

Zestawienie symboli i skrótów

- APP Application (layer) – warstwa zastosowań
- ASIC Application specific integrated circuit – specjalizowany (dedykowany) układ scalony
- BER Bit error rate – bitowa (elementowa) stopa błędów
- CRC Cyclic redundancy check – cykliczna kontrola nadmiarowa lub suma kontrolna cyklicznego kodu nadmiarowego
- DPSK Differential phase shift keying – różnicowa, binarna modulacja (kluczowanie) fazy
- DSR Data signalling rate – przepływność binarna (prędkość transmisji w bitach na sekundę),
- FER Frame error rate – ramkowa (blokowa) stopa błędów
- FSK Frequency shift keying – binarna modulacja (kluczowanie) częstotliwości
- LLC Logical link control (sublayer) – podwarstwa sterowania połączeniem logicznym
- LSK Lokalna sieć komputerowa (ang. Local area network – LAN)
- MAC Medium access control (sublayer) – podwarstwa sterowania dostępem
- PHY Physical (layer) – warstwa fizyczna
- PLL Phase locked loop – pętla synchronizacji fazowej
- RER Residual error rate – wynikowa stopa błędów (błędy ostateczne – niewykryte)
- SAP Service access point – punkt udostępniania usług
- WSMD Wielodostępna, szeregową magistrała danych

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

EFEKTYWNOŚĆ PODSYSTEMU KOMUNIKACYJNEGO PRZEMYSŁOWEJ SIECI LOKALNEJ

W artykule przeprowadzono analizę właściwości użytkowych sieciowego podsystemu komunikacyjnego, ze szczególnym uwzględnieniem przepustowości informacyjnej i wierności przekazu ramek ISO 8802.4 w sieci lokalnej typu Token Passing Bus. Sformułowano model stochastyczny strumienia zakłóceń impulsowych w węzłach magistrali sieciowej.

1. WSTĘP

Podstawowym zadaniem każdego podsystemu komunikacyjnego, w tym również przeznaczonego do zastosowania w przemysłowych, mikrokomputerowych sieciach lokalnych systemów automatyzacji obiektów zdecentralizowanych, jest wierne przekazywanie danych oraz informacji sterującej między przestrzennie rozproszonymi urządzeniami komputerowymi – stacjami LSK. W przypadku sieci przemysłowych zadanie to sprowadza się do zapewnienia wysokiego poziomu niezawodności przekazu oraz odpowiedniej przepustowości kanałów międzystacyjnych, utworzonych na wielodostępnej, szeregowej magistrali danych – WSMD. Wiąże się to z minimalizacją czasów wykonywania zdalnych transakcji sieciowych i jest szczególnie istotne w przypadku systemu automatyzacji dyskretnych i uwarunkowanych czasowo procesów technologicznych.

W klasie sieci lokalnych automatyki, przeznaczonych do budowy elastycznych systemów produkcyjnych – ESP, występują w zasadzie tylko sieci o topologii magistralowej i deterministycznej regule dostępu (Token Passing Bus), polegającej na organizacji logicznego pierścienia obiegu uprawnienia dostępu do medium.

Odległe stacje takiej sieci współpracują przy wykorzystaniu jednokanałowego, wielodostępnego medium, wykonanego na ogół przy użyciu elektrycznego kabla współosiowego. Reprezentantem tego typu LSK jest sieć objęta normalizacją IEC – PROWAY, według dokumentu IEC 955 [1] opublikowanego w 1986 r., a uzupełnionego o części 12 i 13 w 1988 r. [2]. Przemysłowe sieci lokalne według dokumentu IEC 955, a także sieci standardu IEEE 802.4 oraz MINI-MAP charakteryzują się trzywarstwową

architekturą stacji (APP, LLC, PHY) i precyzyjnym sformułowaniem wymagań dotyczących usług, interakcji lokalnych i transakcji zdalnych, a także protokołów przyporządkowanych poszczególnym warstwom modelu OSI/ISO—RM [3].

Szczegółowo i jednoznacznie sformułowane zalecenia normalizacyjne mają na celu:

- uzyskanie podstawowych parametrów użytkowych sieci, określających jej możliwości aplikacyjne,
- zapewnienie kompatybilności sprzętu i oprogramowania pochodzących od różnych producentów.

2. WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWE SIECIOWEGO PODSYSTEMU KOMUNIKACYJNEGO

Podsystem komunikacyjny o strukturze sieci lokalnej powinien być odpowiednio dopasowany do potrzeb jakościowych i ilościowych nadrzędnego systemu automatyzacji obiektów zdecentralizowanych.

Ze względu na różne sposoby organizacji wymiany informacji podsystem komunikacyjny charakteryzuje się następującymi cechami [4]:

- otwartość, określona przez zdolność do jego uzupełniania o nowe funkcje sieciowe i możliwość łączenia z podsystemami komunikacyjnymi o innej organizacji,
- autonomiczność względem podsystemów gromadzenia, przechowywania i przetwarzania danych,
- efektywność komunikacji, określona wskaźnikami oceny jakości usług, takimi jak przepustowość medium, średni czas obsługi w funkcji obciążenia, możliwość priorytetowania, czas dostępu, niezawodność urządzeń itd.,
- zgodność (lub jej brak) z istniejącymi standardami i zaleceniami międzynarodowymi,
- złożoność rozwiązania oraz koszty inwestycyjne i eksploatacyjne.

Wybór podsystemu komunikacyjnego sieci lokalnej ze zbioru możliwych rozwiązań zależy jest zatem w głównej mierze od aktualnych i perspektywicznych zastosowań systemowych oraz postaci przyjętej funkcji jakości obsługi zgłoszeń na zdalne transakcje, generowanych przez użytkowników systemu automatyzacji.

Praktyka produkcyjna przodujących firm wykazuje, że niezależnie od typu i przeznaczenia LSK przestrzegana jest zasada zgodności rozwiązań z modelem warstwowym OSI/ISO—RM architektury sieci, natomiast w konkretnych rozwiązaniach technicznych urządzeń komunikacyjnych występują pewne odstępstwa od szczegółowych zaleceń normalizacyjnych ISO 8802.X wynikłe z faktu, że standardyzacja nie jest jeszcze całkowicie zakończona, zaś ambicją czołowych producentów jest osiągnięcie możliwie najlepszych parametrów użytkowych sieci, pokrywających znaczny obszar zastosowań. Dla sieci IEC—PROWAY parametry te ujęto [1] w formie wymagań funkcjonalnych, określających tzw. główne właściwości PROWAY:

1. liczba stacji N – do 100,
2. długość magistrali L – do 2000 m,
3. przepływność binarna DSR – nie mniejsza od 10^6 b/s,
4. pierwotna elementowa stopa błędów BER – nie większa od 10^{-8} ,
5. wynikowa stopa błędów RER – nie większa od $3 \cdot 10^{-15}$,
6. pojemność danych użytkowych w ramce I_D – do 1000 oktetów,
7. efektywna prędkość przesyłania informacji użytkowej, tj. średnia przepustowość kanału między interfejsami APP/LLC stacji V – nie mniejsza od $3 \cdot 10^5$ b/s,
8. czas dostępu do medium, przy najwyższym priorytecie transakcji sieciowej T_a – nie większy od 10 ms.

Zdeterminowane wskaźniki efektywności określonego rozwiązania LSK, takie jak: N , L , DSR, I_D , T_a wynikają wprost z założeń konstrukcyjnych dotyczących rozwiązań sprzętowych, protokołów i oprogramowania warstw (1 + 2) oraz zależą od charakterystyk transmisyjnych magistrali sieciowej. Metodę oraz rezultaty oszacowania rozmiarów (N , L) sieci jednokanałowej przedstawiono w [6]. Pozostałe parametry użytkowe: BER, RER, V są wzajemnie skorelowane i funkcyjnie zależą od wymienionych, zdeterminowanych parametrów konstrukcyjnych sieci, a także są zależne losowo od procesu automatyzacji i zewnętrznych warunków środowiskowych.

Rozkład błędów elementarnych, którego uśrednioną miarą jest elementowa stopa błędów – BER transmisji standardowych ramek ISO 8802.4, wynika z szeroko pojętych warunków propagacji izochronicznych ciągów symboli kodowych, przesyłanych za pośrednictwem dwupunktowych, półdupleksowych kanałów, tworzonych dynamicznie między interfejsami MAC/PHY współpracujących stacji. BER zależy m.in. od charakterystyk częstotliwościowych: impedancji falowej i zespolonej funkcji przeniesienia poszczególnych składników toru magistrali sieciowej oraz odbić (reflektancji) w punktach niejednorodności magistrali, a szczególnie w jej węzłach stacyjnych.

Istotny wpływ na rozkład błędów elementarnych wywierają szумы własne generowane wewnątrz oraz sygnały zakłóceń zewnętrznych, przenikające do obwodów magistrali sieciowej. Sprawność systemu automatyzacji obiektów zdecentralizowanych jest funkcją wskaźników statystycznych: RER oraz V sieci lokalnej, które silnie zależą od rozkładu błędów elementarnych i rozkładu generacji zleceń warstwy APP na zdalne transakcje sieciowe, lecz są także losowo zależne od stochastycznie zmiennych i charakteryzujących się dużymi dyspersjami rozkładów: długości ciągu ramki, długości czasu przerwy między ramkami, gęstości widmowej i zniekształceń amplitudowo-fazowych sygnału ramki.

Użytkowa niezawodność przekazu komunikatów sieciowych, której miarą jest RER dotyczy obszaru warstw (1 + 2 + medium) i łącznie z efektywną prędkością V stanowi podstawę do oceny przydatności określonego rozwiązania urządzeń komunikacyjnych. Wymagana dla sieci IEC-PROWAY wartość $RER < 3 \cdot 10^{-15}$ wynika z ogólnie

stosowanej zasady, aby wierność zdalnych przekazów informacji poprzez sieć była porównywalna z wiernością przekazów informacji wewnętrzstacyjnej interakcji lokalnych. Znaczenie wskaźnika RER, w przypadku LSK o architekturze zredukowanej do trzech warstw, podkreśla oczywisty fakt, że wobec braku reakcji na błędy przekazu informacji w warstwie APP – wartość RER warunkuje uzyskanie określonego poziomu sprawności działania zdecentralizowanego systemu automatyki. Dla jej minimalizacji podejmowane są różne środki techniczne, polegające głównie na zapewnieniu możliwie małej wartości BER oraz zastosowaniu zabezpieczeń protekcyjnych, poprzez kodowanie nadmiarowe CRC każdej ramki wraz z odpowiednią reakcją na błędy, według protokołu warstwy drugiej.

