

SYNCHRONIZM NIEZAMIERZONY W MASZYNACH

Piotr Krzyworzecka

Katedra Mechaniki i Wibroakustyki
Akademia Górniczo-Hutnicza
Al. Mickiewicza 30, 30-065 Kraków
e-mail: krzyworz@agh.edu.pl

Streszczenie

Synchronizm niezamierzony związany jest z działaniem systemów, nie tylko technicznych, w których realizacja celu podstawowego wiąże się z cyklicznym powtarzaniem sekwencji zdarzeń. Autor podejmuje próbę wykorzystania tego zjawiska dla wspomaganie procedur odtwarzania przez systemy diagnozujące informacji o ewolucji dynamicznych procesów mierzalnych w systemach diagnozowanych. Traktuje synchronizm jako wielowartościową własność mierzalną, formalizowaną przez rozmytą relację bliskości dwu ciągów zdarzeń. Opis taki pozwolił wyróżnić szereg kategorii fenomenu i wprowadzić wskaźniki stopnia synchronizmu dla oceny efektów wspomaganie. Wybrane przykłady zweryfikowane eksperymentalnie pozwoliły ocenić zalety wspomaganie synchronicznego, ale i trudności związane z jego efektywnym wykorzystaniem.

Słowa kluczowe: diagnostyka, synchronizm, innowacja

SPONTANEOUS SYNCHRONISM IN ROTATING MACHINERY

Summary

The paper discusses properties and possibilities of spontaneous synchronism related to repeatable operation mode of certain technical systems. A new approach to phenomenon interpretation and description is proposed, based on the principle that unintentional machine synchronism represents multivalent measurable feature, defined using fuzzy relation of proximity between two series of events. As it has been shown, spontaneous synchronism can improve encoding and information transfer about evolution of internal low-energy vibration components, important for diagnosis in defect formation. On the other hand a proper synchronism category recovered in diagnostic system enables useful information recovery more efficient. Moreover author discusses some categories of synchronism and proposes appropriate methods of synchronisation using as follows: short time mean cycle, direction of innovation in the symptom space, recovered carrier signal, sections of power wavelet transform.

Key words: diagnostics, synchronism, innovation

1. WSTĘP

Truizmem byłoby stwierdzenie, że działanie zorganizowane prowadzi na ogół do lepszych rezultatów niż chaotyczne zachowanie podmiotu działań. Co więcej – pozorny, lub rzeczywisty chaos w obserwowanej rzeczywistości wymaga dobrze zorganizowanej reakcji adaptacji, bądź przeciwdziałania.

Jedną z kategorii organizacji stanowi w maszynie cyklicznej synchronizm [13].

W pewnych okolicznościach determinuje sposób, czas i miejsce przepływu energii i informacji w systemach technicznych także bez zamysłu konstruktora.

Przedmiotem rozważań będzie tu wskazanie i uściślenie roli synchronizmu jako własności wspomagającej odwzorowanie pewnych kategorii

zmienności istotnych dla diagnozowania maszyn [9], w których:

- powtarza się dynamiczne oddziaływanie elementów (także mediów);
- realizacja celu podstawowego obejmuje cykliczne powtarzanie sekwencji zdarzeń podobnych, lecz nie identycznych;
- z ruchem związana jest emisja wibroakustyczna, lub inna mierzalna na zewnątrz obiektu w trakcie jego funkcjonowania.

Wykorzystanie synchronizmu wiąże się z podejściem sygnałowym w badaniu maszyn i systemów ich diagnozowania. Niezależnie od nośnika fizycznego pewne typy zmienności wymagają określonych charakterystyk i procedur dla uzyskania domniemanej, a pożądanej informacji [5].

Zmienność informacyjna – pojęcie innowacji

Jak rozpoznać zmienność pożądaną? Dalej za informacyjnie wartościową uznawana jest zmienność innowacyjna – ZI, w dobrym stanie technicznym praktycznie niemierzalna, jakie by nie były zmiany stanu eksploatacyjnego SE (oczywiście w dopuszczalnych granicach).

Podobnie składowa lub cecha sygnału, której zmienność odtwarza zmianę parametrów stanu technicznego ST w sensie statystycznym, lub zdeterminowanym określana będzie dalej mianem innowacyjnej.

2. FORMALIZACJA I MIERZALNOŚCI SYNCHRONIZMU

Warto poddać rewizji dotychczasowe definicje synchronizmu pod kątem przydatności dla opisu synchronizmu niezamierzonego. Okazują się niewystarczające, a przede wszystkim niekonstruktywne dla rozszerzenia wykorzystania zjawiska w diagnozowaniu maszyn [16] (poza sumowaniem synchronicznym).

Autor zakłada, że synchronizm:

- a) jest wielowartościową własnością mierzalną;
- b) może zostać wykorzystany dla wspomagania kodowania, transferu i odwzorowania w polu zjawiskowym maszyny informacji o jej stanie technicznym.
- c) umożliwia selekcję odwzorowywanych własności;
- d) pozwala lokalnie uniezależnić odwzorowanie zmiany stanu technicznego od zmian cyklu;
- e) efekty wspomagania mogą zostać ilościowo ocenione i porównywane;
- f) wykorzystanie wspomagania w systemie diagnozującym może pozwolić na odwrócenie pewnych operacji obiektu i odtworzenie zmienności informacyjnej oryginalnego nośnika w systemie diagnozującym.

W ostatnim przypadku będzie to już synchronizm zamierzony, wprowadzony celowo, jak to ma powszechnie miejsce w systemach telekomunikacyjnych, bądź pomiarowych.

2.1. Pojęcie synchronizmu

Pojęcie synchronizmu, rozmaicie w różnych zastosowaniach interpretowane w najszerszym ujęciu oznacza jednoczesność par zdarzeń niezależnych

$a_k \in [a_k, \prec], b_k \in [b_k, \prec]$ należących do ciągów uporządkowanych. Synchronizacja natomiast stanowi działanie, które tą jednoczesność zapewnia [6]

Definicję taką, określaną skrótowo SSI (synchronizm systemów informacyjnych) można przyjąć jednie za punkt wyjścia. Ujmuje ona dość precyzyjnie fenomenologię zjawiska w systemach zamierzonego kodowania i przesyłania informacji i

stanowi podstawę optymalizacji pewnej klasy systemów telekomunikacyjnych. Zdaniem autora nie daje takich możliwości w odniesieniu do wewnętrznych procesów drganiowych systemów innych.

