

**Wojciech WOJTKOWSKI**

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA, WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY, KATEDRA AUTOMATYKI I ELEKTRONIKI

**Wielokanałowy pomiar temperatury w układach przekształtnikowych**

Dr inż. Wojciech WOJTKOWSKI

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej. W roku 2005 uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie naukowej Elektrotechnika specjalność Energoelektronika. Autor lub współautor ponad 40 publikacji z zakresu przekształtników rezonansowych, układów sterowania oraz systemów cyfrowych. Prowadzi badania związane z zastosowaniem układów programowalnych i procesorów jednokładowych w sterowaniu rezonansowych układów przekształtnikowych.

e-mail: w.wojtkowski@we.pb.edu.pl

**Streszczenie**

W artykule przedstawiono system wielopunktowego pomiaru temperatury półprzewodnikowych przyrządów mocy, wykorzystany w laboratoryjnym stanowisku badania rezonansowych układów przekształtnikowych. System jest szczególnie przydatny podczas badania nowych konfiguracji przekształtników. Dzięki monitoringowi temperatury, można bezpiecznie pracować na granicy osiągnięć przekształtnika. Zastosowanie proponowanego układu pozwala na szerszy zakres badań laboratoryjnych.

**Słowa kluczowe:** cyfrowe czujniki temperatury, przekształtniki rezonansowe, pomiar temperatury.

**Multipoint temperature measurement in power converters****Abstract**

The multipoint temperature measurement system is presented in the paper. The system is implemented in the laboratory breadboard, used for investigation of new resonant power converters. The system measures temperatures of each semiconductor power devices in the laboratory breadboard, which allows to achieve better results and to improve evaluated converter topology. The information about each transistor and diode temperatures, clearly shows the power losses in each semiconductor power device. Any deviations from assumed values can signalize improper operation of a particular device or mistakes in control signals. Discussed system is especially useful during laboratory performance investigations of a new converter topologies. The temperature measurement is based on the digital temperature sensors operating with 1-wire communication bus. One of the attractive features of the 1-wire bus is that a device only needs two wires, namely data and ground. To accomplish this, such a digital sensor includes an capacitor to power it from the data line. However, in the proposed system, additional wires were implemented to supply the sensors. Such approach is better, when 1-wire communication is taking place in high electromagnetic interferences. Laboratory tests have proved this. Thanks to the multipoint temperature measurement and control, safe operation of the converter at its performance limit is possible. The proposed system is successfully implemented in the resonant DC-DC converter operating with frequency 500 kHz and with the output power equal 3 kW.

**Keywords:** digital temperature sensors, resonant converters, temperature measurement.

**1. Wstęp**

Podczas badań laboratoryjnych nowych topologii układów przekształtnikowych dużej mocy, użyteczna może być informacja o stratach mocy w poszczególnych przyrządach półprzewodnikowych, dostarczana na bieżąco. Dysponując taką informacją, można wysterować badany układ przekształtnikowy do pracy przy maksymalnej, możliwej do uzyskania w danej konfiguracji, mocy wyjściowej, bez ryzyka uszkodzenia elementów półprzewodnikowych mocy. Uszkodzenie może być np. następstwem niesymetrycznego rozkładu prądów w gałęziach mostka wyjściowego, co w konsekwencji prowadzi do nadmiernego nagrzewania struktur określonych przyrządów półprzewodnikowych mocy (ppm)

