

HOLISTYCZNE MODELE PROCESÓW DEGRADACJI W SYSTEMACH MECHANICZNYCH - PRZEGLĄD

Czesław CEMPEL

Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, email: czeslaw.cempel@put.poznan.pl

Streszczenie

W pracy dokonano przeglądu modelu teorii i zastosowań procesora energii o skończonym potencjale destrukcji. Najważniejszym zastosowaniem wszelkich odmian tego procesora jest możliwość holistycznego modelowania ewolucji i dynamiki części mechanicznej różnego typu systemów, również mechatronicznych. Idea procesora energii jest na tyle płodna i uniwersalna że można wykorzystać ją do modelowania jednodobnego zużycia się materiału, z jednej strony, a z drugiej do modelowania samopodobnych hierarchicznie zorganizowanych systemów złożonych z możliwością analitycznego badania rozprawy energii.

Słowa kluczowe: systemy mechaniczne, degradacja, modele holistyczne, procesor energii

HOLISTIC MODELS OF DEGRADATION PROCESSES IN MECHANICAL SYSTEMS - AN OUTLINE

Summary

Mechanical subsystems are key elements of civil and mechanical engineering as well as mechatronic products. Independently of the size of subsystem they may limit the safety and functionality of the main system, so we have to know the long term and short term behavior of mechanical subsystem. The main idea of holistic modeling is illustrated in the paper, and energy processor model can be digested more from some references. But it seems to the author that inference properties of holistic modeling and energy processor models are not widely known and used. Due to its fractal properties, they can be used to model the behavior of the part as well as the whole system, enabling to trace the energy flow, dissipation and wear inside the system.

Keywords: mechanical systems, degradation, holistic models., energy processor

1. WSTĘP

Przez **degradację** w systemach mechanicznych będziemy rozumieli stopniową utratę właściwości konstrukcyjnych i/lub funkcjonalnych elementów **systemów**¹ mechanicznych, lub nawet w efekcie całego systemu. Precyzując dalej, utrata ta będzie się objawiać jako zmiana (przyrost, ubytek) właściwości mechanicznych i/lub geometrycznych elementów systemu, wykraczająca poza założone im przez konstruktora tolerancje. Zmiany te pojawiają się jako skutek funkcjonowania obiektu/systemu w swym środowisku i interakcji **energetycznych** zewnętrznych a w szczególności wewnętrznych. A przez energię będziemy rozumieli zdolność pola zjawiskowego systemu do wywołania zmian. Nie będzie to zatem tylko energia mechaniczna, bo np. elementy mechaniczne podlegają korozji, co trudno nazwać energią mechaniczną, a raczej elektro chemiczną. Zatem modele degradacji muszą mieć charakter

ewolucyjno² energetyczny, ale nie tylko. Bowiem degradacja elementów mechanicznych odbywa się wielokrotnie w ich dynamicznej interakcji, jak np. w łożyskach.

Zatem **holistyczny** (całościowy) model degradacji będzie ujmował dwie skale czasu; czas ewolucji lub lepiej **życia** systemu θ i czas zjawisk dynamicznych t , np. drgań, emisji akustycznej, itp. Model taki można sobie wyobrazić jak na rys. 1, gdzie całościowe zachowanie systemu zmodelowaliśmy operatorem holistycznym $G(\mathbf{r},\theta,t)$ z dodatkową współrzędną miejsca \mathbf{r} . Na skutek wymuszenia $\mathbf{f}(\mathbf{r},\theta,t)$ system reaguje w postaci odpowiedzi $\mathbf{y}(\mathbf{r},\theta,t)$. Odpowiedź ta obserwowana dla czasu życia $\theta_i = \text{const}$ podlega badaniom w dynamicie sytemu, natomiast uśredniona odpowiedź po czasie dynamicznym t może być symptomem ewolucji stanu systemu (więcej patrz [Natke, Cempel 94]).

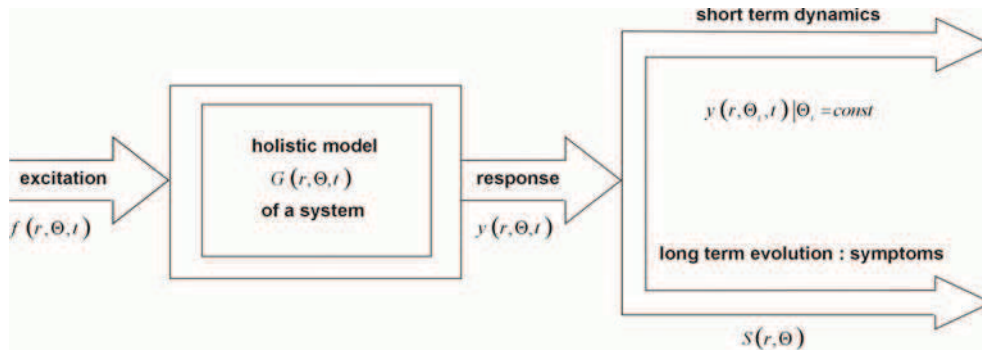
Tak postawione zagadnienie zaczęło się zjawiać w literaturze diagnostyki technicznej w latach

