

Intelligent Current Sensors as Part of Smart Grid Network

Authors

Andrzej Nowakowski
Paweł Wlazło
Radosław Przybysz

Keywords

Smart Grid, intelligent current sensors, autonomous power supply, current transducer, time synchronization

Abstract

The continuous development of the ITC systems, especially industrial Ethernet network using the IEC 61850 protocol allows to building a distributed sensor networks for control and monitor temporary states of the power infrastructure. In the paper the construction of the intelligent current sensors, Measurement Units (MU) for the Smart Grid network has been presented. In the paper the circuit diagram of sensor and synchronization method of the analog to digital converter based on the UTC timestamps has been described. The presented method allows to synchronize intelligent current sensors with an accuracy better than 1 μ s. The presented innovative synchronization method is characterized by a high level of resistance to disappearance and attack of the reference time signal. The measuring device MU design is based on the embedded Linux-platform and as a sensing element used air core current transducers based on Rogowski coil. The connection between the current transducers and the central unit is made using a fiber optic link. Built-in IEC-61850 server provides a real-time measurement value of the True RMS, harmonics spectrum and samples value. The intelligent current transducers in addition to being used in the MUs create also new possibilities in the substation construction like the possibility to place the Autonomous Sensors in large distance from Intelligent Electronic Devices that are located in the substation.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2015205

Introduction

Modern intelligent current sensors are gradually replacing traditional current transformers. The sensors, manufactured with the use of PCB technology, are composed of a current transducer based on the Rogowski coil principle and an electronic circuit integrated with the transducer. The current transducer is characterized by perfect linearity, high dynamic range, wide frequency bandwidth and very repeatable electrical characteristics. Equipped with signal processing circuits, autonomous power supply and communication modules, it allows the realization of the Smart Grid concept related to the monitoring of the temporary state of the power grid. Data transmitted by the intelligent sensor are collected by MU (Merging Unit) which, after time tagging make them available to IEDs (Intelligent Electronic Device), among them the Protection Relay, Power Quality Analyzer and PMU (Phasor Measurement Unit).

Construction of the intelligent current sensor

The block diagram of the intelligent current sensor is presented in Fig. 1. The main parts are current transducer, signal processing

module, synchronization module, communication module and power supply module. The Merging Unit has also been shown because the intelligent current sensor communicates directly with it. The principle of operation of the current transducer has been described in [1]. This article will focus on the electronic parts of the sensor.

Signal processing and communication module

The signal processing module consists of an anti-aliasing filter, amplifier, A/D converter and additional processing circuits. The amplifier, together with A/D converter, must have a dynamic range high enough to cover the current measurement range of interest which may be in the range of a few amperes to several kA. Providing a high dynamic range is one of the more challenging issues when designing the current sensor. The A/D converter is followed by additional processing circuits responsible for packing the data into a format suitable for transmission. The transmission module changes the data from electrical into optical format. The block diagram of the APSP circuit described above is presented in Fig. 2.

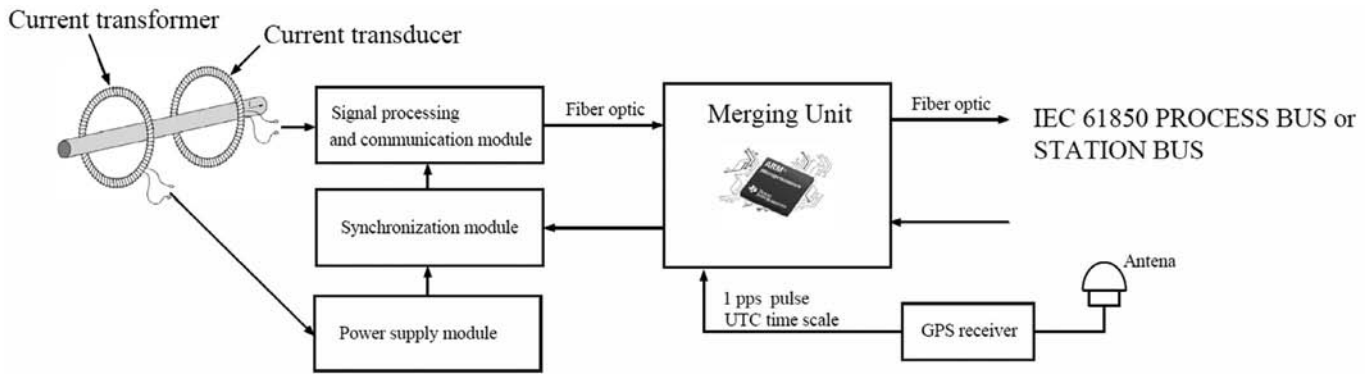


Fig. 1. Block diagram of the intelligent sensor connected to Merging Unit

The analogue output from the current transducer is connected to three operational amplifiers with gains equal to 1, 10 and 100 V/V, which provide the high measurement dynamic range of the sensor [3]. The output from each amplifier is connected to third-order low-pass filter to reduce the maximum frequency spectrum of the signal transmitted to the A/D converter. Each filter section consists of two operational amplifiers connected together in cascades. Signals from the filter block are connected to the 16-bit A/D converter using internal analogue multiplexer. Each channel value is sampled and held, using a common sample clock generated by synchronization module. After the processing, the sampled values are sent to the Merging Unit using fiber optic link. The data are transmitted synchronously with the falling slope of the sampling clock. The transmitted data for each sample consists of 24 bits.

Merging Unit

The Merging Unit module, a device external to the intelligent sensor but vital to its operation, has been designed based on modern 32-bit ARM Cortex A8 MCU. The embedded computer module is equipped with a 512 MB DDRAM, 16 GB NAND Flash memory and runs with 1 GHz clock speed. The Cortex A8 MCU is characterized by low power consumption and large computing

power which is sufficient for seamless operation of the Linux, Android, Windows CE and QNX operating system. The IEC 61850 server has been implemented based on C++ library. The IEC 61850 standard requires high bandwidth and low-latency transmission, especially for the SMV (Sampled Measured Values) service. Therefore, the ARM Cortex A8 was selected as the central unit for the Merging Unit. According to the IEC 61850 specification, data exchange between the Merging Unit and other automation devices over Ethernet should be done by fiber optic links, which provides high resistance to electromagnetic interference and ensures rapid data exchange between nodes. For this purpose in the presented device the Ethernet switch was used. The Ethernet switch converts GMI interface signals from MCU to the 100BaseFL standard and also implements hardware switching between Ethernet ports.

In addition, the Merging Unit module generates synchronization signals for the A/D converter of the intelligent sensor. The signals are obtained from high stability quartz oscillator phase synchronized to 1 pps pulses from GPS receiver.

