

Drgania samowzbudne w maszynach pozadrogowych

Self-excited vibrations in the off-road machines

MICHAŁ KOŃCZAK
MATEUSZ KUKLA
KRZYSZTOF TALAŚKA*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.8-9.70>

Drgania samowzbudne generują wibracje oraz hałas, które oddziałują bezpośrednio na operatorów maszyn pozadrogowych. Minimalizacja wartości tych parametrów jest korzystna z wielu powodów, przede wszystkim zdrowotnych, ekologicznych, a także ekonomicznych.

SŁOWA KLUCZOWE: drgania samowzbudne, autodrgania, wibracje, hałas, maszyna pozadrogowa

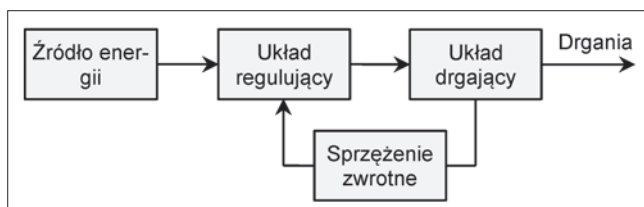
Self-excited vibrations are a generator of vibrations and noise that directly affect operators of off-road machines. Minimizing the values of these parameters is beneficial for a number of reasons, among which the health and ecological as well as economic ones should be considered the most important.

KEYWORDS: self-excited vibrations, self-excescence, vibration, noise, off-road machine

W teorii podstaw mechaniki układy fizyczne, których charakterystyki nie są zmienne w czasie lub też zmieniają się bardzo wolno, nazywa się układami autonomicznymi [1]. Przy tym pominięcie powolnych zmian będących funkcją czasu nie może skutkować istotną wartością błędu.

Szczególnym, wartym uwagi przypadkiem są układy samowzbudne. Należą one do grupy autonomicznych układów niezachowawczych [1]. Cechują się tym, że podczas drgań zachodzą straty energii, które są następnie kompensowane ze źródła zewnętrznego, co powoduje podtrzymanie drgań, a w skrajnym przypadku – ich narastanie. Nazywa się je drganiami samowzbudnymi lub autodrganiami [2].

Cechą charakterystyczną układów samowzbudnych jest to, że w równaniach opisujących ich ruch oscylacyjny parametr czasu występuje w sposób niejawni. Układ samoreguje kompensację strat energii, np. poprzez element nieliniowy, ze źródła zewnętrznego. Jest ono niezmiennie w czasie, dlatego konieczne jest występowanie sprzężenia zwrotnego pomiędzy układem drgającym a regulującym. Taka budowa układu (rys. 1) pozwala na występowanie niezanikających drgań okresowych, pomimo zachodzących w nim strat energii.

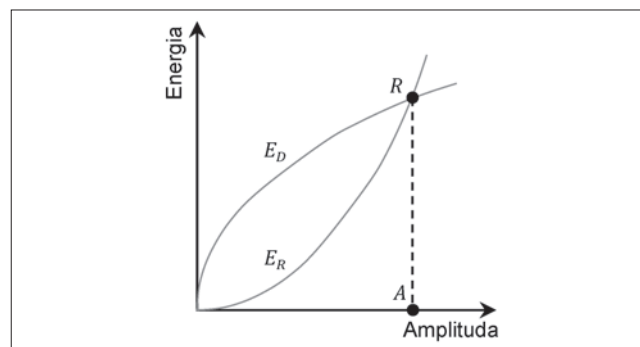


Rys. 1. Schemat blokowy układu samowzbudnego; oprac. własne na podstawie [2]

Nierzadko drgania mają tendencję do narastania aż do momentu ich ustalenia, co oznacza, że stają się stacjonarne. Taki stan rzeczy ma miejsce po małym zakłóceniu pracy układu, doprowadzającym go do niestatecznego

położenia równowagi. Sytuacja ta zachodzi podczas występowania drgań ustalonych, gdy równoważy się suma energii rozpraszanej E_R i energii dostarczanej E_D . Ten bilans energetyczny jest warunkiem koniecznym do powstania drgań samowzbudnych.

