

Tercja



Systemy Pomiarowe i Komputerowe Stanisław Żwan

Tytuł projektu; Innowacyjne urządzenie do wykonywania testów wydajnościowych naftowych otworów wiertniczych.

W ramach etapu 4 zrealizowano prace rozwojowe, których rezultatem jest konstrukcja, wykonanie oraz dokumentacja techniczna innowacyjnego systemu do transmisji danych z czujników pomiarowych za pomocą transmisji bezprzewodowej.

We wniosku projektowym założono, że efektem końcowym etapu będzie opracowanie kompletnego systemu akwizycji, magazynowania i transmisji szyfrowej danych pozyskiwanych na wiertni. Poniżej przedstawiono wybrane zagadnienia, które zostały opracowane podczas realizacji niniejszego etapu.

Na wstępie do realizacja zadań etapu opracowano koncepcję bezprzewodowej transmisji danych pomiarowych do centralnej jednostki obliczeniowej. Ustalono, że zastosowany system transmisji bezprzewodowej pomiędzy wyniesionym systemem pomiarowym, a komputerem online, musi spełniać następujące wymagania:

- zasięg do 100 m,
- możliwość pracy w strefie zagrożonej wybuchem (preferowane gotowe rozwiązanie),
- transmisja dwukierunkowa,
- minimalna szybkość transmisji 10 kB/s (preferowane 1 MB/s),
- transmisja kodowana,
- możliwość dostępu serwisowego,
- możliwość połączenia przewodowego.

Natomiast dla transmisji bezprzewodowej pomiędzy stacją monitorowania parametrów powietrza, a komputerem online, wymagane jest:

- zasięg do 300 m,
- transmisja dwukierunkowa
- minimalna szybkość transmisji 1 kB/s (preferowane 10 kB/s),
- transmisja kodowana,
- możliwość połączenia przewodowego,
- niski pobór energii,
- prosta obsługa programowa.

Ustalono, że najkorzystniejszy będzie wybór jednego z istniejących protokołów transmisji. Analizie poddano następujące systemy transmisji:

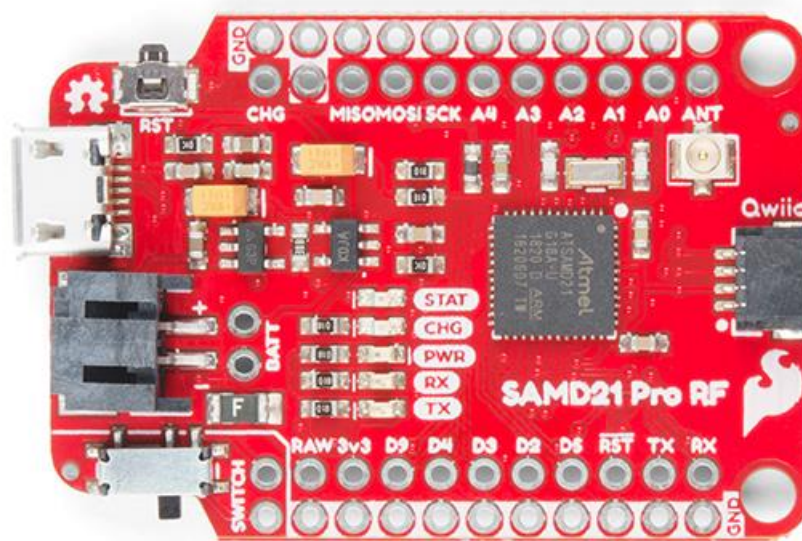
- transceivery 433 MHz lub 866 MHz,
- Wi-Fi 2,4 GHz lub 5 GHz,
- Bluetooth (w tym BLE),
- LoRa,
- ZigBee.

Spośród wymienionych protokołów do transmisji bezprzewodowej pomiędzy wyniesionym systemem pomiarowym, a komputerem online wybrano Wi-Fi, gdyż żaden z pozostałych protokołów nie spełniał wszystkich wymagań. Decydujące były następujące kryteria:

- istniejące łatwo dostępne gotowe rozwiązania z certyfikatem ATEX (przeciwwybuchowość konieczna),
- szybkość transmisji znacząco przekraczający wymagania,
- wystarczający zasięg,
- możliwość łatwego zastąpienia połączeniem przewodowym.

Wybór protokołu transmisji bezprzewodowej pomiędzy stacją monitorowania parametrów powietrza, a komputerem online był znacząco trudniejszy, gdyż żaden z wymienionych protokołów nie spełniał wszystkich wymagań. Ostatecznie wybrano LoRa, ponieważ w tym przypadku wymagana szybkość transmisji jest bardzo niska. LoRa zapewnia wystarczającą szybkość, a jednocześnie zapewnia znacząco większy zasięg, co oznacza pewniejszą transmisję przy mniejszej odległości. Dodatkowym kryterium była możliwość pracy w różnych pasmach częstotliwości. Jedynym niespełnionym kryterium w przypadku LoRa jest możliwość łatwego zastąpienia połączenia radiowego połączeniem przewodowym. Z tego względu konieczne jest uzupełnienie układu transmisji o dodatkowe połączenie przewodowe, dla którego został wybrany został protokół MODBUS RTU korzystający z przemysłowego interfejsu RS-485.

W celu przyspieszenia implementacji protokołu LoRa, sprawdzenia transmisji i odporności na zakłócenia zastosowano gotowe moduły SparkFun Pro RF, rys. 1, z dodanymi prętowymi antenami ćwierćfalowymi. Moduły te oparte są na procesorze SAMD21G18, oraz transceiverze LoRa RF96, przystosowanym do pracy w zakresie 800-950 MHz.



