

Zwiększenie odporności magistrali I2C na zaburzenia EMC spotykane w środowisku przemysłowym

Streszczenie. W artykule przedstawiono przypadek osiągnięcia wysokiej odporności magistrali I2C hybrydowego górniczego sterownika polowego na przemysłowe poziomy zaburzeń EMC. Zaprezentowano układ z wykorzystaniem metod pozwalających na uzyskanie wysokiej odporności elektromagnetycznej. Opisano sposób osiągnięcia wymaganego poziomu odporności na modulowane amplitudowo zaburzenia przewodzone indukowane przez pola o częstotliwości radiowej (CWS), a także na szybkozmienne zaburzenia przejściowe (BURST).

Abstract. Paper presents circuit diagram of connection between thermopile sensor and microcontroller unit before and after required immunity threshold achieving. Article shows ways of industrial level EMC immunity reaching from conducted disturbance induced by radio-frequency fields (CWS) and from fast transients disturbances (BURST). (**Increasing I2C bus immunity from industrial EMC disturbances**).

Słowa kluczowe: odporność EMC, BURST, CWS, środowisko przemysłowe, I2C.

Keywords: EMC immunity, BURST, CWS, industrial environment, I2C.

Wstęp

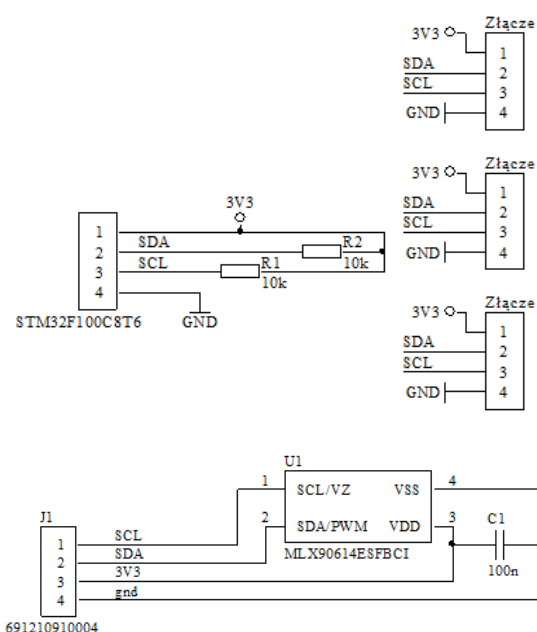
Magistrala I2C jest szyną, w której dwustronna komunikacja odbywa się przy udziale dwu linii – dwukierunkowej linii danych SDA i jednokierunkowej linii zegarowej SCL sterowanej przez urządzenie master. W zależności od potrzeb, urządzenia typu slave nadają bądź odczytują dane z linii SDA. W opisywanym przypadku istotne znaczenie ma fakt, że nadajniki magistrali są skonstruowane zgodnie z zasadą fizycznego iloczynu logicznego linii (logiczny stan wysoki jest recesywny, natomiast logiczny stan niski jest dominujący). Bezpośrednim wynikiem takiej budowy nadajników jest ich fizyczna właściwość jako nadajników typu otwarty kolektor lub otwarty dren. Tym samym możliwe jest wykrywanie kolizji w transmisji pomiędzy wieloma urządzeniami typu slave, nie pozbawione niestety podatności na zakłócenia, co wynika z niewielkiej wydajności prądowej całego układu.

Ogromną zaletą omawianej konstrukcji jest prędkość przesyłania danych dochodząca do 3,2 MBit/s, przy wykorzystaniu tylko 2 linii transmisyjnych. Obecnie standard I2C wykorzystuje się również do przesyłania informacji pomiędzy mikroukładami cyfrowymi wewnątrz urządzeń, w tym także przemysłowych.

