

mgr inż. Kazimierz MAJDAN
Przemysłowy Instytut Automatyki
i Pomiarów MERA-PIAP
Warszawa

ANALIZA SYGNAŁÓW TRANSMISYJNYCH W PRZEMYSŁOWYCH SIECIACH LOKALNYCH

W artykule przedstawiono przebieg standaryzacji sygnałów transmisyjnych stosowanych w jednokanałowych, przemysłowych sieciach lokalnych oraz jej stan aktualny. Przeprowadzono analizę i ocenę różnych technik modulacyjnych, a także warunków propagacji sygnałów w obszarze warstwy fizycznej i medium sieci o topologii magistralowej.

1. WSTĘP

Zadanie opracowania urządzeń przemysłowej sieci lokalnej może być skutecznie rozwiązane tylko przez skoncentrowanie wysiłków instytutów naukowych, producentów specjalizowanych układów scalonych, kabli i osprzętu sieciowego oraz producentów urządzeń systemowych, przy silnym sprzężeniu zwrotnym wyników badań systemowych i opinii użytkowników sieciowych systemów automatyzacji produkcji.

Ważną z punktu widzenia oceny sprawności tego typu systemów, a jednocześnie kontrolerską kwestią (wobec kilku różniących się wzajemnie standardów światowych) jest zagadnienie wyboru postaci sygnału przeznaczonego do wymiany komunikatów między stacjami jednokanałowej sieci lokalnej niskiego szczebla automatyzacji.

Wagę tego problemu podkreśla fakt, że od jakości transmisji sieciowej zależne jest działanie wszystkich urządzeń obiektowych danego systemu automatyzacji obiektów zdecentralizowanych. Optymalizacja procesów: kodowania, modulacji, przesyłania, filtracji i detekcji sygnałów transmisyjnych w obszarze warstwy fizycznej PHY oraz medium transmisji ma również istotne znaczenie, ze względu na brak podstaw do jednolitego traktowania różnych możliwych aplikacji urządzeń komunikacji sieciowej.

Konfiguracja systemu, a zatem topologia magistrali, liczba węzłów aktywnych, zasięg łączności, rodzaj i intensywność zakłóceń środowiska przemysłowego itp. warunki będą na ogół różne i zmienne w czasie. Również sygnały przesyłane między stacjami po magistrali sieciowej, bez względu na ich formę wewnętrzną, będą stochastycznie zmienne, o nieznanym cechach stacjonarności i ergodyczności, co jest specyfiką topo-

logii magistralowej, w odróżnieniu od klasycznych kanałów transmisji danych w relacji „punkt–punkt”.

Z tego powodu bezpośrednie przeniesienie zaleceń standardów światowych, będących rezultatem badań i oceny dokonanej w innych warunkach, niesie z sobą pewien stopień ryzyka. Niniejsza analiza dotyczy więc będzie m.in. pewnych ogólnych cech wybranych sygnałów transmisyjnych oraz zjawisk fizycznych właściwych procesom generacji, przesyłania i odbioru tych sygnałów – co może stanowić przyczynek do optymalizacji urządzeń przemysłowych sieci lokalnych.

Zagadnienia konstrukcyjne technicznej realizacji układów modemowych nie będą w niniejszym artykule prezentowane, głównie ze względu na obiektywną konieczność użycia dla komunikacji z przepływnością binarną 5 lub 10 Mb/s specjalizowanych, szybkich układów scalonych VLSI–ASIC (np. SIEMENS–Token Bus Controller SAB82510 i Token Bus Modem SAB82511) – jest to więc obszar zagadnień technologii układów, projektowanych przy zastosowaniu metod CAD/CAE. Możliwości ingerencji projektantów urządzeń komunikacyjnych będą więc w przyszłości ograniczone do:

- zapewnienia warunków optymalnego dopasowania falowego oraz optymalnej filtracji i korekcji sygnału, zależnie od zastosowanego medium i warunków propagacji.
- implementacji protokołów standardowych warstw:
1(PHY) i 2(LLC) sieci.

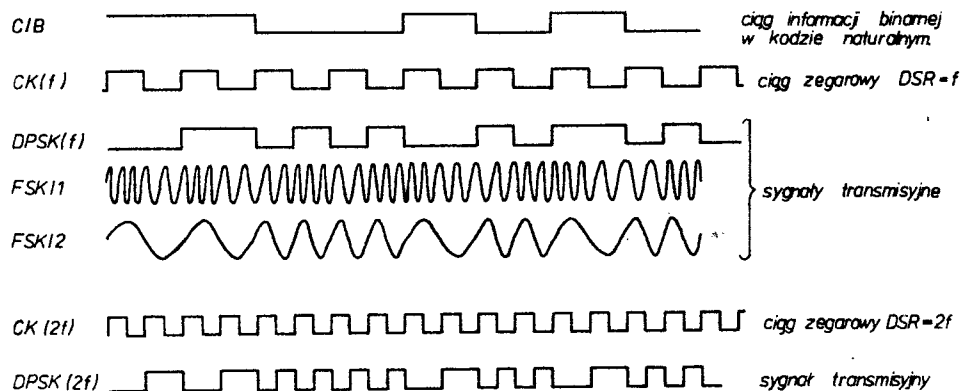
W rozdziałach 2 i 3 zostaną scharakteryzowane tendencje standaryzacyjne oraz własności fizyczne sygnałów transmisyjnych stosowanych w wielodostępnych systemach sieciowych. Przybliżone, opisowo–fizyczne ujęcie zagadnień nie wyczerpuje możliwości dokonania dokładnej analizy przy zastosowaniu aparatu stochastyczno–widmowej teorii sygnału.