Rys. 1. Moduł *SparkFun* Pro RF - widok z przodu

Do badań użyte zostały dwa moduły, na których uruchomione zostały programy testowe napisane w środowisku ARDUINO. Działanie programów było następujące: co sekundę moduł 1 wysyłał ciąg znaków, moduł 2 miał za zadanie odebrać wysłany ciąg znaków i odesłać go z powrotem po zwiększeniu wartości każdego ze znaków o jeden. W obu przypadkach wysyłane ciągi wyposażono w sumę kontrolną.

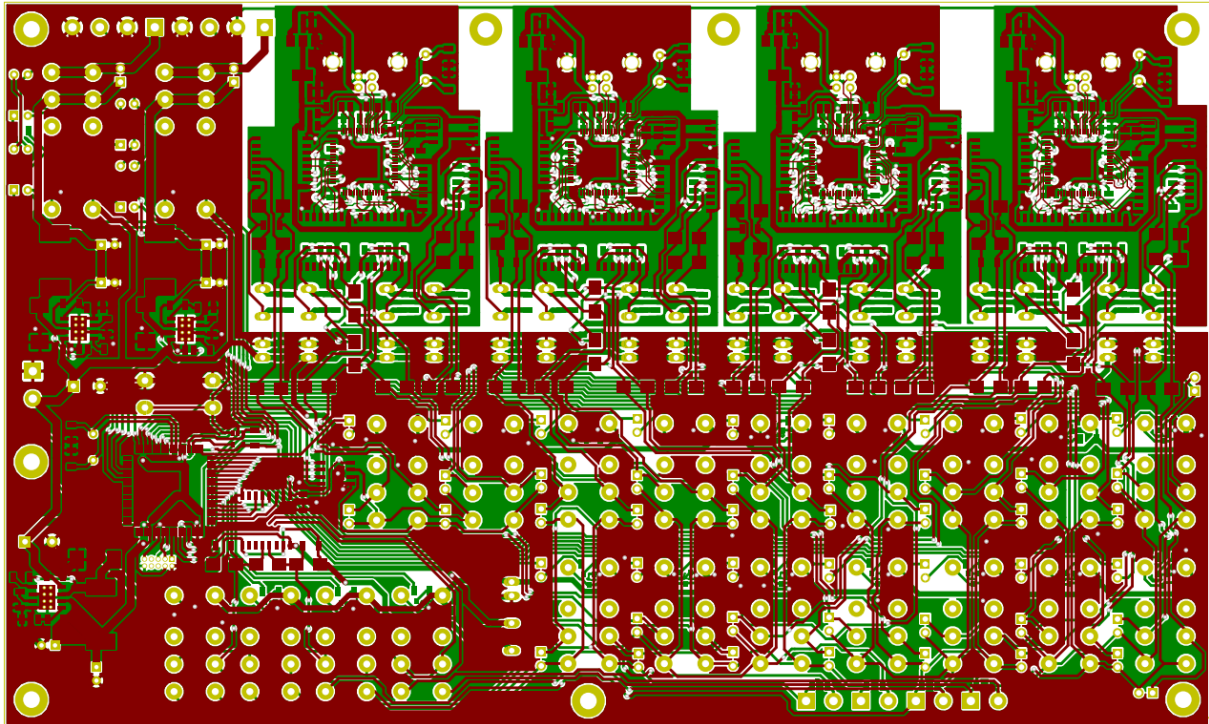
Pierwszy etap testów polegał na pozostawieniu pracujących modułów na kilkanaście minut z jednoczesną kontrolą poprawności wysyłanych i odbieranych ciągów. Okazało się, że podczas całego testu nie wystąpił żaden błąd. Pozwoliło to na przejście do drugiego etapu testów, który polegał na praktycznym sprawdzeniu zasięgu w terenie. Okazało się, że w warunkach miejskich praktyczny zasięg wynosi około dwóch kilometrów. Powyżej tej odległości zaczynały się pojawiać błędy transmisji.

Następnie przeprowadzono etap trzeciego testu, czy badanie odporności na zakłócenia. Do tego testu zostały wykorzystane: pilot pracujący na częstotliwości 433MHz, pilot pracujący na częstotliwości 866 MHz oraz telefon komórkowy. Okazało się, że żaden z pilotów nie był w stanie zakłócić pracy układów LoRa, natomiast telefon komórkowy podczas aktywnego połączenia przyłożony bezpośrednio do anteny modułu 1 lub 2 powodował całkowite zerwanie transmisji. Oddalenie telefonu od anteny powodowało przywrócenie transmisji. Zaznaczyć należy, że test wykonywany był przy oddaleniu modułów o około dwa kilometry. Test odporności na zakłócenia był kilkakrotnie ponawiany za pomocą telefonu komórkowego przy stopniowym zmniejszaniu odległości pomiędzy modułami. W odległości około 300 metrów telefon komórkowy przestał w widoczny sposób zakłócać transmisję pomiędzy modułami. W końcowym etapie zostały przeprowadzone testy w warunkach wiertni poszukiwawczej i pracującego odwiertu geotermalnego.

Jednostka centralna systemu pomiarowego jest zbudowana na płycie głównej, która została specjalnie zaprojektowana i wykonana na potrzeby realizacji projektu, rys. 2. Płyta główna wykonywać ma następujące funkcje:

- zabezpieczenie linii zasilających,
- zabezpieczenie linii sygnałowych RS-485,
- redundancja zasilania,
- redundancja transmisji,
- informacja zwrotna o aktualnym stanie.

Pierwsze dwie funkcje realizowane są sprzętowo i nie podlegają obsłudze programowej. Natomiast pozostałe funkcje wymagają współpracy wcześniej sprawdzonej warstwy sprzętowej oraz oprogramowania.