Z analiz przedstawionych w [6] wynika, że takie czynniki jak jakość dostępnych kabli współosiowych, potrzeba stosowania wyłącznie jednego typu rozgałęźników węzłowych, poziom zakłóceń zewnętrznych, dostępność specjalizowanych układów scalonych VLSI/ASIC ograniczają możliwość osiągnięcia wymaganych, granicznych wartości: N , L , V , T_a – parametrów funkcjonalnych sieci jednokanałowej. Zawęża to obszar możliwych aplikacji danej sieci, lecz jej nie dyskwalifikuje dla wielu zastosowań w systemach o mniejszych rozmiarach terenowych lokalizacji urządzeń obiektowych oraz mniej krytycznych czasach obsługi zleceń.

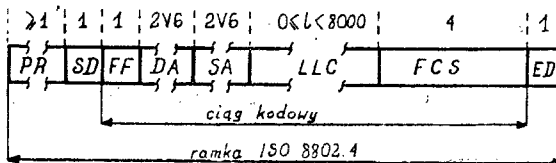
Błędy pierwotne wynikłe z przekłamań poszczególnych bitów wewnątrz ramki ISO 8802.4 mają charakter statystyczny, opisywany najczęściej przez tzw. wagowe widmo błędów – $P_k(m)$, określające prawdopodobieństwo wystąpienia k – błędów elementarnych w m – elementowym ciągu ramki. W zależności od stopnia grupowania (seryjności) błędów elementarnych uśredniona wartość BER, na różnym poziomie zgodności, określa jakość kanałów transmisyjnych w obszarze zbioru urządzeń warstwy PHY i medium. Można zatem dopuścić pewne obniżenie wartości BER, o ile rezultaty badań empirycznych danej konfiguracji przeprowadzonych w laboratoriach, symulowanych oraz rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych pracy przemysłowej LSK dają podstawę do przyjęcia hipotezy statystycznej, że wartość RER jest nie większa od dopuszczalnej.

3. REGUŁA FORMOWANIA RAMKI ISO 8802.4 I KONWERSJI MAC/PHY SYMBOLI KODOWYCH

Zalecenia normalizacyjne dla sieci z deterministycznym dostępem do magistrali (Token Passing Bus) definiują m.in. strukturę ramek organizacyjnych i informacyjnych, a także regułę odwzorowania symboli kodowych MAC warstwy liniowej sieci na symbole PHY warstwy fizycznej przy nadawaniu oraz odwzorowania odwrotnego przy odbiorze ramek. Pokazana na rys. 1 ramka ISO 8802.4 jest izochronicznym ciągiem szeregowym, zbudowanym z tzw. symboli MAC na poziomie interfejsu MAC/PHY stacji, natomiast z

tw. symboli PHY na poziomie interfejsu liniowego stacji. Każda ramka zawiera następujące składniki:

- PR — preambuła ramki, wykorzystana w modemach warstwy fizycznej do synchronizacji zegarów elementowej podstawy czasu,
- SD, ED — ograniczniki odpowiednio początku i końca ramki, wykorzystywane do synchronizacji ramkowej (blokowej) odbioru ramek o zmiennej długości,
- FF — kod funkcyjny, określający rodzaj ramki,
- SA, DA — adresy sieciowe źródła i przeznaczenia ramki,
- LLC — pole danych użytkowych protokołów warstw: $2 \div 7$,
- FCS — ciąg nadmiarowy cyklicznej sumy kontrolnej CRC.



Rys. 1. Format ramki ISO 8802.4

Wymagania standardu IEC-PROWAY-C podane w [1, 2] precyzują format ramki ISO 8802.4 dla jednokanałowej sieci niskiego szczebla automatyzacji ustalając minimum 6 oktetów PR, sześcioelementowe sekwencje SD i ED, 1 oktet FF, po 2 oktety DA i SA, od 0 do 1000 oktetów LLC i 4 oktety FCS.

Isochroniczna sekwencja wewnętrzna od FF do FCS ramki tworzy nadmiarowy ciąg kodowy, zabezpieczony cyklicznym kodem detekcyjnym o wielomianie generacyjnym:

$$g(x) = x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$$

Ciąg kodowy ramki z punktu widzenia konwersji MAC/PHY symboli sygnału szeregowego może być potraktowany jako jednorodny ciąg binarny. Pozostałe składniki ramki zawierają elementy wielowartościowego kodowania symboli MAC na symbole PHY.

Regułę kodowania transmisyjnego fazowokoherentnej modulacji częstotliwości według [2], a także IEEE 802.4 i MINI-MAP, a więc konwersji MAC/PHY symboli ciągu ramki przesyłanej z przepływnością binarną $DSR = \frac{1}{T} = 5$ lub 10 Mb/s przedstawiono w tablicy 1:

Tablica 1

nadawany symbol MAC	symbol PHY	min. długość	składnik ramki ISO 8802.4
CISZA	OFF, OFF	1T	—
PRZERWA	(L, L) (H, H)	2T	PR
NIE DANE	(H, L) (L, H)	2T	SD, ED
ZERO	H, H	1T	SD, FF, DA, SA, LLC, FCS
JEDEN	L, L	1T	ED, FF, DA, SA, LLC, FCS

Symbole PHY: {OFF}, {H}, {L} o nominalnym czasie trwania 1/2 DSR są reprezentowane następująco:

- {OFF} — brak sygnału fali nośnej,
- {H} — sygnał ciągły o częstotliwości DSR, synfazowy z symbolem MAC, zawierający pełny okres fali nośnej, rozpoczynający się i kończący ciągłym fazowo przejściem przez zero,
- {L} — sygnał ciągły o częstotliwości DSR/2, synfazowy z symbolem MAC, zawierający pełny półokres fali nośnej, rozpoczynający się i kończący ciągłym fazowo przejściem przez zero.

Dekodowanie transmisyjne ciągu symboli PHY na symbole MAC w odbiorniku fazowo-koherentnej modulacji częstotliwości polega na pięciowartościowej analizie cech charakterystycznych sygnału pojawiającego się w stanie „odbiór” na wspólnym wejściu/wyjściu liniowym modemu. Regułę dekodowania przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2

sygnał wejściowy	odebrany symbol MAC	minimalna długość
amplituda poniżej poziomu progowego	CISZA	1T
$\overline{\text{CISZA}} \cap (\text{H}, \text{L}) (\text{L}, \text{H})$	NIE DANE	2T
$\overline{\text{CISZA}} \cap (\text{H}, \text{H})$	ZERO	1T
$\overline{\text{CISZA}} \cap (\text{L}, \text{L})$	JEDEN	1T
$\overline{\text{CISZA}} \cap (\text{NIE DANE} \cup \text{ZERO} \cup \text{JEDEN})$	BŁĄD	1T

Z porównania reguł kodowania (tablica 1) i dekodowania (tablica 2) wynika, że procesy te charakteryzują się pewną asymetrią wzajemnego odwzorowania. W szczególności nadawana sekwencja symboli PRZERWA, po stronie odbiorczej wykorzystywana jest do synchronizacji ciągu zegarowego elementowej podstawy czasu w modemach warstwy PHY, zaś do podwarstwy MAC zdekodowane symbole PRZERWA przekazywane są bądź jako sygnały BŁĄD, bądź jako sekwencja ...ZERO, JEDEN, ZERO... zależnie od momentu uzyskania synchronizmu częstotliwościowo-fazowego sygnału zegarowego w odbiorniku z sygnałem podstawy czasu symboli MAC generowanych w nadajniku odległej stacji sieci. Reguła formowania ramki ISO 8802.4 oraz konwersji MAC/PHY symboli kodowych stanowi odniesienie do szczegółowych wymagań funkcjonalnych, elektrycznych i mechanicznych w zakresie dotyczącym urządzeń warstwy fizycznej — PHY i medium.

W [2] sformułowane są m.in. charakterystyczne parametry amplitudowo-czasowe oraz widmowe sygnałów transmisyjnych, a także parametry funkcji przenoszenia poszczególnych składników magistrali sieciowej.

Standardyzacja nie obejmuje natomiast sposobów rozwiązywania wewnętrznych układów funkcjonalnych, zatem możliwa jest znaczna różnorodność konstrukcji

układów modemowych warstwy PHY. W szczególności istnieją różne możliwości rozwiązania układu konwersji PHY/MAC, tzn. układu detektora ciągu symboli kodowych PHY, przy zastosowaniu detekcji korelacyjnej, kwadraturowej lub homodynowej (koherentnej—synchronicznej). Reguła kodowania i dekodowania transmisyjnego oraz sposób detekcji są głównymi czynnikami warunkującymi uzyskanie wymaganej wierności transmisji w dyskretnym kanale szeregowym między interfejsami MAC/PHY współpracujących stacji. Jak wykazano w [5] detekcja synchroniczna odznacza się najbardziej korzystnymi właściwościami z punktu widzenia tolerancji zniekształceń izochronicznych oraz odporności na zakłócenia sygnałów fazowo koherentnej modulacji FM. Dla przepływności binarnej DSR = 5 lub 10 Mb/s synchroniczna detekcja z zastosowaniem cyfrowej pętli synchronizacyjnej — PLL i wielowartościowej analizy sygnału odbieranego wydaje się być jedynie skutecznym rozwiązaniem odbiornika modemu PHY, zapewniającym uzyskanie wysokiego poziomu wierności transmisji sygnałów ramek ISO 8802.4 w warunkach pracy sieci lokalnej typu Token Passing Bus.

