1. Robert SZULIMI[1], 2. Ryszard RYBSKI[1], 3. Leszek FURMANKIEWICZ[1], 4. Mirosław KOZIOŁ[1]

Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki (1)
ORCID: 1. 0000-0001-6331-0629; 2. 0000-0003-2445-4480, 3. 0000-0001-5990-3341, 4. 0000-0001-5039-2004

doi:10.15199/48.2024.12.29

Laboratorium zdalnych pomiarów z interfejsem World Wide Web

Streszczenie. *W artykule zaprezentowano projekt systemu umożliwiającego dokonywanie zdalnych pomiarów z wykorzystaniem modułów pomiarowych Digilent Analog Discovery oraz opracowanego oprogramowania dla użytkownika końcowego. Omówiono założenia systemu umożliwiającego uruchomienie środowiska pomiarowego wykorzystującego przeglądarkę WWW z poziomu użytkownika oraz odpowiednio przygotowany system informatyczny umożliwiający nadzorowanie pomiarów zdalnie. W systemie położono duży nacisk na zagadnienia bezpieczeństwa pracy w sieci Internet.*

Abstract*. The paper presents the project of a system enabling remote measurements using Digilent Analog Discovery measurement modules and appropriately prepared end-user software. The assumptions of the system enabling the preparation of a measurement environment using a web browser from the user's level and a properly prepared IT system enabling the supervision of measurements remotely, will be discussed. In the system security issues were considered very seriously. (****Remote measurement laboratory using World Wide Web interface****).*

Słowa kluczowe: zdalne laboratoria, zdalne pomiary, bezpieczeństwo, aplikacje internetowe.
Keywords: remote laboratories, remote measurements, security, web applications.

Wstęp

Dzięki ciągłemu rozwojowi różnych technik internetowych obecnie możliwe jest przeprowadzanie eksperymentów zdalnie, co sprzyja realizacji kształcenia na odległość oraz prowadzenia badań naukowych. W zakresie kształcenia na odległość stosowane są dwa rozwiązania zależne od właściwości fizycznych laboratorium. Są to laboratoria wirtualne lub laboratoria zdalne [1]. W laboratorium wirtualnym fizyczny system zastępuje się jego modelem, a w laboratorium zdalnym rzeczywisty system jest obsługiwany i kontrolowany zdalnie za pomocą pewnego interfejsu. W [1, 2] przedstawiono szereg zalet, jak również wad obu rozwiązań. Wirtualne laboratorium można wdrożyć, gdy znany jest model matematyczny zjawiska lub obiektu, co stanowi duże ograniczenie. W tym przypadku wymagane jest przygotowanie odpowiedniego oprogramowania i umożliwienie dostępu do tego oprogramowania dla użytkownika zdalnego. Stworzenie laboratorium zdalnego wymaga przygotowania systemu hybrydowego składającego się z oprogramowania i aparatury oraz umożliwienie dostępu do tego systemu. Realizacja laboratoriów zdalnych wymaga większych nakładów finansowych, dodatkowo wdrożenie takiego laboratorium jest kłopotliwe, gdy jego działanie wymaga kontrolowania ruchów mechanicznych. Oba rozwiązania od wielu lat są szeroko stosowane w edukacji inżynierskiej [3, 4, 5]. Pandemia COVID-19 spowodowała wzrost zainteresowania i realizacji systemów laboratoriów wirtualnych i zdalnych [6, 7, 8, 9]. W prezentowanych w literaturze systemach laboratoriów zdalnych występują różnice w sposobie dostępu użytkownika zdalnego do stanowisk laboratoryjnych. W [9, 10] zaprezentowano zdalne systemy do badania sensorów prądu i sensorów przemieszczenia liniowego. W tych hybrydowych systemach aplikacja sterująca zainstalowana jest na komputerze w laboratorium. Obsługa tych systemów jest możliwa za pomocą tej aplikacji lokalnie oraz zdalnie poprzez mechanizm zdalnego pulpitu Google. W [11] zaprezentowano rozwiązanie, w którym użytkownik zdalny łączy się do systemu hybrydowego za pomocą dowolnej platformy zdalnej (np. Zoom, Teams, itp.). Wykorzystane mogą być także rozwiązania dostarczane przez producentów oprogramowania, jak tzw. zmienne sieciowe [12].