Rys. 2. Widok płyty głównej jednostki centralnej systemu pomiarowego po wprowadzonych poprawkach

Pierwszym zadaniem po wykonaniu płyty była jej kontrola i uruchomienie, które polegało na sprawdzeniu poprawności montażu wszystkich elementów. Następnie kolejno uruchomiono wszystkie jej podzespoły, tzn. sekcję zasilania, sekcję stabilizatorów napięcia, sekcję zasilania RS-485, sekcje interfejsów USB, sekcję sterownika procesora. Po usunięciu drobnych błędów montażowych, wszystkie sekcje działają poprawnie. Do wykonania części testów wymagane jest sterownie z procesora. W tym celu napisano odpowiednie oprogramowanie za pomocą IDE ATMEL STUDIO 7. Oprogramowanie pozwala na realizację dwustronnej komunikacji przez interfejs szeregowy RS-485, sterowanie wyjściami procesora i odczyt stanów wejść procesora. Do komunikacji, sterowania i odczytu napisana została prosta aplikacja w Embarcadero XE5. Przy jej pomocy kontynuowano testy sterownika oraz wykonano testy sekcji przełączania interfejsów RS-485 (przełączników sterowanych z procesora), a także testy sekcji przełączania zasilania. Wszystkie przebadane obwody dawały właściwą reakcję (w sekcji przełączania zasilania sukces osiągnięto po wymianie niewłaściwego rezystora). Na zakończenie dla interfejsów RS-485 wykonano testy transmisji. Testy te polegały na uruchomieniu na komputerze sterującym pięciu terminali transmisji szeregowej. Jeden z terminali w określonym cyklu wysyłał zdefiniowane ciągi znaków. Pozostałe terminale służyły do odbierania, wyświetlania i ewentualnego zapisu odbieranych ciągów znaków. Przebadane zostało wszystkie 16 interfejsów komputerowych oraz dodatkowo oba interfejsy sterownika we wszystkich możliwych kombinacjach. Po usunięciu błędów montażowych wszystkie możliwe konfiguracje interfejsów pracowały prawidłowo bez zauważalnych

błędów. Podsumowując, wykonane testy wykazały niewielkie problemy związane z niedokładnością ręcznego montażu SMD. Po usunięciu wykrytych błędów płyta posiada wszystkie oczekiwane parametry i jest w pełni gotowa do wykonywania wszystkich planowanych funkcji.

Kolejne działania związane z realizacją etapu 4 dotyczyły opracowania algorytmów dla docelowego oprogramowania płyty głównej jednostki centralnej systemu pomiarowego. Do transmisji z komputerem zastosowano protokół tekstowy, który umożliwia łatwą analizę i ułatwia usuwanie ewentualnych błędów. Transmisja podzielona jest na pojedyncze ramki o unikalnym numerze i zdefiniowanym formacie. Zaimplementowane algorytmy sterowania działają według zasad opisanych poniżej.

Algorytm sterowania komputerami pomiarowymi. Podczas normalnej pracy oba komputery pomiarowe pracują równolegle. Płyta główna na początku pracy wysyła do komputera A polecenie pracy MASTER, w związku z czym komputer A kontroluje wszystkie linie sygnałowe RS-485, a komputer B pracuje jako SLAVE, analizuje odbywającą się transmisję i zapisuje wyniki pomiarów. Każdy z komputerów po uruchomieniu pracuje w trybie SLAVE, może zostać przełączony w tryb MASTER po odebraniu polecenia z płyty głównej albo po upływie zdefiniowanego czasu bez aktywnej transmisji. Możliwa jest prasa mieszana, czyli komputer A może realizować funkcję MASTER na części interfejsów, a komputer B na pozostałych interfejsach. Oba komputery współpracują z płytą główną wysyłając i odbierając cyklicznie ramki informujące o prawidłowej pracy. W przypadku wykrycia przez płytę główną nieprawidłowej pracy któregoś z komputerów (brak lub nieprawidłowa transmisja, błąd zgłoszonego przez komputer) wykonywane są kolejno następujące operacje:

- odłączenie nieprawidłowo działającego komputera od linii sygnałowych RS-485,
- wysłanie informacji do prawidłowo działającego komputera, żeby przejął funkcję MASTER,
- RESET nieprawidłowo działającego komputera.

Jeśli przeprowadzone operacje przywrócą prawidłową pracę system przechodzi w tryb normalnej pracy. Jeśli prawidłowa praca nie zostanie przywrócona operacja powtarzana jest maksymalnie do 3 razy. Jeśli i to nie przywróci prawidłowej pracy komputera wykonywany jest podobny cykl, jedynie zamiast sygnału RESET odłączane jest na 10 sekund zasilanie nieprawidłowo pracującego komputera.

Jeśli również ta operacja powtórzona 3-krotnie nie przywróci prawidłowej pracy, komputer uznawany jest za uszkodzony i zostaje trwale odłączony od zasilania i linii transmisyjnych. Informacja o tym jest zapisywana w pamięci nieulotnej, aby po wyłączeniu i ponownym włączeniu zasilania całego systemu płyta główna nie włączała uszkodzonego komputera. Ponowne dołączenie uszkodzonego komputera możliwe jest tylko dzięki ręcznemu skasowaniu błędu przez serwisanta po usunięciu usterki. Wszystkie informacje o przeprowadzanych operacjach i stanie pracy są wysyłane do komputera wizualizacyjnego. Algorytm sterowania liniami sygnałowymi. W systemie pomiarowym wszystkie linie sygnałowe zrealizowane zostały przy pomocy interfejsów RS-485. Przewidziane zostały następujące linie sygnałowe:

- linia wewnętrzna – służy do transmisji pomiędzy płytą główną, a komputerami pomiarowymi; nie może zostać odłączona;
- 3 linie danych służące do komunikacji pomiędzy komputerami pomiarowymi, a modułami pomiarowymi; linie są w pełni redundantne, każda może zostać podłączona do 2 różnych interfejsów każdego z dwóch komputerów pomiarowych;
- linia zapasowa danych służąca do komunikacji pomiędzy komputerami pomiarowymi, a modułami pomiarowymi; może zostać podłączona tylko do jednego z interfejsów w każdym z dwóch komputerów pomiarowych.