Umykają bowiem uwadze eksperymentatora pewne fenomeny związane z organizacją przepływu energii i informacji wartościowej w systemach kodowania niezamierzonego, jakim jest niewątpliwie diagnozowany system techniczny, biologiczny bądź ekonomiczny. We wszystkich synchronizm rzadko bywa tak jednoznaczny – co więcej, obserwuje się jego pogarszanie w trakcie eksploatacji. Degradacji funkcjonalnej i strukturalnej maszyny towarzyszy dezorganizacja ruchu (np. zmniejszenie regularności biegu), która prowadzi do desynchronizacji procesów drganiowych zewnętrznych oraz tych związanych z ruchem celowym, czego objawem może być powstanie i intensyfikacja modulacji położenia impulsów siły PPM [2, 9, 14].

Refleksja nad rolą synchronizmu niezamierzonego w maszynie, skłania do rozszerzenia zakresu interpretacji pojęcia i formalizacji jego definicji. Czysto pragmatyczny punkt widzenia postuluje potraktowanie synchronizmu jako własności mierzalnej. Coś trzeba najpierw zmierzyć, by świadomie i celowo wykorzystać w systemie fizycznym.

Otóż przytoczona na wstępie definicja implikuje co najwyżej elementarną mierzalność zjawiska w skali nominalnej [7], tj. rozróżnienie klas: synchronizm–brak synchronizmu. Ponadto w maszynie, przynajmniej jeśli chodzi o procesy drganiowe, trudność sprawiać może już samo określenie zdarzeń, które miałyby być *stricte* jednocześnie.

2.2. Relacja synchronizmu

Docelowa definicja robocza synchronizmu powinna stwarzać podstawę formalną dla realizacji postulatów (1.a)...(1.e) w określonych obszarach zainteresowań. Jej wykorzystanie dla wspomagania odtwarzania składowych wartościowych sygnałów maszyny a zwłaszcza optymalizacja tych procedur, byłyby zdaniem autora lepsze, jeśli potraktować synchronizm jako własność wielowartościową, mierzalną w stopniu większym niż elementarny i skali wyższej niż nominalna.

Określenie synchronizmu, jako relacji jest z wielu względów korzystne. Podejście teoriomnogościowe (relacyjne) wydaje się ogólne w stopniu bardziej niż wystarczającym. [8, 12].

Opis w postaci systemu relacyjnego ma i tę zaletę, że nie wiąże zjawiska synchronizmu z określoną strukturą fizyczną. W ujęciu Ujemowa–Mesarowicza [15] system taki determinuje struktura relacyjna określona na zbiorze obiektów, z którą w sposób sensowny i zadowalający opisuje modelowany fenomen

w pewnym przedziale czasowo-przestrzennym rozstrzygając o stopniu mierzalności jego cech $[W_k]$ (wybranych własności charakteryzujących interesujące procesy fizyczne).

Tworzenie modelu postępuje według kolejności:

$$[z] \Rightarrow [W] \Rightarrow [R]$$

Inaczej mówiąc, jeśli pewne zjawiska implikują własności, wynika z tego określona struktura relacyjna [10,15]. Takie podejście pozwala uniknąć tworzenia modeli trywialnych.

Ujmując najogólniej naturę zjawiska, **synchronizm oznacza powtarzanie w czasie określonej relacji dwuargumentowej** – \mathcal{R} [11]. Nie precyzując w tym momencie typu \mathcal{R} można przyjąć, że zbiór $[\mathcal{R}_k]$ w momentach t_k

$$\mathcal{L}_s = \mathcal{R}_{k-2}:t_{k-2} \prec \mathcal{R}_{k-1}:t_{k-1} \prec \mathcal{R}_k:t_k \prec \mathcal{R}_{k+1}:t_{k+1} \prec \mathcal{R}_{k+2}:t_{k+2} \quad (2.1)$$

formalizuje synchronizm jako łańcuch \mathcal{L}_s (2.1) relacji porządku \prec wyznaczającej następstwo czasowe, lub egzystencjalne kolejnych \mathcal{R}_k , jednak bez kwantyfikacji przyczynowo – skutkowej, ani określenia rodzaju \mathcal{R} .

Przyjmując \mathcal{R} jako lokalny (lub elementarny) opis synchronizmu, można łańcuch \mathcal{L}_s (2.1) uznać za jego opis globalny w przedziale, jeśli przedział obserwacji T obejmie całość fenomenu oraz:

- wszystkie relacje \mathcal{R} są podobnego typu;
- \mathcal{R} jest zwrotna i symetryczna (synchronizm nie wyróżnia przyczyny, a założenie przechodniości nie jest konieczne przy ograniczeniu liczby sygnałów do dwóch);
- w przypadku logiki wielowartościowej ($\mathcal{R} \Rightarrow \mathcal{R}_m$) nie muszą być \mathcal{R}_m jednakowej wartości, jednak w przedziale T ich zmienność winna być pozbawiona trendu (pomijając stan przejściowy procedury synchronizacji).

Zasada (2.1) jest wystarczająco ogólna by wykorzystać ją dla:

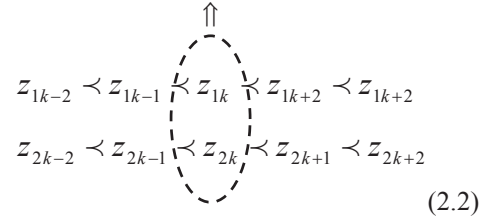
- opisu wspomaganego przepływu informacji wartościowej w maszynie,
- selekcji składowych wartościowych sygnałów zmierzonych.

Pozostaje określenie rodzaju obiektów, których \mathcal{R} dotyczy (dziedziny i przeciw-dziedziny relacji). Uwarunkowania fizyczne wskazują w pierwszym rzędzie na zdarzenia. Pojęcie zdarzenia odnosi się tu do zjawisk na danym poziomie obserwacji niepodzielnych. Autor interpretuje je jako fragment rzeczywistości (lub jej cechy) obiektu lokalizowany momentem, przedziałem, lub kategorią czasu [10].

