

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.Д. КОШУР

*Красноярский Государственный Технический Университет,
Институт Вычислительного Моделирования СО РАН, Россия*
e-mail: koshur@fivt.krasn.ru

The presented results are concerned with computer modelling of the proposed animated composite materials as a complex mechanic, neural network and electronic system which has been named as the Matrix Electronic Materials (MEM). The results are shown an ability of MEM for realisation active elastic waves transformation with respect to amplitudes and frequency and may be used in applications for active suppression of noise and vibration.

Введение

Николай Николаевич Яненко часто высказывал плодотворные идеи на научных семинарах, проводимых под его руководством в Институте теоретической и прикладной механики СО АН СССР. В процессе обсуждения проблем компьютерного моделирования, он неоднократно подчеркивал целесообразность расширением понятия разностной схемы и превращения ее в первичную дискретную модель рассматриваемого объекта или процесса. Классическую форму модели в виде системы интегро-дифференциальных уравнений можно доопределить на основе метода дифференциального приближения [6], хотя во многих случаях моделирования структурированных сред предельное уменьшение параметров бессодержательно в физическом смысле. В монографии [1] представлено развитие этого подхода для моделировании динамических процессов деформирования и разрушения элементов конструкций из композитных материалов с различной структурой.

Дальнейшее обобщение дискретно-структурных принципов моделирования и дополнительное введение в композитный материал активных компонент, привело автора к разработке и компьютерному моделированию новых высокотехнологичных анимационных композитов в виде МЭМ [2,3], которые в дальнейшем могут послужит основой для создания интеллектуальных композитных материалов с управляемой адаптивной реакцией на внешние воздействия.

Компьютерное моделирование МЭМ

Разработка и компьютерное моделирование новых функциональных свойств композиционных материалов и конструкций, наделенных некоторым подобием интеллекта (Smart Composite Materials and Structures) актуально для современной и будущей технологии с широкой областью приложений от космических антенн до бытовой техники [7]. Активное функционирование таких материалов обеспечивается благодаря структурным включениям оптических и электрострикционных компонент, в частности, слоев или семейств волокон из пьезокерамики PZT. Реакция МЭМ на внешние воздействия связывается с минимизацией заданных целевых функционалов, подобно задачам оптимального и адаптивного управления динамическим процессом, воздействуя на него через внедренные в композиционный материал активные структурные компоненты - актуаторы, способные совершать работу и целенаправленно трансформировать энергию волновых процессов, преобразуя амплитуды и частоты упругих волн [4]. В качестве управляющих блоков, через которые осуществляется соединений между сенсорами и актуаторами композитного материала, достаточно перспективным является использование искусственных нейронных сетей различной архитектуры, обучение или настройка которых производится как минимизация заданных критериев качества [5].

На рис. 1 и рис. 2 показаны две схемы нейросетевого управления (NN) процессом динамического деформирования слоистой металлокерамической пластины, содержащей 13 чередующихся слоев из алюминия и керамики, под действием изменяющего внешнего давления $F(t) = F_0 \sin(\omega t)$ на лицевой поверхности пластины. Изменение электрическими напряжениями в активных слоях керамики осуществляется энергетическим блоком (G).

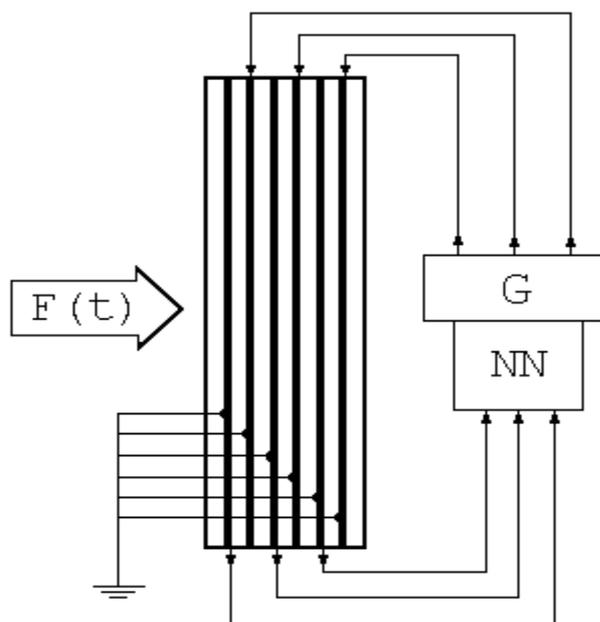


Рис. 1: Схема включения нейросетевого блока управления с входными сигналами от трех сенсорных элементов – трех пассивных слоев пьезокерамики.