Nietypowe zastosowanie

W projekcie pod nazwą „Rodzina inteligentnych ognioszczelnych stacji transformatorowych przeznaczonych do współpracy z siecią Smart Grid”, pojawiła się konieczność zaprojektowania sterownika EAZ z zastosowaniem magistrali I2C do współpracy z bezdotykowymi czujnikami temperatury, które ze względu na aplikację musiały zostać odsunięte od sterownika na odległość około 1 m. Ze względu na wymagania techniczne przyjętego rozwiązania, zdecydowano się zastosować pirometr serii MLX90614, który komunikuje się poprzez magistralę I2C z systemem mikroprocesorowym wykorzystującym mikrokontroler STM32F100C8. Komunikacja pomiędzy urządzeniami odbywała się z częstotliwością standardową tj. 20 kHz. W opisywanym przypadku nietypowość rozwiązania polegała na zastosowaniu standardu I2C do cyfrowego połączenia elementów komunikujących się poza wnętrzem urządzenia, gdzie panują znane, dobrze zidentyfikowane warunki środowiskowe w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej (EMC). Na rysunku 1 przedstawiono pierwszą wersję schematu układu z zastosowaniem magistrali I2C bez użycia elementów odpowiedzialnych za kompatybilność elektromagnetyczną. Zaprezentowany

schemat jest zgodny z notami katalogowymi producentów czujnika i mikrokontrolera.



Rys.1. Pierwsza wersja schematu układu, zgodna z notami katalogowymi producentów czujnika i mikrokontrolera [2],[3]

Zaburzenia EMC

Urządzenia EAZ, w szczególności te przeznaczone do zabudowywania w obudowach ognioszczelnych w wyrobiskach kopalni węgla kamiennego, pracują w warunkach środowiska przemysłowego [5]. Od urządzeń tych wymaga się odporności na zaburzenia elektromagnetyczne typowe dla elektroenergetycznych sieci górniczych o poziomach nie niższych niż podane w normie PN-EN 60255-26:2014 [1]. Norma ta dotyczy kompatybilności elektromagnetycznej przekładników pomiarowych i urządzeń zabezpieczeniowych. W rozdziałach 5 i 6 tej normy przywołuje się rodzaje zaburzeń, które mogą negatywnie wpływać na działanie urządzeń EAZ. Od odporności na te zaburzenia zależy zarówno bezawaryjna praca maszyn służących wydobywaniu węgla kamiennego, jak i bezpieczeństwo personelu obsługującego. Spełnienie poziomów odporności EMC zmniejsza również ryzyko wystąpienia wielu

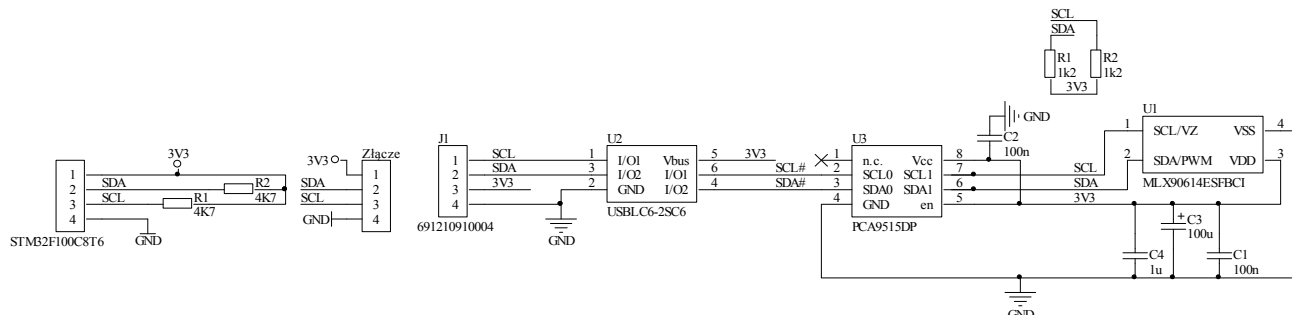
nieuzasadnionych postojów zmniejszających efektywność procesu wydobywania węgla kamiennego. Z wymienionych powyżej powodów, jak również z aktualnych przepisów prawa (Dyrektywa EMC) powstaje konieczność projektowania urządzeń EAZ zgodnie z wymaganiami norm przedmiotowych. Zaprojektowane konstrukcje urządzeń należy także sprawdzić pod kątem osiągniętych poziomów emisji i odporności na elektromagnetyczne sygnały zaburzające.

Dla opracowanego w projekcie układu (rys. 1) przeprowadzono zgodnie z normą [1] badania kompatybilności elektromagnetycznej. Wykonano je w warunkach laboratoryjnych gwarantujących powtarzalność warunków próby. W trakcie prowadzonych badań zaobserwowano, w części sterownika EAZ odpowiedzialnej za transmisję danych z pirometrów do głównego mikrokontrolera sterownika, strefę dużej wrażliwości na zaburzenia BURST i CWS.