Zakładając, że początek układu współrzędnych jest punktem stanu równowagi statycznej układu, można przeprowadzić analizę: Zakłócenie układu skutkuje wprawieniem go w ruch oscylacyjny. Układ cechujący się statecznością powinien dążyć do odzyskania równowagi poprzez rozproszenie energii E_R . Tak się nie dzieje, ponieważ drgania są wzmacniane w wyniku dostarczania energii E_D , co schematycznie przedstawiono na rys. 2. W pierwszej fazie ruchu energia zasilająca jest większa od energii rozpraszającej, co powoduje wzrost amplitudy do wartości A . W drugiej fazie energia rozpraszająca jest większa od energii zasilającej, co powoduje z kolei zmniejszenie amplitudy. Bilans energetyczny układu równoważy się w punkcie R , który stanowi swoisty punkt równowagi dla pewnej wartości amplitudy A . Układ ten znajduje się w tzw. fazie drgań ustalonych, które nazywa się cyklem granicznym.



Rys. 2. Wykres bilansu energetycznego układu samowzbudnego; oprac. własne na podstawie [2]

Układy nazywa się quasi-liniowymi, jeżeli ich stacjonarne drgania samowzbudne mają przebieg zbliżony do okresowego, o częstotliwości drgań swobodnych układu. W pozostałych przypadkach – gdy ustalone drgania samowzbudne znacząco odbiegają od harmonicznym ze skokami wartości prędkości – nazywa się je relaksacyjnymi [1]. Rozwiązanie równań ustalania się autodrgań otrzymuje się np. metodami van der Pola. Stanowią one o bilansie energetycznym danego systemu czy struktury elementów lub ciał. Ogólna postać omawianego równania dana jest zależnością (1):

$$x_1(t) = A(t) \sin(\omega_0 t) \quad (1)$$

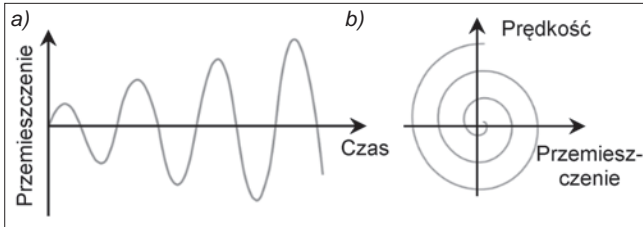
* Mgr inż. Michał Kończak, konczakmichal@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0954-2012> – Politechnika Poznańska, Poznań, Polska
Dr inż. Mateusz Kukla, mateusz.kukla@put.poznan.pl, <https://orcid.org/0000-0003-3456-3824> – Politechnika Poznańska, Poznań, Polska
Dr inż. Krzysztof Talaśka, krzysztof.talaska@put.poznan.pl, <https://orcid.org/0000-0001-9736-9725> – Politechnika Poznańska, Poznań, Polska

gdzie: t – czas, ω_0 – częstość kołowa, x_1 – przemieszczenie.

Przyjmując, że amplituda $A(t)$ zmienia się powoli, a jej przyrost o wartość ΔA podczas jednego okresu jest dostatecznie mały, to prędkość można w przybliżeniu opisać zależnością (2):

$$\dot{x}_1(t) = A(t)\omega_0 \cos(\omega_0 t) \quad (2)$$

Przebieg tego procesu można przedstawić za pomocą charakterystyk pokazanych na rys. 3.



Rys. 3. Charakterystyki otrzymane z równań van der Pola: a) proces wzbudzenia drgań, b) przebieg trajektorii fazowych; oprac. własne na podstawie [1]

Inną metodą opisu drgań samowzbudnych jest równanie Rayleigha, do którego można przejść z równania van der Pola. Jego ogólna postać dana jest zależnością (3):

$$\ddot{x}(t) - \mu \left(\dot{x} - \frac{\dot{x}^3}{3} \right) + x = 0 \quad (3)$$

gdzie: \ddot{x} – przyspieszenie drgań, μ – parametr odpowiadający za nieliniowość i tłumienie