Przedstawione treści mają głównie na celu zwrócenie uwagi na specyficzne zagadnienia łączności cyfrowej występujące w nowej dziedzinie przemysłowych sieci lokalnych.

2. STANDARYZACJA SYGNAŁÓW TRANSMISJI SIECIOWEJ

Rozpoczęta w 1980 r. standaryzacja IEC charakteryzuje się dokonywaniem licznych i daleko idących zmian w częściach obejmujących obszar warstwy fizycznej (PHY) oraz medium transmisyjne. Zmiany te dotyczyły głównie rodzaju sygnału liniowego, prędkości transmisji (przepływności binarnej DSR–b/s) i wymagań czasowych transmisji ramek sygnałowych. Początkowo dokumenty standaryzacyjne IEC–PROWAY definiowały sygnał liniowy jako szeregowy ciąg impulsowy o różnicowej, binarnej modulacji fazy przesyłany z DSR = 1 Mb/s. Sposób tworzenia tego sygnału pokazano na rys. 1, gdzie sygnał liniowy DPSK wytworzony jest z sygnałów: CIB – ciągu

informacji binarnej o kodzie naturalnym i CK – ciągu zegarowego o częstotliwości $f = \text{DSR}$. Sygnał DPSK znajduje liczne zastosowania w modemach pasma podstawowego (baseband) informatycznych systemów sieciowych oraz w lokalnych sieciach automatyki eksploatowanych obecnie w przemyśle USA i RFN, a także w lotnictwie i marynarce wojennej USA.



Rys. 1. Przebiegi czasowe sygnałów nadawanych na magistralę sieciową. DPSK – różnicowa modulacja fazy – baseband; FSK/1 – modulacja manchester + FSK z ciągłością fazy – carrierband; FSK/2 – modulacja FSK z fazą koherentną – carrierband.

Kolejne projekty dokumentów standaryzacyjnych IEC–PROWAY preferowały zasadniczo odmienny sposób wykorzystania pasma przenoszenia magistrali sieciowej, a mianowicie przesunięcie dolnopasmowego sygnału w pasmo 3–7 MHz, w którym zawarty jest sygnał nośny (carrierband). Metodę modulacyjną przedstawiono na rys. 1, gdzie sygnał FSK/1 wytworzony jest przez zastosowanie 2-stopniowej modulacji:

- w pierwszym stopniu kodowego (nieróżnicowego) kluczowania fazy „manchester”,
- w drugim stopniu modulacji FM, na zasadzie kluczowania częstotliwości znamienych 3,75 MHz/6,25 MHz z zachowaniem ciągłości fazy w momentach kluczowania.

Zmiana standardu sygnału liniowego podyktowana była, jak można sądzić, analogiami do modemów telefonicznych (np. modem wg V23/CCITT – produkowany również w PIAP w wersji pakietów PL–01 lub PL–02), a głównie koncepcją wykorzystywania dla przemysłowych sieci lokalnych istniejących instalacji magistralowych sieci telewizji przewodowej typu CATV. Sygnał transmisyjny zawarty wewnątrz podstawowego pasma wizyjnego jest dogodny do przemieszczenia go przez jednowstęgową modulację amplitudy w określony kanał częstotliwościowy i do tworzenia w ten sposób wielokanałowego systemu zintegrowanych usług sieciowych. Stwarza to możliwości dość prostej realizacji intersieci obejmującej m.in. duży obszar obiektów automatyzacji i łączności, podobnie jak to jest zorganizowane w rozległych sieciach informatycznych typu ISDN. Podstawą przyjętego w IEC (Publikacja nr 955 – części 8, 9) standardu

były więc głównie względy ekonomiczne – wykorzystanie szeroko rozpowszechnionej sieci telewizji przewodowej CATV.

Na początku lat 80. koncern GM rozpoczął prace nad systemem łączności dla celów automatyzacji swych fabryk, które finalnie doprowadziły do powstania protokołu automatyzacji produkcji MAP. Jako podstawę przyjęto model OSI/ISO–RM systemów otwartych oraz standardy protokołów IEEE802.2, 802.4 (Token Passing Bus). Zasadniczą cechą architektury, topologii i protokołów MAP sieci wg koncepcji GM jest struktura kręgosłupa (backbone) sieci, tworzona na bazie współosiowych kabli szerokopasmowych i wiążąca w sposób elastyczny istniejące lokalne podsieci o różnych standardach protokołów.

