

# Modelowanie drgań stołu koncentracyjnego z napędem bezwładnościowo-odbojnikowym

Artur Filipowicz  
Iwona Oprzędkiewicz \*

Stoły koncentracyjne są wzbogacalnikami oscylacyjnymi. Uzyskiwanie koncentratu, czyli ziaren o gęstości większej niż średnia, odbywa się podczas wielu powtarzających się cykli. W każdym cyklu można wyróżnić dwa półokresy. W jednym z nich maksymalna wartość przyspieszenia jest znacznie większa od osiąganą w kolejnym półokresie. Dzięki nachyleniu płyty roboczej (rys. 1) i splukiwaniu ziaren w płaszczyźnie równoległej do kierunku ruchu płyty powstaje wachlarz rozdziału. Najprostszą ingerencją w pracę stołu koncentracyjnego jest zmiana nachylenia płyty roboczej lub zmiana strumienia objętości podawanej na nią wody. Znacznie lepsze efekty rozdzielania ziaren o różnej gęstości można uzyskać, zmieniając maksymalne wartości przyspieszeń płyty roboczej w następujących po sobie półokresach drgań. Stosunek maksymalnych przyspieszeń osiągniętych w poszczególnych półokresach drgań jest jednym z najważniejszych parametrów decydujących o wynikach technologicznych pracy stołu.

Pierwszy stół koncentracyjny opatentowano w 1898 r. Oparte na tym patencie stoły typu Wilfley są ciągle produkowane, lecz ich zastosowanie ogranicza się do prac laboratoryjnych, podczas których bez ponoszenia wysokich kosztów analiz denezymetrycznych można ocenić gęstość ziaren mineralnych. W stole typu Wilfley zastosowano rowkowaną płytę roboczą i napęd o parametrach zapewniających asymetrię drgań płyty [2, 3, 8].

Współcześnie stoły koncentracyjne najpowszechniej są używane w USA do wzbogacania rozdrobnionego węgla. W tych zastosowaniach maszyny te są używane do wydzielenia piryty, którego gęstość znacznie różni się od gęstości węgla. W Niemczech stoły stosuje się do separacji rozdrobnionych kabli energetycznych i części układów elektronicznych. W procesach wydzielenia złota lub platyny, gdzie ziarno minerału jest większe od 0,1 mm, stoły są maszynami, z którymi konkurować może jedynie wielokrotnie droższy proces flotacji [8]. W Polsce stoły są używane w Zakładzie Przerobczym Kopalni Rud Cynku i Ołowiu ZG „Trzebieńka”, gdzie służą do wydzielenia galeny, wytwarzając koncentrat o bardzo wysokiej jakości [2].

\* dr inż. Artur Filipowicz – Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Maszyn Górniczych, Przerobczych i Transportowych  
dr inż. Iwona Oprzędkiewicz – Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Automatyki Procesów

Duża skuteczność rozdziału uzyskiwana na stołach koncentracyjnych skłoniła badaczy do prowadzenia analiz mających na celu wskazanie cech napędu umożliwiających uzyskiwanie najlepszych efektów wzbogacania. Próby opisanie kinematyki napędu kończyły się jednak na złożonych równaniach definiujących jedynie ruch elementu roboczego. Graficzne metody analizy przebiegów przemieszczenia płyty roboczej doprowadziły do zauważenia asymetrii przyspieszeń płyty roboczej.

Współczesne metody analizy pozwoliły na zastąpienie analizy graficznej metodami numerycznymi. Wstępnie opracowane prawa ruchu elementu roboczego związanego z napędem poddawano analizie numerycznej, której wyniki po dwukrotnym różniczkowaniu numerycznym dawały przebiegi przyspieszeń bardzo zbliżone do osiągniętych podczas badań eksperymentalnych. Opisana metoda dotyczyła napędów z kinematycznym wymuszeniem drgań płyty stołu. Okazała się ona prostsza od analitycznego dochodzenia do złożonych równań opisujących przyspieszenia płyty stołu.