The samples acquired by the intelligent sensor are successively sent to the MU. Each received sample is tagged with a time-stamp according to UTC time scale. The received data are saved in the IEC 61850 server and are sent through SMV (Sampled Measured

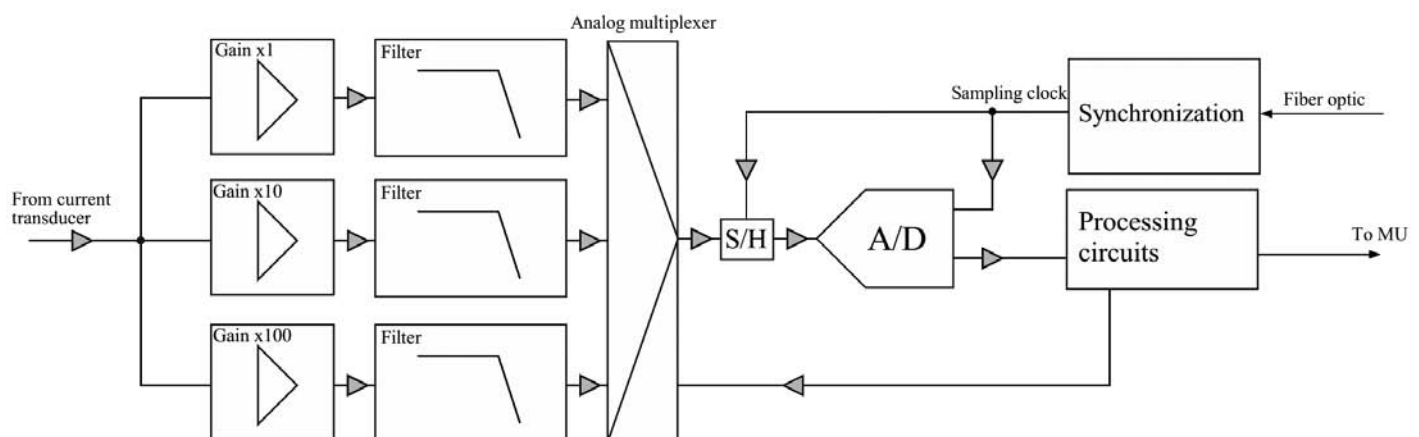


Fig. 2. Block diagram of the signal processing and communication module

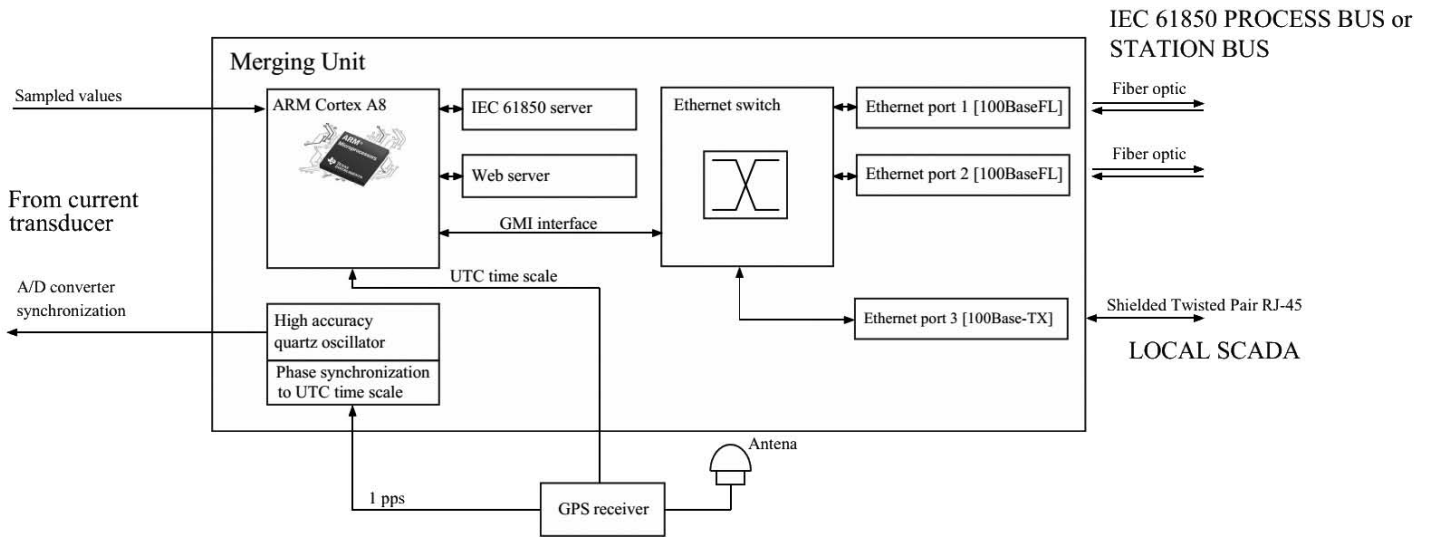


Fig. 3. Block diagram of the MU communication module

Values) service to other devices in the network. In addition, the collected data are displayed by a built-in web server. The unit publishes sampled values according to the multicast sampled values control block 01 (MSVCB01). The Merging Unit can be configured to use either Ethernet port 1 and/or port 2. The block diagram of the circuit described above is presented in Fig. 3.

Power supply module

The main problem in all of the electronic devices is the power supply. In the intelligent current sensors this problems is much more complicated. The sensor is installed over medium voltage cables and requires high voltage isolation between the electrical components and the cables. To resolve this major problem in the described unit the solution that supplies power from the operating currents was selected. The main advantage of this approach is that the supply energy is harvested from the measured currents and no external dedicated supply voltage is needed. This solution makes the unit independent of any power sources and also guarantees high voltage isolation.

Design of the current supply module is a demanding task as the module should work over a wide range of the measured current. The range that can be achieved extends from 1 A to much more than 1000 A. Since the lowest current from that range is sufficient to maintain the operation of the module, the higher current causes excessive power dissipation and thus extensive heating as the voltage across the output of the current transformer increases. The idea of a dissipation energy reducing circuit is presented in Fig. 4. The idea of this mode of operation has been patented [4].

If the current is higher than the optimum, the output of the current transformer is periodically shorted thus minimizing power dissipation. The switch K with very low R_{DS} on-resistance is controlled by an electronic circuit that monitors voltage on an internal storage capacitor C. When the voltage drops below certain threshold, the switch opens and the storage capacitor