Relacja bliskości

Przyjmując obserwację strumienia zdarzeń jako realizację pewnego procesu fizycznego w czasie biegu maszyny (taką definicję procesu przydatną w diagnostyce podaje [16]), autor proponuje określić \mathcal{R} jako relację dwu zdarzeń bliskich należących do dwu strumieni zdarzeń Z_1 i Z_2 [12].

$$z_{1k} \mathcal{R}_k z_{2k} \subset Z_1 \times Z_2$$



Określenie \mathcal{R} jako podzbioru iloczynu kartezyjańskiego $Z_1 \times Z_2$ eliminuje warunek zwrotności. Uznając za trywialne stwierdzenie bliskości zdarzenia samemu sobie, można opis tego faktu pominąć. Wymagania pomiaru ograniczają reprezentacje każdego z procesów do podzbiorów $[z_1]$, $[z_2]$ zdarzeń, będących łańcuchami \mathcal{L}_{s1} i \mathcal{L}_{s2} relacji porządku częściowego, uporządkowanymi dobrze w skali czasu – t , lub \mathcal{G} [12]. W systemie przetwarzania (np. diagnozującym) selekcja łańcucha dokonuje się np. przez odpowiednią procedurę selekcji ciągu próbek, w przedziale obserwacji T_k , przykładem jest opisana w [9] procedura PLD. Zakładając izomorfizm obu łańcuchów:

$$\mathcal{L}_{s1}^N \subset Z_1^N, \quad \mathcal{L}_{s2}^N \subset Z_2^N \quad (2.3)$$

postulaty 1.3. (a) i (b) w roli \mathcal{R} dobrze spełnia relacja bliskości β . [12]. Dla pary zdarzeń $z_{1k} \in [z_1]$ i $z_{2k} \in [z_2]$ uporządkowanych w czasie stanowi w każdym przypadku $z_{1k}\beta_k z_{2k}$ elementarny przeciwna łańcuch relacji porządku określonej na zbiorze par zdarzeń bliskich

$$[\beta(z_{2k1}, z_{2k2})]$$

Pośród podanych w [12] własności relacji β , istotną dla opisu synchronizmu wydaje się także następująca

$$\forall z_1, z_2 (z_1\beta z_2) \equiv (t_1 | z_1 = t_2 | z_2) \quad (2.4)$$

formalizująca wyjściową definicję SSI stwarzająca przesłanki dwuwartościowej klasyfikacji synchronizmu (tak – 1, nie – 0).

W pewnych zastosowaniach celowe okazuje się ograniczenie \mathcal{R} do bliskości największej (postulat wyłączności – [12]). Wówczas każdemu zdarzeniu jednego ze zbiorów $z_{1k} \in [z_1]$ jedno i tylko jedno zdarzenie ze zbioru drugiego $z_{2l} \in [z_2]$ może być bliskie. Jednoznaczna relacja β staje się funkcją ϕ_B taką że, $[z_{1k}, z_{2l}] \in \phi_B$ [tamże]. Wynika stąd, że zbiory Z_1 i Z_2 nie muszą być równoliczne, co więcej, praktycznie ważny bywa przypadek $\text{card}(Z_2) \gg \text{card}(Z_1)$, jako podstawa optymalnej selekcji zdarzeń najbliższych.

Sygnał ma różne cechy, w różnym też stopniu odwozorowują je zdarzenia. By nie ograniczać opisu synchronizmu do jednej z nich, przyjmijmy dalej, że dwuargumentowa relacja $C(z_{1k})\mathcal{R}_s C(z_{1k})$ dotyczy bliskości zdarzeń ze względu na pewną cechę C , będącą własnością mierzalną W_B na zbiorze $Z_1 \times Z_2$. Cech takich można wyróżnić wiele, aby nie mnożyć bytów ponad potrzebę, wskażemy te jedynie, które znalazły zastosowanie

praktyczne, opisane dalej. Dla sygnałów mogą nimi być:

- kształt,
- energia (moc),
- położenie (faza Φ) względem umownego początku sygnału charakterystycznego),
- częstotliwość – $1/\Theta$,
- kierunek – (wektor).

2.3. Wielowartościowość \mathcal{R}

Mierzalność w skali nominalnej należy uznać za ostateczność mało przydatną w ocenie wspomaganiania, a przede wszystkim odtwarzania zmienności informacyjnej. W odniesieniu do β warto rozważyć alternatywne rozwiązania ilościowej lokalnej oceny synchronizmu.

Ocena lokalna

Rozmyta relacja bliskości $\tilde{\beta}$ [8] oferuje jedno z prostszych rozwiązań – jej funkcja przynależności $\mu_{\mathcal{R}}[\tilde{\beta}] \in [0, 1]$ pozwala na lokalną ocenę stopnia synchronizmu w skali *de facto* porządkowej, bo sam wybór typu funkcji nie jest jednoznacznie zdeterminowany i w pewnym stopniu arbitralny.

Funkcja bliskości $\varphi_{\mathcal{B}}$ zamiast relacji β w przestrzeni metrycznej jest powiązana z metryką $d(z_1, z_2)$ jako miarą odległości zdarzeń najbliższych. Definicja SSI implikuje wówczas identyczność zdarzeń

$$\forall z_1, z_2 (z_1 \beta z_2) \Leftrightarrow d(z_1, z_2) = 0 \quad (2.5)$$

Zastąpienie metryki wskaźnikiem bliskości przyjmującym wartości z przedziału $[0, 1]$, pozwala na wielowartościową ocenę stopnia synchronizmu w skali interwałowej. Warunek normalizacji $\varphi_{\mathcal{B}}(z_1, z_2) \in [0, 1]$ narzuca wygodną interpretację pojedynczej wartości $\varphi_{\mathcal{B}}$, ale także analogie z miarami podobieństwa, jak korelacja, czy koherencja, bądź też $\mu_{\mathcal{R}}$ [8]. Podstawowe kryterium wyboru $\varphi_{\mathcal{B}}$ stanowić powinna przydatność dla opisu wspomaganiania odwzorowania w konkretnym przypadku.

Ocena globalna

Jak długo rozpatrujemy stan stacjonarny synchronizmu w przedziale T , uporządkowanie zbioru $[\beta_k]$ nie wnosi informacji o tym stanie i sumę zbiorów

$$\mathcal{R}_S = \bigcup_{k=1}^N \beta_k \quad (2.6)$$

można zdefiniować jako relację synchronizmu ciągów zdarzeń, a jej wartość wykorzystać dla oceny globalnej w T .

