

Robert SMYK\*  
Maciej CZYŻAK\*

## ZDALNY POMIAR PRĄDU Z MOŻLIWOŚCIĄ OBRÓBK CYFROWEJ W FPGA

W artykule przedstawiono realizację modułowego systemu pomiarowo-kontrolnego sterującego wariantami zasilania odbiorników 230 V. System umożliwia kontrolę poboru prądu przez urządzenia infrastruktury informatycznej w biurze. Wykrywa moment pojawienia się obniżonego poboru prądu przez urządzenia. Umożliwia to odłączenie ich od zasilania celem obniżenia kosztów zużycia energii. Do pomiaru prądu wykorzystano moduły przetworników scalonych prąd/napięcie. W ramach pracy zrealizowano rozproszony moduł sprzętowy akwizycji i wysyłania danych pomiarowych z transmisją bezprzewodową w standardzie Zigbee, między punktem pomiarowym a monitorującym oraz między punktem monitorującym a wykonawczym. Moduł pomiarowy zrealizowano w układzie Altera.

SŁOWA KLUCZOWE: pomiar prądu, FPGA, ZigBee, sterowanie zasilaniem

### 1. WPROWADZENIE

W przemyśle oraz sferze publicznej wykorzystywanych jest wiele stanowisk komputerowych pracujących w ramach infrastruktury danej instytucji. Zwykle dąży się do ograniczenia zużycia energii pobieranej przez te stanowiska. Często zużycie energii jest jednym z podstawowych kryteriów ekonomicznych danej instytucji, zwłaszcza w przypadku zastosowań biurowych. Z tego powodu próbuje się stosować różnego rodzaju metody kontrolowania zużycia energii. Warto zaznaczyć, że podstawowym sposobem ograniczania zużycia energii jest wykorzystanie stanowisk komputerowych z małym poborem mocy. Nie zawsze jest to jednak możliwe, stąd próbuje się szukać innych rozwiązań. Do najprostszych można zaliczyć wymuszenie automatycznego wchodzenia w stan uśpienia, a także wyłączenie całkowite zamiast przechodzenia w stan gotowości (ang. stand-by). Najbardziej zaawansowane podejścia wykorzystują dedykowane systemy kontrolujące zużycie energii i sterujące wariantami zasilania.

Większość współczesnych komputerów projektowanych jest z uwzględnieniem normy Energy Star [1]. Czołowe firmy produkujące sprzęt komputerowy dążą do zgodności z Energy Star w wersji 5.2, która nakłada

---

\* Politechnika Gdańska.

rygorystyczne obostrzenia dotyczące energooszczędności. Norma ta m.in. systematyzuje algorytm szacowania zużycia energii TEC (ang. Typical Energy Consumption) przez stanowisko komputerowe. Algorytm ten uwzględnia pobór prądu w trybie czuwania, w trybie wyłączenia, w trybie uśpienia oraz w trybie pracy. W zależności od przynależności do jednej z czterech klas, na które podzielono sprzęt komputerowy, TEC dla komputera klasy desktop waha się w granicach od 148 kWh do 234 kWh, a dla komputera klasy notebook w granicach od 40 kWh do 88 kWh.

Obserwacje pokazują, że w wielu instytucjach sprzęt komputerowy pracuje 24 h/dobę. W takim przypadku zużycie energii można oszacować bazując na informacjach podawanych przez producentów systemów komputerowych. W zależności od wyposażenia, obciążenia oraz konfiguracji, przyjmuje się, że typowy komputer klasy desktop pobiera od 0,06 do 300 Wh. Zakładając pracę pojedynczego stanowiska komputerowego w trybie 24h/dobę przez 7 dni w tygodniu oraz średnie zużycie energii na poziomie 0,2 kWh, można oszacować całkowite użycie energii w ciągu roku na poziomie 1752 kWh.

W artykule przedstawiono projekt systemu kontrolno-pomiarowego służącego do ograniczania poboru energii urządzeń zasilanych napięciem 230 V. Opisano główne założenia oraz szczegóły implementacji.