4. OPIS FIZYCZNY WARUNKÓW PROPAGACJI W ŚRODOWISKU PRZEMYSŁOWYM

Kanały transmisji międzystacyjnej ciągu ramek ISO 8802.4 zawierają następujące elementy konstrukcyjne, należące do warstwy PHY i medium (rys. 2):

- modemy, wykonujące dwukierunkową konwersję MAC/PHY symboli kodowych,
- kable odgałęzień stacyjnych (drop cable),
- rozgałęźniki węzłowe symetryczne (splitter) i niesymetryczne (tap),
- kabel trzonowy magistrali sieciowej (trunk cable) z terminatorami dopasowującymi,
- regeneratory sygnału liniowego (regenerative repeater) dla zwiększenia zasięgu łączności i możliwości przestrzennej rozbudowy trasy magistrali.

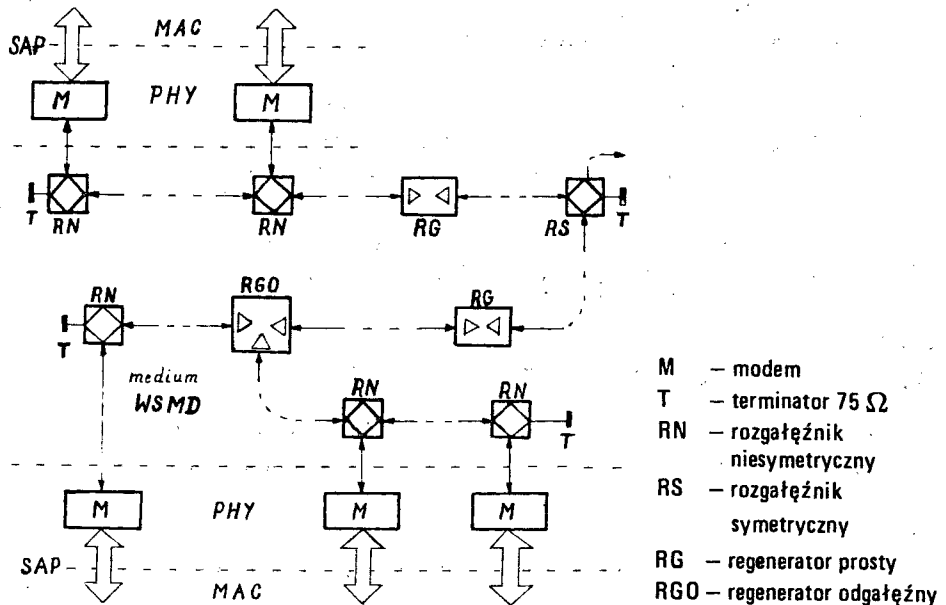
Dla danej struktury sieciowej o liczbie stacji N można określić zbiór \tilde{K} dyskretnych kanałów transmisji szeregowych o liczności $0,5 \cdot N \cdot (N-1)$, zróżnicowanych ze względu na odległość nadajnik — odbiornik i warunki propagacji sygnałów.

W obrębie każdej stacji dołączonej do magistrali sieciowej występuje interfejs szeregowy MAC/PHY, który jest tzw. punktem udostępnienia usług — SAP zbioru \tilde{K} kanałów transmisyjnych utworzonych na magistrali.

Są to typowe usługi transmisji danych, wykonywane analogicznie jak w rozległych sieciach telekomunikacyjnych, a różniące się organizacją połączeń, mniejszym zasięgiem, wyższą prędkością, uwarunkowaniami czasowymi oraz warunkami otoczenia.

Na przesyłane w zbiorze \tilde{K} sygnały ciągów szeregowych o strukturze ramek informacyjnych i organizacyjnych oddziałują m.in. sygnały „obce”, generowane wewnątrz i na zewnątrz urządzeń należących do zbioru \tilde{K} . Poprawna konstrukcja układów modemowych, separacja galwaniczna każdej stacji od magistrali, symetryzacja obwodów interfejsowych, dopasowanie falowe wszystkich dłuższych odcinków kablowych oraz inne

rutynowe zabiegi konstrukcyjne dają podstawę do pominięcia wpływu zakłóceń wewnętrznych. Z praktyki eksploatacyjnej komputerowych systemów automatyki wynika, że szczególnie istotny wpływ na sprawność systemu automatyzacji obiektów zdecentralizowanych mają zakłócenia zewnętrzne oddziaływujące na obwody kanałów sprzężenia szeregowego.



Rys. 2. Struktura urządzeń warstwy fizycznej (PHY) i medium jednokanałowej LSK.

Dla potrzeb dalszej analizy zakłóceniem zewnętrznym będzie nazwane zjawisko polegające na przeniknięciu energii sygnału elektrycznego lub pola elektromagnetycznego do wewnętrznych obwodów kanałów transmisyjnych należących do zbioru \tilde{K} .

Źródłami zakłóceń zewnętrznych są więc inne urządzenia należące do danego systemu automatyzacji, umieszczone w pobliżu i zasilane ze wspólnej sieci energetycznej, generujące zakłócenia w momentach ich załączania i wyłączenia, a także urządzenia emitujące zakłócenia w trakcie ich pracy (silniki komutatorowe, zgrzewarki, elektrozawory, układy tyrystorowe, stycznikowe itp.). Wśród innych przyczyn zakłóceń zewnętrznych można wymienić oddziaływania wewnętrzzastacyjne przez obwody zasilania na skutek zbyt dużej impedancji wyjściowej układu zasilania DC, tj. zasilaczy i przewodów doprowadzających, a także powstałe w wyniku sprzężeń o charakterze galwanicznym, indukcyjnym lub pojemnościowym między obwodami sygnałowymi należącymi do zbioru \tilde{K} a obwodami pozostałych urządzeń zainstalowanych w systemie automatyzacji, zwłaszcza gdy na zewnątrz występują wysokie poziomy napięciowe lub prądowe sygnałów.

Miejscami przeniknięcia zakłóceń zewnętrznych są obwody interfejsowe (tzw. interfejs

MAC/PHY) między układami wyższych (2–7) warstw hierarchicznych a układami funkcjonalnymi warstwy 1 (PHY) każdej stacji oraz obwody zasilania, a przede wszystkim łącze magistralowe WSMD.

Współczesne adaptory sieciowe dla LSK budowane są przy zastosowaniu wysokozintegrowanych, specjalizowanych układów scalonych typu ASIC. Interfejs modemowy MAC/PHY z reguły jest tam zredukowany do umownego styku definiującego zależności logiczne i czasowe sygnałów między kontrolerem MAC a modemem PHY, a zatem nie występuje fizycznie w postaci elementu konstrukcyjnego (kabel wielożyłowy ze złączami). Obwody tego interfejsu można więc potraktować równorzędnie z wszelkimi innymi obwodami wewnętrznymi adaptera.

Poprawnie wykonana konstrukcja urządzeń cyfrowych stacji LSK, zasilaczy, okablowania wewnętrznego, obudowy itp., oraz zastosowanie rutynowych środków ochrony, takich jak filtry sieciowe, ograniczniki amplitudy (diody Zenera, warystory), transformatory izolacyjne zapewniają osiągnięcie wysokiego poziomu odporności na zakłócenia wewnątrzstacyjne, przenikające do obwodów cyfrowych modemu przez linie zasilania. W dalszych rozważaniach zostaną pominięte również jako małoprawdopodobne te zakłócenia zewnętrzne, które wywołują zmiany wartości logicznej sygnałów cyfrowych innych niż sygnały ramek informacyjnych lub sterujących, wymienianych między stacjami przemysłowej sieci lokalnej, a uwzględnione zostaną tylko te przyczyny i źródła zakłóceń zewnętrznych, które w decydującej mierze wpływają na wierność przekazu informacji za pośrednictwem WSMD. Należą do nich głównie:

- sprzężenia pojemnościowe w obrębie transformatora liniowego modemu i rozgałęźnika zainstalowanego w węźle sieci, występujące przy dużych różnicach potencjałów odniesienia obwodów rozdzielonych galwanicznie;
- wyładowania atmosferyczne w strefie niechronionej (na zewnątrz budynków) oraz elektrostatyczne, spowodowane przez dotyk obsługi w strefie chronionej (wewnątrz budynków) trasy magistrali;
- promieniowanie elektromagnetyczne z bliskich źródeł (iskwienie, komutacja obwodów silnoprądowych) występujące w otoczeniu całej trasy magistrali.

Wymienione powyżej przyczyny najczęściej występują łącznie. Przykładowo: energia zakłócenia promieniowanego zmienia również wartość chwilową potencjałów odniesienia, zaś wyładowanie elektrostatyczne występujące w otoczeniu magistrali może poprzez promieniowanie spowodować przenik energii do ośrodka przenoszenia sygnałów użytecznych.

Niezależnie od typu i przyczyny wystąpienia pojedynczego, ograniczonego czasowo zakłócenia w warunkach środowiska przemysłowego jego skutek można fizycznie modelować za pomocą równoważnego źródła impulsów o wysokiej impedancji wyjściowej, dołączonego w wybranym punkcie (węźle) magistrali. Jest to sposób dość często stosowany w badaniach odporności na szum impulsowy kanałów transmisji danych.

Inną metodą, szczególnie użyteczną i stosowaną w badaniach kompatybilności elektromagnetycznej – KEM, jest sprzężenie pojemnościowe lub indukcyjne linii z generatorem impulsów zakłócających o kalibrowanych parametrach określających amplitudę, polaryzację, czasy narastania i trwania pojedynczych impulsów oraz ich położenia na osi czasu.

Metody te oraz szczegółowe warunki ich stosowania przedstawione są w odpowiednich normach [7, 8]. Problematyka związana z odpornością autonomicznych urządzeń cyfrowych na zakłócenia przemysłowe, metodami badań i technicznymi środkami ochrony przed zakłóceniami posiada obszerną literaturę i w tym zakresie nie będzie w niniejszej pracy prezentowana.

Niezależnie od przyjętej metody modelowania lub fizycznej symulacji źródeł zakłóceń sygnały przeniku energii do obwodu magistrali sieciowej mogą być określone parametrami impulsów zakłócających (amplituda, czas trwania, rozkład widma) na wyjściu równoważnego źródła zakłóceń oraz wartościami tłumienności i przesuwności fazowej pomiędzy źródłem zakłóceń a punktem ich przeniku do obwodu magistrali.