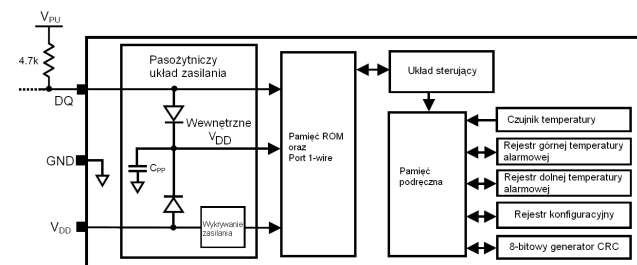
i wyjścia z bezpiecznego dla nich obszaru pracy. Problemy mogą się także pojawiać w przypadku nieodpowiednio dobranych czosów martwych w przebiegach sterujących poszczególnymi tranzystorami mocy lub niewielkich zakłóceń symetrii tych przebiegów w poszczególnych kanałach sterowania. Wszelkie problemy nasilają się przy pracy na granicy osiągnięć układu przekształtnikowego i wówczas jest mało czasu na działanie zapobiegawcze, gdyż szybko dochodzić może do uszkodzenia szczególnie narażonych ppm. Nawet, jeśli badany układ jest wyposażony w automatyczną regulację napięcia bądź prądu wyjściowego, najczęściej sygnałem wejściowym regulatora jest wybrana wielkość wyjściowa układu przekształtnikowego, a nie prądy i napięcia z poszczególnych ppm. Tutaj z pomocą może przyjść omawiany system wielopunktowego pomiaru temperatury ppm, z możliwością automatycznej reakcji na przekroczenie wartości progowych w poszczególnych torach pomiarowych. System ten jest uniwersalny i może wykrywać wiele nieprawidłowości, gdyż większość z nich wiąże się z nadmiernym nagrzewaniem zagrożonego przyrządu mocy. Do budowy układu zastosowano cyfrowe czujniki temperatury współpracujące z szeregową magistralą 1-wire, wymagającą do poprawnej pracy zaledwie jednej linii danych. Układ został z powodzeniem przetestowany w rezonansowym przekształtniku DC-DC, pracującym z częstotliwością około 500 kHz przy mocy wyjściowej 3 kW.

**2. Cyfrowe czujniki temperatury**

Cyfrowe czujniki temperatury występują w wielu odmianach, różniących się dokładnością, zakresem temperatur, obudową i wykorzystywanym interfejsem szeregowej transmisji danych. Najczęściej spotykane rodzaje komunikacji z układem sterującym to magistrale I<sup>2</sup>C, SPI oraz 1-wire. W opisywanym projekcie wykorzystano czujniki współpracujące z magistralą jedнопроводową 1-wire. Zastosowanie tej magistrali pozwala na uproszczenie sieci połączeń pomiędzy czujnikami i systemem sterującym. Różne zastosowania sieci takich czujników są opisane w publikacjach [1, 2, 3]. Wszystkie czujniki i wyprowadzenie mikrokontrolera sterującego są dołączone równolegle do tego samego przewodu (stąd nazwa magistrali 1-wire). Dodatkowo, tym samym przewodem może być przesyłana energia elektryczna zasilająca czujniki. Jest to możliwe w trybie zasilania pasożytniczego [4]. Zasilanie w trybie pasożytniczym z linii danych polega na zmagazynowaniu energii w pojemności wewnętrznej czujnika w określonych przedziałach czasowych, podczas których na magistrali danych musi być utrzymywany wysoki poziom logiczny, a następnie wykorzystaniu tej energii przez czujnik do transmisji jednego bitu informacji w kolejnym przedziale czasu. Ze względu na stosunkowo złożony protokół komunikacji i konieczność zachowania ściśle określonych opóźnień w trakcie komunikacji, do obsługi czujników niezbędny jest mikrokontroler lub układ programowalny. Ładowanie wewnętrznej pojemności odbywa się poprzez rezystor podciągający do napięcia zasilającego linię danych lub poprzez dołączone do magistrali źródło prądowe (lepsze rozwiązanie pozwalające na dołączenie do tej samej magistrali większej liczby czujników jednocześnie). Po przeprowadzeniu testów w układzie docelowym (przekształtnik 3 kW, 500 kHz) stwierdzono, że lepsze efekty daje podłączenie zasilania oddzielnym przewodem i rezygnacja z pasożytniczego trybu zasilania. Wówczas uzyskuje się większą odporność na zakłócenia elektromagnetyczne, których trudno jest uniknąć w bliskim sąsiedztwie falownika rezonansowego pracującego z dużą częstotliwością.