Wszystkie cztery linie danych są monitorowane przez płytę główną. Podczas normalnej pracy używane są 3 podstawowe linie danych. Linie są sterowane przez komputer MASTER i monitorowane przez komputer SLAVE i przez płytę główną. W przypadku wykrycia nieprawidłowej transmisji płyta główna wykonuje kolejno następujące operacje mające na celu przywrócenie transmisji:

- odłączenie linii od komputera SLAVE; jeśli przywróci to prawidłową transmisję linia podłączana jest do zapasowego interfejsu komputera SLAVE;
- przełączenie linii na zapasowy interfejs komputera MASTER;

- odłączenie linii od komputera MASTER, zmiana komputera MASTER na SLAVE, zmiana komputera SLAVE na MASTER;
- chwilowe odłączenie zasilania od nieprawidłowo pracującej linii danych;
- przełączenie zasilania linii danych na zasilanie zapasowe.

Nieprawidłowo pracujące interfejsy po odłączeniu od linii sygnałowych są następnie automatycznie testowane na różnych parametrach transmisji przez płytę główną. Wyniki testów stanowią informację dla serwisu o możliwych przyczynach nieprawidłowej pracy. Wszystkie informacje o przeprowadzanych operacjach i stanie pracy są wysyłane do komputera wizualizacyjnego.

Implementacja opracowanych algorytmów została zrealizowana za pomocą oprogramowania IDE ATMEL STUDIO 7. W celu uzyskania szybkiej i pewnej reakcji oprogramowania algorytmy zostały zaimplementowane w oparciu o przerwanie sprzętowe interfejsów szeregowych oraz o przerwanie zegarowe, pozwalające uzyskać pewną i kontrolowaną w czasie reakcję na wszystkie możliwe do przewidzenia zmiany. W celu przeprowadzenia testów zaimplementowanych algorytmów został zmontowany układ podobny jak we wcześniejszych testach transmisji. Jedynie do interfejsów szeregowych zostały podłączone moduły pomiarowe, tak aby można było testować odłączanie poszczególnych interfejsów.

Testy przeprowadzane były poprzez kolejne fizycznie odłączane i podłączone poszczególnych modułów pomiarowych, interfejsów szeregowych i USB. Ponadto kolejno symulowane były różne uszkodzenia na wszystkich liniach sygnałowych: rozwieranie linii sygnałowych A i B, zwieranie linii sygnałowych A i B do masy, rozłączanie zasilania. Po usunięciu błędów w oprogramowaniu uzyskane ostatecznie wyniki przeprowadzonych testów:

- Odłączanie poszczególnych modułów pomiarowych nie wywoływało żadnej reakcji dopóki na określonym interfejsie pracował prawidłowo chociaż jeden moduł, jest to reakcja prawidłowa, gdyż taka sytuacja oznacza, że interfejs jest sprawny, natomiast problem leży po stronie modułów pomiarowych.
- Odłączenie wszystkich modułów pomiarowych powodowało kolejno próbę odłączenia linii SLAVE, przełączenia interfejsu MASTER, odłączenie i przełączenie linii zasilającej; oczywiście transmisja nie mogła zostać przywrócona ze względu na brak podłączonych modułów. W celu poprawienia możliwości diagnostycznych konieczne okazało się zmodyfikowanie algorytmów, w opisywanej sytuacji dodany został podprogram, który powodował jednoczesne podłączenie redundantnych interfejsów i próby transmisji pomiędzy interfejsami, które w opisywanej sytuacji zakończyły się powodzeniem. Sytuacja taka może wystąpić rzeczywiście np. w przypadku uszkodzenia przewodu, a układ prawidłowo zwrócił informację o zaistniałym błędzie.
- Fizyczne odłączenie interfejsu dawało identyczną, w pełni prawidłową reakcję, jak w przypadku odłączenia wszystkich modułów pomiarowych podłączonych do danego interfejsu.
- Odłączenie interfejsu USB powoduje, że żaden z czterech interfejsów szeregowych podłączonych do danego nie jest w stanie pracować, w takiej sytuacji wszystkie cztery interfejsy szeregowy powinny zostać przełączone na interfejsy redundantne. Taką właśnie reakcję zaobserwowano.
- Symulowanie uszkodzeń poszczególnych interfejsów dawało różną reakcję. W przypadku uszkodzenia zupełnie uniemożliwiającego transmisję następowała prawidłowa reakcja, identyczna jak przy fizycznym odłączeniu interfejsu. Niektóre z uszkodzeń powodowały znaczący wzrost obserwowanego poziomu błędów transmisji, więc konieczne okazało się takie zmodyfikowanie oprogramowania, żeby kontrolowany był poziom błędów transmisji i w przypadku przekroczenia dopuszczalnego poziomu błędów następowała reakcja identyczna, jak przy całkowitym braku transmisji.

Wykonano także integrację elementów systemu pomiarowego z oprogramowaniem. Została ona zrealizowana w postaci listy wszystkich używanych w systemie pomiarowym czujników, przetworników, urządzeń wykonawczych i urządzeń wraz z planowanym sposobem podłączenia, używanym protokołem transmisji, przypisaniem adresu i nazwy parametru.