W ogólności parametry sprzężenia i przenoszenia sygnałów zakłóceń zależne są od częstotliwości, a zatem zmieniają się losowo wraz z losowymi zmianami położenia i szerokości widma poszczególnych impulsów. Pojedyncze impulsy zakłóceń zewnętrznych, w zależności od ich parametrów czasowych (głównie czasu narastania i czasu trwania) ulegają w punktach sprzężenia a następnie na trasie magistrali przekształceniom – głównie amplitudy i kształtu sygnału.

Podczas ich przemieszczania się w postaci fali elektromagnetycznej od punktu sprzężenia do przeciwległych zakończeń magistrali sygnały te interferują z innymi sygnałami zakłóceń wzbudzonymi w przedziale maksymalnego czasu propagacji na magistrali t_p i zależnie od wzajemnych przesunięć fazowych ulegają w pewnych punktach częściowej kompensacji, zaś w innych powiększeniu amplitudy chwilowej, podobnie jak ma to miejsce w przypadku powstawania fali stojącej w wyniku odbić w punktach niedopasowania magistrali.

Wypadkowy sygnał zakłóceń obserwowany w n -tym węźle biernej magistrali sieciowej jest więc superpozycją sygnałów przeniku opóźnionych o różne czasy propagacji.

5. MODEL STOCHASTYCZNY ŹRÓDEŁ ZEWNĘTRZNYCH ZAKŁÓCEŃ PRZEMYSŁOWYCH

Sygnały wynikowe zakłóceń obserwowane w węzłach magistrali są zróżnicowane ze względu na:

- numer węzła z dołączoną aktywną stacją sieci (1n),
- liczbą aktywnych źródeł zakłóceń (1m),
- rozmieszczenie stacji oraz źródeł zakłóceń,
- parametry sprzężenia w punktach przeniku,

- parametry elektryczne i stochastyczne wszystkich m — aktywnych źródeł zakłóceń.
- Z kolei właściwości stochastyczne źródeł zakłóceń zależne są od:
- wyznaczonego przez zbiór protokołów warstwy 7 (użytkownika) procesu automatyzacji,
 - warunków środowiska przemysłowego niezależnych od procesu automatyzacji,
 - zastosowanych zabezpieczeń przed zakłóceniami w środowisku pracy urządzeń sieci lokalnej.

W ogólnym przypadku nie ma podstaw do przyjęcia założenia, że procesy generacji sygnałów zakłóceń z poszczególnych źródeł są statystycznie niezależne, głównie ze względu na występującą zależność od procesu automatyzacji oraz wzajemną korelację momentów ich występowania wynikłą z właściwości na ogół wspólnej sieci zasilającej 220 V/50 Hz.

Proces zakłóceń generowanych w typowym środowisku fabryki przemysłu elektromaszynowego obserwowany w dostatecznie długim przedziale czasu ($t_0, t_0 + T$) ma charakter występowania pewnej liczby serii impulsów zakłócających, przedzielonych dość długimi odcinkami czasu braku tych impulsów.

Przyjęto założenie, że pojedynczy impuls zakłóceń ma stałą amplitudę a_j w ograniczonym czasie jego trwania $\tau_j = k_j \tau$ gdzie $k_j = 1, 2, \dots, K$, zaś τ elementarny (najmniejszy) przedział czasu trwania pojedynczego impulsu. W tych warunkach zdefiniowano tzw. serię zakłóceń impulsowych, przenikających z zewnątrz do obwodu magistrali sieciowej.

Definicja — D1

Seria zakłóceń impulsowych, — jest to zdarzenie losowe określone w zbiorze m aktywnych źródeł zakłóceń, polegające na wygenerowaniu impulsów o długości $\tau_j = k_j \tau$, gdy kolejny impuls rozpoczyna się w czasie trwania poprzedniego, lub występuje po czasie $t \leq \tau_g$ od zakończenia poprzedniego impulsu tej samej serii. Każda seria zakłóceń jest przedzielona obustronnie odcinkiem czasu $t_p > \tau_g$ przerwy w aktywności wszystkich m źródeł zakłóceń.

W przedziale obserwacji ($t_0, t_0 + T$) występują naprzemiennie odcinki czasu $t_s(i), t_p(i), t_s(i+1), t_p(i+1), \dots$ reprezentujące czasy trwania serii i czasy przerw między seriami zakłóceń impulsowych, o losowo zmiennych wartościach liczbowych. Przedziały czasu $t_s(i)$ oraz $t_p(i)$ są więc wartościami zmiennych losowych t_s i t_p zależnymi od długości czasu obserwacji T oraz od rozkładów opisujących atrybuty statystyczne wszystkich m źródeł zakłóceń.

W celu określenia przedziału obserwacji ($t_0, t_0 + T$) rozpatrzono argumenty zależności funkcji $T = f(t_r, t_c)$, gdzie:

t_r — maksymalny czas obiegu znacznika (tzw. Token Rotation Time),

t_c — minimalny przedział czasu stabilności konfiguracji i topologii danej sieci lokalnej.

W sensie statystycznym stabilność warunków zewnętrznych środowiska przemysłowego

wego pracy danej sieci oraz takie cechy jak trasa magistrali, liczba czynnych stacji n , rodzaj i liczba obiektów automatyzacji a zatem liczba m aktywnych źródeł zakłóceń będą w kilkugodzinnym przedziale t_c (1 zmiana produkcyjna) niezmiennie. Jeśli więc przedział czasu obserwacji T jest tak dobrany, że spełnia warunki:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_t < T \ll t_c \\ t_g = \tau \\ \frac{T}{2\tau} = \text{liczba naturalna} \end{array} \right. \quad /1/$$

to proces generacji serii zakłóceń można uznać w przybliżeniu za stacjonarny, niezależny od momentu początkowego t_0 przedziału obserwacji, z zawartością $j = 1, 2, \dots, \frac{m \cdot T}{2\tau}$ impulsów.

Jak już wcześniej zaznaczono, proces generacji zakłóceń obserwowany w zbiorze m źródeł zakłóceń nie jest identyczny (a często również słabo skorelowany) z procesem zakłóceń obserwowanym w n -tym węźle sieci, głównie ze względu na zależność od numeru węzła oraz charakterystyk sprzężenia i propagacji sygnałów zakłóceń po magistrali.

Proces sygnałowy, obserwowany w n -tym węźle sieci, a spowodowany występowaniem aktywizacji w zbiorze m -zewewnętrznych źródeł zakłóceń w przedziale obserwacji $(t_0, t_0 + T)$ i w stanie „CISZA” wszystkich n stacji sieci opisano ciągiem $\{W_{m, n}(t)\}$ sygnałów spowodowanych przez i -elementowy ciąg serii zakłóceń zewnętrznych, gdzie każda i -ta seria wynika z odpowiedniej (wg definicji D1) zależności czasowej momentów aktywizacji $p_j \tau$ oraz czasu trwania $k_j \tau$ pojedynczych impulsów zakłócających. Postać analityczną procesu $\{W_{m, n}(t)\}$ wyrażono zatem wzorem:

$$\left\{ W_{m, n}(t) \right\} = \sum_{j \in i} U_j e^{-[A_j + \alpha_j I_j]} \cdot \left\{ H\left(t - \frac{I_j}{V_g} - \sum_{j=1}^{I_j} p_j \tau\right) + \right. \\ \left. - H\left(t - \frac{I_j}{V_g} - \sum_{j=1}^{I_j} (p_j + k_j) \tau\right) \right\} \quad /2/$$

gdzie: j_t określa bieżący numer impulsu zakłóceń, tzn. liczbę impulsów zakłóceń, które wystąpiły w przedziale czasu $(0, t)$ zaś $H(x)$ jest funkcją skoku jednostkowego:

$$\left\{ \begin{array}{l} H(x) = 1 \text{ dla } x \geq 0 \\ H(x) = 0 \text{ dla } x < 0 \end{array} \right. \quad /3/$$

We wzorze /2/ występują zmienne losowe, których wartości dla danej realizacji procesu $\{W_{m, n}(t)\}$ zależne są od długości T przedziału obserwacji $(t_0, t_0 + T)$, a mianowicie:

\hat{I} - zmienna losowa, przyjmująca wartość $i = 0, 1, 2, \dots, \frac{T}{2\tau}$ określająca liczbę serii zakłóceń zewnętrznych;

\hat{J} - zmienna losowa, przyjmująca wartość $j = 1, 2, \dots, \frac{T \cdot m}{2\tau}$ określająca liczbę pojedynczych impulsów zakłóceń zewnętrznych;

\hat{P}_j —zmienna losowa, przyjmująca wartości $p_j = 1, 2, \dots, \frac{T}{\tau}$ określająca długość odcinka czasu $p_j \tau$ między początkami kolejnych impulsów zakłóceń;

\hat{K}_j —zmienna losowa, przyjmująca wartości $k_j = 1, 2, \dots, \frac{T}{\tau}$ określająca długość odcinka czasu trwania — $k_j \tau$ —tego impulsu zakłóceń, o stałej amplitudzie a_j ;

\hat{U} —zmienna losowa ciągła z przedziału $U_j \in (-U, +U)$, której wartość określa amplitudę j —tego impulsu zakłóceń o czasie trwania k_j . Amplituda U_j reprezentuje różnicę potencjałów na wyjściu równoważnego źródła zakłóceń, które poprzez sprzężenie (np. pojemnościowe) wytwarza w obwodzie magistrali identyczny sygnał jak sygnał zaindukowany z rzeczywistego źródła zakłóceń;

\hat{A}_j —zmienna losowa ciągła z przedziału $a_j \in (a_{\min}, a_{\max})$ której wartość a_j określa moduł napięciowej funkcji sprzężenia (transmitancji) przy środkowej częstotliwości widma j —tego impulsu zakłóceń. Zmienna losowa \hat{A}_j jest zależna głównie od rozkładu zmiennej losowej \hat{K}_j , zaś jej funkcja gęstości zależy od intensywności generacji zakłóceń przez poszczególne źródła, od ich rozmieszczenia (odległości) względem trasy magistrali sieciowej oraz ekranowania magistrali od zewnętrznych pól elektromagnetycznych;

$\hat{\alpha}_j$ —zmienna losowa ciągła z przedziału $\alpha_j \in (\alpha_{\min}, \alpha_{\max})$, której wartość α_j określa moduł napięciowej funkcji przenoszenia (tamowności falowej) dopasowanej falowo linii magistrali przy środkowej częstotliwości widma j —tego impulsu zakłóceń. Dla konkretnego wykonania magistrali istnieje całkowita korelacja rozkładów $\hat{\alpha}_j$ i \hat{K}_j ;

\hat{L}_j —zmienna losowa ciągła z przedziału $l_j \in (0, L)$, której wartość l_j określa długość drogi sygnału przeniku zakłóceń od punktu sprzężenia do n —tego węzła magistrali. Rozkład zmiennej losowej \hat{L}_j jest zależny od rozmieszczenia punktów przeniku sygnałów zakłócających oraz zróżnicowania intensywności pracy poszczególnych, nieidentycznych źródeł zakłóceń, a więc pośrednio zależy od rozkładu zmiennej losowej \hat{J} ;

V_g —prędkość grupowa magistrali — w przybliżeniu stała dla wszelkich sygnałów.