Zastosowane cyfrowe czujniki DS18B20 umożliwiają programowe ustawienie rozdzielczości w zakresie 9-12 bitów. Temperatura jest mierzona w zakresie od -55 do 125°C. Ten zakres jest wystarczający w większości przypadków. Półprzewodnikowe

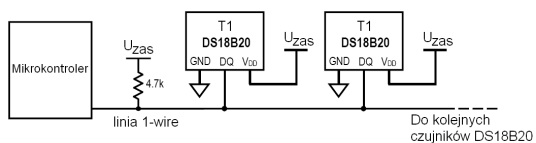
przyrządy mocy zazwyczaj mają dopuszczalną temperaturę złącza rzędu  $150^{\circ}\text{C}$ , ale producenci zalecają ciągłą temperaturę obudowy nie przekraczającą  $100^{\circ}\text{C}$ , co mieści się w przedziale pomiarowym zastosowanych czujników. Wraz ze wzrostem temperatury ppm, maleją dopuszczalne wartości prądów, w związku z czym obszar bezpiecznej pracy przyrządów się zmniejsza. Dlatego przyjęto bezpieczną wartość temperatury obudowy ppm zalecaną przez producentów na poziomie  $100^{\circ}\text{C}$ . W układzie eksperymentalnym zastosowano rozdzielczość 9 bitową, która okazała się wystarczającą na potrzeby stanowiska laboratoryjnego do badania przekształtników rezonansowych. Czas przetwarzania przy takiej rozdzielczości pomiaru wynosi 0,5 s. Maksymalna dokładność pomiaru, dostępna w zakresie do  $85^{\circ}\text{C}$  wynosi  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Czas konwersji temperatury na wartość cyfrową jest zależny od ustawionej rozdzielczości i w najgorszym przypadku wynosi 750 ms. Ma to miejsce przy rozdzielczości 12 bitowej i wynika z zastosowania przetwornika analogowo-cyfrowego działającego metodą kolejnych przybliżeń. Aby umożliwić adresowanie konkretnych czujników dołączonych do magistrali 1-wire, każdy układ DS18B20 posiada zaprogramowany fabrycznie 64-bitowy numer, składający się z kodu rodziny czujników, unikalnego numeru seryjnego oraz kodu kontrolnego CRC, dającego możliwość uzyskania pewności prawidłowej transmisji (wszelkie błędy zostają wykryte dzięki niezgodności kodów CRC odebranego i obliczonego). Schemat blokowy cyfrowego czujnika temperatury typu DS18B20 jest przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy cyfrowego czujnika DS18B20 [4]  
Fig. 1. Digital sensor DS18B20 block diagram [4]

Układ ten posiada rejestry specjalnego przeznaczenia w obszarze pamięci nielotnej EEPROM, przechowujące wartości górnej i dolnej temperatury progowej – alarmowej, także po zaniku zasilania. Dzięki temu, wystarczy tylko raz skonfigurować odpowiednio wartości temperatury w każdym z czujników systemu, a następnie po uruchomieniu, każdy sensor indywidualnie może kontrolować swoje ustawione wartości progowe i zgłosić alarm (alarm jest zgłaszany po wysłaniu przez układ sterujący czujnikami specjalnego rozkazu wyszukiwania alarmu), umożliwiając tym samym szybką identyfikację układu znajdującego się w temperaturze wykraczającej poza ustawione wartości progowe i podjęcie działania zapobiegawczego. Sposób podłączenia czujników do mikrokontrolera i zasilania, zastosowany w omawianym układzie laboratoryjnym, jest przedstawiony na rysunku 2.

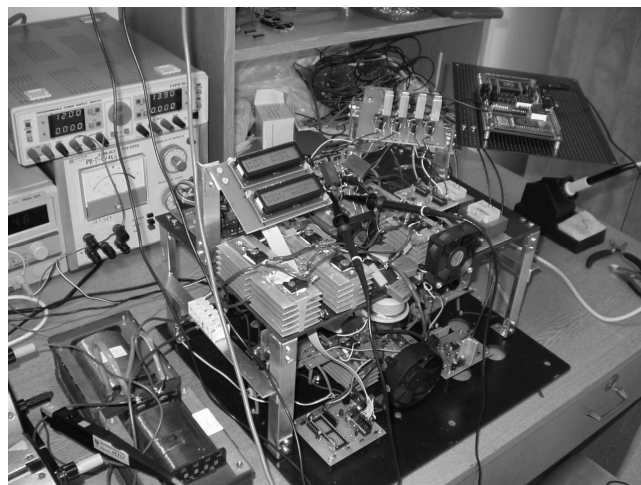
Czujniki zostały podłączone do magistrali 1-wire, wyposażonej dodatkowo w rezystor podciągający do napięcia zasilającego. Każdy czujnik został także zasilony oddzielnym przewodem – zrezygnowano z trybu zasilania pasywnego z powodu konieczności zwiększenia odporności układu na zakłócenia elektromagnetyczne [5] (rys. 2).



