

TOMASZ WĘGIEL, MACIEJ SUŁOWICZ, DARIUSZ BORKOWSKI*

REALIZACJA SYSTEMU POMIAROWEGO DO ZDALNEJ OCENY SILNIKÓW INDUKCYJNYCH

MEASURING SYSTEM IMPLEMENTATION FOR REMOTE TESTING OF INDUCTION MOTORS

Streszczenie

W pracy przedstawiono praktyczną realizację systemu pomiarowego przeznaczonego do zdalnej oceny silników indukcyjnych. Aplikacja ta bazuje na idei rozproszonych systemów pomiarowych w których wykorzystano separowaną podsieć LAN dla urządzeń pomiarowych oraz Internet. Zaproponowane rozwiązanie składa się z trzech warstw: warstwy urządzeń pomiarowych, warstwy sieciowej, warstwy zarządzania. Najważniejszym elementem warstwy urządzeń pomiarowych jest instalowane w pobliżu silnika autonomiczne urządzenie pomiarowe z interfejsem Ethernet (SAMPLER). W skład warstwy sieciowej wchodzi wszystkie elementy służące do przesyłu pakietów za pomocą stosu TCP/IP. W skład warstwy zarządzania wchodzi Pomiarowy Serwer WWW oraz Pomiarowy Serwer FTP wraz pomiarową bazą danych. Zadaniem Pomiarowego Serwera WWW jest komunikowanie się z poszczególnymi urządzeniami pomiarowymi oraz zbieranie z nich danych w sposób zaplanowany lub wymuszony ręcznie w przez użytkownika.

Słowa kluczowe: Akwizycja danych, Diagnostyka uszkodzeń, Sterowanie rozproszone, Silniki indukcyjne

Abstract

In this paper, the practical realization of the measuring system implementation for remote testing of induction motors is presented. Thus application is based on the idea of distributed measuring systems, in which the separated LAN measuring devices sub-network and the Internet are utilised. The proposed solution is composed of three layers: measuring devices layer; network layer; management layer. The most important element of the measuring devices layer is an installation beside the motor, next to the measuring converter, a measuring device with the Ethernet interface (data collector – SAMPLER). The network layer comprises of all elements used for data package transmission, using the TCP/IP stack. For the adopted assumption regarding the Ethernet interface and used UTP connections there is a possibility of building a measuring network in the star topology for the distances between the measured device and the closest Switch up to 100 m. The management layer consists of WWW Measuring Server and the FTP Measuring Server, together with the database of measurement data. The WWW Measuring Server is used to communicate with the particular measuring devices and to collect data from those devices in a planned manner or in an override mode. The pilot version of such system, developed at Cracow University of Technology is installed in one of the Polish power plants.

Keywords: Data acquisition, Fault diagnosis, Distributed control, Induction motors

* Dr inż. Tomasz Węgiel, dr inż. Maciej Sułowicz, mgr inż. Dariusz Borkowski, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Przy obecnych tendencjach w przemyśle, gdzie do najważniejszych celów przedsiębiorstw można zaliczyć: obniżanie kosztów produkcji, poprawę niezawodności pracy urządzeń w procesie technologicznym, podniesienie efektywności produkcji oraz innych czynników techniczno-ekonomicznych, zasadnym staje się poświęcenie znacznie większej uwagi badaniom profilaktyczno-diagnostycznym.

Monitoring i diagnostyka stanu maszyn podczas normalnej eksploatacji są ważnymi elementami poprawiającymi niezawodność pracy całego układu napędowego i rzutującymi na efektywność procesów technologicznych.

W celu umożliwienia przedsiębiorstwom realizacji wyżej wymienionych celów, należy dla ich potrzeb zaprojektować, wykonać i wdrożyć system sprawujący nadzór nad eksploatacją urządzeń i obiektów pracujących w układach napędowych.

Wyposażanie napędów, nie tylko tych odpowiedzialnych, w systemy monitoringu i diagnostyki stanu prowadzi do istotnej redukcji kosztów obsługi technicznej oraz umożliwia znalezienie optymalnych metod i programów remontów. Poprzez okresową ocenę stanu technicznego możliwe staje się wykrycie i śledzenie powstawania różnego rodzaju uszkodzeń. Wczesne wykrycie niekorzystnych zjawisk zachodzących w układzie pozwala unikać długotrwałych zakłóceń procesu technologicznego wywołanych przez awarię maszyn, kosztownych remontów oraz umożliwia właściwe zaplanowanie przeglądów okresowych.