Электрические напряжения в 1, 2 и 3-ем слоях пассивной пьезокерамики образуют входной сигнал для управляющей нейронной сети $\mathbf{V}^{in} = (V_1, V_3, V_5)$. Выходными сигналами энергетического блока и нейронной сети являются подаваемые на изолированные обкладки активных пьезоэлектрических слоев с номерами 2, 4, 6 электрические напряжения $\mathbf{V}^{out} = (V_2, V_4, V_6)$.

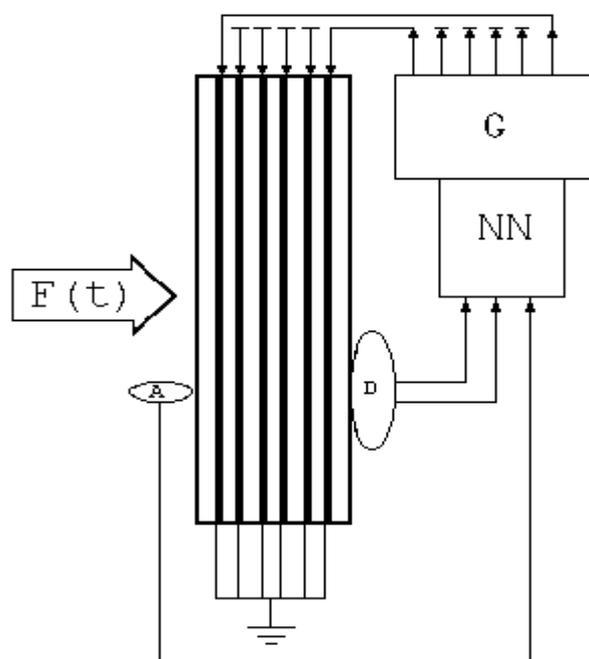


Рис. 2: Схема включения нейросетевого блока по типу автоматического регулирования с выходными сигналами в виде электрических напряжений для шести активных слоев пьезокерамики.

Входными сигналами для управляющей нейронной сети для схемы рис. 2 являются величины $y_1 = (v_s(t))^2$, $y_2 = v_s(t)a_s(t)$, $y_3 = F(t)$, которые формируют входной вектор $\mathbf{Y}^{in} = (y_1, y_2, y_3)$. Предполагается, что емкостными

датчиками (В) на тыльной поверхности пластины измеряется величина скорости $v_s(t)$ и ускорения $a_s(t)$, на лицевой поверхности величина $F(t)$ измеряется датчиком давления (А). Выходными сигналами служат электрические напряжения, подаваемые на шесть внутренних пьезоэлектрических слоев $\mathbf{V}^{\text{out}} = (V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6)$.

Обе схемы включения нейросетевого блока управления соответствуют введению звена обратной связи в рассматриваемой динамической системе.

Компьютерная модель для слоистых металлокерамических композитов типа МЭМ [2,3] построена на основе дискретно-вариационного метода (ДВМ) [1]. Использование ДВМ для разработки дискретных моделей обусловлено его прямой предназначенностью для численного моделирования структурных композиционных материалов с различными свойствами, в частности содержащих пассивные компоненты - слои из алюминия, и активные структурные компоненты - пьезоэлектрические слои из керамики PZT.