¹ System to byt przejawiający swe istnienie przez synergiczne współdziałanie swych elementów, [Cempel 02]

² Przez ewolucje będziemy tu rozumieli powolne zmiany własności o różnorodnym kontekście przyczynowo skutkowym.

siedemdziesiątych, patrz praca [Cempel 76] i monografia [Cempel 82, r2.3] i pierwsza monografia ujmująca już łącznie procesy zużyciowe i dynamiczne [Cempel 85, r3]. Potem nastąpił okres współpracy z prof. H. G. Natke, gdzie rozpracowaliśmy i wykorzystaliśmy te koncepcje do wielu zagadnień praktycznych i budowy dalszych koncepcji teoretycznych. Będziemy o tym jeszcze mówić w dalszej części tej pracy. Na zakończenie wstępu warto dodać, że ujęcie energetyczne i holistyczne staje się coraz

bardziej popularne nie tylko w diagnostyce ale także w optymalizacji dynamicznej konstrukcji. Znamienne są tu prace optymalizujące chwilowy rozływ energii w dziedzinie czasu dynamicznego [Dobry 97], oraz w dziedzinie częstotliwości [Kazmierczak 01]. Tego typu analizy pokazują rzeczywiste miejsca zagrożeń bezpieczeństwa w systemie, gdzie kumuluje się maksimum energii wewnątrznie dyssypowanej



Rys. 1. Zasada holistycznego modelowania systemów mechanicznych

2. ZMIANY WŁASNOŚCI SYSTEMU W MODELACH HOLISTYCZNYCH

Warto sobie wpieryw zdać sprawę jakie zmiany własności elementów mogą zachodzić podczas życia systemu w różnych warunkach użytkowania. W ślad za monografią Collacott'a [Collacott 77] możemy wyróżnić sześć głównych typów zmian właściwości $w(\theta)$ elementów systemów mechanicznych zachodzących w czasie życia.

- Ubytek masy $m(\theta)$ powodowany przez erozję w strumieniu cząstek, korozję z tytułu warunków otoczenia i kawitację w strudze cieczy, zużycie ścierne.
- Wzrost masy $m(\theta)$ z tytułu sedymentacji wtrąceń w płynnym środowisku roboczym.
- Ubytek sztywności $k(\theta)$ spowodowany przez różne typy zmęczenia materiałowego, erozję i w konsekwencji zmianę przekroju czynnego elementu.
- Wzrost sztywności $k(\theta)$ z tytułu sedymentacji i wytrącania z elektrochemicznie aktywnych cieczy.
- Wzrost tłumienia $c(\theta)$ z tytułu wzrostu dyslokacji w materiałach, i procesu uplastyczniania pod wpływem temperatury, obciążeń dynamicznych, itp.
- Ubytek tłumienia $c(\theta)$ jeśli natura tłumienia odpowiada modelom proporcjonalnym do masy i/lub sztywności, które doznają ubytku.

Tak więc możemy już napisać holistyczny operator życia systemu mechanicznego przedstawiający jego dynamikę oraz ewolucję własności.

W postaci ogólnej symbolicznej

$$\mathbf{G}(\mathbf{r}, \theta, \mathbf{t}) \mathbf{y}(\mathbf{r}, \theta, \mathbf{t}) = \mathbf{f}(\mathbf{r}, \theta, \mathbf{t}), \quad (1)$$

oraz np. w postaci dyskretnej dla szczególnych postaci macierzy mas tłumienia i sztywności determinowanej konstrukcją elementu / systemu

$$\mathbf{M}(\theta) \ddot{\mathbf{y}}(\theta, \mathbf{t}) + \mathbf{C}(\theta) \dot{\mathbf{y}}(\theta, \mathbf{t}) + \mathbf{K}(\theta) \mathbf{y}(\theta, \mathbf{t}) = \mathbf{F}(\theta, \mathbf{t}), \quad (2)$$

gdzie kreski nad odpowiedzią dynamiczną symbolizują rząd pochodnej po czasie dynamicznym \mathbf{t} .