Rys. 2. Zasilanie DS18B20 z wykorzystaniem dodatkowej linii zasilającej  
Fig. 2. Powering the DS18B20 with an external supply

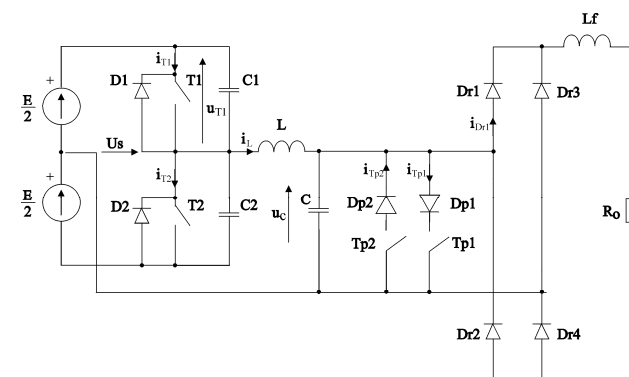
### 3. Opis stanowiska badawczego

Wykonane stanowisko badawcze, wyposażone w system wielopunktowego pomiaru temperatury, służy do badania przekształtników rezonansowych pracujących z wysoką częstotliwością (rzędu kilkuset kHz). Składa się z baterii kondensatorów zasilających ( $27200\ \mu\text{F}/400\ \text{V}$ ), układu mostkowego z tranzystorami MOSFET, prostownika wykonanego z ultra szybkich diod mocy, układu rezonansowego (możliwość zestawiania różnych konfiguracji), wysokoczęstotliwościowego transformatora wyjściowego, układów sterowania wyposażonych w wymienne moduły z układami programowalnymi FPGA, CPLD oraz mikrokontrolerami jednoukładowymi. Widok kompletnego stanowiska badawczego wyposażonego w czujniki temperatury ppm jest przedstawiony na rysunku 3.



Rys. 3. Przekształtnikowy układ badawczy wyposażony w czujniki temperatury  
Fig. 3. The experimental breadboard converter equipped with temperature sensors

Schemat ogólnej testowanej konfiguracji przekształtnika rezonansowego DC-DC, pracującego przy stałej częstotliwości przełączania, jest przedstawiony na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat eksperymentalnego przekształtnika rezonansowego z tranzystorami pomocniczymi Tp1 i Tp2

Fig. 4. The experimental resonant converter with auxiliary transistors Tp2 and Tp1

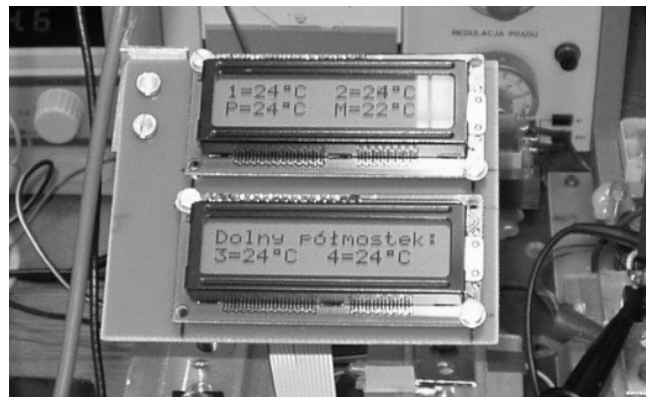
Klucze tranzystorowe Tp1 i Tp2 zastosowano w celu umożliwienia sterowania układem przy stałej częstotliwości, za pomocą modulacji PWM. Układ badawczy umożliwia szybką zmianę konfiguracji na pełno-mostkową. Szczegółowy opis rezonansowego przekształtnika DC-DC, sterowanego przy stałej częstotliwości został przedstawiony we wcześniej opublikowanej pracy [6]. Wszystkie tranzystory mocy są kontrolowane przez indywidualne czujniki temperatury, dodatkowo jest zainstalowany jeden czujnik temperatury dla całego wyjściowego mostka prostowniczego (temperatura M na rysunku 5).