В качестве целевых функционалов были рассмотрены следующие:

$$J_1(\mathbf{W}) = \|\mathbf{v}_s\| = (1/T) \left\{ \int_0^T (v_s)^2 dt \right\}^{1/2},$$

$$J_2(\mathbf{W}) = \|\mathbf{u}_s - \mathbf{u}_s^{\text{opt}}\| = (1/T) \left\{ \int_0^T (u_s - u_s^{\text{opt}})^2 dt \right\}^{1/2}.$$

Здесь \mathbf{W} - вектор настраиваемых параметров нейронной сети из определенного класса, T - время четырехкратного пробега упругих возмущений по толщине композитной пластины, v_s - скорость перемещений тыльной поверхности пластины, u_s - перемещение тыльной поверхности пластины, $u_s^{\text{opt}} = f(t, \omega^{\text{opt}})$ - заданная функция перемещения тыльной поверхности пластины с требуемой частотой ω^{opt} .

Минимизация функционала J_1 по параметрам \mathbf{W} нейронной сети соответствует максимальному уменьшению колебаний тыльной поверхности пластины. Минимизация функционала J_2 обеспечивает последовательную трансформацию упругих колебаний (приходящих с лицевой на тыльную поверхность пластины) к заданной форме и частоте, а настраиваемая нейронная сеть реализует это управление как функция от входных сигналов.

Значения функционалов J_1, J_2 определяются в результате численного интегрирования в интервале $t \in [0, T]$ системы обыкновенных дифференциальных уравнений движения узловых масс дискретных элементов композитной пластины [1-5] с дополнительными внутренними связями, выраженными в дифференциальной и алгебраической форме. Минимизация функционалов по параметрам нейронной сети \mathbf{W} проводилась различными алгоритмами первого и нулевого порядка. Наиболее эффективными для данных задач оказались алгоритм Хука-Дживса и алгоритм случайного спуска с комбинированным обучением. Для найденных оптимальных параметров \mathbf{W}^* и рассмотренных вариантов нейросетевого управления удалось осуществить уменьшение амплитуд колебаний в окрестности тыльной поверхности на один десятичный порядок.

На рис. 3 приведены графики перемещений $u_s(t)$ - при деформировании пластины без включения управления (кривая 1), когда все пьезокерамические слои пластины пассивные и $u_s^*(t)$ - для найденного нейросетевого управления (кривая 2) при $\min J_1 = J_1(\mathbf{W}^*)$.

На рис. 4 представлены графики изменения скорости перемещения $v_s(t)$ (кривая 1) для пассивного режима деформирования и скорости $v_s^*(t)$ (кривая 2) с существенным уменьшением амплитуд колебаний тыльной поверхности композитной пластины для найденного нейросетевого управления при $\min J_1 = J_1(\mathbf{W}^*)$.

На рис. 5 показаны совмещенные графики для заданных перемещений $u_s^{\text{opt}} = f(t, \omega^{\text{opt}})$ в функционале качества J_2 и перемещения $u_s^{**}(t)$, полученного для найденного нейросетевого управления при $\min J_2 = J_2(\mathbf{W}^{**})$. За счет настройки 30 параметров трехслойной нейронной сети значение функционала $J_2(\mathbf{W})$ удалось уменьшить только в три раза, при этом значение $J_2(\mathbf{W}^{**})$ осталось еще недостаточно близким к нулю. Поэтому расхождение между кривыми на рис. 5 еще достаточно сильное, но при этом средняя частотная характеристика $u_s^{**}(t)$ достаточно близка к значению ω^{opt} .

Чтобы представить физический процесс управления электрическими напряжениями для схемы рис. 1 при минимизации J_1 , т.е. уменьшении амплитуд колебаний на тыльной поверхности металлокерамической пластины, на рис. 6 в виде поверхности $E E_{\text{све}} = E(z, t)$ показано изменение напряженности электрического поля в трех слоях керамики при найденном нейросетевом управлении.

Общая волновая картина деформирования металлокерамической пластины приведена на рис. 7 и рис. 8.