Z reguły układy napędowe posiadają systemy zabezpieczeń i sygnalizacji, które ostrzegają przed niewłaściwymi stanami pracy napędu oraz powodują jego wyłączenie w przypadkach wystąpienia awarii lub krytycznych warunków pracy. Z łatwością można stwierdzić, że taki sposób kontroli stanu napędu jest niewystarczający. Należy znacznie większą uwagę poświęcić samej maszynie i objąć ją badaniami profilaktyczno-diagnostycznymi na bieżąco w czasie rzeczywistym („on-line”) w trakcie normalnej pracy. Czynności te powinny dostarczać operatorowi napędu informacji o stanie technicznym maszyny. W przypadku wystąpienia uszkodzenia, dzięki działaniom diagnostycznym, będzie można łatwo określić jego rodzaj, miejsce i zakres. Dzięki ciągłemu monitorowaniu stanu technicznego maszyny elektrycznej, możliwe jest wykrywanie uszkodzeń we wczesnym stadium ich powstawania.

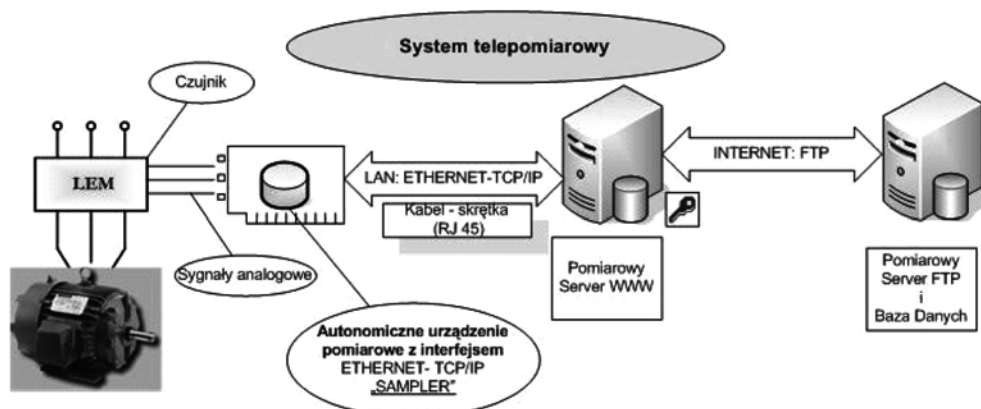
Mechaniczne (pojawienie się ekscentryczności), jak też elektryczne (lokalny wzrost rezystancji) niesymetrie mają z reguły charakter stopniowy i rozwijają się wraz z upływem czasu pracy maszyny w układzie napędowym. Fakt ten stwarza szerokie pole działania dla zadań monitoringu i diagnostyki profilaktycznej jej stanu. Badaniami diagnostycznymi maszyna powinna być objęta praktycznie od chwili zainstalowania w napędzie.

Tematyka pracy wynika z wzrastającego zapotrzebowania na bezinwazyjną diagnostykę układów napędowych głównych ciągów technologicznych w zakładach przemysłowych różnych branż. Bezinwazyjność związanych z tym działań jest jednym z kluczowych warunków, gdyż wyłączanie układów napędowych lub ich elementów w celach przeglądu wiąże się z przerwami w produkcji, a awarie powodują ogromne straty. Podstawowym elementem współczesnych układów napędowych ze względu na niskie koszty zakupu i eksploatacji są silniki asynchroniczne klatkowe. Bezinwazyjna diagnostyka tych maszyn jest możliwa w oparciu o analizę widmową podstawowych sygnałów, takich jak prądy faz stojana, napięcia zasilające oraz drgania na obudowach łożysk, które są bardzo łatwo dostępne pomiarowo w warunkach normalnej eksploatacji. Użycie w celu wykonywania po-

miarów w sposób zdalny specjalizowanego systemu telepomiarowego, który wykorzystuje technologie przemysłowych sieci LAN, Internetu i baz danych, wydaje się być rozwiązaniem najbardziej optymalnym [1–6].

2. Rozproszony System Telepomiarowy

Proponowana w pracy realizacja rozproszonego system pomiarowego ma być niezależna ze względów bezpieczeństwa od istniejącego już systemu zarządzania oraz sterowania urządzeniami zainstalowanymi w zakładzie przemysłowym. Dlatego też przedstawiona koncepcja (rysunek 1) będzie oparta o odseparowaną podsieć, wykorzystującą technologię sieci LAN, Internet i serwery baz danych do gromadzenia danych pomiarowych i wzorców diagnostycznych [2-4].