Dokument GM–MAP2.1 wydany w 1985 r. sumował rezultaty rozległych badań sieci o strukturze kręgosłupowej. Włączono wówczas również do standaryzacji MAP tzw. strukturę komórkową zawierającą węzły, które poza pakietem protokołów terminali MAP stosują zredukowany pakiet protokołów bazowanych na potwierdzonych usługach warstwy LLC, wykonywanych wg koncepcji IEC–PROWAY–C (aktualnie IEEE 802.2 typ 3). W zakresie warstwy fizycznej standard MAP 2.1 definiuje m.in. dwa rodzaje sygnałów standardowych:

- I. IEEE 802.4 sygnał „carrierband” powstający jako produkt duobinarnej modulacji AM–PSK fali nośnej z utworzeniem dwu kanałów: nadawczego i odbiorczego, który jest stosowany do transmisji sygnałów 10 Mb/s przez medium szerokopasmowe wiążące stacje końcowe MAP z użyciem struktury kręgosłupowej i remodulatora „headend”;
- II. IEEE 802.4, sygnał „carrierband” powstający jako produkt kluczowania częstotliwości ze spójnością fazy sygnału nośnego z sygnałem modulującym, który jest stosowany do transmisji sygnałów 5 lub 10 Mb/s w jednokanałowej sieci o strukturze komórkowej MAP (rys. 1 – sygnał FSK/2).

Postać sygnału duobinarnej amplitudowo–fazowej modulacji AM–PSK dla sieci „broadband–backbone” MAP–u wynika wprost z potrzeby zwielokrotnienia częstotliwościowego kanałów w obszarze medium szerokopasmowego. Standaryzacja formy sygnału liniowego dla jednokanałowej podsieci o strukturze komórkowej MAP poprzedzona była szeroko zakrojonymi badaniami systemów sieciowych wyróżnionych ze względu na stosowany sygnał liniowy.

Badania w warunkach zakłóceń przemysłowych zakładów Inland Steel i Ford przeprowadzone na zlecenie GM przez Eastman–Kodak [3] wykazały wyższą odporność na zakłócenia sygnałów o modulacji FSK z fazą spójną (koherentną) nad sygnałami o modulacji FSK z fazą ciągłą wg standardu IEC–PROWAY.

Zastosowanie sygnałów o przepływnościach 5, 10 Mb/s w jednokanałowej sieci lokalnej, poza oczywistym, aczkolwiek nie koniecznym w podsieci niskiego szczebla zwiększeniem szybkości wymiany komunikatów sieciowych, znacznie upraszcza

strukturę sprzętową i organizację obsługi komunikatów przekazywanych poprzez węzły intersieci typu most lub wtórnik (router), pośredniczące między podsiecią o architekturze komórkowej a intersiecią o architekturze kręgosłupowej. Związane jest to z eliminacją (lub znacznym ograniczeniem) buforowania i konieczności organizacji kolejek komunikatów w węzłach pośredniczących, co eliminuje potrzebę instalowania węzłów typu „gateway”. Można przypuszczać, że te powody m.in. zadecydowały o uzupełnieniu w maju 1988 r. standardu IEC-PROWAY-C o części 12 i 13, dołączone do publikacji IEC 955 i definiujące identycznie jak MAP 2.1 oraz IEEE 802.4 – sygnały transmisyjne i charakterystyki medium.

Tak więc obecnie (w 1988 r.) można zauważyć, że istnieje zgodność wszystkich międzynarodowych organizacji normalizacyjnych oraz uznanych komitetów standaryzacyjnych takich jak: IEEE-P802, IEC-PROWAY, a także ANSI ISA (USA) i tzw. Grup Użytkowników MAP w sprawie używania dla jednokanałowych sieci lokalnych sygnałów transmisyjnych powstałych przez zastosowanie jednostopniowej binarnej modulacji częstotliwości z fazą koherentną (sygnał FSK/2 – wg rys. 1).

IEC-PROWAY-C wprowadzie utrzymuje jeszcze alternatywnie sygnał FSK z fazą ciągłą o przepływności 1 Mb/s (części 8 i 9 publikacji IEC 955) jako standardowy lecz zapewne praktyka produkcyjna firm (pojawiają się układy VLSI-ASIC i urządzenia MAP, a nie obserwuje się aplikacji PROWAY-C), a także złożoność dołączania tego typu podsieci do struktury kręgosłupowej MAP spowodują, że sieci lokalne według zaleceń części 8 i 9 publikacji IEC 955 nie znajdą szerszego rozpowszechnienia.

