

NOWAK Andrzej¹
BRZOZOWSKI Krzysztof²

SYMULACJE NUMERYCZNE DRGAŃ ZESPOŁU ELEKTROD OSADCZYCH

W pracy przedstawiono wyniki symulacji numerycznej drgań układu elektrod osadczych stanowiących fragment sekcji odpylającej w elektrofiltrze suchym. Symulacje przeprowadzono z użyciem modelu numerycznego wykorzystującego metodę hybrydową, stanowiącą połączenie metody sztywnych elementów skończonych oraz metody odkształcalnych elementów skończonych. Szczególną uwagę poświęcono problemowi oceny wpływu przyjętego sposobu dyskretyzacji na wyniki obliczeń. Wykazano stabilność uzyskiwanych wyników w zakresie obliczanych przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń po zastosowaniu odpowiednio gęstego podziału elektrod na pojedyncze elementy.

NUMERICAL ANALYSIS OF VIBRATIONS OF COLLECTING ELECTRODES SYSTEM

The paper presents some results of numerical analysis of vibrations of collecting electrodes being a part of a dust removal system of electrostatic precipitators. A numerical model is formulated by means of a hybrid method, which combines the finite element method (FEM) and the rigid finite element method (RFEM). In the paper the influence of discretisation on calculation results is discussed. It is shown that stability of velocities and accelerations calculated has been achieved for an appropriate number of elements into which the electrodes have been divided.

1. WSTĘP

Wyniki przedstawionych w pracy symulacji numerycznych dotyczą głównie testowego (uproszczonego) układu elektrod osadczych, stosowanych w elektrofiltrach suchych do usuwania pyłów ze spalin emitowanych do atmosfery. Prezentowane analizy powstały w wyniku realizacji kolejnego etapu prac badawczych, zmierzających do podniesienia efektywności mechanicznego oczyszczania elektrod, z których pył jest okresowo usuwany za pomocą drgań wzbudzanych przez układy strzepywaczy. Skuteczność odpylania zależy

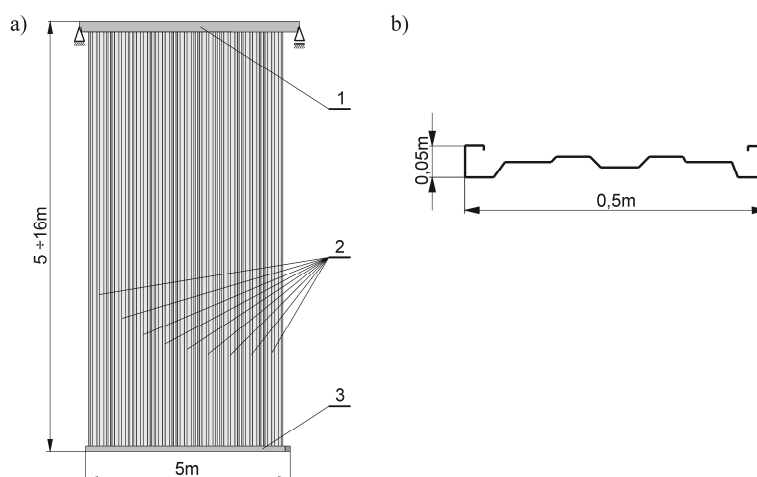
¹Akademia Techniczno-Humanistyczna, Katedra Transportu i Informatyki; 43-309 Bielsko-Biała; ul. Willowa 2.
Tel/Fax: + 48 33 82-79-289, E-mail: a.nowak@ath.eu

²Akademia Techniczno-Humanistyczna, Katedra Transportu i Informatyki; 43-309 Bielsko-Biała; ul. Willowa 2.
Tel: + 48 33 82-79-285, Fax: + 48 33 82-79-289, E-mail: kbrzozowski@ath.eu

przy tym od uzyskiwanych przyspieszeń stycznych i normalnych do powierzchni płyty. Ponieważ zarówno właściwości geometryczne elektrod (profil, długość, grubość), jak i impuls siły wzbudzany przez bijak strzepywacza, decydują o uzyskiwanych wartościach przyspieszeń, przedstawienie propozycji odpowiednich zmian konstrukcyjnych, docelowo zwiększających efektywność elektrofiltru, wymaga w pierwszej kolejności przeprowadzenia szeregu analiz numerycznych.