Analizując pracę stołu z napędem bezwładnościowym typu CONCENCO, postąpiono inaczej. Napęd ten okazał się najprostszym spośród znanych generatorów drgań stołów, co pozwoliło na opracowanie prostych wzorów opisujących jego kinematykę i dynamikę [1].

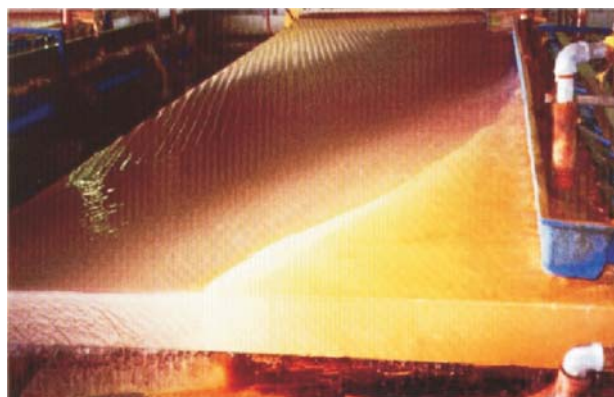
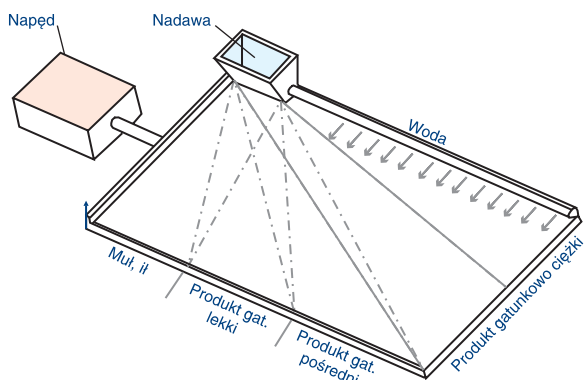
W Katedrze Maszyn Górniczych, Przerobczych i Transportowych AGH opracowano konstrukcję stołu koncentracyjnego z napędem bezwładnościowo-udarowym. Nietypowy napęd analizowano różnymi metodami numerycznymi. Potwierdzały one wyniki badań eksperymentalnych, lecz brak rozwiązania metodami matematycznymi uniemożliwiał formułowanie ogólnych wniosków istotnych dla projektowania napędu.

W artykule przedstawiono równania opisujące ruch i przyspieszenia stołu koncentracyjnego, stanowiące dokładniejszy jak dotąd zapis matematyczny pracy urządzenia.

## Zasada działania stołu koncentracyjnego

Działanie stołu koncentracyjnego polega na wykorzystaniu asymetrii przyspieszeń podczas ruchu w przeciwnych kierunkach. Stół koncentracyjny, jak każdy wzbogacalnik oscylacyjny, doprowadza do rozdzielania ziaren w kolejnych okresach ruchu.

Na rys. 1 pokazano działanie urządzenia i efekty jego pracy w zakładzie oczyszczania złota.



Rys. 1. Schemat stołu koncentracyjnego i efekt jego działania w zakładzie wzbogacania grawitacyjnego

Typowy stół koncentracyjny składa się z płyty z równoległymi rowkami, opartej na ramie oraz mechanizmu powodującego niesymetryczny ruch wahadłowy. Specjalny mechanizm nadaje płycie największe przyspieszenie przy końcu ruchu do przodu, a powrotny ruch jest równomierny i powolny.

Ruch taki powoduje zróżnicowanie maksymalnych przyspieszeń w kolejnych półokresach drgań. Jednym z parametrów charakteryzujących napędy stołów jest stosunek maksymalnych przyspieszeń przy ruchu w przeciwnych kierunkach [2]:

$$S = \left| \frac{\min a(t)}{\max a(t)} \right| \quad (1)$$

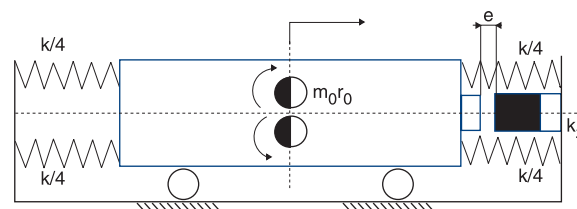
gdzie  $a(t)$  jest funkcją opisującą przyspieszenie stołu.