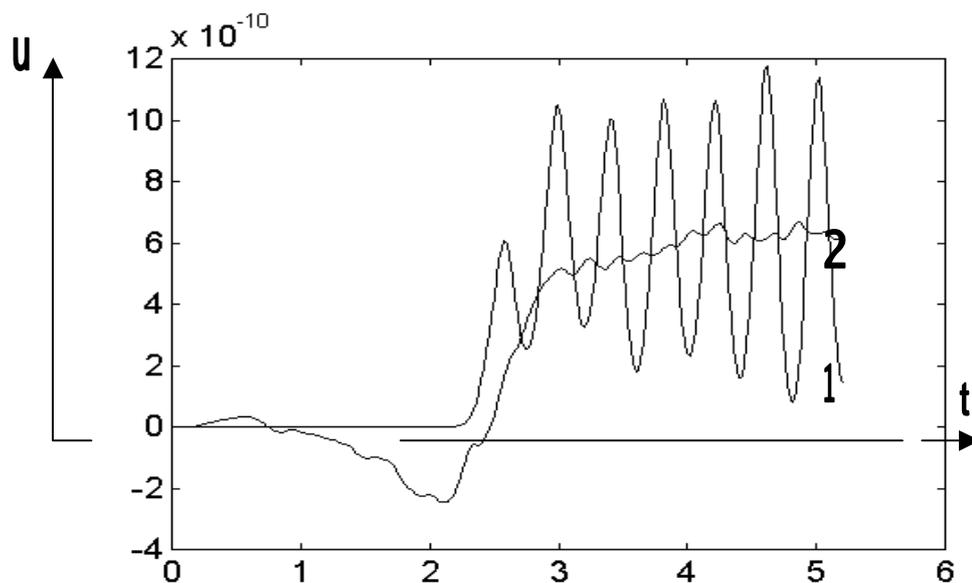


Рис. 3: Изменение перемещений $u_s(t)$ - кривая 1 - при динамическом деформировании композитной пластины в пассивном режиме и $u_s^*(t)$ - кривая 2 - для найденного нейросетевого управления (время t в микросекундах).

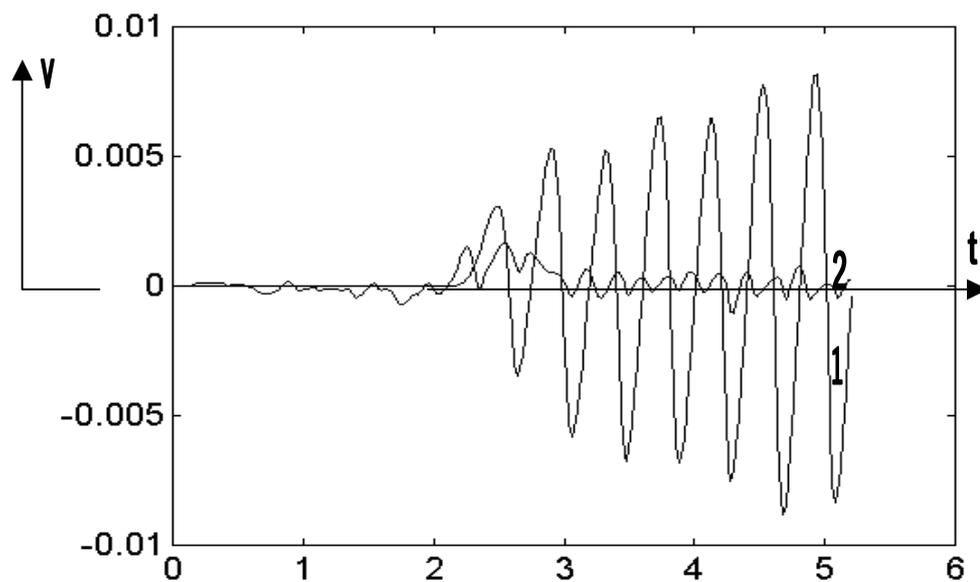


Рис. 4: Изменение скоростей $v_s(t)$ - кривая 1 - при динамическом деформировании композитной пластины в пассивном режиме и $v_s^*(t)$ - кривая 2 - для найденного нейросетевого управления (время t в микросекундах).