Zwykle badania nad oddziaływaniem szybkozmiennych zaburzeń przejściowych (BURST), wykonywane zgodnie z normą [1], przeprowadza się przy użyciu specjalizowanego generatora szybkozmiennych impulsów przejściowych. Badanie zostało przeprowadzone w warunkach sterownika EAZ ustawionego na uziemionej płycie ustalającej potencjał odniesienia, sprzężonego z generatorem impulsów za pomocą klamry sprzęgającej, której zadaniem było pojemnościowe wstrzykiwanie serii impulsów zaburzających. W stanie roboczym sterownik EAZ pozostawał z podłączonym do obudowy przewodem uziemiającym. W czasie narażenia szybkozmiennymi zaburzeniami przejściowymi (BURST) wykorzystuje się serie znormalizowanych impulsów o czasie narastania 5ns i czasie do półszczytu 50 ns. Częstotliwość powtarzania

serii impulsów wynosiła 5 kHz a napięcie szczytowe impulsów 4kV. Łączny czas narażenia podczas tego typu badań wynosi 120 s. Odporność urządzenia jest wystarczająca, jeśli po zaprzestaniu zaburzenia urządzenie pracuje normalnie spełniając przynajmniej podczas badania odporności wymagania kategorii B objawów i efektów [1].

Badania z wykorzystaniem modulowanych amplitudowo zaburzeń przewodzonych indukowanych przez pola o częstotliwości radiowej (CWS) prowadzi się przy użyciu specjalizowanego generatora sygnałowego. Sprawdzenie odporności przeprowadza się zgodnie z wymaganiami z normy [1]. Badanie wykonano również w warunkach sterownika EAZ ustawionego na uziemionej płycie ustalającej potencjał odniesienia sprzężonego z generatorem impulsów za pomocą klamry sprzęgającej, której zadaniem było wstrzykiwanie sygnału zaburzenia za pomocą sprzężenia elektromagnetycznego. W stanie roboczym sterownik EAZ pozostawał z podłączonym do obudowy przewodem uziemiającym. W tym przypadku narażenia sygnał zaburzający był przestrajany w zakresie częstotliwości nośnej od 0,15 MHz do 80 MHz. Sygnał nośny modulowano częstotliwością 1 kHz. Powstałe w ten sposób fale radiowe miały głębokość modulacji równą 80%. Badanie przeprowadzono przy wzrastającej częstotliwości sygnału zaburzenia z krokiem 1% w każdym kolejnym odstępie czasu równym 3 s. Zapisy w normie [1] wymagają podania na cęgi sprzęgające napięcia zaburzeń 10 Vrms z generatora o impedancji wyjściowej 150 Ω. Jeżeli podczas badania urządzenie EAZ pracuje normalnie i spełnia wymagania kategorii A objawów i efektów [1], czyli bez utraty funkcjonalności i ubytku danych w komunikacji w obecności zaburzeń, wówczas przyjmuje się, że jego odporność spełnia wymagania w normie poziom.



Rys.2. Ostateczna wersja schematu układu, zgodna z notami katalogowymi producentów czujnika i mikrokontrolera, z zastosowaniem opisywanych metod ograniczania wpływu zaburzeń EMC [4]

Uodpornienie magistrali I2C na zaburzenia

W trakcie prowadzonego badania odporności sterownika na zaburzenia CWS okazało się, że dla pewnych zakresów częstotliwości sygnałów zaburzających niemożliwa jest komunikacja pomiędzy piometrem a sterownikiem EAZ. Początkowo poziom odporności oscylował wokół wartości 3,5 Vrms sygnału zaburzającego CWS. W toku prac badawczych zidentyfikowano następujące problemy:

- powtarzalne sekwencje restartu wewnętrznego systemu mikroprocesorowego piometru,
- przesyłanie niepoprawnych danych dotyczących temperatury, niezwiązane z błędami transmisji I2C,
- przesyłanie niepoprawnych danych dotyczących temperatury, związane z błędami transmisji I2C,
- modyfikacja wewnętrznych rejestrów pamięci systemu mikroprocesorowego piometru.

Podczas badania odporności sterownika na zaburzenia BURST okazało się, że zaburzenia w powtarzalnie występujących okresach czasu uniemożliwiają komunikację

pomiędzy piometrem a sterownikiem EAZ. Rozpoznano przy tym następujące problemy:

- powtarzalne sekwencje restartu wewnętrznego systemu mikroprocesorowego piometru,
- przesyłanie niepoprawnych danych dotyczących temperatury, związane z błędami transmisji I2C.