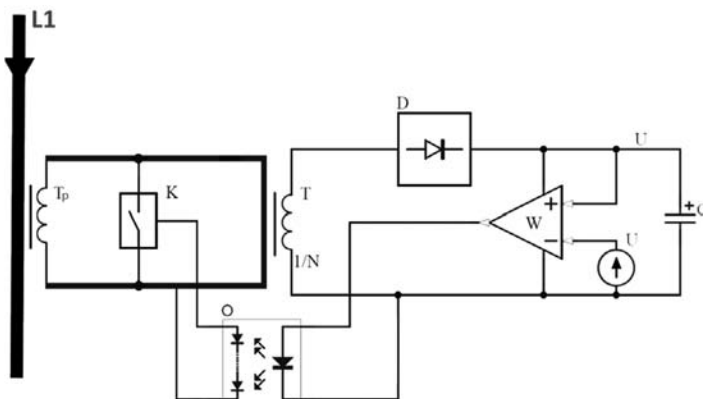


Fig. 4. High current shorting circuit

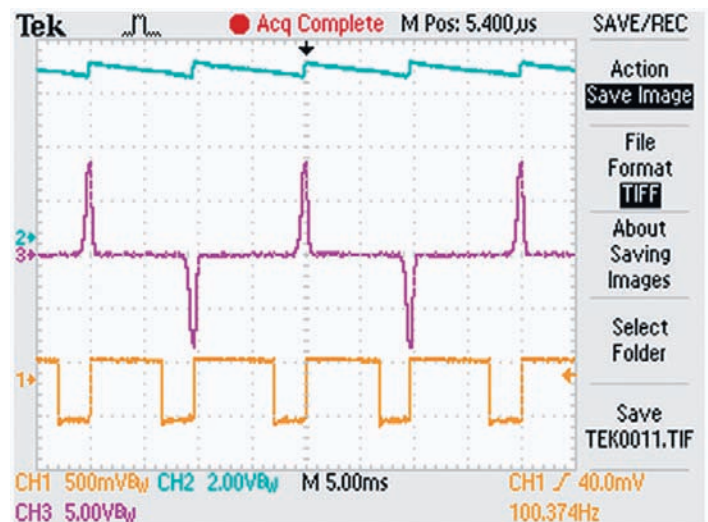


Fig. 5. Circuit waveforms

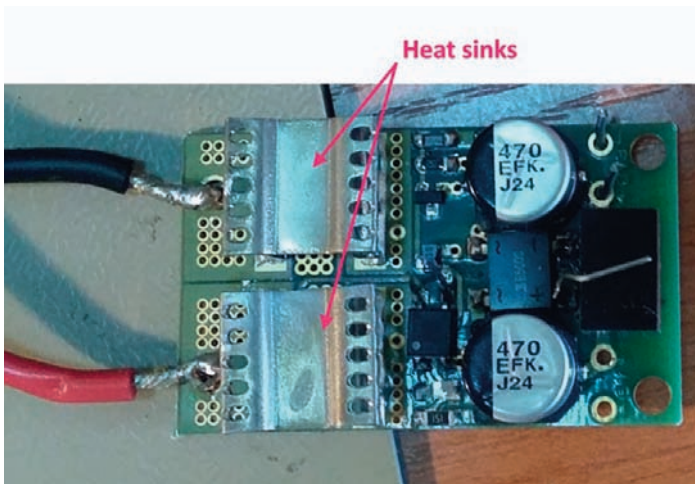


Fig. 6. Current power supply

recharges. The higher the current flowing through the primary current transformer, the shorter the recharge pulses are. The signal waveforms in the circuit have been presented in Fig. 5, where:

blue – voltage on a capacitor C

purple – recharge current pulses

orange – K switch control pulses.

According to the above description the main disadvantage of the proposed solution for current supply is power dissipation in the switch K. It is therefore required to use appropriate methods to dissipate heat such as heat sinks or cooling air circulation. The exemplary construction of a current supply, including heat sinks mounted on the MOSFET switch, has been presented in Fig. 6. The results of the laboratory tests of this model are presented in Tab. 1 and in Fig. 7. The low operating temperature values prove a high efficiency of the energy conversion.

Primary current [A]	Point A	Point B
100	33,2°C	33,1°C
200	33,5°C	40,1°C
300	35,1°C	48,3°C

Tab. 1. Temperatures in selected points (ambient temperature 25°C)

Synchronization module

The intelligent current sensor delivers the measurement data in the form of digital samples synchronized to the UTC time scale. The required accuracy of the synchronization depends on the application that consumes the data. For protection purposes the accuracy of several microseconds is enough while for synchronizers determination the accuracy not worse than 1 μ s is required.

To deliver time-synchronized digital samples of the measured current, the sensor has to be supplied with sampling pulses that have precise time relationship to the UTC time scale. The pulses

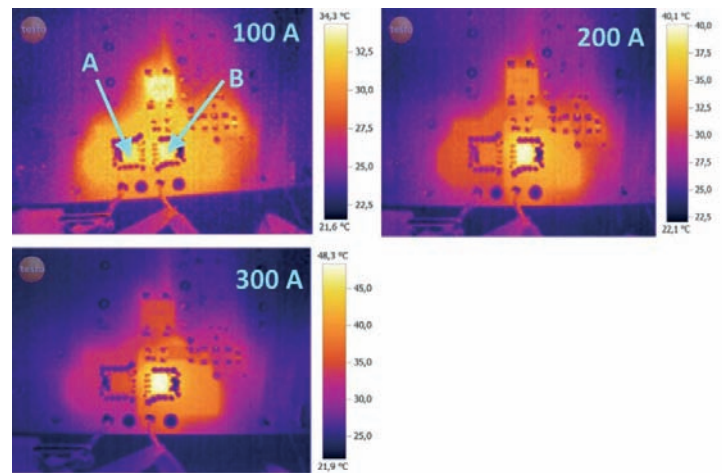


Fig. 7. Temperature layout for 100, 200, 300 A primary current

can be generated externally to the sensor, e.g. in the MU device, or internally if the sensor is supplied with 1 pps pulses from the GPS receiver. There are several methods to generate sampling pulses synchronized to UTC scale. All of them are based on dividing the frequency of a high stability quartz oscillator and some form of synchronization of either the divider or the oscillator or both to the UTC scale.

The simplest circuit, Fig. 8, consists of a high stability quartz oscillator, a counter and a circuit generating a short counter reset pulse at every rising slope of 1 pps pulse from GPS receiver. The frequency of the quartz oscillator, f_q , has to be equal to the integer multiple of the sampling frequency f_s . There are two disadvantages of this circuit. One is that the counter output pulse at the reset instant has a jitter relative to the previous pulse due to the fact that the quartz oscillator is not synchronized to the 1 pps pulse train from GPS receiver. Another disadvantage is that in the absence of 1 pps pulses, the counter output pulses quickly lose their precise time relationship to the UTC scale. With quartz frequency detuned by 10^{-7} from the nominal frequency, just after 10 seconds the accumulated time error of sampling pulses exceeds 1 μ s. The circuit of Fig. 8 can be easily integrated with the APSP provided that a quartz oscillator with small footprint and low power consumption is used, Fig. 9.

The circuit described above can be improved by implementing a quartz oscillator frequency synchronization circuit. Using 1 pps pulses as a time reference it is possible to tune the quartz frequency to the nominal value with accuracy better than 10^{-10} . In the absence of 1 pps pulses, the sampling pulses at the counter output retain their time accuracy relative to UTC scale not worse than 1 μ s for a time period that depends mainly on the temperature and aging coefficient of the oscillator. In practice it is possible to maintain the 1 μ s accuracy for a time period of a few hours. Such a solution demands however a quartz oscillator of very high stability. Oscillators of these type are bulky and draw significant current from the power supply.

The sampling pulses generating circuit that eliminates the jitter of the pulse at the counter reset instant consists of a high stability quartz oscillator that is frequency and phase synchronized to the UTC scale. Such solution demands sophisticated synchronization