1.1 Obiekt

W układzie rzeczywistym pojedyncza sekcja (rys. 1a) składa się z kilku, zwykle nie więcej niż dziewięciu elektrod osadczycy -1, zawieszonych na wspólnej belce nośnej -2 i spiętych w dolnej części tzw. drągiem strzepującym -3.



Rys.1. Sekcja elektrod osadczycy (a) o profilach typu SIGMA VI (b)

Profilom elektrod - najczęściej stosowanym przez krajowych producentów elektrofiltrów - jest profil typu SIGMA VI (rys. 1b), wykonywany z walcowanych na zimno, głębokotłocznych blach o grubości $(1,2 \div 1,5) \cdot 10^{-3}$ m.

Elektrody osadczycy o profilach typu SIGMA VI, pomimo długości przekraczającej nawet 16 m, charakteryzują się dobrą sztywnością oraz jednocześnie pozwalają na maksymalne wykorzystanie obwiedni padania wyładowań koronowych emitowanych przez elektrody wysokonapięciowe.

1.2 Metoda

Do analizy drgań elektrod autorzy zastosowali hybrydową metodę elementów skończonych, przedstawioną w [5]. Metoda hybrydowa jest połączeniem metody odkształcalnych elementów skończonych (MES) oraz metody sztywnych elementów skończonych (SES). W metodzie hybrydowej energia odkształcenia wyznaczana jest z wykorzystaniem MES, z kolei do odwzorowania cech bezwładnościowych płyt elektrod

zbiorczych stosowana jest metoda SES. Krótką charakterystykę sposobu dyskretyzacji płyt elektrod z wykorzystaniem zastosowanej metody przedstawiono w kolejnym rozdziale niniejszej pracy.

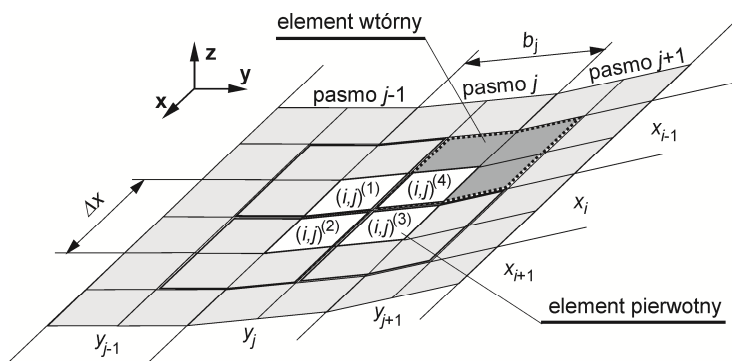
Wstępną weryfikację wykorzystywanej metody przeprowadzono, porównując wartości częstości drgań własnych pojedynczej elektrody, otrzymane w wyniku zastosowania metody hybrydowej, z wartościami częstości drgań własnych uzyskanymi w jednym z dostępnych na rynku komercyjnych pakietów obliczeniowych. Różnica w wartościach pierwszych dziesięciu częstości drgań własnych nie przekraczała 1,5%. Szczegółowe wyniki przedstawiono w pracy [1].

W następnym etapie prac pośrednią weryfikację metody hybrydowej przeprowadzono również w zakresie analiz statycznych. Analizowano ugięcia statyczne dla kilku wybranych układów elektrod osadczych, obciążając układ grawitacją oraz siłą boczną. Również na tym etapie zastosowanie metody hybrydowej prowadzi do uzyskiwania wyników porównywalnych z tymi uzyskiwanymi dla modelu wykorzystującego MES i zaimplementowanego w pakiecie komercyjnym ogólnego przeznaczenia. Szczegółowe wyniki weryfikacji przedstawiono w [2].

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki symulacji numerycznych uzyskanych z wykorzystaniem metody hybrydowej. W szczególności przeprowadzono ocenę wpływu przyjętego sposobu dyskretyzacji elektrod osadczych na zbieżność wyników obliczeń. Do wykonania analiz użyto obliczone przebiegi czasowe przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń wybranych punktów kontrolnych elektrod osadczych w rozpatrywanym układzie, dla zadanego impulsu siły.