Na ogół dysponujemy konkretnymi danymi macierzy \mathbf{M} \mathbf{K} \mathbf{C} uzyskanymi np. z identyfikacji, przy założonej (obliczonej) funkcji ich ewolucji w θ , np. z szybkości korozji w danych warunkach środowiskowych, częstości obciążenia zmęczeniowego przy danych warunkach naprężenia w elemencie, itp. Takie dane umożliwiają zamrożenie czasu ewolucji $\theta_i = const$ i rozwiązanie macierzowych równań różniczkowych (2), uzyskując zamrożoną odpowiedź układu dla $\mathbf{y}(\theta, \mathbf{t})|_{\theta = const}$. Znajomość tej odpowiedzi spełnia dwójaki cel. Po pierwsze umożliwia normalną optymalizację dynamiczną systemu potrzebną we wszystkich analizach dynamicznych. Po drugie, jest ona niezwykle użyteczna w diagnostyce, właśnie do oceny ewolucji własności i ewolucji stanu, bo z niej konstruujemy wszelkiego typu **symptomy**³ diagnostyczne \mathbf{S} [Cempel 85, r3.5], jak niżej.

$$\mathbf{S}(\theta) = \langle \Phi(\mathbf{y}(\theta, \mathbf{t})) \rangle_{\mathbf{t}}. \quad (3)$$

Tutaj $\Phi(\cdot)$ jest nieliniowym operatorem transformującym odpowiedź dynamiczną w taki sposób by uzyskać najlepszą wrażliwość ewolucyjną w θ , zaś nawias $\langle \rangle$ wskazuje na

³ Symptom – wielkość mierzalna współzmiennicza ze stanem obiektu.

uśrednienie po dziedzinie czasu dynamicznego t . Istnieje całe mnóstwo symptomów wymiarowych, jak np. różnego typu amplitudy drgań i symptomów bezwymiarowych, jak np. różne współczynniki uzyskane z ich wzajemnych ilorazów. Jednak każdorazowo w badaniach trzeba potwierdzić zasadność użycia danego symptomu do danego celu i obiektu.

Zarysowana wyżej idea holistycznej obserwacji dynamiki i diagnostyki systemów mechanicznych przedstawiona jest na kolejnym rysunku 2, gdzie odpowiedź dynamiczną $y(\mathbf{r}, \theta, t)$ dla zamrożonego czasu życia θ_v przedstawiono jako (prawie) ortogonalną do osi ewolucji własności mechanicznych. Im dłuższy czas życia systemu, np. lata, tym bardziej ortogonalność czasu dynamicznego t (sekundy) jest uprawomocniona.

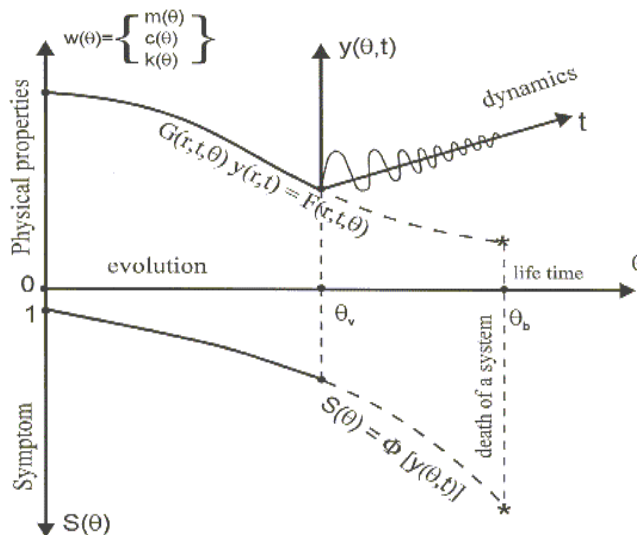
Potrafiśmy sobie już wyobrazić zmiany dynamiki i własności systemu, ale czy możliwe jest ich analityczne zamodelowanie bazując jedynie na przesłance energii dyssypowanej wewnątrznie podczas pracy (życia) systemu? Niżej pokażemy że jest to możliwe dając przegląd modeli znanych z literatury.

3. MODELE EWOLUCJI SYSTEMÓW MECHANICZNYCH I ICH ELEMENTÓW

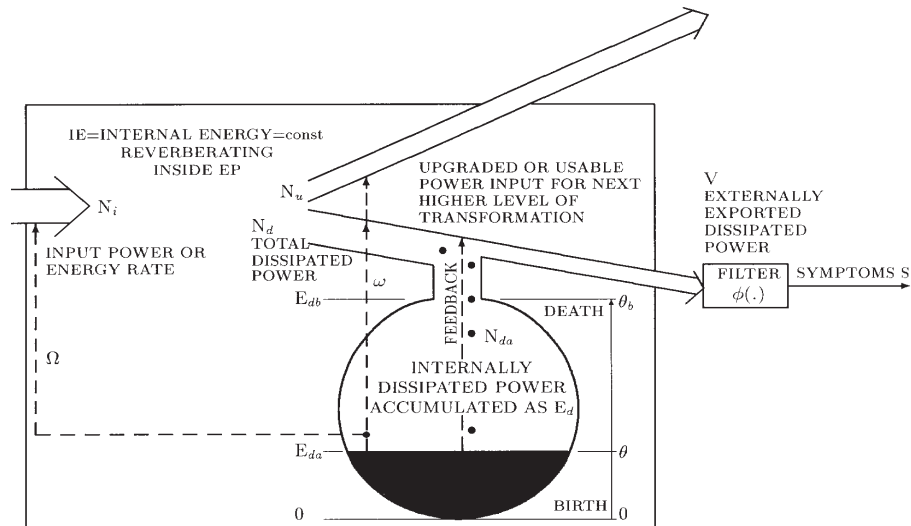
Przymierzając się do konstrukcji modelu ewolucji własności systemu $w(\theta)$ wyartykułujmy zbiór przesłanek do jego budowy, na tyle ogólnych że mogą być słuszne dla całego systemu jak i dla jego elementarnej części mechanicznej.