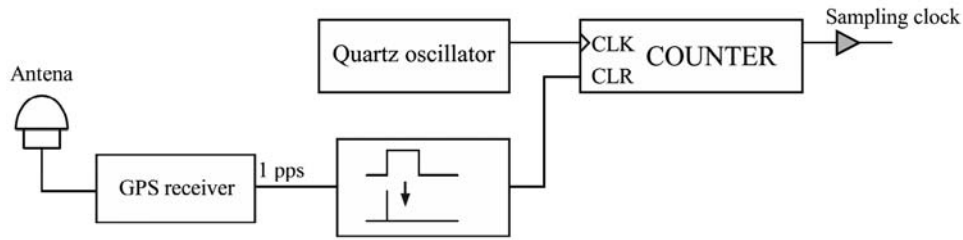


Fig. 8. Block diagram of the synchronization circuit

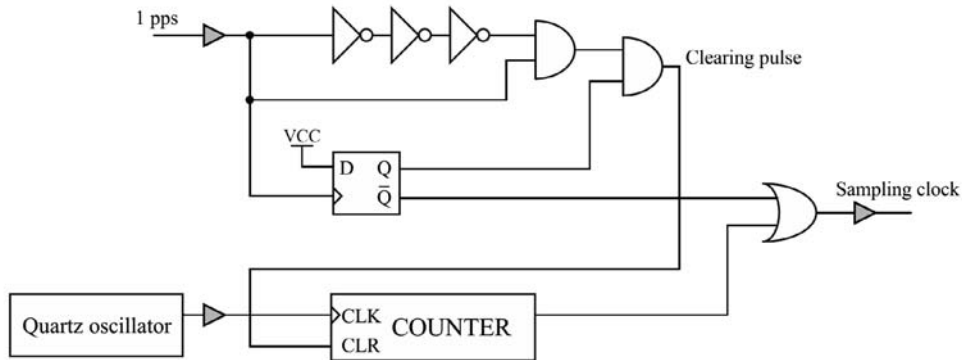


Fig. 9. Exemplary scheme of the synchronization circuit

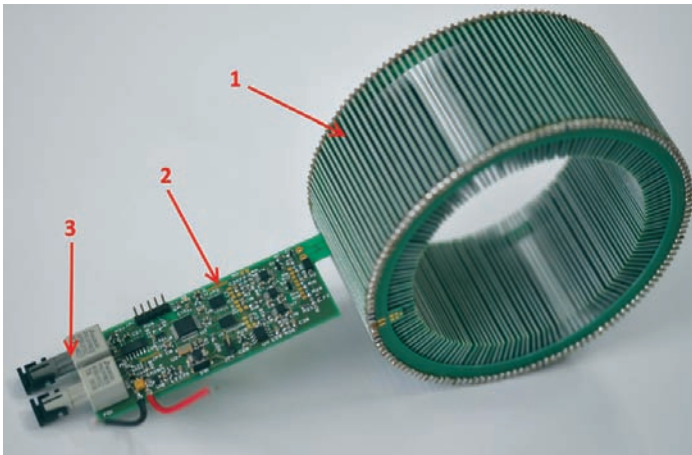


Fig. 10. HDI current transducer with signal processing and communication circuits

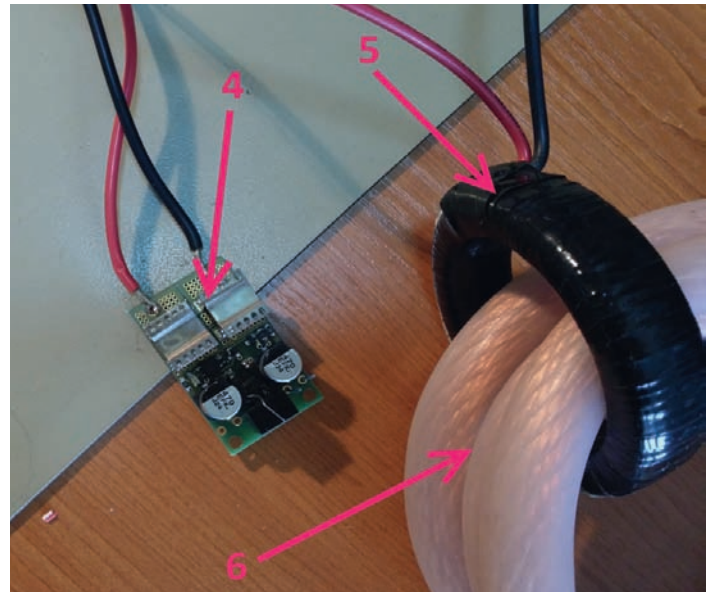


Fig. 11. Power supply module

algorithms. The additional advantage is that the sampling pulses can be precisely shifted in phase relative to 1 pps pulse in order to compensate the delays in the current signal processing path.

Laboratory model of the intelligent current sensor

The laboratory model of an intelligent current sensor, containing the HDI current transducer [2], signal processing and communication circuits, has been presented in Fig. 10, where:

1. HDI current transducer working on Rogowski coil principle
2. signal processing and communication circuits
3. fiber optics connectors.

In Fig. 11 the power supply module, current transformer CT and a test bench current cable have been presented, where:

4. power supply module
5. current transformer CT
6. test bench cable.

The conversion factor (sensitivity) of the HDI current transducer is 4 mV/A and the cut-off frequency is 20 kHz. The power supply provides 0.3 W power and the working current range is from 10 A to 1000 A in terms of the primary side of the current transformer.

The SMV transmitting rate is 10 000 sample/sec. The data that are being sent are compressed into blocks of 8 samples to minimize network bandwidth usage.

Conclusions

The presented new intelligent current sensor is a significant step towards implementing Smart Grid concepts in power networks. The unit is self-powered from the measured current. The current sensor publishes sampled values according to the IEC 61850 SMV service. The presented solution is characterized by a unique method of sampling time synchronization to the UTC time scale. The method is highly resistant to interruptions or absence of 1 pps pulses obtained from GPS receiver or local time publishers. This feature is critical for proper operation of the IED (Intelligent Electronic Device) and also is the key to the safety in the future Smart Grid network.

This work was supported in part by The National Centre for Research and Development in Poland (Project No. PBS1/B4/2/2012).

REFERENCES

1. Lisowiec A., Wpływ konstrukcji cewki Rogowskiego w technologii PCB na dokładność pomiaru prądu, *Przegląd Elektrotechniczny* 2014 nr 7, pp. 199–202.
2. Lisowiec A., Nowakowski A., Parametry częstotliwościowe przetworników prądowych wykonanych w technologii PCB HDI, *Mechanizacja i Automatyza Górnictwa* 2014, nr 5(519), pp. 11–17.
3. Lisowiec A., Kołodziejczyk Z., Wzmacniacz sygnałów wyjściowych przetworników bezrdzeniowych o dużej impedancji wejściowej, *Elektronika* 2014, nr 7, pp. 76–80.
4. Kowalski G., Układ zasilania prądem operacyjnym, Polish patent Pat. 206 274.

Andrzej Nowakowski

Tele & Radio Research Institute, Warsaw

e-mail: andrzej.nowakowski@itr.org.pl

A graduate of Gdańsk University of Technology. His current position is The Deputy Director for Research and Development. He is the author of 150 publications and 25 patents. He has developed many innovative solutions that have been implemented in protection equipment and telecommunication and information systems in power industry.

Paweł Wlazło

Tele & Radio Research Institute, Warsaw

e-mail: pawel.wlazlo@itr.org.pl

Graduate of Warsaw University of Technology, Electronics Department, specialty – automation.

His research interests include: communication and information technologies in power protection and monitoring equipment, used defined logic in bay controllers, smart power grids, industrial and medical measuring and diagnostic equipment.

Head of ICT and Electronics Centre. Author of numerous publications including nine publications in 2014.

Radosław Przybysz

Tele & Radio Research Institute, Warsaw

e-mail: radoslaw.przybysz@itr.org.pl

A graduate of the Electrical Engineering Department of Warsaw University of Technology (2010). Currently an engineer at Tele & Radio Research Institute. He is the author of 15 publications. His main professional interests relate to microcontroller/microprocessor electrical power automation devices, and computer programming.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 48–53. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Inteligentne sensory prądowe jako element sieci Smart Grid

Autorzy

Andrzej Nowakowski
Paweł Włazło
Radosław Przybyśz

Słowa kluczowe

Smart Grid, inteligentny sensor prądu, zasilanie autonomiczne, przetwornik prądowy, synchronizacja czasowa

Streszczenie

Ciągły rozwój systemów teleinformatycznych, zwłaszcza przemysłowych sieci Ethernet wykorzystujących protokołów IEC-61850, pozwala na budowę rozproszonych sieci sensorycznych do kontrolowania i monitorowania chwilowego stanu pracy infrastruktury elektroenergetycznej. W prezentowanej publikacji przedstawiono budowę inteligentnego sensora prądu jako jednostki Measurement Units (MU) sieci Smart Grid. Omówiono budowę poszczególnych bloków sensora oraz sposób synchronizacji przetwornika analogowo-cyfrowego za pomocą wzorcowego sygnału znaczników czasu UTC. Przedstawiona metoda pozwala na synchronizację inteligentnych sensorów prądowych z dokładnością lepszą od 1 μ s. Przedstawiona innowacyjna metoda i układ synchronizacji charakteryzuje się wysokim poziomem odporności na zanik i atak na referencyjny sygnał czasu. Budowa urządzenia pomiarowego MU została oparta na platformie z wbudowanym systemem operacyjnym Linux, a jako element pomiarowy prądu wykorzystano bezbrzdniowy przetwornik pracujący na zasadzie cewki Rogowskiego. Połączenie między przetwornikiem prądowym a jednostką centralną jest wykonane za pomocą łącza światłowodowego. Wbudowany serwer IEC-61850 udostępnia dane o wartościach skutecznych i harmonicznym oraz próbkach sygnału. Zaprezentowane rozwiązanie inteligentnych przetworników prądu oprócz zastosowania jako układu MU daje również nowe możliwości w konstrukcji rozdzielni, m.in. umożliwia umieszczenie autonomicznych sensorów prądowych ze znacznej odległości od innych urządzeń rozdzielni i sterowników polowych.