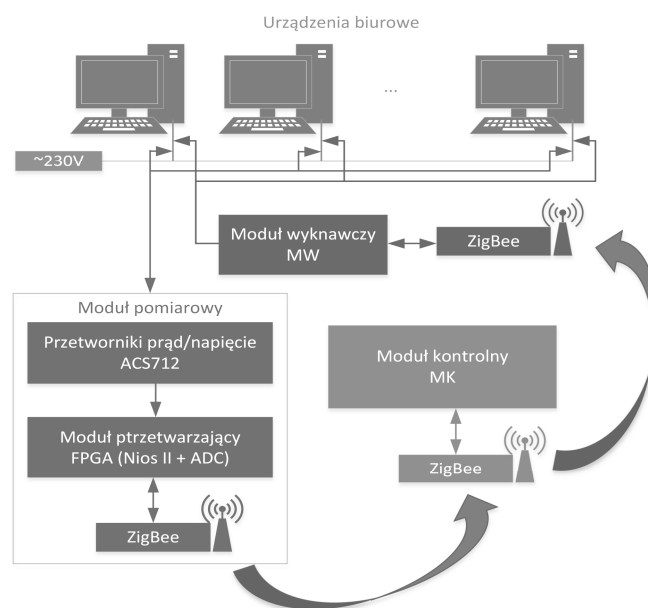
## 2. PROJEKT SYSTEMU KONTROLI POBORU PRĄDU

Proponowany system kontroli poboru prądu ma budowę modułową. Założono, że warstwa sprzętowa systemu powinna składać się z pewnej liczby modułów programowalnych, które mogą być zestawiane w różne konfiguracje w zależności od potrzeby. Daje to możliwość łatwego dostosowania systemu do konkretnego, często bardzo specyficznego środowiska pracy. Ważniejsze wymagania funkcjonalne obejmują: monitoring poboru prądu w instalacji niskiego napięcia 230 V, możliwość rozproszonej instalacji modułów systemu, dostosowywanie jak największej liczby parametrów pracy systemu poprzez zmianę jego oprogramowania oraz wykorzystanie komponentów o bardzo niskim poborze energii.

Schemat blokowy systemu obejmujący podstawowe bloki, przedstawiono na rys. 1. W warstwie sprzętowej obejmującej moduł pomiarowy wykorzystano scalone przetworniki prąd/napięcie typu ACS712 [2]. Przetworniki te pozwalają na pomiar prądu w zakresie 0-5 A. Ważnym czynnikiem przesądzającym o zastosowaniu proponowanych przetworników było to, że posiadają liniową charakterystykę napięcia wyjściowego. Przyjęto, że pojedynczy przetwornik ACS712 mierzy prąd pobierany przez jedno stanowisko komputerowe, które może być wyposażone w dodatkowe urządzenia typu drukarka, skaner lub kilka



monitorów LCD (wariant spotykany w firmach zajmujących się wytwarzaniem oprogramowania lub obróbką grafiki).



Rys. 1. Schemat blokowy systemu pomiarowo-kontrolnego sterującego wariantami zasilania

Moduł przetwarzający w warstwie pomiarowej zbudowano w oparciu o dedykowany SoC (ang. System-on-Chip) w układzie FPGA Cyclone V firmy Altera, gdzie wbudowano główną jednostkę przetwarzającą Nios II [3] oraz moduły interfejsowe do komunikacji z urządzeniami peryferyjnymi, takimi jak 12-bitowy przetwornik A/C i moduł radiowy ZigBee pracujący w paśmie 2.4 GHz. Wielkość mierzona jest przetwarzana w SoC, a informacja o zużyciu energii wysyłana jest bezprzewodowo do modułu kontrolnego.

Moduł kontrolny w wersji prototypowej omawianego systemu zbudowano w oparciu o miniaturowy komputer RaspberryPI klasy ARM, który komunikuje się z modułem pomiarowym oraz modułem wykonawczym drogą radiową przy użyciu standardu ZigBee. Komputer może być zasilany napięciem 5 V z zewnętrznego zasilacza. W wersji prototypowej jako zasilacz wykorzystano splitter PoE TP-Link TL-POE10R[4].

Moduł wykonawczy (MW) zbudowano w oparciu o moduł ZigBee, który w tym przypadku pełni rolę sterownika załączającego przełączniki sterujące wariantami odcięcia lub doprowadzenia zasilania do stanowiska komputerowego. Urządzenia z serii Xbee 802.15.4 [5] firmy Digi International, pracujące w standardzie IEEE 802.15.4, posiadają do 10 wejść/wyjść

dyskretnych. Umożliwia to budowę prostego sterownika bez konieczności wykorzystywania mikrokontrolera.