3. ANALIZA WIERNOŚCI JEDNOKANAŁOWEJ TRANSMISJI SIECIOWEJ

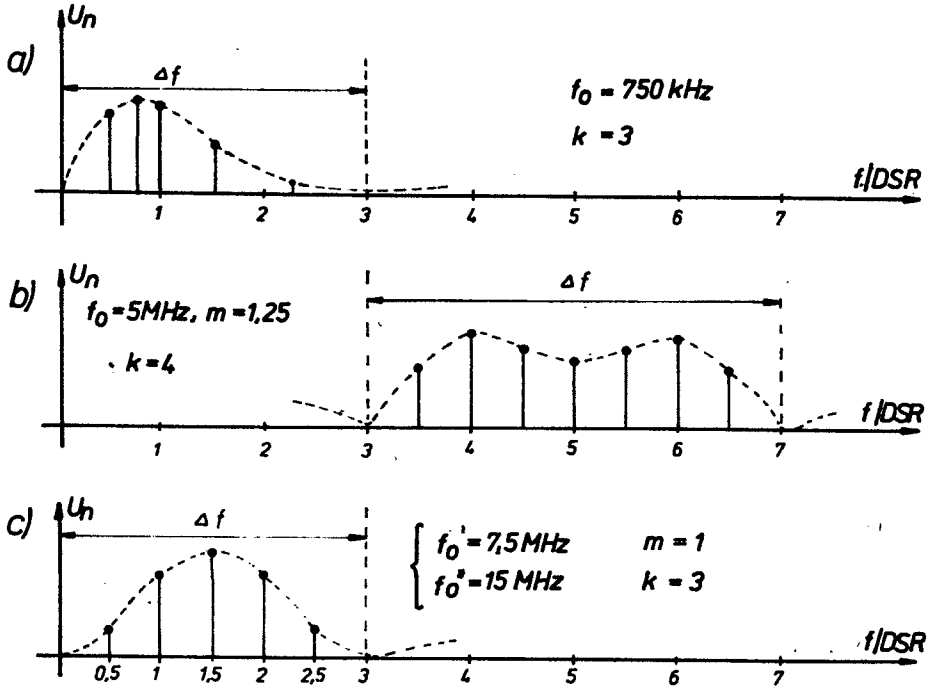
Przepustowość informacyjna wielodostępnego systemu sieciowego jest określona przez wierność i efektywną szybkość wymiany danych użytkowych oraz czas dostępu do magistrali sieciowej. Są to wskaźniki statystyczne – dla pełnej oceny należałoby znać ich rozkłady losowe, a co najmniej istotne parametry tych rozkładów. Wierność przekazu ma pośredni wpływ (powtórzenia) na efektywną szybkość i czas dostępu, występuje więc między nimi dość silna korelacja wzajemna.

Tak określona przepustowość informacyjna zależy głównie od:

- intensywności generacji zleceń sieciowych w źródłach danych (obiektach automatyzacji),
- liczby i rodzaju dołączonych stacji,
- postaci sygnału transmisyjnego,
- charakterystyk transmisyjnych medium,
- metody filtracji i detekcji sygnału odbieranego,
- charakterystyk stochastyczno-widmowych otoczenia, tj. źródła zakłóceń zewnętrznych,

○ cech konstrukcyjnych układów nadawczo—odbiorczych.

Przedstawiona w dalszym ciągu w formie opisowo—fizycznej analiza dotyczyć będzie wpływu czynników 3, 4, 5 oraz częściowo (dla zakłóceń addytywnych o charakterze szumu białego) także czynnika 6 na wierność transmisji, a zatem również na wynikową przepustowość informacyjną systemu sieciowego.



Rys. 2. Rozkłady gęstości widmowej sygnałów nadawanych: a) baseband— $DSR = 1 \text{ Mb/s}$, różnicowa modulacja fazy—DPSK; b) carrierband— $DSR = 1 \text{ Mb/s}$, modulacja manchester + FSK/1; c) carrierband— $DSR = 5 \text{ Mb/s}$ lub 10 Mb/s , modul. FSK/2

Pokazane w formie przykładu na rys. 1 przebiegi czasowe oraz na rys. 2 wykresy uśrednionej (tj. dla zrównoważonego kodowo ciągu modulującego—CIB) obwiedni gęstości widmowej sygnałów: DPSK, FSK/1 i FSK/2 pozwalają na dokonanie przybliżonej analizy własności fizycznych przesyłania i odbioru tych sygnałów. Należy jednak zaznaczyć, że w każdym przypadku postać czasowa i rozkład widma zależne są od przedziału obserwacji i mają charakter losowy.

Binarną modulację fazy (sygnał DPSK) oraz modulację częstotliwości (sygnały: FSK/1 i FSK/2) można zaliczyć do wspólnej klasy binarnych modulacji kątowych. Sygnał DPSK zdefiniowany jest jako produkt kodowo—impulsowej, różnicowej, binarnej

modulacji fazy. Ma on wiele cech wspólnych z sygnałem FSK/2, co można zauważyć porównując (rys. 1) przebieg czasowy FSK/2 z sygnałem DPSK (2f), uzyskanym w wyniku modulacji kodowej tego samego sygnału informacji CIB, przy użyciu podwojonej częstotliwości zegarowej CK (2f).