Najprostszy globalny wskaźnik stopnia synchronizmu stanowi średnia ocen lokalnych $ws = E[\mu(\mathcal{R})]$ lub, w przypadku funkcji bliskości $ws = E[\varphi_{\mathcal{B}}]$ (2.7)

Potrzebę uśredniania uzasadnia natura wewnętrznych procesów drganiowych maszyny. W przypadku niezamierzonych i nieokreślonych bliżej modulacji drgań [9], kolejne elementy łańcucha (2.1):

- nie są równowartościowe,
- ich wartości nie są dokładnie znane.

Wówczas bliskość oceniana być może jedynie w sensie statystycznym.

Synchronizm w przedziale T , przedstawia zatem system relacyjny $\mathcal{S}_{\mathcal{R}}$ – uporządkowany zbiór wszystkich m dwuelementowych relacji bliskości w zbiorze iloczynowym obu ciągów: zdarzeń – wzór(2.2)

$$\mathcal{S}_{\mathcal{R}} = \left\langle \bigcap_{i=1}^m \beta_i \subset Z_1 \times Z_2, \prec, W_{\mathcal{B}} \right\rangle$$

min(m) = 2 (2.8)

a jego stopień ocenia globalny wskaźnik stopnia synchronizmu ws – wzór (2.7). Inne miary synchronizmu należy rozpatrywać w konkretnych zastosowaniach i powiązaniu z określoną procedurą odtwarzania zmienności innowacyjnej.

2.4. Desynchronizacja

Desynchronizacja oznacza działanie pogarszające synchronizm. W maszynie jest przejawem dezorganizacji funkcjonalnej, związanej z postępiami degradacji strukturalnej. Jej wpływ na wibroakustyczne pole zjawiskowe omawia p.3. Desynchronizacja wiąże się ze wzrostem entropii, większym udziałem energetycznym losowych i niepożądanych zachowań maszyny i nie tylko, (efekt dotyczy także organizmów żywych, ekosystemów, społeczeństw).

Mierzalność \mathcal{R}_S pozwala na ocenę ilościową desynchronizacji poprzez skutek przeciwny do efektów synchronizacji. Objawem jest tu także nierównomierność biegu typu losowych fluktuacji cyklu

Proponowana formalizacja okazała się konstruktywna w sensie praktycznym, implikując konkretne rozwiązania, jakie dać mogą odpowiedzi na pytania:

- **synchronizm czego z czym?**
- **w jaki sposób?**
- **w jakim stopniu?**
- **jak?**

3. MODELE WSPOMAGANIA SYNCHRONICZNEGO W MASZYNIE

3.1. Model jakościowy (nominalny) MJ

W hierarchii modeli przydatnych w opisie fenomenu synchronizmu, model najbardziej ogólny nazywany modelem jakościowym (nominalnym) MJ, desygnuje jedynie nazwy własności (cech),

związanych z różnymi aspektami działania obiektu [10].

Maszyna ma wiele własności – jeszcze więcej, gdy jest w ruchu. Jednak potrzeby skutecznego diagnozowania prowadzą do akceptowalnego zdaniem autora, modelu minimum

$$MJ = \langle W1, W2, W3, W_E, W_W \rangle \quad (3.1)$$

[W1] – Zbiór cech diagnozowalnych, umownie reprezentowany dalej przez własność ogólną stanu $W1$.

[W2] – Cechy związane z funkcjonowaniem obiektu – ruchem, dynamiką i sterowaniem. Reprezentują procesy zdeterminowane i odwracalne, zmienne w skali czasu 't'. Generalnie utrudniają diagnozowanie, lecz właściwie ich wykorzystanie uzyskały symptomy stanu mało wrażliwe na zmiany warunków pracy.

[W3] – Zbiór niekontrolowanych cech zakłócających (zakłócenia niezdeterminowane).

W_W – Własność wspomagająca odwzorowanie. Pominięta zakłóca, właściwie wykorzystana pozwala uzyskać lokalne odwzorowanie własności innej, lepsze w sensie wybranego kryterium. Powinna być mierzalna, a także odtwarzalna w systemie diagnozującym.

W_E – Dotyczy pewnej strategii działań (planu eksperymentu identyfikacji – PE) dla uzyskania najlepszego rezultatu, tak PDI, jak też diagnozy. W_E nie stanowi immanentnej własności obiektu, lecz systemu diagnostycznego jako całości. Jej włączenie w skład MJ wydaje się uzasadnione, bowiem:

- PE decyduje o stopniu mierzalności wybranych składowych modelu;
- od wyboru PE zależy, w jakim stopniu eksperyment odwzorowuje rzeczywiste własności obiektu, a w jakim działanie eksperymentatora;
- związki między $W1$ i $W2$ mogą zależeć od W_E (np. preferowanie eksperymentalnych, niekorzystnych warunków pracy przyspiesza postępy zużycia).

Eksperyment wspomagany

Niektóre cechy grupy $W2$, na przykład prędkość obrotowa, mogą pełnić rolę W_W , wspomagając odwzorowania zmienności innowacyjnej. Wykorzystanie synchronizmu nie wymaga sterowania, a jedynie mierzalności adekwatnej W_W . W konkretnych rozwiązaniach W_W powinna być mierzalna w skali wyższego rzędu, aby umożliwić jej odtworzenie w systemie diagnozującym [9].

Tak określony MJ jest deterministyczny w sensie jednoznacznego sprecyzowania elementów

zbioru [W]. Do celów praktycznych bezpośrednio nieprzydatny, stanowi jednak MJ podstawę tworzenia modeli ilościowych oraz konstruktywnej interpretacji ich odwzorowań.

Procesy drganiowe maszyn są przejawem takiej, a nie innej organizacji przepływu energii dostarczanej. By prześledzić sposób w jaki niezamierzony synchronizm wspomaga kodowanie, transfer i transformacje zmienności innowacyjnej tych procesów, autor przyjął za podstawę model maszyny jako procesora energii [3, 4], według którego pogorszeniu stanu technicznego towarzyszy w skali czasu eksploatacyjnego ewolucja mocy $V(\theta)$. rozpraszanej jako dynamiczne procesy resztkowe – DPR.

DPR, bezpośrednio niemierzalne, mogą reprezentować zmienność innowacyjną.

Model ten jest asynchroniczny. Procesor energii nie uwzględnia bezpośrednio organizacyjnego działania ruchu celowego dla propagacji V , bo dotyczy innej skali czasu.