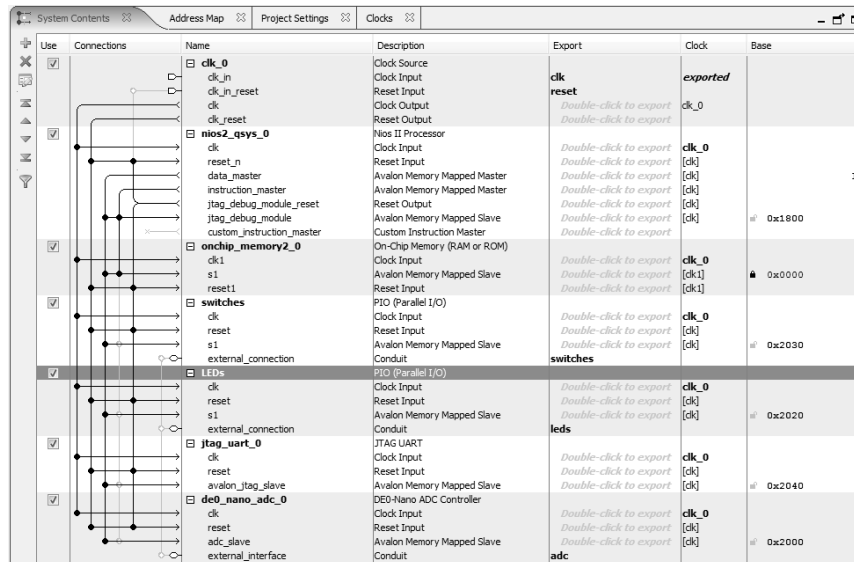
Rolę urządzenia nadzorczego w proponowanym systemie pełni moduł kontrolny (MK), odbierający od modułu pomiarowego informację o wartości poboru prądu pojedynczych stanowisk komputerowych. W zależności od ustalonej i zaprogramowanej wartości progowej, układ ten wykrywa moment obniżonego poboru prądu oraz wysyła informację do modułu wykonawczego o konieczności odłączenia zasilania od danego stanowiska. Opisany powyżej scenariusz sterowania w wersji prototypowej systemu rozszerzono o możliwość samoczynnego przywracania zasilania dla stanowiska komputerowego po upływie określonego czasu. Uwzględniono tu również możliwość przywrócenia zasilania dla stanowiska poprzez załączenie ręczne. Planowana jest rozbudowa systemu o moduł komunikacyjny NFC (ang. Near Field Communication), który umożliwi załączanie zasilania dla stanowiska z poziomu aplikacji działającej na smartfonie. Pozwoli to na kontrolę dostępu do stanowiska tylko dla osób upoważnionych.

### 3. REALIZACJA MODUŁU PRZETWARZAJĄCEGO

Jak zaznaczono w rozdziale 2, głównym elementem bloku pomiarowego jest moduł przetwarzający, odpowiedzialny za obróbkę prądu mierzonego na danym stanowisku komputerowym. W roli programowalnego sterownika wykorzystano SoC zrealizowany w układzie FPGA. Schemat implementacyjny wspomnianego SoC znajduje się na rys. 2. Moduł ten zbudowano w oparciu o procesor software'owy Nios II (**nios2\_qsys\_0**) ze względu na dużą elastyczność w konfigurowaniu komponentów sprzętowych jak i możliwość kontroli sterownika na poziomie programowym. Sterownik posiada zintegrowaną pamięć operacyjną (**onchip\_memory2\_0**), wbudowane moduły komunikacyjne UART i SPI (**jtag\_uart\_0** i **de0\_nano\_adc\_0**). Projekt SoC został przygotowany w środowisku Quartus II, a rozwiązanie układowe zaimplementowano przy użyciu płyty TerasIC DE0 Nano[6]. Na rys. 3 przedstawiono przykładowy kod w języku C realizujący obsługę przetwornika A/C w omawianym SoC.

W celu właściwego doboru przetworników prąd/napięcie wykonano doświadczalne pomiary poboru mocy oraz prądu dla kilku stanowisk komputerowych w trakcie startu systemu operacyjnego oraz podczas pracy z oprogramowaniem biurowym. Uzyskane dane pomiarowe zaprezentowano w Tab. 1. W wyniku zrealizowanych pomiarów stwierdzono, iż pobór prądu dla typowego stanowiska stacjonarnego PC wynosi od 600 mA do 900 mA w czasie normalnej pracy biurowej polegającej na przeglądaniu dokumentu tekstowego oraz pracy przy użyciu arkusza kalkulacyjnego. Dla komputerów PC przenośnych uzyskano pobór prądu na poziomie 300 mA w przypadku konfiguracji rozbudowanej i około 140 mA w przypadku typowego laptopa biurowego.