Ciąg losowy $\{W_{m,n}(t)\}$ reprezentuje realizację stacjonarnego procesu stochastycznego zakłóceń w n —tym węźle sieci, przy m —aktywnych, losowych źródłach zakłóceń impulsowych.

Uogólnienie na całą sieć o N stacjach i M źródłach przyjmie postać macierzy $[W_{m,n}]$ o wymiarach $N \times M$, której każdy wyraz opisuje postać czasową realizacji procesu zakłóceń wg wzoru [2/

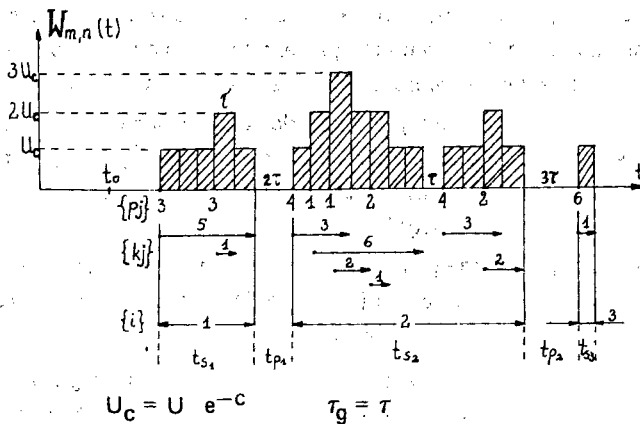
$$[W_{m,n}(t)] = \begin{bmatrix} W_{1,1}(t) & W_{1,2}(t) & \dots & W_{1,n}(t) & \dots & W_{1,N}(t) \\ W_{2,1}(t) & W_{2,2}(t) & \dots & W_{2,n}(t) & \dots & W_{2,N}(t) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ W_{m,1}(t) & W_{m,2}(t) & \dots & W_{m,n}(t) & \dots & W_{m,N}(t) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ W_{M,1}(t) & W_{M,2}(t) & \dots & W_{M,n}(t) & \dots & W_{M,N}(t) \end{bmatrix} \quad /4/$$

Wewnątrz macierzy $\{W_{m,n}(t)\}$ zaznaczono podmacierz wierszową $[W_{m,1}(t)...W_{m,2}(t)...W_{m,n}(t)]$, której wyrazy opisują grupowy strumień impulsowy zakłóceń w węzłach magistrali, przy statystycznie niezmiennych warunkach pracy sieci, w przedziale czasu obserwacji $(t_0, t_0 + T)$. Wyrazy tej podmacierzy można więc uznać za realizacje stacjonarnego procesu stochastycznego strumienia grupowego zakłóceń impulsowych w n -tym węzle magistrali, który ze względu na liczbę serii spełniających definicję D1 może mieć w ogólności inny charakter niż strumień impulsowy określony w zbiorze m -źródeł. Przyczyną tego są zniekształcenia multiplikatywne: amplitudowe i fazowe oraz wielodrożność impulsów przy ich propagacji od źródła do n -tego węzła magistrali powodujące m.in. występowanie wzajemnych kompensacji energii, a zatem dzielenia jednych a łączenia innych serii impulsowych. W dalszym ciągu analizuje się więc i -elementowy strumień $\{W_{m,n}(t)\}_i$, gdzie liczba i -serii określona jest w zbiorze m -źródeł jako r -elementowy strumień grupowy serii impulsowych $\{S_r(t)\}$ spełniający warunki definicji D1, lecz według jego obserwacji w n -tym węzle magistrali.

Rozpatrzono teraz przypadek graniczny, w sensie maksymalnej wartości uśrednionego poziomu amplitudy strumienia $\{S_r(t)\}$ w przedziale czasu $(t_0, t_0 + T)$ wraz z interpretacją fizyczną sumowania impulsów zakłóceń w n -tym węzle.

Mianowicie przy ustalonych wartościach $a_j, \alpha_j, l_j, (U_j = +U)$ argumentów funkcji /2/ dla wszystkich wygenerowanych w przedziale czasu $(t_0, t_0 + T)$ impulsów $(j = 1, 2, \dots, \frac{T \cdot m}{2\tau})$ występuje sytuacja sumowania sygnałów prostokątnych, identycznych ze względu na amplitudę, lecz różniących się czasami trwania. Jest to więc wymaginowany przypadek magistrali nie zniekształcającej, gdy generowane losowo przez identyczne źródła sygnały impulsowe przenikają do obwodu magistrali tylko w jednym punkcie. W tak określonych warunkach strumień $\{S_r(t)\} \equiv \{W_{m,n}(t)\}$ (rys. 3). W ogólnym przypadku korelacja zmiennych losowych R oraz l , reprezentujących liczbę serii w strumieniach odpowiednio $\{S_r(t)\}$ i $\{W_{m,n}(t)\}_i$ jest zależna od rozkładów zmiennych losowych P_j, K_j, U_j , od których z kolei zależą wartości argumentów a_j, α_j, l_j, u_j funkcji /2/.

Liczne uzależnienia o charakterze losowym i deterministycznym dotyczące ciągów $\{W_{m,n}(t)\}$, a także brak danych pomiarowych utrudniają skonstruowanie uogólnionego modelu matematycznego strumienia pochodnego $\{S_r(t)\}$. Wiarygodnym modelem byłyby zweryfikowane statystycznie rozkłady parametrów tego strumienia, otrzymane w wyniku badań empirycznych w reprezentatywnych warunkach rzeczywistych pracy sieci. Prostsza metodą byłoby przeprowadzenie eksperymentów symulacyjnych zależności /2/ i /4/ wspomaganymi przez oszacowania analityczne /5/.../15/ dotyczące właściwości zmiennych losowych P_j i K_j . Najbardziej skutecznym działaniem badawczym jest niewątpliwie powiązanie obydwu wymienionych powyżej metod modelowania.



$$U_c = U e^{-c} \quad \tau_g = \tau$$

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p_j	3	3	4	1	1	2	4	2	6
k_j	5	1	3	6	2	1	3	2	1
$i = r$	1		2					3	

$$\{S_r(t)\} = W_{m,n}(t) = \sum_{j \in I} U_j \cdot e^{-c} \cdot \left\{ H(t - t_0 - \sum_{j=1}^{jt} p_j \cdot \tau) - H[t - t_0 - \sum_{j=1}^{jt} (p_j + k_j) \tau] \right\}$$

Rys. 3. Fragment ciągu $\{W_{m,n}(t)\}$ z rozkładem czasów serii strumienia $\{S_r(t)\}$

W celu wyznaczenia zależności analitycznych dotyczących rozkładów, a przynajmniej uśrednionych parametrów opisujących strumień $\{S_r(t)\}$ przyjęto założenia Z1...Z6.

Założenia

- Z1. Liczba źródeł zakłóceń jest ustalona i wynosi m ; źródła te są ponumerowane: $m' = 1, 2, \dots, m$.
- Z2. Praca poszczególnych źródeł jest asynchroniczna i wzajemnie niezależna. Impulsy prostokątne zakłóceń z danego źródła generowane są przypadkowo i charakteryzują się stałym czasem trwania $k_j \tau = \tau_{m'} = \text{constans}(t)$, w ogólnym przypadku zróżnicowanym według numeru źródła m' .
- Z3. Każde źródło generuje zakłócenia tworzące ciąg (strumień) impulsowy o współczynniku wypełnienia czasowego $\eta_{m'} = \delta_{m'} \tau_{m'} < 0,1$ ze stałą intensywnością $\delta_{m'} = \delta = \text{constans}(m')$, co oznacza, że średnia liczba impulsów generowanych w jednostce czasu jest stała dla wszystkich źródeł i wynosi δ .

- Z4. Strumień $\{S_r(t)\}$ powstaje w wyniku superpozycji strumieni składowych, generowanych przez m źródeł. Pominięte są zniekształcenia amplitudowo-fazowe, którym ulegają impulsy zakłóceń w punktach sprzężenia i na trasie magistrali.
- Z5. W każdym węźle magistrali następuje amplitudowe sumowanie impulsów prostokątnych o tej samej biegunowości. Oznacza to, że nie występują przypadki sumowania geometrycznego sygnałów pochodzących od różnych źródeł, a pojawiających się równocześnie w węźle.
- Z6. Rozkład momentów początkowych wszystkich wygenerowanych impulsów w dostatecznie długim przedziale czasu $(t_0, t_0 + T)$ jest zbliżony do rozkładu Poissona z parametrem intensywności $\lambda = m \delta$.

Założenie Z4 jest w sposób naturalny spełnione w przypadku magistrali biernej, energetycznie symetrycznej. Założenie Z6 jest właściwie konsekwencją założeń Z1...Z5, gdy liczba źródeł $m > 10$. Tak sformułowane zagadnienie pozwala na zastosowanie pewnych metod analitycznych teorii obsługi masowej [10].