O własnościach transmisyjnych sygnałów DPSK, FSK/1 i FSK/2 można więc dyskutować przy użyciu metod przybliżonej analizy stochastyczno-widmowej sygnałów binarnej modulacji częstotliwości FM. Przy analizie metod odbioru sygnałów DPSK i FSK/2 może mieć również zastosowanie analiza własności binarnej modulacji fazy.

Sygnały binarnej FM różnicują następujące ogólne własności:

- prędkość transmisji (przepływność binarna) i prędkość modulacji,
- przebieg czasowy ciągły/impulsowy,
- zachowanie ciągłości fazy w momentach kluczkowania,
- spójność częstotliwości nośnej i modulującej,
- zawartość składowej stałej,
- zawartość energetyczna widma mocy (gęstość widmowa),
- położenie zer widma mocy,
- własności synchronizacyjne sygnału nośnego i modulującego,
- odporność na zniekształcenia amplitudowo-fazowe medium transmisyjnego,
- odporność na szum własny (termiczny, przydźwięki sieciowe, echo własne itp.),
- odporność na zewnętrzne zakłócenia otoczenia przemysłowego.

Wymienione powyżej własności opisujące sygnały transmisyjne binarnej FM są wzajemnie powiązane, a związki te można scharakteryzować i ocenić m.in. na podstawie analizy widmowej. Własności widmowe sygnału FM określają następujące parametry:

– dewiacja częstotliwości: $\Delta F = \frac{F_1 - F_2}{2}$, gdzie F_1 i F_2 są odpowiednio górną i dolną częstotliwością znamioną modulacji;

– częstotliwość środkowa $f_0 = \frac{F_1 + F_2}{2}$

– wskaźnik modulacji $m = \frac{2 \Delta F}{V}$ gdzie V jest prędkością modulacji wyrażoną w bodach – Bd;

– względna szerokość widma $k = \frac{\Delta f}{DSR}$ gdzie Δf jest przedziałem częstotliwości zawierającym informacyjną część widma mocy, DSR jest przepływnością binarną wyrażoną w b/s.

Wszystkie trzy postacie sygnałów zmodulowanych, tj. DPSK, FSK/1, FSK/2 nie zawierają składowej stałej, natomiast zawartość energetyczna widma mocy (rys. 2), określona przedziałem Δf oraz współczynnikiem k wykazuje przewagę sygnałów DPSK i FSK/2 nad sygnałem FSK/1. Impulsowy sygnał DPSK posiada jednak nieco większą energię widma poza przedziałem Δf oraz pewną zawartość widma odbitego i pod tym względem jest mniej korzystny w porównaniu do sygnału FSK/2.

Z eksploatacyjnego punktu widzenia pożądane jest aby przepływność binarna DSR była jak największa, zaś pasmo częstotliwości Δf wąskie. Można to skutecznie uzyskać przez zmniejszenie dewiacji ΔF ponieważ o szerokości widma decyduje głównie wartość wskaźnika modulacji m . Występuje tu jednak ograniczenie związane z techniczną realizacją demodulatora przy małej dewiacji.

Stosowanie małych wartości współczynnika k jest szczególnie istotne w przypadku dużych wartości DSR właściwych dla sieci lokalnych. Wiąże się to z zagadnieniem minimalizacji zniekształceń charakterystycznych sygnału po demodulacji FM spowodowanych niestałą charakterystyką tłumieniową oraz nieliniową charakterystyką fazową magistrali sieciowej, a także zależnością tych charakterystyk od odległości nadajnik—odbiornik i impedancji wejściowej obciążonych węzłów magistrali.

Zaletą sygnałów FSK/1 i FSK/2 jest symetria uśrednionej obwiedni gęstości widmowej, a w przypadku sygnału FSK/1 również mała dyspersja kodowa widma, uzyskana kosztem podwojenia prędkości modulacji V , oraz możliwość wstępnej filtracji sygnału podawanego na wejście modulatora FM.

Zawartość widma odbitego, asymetria i dość duża dyspersja kodowa obwiedni widma sygnału DPSK są źródłem tzw. zniekształceń włączeniowych, zwłaszcza przy bezpośrednim połączeniu nadajnik—odbiornik. Po przejściu przez dolnoprzepustową linię magistrali oraz transformatory liniowe nadajnika i odbiornika widmo tego sygnału symetryzuje się, zaś jego postać czasowa znacznie upodabnia się do sygnału FSK/2.