Rys. 2. Schemat połączeń SoC sterownika modułu przetwarzającego

```

#define ADC_ADDR 0x00009000
#define LED_ADDR 0x00009040
#define UART_ADDR 0x00009020
//RXD - C3 gpio0p1
//TXD - D3 gpio0p0
void putchar(volatile int * uart, char c);
void puts(volatile int * uart, char *c);
void kasuj_lancuch(char *c, int n);
void dec2str(char *c, int n);
int strlen(char *c);
int main (void){
    volatile int * adc = (int*)(0x00009000);
    volatile int * sw = (int*)(0x00009050);
    volatile int * led = (int*)(0x00009040);
    volatile int * uart = (int*)(0x00009020);
    unsigned int data;
    int count;
    int channel;
    char pomiar[20];
    data = 0;
    count = 0;
    channel = 0;
    while (1){
        *(adc) = 0; //Start the ADC read
        count += 1;
        data = *(adc+channel); //Get the value of the selected channel
        data = data/16; //Ignore the lowest 4 bits
        *(led) = data; //Signalize the ADC value on the LEDs
        if (count==500000){
            count = 0;
            channel = !channel;
            //Sending measured value to UART
            puts(uart,"CH");
            kasuj_lancuch(pomiar,20);
            dec2str(pomiar,data);
            puts(uart,pomiar);
            puts(uart,"$0"); //Comment it for Xbee communication
        }
    }
    return 0;
}

```

Rys. 3. Listing przykładowego kodu do odczytu danych z przetwornika A/C przy użyciu procesora Nios II

Tabela 1. Pomierzone pobory mocy i prądu dla stanowiska komputerowego w wybranych wariantach pracy

Konfiguracja stanowiska	Stan	Moc	Prąd
PC stacjonarny (typowy), Intel Core Quad, HDD 250GB, RAM 4GB, monitor 19"	Wyłączony	4W	61 mA
	Uruchamianie systemu	około 160 W	900 mA – 1100 mA
	Praca biurowa	max 160 W	max 900 mA
PC przenośny (typowy) intel Core i3, HDD 500GB, RAM 3GB	Wyłączony	0,5 W	około 20 mA
	Uruchamianie systemu	max 35 W	max 180 mA
	Praca biurowa	20 W	max 140 mA
PC przenośny (wydajny) Intel Core i7, HDD 500GB, RAM 16GB	Wyłączony	0,5 W	około 20 mA
	Uruchamianie systemu	max 75 W	300 mA
	Praca biurowa	max 60 W	max 300 mA
PC stacjonarny (wydajny) Intel Core i7, 2 x HDD 1TB, RAM 32GB	Wyłączony	2 W	<30 mA
	Uruchamianie systemu	około 160 W	900 mA
	Praca biurowa	128 W	537 mA

Wykorzystanie przetworników ACS712 pozwala na pomiar prądu w zakresie 0-5A z dokładnością na poziomie 180 mV/A. W praktyce pozwala to na sterowanie wariantami zasilania stanowiska złożonego z maksymalnie pięciu komputerów stacjonarnych.

#### 4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono realizację zdalnego pomiaru prądu pobieranego przez stanowiska komputerowe podczas startu systemu, normalnej pracy oraz w trybie czuwania. Zastosowano system modułowy złożony z modułów pomiarowych, modułu sterującego oraz modułów komunikacyjnych w standardzie ZigBee. System wykorzystuje procesor software'owy Nios II firmy Altera zrealizowany w układzie FPGA Cyclone 5. Do pomiaru prądu zastosowano przetworniki typu ACS712. Stwierdzono, że w celu minimalizacji zużycia energii korzystne jest całkowite odcinanie zasilania. Jak pokazały eksperymenty, opłacalne może być też wykorzystanie nowszego sprzętu komputerowego.



## LITERATURA

- [1] Energy Star, ENERGY STAR® Program Requirements for Computers Partner rev. 6, [www.energystar.gov](http://www.energystar.gov), styczeń 2015.
- [2] Allegro Microsystems LLC, ASC712 Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor, ACS712-DS, Rev. 15, 2013.
- [3] Altera, Nios II Processor Reference, [www.altera.com](http://www.altera.com), luty 2014.
- [4] TP-Link, TL-POE10R v4 Data Scheet, [www.tp-link.com.pl](http://www.tp-link.com.pl), 2014.
- [5] Digi International, Xbee Multipoint RF Modules, [www.digi.com](http://www.digi.com), 2014.
- [6] TerasIC, DE0-Nano User Manual, [www.terasic.com](http://www.terasic.com), 2013.

### REMOTE CURRENT MEASUREMENT WITH DIGITAL PROCESSING IN FPGA

The paper presents the implementation of a modular control measurement system that controls the mains supply of 230V equipment. The system realizes the control of current consumption by the computer infrastructure in an office. The system detects the condition of lower current consumption. It allows to cut off the selected devices from the supply in order to reduce the energy cost. The integrated converters current/voltage are used to measure currents. In this work also a hardware module that performs data acquisition with a use of wireless transmission between the measurement and the monitoring points is presented. For transmission the Zigbee standard has been applied. The measurement module has been impemented in the Altera FPGA environment.