Założenia Z1...Z3 pozostaną niezmiennie do końca rozważań. Przyjęto natomiast pewne chwilowe uproszczenia w celu uzyskania przejrzystych wdrażeń analitycznych, a także przedstawiono sposób uwzględnienia zależności fazowych przy sumowaniu strumieni składowych a więc rezygnacji (przynajmniej częściowej) z założeń Z4 i Z5 oraz modyfikacji założenia Z6.

Konsekwencją przyjętych założeń: Z1...Z6 jest możliwość przedstawienia grupowego strumienia $\{S_r(t)\}$ w alternatywnych postaciach jako:

- I. prostego, sumacyjnego strumienia Poissona; dla małych intensywności δ i małych czasów $\tau_{m'} < \tau_0$ generacji pojedynczych impulsów w strumieniach składowych,
- II. złożonego, sumacyjnego strumienia impulsowego o niestandardowym rozkładzie; dla ograniczonych od dołu ($\tau_p \gg \tau_0$) czasów trwania przerw między impulsami w strumieniach składowych.

Rozkład Poissona aktywizacji źródeł generujących impulsy zakłóceń oraz małe wypełnienie czasowe $\eta_{m'} < 0,1$ strumieni składowych stanowią podstawę do uznania, że strumień $\{S_r(t)\}$ ma również jednowymiarowy, poissonowski charakter rozkładu liczby impulsów w przedziale czasu $(t_0, t_0 + T)$, opisany wyrażeniem:

$$V_k(T) = \frac{(\lambda \cdot T)^k}{k!} e^{-\lambda \cdot T} \quad /5/$$

Ze wzoru /5/ wynika, że prawdopodobieństwo pojawienia się w odcinku czasu $(t_0, t_0 + T)$ co najmniej jednego impulsu zakłóceń, tzn. jednoelementowej serii w strumieniu grupowym $\{S_r(t)\}$ jest równe:

$$P_{>1}(t) = 1 - V_0(T) = 1 - e^{-\lambda \cdot T} \quad /6/$$

W przypadku strumieni składowych o stałej długości $\tau_{m'} = \tau$ każdego losowo wygenerowanego impulsu zakłóceń, prawdopodobieństwo zdarzenia, polegającego na

wystąpieniu w dowolnym momencie czasu niezerowego sygnału zakłóceń w strumieniu grupowym $\{S_r(t)\}$ równe:

$$\eta_s = 1 - e^{-\lambda \cdot \tau} \quad /7/$$

jest miarą wypełnienia strumienia $\{S_r(t)\}$.

Średnia liczba serii impulsów tego strumienia w jednostce czasu będzie zatem wyrażona:

$$\delta_s = \frac{d\eta_s}{d\tau} = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot \tau} \quad /8/$$

natomiast średnia długość serii będzie równa:

$$\bar{t}_s = \frac{\eta_s}{\delta_s} = \frac{1 - e^{-\lambda \cdot \tau}}{\lambda \cdot e^{-\lambda \cdot \tau}} \quad /9/$$

Z zależności /5/.../9/ poprzez funkcje tworzące i przekształcenia Laplace'a otrzymuje się wyrażenia analityczne opisujące rozkłady długości serii – t_s i długości przerw międzyseryjnych – t_p strumienia grupowego $\{S_r(t)\}$:

$$\begin{aligned} f(\hat{t}_s = t) &= e^{-\lambda \cdot \tau} \cdot \delta(t - \tau) + \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot \tau} \cdot H(t - \tau) + \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \cdot \lambda^k \cdot e^{-\lambda(k+1)\tau} \frac{[t - (k+1)\tau]^{k-1}}{(k-1)!} \cdot \\ &\left\{ 1 + \frac{\lambda}{k} [t - (k+1)\tau] \right\} \cdot H[t - (k+1)\tau] \quad /10/ \\ f(\hat{t}_p = t) &= \lambda \cdot e^{-\lambda t} \end{aligned}$$

We wzorach /10/ $\delta(x)$ jest funkcją Diraca, $H(x)$ – funkcją skoku jednostkowego /3/, zaś ciągłe zmienne losowe: \hat{t}_s , \hat{t}_p przyjmują wartości w przedziale nieograniczonym $(0, \infty)$. Stosunkowo proste wyrażenia /10/ opisujące funkcje gęstości rozkładów zmiennych losowych \hat{t}_s oraz \hat{t}_p uzyskano przy daleko idących uproszczeniach, polegających na założeniu poissonowskiego strumienia grupowego i stałej wartości τ czasu trwania każdego impulsu w strumieniach składowych. Strumień grupowy $\{S_r(t)\}$ powstaje zaś w wyniku nie tylko prostego sumowania, lecz także nakładania się (interferencji) sygnałów wygenerowanych przez różne źródła, a pojawiających się równocześnie w danym węźle sieci. Jest to istotną przyczyną przesunięć czasowych, a także likwidacji niektórych, bądź inicjowania dodatkowych momentów początkowych serii strumienia $\{S_r(t)\}$. Rzeczywiste rozkłady zmiennych losowych: \hat{t}_s , \hat{t}_p mogą więc znacznie różnić się od opisanych wzorami /5/.../10/, zaś główną przyczyną tej rozbieżności jest przyjęcie wartości intensywności strumienia grupowego λ jako sumy intensywności strumieni składowych.

Zależność fazową między momentami generacji impulsów zakłócających w zbiorze m źródeł wskazuje na to, że bardziej zgodnym z rzeczywistością byłby jednak model strumienia $\{S_r(t)\}$ uwolniony od założenia o poissonowskim rozkładzie momentów początkowych serii, a przynajmniej uwzględniający wpływ warunków propagacji impulsów zakłóceń od źródła ich powstawania do n -tego węzła sieci, które

łącznie z interferencjami zmieniają postać i parametry rozkładów opisanych wzorami /5/.../10/.

Wpływ ośrodka propagacji – magistrali oraz tłumienności sprzężenia źródeł zakłóceń z magistralą, a także znaczna liczba przypadków całkowitej kompensacji, obcinania pojedynczych impulsów o czasie $t_s < \tau_g$ lub łączenia sąsiednich serii przedzielonych odstępem $t_p < \tau_g$ przez układy wejściowe odbiornika modemu wskazują na możliwość wyznaczenia średniego prawdopodobieństwa $p_d = f(m, \tau, \delta)$ „zgubienia” niektórych serii w strumieniu $\{S_r(t)\}$.

Możliwe jest więc także przekształcenie intensywności $\lambda \rightarrow \lambda'$, które uwiarygodni poissonowski model strumienia $\{S_r(t)\}$. Uwzględnione prawdopodobieństwa p_d prowadzą do wyrażenia rozkładu liczby l – „znaczących” impulsów:

$$\pi_l(t) = (1 - p_d)^l \cdot \sum_{i=1}^{T \cdot m/2T} \binom{i-1}{l-1} V_i(t) \cdot p_d^{(i-1)} \quad /11/$$

spośród i -elementowego zbioru impulsów tworzących ciąg $W_{m, n}(t)$.

Wartość oczekiwana

$$E(l) = \lambda' = \sum_{l=1}^{T \cdot m/2T} l \pi_l(t) = \sum_{l=1}^{T \cdot m/2T} l (1 - p_d)^l \sum_{i=1}^{T \cdot m/2T} \binom{i-1}{l-1} \cdot V_i(t) \cdot p_d^{(i-1)} \quad /12/$$

jest miarą intensywności zmodyfikowanego strumienia grupowego $S_r'(t)$, która może być użyta w miejsce λ we wzorach /6/.../10/. Uogólnienie wyrażen $\eta_s, \delta_s, \bar{t}_s$ według wzorów /7/.../9/ na przypadki różnych czasów trwania $\tau_{m'} = \text{var}(m')$ impulsów w strumieniach składowych prowadzi do wzorów:

$$\left\{ \begin{aligned} \eta_s &= 1 - e^{-\frac{\lambda}{m} \sum_{m'=1}^m \tau_{m'}} \\ \delta_s &= \sum_{m'=1}^m \frac{\partial \eta_s}{\partial \tau_{m'}} = \lambda \cdot e^{-\frac{\lambda}{m} \sum_{m'=1}^m \tau_{m'}} \\ \bar{t}_s &= \frac{\eta_s}{\delta_s} = \frac{e^{\frac{\lambda}{m} \sum_{m'=1}^m \tau_{m'}}}{\lambda} - \frac{1}{\lambda} \end{aligned} \right. \quad /13/$$

które łącznie z przekształceniem /12/ intensywności λ na λ' mogą być praktycznie wystarczająco dokładnym modelem seryjnych zakłóceń impulsowych przenikających z otoczenia zewnętrznego magistrali sieciowej.

Innym sposobem opisu strumienia grupowego $\{S_r(t)\}$ w n -tym węźle magistrali sieciowej jest model sumowania asynchronicznych strumieni impulsowych z losowo generowanymi impulsami „prądu stałego” o czasach trwania $\tau_{m'} = \text{constans}(m')$ i odstępach τ_p zawartych w przedziale $[(m-1)\tau_{m'}, \infty]$ w każdym strumieniu składowym.

Dla tak określonego strumienia $\{S_r(t)\}$, przy zadanych wartościach $\tau_{m'}$, $\delta_{m'}$, m' -tego strumienia składowego o wypełnieniu $\eta_{m'} = \tau_{m'} \delta_{m'}$, można wyznaczyć parametry serii impulsowych strumienia grupowego $\{S_r(t)\}$:

$$\begin{aligned} \text{Wypełnienie:} \quad \eta_s &= 1 - \prod_{m'=1}^m (1 - \eta_{m'}) \\ \text{Intensywność:} \quad \delta_s &= \prod_{m'=1}^m (1 - \eta_{m'}) \sum_{m'=1}^m \frac{\delta_{m'}}{1 - \eta_{m'}} \quad /14/ \\ \text{Średni czas} \\ \text{trwania:} \quad \bar{t}_s &= \frac{\eta_s}{\delta_s} \end{aligned}$$

W przypadku identycznych $\eta_{m'} = \eta = \text{constans}$ (m') strumieni składowych, wzór /14/ przyjmuje postać:

$$\begin{cases} \eta_s = 1 - (1 - \eta)^m \\ \delta_s = m \cdot \delta (1 - \eta)^{m-1} \\ \bar{t}_s = \frac{1 - (1 - \eta)^m}{m \eta (1 - \eta)^{m-1}} \cdot \tau \end{cases} \quad /15/$$

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono wyniki obliczeń charakterystyk $\eta_s = f(\eta, m)$ oraz $\frac{\delta_s}{\delta} = f(\eta, m)$ dla obydwu zaprezentowanych modeli grupowania zakłóceń impulsowych, generowanych losowo przez m identycznych źródeł zakłóceń – odpowiednio według wzorów /7/ i /8/ dla strumienia Poissona oraz według wzoru /15/ dla złożonego, sumacyjnego strumienia impulsowego.