Zarówno dla zaburzeń CWS jak i BURST problemy z przesyłaniem niepoprawnych danych dotyczących temperatury zostały częściowo wyeliminowane metodami programowymi poprzez wprowadzenie obsługi danych kontrolnych PEC (Packet Error Check). Wprowadzenie mechanizmu sprawdzania poprawności danych nie rozwiązało jednak w pełni problemu, bowiem nie wyeliminowało przyczyny błędu, a jedynie w znaczący sposób zmniejszyło liczbę błędnych ramek, które poprzez sterownik EAZ były identyfikowane jako poprawne. Wobec tego metodę tę można było potraktować jedynie jako uszczelnienie całego mechanizmu odporności na zakłócenia EMC.

Przy podejmowaniu próby zwiększenia odporności układu nie można było zastosować filtrów RC typowych do

zastosowania w takich przypadkach. Było to spowodowane maksymalną dopuszczalną pojemnością linii obsługiwanej przez nadajniki I2C, wynoszącą 400 pF. Ograniczenie to powoduje, że wymaganą odporność tej magistrali należy osiągnąć innymi metodami, bowiem zastosowanie filtrów RC z pojemnością skupioną o wartości 390 pF nie przynosi oczekiwanych rezultatów, a ich rzeczywisty wpływ na zwiększenie odporności układu jest zasadniczo pomijalny.

Kolejne próby zwiększenia odporności na zaburzenia CWS doprowadziły do znalezienia bezpośredniej przyczyny występowania powtarzalnych sekwencji restartu wewnętrznego systemu mikroprocesorowego pirometru. Okazało się, że zbyt duże chwilowe napięcie na zaciskach sygnałowych i zasilania pirometru. Wprowadzenie układu zabezpieczającego USBLC6-2, spowodowało trwałe wyeliminowanie efektu restartu systemu pirometru. Mechanizm ten działa w sposób następujący. Dioda Zenera włączona pomiędzy linię masy a linię zasilającą obwodu skutecznie ogranicza maksymalne napięcie, które pojawia się na zaciskach zasilających pirometru. Jednocześnie komplet diod Schottky'ego wchodzących w skład układu zabezpieczającego eliminuje szybkie stany przejściowe o wyższym napięciu niż dopuszczone przez system pirometru, eliminując częściowo problemy związane z modyfikacją wewnętrznej pamięci systemu pirometru. Dzięki zastosowaniu układu zabezpieczającego tego rodzaju udało się praktycznie wyeliminować problemy niezwiązane ze zwiększoną liczbą błędów transmisji I2C, przy jednoczesnym zwiększeniu odporności badanego układu na sygnał zaburzający o napięciu rzędu 7 Vrms.

Ze względu na powszechnie lokalny charakter magistrali I2C, nadajniki dostępne dla tego standardu są nadajnikami o ograniczonej wydajności prądowej (pojedyncze miliampery). Niewielkie prądy pojawiające się w magistrali I2C podczas transmisji decydują o jej podatności na zakłócenia elektromagnetyczne. Efekt ten można częściowo wyeliminować poprzez zmniejszenie prędkości transmisji, jest to jednak niekorzystne ze względu na znaczne ograniczenie częstotliwości pomiarów. W związku z tym tej metody ograniczenia wpływu zaburzeń nie można było w projekcie zastosować. Dopuszczalne jednak mogło być zastosowanie regeneratora sygnału magistrali I2C z nadajnikiem o wyższej wydajności prądowej w stosunku do nadajnika systemu pirometru. Zastosowanie układu regeneratora sygnału PCA9515A, spowodowało wzrost poziomu odporności czujnika temperatury na zaburzenia zarówno typu BURST, jak i CWS, było to jednak uodpornienie niewystarczające z punktu widzenia odporności wymaganej przez normę [1]. Przydatne w tym przypadku okazało się ekranowanie torów sygnałowych, stosowane w technice przesyłania sygnałów Audio-Video. Aby osiągnąć zadowalający poziom odporności na zaburzenia BURST i CWS, zdecydowano się sprawdzić kilka rodzajów przewodów ekranowanych. Podczas badań najbardziej skuteczne tłumienie zakłóceń uzyskano w wyniku zastosowania typowego kabla VGA, którego skręcone żyły są chronione podwójnym, odseparowanym galwanicznie ekranem. Ekran zewnętrzny uziemiono poprzez jego połączenie z obudową sterownika EAZ, natomiast ekran wewnętrzny dołączono do masy zasilania układu: pirometr – sterownik EAZ. Praktyczne zastosowanie wymaga w tym przypadku użycia przewodu w postaci podwójnie ekranowanej skrętki S-STP z rozdzielonymi galwanicznie ekranami, lub przewodu wykonanego na potrzeby transmisji w standardzie USB 3.0 lub standardzie