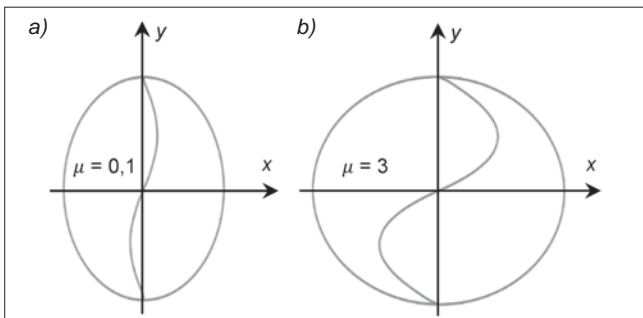
Do zobrazowania tego równania można zastosować wykreślną metodę Lienarda, w której krzywa będzie się zmieniać w zależności od parametru μ . Im niższa wartość tego parametru, tym krzywa fazowa jest bliższa okręgowi, natomiast im wyższa – tym bardziej ulega deformacji wzdłuż osi x , jak pokazano na rys. 4. Równanie trajektorii fazowych przyjmuje postać zależności (4):

$$\frac{du}{dx} = \frac{\mu \left(u - \frac{u^3}{3} \right) - x}{u} \quad (4)$$

gdzie krzywa Lienarda jest opisana jako:

$$x = \mu \left(u - \frac{u^3}{3} \right) \quad (5)$$

gdzie: x , u – współrzędne fazowe.

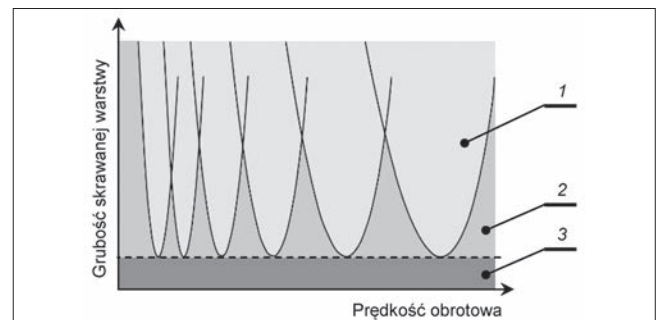


Rys. 4. Krzywe Lienarda dla różnych wartości parametru μ ; oprac. własne na podstawie [3]

W życiu codziennym często można się spotkać z drganiami samowzbudnymi. Do powszechnych przykładów tego zjawiska zalicza się mowę, ćwierkot ptaków, drżenie liści oraz inne – związane z występowaniem tarcia suchego, jak skrzypienie drzwi czy gra na instrumencie smyczkowym.

W technice drgania tego rodzaju występują bardzo często i stanowią istotne zagadnienie. Celowo wykorzystuje się układy samowzbudne np. w elektronice, gdzie za klasyczny przykład tego rodzaju można uznać wzmacniacze. Z drugiej strony ich negatywne skutki można zaobserwować m.in. podczas występowania tarcia suchego, drgań narzędzia podczas obróbki skrawaniem, galopowania sieci energetycznych, drżenia lusterek w samochodach podczas niskich obrotów silnika i drgania mostów wiszących [1]. Niekiedy występowanie drgań samowzbudnych jest niebezpieczne i konieczna jest ich eliminacja. W lotnictwie autodrgania mogą doprowadzić do zjawiska zwanego flutterem skrzydeł samolotu, a w ostateczności – do katastrofy.

Obecnie w technice niwelowanie drgań stanowi istotne zagadnienie ze względu na wytrzymałość i trwałość konstrukcji i bezpieczeństwo użytkownika. Przekraczanie założonego, bezpiecznego poziomu amplitudy drgań może spowodować zmęczenie materiału i doprowadzić do jego zniszczenia, jak w przypadku materiałów cienkościennych, lub spoin spawanych. Drgania mogą również powodować przemieszczanie się elementów układów względem siebie prowadzące do ich rozszczelnienia. W innym przypadku może dojść do zakleszczenia mechanizmów czy poluzowania elementów złącznych, co ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa operatora maszyn wirujących. Zwiększanie parametrów obróbki skrawaniem w celu poprawy wydajności powoduje nierzadko wytrącenie układu narzędzia z równowagi. Ma to istotne znaczenie dla trwałości narzędzia oraz jakości obrobionej powierzchni. Charakterystykę tego procesu przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Charakterystyka obróbki skrawaniem – krzywe workowe; 1 – obszar niestabilnej obróbki, 2 – obszar stabilnej obróbki, 3 – obszar stabilnej obróbki w całym zakresie prędkości obrotowej; oprac. własne na podstawie [5]