System pomiarowy jest złożonym środowiskiem składającym się z wielu elementów, które są powiązane ze sobą w ramach całego systemu na różne sposoby. Podstawowym elementem systemu

jest komputer online, będący jest bazą sprzętową na której pracuje oprogramowanie systemu pomiarowego. Wyposażony jest we wszystkie interfejsy niezbędne do połączenia ze wszystkimi pozostałymi elementami systemu pomiarowego, takimi jak: osuszacz powietrza technicznego, osuszacz próbki gazowej, analizator sumy węglowodorów Total Gas, chromatograf gazowy, wyniesiony układ pomiarowy, jednostka centralna, dwa koncentratory danych, analogowe czujniki pomiarowe, czujniki przepływu dwufazowego, czujniki impulsowe, stacja pogodowa i zespół kamer. Ponadto w skład systemu wchodzi komputer offline, przeznaczony do prac biurowych i analitycznych. Po połączeniu wymienionych elementów systemu, wykonano badania poprawności ich pracy. Stwierdzone błędy zostały usunięte i system pomiarowy został doprowadzony do pełnej funkcjonalności. Stwierdzono, że jednoczesna praca wszystkich urządzeń daje prawidłowe rezultaty i nie obciąża nadmiernie systemu operacyjnego.

Sygnały z czujników analogowych zwykle nie mogą być przesyłane bezpośrednio do przetwornika analogowo-cyfrowego lecz wymagają wstępnego przygotowania przez układ zasilająco-wzmacniający. Wobec tego kanały analogowe systemu pomiarowego zostały poddane badaniom obejmującym ich kalibrację, a także sprawdzenie liniowości, przesłuchów międzykanałowych, odpowiedzi częstotliwościowej i czasowej, odporności na zakłócenia. Dobrano też parametry pracy układów filtracji cyfrowej.

Sterowanie modułami pomiarowymi i zbieranie z nich odczytów jest realizowane przy pomocy specjalnie zaimplementowanego programu „picker” pracującego na komputerach MASTER i SLAVE. Odczyty zebrane z modułów pomiarowych są rejestrowane w lokalnej bazie danych oraz udostępniane w celu dalszego przetwarzania za pomocą dedykowanego protokołu komunikacyjnego. Moduły pomiarowe mogą być podłączone przy pomocy interfejsu RS-485 do trzech kanałów komunikacyjnych. Komunikacja odbywa się przy użyciu protokołu MODBUS-RTU. Każdy z tych kanałów może być podłączony równocześnie do dwóch bliźniaczych jednostek z uruchomionym programem „picker”, z których jedna pracuje w trybie master, a druga w trybie slave, przy czym tryb ten może być przełączany niezależnie dla każdego kanału. Każdym kanałem steruje niezależny wątek, który w trybie master komunikuje się sekwencyjnie z wszystkimi modułami pomiarowymi podłączonymi do magistrali, a w trybie slave nasłuchuje na interfejsie, i rejestruje całą komunikację między urządzeniem master a modułami pomiarowymi. Tym sposobem na jednostce pracującej w trybie slave tworzy się pełna kopia zarejestrowanych odczytów na wypadek awarii jednostki pracującej w trybie master. W przypadku zarejestrowania braku aktywności jednostki master przez określoną liczbę cykli, jednostka slave przełącza się w tryb master, przejmując tym samym kontrolę nad magistralą. Komunikacja odbywa się poprzez TCP/IP i składa się z ramek podzielonych na pola.

Aby poprawić niezawodność pracy, również w przypadku wystąpienia uszkodzeń, w systemie pomiarowym wprowadzono redundancję w następujących obszarach:

- dwa komputery jedno płytkowe służące do zbierania danych pomiarowych (MASTER i SLAVE),
- podwójne (przewodowe i bezprzewodowe) połączenie wyniesionej jednostki pomiarowej z systemem komputerowym,
- zapasowe kanały pomiarowe,
- zapasowe interfejsy szeregowy RS-485,
- zasilanie z podtrzymaniem UPS,
- układ płyty głównej jednostki centralnej systemu pomiarowego służący do zarządzania przełączaniem interfejsów szeregowych RS-485 i nadzorowania pracy komputerów jedno płytkowych,
- automatyczne kopie zapasowe zebranych danych pomiarowych.

Układy redundantne poddano testom. Testy komputerów jedno płytkowych polegały na symulowaniu uszkodzeń poprzez odłączanie interfejsów USB, interfejsów RS-485, interfejsów Ethernet oraz zasilania. Wszystkie wykryte błędy zostały usunięte. Połączenie wyniesionej jednostki pomiarowej z systemem komputerowym polegały na odłączaniu i przyłączaniu interfejsu przewodowego i bezprzewodowego Wi-Fi. Ponieważ w systemie pomiarowym wszystkie komputery pracują pod

kontrolą systemów operacyjnych należało się spodziewać, że transmisja danych będzie automatycznie przywracana po ponownym podłączeniu medium transmisyjnego. Dokładnie taką reakcję zaobserwowano. Podczas testów zapasowe kanałów pomiarowych wykryto niewielkie błędy (niektóre z kanałów nie były prawidłowo odczytywane w oprogramowaniu), które zostały usunięte. Testy zapasowych interfejsów szeregowych RS-485 polegały na sprawdzeniu poprawności reakcji oprogramowania komputerów jednopłytkowych w połączeniu z oprogramowaniem wizualizacyjnym. Zaobserwowane nieprawidłowości zostały usunięte. Test zasilania z podtrzymaniem UPS obejmował próby ładowania i rozładowania baterii akumulatorów zewnętrznych. Sprawdzono również czas pracy zasilacza UPS na akumulatorach wewnętrznych. Uzyskany wynik 3,5 godz. jest w pełni wystarczający do przeprowadzenia podłączenia lub przełączenia akumulatorów zewnętrznych.