2. CHARAKTERYSTYKA METODY HYBRYDOWEJ

Dyskretyzacja płyty elektrody w modelu numerycznym, wykorzystującym metodę hybrydową, wymaga dwustopniowego postępowania. W pierwszej fazie dyskretyzacji przeprowadzany jest podział pierwotny poszczególnych pasm elektrody $j = 1, \dots, n_y$ (rys. 2) na odkształcalne elementy skończone (powłokowe, prostokątne czterowęzłowe). Ten etap umożliwia obliczenie energii odkształcenia.



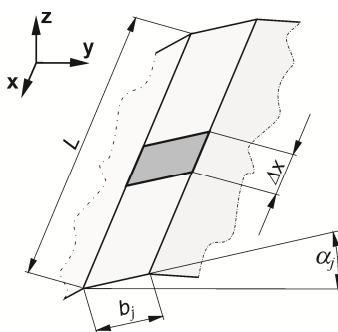
Rys. 2. Schemat podziału wtórnego pojedynczej elektrody

Taki podział, przy ustalonych wartościach parametrów E , ν , α_j , b_j , h (E – moduł Younga, ν – liczba Poissona, α_j , b_j – jak na rys. 3, h – grubość elementu) prowadzi do uzależnienia macierzy sztywności elementów wyłącznie od Δx i $\Delta y = b_j$. Ponadto skutkiem przyjęcia stałej długości elementów Δx jest identyczność macierzy sztywności elementów pojedynczego j -tego pasma płytowego.

W drugiej fazie dyskretyzacji, zgodnie z ideą klasycznej metody SES, rozważane ciało podatne dzieli się na sztywne elementy skończone (ses), zwane dalej elementami wtórnymi (rys. 2), które przejmują własności bezwładnościowe ciała.

Cechą szczególną zastosowanego dwuetapowego procesu dyskretyzacji jest to, że poszczególne płatki elementu pierwotnego należą do różnych elementów wtórnych i odwrotnie – poszczególne segmenty, z których zbudowany jest element wtórny, należą do różnych elementów pierwotnych.

Dla wygenerowanego zbioru elementów wyznacza się ich parametry masowe (płaszczyznowe i odśrodkowe momenty bezwładności) oraz współrzędne $x_{i,j}$, $y_{i,j}$, $z_{i,j}$ środków geometrycznych elementów (i – j), a w dalszej kolejności definiuje wektor współrzędnych uogólnionych \mathbf{q} , macierz mas \mathbf{M} oraz macierz sztywności \mathbf{C} . Szczegółowa dyskusja przekształceń i algorytmizacji metody została zamieszczona w [5].