W niniejszym artykule przedstawiono problematykę bezpieczeństwa pracy w sieci Internet oraz rozwiązanie systemu pozwalającego na realizację zdalnego laboratorium, który jest obsługiwany za pomocą przeglądarki WWW i odpowiednio przygotowanego systemu informatycznego umożliwiającego nadzorowanie pomiarów zdalnie.

Problematyka bezpieczeństwa pracy w sieci

Podczas pracy w laboratorium zdalnym bardzo ważne są aspekty zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa. W zależności od sposobu realizacji połączenia Internetowego z zasobami w laboratorium istnieje wiele ważnych problemów, które należy rozwiązać. Jednym z często stosowanych sposobów udostępniania stanowiska laboratoryjnego do pracy zdalnej jest użycie tzw. pulpitu zdalnego. Jest to dobrze znany mechanizm umożliwiający przejęcie kontroli nad komputerem zdalnym przez użytkownika połączonego przez sieć Internet. Użytkownik po podłączeniu do pulpitu z użyciem odpowiedniego oprogramowania uzyskuje dostęp do funkcji komputera tak, jakby przy nim fizycznie pracował. Jest to bardzo wygodne i łatwe do uruchomienia środowisko pracy.

Niestety istnieje wiele zagrożeń związanych z takim sposobem pracy. Użytkownik zdalny otrzymuje dostęp do komputera, który zazwyczaj jest również dołączony do sieci LAN w danej instytucji np. uczelni lub szkole. W sieci LAN mogą również pracować komputery i urządzenia, do których normalnie nie ma dostępu przez sieć Internet. Zatem użytkownik zdalny uzyskuje dostęp do wielu narzędzi w systemie operacyjnym, które pozwalają mu przejrzeć zasoby sieci lokalnej, czyli np. jakie komputery pracują w sieci, czy te komputery udostępniają swoje zasoby w sieci, jakie to zasoby itp. Istnieje więc zagrożenie uzyskania nieautoryzowanego dostępu do zasobów komputerowych w sieci lokalnej przez osoby trzecie. Użytkownik zdalny może skopiować w łatwy sposób zasoby, które są udostępnione tylko w sieci lokalnej. Jeśli udostępnione zasoby nie są zabezpieczone użytkownik zdalny może je również zmienić lub skasować.

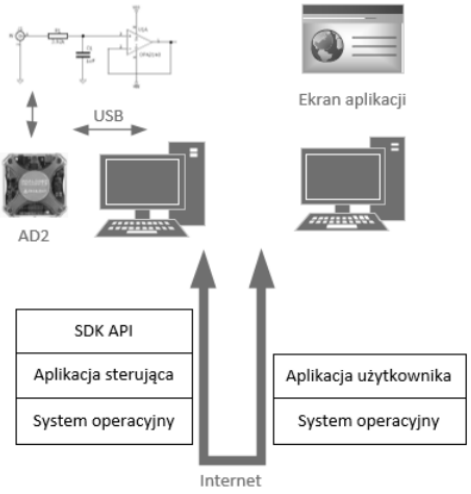
Kolejne zagrożenie, które niesie używanie pulpitu zdalnego to możliwość zainfekowania komputerów w sieci przez wirusy komputerowe. Za pomocą mechanizmów pulpitu zdalnego można również kopiować pliki z komputera zdalnego, na którym pracuje użytkownik, do komputera udostępniającego swój pulpit. Można w ten sposób skopiować również zainfekowane pliki zawierające wirusy komputerowe, trojany i inne szkodliwe oprogramowanie. Użytkownik zdalny może nawet nieświadomie doprowadzić do zainfekowania komputera zdalnego, ponieważ nie zdaje sobie sprawy, że używane przez niego oprogramowanie zawiera wirusy.