3.2. Deterministyczno-probabilistyczny model sygnałowy (Det-Pro)

Przedstawiony na rysunku 3.1 układ opisuje emisję drgań mierzalnych $\{y\}$ w skali 't' dla pojedynczego podzespołu. Analiza maszyny w ruchu pozwala wyróżnić dwie grupy procesów wewnętrznych, które różnicuje nie nośnik fizyczny zdarzeń, lecz natura zmienności. Ma miejsce przewaga zachowań losowych w jednym oraz deterministycznych w drugim torze. Model taki określić można zatem jako deterministyczno-probabilistyczny, w skrócie Det-Pro (rys. 3.1) [11, 12].

Niezależnie od szczegółowego modelu degradacji strukturalnej lub funkcjonalnej, można przyjąć istnienie wewnętrznego procesu $\{x\}$, w którym zmiany stanu są kodowane. Model rozdziela liniową część toru opisywaną dalej modelem parametrycznym ARX od operacji nieliniowej $\mathcal{V}\{x\}$, generalnie nieznaną.

Wewnętrzny proces drganiowy pary kinematycznej jest w tym ujęciu superpozycją dwóch składowych:

$$\{x\} = \{x_I\} + \{x_E\}$$

energetycznie nierównoważnych tak, że:

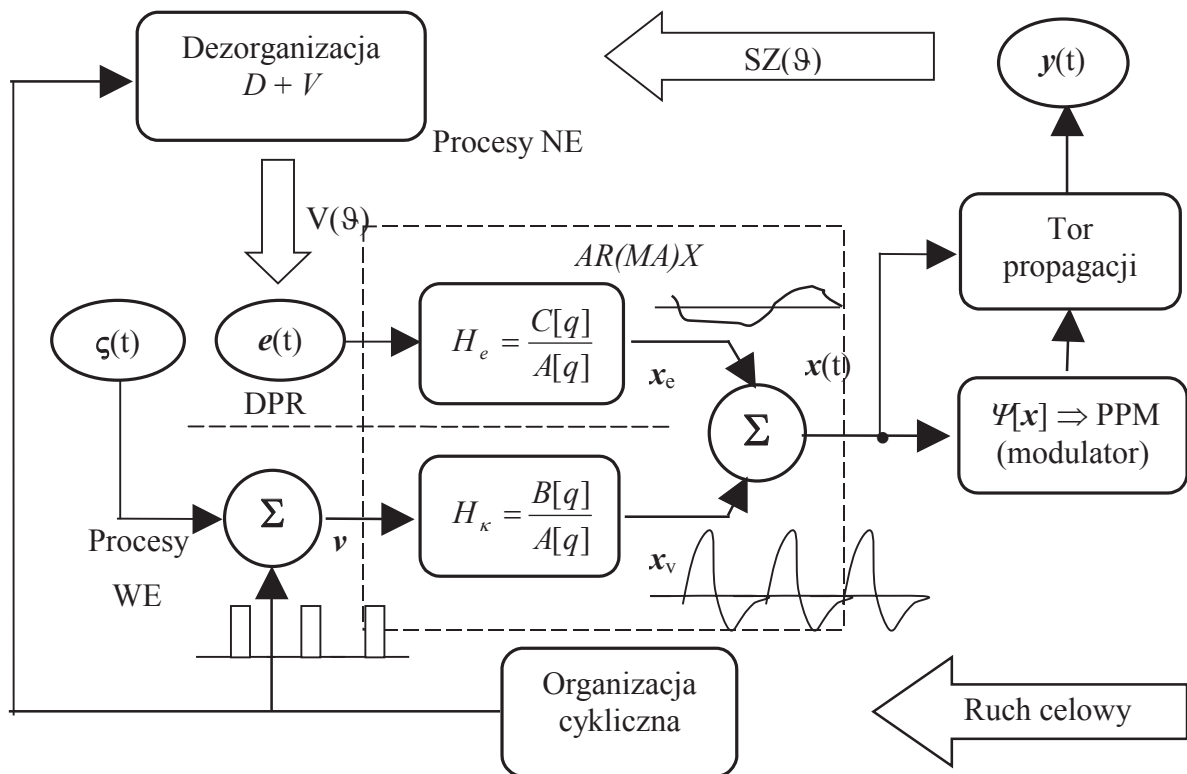
$$\|x_I\|^2 \gg \|x_E\|^2$$

(przynajmniej w początkowym okresie ewolucji V). Wyróżnić należy:

W torze Det:

$\kappa(t)$ – ciąg impulsów siły oddziaływania dynamicznego elementów pary kinematycznej,

$v(t)$ – bezpośrednia drganiowa reprezentacja $\kappa(t)$, – sygnał $v(t)$ filtrowany przez transmitancje pary kinematycznej.



Rys. 3.1. Model sygnałowy wewnętrznych procesów WA pary kinematycznej w ruchu.

$\zeta(t)$ – reprezentuje nieinnowacyjne działanie różnicujące impulsy nośne v_k , w skali '9' nie wykazuje trendu,
 SZ(9) – wibroakustyczne sprzężenie zwrotne

Składową $x_v = h_v(t) * v(t)$ determinuje ciąg impulsów siły formowanych przez dynamikę elementów pary powtarzanych w odstępach czasu Θ_k odpowiadających kolejnym cyklom pracy maszyny (pary kinematycznej) we wzorcowym stanie technicznym, co w przybliżeniu odpowiada ruchomej średniej krótkoterminowe cyklu : $\Theta = E[\Theta_k, T_{2n}]$ [9].

W torze Pro - składowa x_E wolnozmienna typu szumu kolorowego powstaje w wyniku filtracji dolnoprzepustowej $e(t)$ (DPR), który stanowi drganiową reprezentację rozpraszanej energii uszkodzenia V

- zmiany parametrów filtru mogą być informacyjne;
- propagacja $e(t)$ odbywa się w torze liniowym i nieliniowym.

Transfer informacji wartościowej odbywa się w przedziałach czasu kontaktu dynamicznego elementów organizowanego procesami kinematycznymi impulsy siły.