Rys. 1. Struktura systemu telepomiarowego do zdalnej diagnostyki i monitoringu w oparciu o sieci LAN i Internet

Fig. 1. Tele-measuring system structure for remote diagnosis and monitoring based on LAN and Internet networks

Struktura systemu składa się z trzech warstw: warstwy zarządzania, warstwy sieciowej (komunikacyjnej) i warstwy urządzeń pomiarowych.

Najważniejszym elementem warstwy urządzeń pomiarowych jest instalowane przy silniku, obok czujnika pomiarowego (przetwornik pomiarowy LEM), urządzenia pomiarowego z interfejsem Ethernet o roboczej nazwie „SAMPLER”. Urządzenie to zostało wyprodukowane przy współpracy autorów pracy z firmą TOMAK z Krakowa.

W skład warstwy sieciowej wchodzi wszystkie elementy służące do przesyłu pakietów za pomocą stosu TCP/IP. Elementami tej warstwy są wspomniane wcześniej sieci lokalne oraz Internet. Dla przyjętego założenia, odnośnie do interfejsu Ethernet i stosowanych połączeń UTP (dla warstwy urządzeń pomiarowych), istnieje możliwość budowy sieci pomiarowych w topologii gwiazdy przy odległościach do 100 m pomiędzy obiektem pomiarowym a najbliższym Switchem.

W skład warstwy zarządzania wchodzi Pomiarowy Serwer WWW oraz Pomiarowy Serwer FTP wraz pomiarową bazą danych. Sterowanie pracą tej warstwy jest zależne od Centrum Diagnostycznego, w którym znajduje się, oprócz Pomiarowego Serwera FTP i bazy danych, cały system wnioskowania diagnostycznego. Pomiarowy Serwer WWW, którego pracę nadzoruje również Centrum Diagnostyczne, znajduje się natomiast w lokalnej podsięci urządzeń pomiarowych. Zadaniem Pomiarowego Serwera WWW jest komunikowanie się z poszczególnymi urządzeniami pomiarowymi oraz zbieranie z nich danych w sposób zaplanowany (o ściśle określonej porze dnia) lub wymuszony ręcznie w danej chwili przez użytkownika. Następnie zebrane dane z silników (już w postaci plików binarnych) są przesyłane do Pomiarowego Serwera FTP znajdującego się w Centrum Diagnostycznym, gdzie będzie odbywać się analiza i ocena diagnostyczna zebranych sygnałów. Zwrotnie do osób odpowiedzialnych za utrzymanie obiektów napędowych będzie trafiać wynik oceny w formie e-maila, SMS-a lub innego sygnału informacyjnego.

Autonomiczne urządzenie pomiarowe z interfejsem Ethernet – „SAMPLER”

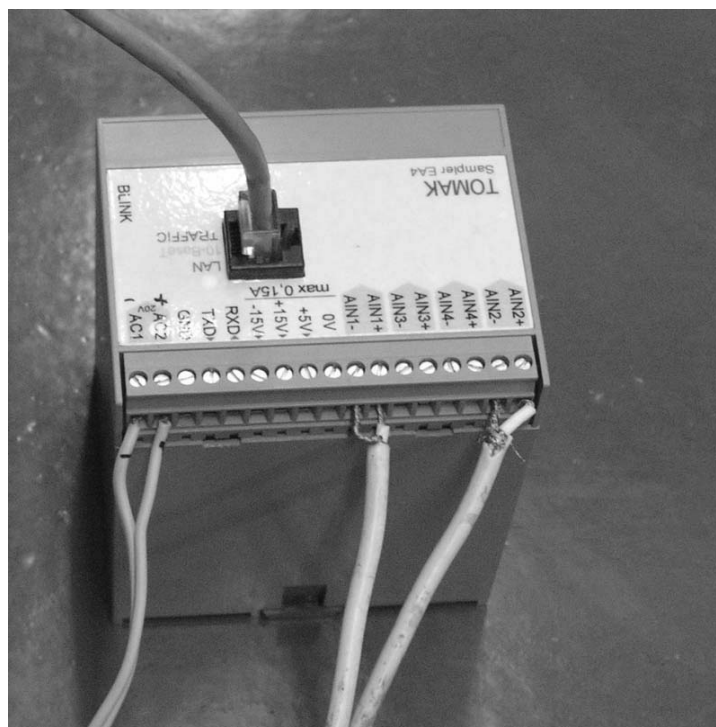
Urządzenie pomiarowe „SAMPLER” (rysunek 2) jest pomostem pomiędzy czujnikami mierzącymi prąd (przetwornik – LEM) a Pomiarowym Serwerem WWW. Dzięki temu urządzeniu istnieje możliwość zbierania danych z czujników pomiarowych. Sterowanie procesem akwizycji odbywa się na zasadzie wymiany komend sterujących w formie zleceń HTTP pomiędzy Serwerem Pomiarowym WWW a Wbudowanym Serwerem WWW urządzenia.