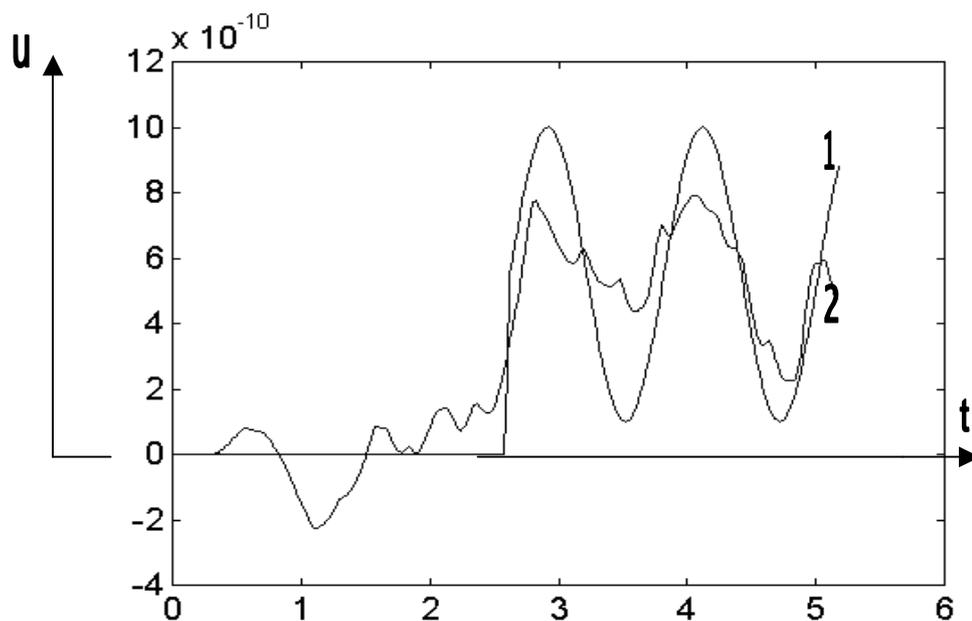


Рис. 5: Графики заданного перемещения $u_s^{opt}=f(t, \omega^{pt})$ - кривая 1 - для $\omega^{pt} = \omega/3$ и перемещения $u_s^{**}(t)$ - кривая 2 - для найденного нейросетевого управления при $J_2 \rightarrow \min$ (время t в микросекундах).

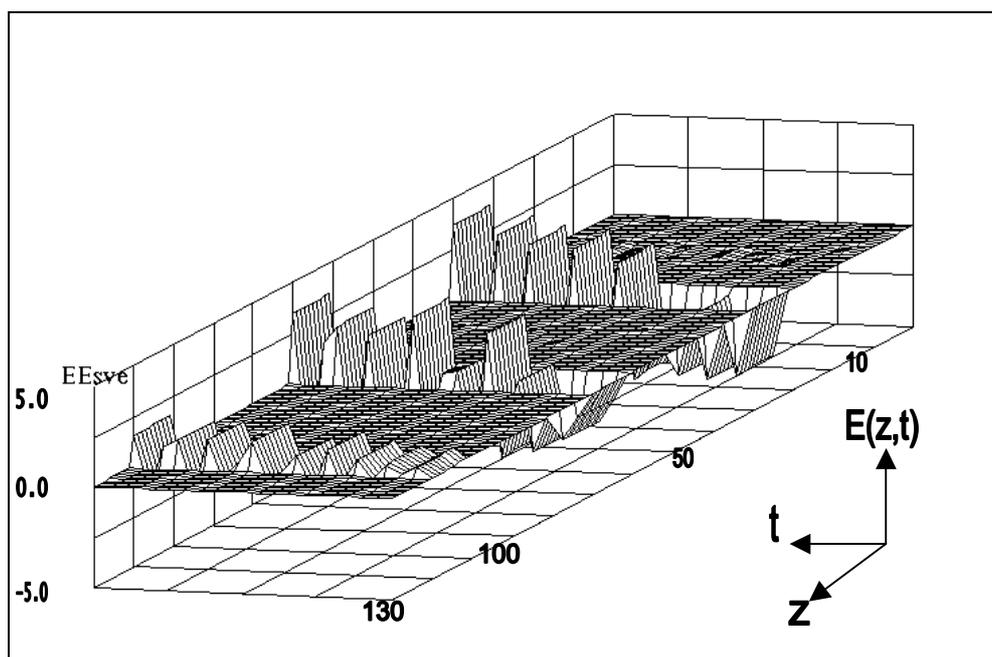


Рис. 6: Изменение напряженности электрического поля в трех слоях керамики при найденном нейросетевом управлении $J_1 \rightarrow \min$.