W systemie pomiarowym funkcjonują trzy niezależne kopie danych pomiarowych, przechowywane w obu komputerach jednopłytkowych oraz w komputerze online. Wszystkie kopie powinny być identyczne. Jedynie w sytuacjach awaryjnych mogą wystąpić różnice, które po usunięciu awarii powinny zostać usunięte. Testy zarządzania kopiami danych polegały na symulowaniu awarii uniemożliwiającej zbieranie danych pomiarowych. W przypadku komputerów jednopłytkowych polegało to na odłączeniu zasilania, ale w taki sposób, żeby zawsze pracował co najmniej jeden z nich. W przypadku komputera online, odłączane były interfejsy transmisyjne Ethernet i Wi-Fi. Następnie „awaria” była usuwana i obserwowany był proces przywracania identyczności baz danych. Stwierdzono, że mechanizmy baz danych działały prawidłowo i szybko doprowadzały do uzupełnienia danych, wizualizacja również prawidłowo informowała o postępie uzupełniania danych, oraz na których komputerach znajduje się pełna baza pomiarów. Konieczne było jednak obniżenie priorytetu procesów odpowiedzialnych za uzupełnianie baz danych, co pozwoliło zachować płynność obserwowanych danych bieżących. Pomimo tego, godzinna przerwa w danych pomiarowych jest uzupełniana w około 1,5 minuty.

System pomiarowy został także poddany testom długoterminowym, których zadaniem było wykrycie ewentualnego wystąpienia niekorzystnych zjawisk, takich jak:

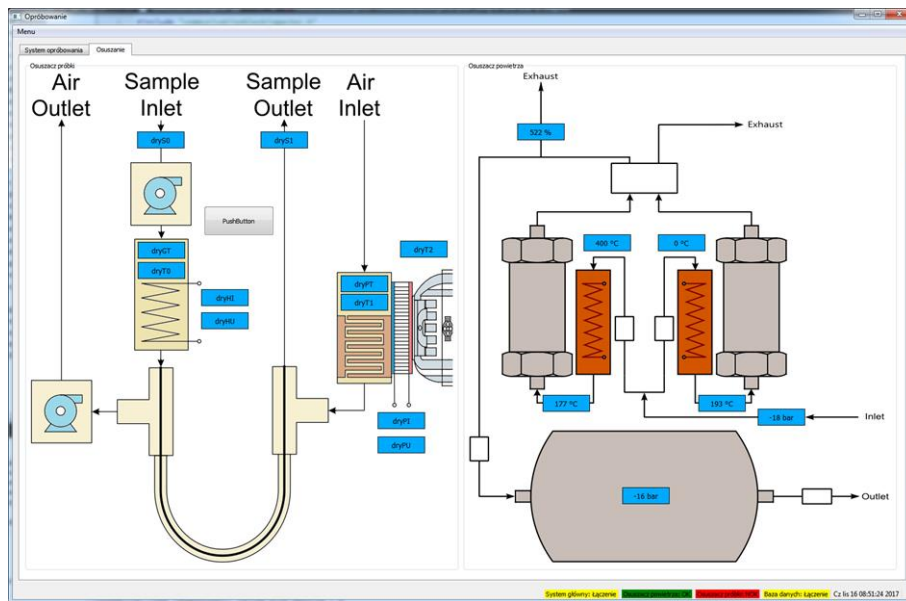
- wyciek pamięci (memory leakage, błędy zwalniania nieużywanej pamięci),
- przeciążenie bazy danych z wynikami,
- niestabilności pracy systemu operacyjnego,
- zapełnienie pamięci dyskowej komputerów.

Testy polegały na uruchomieniu systemu pomiarowego na czas 30 dni na wszystkich trzech komputerach. Uruchomione zostały programy służące do pracy systemu, a jednocześnie dodatkowe programy, które służyły do zapisywania co jedną minutę następujących parametrów pracy komputerów: zajętość procesorów i pamięci operacyjnej, czas pracy dysków, wykorzystanie pamięci dyskowej i interfejsu Ethernet. Najważniejszym wnioskiem z wyników testów jest ten, że w żadnym komputerze nie występuje żadne niekorzystne zjawisko, które powodowałoby wzrost zużycia jego zasobów w miarę upływu czasu. Jedynym wyjątkiem jest stopniowy wzrost zapełnienia dysków, co jest naturalnym efektem związanym z zapisem danych pomiarowych.

Po zakończeniu testów długoterminowych przeprowadzono testy zachowania systemu pomiarowego w sytuacjach awaryjnych polegających na wyłączeniu jednego z komputerów wyniesionego systemu pomiarowego na 1 godzinę oraz na 6 godzin. Rejestrowane były jedynie parametry pracy komputera online. Rejestracja włączana była pół godziny przed wyłączeniem komputera wyniesionego systemu pomiarowego i była prowadzona do momentu, aż wyniki po ponownym włączeniu komputera wyniesionego systemu pomiarowego wróciły do poprzednich wartości. Wyniki nie wykazały żadnych istotnych różnic w stosunku do pomiarów długoterminowych, co wynika z tego, że komputer online automatycznie przeszedł na współpracę z drugim z komputerów wyniesionego systemu pomiarowego. Z tego względu przeprowadzono kolejne testy, polegające na wyłączeniu komputera online na 1 godzinę i na 6 godzin. W tym czasie rejestrowane były jedynie parametry komputerów wyniesionego systemu pomiarowego do momentu ustabilizowania wskazań ponownym włączeniu komputera online. Jedyną zauważoną różnicą w zarejestrowanych wynikach było wykorzystanie interfejsu

Ethernet. Stwierdzono także, że uzupełnienie bazy danych w komputerze online trwało około 2 minut dla testu godzinnego i około 5 minut dla testu 6-godzinnego.