Oczywiście istnieje możliwość ograniczenia dostępu do udostępnionych zasobów na innych komputerach, jednak wymaga to dużego doświadczenia w administrowaniu zasobami komputerowymi. Niestety w wielu przypadkach użytkownicy w sieci lokalnej nie przywiązują dużej wagi do tego, jakie zasoby udostępniają i nie zastanawiają się nad tym, że mogą one zostać przejęte w nieautoryzowany sposób. Użytkownicy często nie używają oprogramowania antywirusowego lub jest ono nieaktualne. Często systemy antywirusowe i ściany ogniowe są wyłączane, ponieważ utrudniają użycie różnego typu oprogramowania stosowanego w komputerze. Użytkownik często nie wie, jak skonfigurować oprogramowanie typu ściana ogniowa, żeby nie blokowało użycia określonego programu, ale wie, jak to oprogramowanie wyłączyć i tak często się dzieje. Autorzy artykułu zaobserwowali stosowanie tego typu praktyk podczas zajęć ze studentami w laboratoriach. W laboratorium, gdzie znajduje się wiele stanowisk laboratoryjnych trudno jest kontrolować poziom zabezpieczeń wszystkich komputerów i urządzeń w sieci. Osoby prowadzące zajęcia często nie posiadają odpowiedniego doświadczenia w tym zakresie. Omawiane w dalszej części artykułu rozwiązanie całkowicie eliminuje opisane problemy.

Założenia budowy systemu

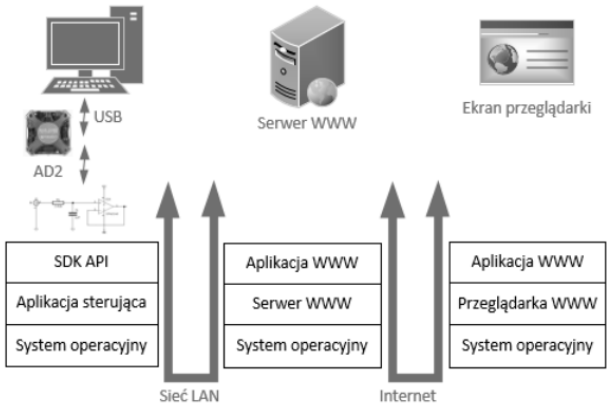
Podstawowym założeniem jest zbudowanie systemu pozwalającego uniknąć użycia rozwiązań bazujących na zdalnym pulpicie. Jest to możliwe do uzyskania na wiele sposobów. Niektóre nowoczesne urządzenia pomiarowe posiadają możliwość nadzoru ich pracy przez sieć Internet, jednak nie jest to powszechnie spotykane rozwiązanie. Wiele urządzeń może być kontrolowane z poziomu komputera za pomocą interfejsu komunikacyjnego, jak USB lub RS232. Takie urządzenia nie mogą być podłączone bezpośrednio do sieci komputerowej i zarządzane zdalnie. W celu wykorzystania tego typu urządzeń pomiarowych do pracy zdalnej należy podłączyć je do komputera, przygotować odpowiednie, specjalizowane oprogramowanie umożliwiające z jednej strony komunikację z nimi, a z drugiej (wykorzystując zasoby komputera) komunikację przez Internet. Producenci urządzeń często udostępniają specjalny zestaw oprogramowania ułatwiający realizację komunikacji w aplikacji użytkownika z urządzeniem w postaci tzw. SDK (ang. Source Development Kit). Podczas projektowania tego typu oprogramowania należy wziąć pod uwagę specyfikę pracy w sieci Internet. Oprogramowanie w takim przypadku będzie się składać z modułu programowego działającego na komputerze połączonym z danym urządzeniem pomiarowym, z którym ma współpracować. Drugi moduł programowy pozwalający na kontrolowanie działania systemu powinien zostać uruchomiony na komputerze użytkownika. Moduły muszą komunikować się przez sieć Internet. Jest to zadanie możliwe do rozwiązania na wiele sposobów i pozwala na szybkie zrealizowanie projektu, ale niestety posiada wiele wad. Podstawową wadą jest konieczność bezpośredniej komunikacji modułów programowych, co pokazano na rysunku 1. Moduł sterujący może pracować w roli serwera a moduł aplikacji użytkownika w roli klienta. Praca systemu wymaga użycia publicznego adresu IP dla komputera pełniącego rolę serwera oraz użycia wybranego portu komunikacyjnego. Jeśli w danym laboratorium zaistnieje konieczność umożliwienia pracy na kilku takich stanowiskach, wymagane będzie przydzielenie adresów publicznych dla każdego komputera. Kolejnym ograniczeniem może być użycie portu komunikacyjnego, który może być blokowany w sieci przez urządzenia typu ściana ogniowa. Komputery posiadające publiczne adresy IP są narażone na ataki z sieci Internet. Powinny być one zabezpieczone przed nieautoryzowanym dostępem przez odpowiednie ustawienia systemu i oprogramowania, co wymaga sporego doświadczenia.