Podstawowymi elementami urządzenia „SAMPLER” są:

- przetworniki A/C,
- mikrokontroler (wraz z zarządzającym oprogramowaniem),
- kontroler LAN (z obsługą TCP/IP) i interfejsem Ethernet,
- pamięć RAM/Flesz,
- Wbudowany Serwer WWW.

Projektanci urządzenia zakładali, że musi ono być jak najtańsze ze względu na konkurencyjność w stosunku do dostępnych na rynku podobnych urządzeń. Stąd też do jego budowy użyto mikrokontrolera AVR ATMEGA 128L firmy Atmel. Jako interfejs Ethernet wykorzystywany jest kontroler CS8900A firmy Cypress Semiconductor, pracujący z prędkością 10 Mbit/sek. Jako przetwornik A/C użyto AD7654 firmy Analog Devices. Jest to 16-bitowy jednoczesny dwukanałowy przetwornik o częstotliwości 500 kSPs, pozwalający stworzyć cztery niezależne kanały próbkowania. Jako rozszerzenia pamięci użyto Data-Flash AT45DB161B firmy Atmel o pojemności 16 Mb. Dzięki tej pamięci istnieje możliwość przechowania pobieranych danych. Tak więc powstało autonomiczne urządzenie przetwarzające napięciowy sygnał analogowy na cyfrowy z interfejsem Ethernet o roboczej nazwie „SAMPLER”. Nasze urządzenie może zbierać dane z czterech kanałów pomiarowych (przy czym z dwóch jednocześnie; zakres napięć wejściowych: 5..0..+5 V, rozdzielczość przetwornika A/C: 16 bitów) z częstotliwością próbkowania 10 kHz w czasie 10 sek., a następnie udostępniać je do zdalnego pobrania przez użytkownika poprzez protokół TCP/IP. W urządzeniach „SAMPLER” wszelkie usługi realizowane są przez serwer (HTTP). Zaletą tego rozwiązania jest możliwość sterowania urządzeniem za pomocą dowolnej przeglądarki internetowej. Dzięki wskazaniu w przeglądarce adresu IP urządzenia,

użytkownik może zobaczyć jego interfejsową stronę WWW, która pozwala zmieniać ustawienia konfiguracyjne urządzenia, zapoczątkować proces pomiarowy, zobaczyć status wykonywanych pomiarów, jak również pobrać udostępnione przez wbudowany serwer ostatnio wykonane dane pomiarowe.



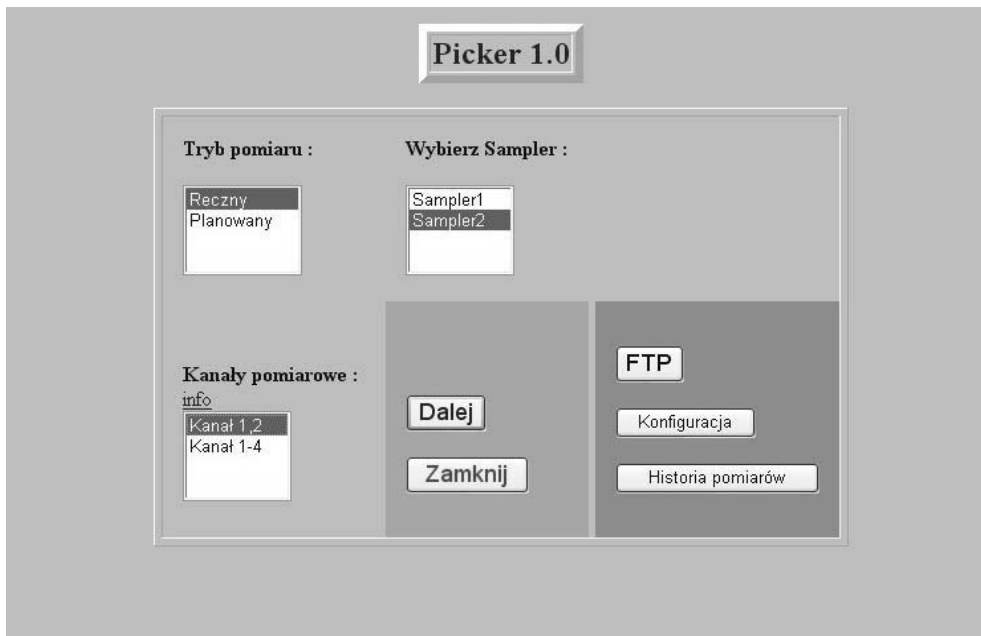
Rys. 2. Autonomiczne urządzenie pomiarowe „SAMPLER”