Główną aplikację przystosowano do pracy na komputerze PC pod kontrolą systemu operacyjnego LINUX. Do rozwoju aplikacji głównej wybrano język programowania C++, ze względu na możliwości tego języka, dostępność bibliotek, szybkość, niezawodność, dostępność wykwalifikowanych programistów, cenę. W celu przyspieszenia pracy wybrano Framework Qt, który umożliwi napisanie zarówno napisanie aplikacji głównej dla PC, jak i proste przeniesienie kodu na inne platformy, w tym mobilne i wbudowane. Do obsługi wielowątkowości wybrano bezpłatny Actor Framework. Dzięki temu możliwe jest łatwe, szybkie rozwijanie aplikacji, a także wysokopoziomowe, sieciowe łączenie wątków na różnych urządzeniach.



Rys. 3. Widok okna aplikacji z właściwymi polami odczytu oraz kontrolą łączności z modułami

Aplikacja główna budowana jest zgodnie z filozofią programowania reaktywnego, dlatego do implementacji został wybrany model aktorów dostępny w Actor Framework dla C++. Rdzeń może być rozbudowywany, gdyż dzięki Actor Framework możliwe jest szybkie dodawanie kolejnych modułów, odpowiadających za obsługę niezależnych wątków aplikacji. Takie wątki mogą wykonywać np. obliczenia w tle, albo tak jak w niniejszej aplikacji odpowiadać za obsługę komunikacji z zewnętrznymi sprzętowymi modułami oraz różnorodnymi czujnikami. Celem aplikacji uruchomionej na głównym komputerze pomiarowym jest synchronizacja danych z komputerami systemu pomiarowego i stworzenie kopii danych z ich pamięci do relacyjnej bazy danych SQL na głównym komputerze pomiarowym, z której to dane mogą być później obrabiane, filtrowane i analizowane w trybie offline. Najważniejszym zadaniem aplikacji głównego komputera pomiarowego jest zsynchronizowanie wszystkich próbek zapisanych przez komputery systemu pomiarowego tak, aby żadna nie została zagubiona.

Aplikacja zapewnia bezpieczny odczyt przez sieć. Programowanie kolejnych modułów, zgodnie z założeniami przyjętych technologii Framework Qt i Actor Framework, wymagało małego nakładu pracy. Przykładowy widok ekranu aplikacji przedstawiono na rys. 3. W aplikacji zawarto mechanizmy wykrywające utratę oraz powrót komunikacji z poszczególnymi modułami. Test 96-godzinny wykazał, że aplikacja pracowała bardzo stabilnie, z niskim użyciem czasu procesora oraz pamięci operacyjnej.

Ze względu na charakter zbieranych danych pomiarowych, których jest dużo, natomiast nie mają one ze sobą skomplikowanych relacji, do budowy bazy danych zdecydowano się na użycie bezpłatnego i

otwartego oprogramowania MySQL, głównie ze względu na wygodę utrzymania. Każdy rekord w bazie to zestaw wartości ze wszystkich czujników i urządzeń w jednostce czasu (domyślnie jedna sekunda). Bazę podano testom obciążeniowym, symulującego działanie w środowisku produkcyjnym. Testy wykazały, że przy planowanych ilościach zapytań do bazy danych jej silnik jest obciążony w niewielkim stopniu. Głównym zapytaniem do bazy jest INSERT. Zapytania typu SELECT są bardzo rzadkie, a charakter zbieranych danych (które są od siebie praktycznie niezależne) powoduje, że nie ma też zapytań złączeniowych. W związku z tym nie występują tu indeksy i całość wykorzystuje mniej pamięci operacyjnej. Wielkość bazy danych może osiągnąć kilkanaście gigabajtów, więc ma to znaczenie dla jej działania po pewnym czasie w środowisku produkcyjnym.

Do komunikacji pomiędzy urządzeniami uzupełniającymi, takimi jak: osuszacz powietrza, osuszacz próbki gazowej, analizator sumy węglowodorów, a komputerem sterującym wykorzystany został interfejs Ethernet. Uzasadnieniem tego wyboru jest łatwość implementacji w istniejącym i tworzonym hardware, duża szybkość przesyłania danych, możliwość tworzenia tanich połączeń na duże odległości. Warstwa transportowa oparta jest o protokół UDP, a dane pomiędzy elementami systemu przesyłane są za pomocą autorskiego protokołu opartego o znaki tekstowe ASCII. Dla zaimplementowania połączenia zdalnych, niezależnych procesów uruchomionych na różnych maszynach i systemach operacyjnych (Linux, Windows) wykorzystano możliwości Actor Framework dla C++. Zastosowanie modelu Actor pozwala na komunikację poprzez mechanizm wiadomości, który oparty jest niskopoziomowo na protokole TCP/IP. W związku z tym nie jest konieczne obsługiwanie stosu tego protokołu przez aplikację, a tylko skupienie się na odpowiedniej komunikacji między aktorami poprzez zaimplementowane API. Technika ta potrzebna jest w przypadku zdalnych urządzeń podłączonych do sieci, które przeznaczone są do obsługi specjalizowanego urządzenia i na których można uruchomić skompilowany w C++ kod programu.