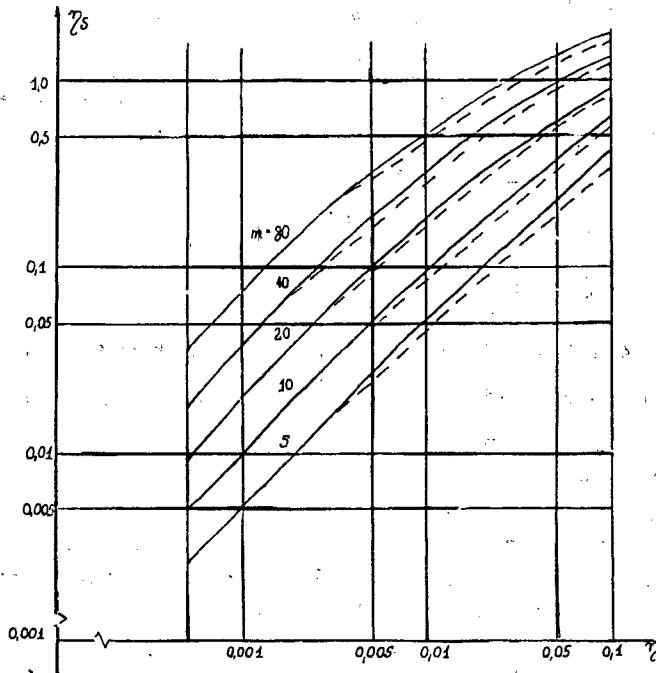
Z wykresów wynika znaczny poziom zbieżności obydwu modeli dla małych współczynników wypełnienia η strumieni składowych oraz silna zależność rozkładów parametrów strumienia grupowego od η i liczby źródeł zakłóceń m .

Wszelkie środki techniczne podejmowane w otoczeniu magistrali sieciowej dla minimalizacji wartości $\eta_{m'} = \tau_{m'} \delta_{m'}$, a więc czasu trwania i intensywności generacji impulsów oraz liczby m źródeł zakłóceń, takie jak ekranowanie, filtracja, separacja galwaniczna, odległościowa itp. mogą znacznie polepszyć warunki odbioru sygnałów ramek ISO 8802.4 przesyłanych na magistrali przemysłowej sieci lokalnej.

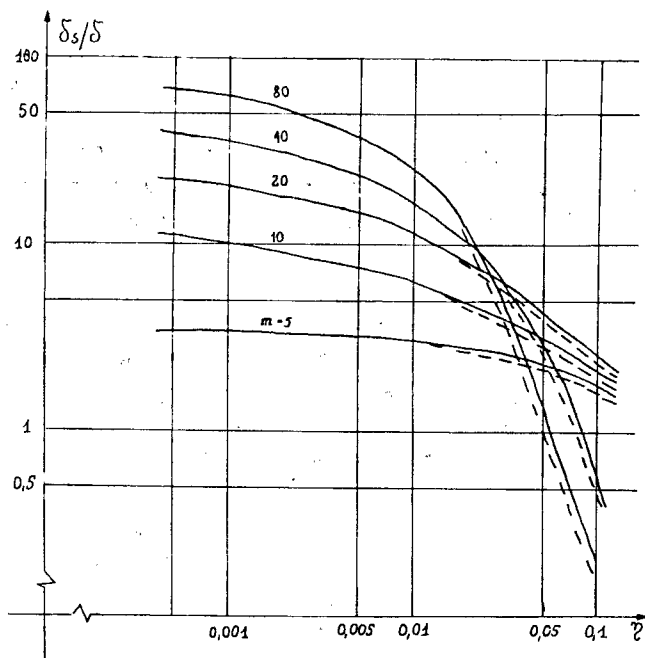
Zastosowanie fazowokoherentnej modulacji częstotliwości dla DSR = 5 Mb/s lub 10 Mb/s i związana z tym możliwość skutecznej filtracji pasma użytecznego prowadząca do zmniejszenia wartości η_s oraz δ_s , poprzez likwidację krótkich i zmniejszenie energii długich impulsów strumienia grupowego $\{S_r(t)\}$ również przyczynia się do zwiększenia odporności na zakłócenia w warunkach przemysłowych.

Znaczne uproszczenia, przyjęte w oszacowaniach według wzorów /7/, /8/, /15/ powodują, że wartości η_s , δ_s przedstawione w funkcji η , m na wykresach (rys. 4 i 5) są

raczej relatywną a nie bezwzględną miarą parametrów strumienia grupowego $\{S_r(t)\}$.
Widoczna zbieżność parametrów obydwu zaprezentowanych modeli grupowania asynchronicznych sygnałów impulsowych pozwala na praktyczne stosowanie analitycznego opisu strumienia Poissona $\{S_r(t)\}$.
Identyfikacja jego parametrów dokonana w wyniku pomiarów przeprowadzonych w rzeczywistych warunkach środowiska przemysłowego w powiązaniu z badaniami symulacyjnymi może w przyszłości doprowadzić do prostych technicznie metod badań odporności na zakłócenia urządzeń podsystemu komunikacyjnego przemysłowej sieci lokalnej.



Rys. 4. Zależność wypełnienia strumienia grupowego $\{S_r(t)\}$ od wypełnienia strumieni składowych zakłóceń
— złożony strumień sumacyjny
- - - prosty strumień Poissona



Rys. 5. Zależność intensywności strumienia grupowego $\{\delta_s(t)\}$ od wypełnienia strumieni składowych zakłóceń
 — złożony strumień sumacyjny
 - - - - - prosty strumień Poissona

6. WIerność TRANSMISJI NA MAGISTRALI SIECIOWEJ INTEL DIGIT—PROWAY

Urządzenia komunikacyjne sieci lokalnej systemu INTEL DIGIT—PROWAY wykonują funkcje warstwy łącza danych i warstwy fizycznej oraz medium transmisji sieciowej. Opracowane w latach 1984–1986 kontroler komunikacyjny MK40, modem MK30, magistrala MK01 zostały poddane badaniom technoklimatycznym, kompatybilności elektromagnetycznej – KEM i wierności transmisji międzystacyjnej z zastosowaniem kryteriów oceny wyników testowania według warunków $BER < 10^{-6}$ i $RER < 3 \cdot 10^{-15}$. Uzyskano pozytywne rezultaty rutynowych badań pełnych, zaś pomiary wierności wykazały możliwość osiągnięcia zasięgu do 2500 m, przy liczbie stacji do 50 w typowych warunkach otoczenia przemysłowego [6]. W zakresie wymagań KEM nie osiągnięto natomiast wymaganego przez normę PN-86/E-06600 poziomu W2 odporności na zakłócenia impulsowe, nanosekundowe.

Rezultaty te oraz negatywna ocena zastosowanej w modemie MK30 niestandardowej, w sensie IEC—PROWAY, techniki różnicowej modulacji fazy typu DPSK (tzw. różnicowy

kod „Manchester”) spowodowały, że nie przyjęto tego rozwiązania do wdrożenia produkcyjnego. Pomimo uzasadnień teoretycznych [5] o lepszych właściwościach widmowych i detekcyjnych sygnałów DPSK w porównaniu do techniki modulacyjnej według IEC—PROWAY, potwierdzonych wynikami badań przepustowości w funkcji zasięgu i obciążenia magistrali przeważał pogląd, że tylko ścisłe przestrzeganie zaleceń normalizacyjnych IEC—PROWAY gwarantuje osiągnięcie wymaganych parametrów użytkowych sieci.

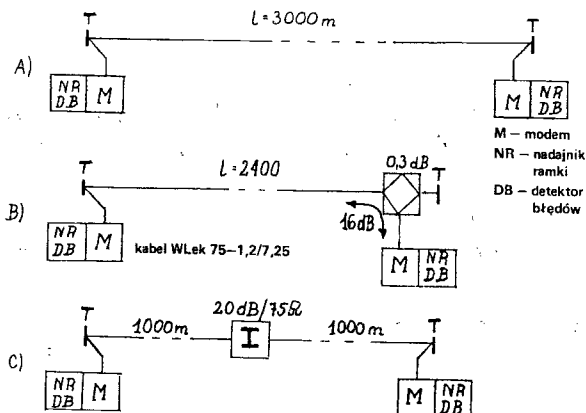
W związku z tym nastąpiła zmiana koncepcji i opracowanie nowych urządzeń komunikacyjnych z zastosowaniem techniki modulacyjnej FSK z ciągłością fazy. Działania te okazały się jednak nieskuteczne i w konsekwencji nastąpiła kolejna zmiana polegająca na przyjęciu techniki fazowokoherentnej modulacji częstotliwości analogicznie do alternatywnych zaleceń IEC—955/PROWAY opublikowanych [2] w VI/1988 jako wynik uzgodnień między IEC—PROWAY a IEEE 802.4.

W istocie nastąpił więc powrót do uprzednio krytykowanej, pierwotnej koncepcji formowania i przetwarzania sygnałów transmisji międzystacyjnej, ponieważ w [5] wykazano, że sygnały różnicowej modulacji fazy i sygnały koherentnej modulacji częstotliwości różnią się tylko formalną definicją symbolu elementarnego w ciągu modulacyjnym. W tej kolejnej konstrukcji, również niestandardowej dla DSR = 1 Mb/s, przyjęto jednak odmienną, w porównaniu do rozwiązania modemu MK30, zasadę detekcji korelacyjnej symboli kodowych PHY oraz programowe formowanie i synchronizację ramki, a także odmienny sposób dołączania stacji do magistrali.