- Po pierwsze praca (życie) systemu polega na przetwarzaniu dostarczonej energii na energie wyższego rzędu produktu, usługi, itp.
- Część dostarczonej energii nie jest przetwarzana na realizację funkcji projektowej systemu, czyli jest dyssypowana na zewnątrz i wewnątrz systemu.
- Energia dyssypowana wewnątrznie akumuluje się w postaci uszkodzeń, produktów zużycia, itd, co więcej potencjał tej akumulacji jest **skończony**.
- Istnieje tzw. destrukcyjne dodatnie sprzężenie zwrotne między energią dyssypacji zakumulowaną wewnątrznie i dyssypowaną zewnątrznie. To znaczy, im starszy system tym mniej efektywnie pracuje.
- Obserwacja zewnętrznego wyjścia energii dyssypowanej, gdzie jest obserwowana cała gama procesów resztkowych pracującego systemu, dostarcza nam możliwości tworzenia symptomów ewolucji systemu i oceny jego stanu.
- Struktura i mechanizm dyssypacji nie ulega istotnej zmianie w trakcie życia systemu, czyli system i jego elementy zachowują swą operacyjną identyczność.

Przesłanki te posłużyły do budowy modelu ewolucji w postaci tzw. procesora energii systemu o skończonym potencjale destrukcji, tak jak na rysunku 3, (patrz np. [Cempel 92]).



Rys. 2. Idea holistycznej obserwacji dynamiki i ewolucji stanu systemu mechanicznego



Rys. 3. Procesor energii o skończonym potencjale destrukcji jako model ewolucji stanu systemu mechanicznego [Cempel 92]

Wychodząc z przedstawionych przesłanek można zbudować różniczkowy model ewolucji stanu dla energii dyssypowanej zewnętrznie $V(\theta)$, który po rozwiązaniu stosownego równania różniczkowego można przedstawić w postaci [Cempel 92],

$$\frac{V(\theta)}{V_o} = \left(1 - \frac{\theta}{\theta_b}\right)^{-1} = (1 - D)^{-1}, \quad D = \frac{\theta}{\theta_b} \quad (4)$$

$$D(\theta) = \begin{cases} \theta/\theta_b - \text{dla prostego zużycia ciągłego, np. tarcie, korozja} \\ \text{można to również otrzymać z ilorazu dyssypowanych energii} \\ \\ n/N_b - \text{dla prostego zużycia cyklicznego} \\ (n - \text{bieżąca liczba cykli, } N_b - \text{graniczna liczba cykli}) \end{cases} \quad (4a)$$

Jak widać z rozwiązania (4) ma ono charakter asymptotyczny względem czasu życia θ i dla czasu θ_b , wyznaczonego konstrukcją i warunkami eksploatacji systemu, jego moc dyssypowana zewnętrznie $V(\theta)$ dąży do nieskończoności. Praktycznie oznacza to iż cała moc dostarczana na wejście jest zużytkowana na destrukcję systemu, co daje jego natychmiastowe zniszczenie. Jest to typowe zachowanie maszyn, urządzeń, których sprawność maleje w miarę zużycia, a poziom zakłóceń zewnętrznych rośnie (temperatura, drgania, hałas). Zatem fakt ten możemy wykorzystać do budowy uogólnionego operatora symptomowego $\Phi(*)$

$$\frac{S}{S_o} = \Phi\left(\frac{V}{V_o}\right) = \Phi((1 - D)^{-1}), \quad (5)$$

gdzie dalej możemy interpretować argument operatora symptomowego $1 - D = \Delta D > 0$, jako

gdzie:

θ_b - skończony czas życia systemu determinowany jego parametrami, a V_o początkowy poziom energii dyssypowanej zewnętrznie. Bliższe szczegóły wyprowadzenia i interpretacji patrz również [Cempel 97], [Natke, Cempel 97], skąd wynika również że;

bezwymiarowy reszkowy czas życia systemu zgodnie z (4a).