Fig. 2. Stand-alone measuring device “SAMPLER”

Pomiarowy serwer WWW

Specjalistyczne oprogramowanie sieciowe (Pomiarowy Serwer WWW o roboczej nazwie PICKER 1.0) zostało opracowane na potrzeby telediagnostyki i obsługi urządzeń typu „SAMPLER”. Jego podstawowym zadaniem jest zarządzanie urządzeniami pomiarowymi poprzez sieć Ethernet. Umożliwia ono przede wszystkim zdalne sterowanie urządzeniem (pomiar) bezpośrednio przez ręczne załączenie lub przez zaplanowanie (określenie dokładnej daty i godziny) wykonania pomiaru. Daje ono również możliwość obejrzenia zebranych danych tuż po pomiarze (wykres czasowy). Dzięki zaimplementowanej funkcji komunikacji z dowolnym serwerem FTP, istnieje możliwość wysłania danych pomiarowych na serwer, przeglądania zawartości serwera i podglądnięcia zapisanych tam wcześniej danych. W skład oprogramowania wchodzi również wbudowany skaner, który umożliwia wyszukanie aktywnych urządzeń pomiarowych. Główną częścią oprogramowania a zara-

zem jego interfejsem, jest strona WEB (rysunek 3), a więc do prawidłowego działania wymagany jest serwer (np. darmowy Apache), na którym będzie umieszczony kod programu. Oprogramowanie zostało napisane w języku PHP i korzysta dodatkowo z plików wykonywalnych (EXE) oraz bibliotek dołączanych dynamicznie (DLL). Zalecane jest, aby powyższy serwer znajdował się w jednej podsieci z urządzeniami pomiarowymi. Do obsługi programu od użytkownika wymagana jest jedynie przeglądarka stron WWW (taka jak np. Internet Explorer, Mozilla Firefox, Netscape itp). Dostęp do programu jest chroniony, a wejście na stronę główną możliwe jest po wprowadzeniu loginu i hasła.



Rys. 3. Przykładowa strona główna Serwera Pomiarowego WWW

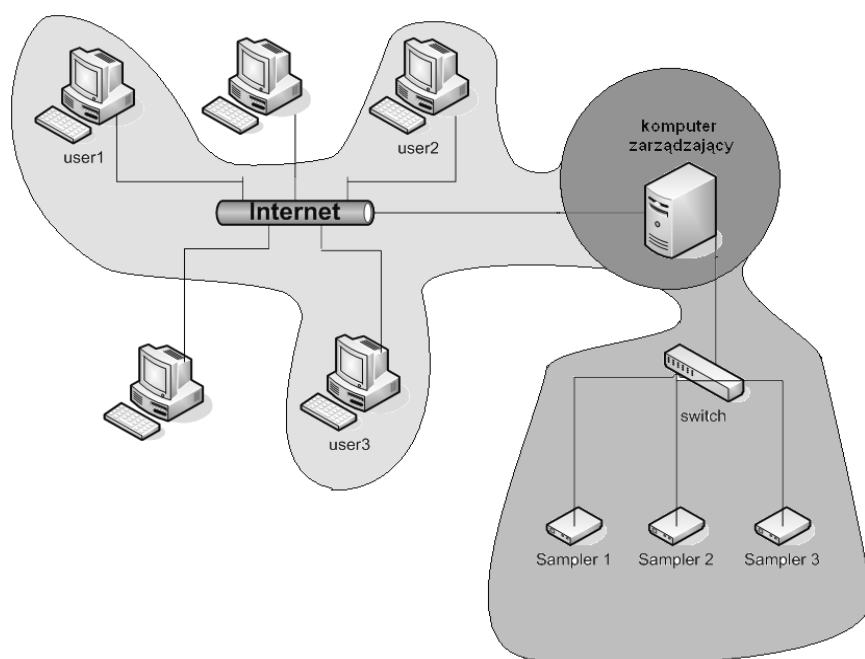
Fig. 3. An example of main web page get from Measuring Server WWW

3. Praktyczna realizacja systemu pomiarowego

3.1. Struktura sieciowa systemu pomiarowego

System składa się z sieci ethernetowej, do której przyłączony jest serwer, czyli komputer zarządzający pomiarami, posiadający fizycznie dwie karty ethernetowe. Jedna karta jest podłączona do sieci internetowej, druga zaś do wewnętrznej sieci poprzez przełącznik sieciowy „Switch”, do którego z kolei podłączone są „SAMPLERY” (rysunek 4). Praca systemu bazuje na technologii wirtualnych sieci VPN. W skład naszej sieci VPN wchodzi wszyscy użytkownicy systemu i komputer nadzorujący.