Rozkład gęstości widmowej sygnału transmisyjnego ma również istotne znaczenie przy rozpatrywaniu odporności na zakłócenia addytywne — szumowe oraz multiplikatywne — impulsowe. Przy modulacji FM sygnałem prostokątnym, symetrycznym o postaci analitycznej:

$$U_m = U \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sin \pi Vt + \frac{2}{3\pi} \sin 3\pi Vt + \frac{2}{5\pi} \sin 5\pi Vt + \dots \right)$$

powstają składniki widma o częstotliwościach będących kombinacją częstotliwości f_0 i $V/2$, zaś funkcja opisująca przebieg obwiedni gęstości widmowej zależy od ciągłości fazy przebiegu zmodulowanego. Poza pasmem użytecznym Δf :

- przy fazie nieciągłej posiada ekstrema i opada według zależności $1/f^2$,
- przy fazie ciągłej, opada monotonicznie według zależności $1/f^4$.

Wszystkie ww. sygnały rozpatrywane jako sygnały binarnej FM charakteryzują się ciągłością zmian fazy w momentach charakterystycznych modulacji i dużym stopniem

koncentracji widma w paśmie Δf , a zatem ograniczenie pasma poprzez filtrację, w przypadku systemu jednokanałowej transmisji sieciowej, ma znaczenie jedynie ze względu na zwiększenie odporności na zakłócenia. Należy zaznaczyć, że przy topologii magistralowej sieci lokalnej, gdzie odległość nadajnik—odbiornik i wypełnienie czasowe sygnału liniowego są losowo zmienne, filtracja sygnałów transmisyjnych nie może mieć charakteru tzw. optymalnej filtracji. Nie jest bowiem możliwe optymalne dopasowanie charakterystyki tłumieniowej i fazowej oraz obwiedni częstotliwościowo—czasowej filtrów do stochastycznie zmiennego sygnału na wejściu odbiornika. Właściwość ta powoduje, że większa asymetria widma sygnału DPSK oraz dość duża dyspersja widma sygnałów DPSK i FSK/2 w porównaniu do sygnału FSK/1 stają się mniej istotne, zaś odporność na zakłócenia analizowanych sygnałów w głównej mierze będzie zależna od względnej szerokości k uśrednionego widma oraz jego zniekształceń powstałych podczas propagacji przez magistralę sieciową. Ocena odporności na zakłócenia szumowe, a tym bardziej impulsowe, sygnałów binarnej FM jest bardzo trudna i na ogół dokonywana w sposób empiryczny. W przypadku przemysłowych sieci lokalnych możliwość dokonania oceny analitycznej utrudnia również niedostatecznie poznany model stochastyczny źródła zakłóceń. Można sądzić, że również z tego powodu w dokumentach normalizacyjnych IEC podawane są jedynie wymagania dotyczące odporności szumowej, zaś metody definiowania i badań odporności na zakłócenia impulsowe — nanosekundowe (KEM), zadawane w obwodach medium transmisyjnego ze względu na ich deterministyczny charakter nie znalazły dotychczas zastosowania w standaryzacji warstwy fizycznej PHY oraz medium transmisji w sieciach lokalnych. Ogólnym wyrażeniem analitycznym, opisującym rzeczywisty sygnał w dowolnym kanale transmisyjnym jest:

$$Y(t) = A(t) \cdot S(t, x) + Z(t)$$

$Y(t)$, $A(t)$, $Z(t)$ reprezentują odpowiednio procesy stochastyczne sygnałów: na wejściu odbiorczym, zakłóceń multiplikatywnych i zakłóceń addytywnych. Z twierdzeń granicznych rachunku prawdopodobieństwa wynika, że proces $Z(t)$ powstający z superpozycji bardzo wielu czynników niezależnych od siebie jest sygnałem gaussowskim, stacjonarnym o wartości średniej zerowej i jednoargumentowej funkcji autokorelacji, zależnej od przedziału obserwacji. W wielu rozważaniach teoretycznych oraz badaniach empirycznych jakości przesyłania informacji cyfrowych, zakłócenia addytywne modelowane są przez procesy szumu gaussowskiego lub białego szumu dolnopasmowego [5].

Dla porównania odporności szumowej sygnałów o różnych technikach modulacyjnych bierze się pod uwagę zależność pierwotnej stopy błędów kanału od odstępów mocy sygnału od mocy szumu SNR, tj. stosunku energii przypadającej na element jednostkowy sygnału do widmowej gęstości mocy szumu. Równoważnym określeniem SNR, a bardziej dogodnym pomiarowo, jest stosunek mocy sygnału podzielonej przez DSR do

mocy szumów podzielonej przez szerokość pasma odbiornika, mierzony na wejściu odbiornika. W teorii sygnału dowodzi się, że w systemach z modulacją fazy dopuszczalny jest mniejszy o $3 \div 4$ dB SNR w porównaniu do systemów z modulacją częstotliwości przy tej samej stopie błędów.