Wstęp

Nowoczesne inteligentne sensory prądu stopniowo zastępują tradycyjne rozwiązania przekładników prądowych. Sensory budowane w technologii obwodów drukowanych zawierają przetwornik prądowy działający na zasadzie cewki Rogowskiego oraz zintegrowany z nim układ elektroniczny. Przetwornik prądowy charakteryzuje wysoka liniowość przetwarzania, dynamika oraz szerokie pasmo częstotliwości pracy i bardzo duża powtarzalność parametrów elektrycznych. Zintegrowany układ przetwarzania sygnałów, autonomiczny układ zasilania i moduł komunikacji pozwalają na realizację koncepcji Smart Grid, która umożliwia monitorowanie chwilowego stanu pracy sieci elektroenergetycznej. Dane wysłane przez inteligentny sensor są agregowane przez jednostkę zbierania danych (ang. *merging unit*) i po oznaczeniu znacznikiem czasu są dostępne dla inteligentnych urządzeń elektronicznych (ang. *intelligent electronic device*) np.: sterowniki polowe, analizatory jakości energii elektrycznej (ang. *power quality analyzer*) oraz dla urządzeń wyznaczających synchrofazory (ang. *phasor measurement unit*).

Budowa inteligentnego sensora prądu

Na rys. 1 przedstawiono schemat blokowy inteligentnego sensora prądu. Głównymi modułami są: przetwornik prądowy, moduł przetwarzania sygnałów oraz synchronizacji, komunikacji i zasilania. Jednostka zbierania danych również została pokazana, ponieważ inteligentny sensor prądu komunikuje się z nią bezpośrednio. Zasada działania przetwornika prądowego została opisana w [1]. W prezentowanym artykule skupiono się na budowie części elektronicznej sensora.

Moduł przetwarzania sygnałów i komunikacji

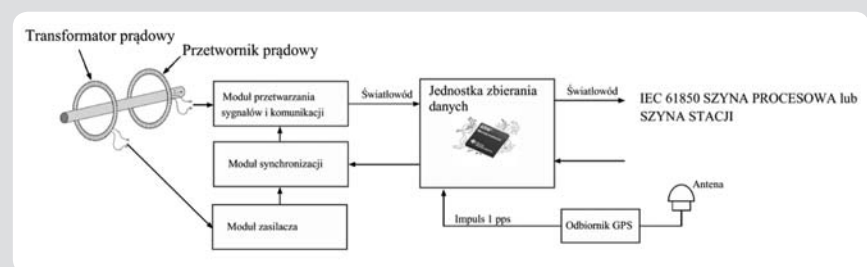
Moduł przetwarzania sygnałów zawiera: filtr antyaliasingowy, wzmacniacz, przetwornik A/C oraz dodatkowy układ formowania danych pomiarowych. Wzmacniacz wejściowy w połączeniu z przetwornikiem A/C musi zapewnić wysoką dynamikę przetwarzania w celu pokrycia całego żadanego zakresu pomiarowego, który może wynosić od pojedynczych amperów do kiloamperów. Zapewnienie odpowiedniej dynamiki przetwarzania jest podstawowym wyzwaniem przy budowie sensora prądu. Przetwornik A/C jest połączony dodatkowo z układem formowania danych pomiarowych do celów transmisyjnych. Moduł transmisji zamienia dane z postaci elektrycznej na postać impulsów świetlnych. Schemat blokowy opisanego powyżej układu APSP przedstawiono na rys. 2.

Wyjście analogowe z przetwornika prądowego jest podłączone do trzech wzmacniaczy operacyjnych o wzmacnieniu 1, 10 i 100 V/V, które zapewniają wysoką dynamikę pomiaru z przetwornika prądowego [3]. Wyjście każdego ze wzmacniaczy jest połączone z wejściem 3-rzędowego filtra dolnoprzepustowego w celu ograniczenia maksymalnego spektrum częstotliwości

sygnału przekazywanego na wejście przetwornika A/C. Każda sekcja filtra zawiera dwa połączone kaskadowo wzmacniacze operacyjne. Sygnał z bloków filtrów jest podłączony do wejścia 16-bitowego przetwornika A/C za pomocą łącza wewnętrznego multiplexera analogowego. Każdy kanał jest próbkowany i zapamiętywany synchronicznie z impulsami zegarowymi generowanymi przez moduł synchronizacji. Po przetworzeniu zapamiętane próbki sygnału są przesyłane do jednostki zbierania danych za pomocą łącza światłowodowego. Dane przesyłane są synchronicznie z opadającym zboczem sygnału zegarowego. Transmitowane dane zawierają 24-bity na każdą próbkę.

Jednostka zbierania danych

Jednostka zbierania danych, będąca zewnętrznym modułem dla inteligentnego sensora, ale pełniącą kluczową rolę dla jego działania, została zaprojektowana w oparciu o nowoczesny 32-bitowy mikroprocesor ARM Cortex A8. Moduł komputera zawiera pamięć DDR o pojemności 512 MB i NAND Flash 16 GB oraz jednostkę centralną działającą z częstotliwością 1 GHz. Mikroprocesor Cortex A8 charakteryzuje małe zapotrzebowanie



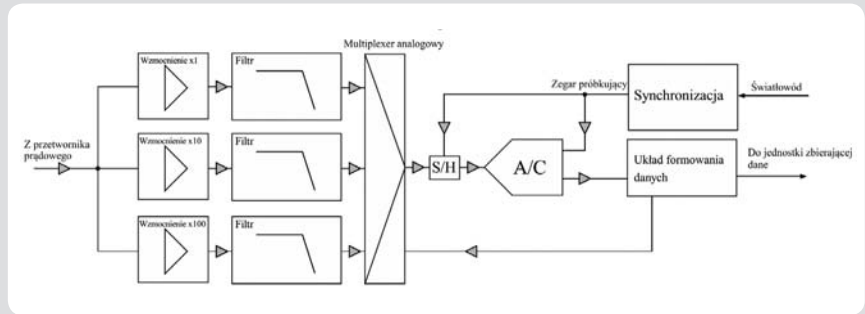
Rys. 1. Schemat blokowy inteligentnego sensora prądu podłączonego do jednostki zbierającej dane

na moc elektryczną oraz duża moc obliczeniowa, która jest wystarczająca do prawidłowego działania systemów operacyjnych Linux, Android, Windows CE oraz QNX. Serwer IEC 61850 został zaimplementowany w oparciu o zewnętrzny bibliotekę języka C++. Standard IEC 61850 wymaga dużej przepustowości łącza oraz krótkich czasów transmisji danych, zwłaszcza dla usługi SMV (ang. *Sampled Measured Values*). Dlatego wybrano mikroprocesor ARM Cortex A8 jako jednostkę centralną modułu zbierania danych. Zgodnie ze specyfikacją IEC 61850, wymiana danych pomiędzy jednostką zbierającą dane i innymi urządzeniami w sieci Ethernet powinna być realizowana przy użyciu łączy światłowodowych, które zapewniają wysoką odporność na zakłócenia elektromagnetyczne oraz szybką wymianę danych między węzłami sieci. W prezentowanym rozwiązaniu wykorzystano do tego celu przełącznik ethernetowy. Przełącznik zamienia sygnały interfejsu GMI mikroprocesora w sygnał optyczny standardu 100BaseFL oraz zapewnia sprzętowe przełączanie portów ethernetowych. Dodatkowo moduł jednostki zbierania danych generuje sygnał synchronizujący dla przetwornika A/C inteligentnego sensora. Sygnał ten jest uzyskiwany z wysokostabilnego oscylatora kwarcowego, synchronizowanego fazowo do impulsów 1 pps odbiornika GPS.