W zależności od wybranego typu operatora symptomowego (liniowy, potęgowy, logarytmiczny, itp.) co wiąże się z modelowanym prawem fizycznym zużycia, dostaniemy różne formy symptomowych obrazów zużycia się, co w literaturze (np. [Cempel 92]) nosi nazwę symptomowej **krzywej życia** $S(\theta)$, z czym związana jest postać niezawodności symptomowej $R(S) = \Delta D$, zwana też bezwymiarowym reszkowym czasem życia systemu.

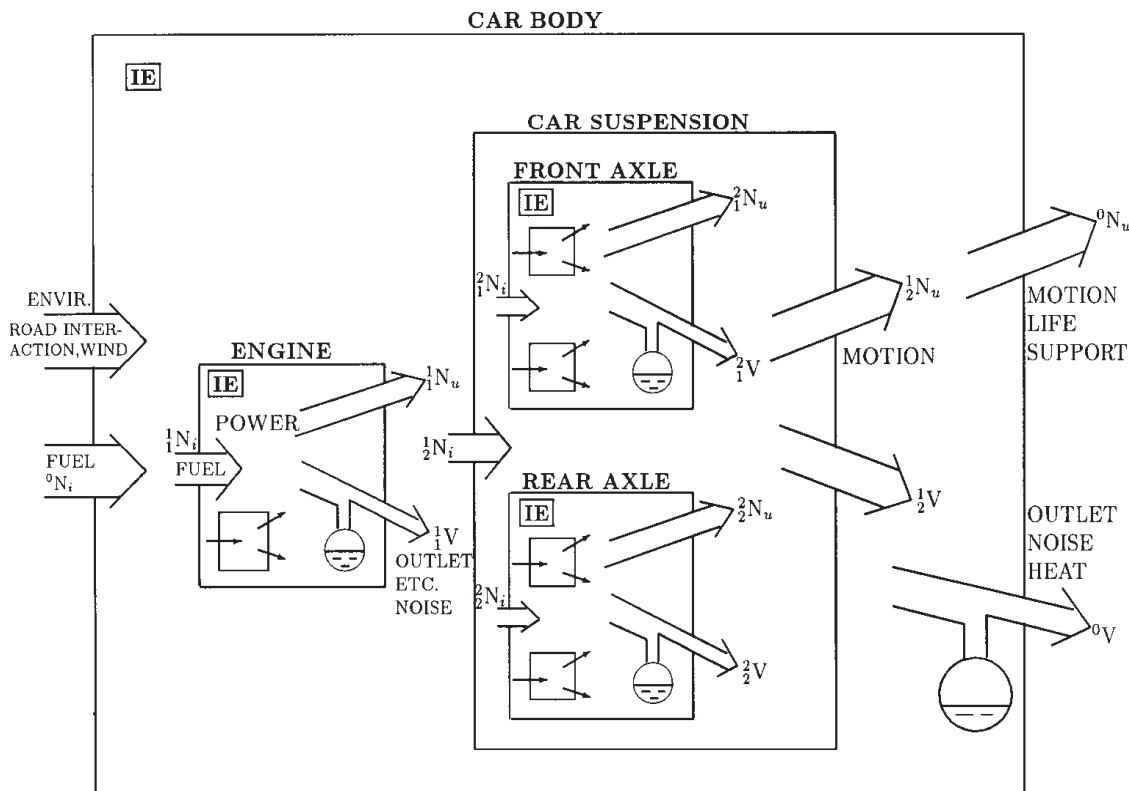
I tak dla najprostszego wykładniczego operatora symptomowego $\Phi(*)$ z wykładnikiem γ otrzymujemy krzywą życia i niezawodność symptomową typu Pareto. Dla logarytmicznych operatorów symptomowych z wykładnikiem γ otrzymamy symptomowe krzywe życia i rozkłady niezawodności Weibulla i Frechet, a nawet liniowe i eksponencjalne. [Cempel 92], [Natke, Cempel 97],

tak jak to pokazano w tabeli 1. Prawidłowości te wykazano w cytowanych pracach i są one bardzo użyteczne bo wymagają jedynie identyfikacji jednego parametru, wykładnika γ , co łatwo wykonać za pomocą każdego programu

statystycznego jeśli dysponujemy zbiorem odczytów symptomów z jednej krzywej życia.