Rys.3. Pasma płytowe j o szerokości b_j oraz kącie α_j nachylenia do osi y

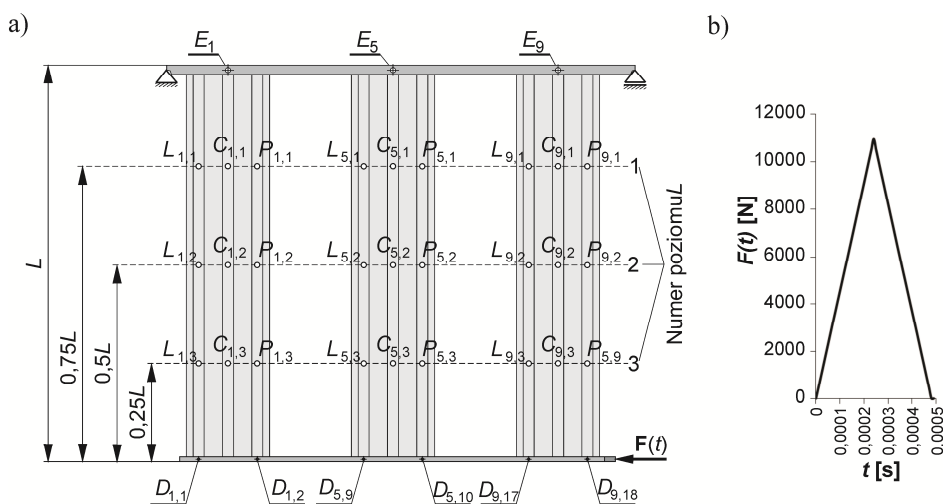
3. ANALIZA UKŁADU ELEKTROD

3.1 Model testowy

Przeprowadzona w pracy analiza wyników symulacji numerycznych dotyczy uproszczonego dyskretnego modelu układu elektrod osadczych (zwanego dalej modelem testowym), którego schemat przedstawiono na rys. 4a. Modelowany układ składa się z elementu nośnego (belki zawieszenia), 3 elektrod zbiorczych typu SIGMA VI oraz drąga strzepującego. Zarówno belkę zawieszenia, jak i drąg strzepujący zamodelowano jako elementy belkowe o zastępczych profilach przekrojów porzecznych dobranych tak, aby ich parametry bezwładnościowe odpowiadały przekrojom rzeczywistym. Dyskretyzację tych elementów układu wykonano z wykorzystaniem klasycznej metody SES [3, 4, 6]. Z kolei do dyskretyzacji elektrod zastosowano metodę hybrydową. Przyjęto długość elektrod $L = 1\text{m}$. Do szczegółowych analiz wybrano punkty $L_{i,p}$, $C_{i,p}$, $P_{i,p}$, rozmieszczone na trzech różnych wysokościach: $0,25L$, $0,5L$ oraz $0,75L$, oznaczonych jak na rys. 4a.

Indeksy i w oznaczeniach punktów określają numer elektrody, do której należą ($i = 1, 5, 9$), a indeksy p – numer poziomu, na którym się znajdują ($p = 1, 2, 3$). Model testowy uwzględniał przegubowe zawieszenie elektrod osadczych na belce nośnej w punktach E_1 , E_5 i E_9 oraz sztywne zawieszenie drąga strzepującego w punktach $D_{i,r}$, gdzie i jest numerem elektrody, a r numerem punktu należącego do drąga ($r = 1, 2, 9, 10, 17, 18$). W obliczeniach nie uwzględniano tłumienia. Warto zauważyć, że pojedyncza płyta o profilu SIGMA VI (rys. 1b) ma 19 pasm o różnej szerokości. Ta liczba była stała. Zmieniano zatem $\Delta x = L/n$, gdzie n – liczba podziałów pasma w kierunku osi x .

W ramach symulacji numerycznej, układ obciążony grawitacją poddano jednocześnie obciążeniu impulsem siły $\mathbf{F}(t)$ (rys. 4b) i porównywano przebiegi przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń wybranych punktów kontrolnych belki zawieszenia i drąga strzepującego oraz elektrod osadczych.