Współcześnie większość komputerów pracujących w tego typu środowisku nie jest bezpośrednio dołączane do sieci Internet, ale pracują w sieci Intranet używając usługi NAT dla dostępu do sieci Internet. Komputery pracujące w sieci Intranet z usługą NAT nie umożliwiają połączenia z sieci Internet. Jest to z jednej strony ograniczenie a z drugiej strony to rozwiązanie pozwala na zwiększenie poziomu bezpieczeństwa komputerów. W przypadku tego typu konfiguracji rozwiązanie bazujące na komunikacji bezpośredniej nie będzie możliwe do uruchomienia. Rozwiązaniem, które umożliwi dostęp do komputera pracującego w sieci Intranet jest zastosowanie sieci wirtualnej, tzw. VPN. Pozwala ona na zestawienie połączenia między dwoma komputerami, jednak bardzo często polityka bezpieczeństwa pracy w sieci w danej instytucji wyklucza instalowanie tego typu rozwiązań.



Rys.1. System z komunikacją bezpośrednią

Rozwiązaniem, które pozwoli na uniknięcie opisanych ograniczeń jest użycie architektury z komunikacją pośrednią, co przedstawiono na rysunku 2.



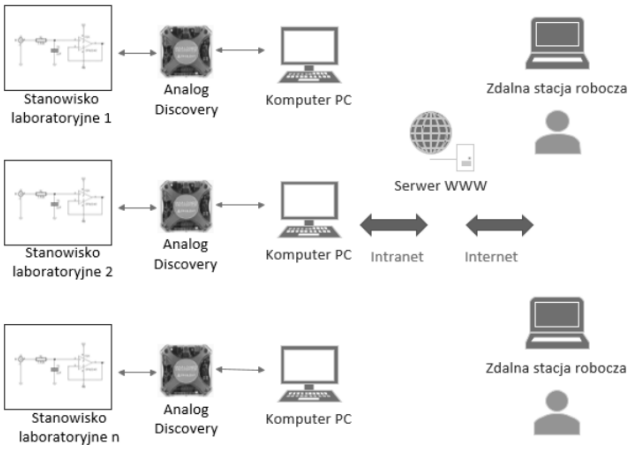
Rys.2. System z komunikacją pośrednią

W tym przypadku komputer zdalny łączy się do serwera, który pracuje z publicznym adresem IP i jest dostępny w sieci Internet i może również pełnić rolę serwera WWW. W laboratorium znajduje się komputer nadzorujący pracę urządzeń pomiarowych, który pracuje w sieci Intranet i nie jest bezpośrednio dostępny w sieci Internet, ale może się łączyć do komputera serwera WWW. Interfejs użytkownika aplikacji w tym przypadku możliwy jest do uruchomienia

jako aplikacja internetowa w postaci strony WWW w przeglądarce użytkownika. Aplikacja komunikuje się z serwerem WWW, który pracuje jako pośrednik w komunikacji między systemem pomiarowym a użytkownikiem. W dalszej części artykułu zostanie omówione rozwiązania opracowane na potrzeby realizacji zajęć w laboratorium pomiarów sygnałów z wykorzystaniem komunikacji pośredniej i interfejsu WWW.

Realizacja systemu

Opracowany system, którego architekturę przedstawiono na rysunku 3, przygotowany jest do pracy z wieloma stanowiskami laboratoryjnymi, które mogą być nadzorowane przez użytkowników zdalnie z pomocą przeglądarek WWW. Na potrzeby pracy z przeglądarką system wykorzystuje tylko jeden serwer WWW.

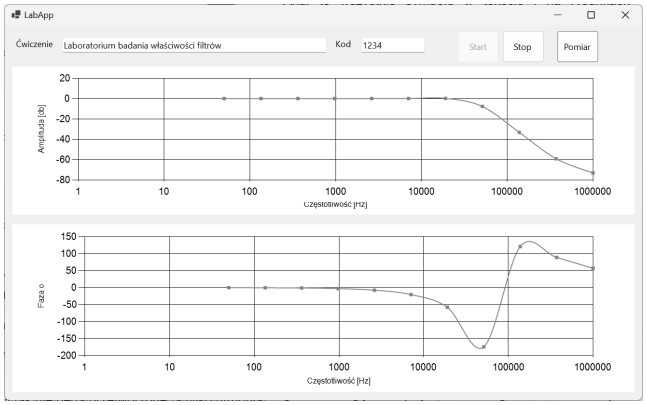


Rys.3. Architektura systemu

Możliwe jest uruchomienie wielu stanowisk laboratoryjnych. Każde z nich realizuje zadania pomiarowe i sterujące z wykorzystaniem modułu Digilent Analog Discovery (AD) [13]. Każde stanowisko składa się z komputera PC dołączonego do sieci lokalnej oraz modułu AD.