Tabela1. Modele symptomowe generowane przez procesor energii z ograniczonym potencjałem dyssypacji

Symptom operator	Symptom life curve	Symptom reliability, or Damage capacity	Remarks, Symptom model
$V > V_0, \gamma > 0$ $\Phi(\frac{V}{V_0}) \simeq$	$S_0 > 0, \frac{S(D)}{S_0} =$	$R(S) =$	
$(\ln \frac{V}{V_0})^{1/\gamma}$	$[-\ln(1 - D)]^{1/\gamma}$	$\exp[-(\frac{S}{S_0})^\gamma]$	Weibull , $S \geq S_0$
$[-\ln(1 - \frac{V_0}{V})]^{-1/\gamma}$	$[-\ln D]^{-1/\gamma}$	$1 - \exp[-(\frac{S}{S_0})^{-\gamma}]$	Fréchet , $S \geq S_0$ (reciprocity of Weibull type symptom)
$(\frac{V}{V_0})^{1/\gamma}$	$(1 - D)^{-1/\gamma}$	$(\frac{S}{S_0})^{-\gamma}$	Pareto , $S \geq S_0$ (asymptotics of Fréchet)
$1 + (1 - \frac{V_0}{V}) \cdot \frac{1}{\gamma}$	$1 + \frac{1}{\gamma} D$	$1 + (1 - \frac{S}{S_0}) \cdot \gamma$	Uniform , $S \geq S_0$ $S \sim S_0$ (approximation of Pareto and exp(.))
$\exp(\frac{1}{\gamma}(1 - \frac{V_0}{V}))$	$\exp(\frac{1}{\gamma} D)$	$1 - \gamma \ln \frac{S}{S_0}$	Exponential , $S \geq S_0$

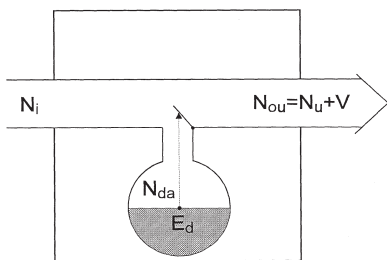


Rys. 3. Model samochodu jako fraktalna i hierarchicznie zorganizowana agregacja procesorów energii [Natke, Cempel 99]

Modele te sprawdziły się w wibroakustycznej diagnostyce maszyn i z pewnością mogą się sprawdzić w badaniach pierwiastkowych zużycia zmęczeniowego, trybologicznego materiałów i części maszyn. Do tego modele te mają własności samopodobne, fraktalne, gdyż ten sam lub podobny sposób zużywania może być ważny na różnych poziomach hierarchicznej organizacji systemu złożonego. A możliwość **sumowania strumieni energii** jest nie do przecenienia. Pokazuje to dobitnie rys 3, w zastosowaniu do modelowania samochodu [Natke, Cempel99].

4. UPROSZCZONE PROCESORY ENERGII DLA ZUŻYCIA JEDNO I WIELOMODALNEGO

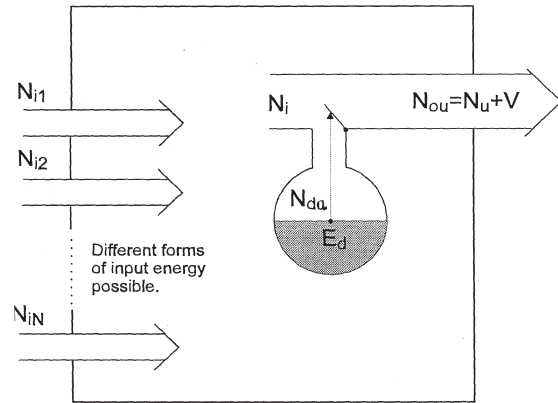
Rozróżnienie pomiędzy wyjściem produktu/usług systemu lub wyjściem jego elementu nie zawsze jest oczywiste. W niektórych prostych obiektach, np. odkurzaczu, a zwłaszcza w elementach systemu, wyjście energii przetworzonej i dyssypowanej jest to samo. Czy zatem jest do pomyślenia taki model **uproszczonego procesora** energii z jednym wejściem i jednym wyjściem i zachowaniem podobnym jak procesor dwuwejściowy? Modele takie przedstawiono w pracy autora [Cempel 98] pokazując iż mimo połączenia wyjść procesora energii równanie opisujące jego zachowanie jest identyczne jak w (4). Procesor taki przedstawia rysunek 4, skąd widać że w wielu przypadkach jego zastosowanie jako modelu w badaniach zużycia materiałów i elementów jest daleko bardziej oczywiste niż procesora z rysunku 2.



Rys. 4. Uproszczony jedno wejściowy procesor energii o skończonym potencjale zużycia [Cempel98].

Zużycie elementów maszyn nie zawsze ma charakter jednomodalny, często podczas pracy maszyn zachodzą w ich elementach różne formy

zmęczenia, ścierania, erozji, itd., a więc zużycie ma charakter wielomodalny. Wtedy lepszym modelem ewolucji własności będzie procesor wielowejsiowy z jednym wyjściem tak jak na rysunku 5. Jego sposób opisu dla wielkości wyjściowej jest identyczny, z tym, że wejście jest ważoną sumą różnych form energii, które potrafimy wyróżnić i opisać.



