage faults of semiconductors elements.

*(Received: 30.01.2019, revised: 13.03.2019)*