Oprogramowanie stanowiska laboratoryjnego

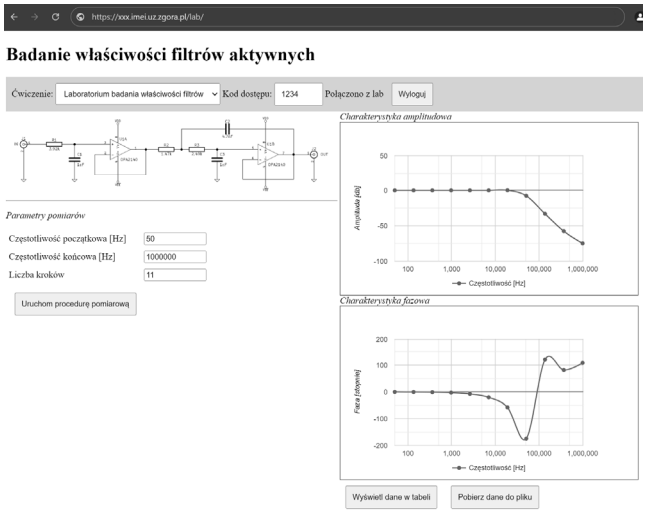
Każde stanowisko laboratoryjne wymaga uruchomienia przygotowanego wcześniej modułu programowego realizującego określone zadania, np. ćwiczenie, w którym badane są właściwości filtrów aktywnych. Moduł AD może być wykorzystany jako generator sygnałów oraz przyrząd pomiarowy. W zależności od potrzeb można zrealizować różne procedury pomiarowo-sterujące. Wymaga to napisania programu sterującego modułem AD w oparciu o SDK dostarczane przez producenta modułu. SDK pozwala na pisanie programów w różnych językach programowania, jak C, C#, Python itp. Możliwe jest uruchamianie oprogramowania w systemie Windows oraz Linux. Przykładowy moduł programowy uruchomiony na potrzeby ćwiczenia związanego z badaniem został przygotowany przy użyciu języka C# i środowiska Visual Studio. Graficzny interfejs użytkownika tego programu przedstawiono na rysunku 4. Po jego uruchomieniu należy podać unikalną nazwę ćwiczenia realizowanego na danym stanowisku. Możliwe jest uruchomienie wielu stanowisk, gdzie będzie realizowane to samo ćwiczenie. Na potrzeby ograniczenia dostępu tylko dla uprawnionych osób należy również podać kod dostępu. Moduł programowy po uruchomieniu oczekuje na polecenia od użytkownika zdalnego, które będą wydawane za pomocą aplikacji internetowej uruchamianej w przeglądarce. W oknie aplikacji prezentowane są wyniki przeprowadzanych badań.



Rys.4. Przykładowa aplikacja sterująca

Obsługa zdalna stanowiska laboratoryjnego

Użytkownik ma możliwość pracy zdalnej z systemem po uruchomieniu przeglądarki i wpisaniu adresu URL serwera WWW (rys. 5), który jest pośrednikiem pomiędzy stanowiskiem laboratoryjnym a użytkownikiem.



Rys.5. Aplikacja WWW w przeglądarce

Na potrzeby nadzorowania modułu programowego uruchamianego na stanowisku laboratoryjnym należy również przygotować odpowiednią stronę WWW. Strona WWW będzie komunikować się z modułem laboratoryjnym za pośrednictwem serwera WWW. Do zbudowania strony WWW wykorzystano język HTML5, w tym CSS i JavaScript oraz bibliotekę Google Charts.