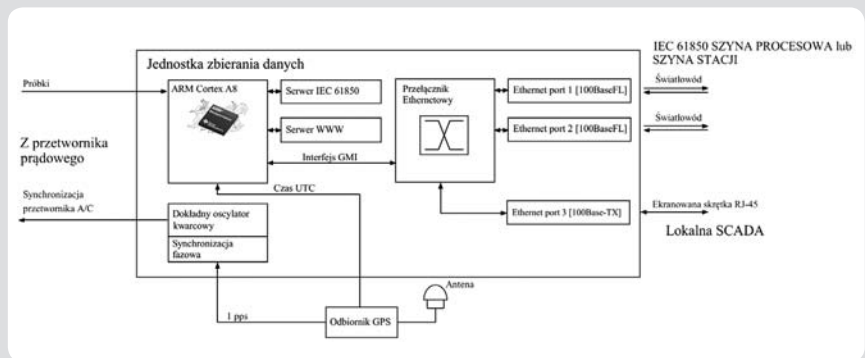
Próbki zebrane przez inteligentny sensor są przesyłane do modułu zbierania danych na bieżąco. Każda odebrana próbka jest oznaczana stemplem czasowym czasu UTC. Odebrane dane są gromadzone w serwerze IEC 61850 i są wysyłane przez usługę SMV (ang. *Sampled Measured Values*) do innych urządzeń w sieci. Dodatkowo zgromadzone dane są wyświetlane przez wbudowany serwer WWW. Jednostka wysyła dane zgodnie z blokiem kontrolnym 01 (MSVCB01). Jednostka zbierania danych w zależności od konfiguracji może używać portu ethernetowego 1 lub 2. Schemat blokowy układu opisanego powyżej przedstawiono na rys. 3.

Moduł zasilania

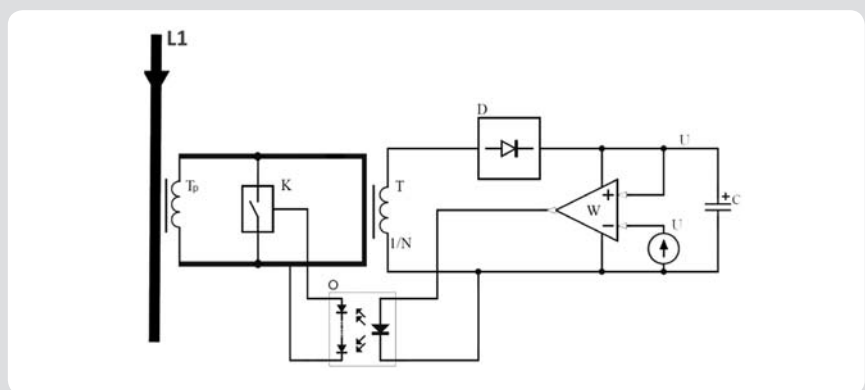
Głównym problemem wszystkich urządzeń elektrycznych jest ich zasilanie. W inteligentnych sensorach prądu ten problem jest bardziej skomplikowany. Sensor jest instalowany nad kablami wysokiego napięcia i wymagane jest zapewnienie wysokiego napięcia izolacji pomiędzy podzespołami elektronicznymi a kablami. Żeby rozwiązać ten poważny problem, w prezentowanym układzie zastosowano zasilacz prądowy, który działa na zasadzie prądów operacyjnych. Główną zaletą tego rozwiązania jest to, że energia potrzebna do działania pozyskiwana jest z prądów mierzonych i nie ma konieczności stosowania dedykowanych zewnętrznych źródeł zasilania. To rozwiązanie jest niezależne od źródeł zasilania oraz zapewnia wysokie napięcie izolacji. Projektowanie zasilacza prądowego jest zadaniem wymagającym. Zasilacz powinien działać w szerokim zakresie prądów mierzonych. Zakres ten powinien wynosić od 1 A do nawet 1000 A. Prąd z dolnego zakresu jest wystarczający do prawidłowego działania zasilacza, ale prąd z górnego zakresu wymaga rozpraszania dużej ilości



Rys. 2. Schemat blokowy układu przetwarzania sygnałów i modułu komunikacyjnego



Rys. 3. Schemat blokowy jednostki zbierającej dane



Rys. 4. Układ zwieracza dużych prądów

mocy, ciepła generowanego wskutek wzrostu napięcia na wyjściu przekładnika prądowego. Pomysł rozwiązania układu zmniejszającego ilość mocy do rozproszenia przedstawiono na rys. 4. Pomysł ten został opatentowany [4]. Kiedy wartość prądu przekroczy wartość optymalną, wyjście przekładnika prądowego jest cyklicznie zwierane, co minimalizuje ilość mocy do rozproszenia. Łącznik K o bardzo małej wartości rezystancji w stanie przewodzenia R_{DS} jest kontrolowany przez układ elektroniczny, który monitoruje napięcie na kondensatorze C. Kiedy napięcie spadnie poniżej wartości progowej, łącznik jest otwierany, a kondensator doładowywany. Im większy płynie prąd po stronie pierwotnej przekładnika, tym węższe impulsy doładowujące są generowane. Przykładowy oscylogram sygnałów układu przedstawiono na rys. 5, gdzie:

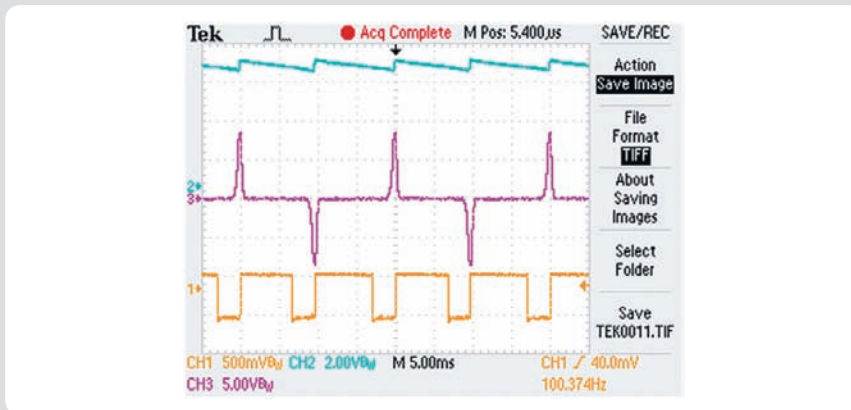
niebieski – napięcie na kondensatorze C

fioletowy – impulsy doładowujące
pomarańczowy – impulsy sterujące łącznikiem K

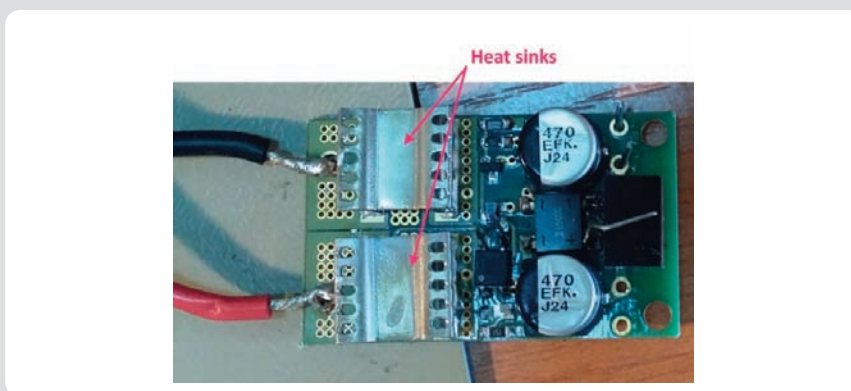
Zgodnie z wyżej przedstawionym opisem, głównym problemem zasilania z prądów jest moc rozpraszana w łączniku K. Wymagane jest zatem zastosowanie odpowiednich metod do rozproszenia powstałego ciepła, np. zastosowanie radiatorów czy wymuszenie ruchu powietrza chłodzącego. Przykładową realizację konstrukcji zasilacza prądowego z zamontowanymi radiatorami na kluczach MOSFET przedstawiono na fot. 1. Wyniki badań laboratoryjnego modelu zasilacza przedstawiono w tab. 1 i na fot. 2. Niska wartość temperatury potwierdza wysoką sprawność przetwarzania energii.

Moduł synchronizacji

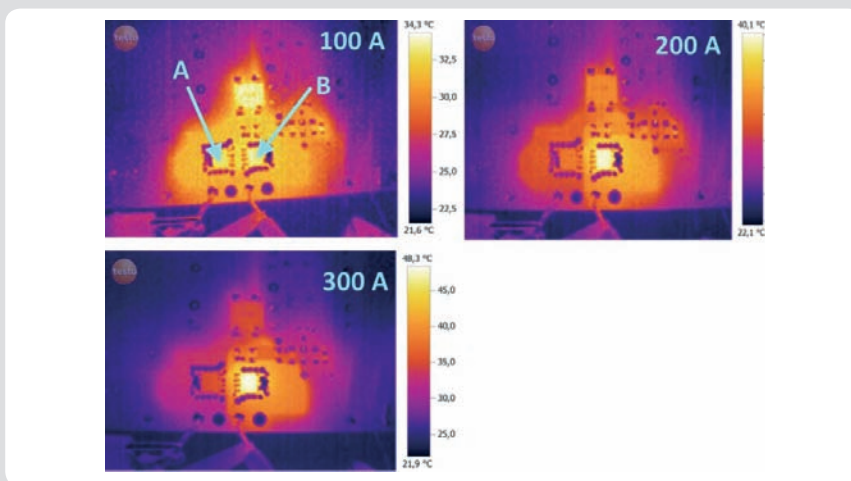
Inteligentny sensor prądu dostarcza dane pomiarowe w postaci cyfrowych próbek



Rys. 5. Oscylogramy układu zasilania z prądów



Fot. 1. Zasilacz prądowy



Fot. 2. Temperatura układu dla 100, 200, 300 A prądu strony pierwotnej

synchronizowanych ze skalą czasu UTC. Wymagana dokładność synchronizacji zależy od aplikacji odbierającej dane. Dla urządzeń zabezpieczeniowych dokładność kilku mikrosekund jest wystarczająca, ale dla układów wyznaczających synchronizację nie może być gorsza niż 1 μ s. Żeby dostarczyć synchronizowaną czasowo cyfrową próbkę mierzonego sygnału, sensor prądowy musi być taktowany precyzyjnym sygnałem zegarowym, synchronizowanym do skali czasu UTC. Sygnał może być generowany zewnętrznie, np. w jednostce

zbierającej dane, lub wewnętrznie, jeżeli sensor jest taktowany sygnałem 1 pps z odbiornika GPS. Jest kilka metod pozwalających na generację impulsów próbkujących, synchronizowanych do skali czasu UTC. Wszystkie one bazują na podziale częstotliwości sygnału pozyskanego z wysokostabilnego oscylatora kwarcowego i synchronizowaniu podzielonego sygnału lub oscylatora do referencyjnego znacznika czasu UTC. Na rys. 6 przedstawiono prosty układ realizujący wyżej opisaną metodę. Układ składa się z wysokostabilnego oscylatora

Prąd strony pierwotnej [A]	Punkt A	Punkt B
100	33,2°C	33,1°C
200	33,5°C	40,1°C
300	35,1°C	48,3°C

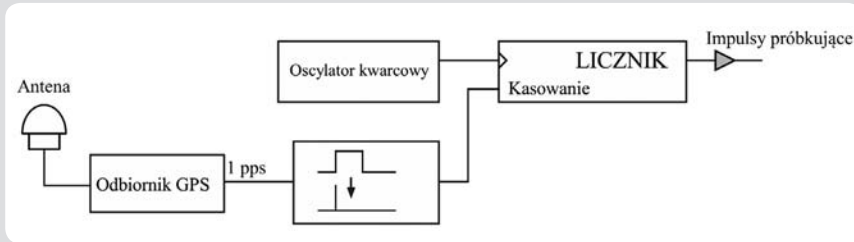
Tab. 1. Temperatura w wybranych punktach (temperatura otoczenia 25°C)

kwarcowego, licznika oraz układu generującego krótki impuls zerujący licznik w momencie narastania zbocza sygnału 1 pps odbiornika GPS. Częstotliwość oscylatora kwarcowego f_0 musi być całkowitą wielokrotnością częstotliwości próbkującej f_s . To rozwiązanie układowe ma dwie wady. Pierwszą jest to, że wyjście licznika w momencie kasowania jest obciążone fluktuacją w relacji do poprzedniego impulsu ze względu na fakt, że generator kwarcowy nie jest zsynchronizowany z sygnałem 1 pps odbiornika GPS. Następną wadą rozwiązania jest fakt, że zanik sygnału 1 pps powoduje szybką utratę synchronizacji sygnału próbkującego. Dla kwarcu o dokładności 10^{-7} w stosunku do częstotliwości nominalnej po 10 sekundach skumulowany błąd odstrojenia fazy częstotliwości próbkującej przekroczy 1 μ s. Zaprezentowany układ z rys. 6 może być w prosty sposób zaimplementowany w APSP. Wystarczy zastosować oscylator kwarcowy w małej obudowie i małym zapotrzebowaniu na energię. Przykładowe rozwiązanie przedstawiono na rys. 7.