Kąt pochylenia stołu waha się w granicach od 0 do 10° i zależy od rozdrobnienia materiału. Na każde ziarno znajdujące się na powierzchni stołu działają siły ciężkości, bezwładności, tarcia i naporu płynącej wody. Na płycie otrzymuje się pasy rozchodzące się w kształcie wachlarza ku brzegom płyty. Są to produkty wzbogacenia, które spływają do oddzielnych koryt. Pas najbardziej odchylony składa się z minerałów ciężkich (koncentrat), a przeciwnieległy – z minerałów lżejszych (odpady) (rys. 1) [3, 8].

Poszukiwania metod, które pozwoliłyby zwiększyć wartość  $S$  doprowadziły do zaprojektowania nowego typu stołu z dwumasowym wibratorem bezwładnościowym i asymetryczną charakterystyką sprężystości. Na rys. 2 pokazano schemat kinematyczny napędu oraz widok zbudowanego modelu fizycznego.

W stole tym asymetria przyspieszeń jest osiągana w wyniku uderzania ramy stołu (napędzanej dwumasowym wibratorem bezwładnościowym) w odbojnik o sztywności  $k_z$ .

Badania nowego typu stołu wykazały, że zastosowanie w układzie dodatkowej sprężystości odbojnika pozwala na uzyskanie dużej różnicy przyspieszeń przy ruchu stołu w przód i w tył. Stosowane na etapie projektowania metody symulacyjne nie umożliwiły jednak opracowania analitycznego zapisu drgań stołu. Artykuł przedstawia sposób wyznaczenia równań ruchu stołu z napędem bezwładnościowo-udarowym. Opracowane



Rys. 2. Stół koncentracyjny z napędem bezwładnościowo-udarowym. Schemat kinematyczny i model fizyczny

równania mogą być wykorzystane podczas prowadzenia prac projektowych dotyczących nowego napędu.

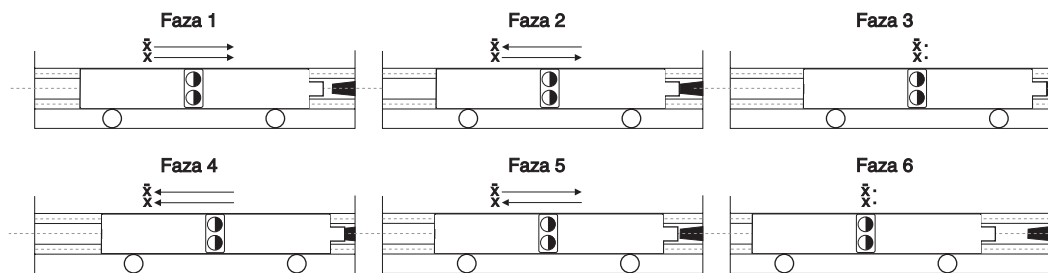
Dzięki wykorzystaniu przedstawionych równań będzie możliwa optymalizacja parametrów stołu w celu wyznaczenia częstości drgań  $\omega$ , przy której można uzyskać największą wartość stosunku przyspieszeń  $S_{\max}$ , gwarantującą osiąganie najlepszych efektów wzbogacania. Funkcja celu ma wtedy postać:

$$S_{\max} = \max_{\omega} \left| \frac{\min a(t)}{\max a(t)} \right| \quad (2)$$

### Model matematyczny drgań stołu koncentracyjnego

Ruch rzeczywistego stołu koncentracyjnego można opisać następującym modelem matematycznym [7]:

$$m_0 r_0 \omega^2 \sin \omega t = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + T_A + N \quad (3)$$



Rys. 3. Fazy ruchu płyty stołu koncentracyjnego

gdzie:  $m_0$  – suma mas niewyważonych wibratora bezwładnościowego,  $r_0$  – promień mimośrodowości mas niewyważonych,  $\omega$  – częstość drgań,  $t$  – czas,  $m$  – suma mas układu drgającego,  $c$  – tłumienie wiskotyczne sprężyn stołu,  $k$  – sztywność zastępcza sprężyn,  $T_A$  – tłumienie od tarcia między stołem a ramą,  $N$  – funkcja opisująca działanie odbojnika,  $x$  – przemieszczenie stołu,  $\dot{x}$  – prędkość stołu,  $\ddot{x}$  – przyspieszenie stołu.