Istotnym czynnikiem ograniczającym odporność szumową kanałów utworzonych na wielodostępnej magistrali sieciowej są zniekształcenia fazowe sygnałów zmodulowanych wywołane przez zniekształcenia grupowego czasu przejścia. Wraz ze wzrostem liczby dołączonych stacji powstają wielokrotne odbicia będące źródłem tzw. echa własnego, tj. sygnału zakłócającego zawartego w paśmie użytecznym, a także zmienia się przebieg charakterystyki grupowego czasu przejścia, wywołany dołączeniem reaktancji wejść liniowych wielu stacji. Duże znaczenie ma przy tym kształt przebiegu charakterystyki grupowego czasu przejścia odniesiony do częstotliwości środkowej widma sygnału zmodulowanego. Niezależnie od techniki modulacyjnej znaczne zmniejszenie stopy błędów przy stałym SNR uzyskuje się przez zastosowanie odpowiednich korektorów amplitudowo-fazowych na wejściu odbiornika. W przypadku sieci o topologii magistralowej może mieć jedynie zastosowanie korekcja kompromisowa, wykonana dla elektrycznie i statystycznie średnich sygnałów wejściowych. W teorii sygnału dowodzi się, że kształtowanie funkcji opisującej przebieg charakterystyki grupowego czasu przejścia $\frac{dB}{d\omega} = f(f)$, polegające na zmniejszeniu jej nachylenia oraz zwiększeniu symetrii względem częstotliwości środkowej f_0 prowadzi do kilkudecybelowego zmniejszenia dopuszczalnej wartości SNR dla sygnału binarnej FM. Ze względu więc na łatwość kształtowania charakterystyki korekcyjnej przy mniejszej względnej szerokości widma sygnały DPSK i FSK/2 wykazują przewagę nad sygnałem FSK/1. Zysk SNR jest bardziej widoczny dla odbiornika z homodynową detekcją sygnału zmodulowanego, łatwo realizowaną dla sygnałów modulacji fazy, co z uwagi na wcześniej wykazane analogie również preferuje sygnały DPSK i FSK/2.

Odporność szumowa sygnału FSK/1 z korelacyjno-cyfrową (bez PLL) detekcją zmniejsza się o dalsze 3–4 dB ze względu na fakt, że sygnał nośny nie jest zsynchronizowany z przebiegiem modulującym co powoduje, że na pojedynczy element sygnału modulującego przypada niecałkowita liczba półokresów fali nośnej. Ponadto przebieg zegarowy elementowej podstawy czasu odtworzony na podstawie dekodowania ortogonalnych przejść zerowej sygnału z wyjścia demodulatora FM charakteryzuje się fluktuacjami fazy (jitter) zależnymi od indywidualnych zniekształceń izochronicznych sygnału zdemodulowanego, a te bezpośrednio zależą od obwiedni częstotliwościowo-czasowej, a pośrednio również od zakłóceń fali nośnej. Jest to następną przyczyną obniżenia wierności transmisji sygnału FSK/1. Jakość detekcji sygnału FSK/1 w dużym stopniu zależy od stabilności generatorów elementowej podstawy czasu sygnału modulującego współpracujących stacji, a także od dryftu częstotliwości generatora VCO w układzie modulatora FM i przebiegu odniesienia w demodulato-

rze FM (lub stabilności liniowej charakterystyki dyskriminatora, zależnie od rozwiązania demodulatora FM). Przy dużej liczbie współpracujących stacji sieci lokalnej zagadnienie stabilności częstotliwościowej przetwarzanych sygnałów ma szczególne znaczenie.

Jak to wcześniej wykazano, sygnały DPSK i FSK/2 mają wspólne cechy sygnałów o binarnej (duobinarnej) różnicowej modulacji fazy i w związku z tym, dla ich odbioru może być skutecznie zastosowana koherentna (homodynowa) detekcja wynikająca wprost z natury tych sygnałów, przy użyciu jednego generatora, wspólnego dla częstotliwości nośnej i modulującej, na zasadzie pojedynczej pętli cyfrowej PLL. Zagadnienie stabilności względnej generatorów upraszcza się zatem wobec dużego zakresu chwytności PLL.

W zakresie własności synchronizacyjnych pozornie przeważają cechy właściwe sygnałom DPSK i FSK/1, ze względu na częstość zmian stanów znamienych (co najmniej 1 na bit), uzyskaną odpowiednio przez wynikową lub wstępną modulację kodową. Spójność częstotliwości nośnej i modulującej sygnału FSK/2 powoduje, że dowolnie długi, jednoimienny stan znamieny sygnału daje taką samą możliwość synchronizacji PLL przebiegu odniesienia jaką uzyskuje się przy częstych zmianach częstotliwości nośnej. Tak więc można uznać, że przy założeniu idealnej synchronizacji wstępnej (preamble) własności synchronizacyjne wszystkich trzech analizowanych sygnałów transmisyjnych są identyczne.