3.3. Tory synchronizacji i desynchronizacji

Zachowania systemów Det-Pro są podobne jeśli chodzi o procesy (fenomeny) organizacji i dezorganizacji. Diagram na rysunku 3.4 pozwala prześledzić prawidłowości związane

z odwzorowaniem składowych MJ poprzez synchronizację i desynchronizację w obu torach propagacji drgań (por. rysunek 3.1), co może implikować procedury synchronizacji wspomagające odtwarzanie zmienności innowacyjnej

Rozważmy dwie ewentualności

- 1) dominuje wysokoenergetyczny, liniowy kanał transmisji kanał transmisji

$$V \Rightarrow e + v \Rightarrow x_v \Rightarrow y_C \Rightarrow \text{pomiar}$$

$$\kappa \uparrow \text{synchronizacja} \quad (3.2)$$

- 2) badamy informację wartościową DPR transmitowaną przez nieliniowy tor propagacji istotne staje się wówczas działanie desynchronizujące x_e

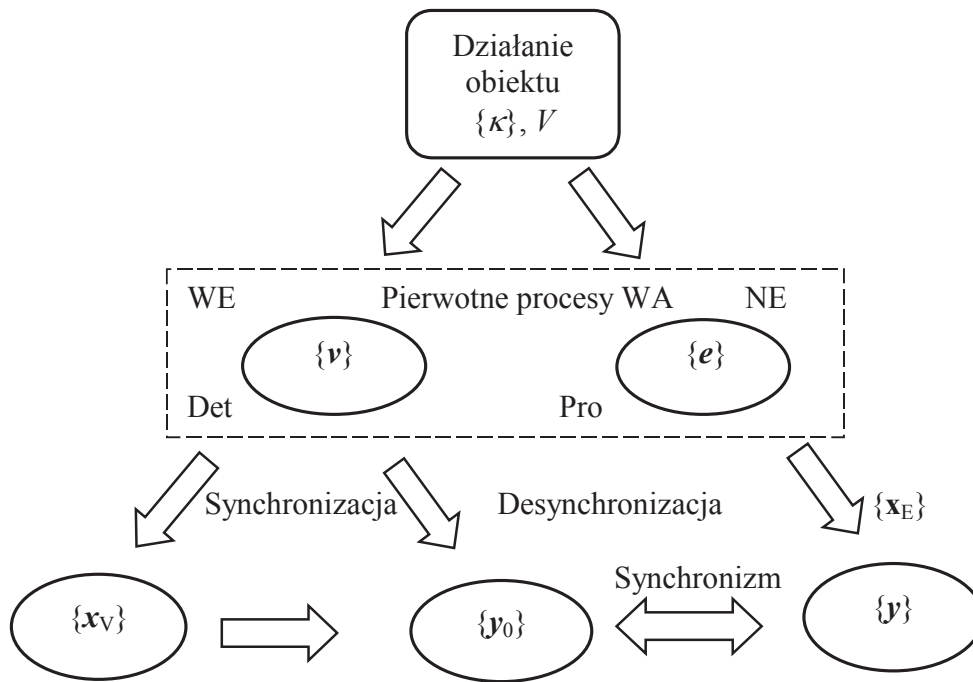
$$V \Rightarrow e \Rightarrow x_E$$

$$\Downarrow \text{desynchronizacja}$$

$$x \Rightarrow \Psi \Rightarrow y \Rightarrow \text{pomiar}$$

$$\Uparrow \text{synchronizacja}$$

$$\kappa \Rightarrow v \Rightarrow x_v \quad (3.3)$$



Rys. 3.2. Tory synchronizacji i desynchronizacji w maszynie

Analiza funkcjonowania modelu (3.2) pozwala ponadto przypuszczać, że:

- dążenie do zyskania dużej dynamiki widma nie zawsze bywa uzasadnione;
- widmo synchroniczne przedstawia głównie zmiany rozplywu energii między wysokoenergetycznymi składowymi pola WA, stąd zmiana modułu wektora widma harmonik (mocy) nie musi w początkowym stadium ewolucji uszkodzenia być jego symptomem;
- ewolucja uszkodzeń prowadzi do zwiększenia stopni swobody i zmniejszenia dynamiki widma;
- przy pracy cyklicznej pojedynczy sygnał charakterystyczny niekoniecznie jednoznacznie określa stan techniczny maszyny, bo fluktuacje cyklu bywają symptomatyczne.

4. WYKORZYSTANIE SYNCHRONIZMU W SYSTEMIE DIAGNOZUJĄCYM

Podstawowym warunkiem powodzenia jest tu odtworzenie własności wspomagającej w systemie diagnozującym. Wszystkie użyteczne w praktyce metody charakteryzuje konieczność odtworzenia pewnej kategorii synchronizmu [2,9]. Jego stopień oraz efekty wspomagania powinny być mierzalne, tak względem metod jak też odwzorowań referencyjnych. Umożliwia to porównywanie rozwiązań alternatywnych i wybór lepszego.