W modelu matematycznym (3) uwzględniono nieliniową funkcję  $N$  opisującą działanie odbojnika  $x'$ :

$$N = \begin{cases} k_z(x-e) & \wedge x \geq e \\ 0 & \wedge x < e \end{cases} \quad (4)$$

gdzie:  $k_z$  – sztywność odbojnika,  $e$  – wymiar strefy nieczułości.

Uwzględniono również występowanie w rozważanym układzie tłumienia  $T_A$ , jako funkcję prędkości stołu:

$$T_A = T_{AS} \text{sign}(\dot{x}) \quad (5)$$

gdzie  $T_{AS}$  oznacza siłę tarcia suchego.

Tak zdefiniowany model posłużył do przeprowadzenia badań symulacyjnych w środowisku pakietu MATLAB. Celem badań było wyznaczenie parametrów stołu zapewniających uzyskanie maksymalnej wartości stosunku przyspieszeń  $S_{\max}$  (2). Wykazały one, że najprostszym sposobem zmiany wartości  $S$  jest zmiana strefy nieczułości  $e$  i częstości drgań  $\omega$  (rys. 2). Aby zweryfikować otrzymane wyniki, podjęto próbę analitycznej analizy pracy stołu koncentracyjnego. Z uwagi na nieliniowość i nieciągłość rozważanego układu, celowy jest zapis równania (3) oddzielnie dla każdej fazy ruchu stołu (rys. 3). Warunki końcowe każdej z faz ruchu są warunkami początkowymi kolejnej fazy [5]:

**Faza 1.**

Ruch w kierunku odbojnika, ale przed zetknięciem z nim stołu:

$$\dot{x} > 0 \wedge x < e$$

$$m_0 r_0 \omega^2 \sin \omega t = m \ddot{x} + c \dot{x} + kx + T_{AS} \quad (6)$$

**Faza 2.**

Uderzenie o odbojnik i kontynuacja ruchu w tę samą stronę jak **fazie 1**:

$$\dot{x} > 0 \wedge x \geq e$$

$$m_0 r_0 \omega^2 \sin \omega t = m \ddot{x} + c \dot{x} + kx + T_{AS} + k_z(x-e) \quad (7)$$

**Faza 3.**

Zatrzymanie stołu po uderzeniu w odbojnik:

$$\dot{x} = 0 \wedge x \geq e$$

$$m_0 r_0 \omega^2 \sin \omega t = m \ddot{x} + c \dot{x} + kx + k_z(x-e) \quad (8)$$

**Faza 4.**

Ruch stołu w przeciwnym kierunku jak w **fazie 1** i **fazie 2**, bez utraty kontaktu z odbojnikiem:

$$\dot{x} < 0 \wedge x \geq e$$

$$m_0 r_0 \omega^2 \sin \omega t = m \ddot{x} + c \dot{x} + kx - T_{AS} + k_z(x-e) \quad (9)$$

**Faza 5.**

Oddalanie się stołu od odbojnika, po utracie z nim kontaktu:

$$\dot{x} < 0 \wedge x < e$$

$$m_0 r_0 \omega^2 \sin \omega t = m \ddot{x} + c \dot{x} + kx - T_{AS} \quad (10)$$

**Faza 6.**

Zatrzymanie stołu w punkcie najbardziej oddalonym od odbojnika:

$$\dot{x} = 0 \wedge x < e$$

$$m_0 r_0 \omega^2 \sin \omega t = m \ddot{x} + c \dot{x} + kx \quad (11)$$

Rozwiązanie równań (6)–(11) pozwoliło analitycznie wyznaczyć związki opisujące przemieszczenia, prędkości oraz przyspieszenia stołu w poszczególnych fazach ruchu. Na podstawie tych zależności zbadano wpływ parametrów stołu na stosunek przyspieszeń  $S$ .