Cyfrowe czujniki temperatury w miniaturowych obudowach TO-92 zostały umieszczone na radiatorach ppm i dociśnięte obejmami metalowymi przykręconymi do radiatorów. Miejsce kontaktu z radiatorem zostało dodatkowo pokryte pastą silikonową o wysokiej przewodności cieplnej. W tak zaprojektowanym systemie pomiaru temperatury możliwa jest zarówno obserwacja temperatury na dwóch wyświetlaczach alfanumerycznych (każdy typu 2x16 ze sterownikiem typu HD-44780) jak i sygnalizacja temperatury alarmowej w poszczególnych torach. Układ po wykryciu przekroczenia temperatury któregośkolwiek radiatora włącza alarm dźwiękowy lub wyłącza sterowanie przekształtnika, w zależności od potrzeb. Na etapie badań laboratoryjnych, przy testowaniu maksymalnej mocy możliwej do uzyskania na obciążeniu, alarm temperaturowy okazał się bardzo przydatnym udogodnieniem. Alarm automatyczny zwalnia badacza od potrzeby bezustannego śledzenia wskazań temperatury i pozwala na ciągłą obserwację przebiegów napięć i prądów co zapewnia bardziej komfortową pracę.

Pomimo skomplikowanego protokołu komunikacji poprzez magistralę szeregową układów DS18B20 oraz stosunkowo długich przewodów połączeniowych z mikrokontrolerem znajdujących się w polu elektromagnetycznym wytwarzanym w obwodach rezonansowego przekształtnika, przy mocach wyjściowych do 3 kW nie stwierdzono zakłóceń działania czujników.

Na rysunku 5 przedstawiono widok wyświetlaczy z mierzoną temperaturą radiatorów przyrządów półprzewodnikowych mocy. Ponieważ prowadzono eksperymenty z układami pracującymi z częstotliwościami rzędu kilkuset kHz przy stosunkowo dużej mocy wyjściowej, konieczne było zapewnienie jak najkrótszych połączeń przewodowych pomiędzy poszczególnymi elementami składowymi stanowiska badawczego. Szczególnie krytyczne są połączenia pomiędzy kondensatorami wejściowymi o dużej pojemności, a tranzystorami mostka falownika. W przypadku gdy jeden z tranzystorów głównych falownika jest wyłączony, jego pojemność wyjściowa  $C_{DS}$  wraz z indukcyjnością pasywną przewodu łączącego tranzystor ze źródłem napięcia (w tym przypadku z kondensatorem wejściowym) tworzy obwód rezonansowy zasilany przez inny (aktualnie przewodzący) tranzystor mostka, bezpośrednio ze źródła. W takim przypadku występują pasożytnicze oscylacje o znacznej amplitudzie. Aby tego uniknąć, należy maksymalnie ograniczyć indukcyjności pasywności przewodów łączących z wejściowymi kondensatorami filtrującymi oraz zastosować wysokiej klasy kondensatory o niskiej indukcyjności pasywności. W prezentowanym układzie osiągnięto ten cel poprzez budowę piętrową falownika, który praktycznie jest umieszczony na samych kondensatorach wejściowych. Piętrowa budowa jest wymuszona przez duże rozmiary samych kondensatorów. W wersji półmostkowej, oba tranzystory główne znajdują się praktycznie na zaciskach kondensatorów wejściowych co minimalizuje indukcyjności połączeń. Pomimo takiej budowy falownika, do kondensatorów wejściowych dołączono równolegle duże kondensatory bezindukcyjne. Konstrukcja przestrzenna została wykonana z płyt bakelitowych oraz kątowników aluminiowych. Dodatkowo stanowisko zostało wyposażone w trzy wentylatory: po jednym na każdy półmostek falownika oraz jeden do tranzystorów pomocniczych. To pozwoliło na pracę z mniejszymi gabarytowo radiatorami odprowadzającymi ciepło z elementów mocy. Wentylatory znacząco poprawiają odprowadzanie ciepła z przyrządów półprzewodnikowych, co dodatkowo łatwo jest zaobserwować dzięki systemowi wielopunktowego pomiaru temperatury. Rozmiary radiatorów wpływają na możliwą gęstość upakowania elementów, co ma duże znaczenie przy wyższych częstotliwościach pracy. Można wprowadzić wiele przyrządów na wspólnym radiatorze po zastosowaniu izolacji za pomocą termoprzewodzących podkładek izolacyjnych, jednak w tym przypadku wzrastają pojemności pasożytnicze pomiędzy poszczególnymi ppm. Aby maksymalnie skrócić długość połączeń pomiędzy układem sterującym a sterownikami tranzystorów i samymi tranzystorami mocy, układ sterowania został umieszczony na odpowiednich wspornikach nad tranzystorami mocy. Każdy sterownik tranzysto-