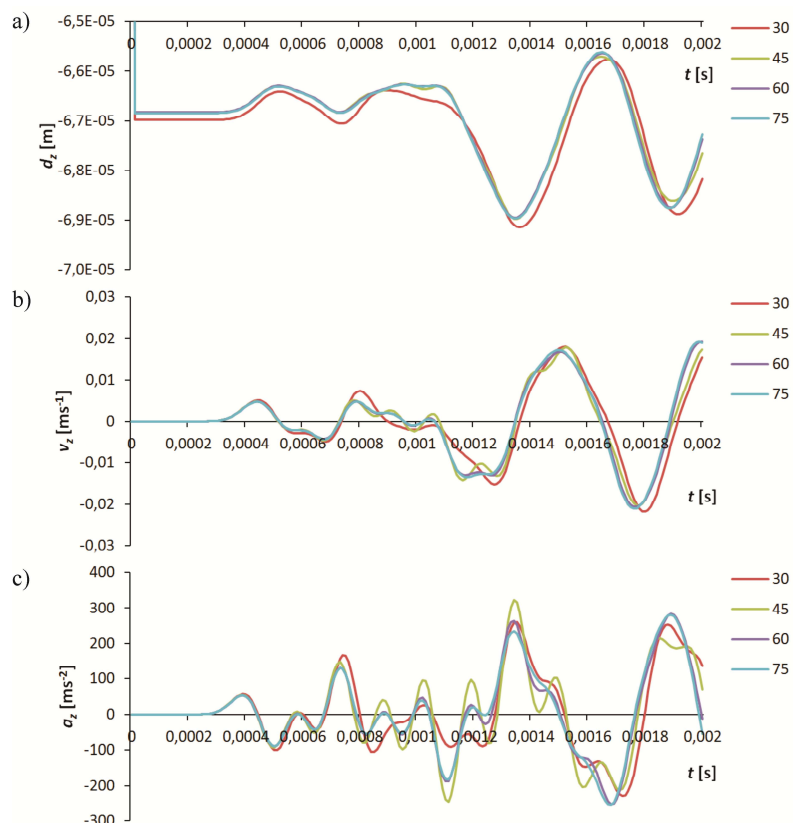


Rys. 4. Schemat modelu testowego sekcji elektrod -(a), obciążonego impulsem siły $\mathbf{F}(t)$ -(b)

3.2 Sposób dyskretyzacji elektrod a wyniki obliczeń numerycznych

Przed przystąpieniem do analizy drgań układu, wywołanych obciążeniem dynamicznym w postaci impulsu siły, przeanalizowano wpływ przyjętego podziału dyskretyzacyjnego elektrod na uzyskiwane wyniki obliczeń. Idealne rozwiązanie powinno być niezależne od przyjętej dyskretyzacji (liczby n). W praktyce jednak, ze względu na koszty obliczeniowe, osiągnięcie takiego rozwiązania jest niemożliwe. Stąd konieczność przeprowadzenia wstępnych analiz, pozwalających na wskazanie takiego sposobu dyskretyzacji, który zapewni akceptowalny kompromis pomiędzy czasem obliczeń, a dokładnością uzyskanych wyników. Standardowa procedura polega przy tym na porównywaniu wyników uzyskanych dla różnej gęstości podziału dyskretyzacyjnego. Problem ten dotyczy wszystkich modeli numerycznych, również modeli implementowanych w komercyjnych pakietach obliczeniowych.

W celu minimalizacji błędu wynikającego z przyjętego sposobu dyskretyzacji wykonano szereg symulacji, w których przyjmowano ten sam model obciążenia układu (grawitacja i impuls siły), a zmianie podlegała gęstość podziału pasm płyt elektrod. Każdorazowo obciążenie dynamiczne w postaci impulsu siły miało przebieg, jak na rys. 4b. Czas wszystkich symulacji ograniczono do 0,002 s.



Rys. 5. Wpływ gęstości siatki dyskretyzacyjnej na wartości składowych normalnych przemieszczenia -(a), prędkości -(b), przyspieszenia -(c)(punkt kontrolny $C_{9,3}$)

Dyskretyzację wykonano dla podziału pasm elektrody po długości, rozpoczynając od podziału na 10 elementów, a następnie na 15, 30, 45, 60 i 75 elementów, co oznacza zastosowanie od 1,5 do 7-krotnego zagęszczenia podziału wejściowego i odpowiednio podziału płyty elektrody na 200÷1500 elementów. Następnie analizowano obliczone przebiegi składowych przemieszczeń d_s , prędkości v_s i przyspieszeń a_s dla punktów kontrolnych elektrod. Indeks $s = (x, y, z)$ jest oznaczeniem składowej, np. a_z oznacza składową normalną przyspieszenia. Ponieważ w analizowanych punktach, dla wszystkich wymienionych składowych występował podobny charakter przesunięcia krzywych