HDMI. Zastosowanie tego rodzaju przewodu pozwoliło na osiągnięcie odporności układu na sygnał zaburzający CWS o napięciu rzędu 9 Vrms. Odporność ta nie jest jednak wystarczająca z punktu widzenia warunków środowiska przemysłowego, gdzie wymagany jest 10 Vrms próg odporności na sygnały CWS. Pomimo zastosowania wszystkich wymienionych wyżej metod zwiększania odporności na zaburzenia EMC (rys. 2), sporadycznie występował problem (zarówno dla zaburzeń EMC i BURST) zrywania transmisji. Po wnikliwej analizie tego zjawiska stwierdzono problem związany z tętnieniami zasilania występującymi w chwilach, w których zaburzenia skutecznie sprzęgały się z transceiverami I2C pirometru. Problem ten udało się rozwiązać za pomocą kondensatorów o niskiej zastępczej rezystancji szeregowej (low ESR) i dużej pojemności (100 µF), w powiązaniu z dodatkowym uziemieniem po stronie pirometru zewnętrznego ekranu podwójnie ekranowanego przewodu. Zastosowanie tego rozwiązania umożliwiło osiągnięcie wymaganego progu odporności 10 Vrms zarówno na sygnał CWS, jak i 4 kVpp na sygnał BURST.

Podsumowanie

Opisane powyżej, zastosowane praktycznie metody zdecydowały o osiągnięciu satysfakcjonującego poziomu odporności zaprezentowanego obwodu na zaburzenia obecne w środowisku przemysłowym. Przy podejmowaniu prób zwiększenia elektromagnetycznej odporności układu, niektóre z nich kończyły się niepowodzeniem, z kolei inne umożliwiły jedynie zbliżenie właściwości rozpatrywanego obwodu do wymaganego progu odporności na zaburzenia. Zaprezentowane w artykule metody pozwoliły osiągnąć wymagany poziom odporności na zaburzenia BURST i CWS. Okazało się, że dobrze zaprojektowane obwody zasilające są kluczem do sukcesu. Dotyczy to również przypadku odporności obwodów elektronicznych na zaburzenia EMC.

Pomimo różnic w naturze zjawisk sygnałów zaburzających CWS i BURST, metody eliminowania wpływu zewnętrznych pól elektromagnetycznych są dla obu rodzajów zaburzeń podobnie skuteczne. W praktyce często okazuje się, że uzyskanie wymaganego progu odporności dla zaburzeń CWS rozwiązuje jednocześnie, tak jak w omawianym przypadku, problem pojawiający się dla zaburzeń innego typu.

Artykuł zawiera wyniki osiągnięte podczas realizacji projektu ID181836 finansowanego przez NCBiR.

LITERATURA

- [1] PN-EN 60255-26:2014-01E, Przekazniki pomiarowe i urządzenia zabezpieczeniowe, Część 26: Wymagania dotyczące kompatybilności elektromagnetycznej.
- [2] Nota katalogowa MLX90614, rozdział 11, Applications Information.
- [3] Nota katalogowa STM32F100C8, rozdział 5.3.16, I2C interface characteristics.
- [4] Datasheet of PCA9515A
- [5] Chudorliński J. Problematyka techniczna i prawna konstrukcji urządzeń automatyki zabezpieczeniowej zgodnych z wymaganiami EMC. *Przegląd Elektrotechniczny*, 90(2014) nr.7, 156-159

Autorzy: mgr inż. Paweł Michalski, mgr inż. Jerzy Chudorliński, Instytut Tele- i Radiotechniczny, Teleinformatyki i Elektroniki CA ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa, E-mail: pawel.michalski@itr.org.pl, jerzy.chudorliński@itr.org.pl