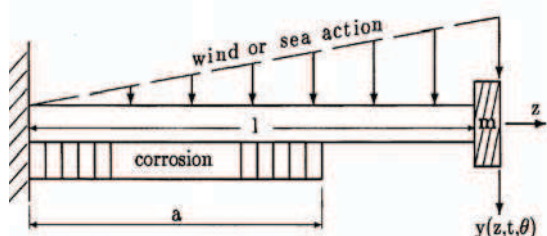
Rys. 5. Wielowejsiowy i jedno wejściowy uproszczony procesor energii [Cempel98].

5. PRZYKŁAD HOLISTYCZNEGO MODELOWANIA DEGRADACJI OBIEKTU

Jako przykład holistycznego ujęcia zagadnień dynamiki i ewolucji własności z tytułu degradacji obiektu / systemu podczas pracy w agresywnych warunkach rozpatrzmy model nogi platformy wiertniczej poddanej wpływowi korozji na długości a , oraz falowaniu morza na prawie całej długości. Alternatywnie może to być model komina stalowego, lub też maszty elektrowni wiatrowej z korozją ziemną i podmuchami wiatru. Model fizyczny tego obiektu przedstawia rysunek 6 zaczerpnięty z prac autora [Natke, Cempel00]. Jak widać z rysunku możemy tu zastosować model belki wspornikowej obciążonej dynamicznie i korozyjnie na swym przelocie a , z ewentualną masą na końcu. Uwzględniając oznaczenia rys. 6 i pomijając szczegóły rozważań zamieszczone w cytowanej już wyżej pracy możemy napisać holistyczne równanie ruchu i ewolucji własności belki jak niżej.

$$m_o \left\{ 1 - \sigma_c \frac{\theta}{R} [H(z) - H(z-a)] \right\} \frac{\partial^2 y(z,t)}{\partial t^2} + cm_o \left\{ 1 - \sigma_c \frac{\theta}{R} [H(z) - H(z-a)] \right\} \frac{\partial y(z,t)}{\partial t} + EI_o \left\{ 1 - \sigma_c \frac{\theta}{R} [H(z) - H(z-a)] \right\} \frac{\partial^4 y(z,t)}{\partial z^4} = \frac{z}{l} f(t), \quad (6)$$

Tutaj dodatkowo R jest promieniem przekroju belki, σ_c jej szybkością korozji (dla Morza Północnego $\sigma_c = 0,12$ mm / rok [Natke, Cempel 00]) na przelocie belki równym a . Jeśli dopuścimy ze względów bezpieczeństwa zmniejszenie przekroju tylko o $R/2$, to czas przeżycia ze względu na korozję ze współczynnikiem bezpieczeństwa 2 będzie $\theta_{bc} = R/\sigma_c$ lat pracy.



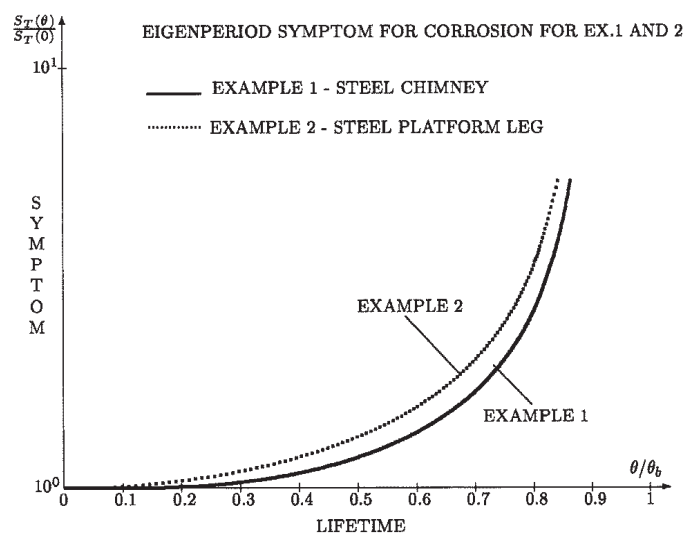
Rys. 6. Model fizyczny obiektu mechanicznego poddanego degradacji korozją i wymuszeniem fal lub wiatru [Natke, Cempel 00]

Ponieważ model obiektu jest liniowy możemy zastosować rozwinięcie jego odpowiedzi wg

postaci własnych belki $U_j(z, \theta)$ i zaproponować jako szereg

$$y(z, t, \theta) = \sum_{j=1}^{\infty} q_j(t) U_j(z, \theta) \quad (7)$$

Rozwiązanie względem kolejnych współrzędnych $q_j(t)$ da nam częstości własne belki ω_j , z których da się obliczyć okres drgań własnych belki $T = 2\pi / \omega$, dla poszczególnych postaci drgań. Jak się okazuje z rozwiązania najlepszym symptomem degradacji (symptomową krzywą życia) jest okres drgań pierwszej postaci własnej $T_1(\theta) = S_T(\theta)$. Na rysunku 7 przedstawiono jego wyliczone zmiany w funkcji bezwymiarowego czasu pracy $D = \theta / \theta_{bc}$, skąd widać że zmiana okresu drgań pod wpływem korozji może być prawie dziesięciokrotna. W przykładzie tym dla prostoty uwzględniono tylko wpływ korozji, a można jeszcze uwzględnić wpływ zmęczenia na skutek falowania / wiatru jeśli np. potraktujemy jako dominujące drgania z pierwszą częstością własną ω_1 .