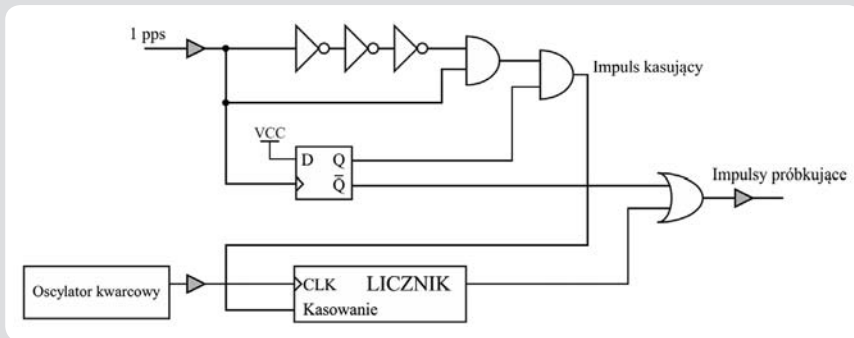
Omówione powyżej rozwiązanie może zostać udoskonalone poprzez dodanie synchronizowanego oscylatora kwarcowego. Użycie impulsów 1 pps jako sygnału referencyjnego pozwala na dostrojenie częstotliwości pracy kwarcu do wartości nominalnej z dokładnością lepszą niż 10^{-10} . W przypadku zaniku sygnału 1 pps impulsy synchronizujące na wyjściu licznika pozostają dostrojone czasowo do skali czasu UTC z dokładnością nie gorszą niż 1 μ s, przez okres zależny głównie od temperatury i współczynnika starzenia oscylatora. W praktyce możliwe jest utrzymanie dokładności 1 μ s przez okres kilku godzin. Takie rozwiązanie wymaga jednak oscylatora kwarcowego o bardzo dużej stabilności. Oscylatory tego typu są duże i wymagają znacznego prądu zasilania. Impulsy generowane z opisanego układu nie wykazują fluktuacji w momencie zerowania licznika, ponieważ wysokostabilny oscylator kwarcowy jest synchronizowany częstotliwościowo i fazowo do czasu UTC. Opisane rozwiązanie wymaga jednak skomplikowanych algorytmów synchronizacji. Dodatkową zaletą jest to, że impulsy próbkowania mogą być precyzyjnie przesunięte w fazie w relacji do impulsów 1 pps, w celu skompensowania opóźnienia przetwarzania sygnału w torze pomiarowym.

Laboratoryjny model inteligentnego sensora prądu

Na fot. 10 przedstawiono laboratoryjny model inteligentnego sensora prądu. Sensor składa się z przetwornika prądowego HDI [2], układu przetwarzania sygnałów oraz modułu komunikacji:



Rys. 6. Schemat blokowy układu synchronizacji



Rys. 7. Przykładowy schemat układu synchronizacji

1. przetwornik prądowy HDI, działający na zasadzie cewki Rogowskiego
2. moduł komunikacji oraz przetwarzania sygnałów
3. łącza światłowodowe.

Na fot. 4 przedstawiono moduł zasilacza wraz z przekładnikiem prądowym CT oraz kabel testowy:

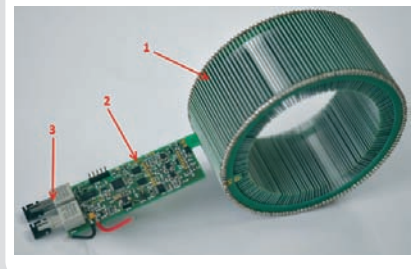
4. moduł zasilacza
5. przekładnik prądowy CT
6. kabel testowy.

Współczynnik przetwarzania (czułość) przetwornika prądowego HDI wynosi 4 mV/A, a pasmo częstotliwości pracy 20 kHz. Moduł zasilacza dostarcza 0,3 W mocy i pracuje w zakresie prądów od 10 A do 1000 A w odniesieniu do strony pierwotnej przekładnika prądowego. Częstotliwość wysłania danych SMV wynosi 10 000 próbek/s. Dane wysyłane są w paczkach po 8 próbek każda, w celu minimalizacji wykorzystania przepustowości pasma sieci.

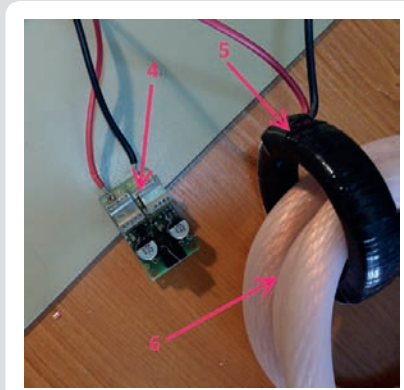
Podsumowanie

Zaprezentowany nowy inteligentny sensor prądu jest znaczącym krokiem w realizacji koncepcji Smart Grid w sieci elektroenergetycznej. Sensor wykorzystuje energię pobraną z prądów mierzonych do własnego zasilania. Sensor prądu wysyła dane zgodnie z protokołem IEC 61850 i usługą SMV. Zaprezentowane rozwiązanie charakteryzuje się unikatową metodą synchronizacji częstotliwości próbkowania do skali czasu UTC. Metoda ta jest bardzo odporna na przerwy i zanik sygnału 1 pps pozyskiwanego z odbiorników GPS lub lokalnego generatora czasu. Ta właściwość jest krytyczna dla poprawnego działania inteligentnych urządzeń (ang. *intelligent electronic device*) oraz jest kluczem do bezpieczeństwa w przyszłych sieciach Smart Grid.

Ta praca powstała w ramach projektu (PBS1/B4/2/2012) finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.



Fot. 3. Model laboratoryjnego inteligentnego sensora prądu



Fot. 4. Moduł zasilania

Bibliografia

1. Lisowiec A., Wpływ konstrukcji cewki Rogowskiego w technologii PCB na dokładność pomiaru prądu, *Przegląd Elektrotechniczny* 2014, nr 7, s. 199–202.
2. Lisowiec A., Nowakowski A., Parametry częstotliwościowe przetworników prądowych wykonanych w technologii PCB HDI, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa* 2014, nr 5(519), s. 11–17.
3. Lisowiec A., Kołodziejczyk Z., Wzmacniacz sygnałów wyjściowych przetworników bezdrzewiowych o dużej impedancji wejściowej, *Elektronika* 2014, nr 7, s. 76–80.
4. Kowalski G., Układ zasilania prądem operacyjnym, patent: Pat. 206 274.

Andrzej Nowakowski

dr hab. inż., prof. nadzw. ITR

Instytut Tele- i Radiotechniczny w Warszawie

e-mail: andrzej.nowakowski@itr.org.pl | www.itr.org.pl

Absolwent Politechniki Gdańskiej. Pracuje na stanowisku zastępcy dyrektora Instytutu ds. Badawczo-Rozwojowych. Autor ok. 150 publikacji i 25 patentów oraz wielu nowatorskich rozwiązań wdrożonych w energetyce z zakresu mikroprocesorowych urządzeń EAZ i systemów teleinformatycznych.

Paweł Wlazło

mgr inż.

Instytut Tele- i Radiotechniczny w Warszawie

e-mail: pawel.wlazlo@itr.org.pl | www.energetyka.itr.org.pl

Absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Warszawskiej (1993), kierunku automatyka. Autor wielu publikacji naukowych, w tym 9 opublikowanych w 2014 roku. Jego zainteresowania zawodowe obejmują: zagadnienia związane z teleinformatyką urządzeń EAZ, logiką użytkownika w sterownikach polowych, sieciami Smart Grid, a także przemysłową i medyczną aparaturą pomiarową oraz diagnostyczną. Pracuje na stanowisku kierownika Centrum Teleinformatyki i Elektroniki.

Radosław Przybysz

mgr inż.

Instytut Tele- i Radiotechniczny w Warszawie

e-mail: radoslaw.przybysz@itr.org.pl | www.energetyka.itr.org.pl

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej (2010). Pracuje na stanowisku badawczo-technicznym w Instytucie Tele- i Radiotechnicznym. Autor 15 publikacji. Jego zainteresowania zawodowe obejmują: zagadnienia związane z budową mikroprocesorowych układów automatyki i zabezpieczeń sieci elektroenergetycznych oraz programowania komputerów.