Wzory (12)–(17) przedstawiają równania, opisujące przyspieszenia stołu  $a_i(t)$  w  $i$ -tej fazie ruchu stołu koncentracyjnego, gdzie  $i$  kolejne fazy ruchu stołu – od 1 do 6.

$$a1(t) = A_1\omega^2\left((m\omega^2 - k)\sin(\omega t) + c\omega\cos(\omega t)\right) - A_{14}\left(x_0 + \frac{T_{AS}}{k} + A_1c\omega\right)\exp\left(-\frac{ct}{2m}\right) + A_{15}A_3\exp\left(-\frac{ct}{2m}\right)\sin(A_2t) \quad (12)$$

$$a2(t) = A_4\omega^2\left((m\omega^2 - k - k_z)\sin(\omega t) + c\omega\cos(\omega t)\right) - A_{16}\left(x_0 + \frac{T_{AS}}{k} + A_3c\omega\right)\exp\left(-\frac{ct}{2m}\right) + A_{17}A_7\exp\left(-\frac{ct}{2m}\right)\sin(A_3t) \quad (13)$$

$$a3(t) = A_4\omega^2\left((m\omega^2 - k - k_z)\sin(\omega t) + c\omega\cos(\omega t)\right) - A_{16}(x_0 + A_8 + A_3c\omega)\exp\left(-\frac{ct}{2m}\right) + A_{17}A_9\exp\left(-\frac{ct}{2m}\right)\sin(A_3t) \quad (14)$$

$$a4(t) = A_4\omega^2\left((m\omega^2 - k - k_z)\sin(\omega t) + c\omega\cos(\omega t)\right) - A_{16}(x_0 + A_{10} + A_3c\omega)\exp\left(-\frac{ct}{2m}\right) + A_{17}A_{11}\exp\left(-\frac{ct}{2m}\right)\sin(A_3t) \quad (15)$$

$$a5(t) = A_1\omega^2\left((m\omega^2 - k)\sin(\omega t) + c\omega\cos(\omega t)\right) - A_{14}\left(x_0 - \frac{T_{AS}}{k} + A_1c\omega\right)\exp\left(-\frac{ct}{2m}\right) + A_{15}A_{12}\exp\left(-\frac{ct}{2m}\right)\sin(A_2t) \quad (16)$$

$$a6(t) = A_1\omega^2\left((m\omega^2 - k)\sin(\omega t) + c\omega\cos(\omega t)\right) - A_{14}(x_0 + A_1c\omega)\exp\left(-\frac{ct}{2m}\right) + A_{15}A_{13}\exp\left(-\frac{ct}{2m}\right)\sin(A_2t) \quad (17)$$

gdzie dla uproszczenia zapisu wprowadzono symbole pomocnicze:

$$A_1 = \frac{m_0r_0\omega^2}{(m\omega^2 - k)^2 + c^2\omega^2} \quad A_2 = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{c^2}{4m^2}}$$

$$A_3 = \frac{cx_0}{m} + v_0 + \frac{cT_{AS}}{mk} + A_1\omega(m\omega^2 - k + c^2)$$

$$A_4 = \frac{m_0r_0\omega^2}{(m\omega^2 - k - k_z)^2 + c^2\omega^2} \quad A_5 = \sqrt{\frac{k + k_z}{m} - \frac{c^2}{4m^2}}$$

$$A_6 = \frac{T_{AS} - k_z e}{k + k_z} \quad A_7 = \frac{cx_0}{m} + v_0 + \frac{c}{m}A_6 + A_1\omega(m\omega^2 - k - k_z + c^2)$$

$$A_8 = -\frac{k_z e}{k + k_z} \quad A_9 = \frac{cx_0}{m} + v_0 + \frac{c}{m}A_8 + A_1\omega(m\omega^2 - k - k_z + c^2)$$

$$A_{10} = -\frac{T_{AS} + k_z e}{k + k_z}$$

$$A_{11} = \frac{cx_0}{m} + v_0 + \frac{c}{m}A_{10} + A_1\omega(m\omega^2 - k - k_z + c^2)$$