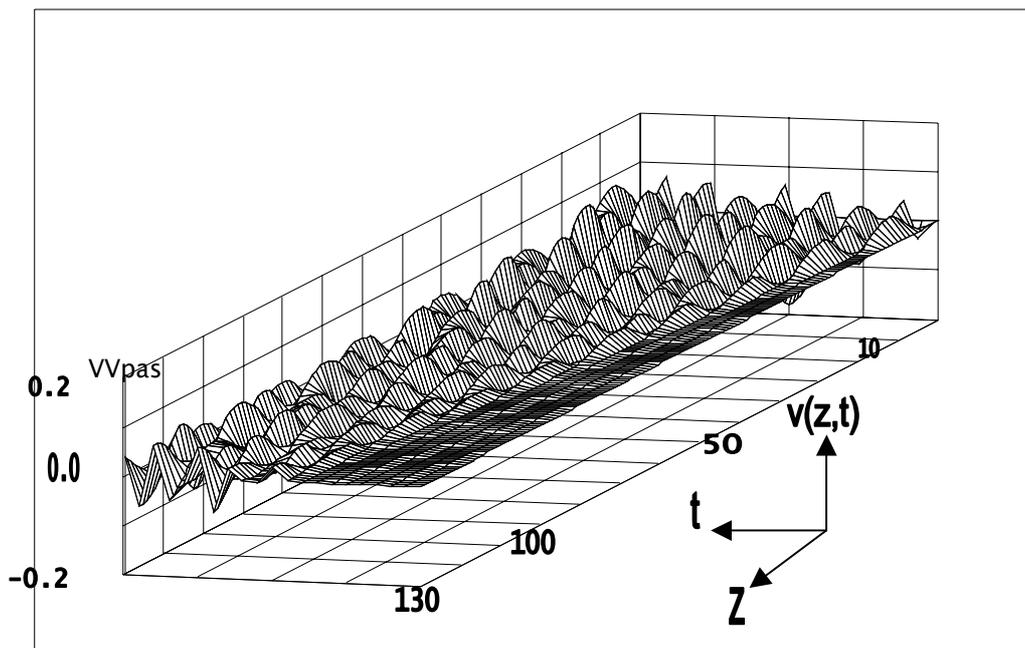


Рис. 7: Распределение скоростей перемещений $v(z,t)$ композитной пластины в пассивном режиме деформирования.

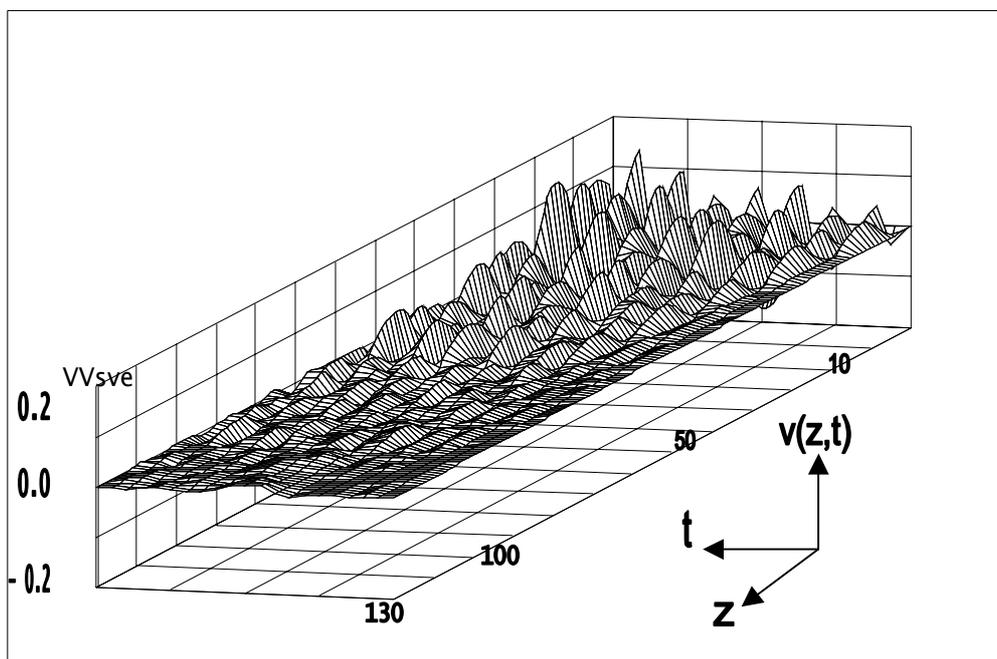


Рис. 8: Распределение скоростей перемещений $v(z,t)$ композитной пластины для найденного нейросетевого управления при $J_1 \rightarrow \min$.