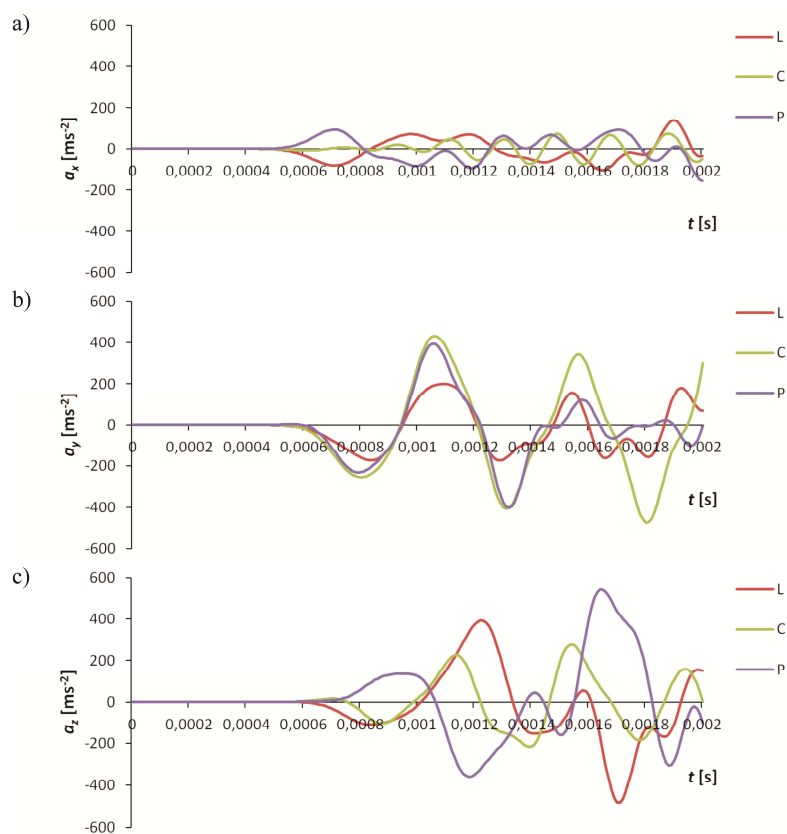
wynikowych, w pracy zaprezentowano zestawienie przebiegów dla składowych normalnych przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia (d_y, v_y, a_y) punktu $C_{9,3}$ (rys. 5).

Można zauważyć, że wyniki są jakościowo zgodne, natomiast różnice ilościowe maleją wraz ze wzrostem liczby n . Analiza wyników obliczeń w odniesieniu do prędkości (rys. 5b) i przyspieszeń (rys. 5c) pozwala przyjąć, że wystarczająca jest dyskretyzacja z użyciem $n = 60$ elementów dla każdego pasma płyty elektrody.

Zastosowany podział oznacza przyjęcie elementów o długości krawędzi równej około 0,017 m i szerokości równej szerokości danego pasma (w profilu SIGMA VI szerokość pasm waha się od 0,008 m do 0,075 m). W takiej konfiguracji cała płyta elektrody jest modelowana jako układ o 7200 stopniach swobody.

3.3 Analiza przyspieszeń

W następnym kroku analizowano zachowanie całego układu, zestawiając przebiegi składowych przyspieszeń w trzech kierunkach dla punktów znajdujących się w połowie długości środkowej elektrody (elektroda nr 5). Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 6.



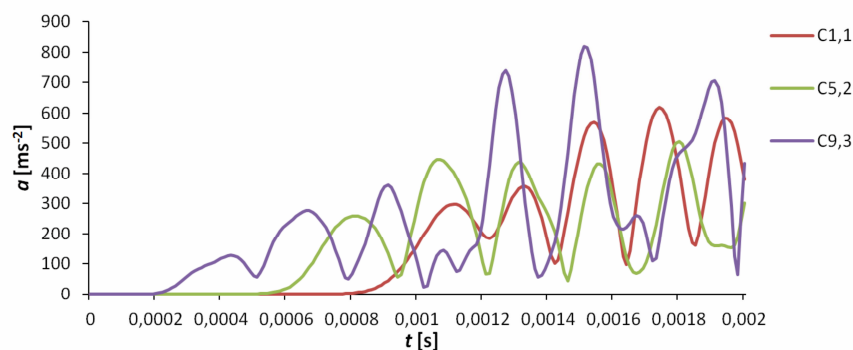
Rys. 6. Przebiegi składowych przyspieszenia w punktach $L_{5,2}$, $C_{5,2}$, $P_{5,2}$: a) a_x , b) a_y , c) a_z

Analiza przedstawionych przebiegów składowych przyspieszeń wskazuje na występowanie pewnych prawidłowości, a mianowicie:

- 1) składowa a_x ma zdecydowanie najmniejszy wpływ na wartość przyspieszenia wypadkowego,
- 2) składowe a_y i a_z , czyli odpowiednio styczna w kierunku przyłożenia impulsu siły oraz normalna do powierzchni elektrody, istotnie wpływają na wartość przyspieszenia wypadkowego,
- 3) w punktach $L_{5,2}$ i $P_{5,2}$ obserwuje się znacznie większe przyspieszenia normalne, powodujące tzw. „falowanie” zewnętrznych pasm elektrod.