Sygnał DPSK w odniesieniu do bitów, zaś sygnał FSK/2 w odniesieniu do duobitów posiada cenną właściwość polegającą na zabezpieczeniu przed skutkami przypadkowej zmiany fazy o π przebiegu odtworzonej elementowej podstawy czasu wskutek niekorzystnej serii zakłóceń multiplikatywnych sygnału odbieranego. Nie powstanie wówczas wielokrotny ciąg błędów, który nie jest wykrywalny przez detekcyjny kod nadmiarowy CRC. Właściwość ta zmniejsza wymagania dotyczące jakości uzyskiwania fazy początkowej zegara (odbiór ciągu „preamble”) i ma istotne znaczenie, wobec ostro formułowanych wymagań, na wynikową stopę błędów transmisji w przemysłowej sieci lokalnej.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawione w rozdziale 2 tendencje i stan aktualny standaryzacji w zakresie warstwy 1(PHY) oraz medium transmisyjnego przemysłowych, jednokanałowych sieci lokalnych, a także zamieszczone w rozdziale 3 rezultaty przybliżonej analizy sygnałów i warunków transmisyjnych pozwalają na wyprowadzenie pewnych ogólnych wniosków. Sformułowane poniżej wnioski prezentują poglądy (hipotezy) autora, zaś ich weryfikacja będzie możliwa w rezultacie badań empirycznych w ramach tematu CPBR 7.2 –

cel 76. Inne aspekty oceny możliwych wykonawców magistrali sieciowej dokonanej z punktu widzenia zasięgu komunikacji, liczby stacji, odporności szumowej oraz możliwości technicznej realizacji urządzeń zostaną zamieszczone w równoległej opracowywanej publikacji.*). Wnioski ogólne niniejszej analizy są następujące:

1. Najbardziej perspektywicznym standardem dla jednokanałowej przemysłowej sieci lokalnej z punktu widzenia własności stochastyczno-widmowych sygnału transmisyjnego oraz własności transmisyjnych wielodostępnej magistrali sieciowej i metod detekcji tego sygnału jest standard IEEE 802.4. Draft K, stosujący technikę modulacji FSK z fazą koherentną dla przepływności binarnych 5 Mb/s i 10 Mb/s.
2. Wobec obserwowanego dotychczas małego poparcia dla normy IEC-PROWAY-C w zakresie zaleceń ujętych w częściach 8 i 9 publikacji IEC 955 oraz alternatywy tego standardu w częściach 12 i 13, o treści identycznej z IEEE 802.4 Draft K, a także znacznie mniej korzystnych własności transmisyjnych stosowanej tam techniki modulacyjnej (FSK z fazą ciągłą – 1 Mb/s) – norma ta zapewne nie znajdzie szerokiego rozpowszechnienia w aplikacjach systemowych.
3. Przepustowość informacyjna systemu sieciowego decydująca o jego jakości i niezawodności uwarunkowana jest wieloma czynnikami losowymi, słabo rozpoznanymi na obecnym etapie rozwoju tych systemów. Z tego powodu celowe jest przeprowadzenie badań empirycznych dotyczących obszaru warstwy PHY i medium dla identyfikacji źródła błędów oraz oceny odporności na wpływ różnych, specyficznych warunków propagacji przez magistralę sieciową w otoczeniu przemysłowym przewidywanych aplikacji.
4. Badania odporności na zakłócenia urządzeń sieciowych warstwy PHY i medium poza rutynowym wyznaczeniem charakterystyk szumowych powinny obejmować statystyczne charakterystyki wierności transmisji w obecności zakłóceń impulsowych zadawanych w obwodach magistrali sieciowej według przyjętego modelu procesu stochastycznego zakłóceń. Jest to zadanie o dużym stopniu złożoności w sensie teoretycznym i technicznym. Tymczasowo, dla relatywnej oceny odporności na zakłócenia impulsowe różnych rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń transmisyjnych, mogą być zastosowane deterministyczne metody badań KEM, powiązane z wynikami diagnostyki pierwszych aplikacji przemysłowych.

Literatura

[1] IEC Publication 955: Process Data Highway. Type C (PROWAY C), for Distributed Process Control Systems. January 1986

*) Górzyński K., Majdan K.: *Zasięg łączności na jednokanałowej magistrali sieciowej.*

- [2] IEC. Addendum to Publication 955 (PROWAY C): Phase — Coherent — FSK 5 and 10 Mb/s physical layer and medium specifications. June 1988
- [3] Crowder R.: The MAP Specification. Control Engineering. Vol. 32 No 11. 1985
- [4] Missala T.: System INTEL DIGIT PROWAY. Informacje podstawowe. Biuletyn MERA—PIAP nr 5/1985
- [5] Sobczak W.: Statystyczna teoria systemów przesyłania informacji. Warszawa, WKiŁ, 1984
- [6] Majdan K.: Metoda oceny efektywności telemetrycznego podsystemu koncentracji danych. Biuletyn MERA—PIAP nr 5/1980

*
* *