$$A_{12} = \frac{cx_0}{m} + v_0 - \frac{cT_{AS}}{mk} + A_1\omega(m\omega^2 - k + c^2)$$

$$A_{13} = \frac{cx_0}{m} + v_0 + A_1\omega(m\omega^2 - k + c^2)$$

$$A_{14} = \left(\frac{k}{m} - \frac{5c^2}{8m^2}\right)\cos(A_2t) - \left(\frac{3cA_2}{2m} - \frac{c}{4m^2A_2}\right)\sin(A_2t)$$

$$A_{15} = -\frac{c}{m}\cos(A_2t) + \frac{c^2}{4m^2A_2} - A_2$$

$$A_{16} = \left(\frac{k + k_z}{m} - \frac{5c^2}{8m^2}\right)\cos(A_3t) - \left(\frac{3cA_3}{2m} - \frac{c}{4m^2A_3}\right)\sin(A_3t)$$

$$A_{17} = -\frac{c}{m}\cos(A_3t) + \frac{c^2}{4m^2A_3} - A_3$$

Symbole  $x_0$  oraz  $v_0$  oznaczają odpowiednio początkowe przemieszczenie i prędkość w danej fazie ruchu.

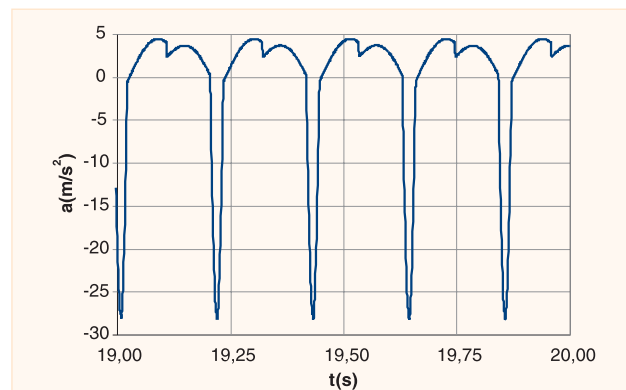
## Wyniki analizy pracy napędu

Podczas obliczeń przyjęto parametry stołu koncentracyjnego zgodne z wartościami zmierzonymi na modelu fizycznym, czyli:  $m_0 = 2,3$  kg;  $r_0 = 0,055$  m;  $k = 17,05$  kN/m;  $m = 45,6$  kg;  $T_{AS} = 10$  N;  $k_z = 230$  kN/m;  $c_0 = 0,1$ .

Podobnie jak podczas wcześniejszych analiz symulacyjnych stwierdzono, że parametrami regulacyjnymi

stołu umożliwiającymi zmianę  $S$  w najprostszy sposób, są częstotść drgań  $\omega$  i strefa nieczułości  $e$  (rys. 2). Przebiegi uzyskane podczas obliczeń były bardzo podobne do wykreślanych podczas wcześniejszych badań symulacyjnych [6, 7].

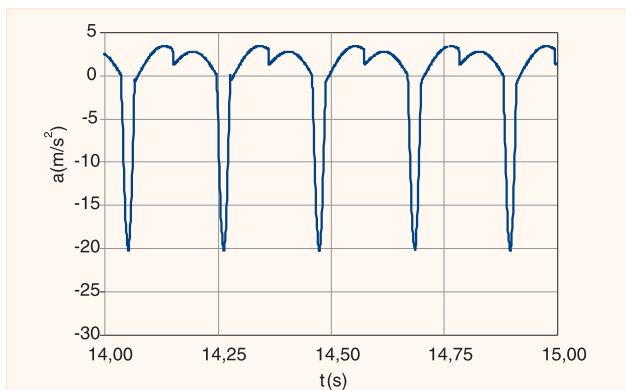
Na rys. 4 pokazano przykładowy przebieg przyspieszenia płyty stołu, gdy:  $\omega = 27,5$  rad/s,  $e = 3$  mm.