Użytkownik zdalny po wpisaniu w przeglądarce adresu serwera WWW uzyska dostęp do strony WWW, gdzie będzie mógł z listy wybrać ćwiczenie do zrealizowania. Możliwe jest uruchomieniu wielu stanowisk i wtedy w liście będą widoczne nazwy ćwiczeń zdefiniowane podczas uruchomienia modułów programowych na stanowiskach laboratoryjnych. Każde z ćwiczeń może mieć zdefiniowany kod dostępu, który musi wpisać użytkownik w celu rozpoczęcia pracy zdalnej. Po wpisaniu kodu dostępu i zalogowaniu do serwera dany użytkownik przejmuje kontrolę nad stanowiskiem laboratoryjnym za pomocą opracowanej aplikacji internetowej w przeglądarce oraz modułu laboratoryjnego. Możliwe jest przygotowanie procedur pomiarowych, które dla określonych, podanych przez użytkownika, wartości początkowych pomiaru wyznaczą odpowiedź badanego układu np. w postaci charakterystyk amplitudowej i fazowej filtru. Użytkownik po

wykonaniu procedury pomiarowej może wyświetlić tabelę zmierzonych wartości lub pobrać ją w postaci pliku CSV na dysk lokalny w celu dalszego przetwarzania.

Komunikacja w systemie

Zbudowanie aplikacji internetowej komunikującej się z innym modułem programowym w czasie rzeczywistym wymaga użycia odpowiednich mechanizmów programowych. Zarówno aplikacja internetowa w przeglądarce, jak i moduł laboratoryjny korzystają z protokołu HTTPS w celu wymiany danych. Aplikacje internetowe pracują w sposób bezstanowy, co oznacza, że przeglądarka po pobraniu strony WWW z serwera nie jest automatycznie informowana o zmianie stanu na serwerze lub w systemie. Programista musi sam zadbać o mechanizmy komunikacji w czasie rzeczywistym pomiędzy przeglądarką a serwerem WWW. W przypadku opracowanej aplikacji wymagana jest jeszcze komunikacja z modułem programowym stanowiska laboratoryjnego. Serwer WWW jest wykorzystywany do umożliwienia dostępu do stron WWW w przeglądarce oraz do komunikacji aplikacji w przeglądarce z aplikacją w laboratorium w czasie rzeczywistym. Komunikacja w czasie rzeczywistym w aplikacjach internetowych możliwa jest do uruchomienia z wykorzystaniem protokołu WebSocket, który jest obsługiwany przez wszystkie współczesne przeglądarki WWW. Procedury protokołu WebSocket są opakowane w protokole HTTPS. W celu ułatwienia budowy oprogramowania została użyta biblioteka Microsoft SignalR [14], która umożliwia budowanie heterogenicznych aplikacji internetowych komunikujących się ze sobą w czasie rzeczywistym. Dzięki temu możliwe było uruchomienie komunikacji w aplikacji internetowej przy użyciu języka JavaScript oraz w aplikacji modułu laboratoryjnego w języku C#. Biblioteka SignalR pozwala na zdefiniowanie zdarzeń uruchamianych w systemie, które mogą przekazywać polecenia i dane pomiędzy komponentami systemu. Dzięki temu z poziomu aplikacji internetowej użytkownik wydaje polecenie rozpoczęcia procedury pomiarowej. Polecenie jest odbierane w aplikacji modułu sterującego w laboratorium za pośrednictwem serwera WWW. Moduł sterujący w laboratorium oczekuje na polecenia od aplikacji internetowej i po odebraniu polecenia wykonania procedury pomiarowej wykonuje zaprogramowane zadania i wysyła wyniki pomiarów do aplikacji internetowej. Aplikacja internetowa nasłuchuje na zdarzenie dostępności wyników pomiarów i po ich odebraniu wyświetla je na ekranie. Komunikacja odbywa się w sposób asynchroniczny bez blokowania interfejsu użytkownika w czasie rzeczywistym.

Uruchomienie systemu

Uruchomienie systemu do pracy wymaga wdrożenia serwera WWW, który może pracować pod kontrolą systemu Windows Server z modułem IIS (ang. Internet Information Services). Aplikacja uruchamiana na serwerze WWW została przygotowana jako aplikacja ASP.NET. Takie rozwiązanie daje wiele możliwości. Oprogramowanie modułów laboratoryjnych zostało przygotowane jako aplikacja WinForms dla systemu Windows. Możliwe jest również przygotowanie wersji aplikacji dla systemu Linux przeznaczonych do uruchomienia na urządzeniu Raspberry Pi.