Wnioski te znajdują także potwierdzenie w dostępnych autorom wynikach pomiarów przeprowadzonych na pełnym układzie rzeczywistym, zamontowanym na stanowisku badawczym. Potwierdza to pośrednio poprawność zastosowanego sposobu modelowania cech sprężysto-bezwładnościowych analizowanego układu.

Na kolejnym rysunku (rys. 7) przedstawiono obliczony przebieg zmian przyspieszenia wypadkowego w punktach położonych w różnej odległości od drąga strzepującego (punkty $C_{1,1}$, $C_{5,2}$, $C_{9,3}$). Charakter przebiegów ilustruje opóźnienie czasowe wzbudzenia się drgań w analizowanych punktach. Jak należało oczekiwać, im punkt jest bardziej oddalony od źródła zaburzenia, tym później zostaje wzbudzony do drgań.



Rys. 7. Przebiegi składowych przyspieszenia całkowitego a (punkty $C_{1,1}$, $C_{5,2}$, $C_{9,3}$)

Aby przeprowadzić analizę przebiegów przyspieszeń w dziedzinie amplitud, wykonano symulację drgań układu 9 elektrod SIGMA VI, o długości $L = 16$ m. Czas symulacji wydłużono do 0,01 s. Obliczenia wykonano dla gęstości podziału $n = 650$ elementów w kierunku osi x . Analizowano wartości skuteczne przyspieszenia całkowitego $W_{RMS,i,p}$ w punktach kontrolnych $C_{i,p}$, wyrażone zależnością:

$$W_{RMS,i,p} = \frac{1}{T} \left[\int_0^T a_{i,p}^2 dt \right]^{1/2} \quad (1)$$