Komputer nadzorujący nie posiada ze względów bezpieczeństwa zewnętrznego adresu IP, nie jest on więc widoczny dla użytkowników Internetu. Dostęp do niego jest możliwy tylko po zainstalowaniu programu, który umożliwia utworzenie sieci wirtualnej oraz podłączenie się do niej. Przykładem takiego programu może być „Hamachi”. Komputer nadzorujący oraz użytkownicy tworzą więc w naszym rozwiązaniu wirtualną sieć LAN dzięki temu programowi. Każdy użytkownik posiada nowy adres IP, przypisany do wirtualnej karty ethernetowej. Zarówno użytkownicy systemu, jak i komputer nadzorujący mogą znajdować się w niezależnych sieciach (podsięciach) i nie posiadać zewnętrznego IP (wskazane ze względów bezpieczeństwa). Warunkiem koniecznym do działania wirtualnej sieci jest dostęp do Internetu wszystkich jej użytkowników.

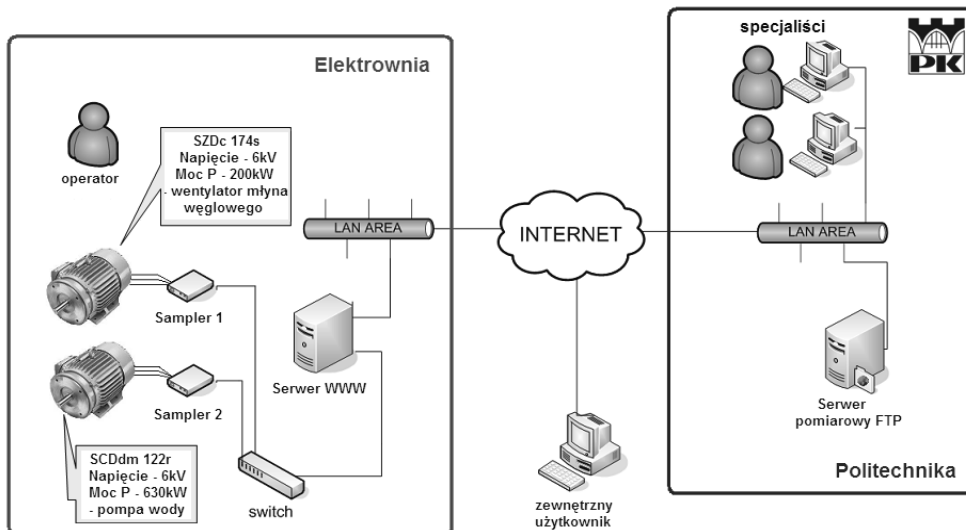


Rys. 4. Struktura fizyczna i wirtualna sieci

Fig. 4. Physical and virtual structure of network

3.2. Instalacja elementów systemu w rzeczywistości

Działanie systemu poddano testom w warunkach przemysłowych dla jednej z elektrowni pracującej na południu Polski. Ciągłym monitoringiem stanu w systemie objęto dwa silniki asynchroniczne napędzające odpowiednio: wentylator młyna węglowego SZDc 174 s o mocy 200 kW oraz pompę wody SCD dm 122 r o mocy 630 kW. Po wytypowaniu silników, dla których będą prowadzone ciągłe badania diagnostyczne za pomocą systemu, dokonano rozeznania możliwości instalacji elementów składowych systemu. Struktura zainstalowanego systemu oparta została na dwóch odrębnych sieciach lokalnych: elek-



Rys. 5. Struktura systemu zainstalowanego w elektrowni

Fig. 5. Structure of implemented system in a power plant

rowni i Politechniki Krakowskiej połączonych Internetem. Do lokalnej sieci elektrowni został dołączony system pomiarowy składający się z czujników pomiarowych LEM, urządzeń „SAMPLER”, „Switcha” łączącego dwa segmenty sieci komputerowej oraz serwerów.