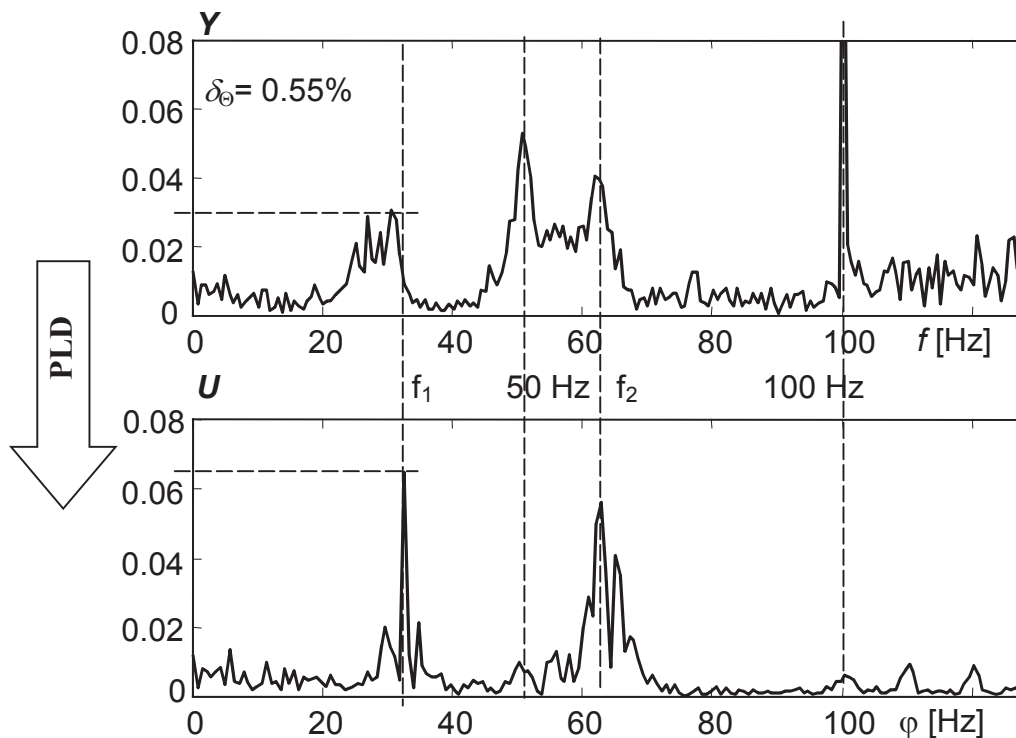
4.1. Synchronizm czasu i cyklu

Doświadczenie potwierdziło sens wyróżnienia oprócz wpływających według rytmu zegara uniwersalnego czasów eksploatacyjnego \mathcal{G} i dynamicznego t , różniących się jedynie mnożnikiem skali, także trzeciej kategorii – skali czasu względnego ‘·’, synchronicznego z pewną uśrednioną charakterystyką cyklu podstawowego θ .

Synchronizacja przybliżona cyklem w praktyce realizowana być może poprzez decymację silnie nadpróbkowanego sygnału zachowującą proporcjonalność liczby próbek i cyklu chwilowego. Powoduje to wyrównanie długości dyskretnej reprezentacji kolejnych cykli i zbliża rezultat do sygnału stacjonarnego. Daje to realną poprawę odwzorowania składowych kinematycznych widma przy zmianie prędkości obrotowej, co ilustruje przykład na rys. 4.1, zachowując jednocześnie informację o modulacji PPM sygnału charakterystycznego.

4.2. Synchroniczna demodulacja PPM

Wspomaganie przez synchronizm procedur demodulacji (PDM) przez wykorzystanie nieco zmodyfikowanej pętli synchronizacji fazy PLL synchronizowanej jednocześnie fazą wartościową i częstotliwością nośną umożliwia demodulację selektywną i nieobciążoną oraz dopuszczającą znaczny poziom zakłóceń szumowych i tonowych.



Rys. 4.1. Widma RMS prędkości drgań małej przekładni:
 a) sygnał oryginalny o względnym przyroście cyklu $\delta = 0.55\%$;
 b) sygnał w skali czasu cykl

4.3. Przekroje synchronizujące

Wykorzystanie synchronizmu cykli dwu sygnałów pozwala uzyskać proste i stabilne obrazy drgań jeśli:

- synchronizacja dokonuje się przez wybór dwu przekrojów płaskich P_1 i P_2 dwuparametrowych charakterystyk każdego z sygnałów;
- przynajmniej jeden z przekrojów znajduje się w strefie zmian innowacyjnych, tj. wywołanych zaburzeniem funkcjonalnym, lub strukturalnym; to krzywe parametryczne $[P_1, P_2]$ określone mianem trajektorii symptomatycznych (TS) są przydatne dla szybkiej ewolucji dysfunkcji. Przykładowe porównanie ewolucji trajektorii pierwotnych i symptomatycznych przedstawia rys. 4.1.

Stopień osiągniętego synchronizmu pozwala wnioskować o naturze dysfunkcji.

Dzięki autosynchronizacji TS są mało wrażliwe na niestacjonarność sygnałów składowych.

4.4. Synchronizm kierunku

Można go uważać za uogólnienie synchronizmu fazy. Jeśli w przestrzeni odwzorowań pewien kierunek reprezentuje lokalnie maksymalną zmienność innowacyjną, to doprowadzenie do synchronizmu z nim kierunku odwzorowania

lokalnego maksymalizuje stosunek sygnału do szumu SNR dając poprawę kilkudziesięciu decybeli.

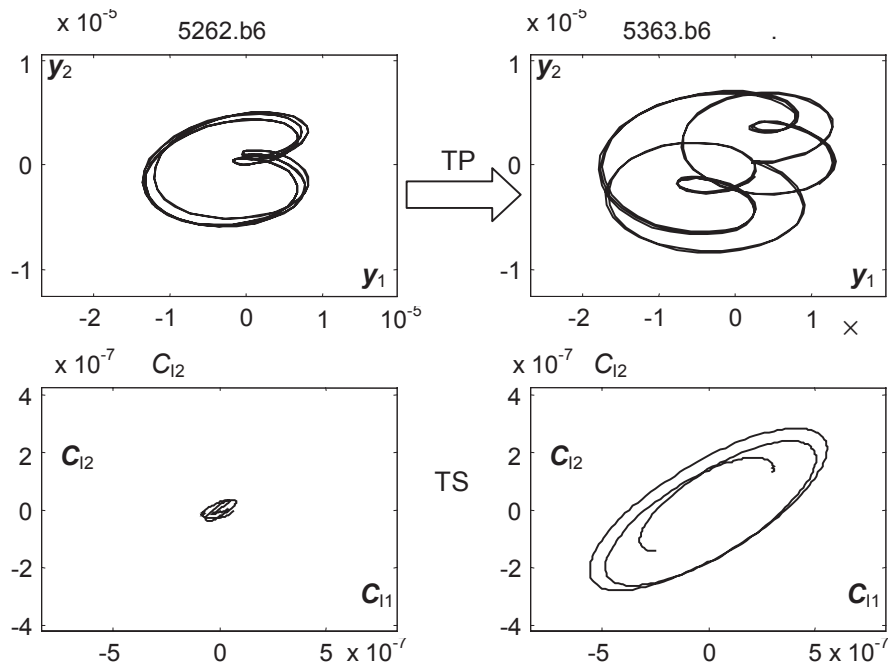
Sygnalizowane przykłady bynajmniej nie wyczerpują możliwości metody, ani nie ograniczają obszaru zastosowań do układów mechanicznych. Wybór determinowała w równej mierze chęć zbadania trudności, jakie stwarza wykorzystanie synchronizmu w praktyce, jak też osiągnięcia w każdych okolicznościach wspomaganie przynajmniej skutecznego.

5. PODSUMOWANIE

- synchronizm stanowiąc kategorię cyklicznie powtarzanej organizacji sam jest własnością mierzalną;
- może zostać wykorzystany dla wspomaganie odwzorowań pewnych własności obiektu istotnych w diagnozowaniu;
- umożliwia selekcję odwzorowywanych własności;
- pozwala lokalnie uniezależnić odwzorowanie zmiany stanu technicznego od zmian cyklu;
- umożliwia wcześniejsze wykrycie zmienności innowacyjnej;
- efekty wspomaganie mogą zostać ilościowo ocenione i porównywane;

Korzyści te okazują się zauważalne pod warunkiem spełnienia wyższych wymagań metod, krytycznych

co do trafnego wyboru kategorii własności wspomagającej, właściwego stopnia synchronizmu i efektywnej procedury synchronizacji w systemie diagnozującym.