rów mocy jest wyposażony w zestaw kondensatorów o dużej pojemności, umieszczony w bezpośrednim sąsiedztwie. Takie rozwiązanie zapewnia odpowiednią szybkość przełączania sterowanego tranzystora MOSFET i w efekcie umożliwia pracę przekształtnika z wysoką częstotliwością.



Rys. 5. Wyświetlacze temperatury  
Fig. 5. Temperature displays

#### 4. Wnioski

Wielopunktowy pomiar temperatury w energoelektronicznym układzie prototypowym pozwala na szybką orientację w poziomie strat mocy wydzielanej w poszczególnych elementach mocy. Informacja taka jest cenna przy badaniu sprawności układu, symetrii rozpyły prądów oraz dopuszczalnej mocy wyjściowej w danej konfiguracji przekształtnika. Dodatkowo wartość temperatury może być wykorzystana do automatycznego wyłączenia układu w przypadku nadmiernego nagrzania elementów. Zaproponowany system jest uniwersalny i może wykrywać wiele nieprawidłowości występujących w przekształtniku i w przebiegach sterujących, gdyż większość z nich wiąże się z nadmiernym nagrzewaniem zagrożonego przyrządu mocy. Do budowy układu zastosowano cyfrowe czujniki temperatury współpracujące z szeregową magistralą 1-wire, wymagającą do poprawnej pracy zaledwie jednej linii danych. Układ został z powodzeniem zastosowany w rezonansowym przekształtniku DC-DC, pracującym z częstotliwością około 500 kHz przy mocy wyjściowej 3 kW.

Zrealizowano w ramach pracy S/WE/1/06 finansowanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

#### 5. Literatura

- [1] Wang Jingzhuo, Gong Chenglong: Research on 1-wire Bus Temperature Monitoring System. The Eighth Int. Conf. on Electronic Measurement and Instruments – ICEMI 2007.
- [2] Hongmei Xue: Research and Development of an Intelligent Temperature Measuring System Based on 1-wire Bus. 2008 Int. Conf. on Intelligent Computation Technology and Automation, 2008.
- [3] Shuxiao Wang, Cheng K.W.E. Ding K.: Design of the Temperature and Humidity Instrument Based on 1-wire Sensor for Electric Vehicle Motors. 3rd Int. Conf. on Power Electronics Systems and Applications, 2009.
- [4] Maxim Integrated Products. DS18B20 Programmable Resolution 1-wire Digital Thermometer. Sunnyvale, USA, 2008.
- [5] Wojtkowski W.: Power MOSFET transistors temperature measurement with 1-wire digital temperature sensors. *Tehnična Élektrodinamika*, T.28, 2007 r.
- [6] Wojtkowski W.: Analysis and design of a DC-DC high frequency power converter. *Tehnična Élektrodinamika*, T.27, 2006 r.