Po stronie Politechniki podłączono serwer FTP służący do zbierania i przechowywania pomiarów. Na rysunku 5 przedstawiono strukturę sieciową zainstalowanego systemu pomiarowego. Zestawione powyżej elementy pozwoliły na uruchomienie systemu pomiarowego i transmisję danych na serwer FTP znajdujący się na Politechnice Krakowskiej.

Zarówno czujniki pomiarowe LEM, jak i urządzenie „SAMPLER” zostały zainstalowane w szafie pomiarowo-sterującej w polach rozdzielczych, co przedstawiono na rysunku 6. Następnie połączono obydwa urządzenia „SAMPLER” do „Switcha”, tworząc autonomiczną sieć pomiarową w rozdzielni WN. „Switch” umieszczono w zamkniętej obudowie w jednym z wolnych pól rozdzielczych. Z rozdzielni, gdzie zainstalowano urządzenia pomiarowe i zbudowano autonomiczną sieć pomiarową, wyprowadzono kanałami kablowymi kabel sieciowy – skrętkę STP klasy F (kategoria 7) – do pomieszczenia nastawni. Łączna długość ułożonej skrętki w kanałach kablowych wynosiła około 80 metrów. Skrętkę wprowadzono w pomieszczeniu nastawni i zakończono gniazdem RJ-45. W pomieszczeniach nastawni umieszczono w zamkniętej obudowie specjalny komputer pomiarowy, będący również serwerem WWW (komputer zarządzający pomiarami). Na czas uruchomienia i konfiguracji systemu do komputera podłączono monitor i inne urządzenia zewnętrzne, które pozwoliły wykonać prace serwisowe.

Elementy składowe systemu telepomiarowego są widoczne w miejscach zakreślonych kółkiem na rysunku 6. Widok jednego urządzenia „SAMPLER” wraz z czujnikami LEM znajduje się na rysunku 7.

Po prawidłowym skonfigurowaniu wszystkich zmiennych systemowych i przeprowadzeniu testowych pomiarów można było odłączyć urządzenia zewnętrzne i pozostawić system w wersji bezobsługowej w elektrowni.

Przykładowe wyniki pomiarów i wstępnych analiz sygnałów diagnostycznych zarejestrowanych dla pracujących silników przedstawiono na rysunkach 9 i 10.



Rys. 6. Instalacja system pomiarowy w elektrowni

Fig. 6. Application of measuring system in a power plant

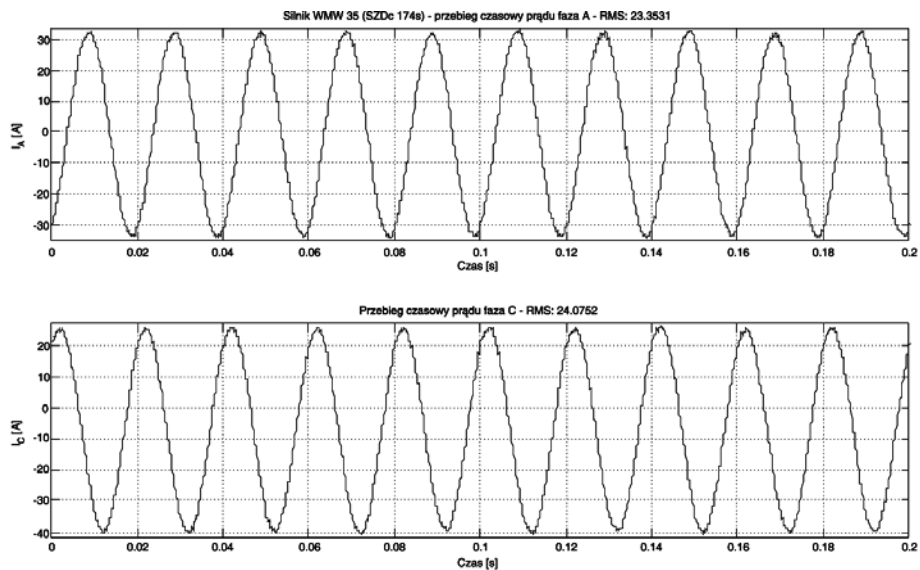
Na podstawie zaawansowanych analiz widma prądu dokonywana jest ocena stanu klatki wirnika dla silników objętych stałym monitoringiem. Po kilkumiesięcznej eksploatacji systemu stwierdzono pogorszenie się stanu klatki wirnika w jednym z monitorowanych silników.