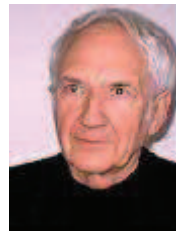
Rys. 4.2. Wyraźne zróżnicowanie zmian i form trajektorii przemieszczeń drgań wywołane wzrostem skoszenia (strzałka)
 TP – trajektorie pierwotne,
 TS – trajektorie symptomatyczne

Literatura

- [1]. Adamczyk J., Krzyworzecka P.: *Synchron Filterung diagnostischer Schwingungssignale*. Dresden, IV Koll. Techn. Diagn., 14-15 III, 1996
- [2]. Adamczyk J., Krzyworzecka P., Łopacz H.: *Systemy synchronicznego przetwarzania sygnałów diagnostycznych*. Kraków, Collegium Columbianum, 1999
- [3]. Cempel C., Tomaszewski F.: *Diagnostyka maszyn, zasady ogólne, przykłady zastosowań*. Radom, Wyd. MCMENT, 1992.
- [4]. Cempel C.: *Ewolucyjne modele symptomowe w diagnostyce maszyn*. Gdańsk, Mat. I Kongr. Diagn. Technicznej, t.1, 1996.
- [5]. Cholewa W., Kaźmierczak J.: *Data Processing and Reasoning in Technical Diagnostics*. W-wa, WNT, 1995.
- [6]. Haykin S.: *Systemy telekomunikacyjne*. W-wa, WKiŁ, 1998
- [7]. Jaworski H.: *Matematyczne podstawy metrologii*. W-wa, WNT, 1979
- [8]. Kaufman A.: *Introduction a la theorie des sous-ensembles flous*. Paris, Masson, vol.3, 1975
- [9]. Krzyworzecka P.: *Synchroniczne wspomaganie odwzorowań diagnostycznych*. Kraków. Mon. AGH, n. 103, s. 162, 2001
- [10]. Krzyworzecka P.: *Uwagi o charakterystykach odwzorowania istotnych własności obiektu diagnostyki*. W-wa, Met. Cyfr. Analiz. Sygn., PAN, Oss. 1979.
- [11]. Krzyworzecka P.: *Deterministyczno-probabilistyczny model złożonego obiektu diagnostyki*. Gliwice, Mat IV Symp. Diagn. Masz., ZN Pol. Śl., 1978
- [12]. Kuratowski K.: *Wstęp do teorii mnogości i topologii*. W-wa, PWN, 1972
- [13]. Morel J.: *Vibrations des machines et diagnostic de leur etat mecanique*. Paris, Eyrolles, 1992
- [14]. Radkowski St.: *Diagnozowanie powstawania uszkodzeń na podstawie nisko-energetycznych składowych sygnału wibroakustycznego*. W-wa, Machine Dynamics Problems, vol. 12, 1995
- [15]. Sadowski W.: *Podstawy ogólnej teorii systemów*. W-wa, PWN, 1977
- [16]. Zóltowski B., Ćwik Z.: *Leksykon diagnostyki technicznej*. Bydgoszcz, Wyd. ATR, 1996

Ważniejsze oznaczenia i skróty

CWT – ciągła transformata falkowa
Det-Pro – model deterministyczno-probabilistyczny
DPM – demodulacja fazy
DPR – dynamiczny proces resztkowy
 f_c – częstotliwość nośna
 f_T – częstotliwość referencyjna
 φ – częstotliwość w skali czasu 'η'
 Φ_C – faza nośna
 ϕ – faza wartościowa
MJ – model jakościowy obiektu
MSDM – modulacja sygnału drganiowego maszyny
 μ_R – lokalny wskaźnik podobieństwa (funkcja przynależności)
 P_k – przekrój synchronizujący
PE – plan eksperymentu PDI
PLD – procedura liniowej decymacji
PLL – *Phase-locked loop*, pętla synchronizacji fazy
PPM – *Pulse Position Modulation*, modulacja położenia impulsu
 Π_{kx} – globalny wskaźnik podobieństwa
 R_p – relacja podobieństwa
 \mathcal{R} – lokalna relacja synchronizmu
 \mathcal{R}_S – relacja synchronizmu
 y_C – sygnał nośny
SN – synchronizm niezamierzony
SNR – *Signal to noise ratio*, stosunek mocy sygnału I szumu
 $s_F(t, \Theta)$ – sygnał charakterystyczny
 T – przedział t czasu obserwacji (pomiaru)
 Θ – cykl, wartość średnia krótkoterminowa w oknie $\Pi < T_j$;
 Θ_k – kolejny cykl, wartość chwilowa czasu realizacji sygnału charakterystycznego
 Θ_0 – cykl w skali czasu cyklu
 $\Delta\Theta_k$ – kolejny (chwilowy) przyrost cyklu;
 $\Delta\Theta_T$ – średni przyrost cyklu w przedziale – T .
 Θ_C – cykl nośny, w przedziale T
 t – czas dynamiczny
 T – przedział obserwacji sygnału
 η – czas cyklu
 \mathcal{S} – czas eksploatacyjny
 w – wskaźnik
 W – własność ogólna mierzalna
WS – własność szczególna, kategoria
 x – sygnał oryginalny wartościowy
 y – sygnał oryginalny mierzony
 z – zdarzenie



Dr hab. inż. Piotr Krzyworzeka studiował na Wydziale Elektryfikacji Górnictwa i Hutnictwa AGH uzyskując w roku 1964 dyplom magistra inżyniera elektryka o specjalności automatyka, a w roku 1972 doktorat z zakresu diagnostyki technicznej. Pracuje na tejże uczelni do dziś, początkowo w Katedrze Maszyn i Pomiarów Elektrycznych, potem (od 1987) w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki. Jest autorem ok. 60 publikacji, głównie o tematyce diagnostycznej, rzeczoznawcą SEP w zakresie elektroakustyki, sekretarzem Polskiej Sekcji Audio Engineering Society, a także członkiem PTDT od momentu jego powstania.