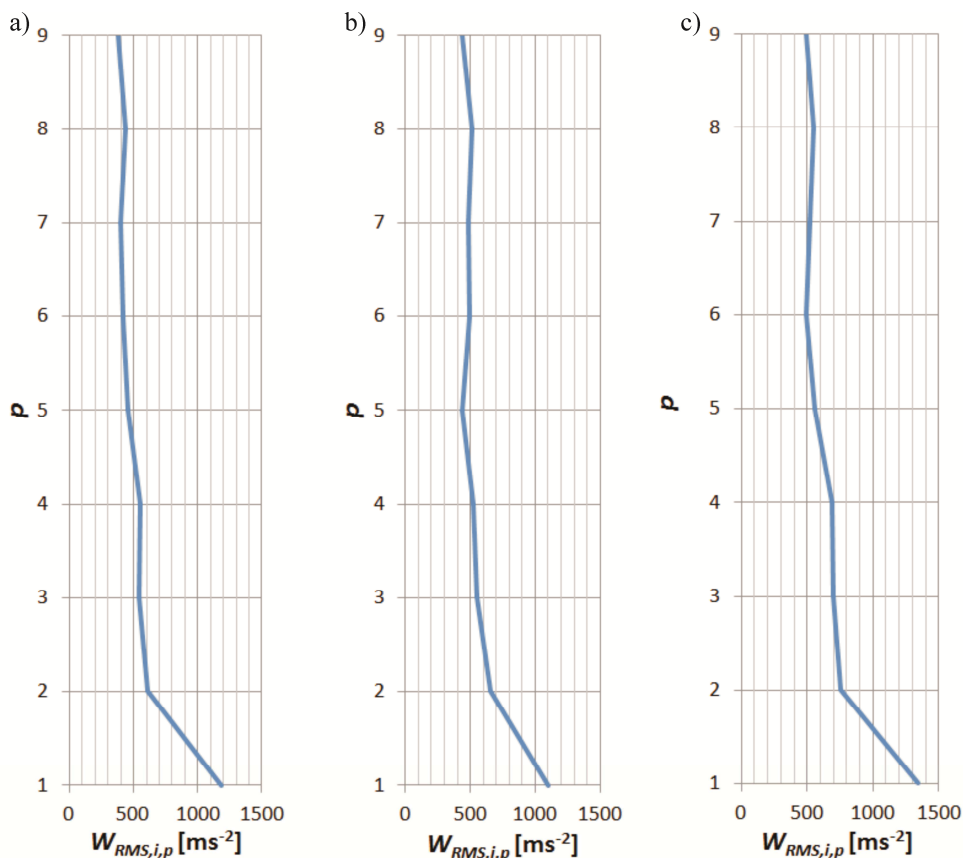
gdzie: T – czas analizy,

$a_{i,p}$ – przyspieszenie całkowite w punkcie kontrolnym $C_{i,p}$,

$i = (1, 5, \dots, 9)$ – oznacza numer elektrody,

$p = (1, 2, \dots, 9)$ – oznacza numer poziomu.

Przyjęto stałą, wynoszącą $L/10$, odległość pomiędzy poziomami p . Na rys. 8 przedstawiono wartości skuteczne przyspieszenia całkowitego w punktach $C_{1,p}$, $C_{5,p}$, $C_{9,p}$.



Rys. 8. Wartości skuteczne $W_{RMS,i,p}$ przyspieszenia całkowitego w punktach $C_{1,p}$ (a), $C_{5,p}$ (b), $C_{9,p}$ (c)

W powyższym zestawieniu obserwuje się spadek wartości skutecznych $W_{RMS,i,p}$ przyspieszenia całkowitego wraz ze wzrostem odległości punktów kontrolnych od drąga strzepującego. Występowanie takiej tendencji jest potwierdzeniem poprawności obliczeniowej badanego modelu.

4. WNIOSKI

Przedstawione w pracy wyniki symulacji numerycznych, w większości dotyczą układu testowego, w którym uwzględniono trzy jednometrowe elektrody osadcze. Uproszczenie to pozwoliło istotnie skrócić czas obliczeń odpowiedzi układu na zadany impuls siły i umożliwiło wykonanie szeregu obliczeń dla różnej liczby elementów wykorzystywanych w procesie dyskretyzacji płyty elektrody. Na podstawie otrzymanych wyników wskazano

wymiary elementów, na które należy podzielić płytę elektrody, w celu zapewnienia minimalizacji błędów związanego z procesem dyskretyzacji w metodzie hybrydowej. Należy przy tym zaznaczyć, że sugerowane dla analizowanego modelu testowego wymiary elementów mogą być bezpośrednio zastosowane w podziale płyt elektrod osadzących na elementy skończone w modelach „pełnych”, tzn. składających się z dziewięciu szesnastometrowych elektrod osadzących o profilach typu SIGMA VI. Następny etap prac będą stanowić dodatkowe próby weryfikacji obliczeniowej, a także pomiarowej takich układów.

Przedstawiona metoda i modele zbudowane przy jej użyciu znajdą zastosowanie w opracowywanym przez zespół, dedykowanym pakiecie obliczeniowym do analizy drgań układu elektrod.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Adamiec-Wójcik I., Nowak A. P., Wojciech S.: *Comparison of methods for vibration analysis of electrostatic precipitators*, Acta Mechanica Sinica (2011) Vol. 27, No. 1, pp. 72-79.
- [2] Brzozowski K., Nowak A.P.: *Weryfikacja obliczeniowa hybrydowej metody elementów skończonych*, Modelowanie Inżynierskie (2010) T.8 Nr 39, ss. 27-34.
- [3] Kruszewski J., Gawroński W., Wittbrodt E., Najbar F., Grabowski S.: *Metoda sztywnych elementów skończonych*, Warszawa, Arkady 1975.
- [4] Kruszewski J., Sawiak S., Witbrodt E., *Metoda sztywnych elementów skończonych w dynamice konstrukcji*, Warszawa, WN-T 1999.
- [5] Nowak A. P., Adamiec-Wójcik I.: *Vibration analysis of collecting electrodes of precipitators by means of the hybrid finite element method*, Multibody Dynamics, ECCOMAS Thematic Conference, Conference Proceedings, Warsaw 2009, pp. 214-217.
- [6] Wittbrodt E., Adamiec-Wójcik I., Wojciech S.: *Dynamics of flexible multibody systems Rigid finite element method*, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag 2006.

Pracę wykonano w ramach realizacji projektu rozwojowego badawczego nr NR03-0036-04/2008, finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.