Rys. 7. Urządzenie pomiarowe „SAMPLER” z osprzętem
Fig. 7. Measuring device “SAMPLE” with equipment

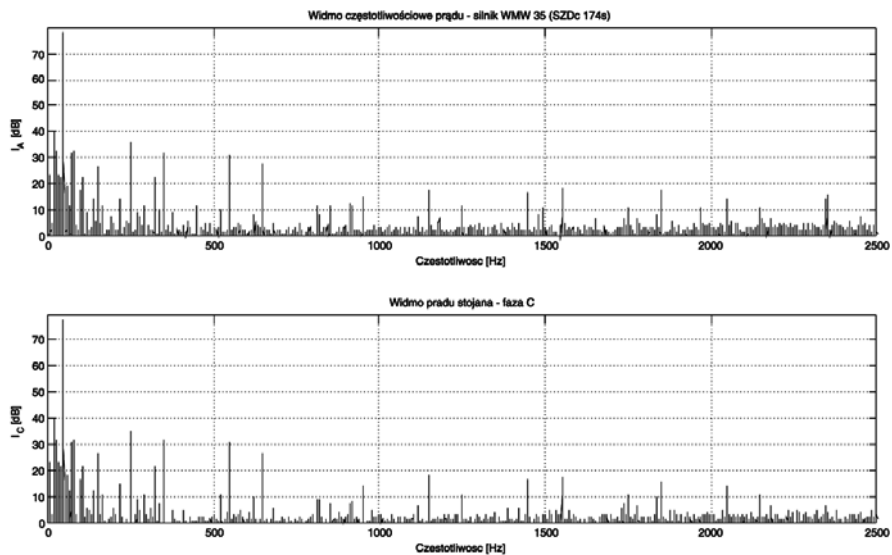


Rys. 8. Konfiguracja elementów rozproszonego systemu pomiarowego
w pomieszczeniu sterowni
Fig. 8. Configuration of distributed measuring system elements in control room



Rys. 9. Przebiegi czasowe prądów dla silnika WMW 35 zarejestrowane za pomocą urządzenia „SAMPLER”

Fig. 9. Time waveform of currents for motor WMW 35 registered by „SAMPLER” device



Rys. 10. Widma prądu dla silnika WMW35 dla sygnałów zarejestrowane za pomocą urządzenia „SAMPLER”

Fig. 10. Spectrum of currents of motor WMW 35 for signals recorded by „SAMPLER” device

4. Podsumowanie

Realizacja przedstawionego systemu była możliwa dzięki szybkiemu postępowi w rozwoju relatywnie taniej technologii, umożliwiającej budowę rozproszonych komputerowych systemów pomiarowych. Technologia ta pozwala na zbudowanie systemu diagnostycznego, który wcześniej wykryje niekorzystne zjawiska zachodzące w silniku, umożliwi uniknięcie długotrwałych zakłóceń procesu technologicznego, wywołanych przez awarię maszyny, oraz pomoże z wyprzedzeniem właściwie zaplanować działania remontowo-eksploatacyjne.

Literatura

- [1] Sobczyk T.J., Węgiel T., Sułowicz M., Warzecha A., Weinreb K., *A distributed system for diagnostics of induction motors*, Proceedings of IEEE Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED'2005, Vienna 7-9.09.2005.
- [2] Sułowicz M., Węgiel T., *System telediagnostyczny dla silników indukcyjnych klatkowych*, Proceedings of XLII International Symposium on Electrical Machines, SME'2006, Kraków 3-6.07.2006, 283-286.
- [3] Węgiel T., Sułowicz M., Borkowski D., *Rozproszony system akwizycji sygnałów diagnostycznych dla silników indukcyjnych*, Zeszyty Problemowe BOBRME, nr 77, Katowice 2007, 71-76.
- [4] Węgiel T., Sułowicz M., Borkowski D., *Centrum diagnostyczne do zdalnej oceny stanu silników indukcyjnych*, Zeszyty Problemowe BOBRME, nr 77, Katowice 2007, nr 77, 77-82.
- [5] Sobczyk T.J., Węgiel T., Sułowicz M., Borkowski D., *Realization of the distributed diagnostics system for induction motors*, Proceedings of XLIII IS-SME, 43th International Symposium on Electrical Machines, Poznań 2-5.07.2007, 61-62.
- [6] Węgiel T., Sułowicz M., Borkowski D., *A Distributed System of Signal Acquisition for Induction Motors Diagnostic*, Proceedings of SDEMPED 2007, Cracow 6-8.09.2007, 261-265, and CD – paper sf-0021, IEEE Xpolre.