Rys. 4. Przebieg przyspieszeń płyty stołu gdy  $\omega = 27,5$  rad/s,  $e = 3$  mm

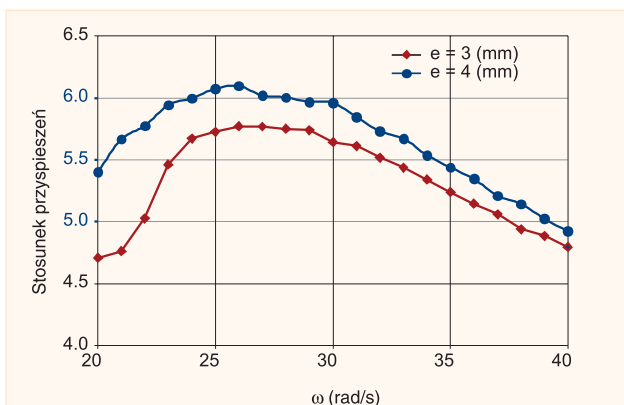
Uzyskany podczas obliczeń maksymalny stosunek przyspieszeń  $S_{max}$  osiągnął wartość ok. 5,5, która jak wykazały badania eksploatacyjne, pozwala osiągać bardzo dobre efekty pracy stołu [4]. Podobne analizy przeprowadzono dla różnych zakresów parametrów drgań.

Na rys. 5 pokazano przebieg przyspieszenia płyty stołu dla  $\omega = 27,5$  rad/s,  $e = 4$  mm.



Rys. 5. Przebieg przyspieszeń płyty stołu dla  $\omega = 27,5$  rad/s,  $e = 4$  mm





Rys. 6. Zależność stosunku przyspieszeń w kolejnych półokresach drgań od częstości  $\omega$

Po zwiększeniu strefy nieczułości, stosunek  $S_{max}$  nie zmienił znacząco wartości, jednak wyraźnie zmniejszyła się wartość przyspieszeń w kolejnych półokresach ruchu płyty (rys. 4 i 5). Taka zmiana wpływa korzystnie na proces rozdzielania materiału na płycie stołu, gdyż eliminuje problem cofania się ziaren w fazie ruchu płyty, w której powinny pozostawać w spoczynku.

Na rys. 6 pokazano wyniki jednoparametrowej optymalizacji stosunku przyspieszeń  $S$ . Przy strefie nieczułości  $e = 3$  mm i  $e = 4$  mm zmieniano wartość częstości drgań.

Widać, że maksymalną wartość  $S$  można uzyskać przy drganiach o częstości 26–27 rad/s. Wcześniejsze analizy i badania wykazały, że dla opisanych konstrukcji, największą wartość  $S$  można uzyskać gdy  $e = 4$  mm. Potwierdzają to również wyniki analiz prowadzonych nową metodą.

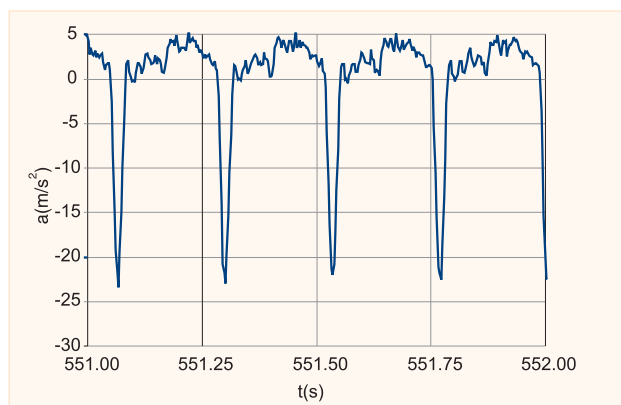
Proponowana metoda obliczeniowa potwierdza wnioski uzyskane podczas wcześniejszych analiz i badań.

Na rys. 7 przedstawiono przebieg przyspieszeń zarejestrowany gdy  $e = 4$  mm i  $\omega = 27$  rad/s. Porównanie rys. 5 i 7 wskazuje na duże podobieństwo wyników uzyskanych podczas obliczeń i podczas symulacji. Niewielkie różnice można wyjaśnić małą różnicą częstości drgań, błędami w określaniu parametrów pracy stołu, a zwłaszcza nieprecyzyjnym określeniem wartości związanych z oporami ruchu i tłumieniem w sprężynach stalowych oraz w odbojniku.