Przeprowadzono analogiczne badania prototypów w trzystacyjnej konfiguracji z dwoma odcinkami magistrali o długości po 100 m przy zastosowaniu kryterium oceny wyników według uproszczonego oszacowania tylko pierwotnej stopy błędów $BER < 10^{-6}$.

Niezależnie od dalszych zamierzeń dotyczących urządzeń komunikacyjnych systemu INTELDIGIT—PROWAY istnieją przesłanki potwierdzające trafność wyboru techniki fazowokoherentnej modulacji częstotliwości. Wskazują na to wykonane orientacyjne pomiary wierności przekazu ramek ISO 8802.4 w dwupunktowych kanałach magistrali z kablem krajowym typu WLeK—1,2/7,25. Wyznaczone wartości elementowej BER i ramkowej FER pierwotnej stopy błędów (rys. 6) oraz zaobserwowany efekt niewystępowania błędów wielokrotnych, przekraczających możliwości detekcyjne CRC kodu cyklicznego, dają podstawę do oceny, że wymagania normy IEC—955/PROWAY dotyczące wierności transmisji: $BER < 10^{-8}$ i $FER < 3 \cdot 10^{-15}$ mogą być spełnione dla zasięgu do 2000 m magistrali, w konfiguracji 30...50 stacji, przy przepływności binarnej DSR = 1 Mb/s.

Stwierdzenie to wymaga weryfikacji poprzez wykonanie możliwie kompletnych badań urządzeń przeznaczonych do wdrożenia. Rezultaty inne od oszacowanych powyżej mogą być natomiast miarą oceny rozwiązań konstrukcyjnych układów warstwy fizycznej.



Rys. 6. Układy pomiarowe kanałów 1 Mb/s transmisji sygnałów fazowokoherentnej FSK.

Wyniki badań wierności

Struktura kanału	Liczba ramek nadanych	Pole LLC (bajty)	Ramki błędne	Bity błędne	FER	BER
A	$5 \cdot 10^7$	4	240	825	$4,8 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-9}$
A	$1,5 \cdot 10^6$	1024	615	1220	$4,1 \cdot 10^{-4}$	$9,9 \cdot 10^{-8}$
B	$1,5 \cdot 10^6$	512	64	73	$4,3 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$
B	$0,5 \cdot 10^6$	1024	75	90	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$
C	$1,5 \cdot 10^6$	1024	280	615	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$

W pomiarach zostały użyte jako modemy warstwy fizycznej zmodyfikowane pakiety MK30, w których układy modulatora i demodulatora kodowego DPSK zostały wymienione na układy fazowokoherentnej modulacji i demodulacji FSK, dla przepływności binarnej DSR = 1 Mb/s wykonane według reguł kodowania i dekodowania podanych w [2]. (Por. pkt. 3). Z przedstawionej analizy i wykonanych pomiarów wynika, że alternatywne zalecenia IEC-955/PROWAY, podane w [2], których istotą jest technika fazowokoherentnej modulacji FSK dla DSR = 5 Mb/s i 10 Mb/s mogą być z dobrym skutkiem przyjęte również do stosowania w sieciach przemysłowych o przepływności binarnej DSR = 1 Mb/s.

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zadanie opracowania urządzeń podsystemu komunikacyjnego przemysłowej sieci lokalnej charakteryzuje się licznymi uwarunkowaniami, polegającymi głównie na konieczności jednoczesnego spełnienia wielu wymagań, nietypowych w odniesieniu do klasycznych systemów automatyki.

Zadanie to powinno zatem przebiegać „od dołu do góry” w sensie zarówno podziału warstwowego architektury sieci, jak również dekompozycji na zadania cząstkowe i ich koordynacji.

Urządzenia te, na każdym etapie ich opracowania, powinny być poddawane badaniom, w możliwie szerokim zakresie parametrów funkcjonalnych. Przy opracowaniu urządzeń sieci lokalnej, INTEL DIGIT—PROWAY podejmowane były kolejne próby rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń z przyjmowaniem „a priori” ciągle zmieniających się zaleceń standaryzacyjnych IEC/PROWAY jako podstawy gwarantującej osiągnięcie postawionego celu. Zgodność ze standardem IEC/PROWAY w zakresie interfejsów i protokołów była właściwie jedynym kryterium oceny prototypów.

Działania te oraz dotychczas osiągnięte efekty spotkały się z trafną, aczkolwiek zdecydowanie krytyczną oceną autora referatu [9].

Z tej oceny oraz treści niniejszego artykułu można wyprowadzić pewne, być może kontrowersyjne, wnioski ogólne.

1. W badaniach, a następnie ocenie jakości opracowanych modeli, prototypów i seryjnych urządzeń sieci lokalnej powinny być w maksymalnym stopniu uwzględniane wymagania funkcjonalne, dotyczące całości podsystemu komunikacyjnego (por. pkt. 2). Ocena dokonywana tylko według kryterium elementowej stopy błędów — BER w warstwie fizycznej PHY, ze sprawdzeniem funkcjonalności protokołu sterowania dostępem w podwarstwie MAC, nie może stanowić wiarygodnej miary skuteczności rozwiązań konstrukcyjnych.
2. Z przedstawionego w zarysie (pkt. 6) przebiegu prac w zakresie urządzeń komunikacyjnych INTEL DIGIT—PROWAY wynika, że ścisłe stosowanie szczegółowych zaleceń IEC/PROWAY nie daje gwarancji uzyskania zgodności z ogólnymi i nadrzędnymi wymaganiami tego standardu, sformułowanymi w rozdziale 1 „Functional requirements” pkt. 1.2.3 p.t. „Main Features of PROWAY” dokumentu IEC—955/PROWAY.
3. Badania odporności na zakłócenia przemysłowe z symulacją sygnałów zakłócających według KEM [7, 8] są skutecznym środkiem oceny i optymalizacji rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń automatyki przemysłowej, zwłaszcza w zakresie oddziaływań w obwodach AC sieci elektroenergetycznej.
Zagadnienie metod badań odporności na zakłócenia generowane wewnątrz (szumy, odbicia) oraz przenikające z zewnątrz do obwodów wielodostępnej magistrali

sieciowej nie jest jeszcze w pełni rozpoznane. Z przedstawionej w punktach 4 i 5 heurystycznej analizy przenikania i sumowania strumieni impulsowych w węzłach magistrali sieciowej wynika, że deterministyczny model sygnałów zakłóceń impulsowych, nanosekundowych według [7, 8] nie uwzględnia losowych zależności między procesami stochastycznymi sygnałów użytecznych i zakłócających.

Bardziej zbieżnymi z rzeczywistością byłyby sygnały zakłócające wytworzone jako superpozycja gaussowskiego szumu dolnopasmowego ze strumieniem impulsowym o poissonowskim rozkładzie momentów generacji serii i wykładniczym rozkładzie czasów odstępów między seriami impulsów.

4. Autodiagnostyka transakcji sieciowych, zawarta w protokołach warstw APP, a także bieżące monitorowanie magistrali lub testy wykonywania zleceń użytkownika dotyczą zdarzeń wynikowych, obserwowanych na wyższych poziomach formowania komunikatów sieciowych.

Do badań wierności przekazów na magistrali sieciowej, przepustowości, odporności na zakłócenia itp., czyli zdarzeń losowych w skali bitowej z ciągłym wypełnieniem transmisji ramek, niezbędne są tzw. analizatory (mierniki) rozkładu (stopy) błędów, szeroko stosowane przez producentów i użytkowników sieci lokalnych.

Użyteczność tych przyrządów będzie szczególnie widoczna w fazie wykonywania instalacji kablowej magistrali z licznymi rozgałęzzeniami i regeneratorami oraz w przypadku rekonfiguracji jej węzłów.

Wyniki pomiarów błędów transmisji w różnorodnych warunkach aplikacji przemysłowych pozwolą w przyszłości na opracowanie programowych modeli symulacyjnych z zadawaniem zleceń użytkownika, rozmiarów i konfiguracji sieci oraz rozkładów losowych błędów transmisji.

5. Wobec braku krajowych doświadczeń eksploatacyjnych w zakresie przemysłowych zastosowań sieci lokalnych celowe byłoby możliwie szybkie uruchomienie doświadczalnej aplikacji w rzeczywistych, typowych warunkach, w sensie obiektu automatyzacji i środowiska przemysłowego.
6. Decyzje producentów urządzeń oraz projektantów i użytkowników systemów automatyki o strukturze sieciowej, dotyczące urządzeń komunikacyjnych sieci lokalnej powinny być poprzedzone szczegółową analizą i oceną szeroko pojętej efektywności podsystemu komunikacyjnego.

Literatura

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

- [2] IEC Addendum to Publication 955: Phase — Coherent — FSK 5 and 10 Mb/s physical layer and medium specifications. June 1988
- [3] ISO IS 7498: Information Processing Systems — Open Systems Interconnection — Basic Reference Model.
- [4] Frank H.: Optimal design of computer network. Nowy Jork Prentice — Hall Series on Automatic Computations 1972
- [5] Majdan K.: Analiza sygnałów transmisyjnych w przemysłowych sieciach lokalnych. Biuletyn MERA—PIAP nr 6/88
- [6] Górzyński K., Majdan K.: Zasięg łączności na jednokanałowej magistrali sieciowej. Biuletyn MERA—PIAP nr 3/89
- [7] PN—86/E—06600. Automatyka i pomiary przemysłowe. Kompatybilność elektromagnetyczna urządzeń. Ogólne wymagania i badania.
- [8] IEC Dokument 65(CO)39 Draft—Electromagnetic compatibility for industrial process measurement and control equipment. Part four: Electrical fast transient requirements.
- [9] Lewoc J.: Sieci lokalne dla automatyzacji przemysłu. Ucieczka w nowe. Krajowa konferencja N—T „Lokalne sieci komputerowe dla automatyzacji przemysłu”. Częstochowa 1989 r.
- [10] Gnedenko B., Kovalenko J.: Vvedenie w teoriju massovogo obsluživanja. Moskwa, Nauka 1987.