Przegląd stanu techniki

Niwelowanie drgań jest również istotne ze względu na ergonomię użytkownika maszyn. Dotychczas uwaga była skupiona na generowanym hałasie, który jest uciążliwy dla użytkownika nawet przy krótkotrwałej pracy i znacząco wpływa na spadek wydajności. Do tego w ostatnich dwóch dekadach doszły zagadnienia związane z występowaniem choroby wiracyjnej. Jest ona niezwykle niebezpieczna i może powodować zespół cieśni nadgarstka, zwyrodnienie stawów, zaburzenia wielonerwowe, obniżenie lub podwyższenie ciśnienia tętniczego krwi, objawy Raynau- da czy nawet amputację palców lub całych dłoni z powodu zniszczenia układu naczyniowego rąk [6]. Z tego względu istotne jest zapobieganie powstawaniu drgań samowzbudnych bądź minimalizowanie ich negatywnych skutków.

Poziom dopuszczalnego hałasu i drgań przenoszonych przez maszyny uregulowano normami, które zostały uwzględnione w przepisach kodeksu pracy [7]. Do najważniejszych norm można zaliczyć:

- Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 5 sierpnia 2005 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na hałas lub drgania mechaniczne (Dz.U. 2005 nr 157 poz. 1318) – precyzuje najwyższe dopuszczalne natężenie wielkości charakteryzujących hałas i drgania w środowisku pracy,
- Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz.U. 2018, poz. 1286),
- PN-ISO 1999:2000 – Akustyka – Wyznaczanie ekspozycji zawodowej na hałas i szacowanie uszkodzenia słuchu wywołanego hałasem – stanowi o dopuszczalnej ekspozycji na hałas w trakcie ośmiogodzinnej pracy dla pięciu dni roboczych w tygodniu,
- PN-N-01352:1991 – Drgania – Zasady wykonywania pomiarów na stanowiskach pracy – opisuje oddziaływanie drgań bez przerwy w trakcie ośmiogodzinnej zmiany.

Dla przykładu: na podstawie tych norm określono 125 dB jako graniczną wartość hałasu dla maszyn stanowiących źródło energii (silników), oraz 99 dB dla pilarek do drewna, przyjmując, że dana maszyna jest głównym źródłem hałasu na stanowisku pracy. Producenci maszyn, aby być bardziej konkurencyjni, musieli zatem wziąć pod uwagę zjawisko powstawania drgań samowzbudnych oraz zająć się związanymi z tym problemami.

W wyniku przeprowadzenia badań własnych nad aktualnym stanem techniki zebrano dane dotyczące wybranych maszyn pozadrogowych. Ich podsumowanie przedstawiono w tablicy.

TABLICA. Zbiór danych dotyczących wybranych maszyn pozadrogowych

Maszyna	Rodzaj napędu	Źródło energii	Poziom mocy akustycznej ¹ /poziom hałasu ² [dB]	Generowane drgania dla uchwytu głównego/ dodatkowego* [m/s ²]	Producent
Kosiarka 756 YS	przekładnia hydrostatyczna	silnik spalinowy 179 cm ³	98 ²	2,4/1,2*	Stihl
Łuparka do drewna 6422	hydrauliczny	silnik spalinowy 208 cm ³	94,1 ²	–	Hecht
Łuparka do drewna ZI HS10TN	hydrauliczny	silnik elektryczny 3 kW	80 ²	2,5	Zipper
Łuparka do drewna LS05V	hydrauliczny	silnik elektryczny 5,1 kW	75 ²	2,5	Cedrus
Łuparka do drewna LS07V	hydrauliczny	silnik elektryczny 3,5 kW	83,6 ²	2,5	Cedrus
Pilarka 440	łańcuchowy	silnik spalinowy 40,9 cm ³	112 ¹	3,8/4,2*	Husqvarna
Pilarka 555	łańcuchowy	silnik spalinowy 59,8 cm ³	116 ¹	3,5/5	Husqvarna
Pilarka MS 211	łańcuchowy	silnik spalinowy 35,2 cm ³	113 ¹	3,5	Stihl
Pilarka MS 362	łańcuchowy	silnik spalinowy 59 cm ³	117 ¹	3,5	Stihl
Pilarka SP 426	łańcuchowy	silnik spalinowy 42,4 cm ³	114 ¹	5,93/5,4*	Stiga