## Wnioski

Uzyskane efekty modelowania potwierdzają zgodność opracowanego modelu matematycznego z obiektem rzeczywistym. Przeprowadzone symulacje wykazały, że wraz ze wzrostem sztywności zastępczej sprężyn  $k$ , rośnie wartość pulsacji  $\omega$ , przy której stosunek przyspieszeń  $S$  osiąga maksimum, jednak  $S$  osiąga wtedy coraz mniejszą wartość. Sztywność odbojnika  $k_z$  nie ma wpływu na wartość pulsacji  $\omega$ , przy której stosunek przyspieszeń  $S$  osiąga maksimum, natomiast jego wzrost pociąga za sobą wzrost wartości  $S$ . Badania wykazały również, że zwiększenie wartości tłumienia wiskotycznego sprężyn stołu  $c$ , powoduje wzrost  $S$ , przy jednoczesnym zmniejszeniu pulsacji  $\omega$ .

Otrzymane wyniki są zgodne z wcześniejszymi analizami wykorzystującymi środowisko Simulinka i badaniami przeprowadzonymi na rzeczywistych obiektach o określonych parametrach. Jednocześnie należy stwier-



Rys. 7. Wyniki rejestracji przyspieszeń dla  $\omega = 27$  rad/s,  $e = 4$  mm

dzić, że analityczne rozwiązanie równań opisujących pracę stołu koncentracyjnego może mieć szersze zastosowanie niż ograniczenie się jedynie do badań obiektu rzeczywistego. Pozwala mianowicie na efektywny dobór parametrów obiektu, a także na ocenę ich „istotności” przy wyznaczaniu maksymalnego stosunku przyspieszeń  $S$ . Stwarza także możliwość prognozowania drgań stołu o określonych parametrach.

Podczas badań, istotne znaczenie miało wyznaczenie wartości parametrów opisujących opory ruchu, tj. tarcie suche  $T_{AS}$ , tłumienie wiskotyczne w sprężynach  $c$ , sztywność odbojnika  $k_z$  itp. Parametry te mogą zmieniać wartości np. w wyniku długotrwałego używania urządzenia. Konieczna więc była weryfikacja tych wartości na podstawie analizy rzeczywistego obiektu.

Obiecujące efekty dotychczasowych prac pozwalają na kontynuację badań w kierunku polioptymalizacji parametrów analizowanego stołu metodami analitycznymi.

## Bibliografia

1. Banaszewski T.: Maksymalna asymetria przyspieszeń stołu koncentracyjnego z wibratorem bezwładnościowym podwójnie dwumasowym. *Mechanika* z. 4, t. 16, Kraków, AGH 1997.
2. Banaszewski T., Filipowicz A.: Przyczyny słabego wykorzystania stołów koncentracyjnych w przemyśle krajowym. *Inżynieria Chemiczna i Procesowa*, nr 21, Politechnika Łódzka, Łódź, 1997.
3. Blaschke W., Blaschke S.: Technika wzbogacania grawitacyjnego. *Stoły koncentracyjne*. Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków, 2001.
4. Filipowicz A.: Badania prędkości transportowej ziaren na stole koncentracyjnym, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Górnictwo I*, z. 245, Gliwice, 2000.
5. Gibson J. E.: *Nieliniowe układy sterowania automatycznego*. WNT Warszawa 1968,
6. Sapiński B., Filipowicz A.: Analysis of Concentrating Table Vibration Using Wavelet Transformation. *Inter. Carpathian Control Conf. ICC 2001*. Krynica, 2001
7. Oprządkiewicz I., Filipowicz A.: Descriptions of vibrations of a concentrating table with an inertial-bumper drive. *International Carpathian Control Conference ICC 2002*. Malenovice, Czechy, 2002.
8. Weiss N. L.: *Mineral processing handbook*. Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining and Petroleum Engineers, Inc. 1985 New York, USA, 1985. ■