Rys. 7. Symulowany wpływ korozji na okres drgań pierwszej postaci własnej belki [Natke, Cempel00]

6. PODSUMOWANIE

W pracy dokonano przeglądu modelu teorii i zastosowań procesora energii o skończonym potencjale destrukcji. Najważniejszym zastosowaniem wszelkich odmian tego procesora jest możliwość holistycznego modelowania ewolucji i dynamiki części mechanicznej różnego typu systemów, również mechatronicznych. Idea procesora energii jest na tyle płodna i uniwersalna że można wykorzystać ją do modelowania jednodobnego zużycia się materiału, z jednej strony, a z drugiej do modelowania

samopodobnych hierarchicznie zorganizowanych systemów złożonych z możliwością analitycznego badania rozplywu energii. Wydaje się, że przedstawiona idea procesora energii z ograniczonym potencjałem dysypacji rokuje dalsze zastosowania w badaniach degradacji, zarówno materiałów jak i systemów złożonych.

LITERATURA

1. Cempel C. Wstęp do Teorii i Inżynierii Systemów, E-skrypt, Politechnika Poznańska, Internet, <http://neur.am.put.poznan.pl>.
2. Cempel C. Sumowanie synchroniczne jako metoda diagnostyki maszyn, *Archiwum Budowy Maszyn*, 1976, tom 23, nr 3, s 433 – 441.
3. Cempel C. Podstawy Wibroakustycznej Diagnostyki Maszyn, WNT, Warszawa, 1982, s 342.
4. Cempel C. Diagnostyka Wibroakustyczna Maszyn, Wyd. Pol. Poznańskiej, 1985, Wyd. II, PWN, Warszawa, 1990, s 244.
5. Natke H. G., Cempel C., Holistic modelling as a tool for the diagnosis of critical complex systems, *Automatica*, 1995, Vol.32, No1, pp 89 – 94.
6. Dobry M. W., Optymalizacja przepływu energii w systemie człowiek – narzędzie – podłoże, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Rozprawy nr 330, Poznań 1998.
7. Kaźmierczak H., Analiza rozkładu mocy obciążeń dynamicznych w systemach mechanicznych, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Rozprawy nr 363, Poznań 2001.
8. Collacott R. A., Mechanical Fault Diagnosis and Condition Monitoring, E. Horwood, Chichester, UK, 1977.
9. Cempel C., Damage Initiation and Evolution in Operating Mechanical Systems, *Bull. Polish Academy of Sciences, Techn. Sc.* 1992, Vol. 40, No 2, pp 201 - 214.
10. Cempel C., Energy Processors in Systems Engineering and their Evolution, *Bulletin of Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, Vol. 45, No 4, 1997, pp 495 – 511.
11. Natke H. G., Cempel C., Model Aided Diagnosis of Mechanical Systems, Springer Verlag, New York, Berlin, 1997, p 248.
12. Natke H. G., Cempel C., Holistic dynamics and subsystem modeling: principles, *International Journal of System Science*, Vo., 30, No 3, 1999, pp 283 –293.
13. Cempel C., Energy Models of Processes and Systems in Operation, in: *Modelling and Reality – the Role of Learning and Self-Organization*, Workshop Papers edited by H. G. Natke, CRI, Hannover University, 1998, pp 67 – 97.
14. Natke H.G., Cempel C., Model – based diagnosis of systems emphasizing a holistic approach, *International Journal of Systems Science*, 2000, Vol. 31, No 11, pp 1497 – 1504.



Czesław CEMPEL - profesor dr hab. jest kierownikiem Zakładu Wibroakustyki i Bio-Dynamiki Systemów Wydziału Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej, dr h.c. Politechniki Szczecińskiej, członek korespondent Polskiej Akademii Nauk, członek Komitetu Badań Naukowych w trzeciej kadencji. Jest członkiem wielu organizacji naukowych krajowych i zagranicznych np.: IMEKO, EUROSCIENCE, GAMM. Jeden z założycieli PTDT w 1990 r. Obecnie jest honorowym przewodniczącym PTDT. Zajmuje się wibroakustyką i diagnostyką maszyn, inżynierią systemów, ekologią. Autor ponad 350 opublikowanych prac, 12 skryptów i książek, w tym jedna w języku niemieckim i dwie w angielskim.