Zaimplementowana komunikacja działa sprawnie. Ze względu na specyfikę pracy czas odświeżania danych wynosi 1 Hz. Stosunkowo rzadkie odświeżanie powoduje bardzo niskie obciążenie sieci. System jest tak zaprojektowany, że dane z poszczególnych modułów nie są kluczowe. W związku z powyższym utrata ramki na skutek błędu sieci jest akceptowalna, dzięki czemu można było zastosować protokół UDP. Zarówno oprogramowanie na urządzeniach, jak i na komputerze pomiarowym jest odporne na błędy wynikłe ze zdeformowania ramki (taka ramka jest pomijana). Tak samo dzieje się w przypadku zaniku komunikacji sieciowej, np. z powodu awarii któregoś elementu. Wymiana danych poprzez protokół UDP powraca automatycznie po przywróceniu komunikacji sieciowej.

Komputer pomiarowy komunikuje się także z głównym systemem pomiarowym. System ten zapisuje dane pomiarowe z zainstalowanych czujników. Jak już wspomniano, system pomiarowy posiada dwa specjalne wbudowane komputery, które są odpowiedzialne za obsługę pomiaru i komunikację z głównym komputerem pomiarowym. Pomiar jest kluczowy, dlatego jeden komputer służy jako zapasowy dla drugiego. Komputery te na bieżąco synchronizują ze sobą dane pomiarowe, a gdy jeden jest niedostępny to jego rolę przejmuje drugi. Główny komputer pomiarowy utrzymuje stałe połączenie sieciowe z obydwooma tymi komputerami, ale dane synchronizuje tylko z jednym – tym który aktualnie w systemie pomiarowym jest ustawiony jako nadrzędny (master). W procesie pomiaru istotne jest, aby na głównym komputerze pomiarowym zarejestrować w bazie danych wszystkie pomiary zapisane w komputerze systemu pomiarowego. Musi tu być zapewniona synchronizacja pomiędzy tymi maszynami, a żadna próbka nie może zniknąć. W tym przypadku niemożliwe jest użycie standardowej komunikacji po sieci Ethernet. Nawet przy zastosowaniu protokołu TCP, nie można mieć pewności, że wszystkie dane na głównym komputerze pomiarowym będą kopiami lustrzanymi z systemu pomiarowego.

Zamiast stosować skomplikowany system z wysyłaniem odpowiedzi i potwierdzeniem przyjęcia rekordu zdecydowano się na inne rozwiązanie. Zastosowano dokładnie ten sam protokół tekstowy ASCII co opisany powyżej do komunikacji między głównym komputerem a modułami. Tak samo, pracuje on w oparciu o protokół UDP w sieci Ethernet. Dzięki temu komunikacja jest szybka, a w tym przypadku ilość danych może być już większa, choć mimo wszystko nie powinna wysycić sieci o

prędkości 100 Mbit/s. Podczas pomiaru komputery systemu pomiarowego zapisują kolejne wyniki jako rekord, do którego jest przyporządkowany identyfikator ID. Ideą jest tu zastosowanie unikalnych identyfikatorów. Zakłada się, że nie może być między nimi przerwy. W związku z tym główny komputer pomiarowy będzie odpytywał o dane z odpowiednim identyfikatorem tak długo, aż je dostanie od systemu pomiarowego. W ten sposób synchronizacja danych odporna jest na wszelkie przerwy w działaniu sieci, a nawet w działaniu głównego komputera pomiarowego. Każde odpytanie poprzedzone jest sprawdzeniem, czy wszystkie dane z danym identyfikatorem są już zapisane w głównej bazie danych. Jeśli nastąpiła awaria połączenia system odpyta o kolejne brakujące dane poczynając od najniższego brakującego identyfikatora.

Przeprowadzono testy tego rozwiązania, symulując następujące awarie:

- odłączenie kabla sieciowego przez wyjęcie wtyczek RJ45 z poszczególnych komputerów, jak i ze switcha,
- odłączenie switcha od zasilania,
- kontrolowane wyłączenie aplikacji sterującej,
- wysłanie sygnał SIGKILL do aplikacji sterującej,
- odłączenie komputera pomiarowego od zasilania.

W każdym z powyższych przypadków po przywróceniu komunikacji (za pomocą naprawy „uszkodzonego” kabla, lub po włączeniu aplikacji) system w akceptowalnym czasie dokonywał synchronizacji nie zapisanych danych. Pomiar obciążenia procesora i pamięci podczas tych operacji pokazuje, że jest on znikomy i nie ma wpływu na responsywność głównej aplikacji.

Wnioskiem z przeprowadzonych analiz jest to, że architektura systemu została wybrana prawidłowo. Spójność danych pomiędzy elementami systemu jest zachowana nawet podczas długich przerw w komunikacji. Aplikacja głównego komputera pomiarowego pracująca na nowoczesnym komputerze klasy PC o niewygórowanych parametrach pozostaje przez cały czas responsywna. Nawet w sytuacji synchronizacji dużej ilości zaległych danych obciążenie dysku twardego nie jest duże, a zużycie pamięci RAM i obciążenie procesora pozostaje na niskim, bezpiecznym poziomie.

Ważnym elementem jest przeprowadzenie procesu badań pracy układu akwizycji i transmisji danych w warunkach pracującej wiertni poszukiwawczej, według wiedzy wykonawców projektu tak kompleksowe i długotrwałe badania prowadzone w warunkach opróbowania złóż (głównie geotermalnych – oczywiście testowana była głównie transmisja) w warunkach rzeczywistych dotychczas były w większości zarezerwowane dla dużych koncernów paliwowo-poszukiwawczych. Wyniki badań zostały wykorzystane do optymalizacji opracowanych systemów dla zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa (praca w strefach przeciwwybuchowych, bezpieczeństwo danych) i niezawodności w szczególnie trudnych warunkach. Nadmieniamy, że kluczowe elementy systemu zostały zaprojektowane, wykonane i przebadane przez wykonawców projektu.