Analiza zamieszczonych danych pozwala zauważyć istotne różnice zarówno w wielkości drgań, jak i poziomie hałasu. Wynikają one z wielu czynników. Warto zwrócić uwagę, że normy dopuszczają pewne zakresy tych wartości w zależności od czasu ich trwania podczas pracy. Poziom hałasu działający na narząd słuchu można określić, stosując zasadę równej energii. Zakłada ona wystąpienie takich samych potencjalnych skutków dla człowieka przy różnych wartościach energii i czasu jej oddziaływania. Przykładowo, w odniesieniu do poziomu hałasu równoważne wartości to: 85 dB przez 8 godzin, 88 dB przez 4 godziny, 91 dB przez 2 godziny, 94 dB przez 1 godzinę oraz 97 dB przez 30 minut [8]. Jednak stosowanie tej metody budzi pewne wątpliwości [8]. Z drugiej strony daje ona podstawy do określenia i oceny teoretycznych czasów, w jakich można pracować z wymienionymi w tablicy urządzeniami.

Podsumowanie

Niezamierzone powstawanie drgań samowzbudnych w maszynach jest niepożądanym zjawiskiem, które może skutkować znaczącym skróceniem żywotności układu, ale również nagłym, trwałym uszkodzeniem.

Eliminacja drgań jest również konieczna z punktu widzenia ergonomii użytkownika i zwiększenia wydajności pracownika poprzez wydłużenie możliwego czasu pracy i jednocześnie zmniejszenie obciążenia psychiczno-fizycznego. Producenci maszyn są zobowiązani do spełniania norm dotyczących emitowanych drgań i hałasu. Jednak sposób ich detekcji i eliminacji jest często procesem skomplikowanym, podnoszącym koszty, co przekłada się na cenę produktu.

Zasadne jest więc podejmowanie prac badawczych zorientowanych na określenie procesów powstawania drgań samowzbudnych. Umożliwi to wypracowanie metodyki pomiarów związanych z ustalaniem poziomu wibracji, ale również wielkości ciśnienia akustycznego. Efekty tych prac będą podstawą do modelowania układów wykonawczych maszyn pozadrogowych, które generują drgania samowzbudne. Dzięki temu możliwa będzie ich analiza. Celem prowadzonych prac jest określenie parametrów oraz wytycznych, których uwzględnienie w konstrukcji będzie skutkowało zmniejszeniem niekorzystnych zjawisk związanych z występowaniem drgań mechanicznych oraz hałasu.

LITERATURA

- [1] Giergiel J. „Drgania mechaniczne”. Kraków: Wydawnictwo AGH, 2000. ISBN 83-88408-80-1.
- [2] Arczewski K., Pietrucha J., Szuster J.T. „Drgania układów fizycznych”. Warszawa: Oficyna Wydawnicza PW, 2014. ISBN 978-83-7814-246-1.
- [3] Osiński Z. „Teoria drgań”. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1980. ISBN 83-01-02278-7.
- [4] Osiński Z. „Tłumienie drgań”. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1997. ISBN 83-01-12404-0.
- [5] Morek R. „Obróbka stabilna – drgania samowzbudne”. TeWy. 6 (2015): 1–5.
- [6] Szczeklik A., Gajewski P. „Interna Szczeklika”. Medycyna Praktyczna, Kraków 2018. ISBN 978-83-7430-549-5.
- [7] Dziurdź J. „Zagrożenia człowieka w środowisku pracy. Drgania i hałas. Materiały dydaktyczne”. Warszawa: Politechnika Warszawska, 2011.
- [8] Pawlaczek-Łuszczynska M. (red.) „Minimalizowanie ryzyka uszkodzenia słuchu w miejscu pracy – poradnik dla pracowników BHP, PIS, PIP, pracodawców i pracowników”. Łódź: Oficyna Wydawnicza Instytutu Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera, 2010, ISBN 978-83-60818-49-7.
- [9] Szulewski P., Śniegulska-Grądzka D. „Systemy automatycznego pomiaru drgań w obrabiarkach”. Mechanik. 3 (2017): 170–175.
- [10] Katedra Dynamiki Maszyn. „Pomiar parametrów drgań. Materiały dydaktyczne”. Łódź: Politechnika Łódzka. Online: <http://www.kdm.p.lodz.pl/wyklady/lab/cwiczenie1.pdf> (dostęp: 21.03.19).