Podsumowanie

Opracowany system może być wykorzystany do prowadzenia zajęć dydaktycznych w sposób zdalny bez potrzeby użycia pulpitu zdalnego co znacznie podnosi poziom bezpieczeństwa. Komputer pełniący rolę serwera WWW jest udostępniony w sieci Internet należy więc zadbać o jego odpowiednie zabezpieczenie. Rozwiązanie systemu informatycznego może być wykorzystane także w laboratoriach badawczych i wszędzie tam, gdzie wykonywane są zdalne eksperymenty pomiarowe.

System posiada duży potencjał rozwoju, można go wzbogacić o obsługę kamer wideo udostępniając podgląd stanowiska dla osoby realizującej ćwiczenie oraz o funkcjonalności rejestracji konta użytkownika i logowania do portalu zdalnego dostępu, co umożliwi identyfikację osób używających portal oraz przygotowanie protokołu z wykonania ćwiczenia na potrzeby dydaktyczne.

***Autorzy**: dr inż. Robert Szulim, e-mail: r.szulim@imei.uz.zgora.pl; prof. dr hab. inż. Ryszard Rybski, e-mail: r.rybski@imei.uz.zgora.pl; dr inż. Leszek Furmankiewicz, e-mail l.furmankiewicz@imei.uz.zgora.pl; dr inż. Mirosław Kozioł, e-mail: m.koziol@imei.uz.zgora.pl.*
Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki ul. Prof. Z. Szafrana 2, 66-003 Zielona Góra.

LITERATURA

[1] Heradio R., de la Torre L., Galan D., Cabrerizo F.J., Herrera-Viedma E., Dormido S., Virtual and remote labs in education: A bibliometric analysis. *Computer & Education*, 98 (2016), 14–38
[2] Chmielewski T., Zielińska K., Survey on Remotely Controlled Laboratories for Research and Education. Applied Computer Science, 2017, No 13, 85–96
[3] Kaczmarek Z., Gębka M., Reczyński G., Zdalny dostęp do laboratorium wielkości nieelektrycznych, *PAK*, 56 (2010), nr 12, 1464-1466
[4] Gustavsson I., Zackrisson J., Håkansson L, Claesson I., Lagö T., The VISIR project – an Open Source Software Initiative for Distributed Online Laboratories, Proceedings of the 2007 REV Conference, Porto, Portugal, (2007).
[5] Hernandez-Jayo U., Garcia-Zubia J., Remote measurement and instrumentation laboratory for training in real analog electronic experiments, Elsevier, Measurement, 2 (2016), 123-134
[6] Esqueda-Elizondo J. J., Jiménez-Beristáin L., Martínez-Verdín A. S., Serrano-Trujillo A., Electronics engineering virtual laboratory for COVID-19 pandemic. *Journal Computer Technology*, 5 (2021), No 14, 12–19
[7] Todos P., Virlan P., Tertea G., Training of Practical Engineering Skills in the Context of the COVID-19 Pandemic. *Journal of Social Science*, 4 (2021), No 3, 18–27
[8] Vergara D., Fernández-Arias P., Extremera J., Dávila L.P., Rubio M.P., Educational trends post COVID-19 in engineering: Virtual laboratories. Mater. Today Proc. 49 (2022), 155–160
[9] Furmankiewicz L., Kozioł M., Rybski R., Szulim R., System pomiarowy do badania czujników prądu i przemieszczenia liniowego w trybie zdalnym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 98 (2022), nr 11, 135—138
[10] Furmankiewicz L., Kozioł M., Rybski R., Szulim R., Concept and Implementation of Measurement Systems for Stationary and Remote Testing of Sensors for Electrical and Non-Electrical Quantities. *Sensors*, 23(4) (2023)
[11] Stępień M., Frania K., Przybyła K., Kasprzak M., Koncepcja zdalnego pomiaru i sterowania sygnałów w przekształtnikach energoelektronicznych w oparciu o wyniki realizacji projektu RELABEMA, Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i w Przemyśle - SP'2022: Materiały konferencyjne, (2022), 73-76
[12] Kaczmarek J., Ortolano M., Power O., Kučera J., Callegaro L., D'Elia V., Marzano M., Walsh R., Kozioł M., Rybski R., Virtual Training Laboratory for Primary Impedance Metrology, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, (72) 2023, 1--13
[13] Strona internetowa firmy Digilent, https://digilent.com
[14] Strona internetowa firmy Microsoft, Microsoft SignalR, https://dotnet.microsoft.com/en-us/apps/aspnet/signalr