На рис. 7 в виде поверхности $VV_{pas}=v(z,t)$ показано изменение распределения скоростей по толщине пластины вдоль координаты z (130 дискретных элементов, по 10 в каждом слое) и времени t в пассивном режиме деформирования.

На рис. 8 в виде поверхности $VV_{sve}=v(z,t)$ показано изменение распределения скоростей по толщине пластины и времени t для найденного нейросетевого управления электрическими напряжениями в трех четных

пьезоэлектрических слоях. Ближайшая граница поверхностей соответствует тыльной стороне пластины, где амплитуды скоростей перемещений, благодаря найденному управлению, снижены на порядок.

Анализ результатов проведенных вычислительных экспериментов с найденными нейросетевыми управлениями для подавления различных частот внешнего воздействия из некоторого диапазона показал, что достаточной универсальностью или широкой адаптивностью рассмотренные виды управления, к сожалению, не обладают. В частности, синоптические карты весов нейронных сетей, полученных для подавления амплитуд колебаний на тыльной поверхности пластины, могут сильно отличаться для различных частот внешних воздействий. По этой причине были проведены вычислительные эксперименты по поиску и настройке в определенном смысле универсального нейросетевого управления для заданного интервала частот $\Omega = [0.5\omega, 2.0\omega]$, где $\omega = 5\pi \cdot 10^6$ 1/с. При этом рассматривалась минимизация функционала вида:

$$J_1^0(\mathbf{W}) = 1/(1.5\omega T) \left\{ \iint_{\Omega \times [0, T]} (v_s)^2 dt d\omega \right\}^{1/2},$$

Для решения задачи $J_1^0 \rightarrow \min$ требуются большие вычислительные затраты по сравнению с рассмотренной задачей $J_1 \rightarrow \min$ с фиксированной круговой частотой ω . При минимизации $J_1^0(\mathbf{W})$ для универсального нейросетевого управления было достигнуто снижение амплитуды колебаний на тыльной поверхности в 2-3 раза, но не на порядок, как это возможно для каждой частоты в отдельности.

В дальнейшем планируется найти эффективное адаптивное управление за счет введения двухступенчатого управления, содержащего блок распознавания частоты с последующим переключением на настроенный блок управления одной из базовых частот, конечный набор которых с требуемой эффективностью по качеству управления перекрывает определенный интервал частот внешних воздействий. Данный способ управления основан на покрытии интервала Ω конечным набором малых окрестностей $(\omega_i - \varepsilon, \omega_i + \varepsilon)$, где ω_i для $i = 1, 2, \dots, n$ найденный набор базовых частот, ε допустимая погрешность в определении частоты, согласованная с локально адаптивными свойствами найденных нейросетевых управлений для базовых частот ω_i .

Заключение

Найденные с помощью компьютерного моделирования варианты МЭМ в виде композитных пластин с нейросетевым управлением указывают на возможность создания достаточно тонких активных слоистых преград для гашения упругих волн не за счет демпфирования и пассивного отражения на границах слоев с резко изменяющимися импедансами, а за счет последовательной трансформации упругих волн с помощью управляемого воздействия электрическими полями на активные структурные включения из пьезоэлектрических материалов.

В виду способности управляющих и вычислительных блоков, с использованием нейронных сетей, осуществлять высокое быстродействие при преобразовании информации, использование нейросетевых распознающих и управляющих блоков как составляющих элементов комплексной системы, объединяющей механическую, электронную и нейросетевую подсистемы и называемых Матричными Электронными Материалами (МЭМ) является перспективным для управления в режиме реального времени.

Список литературы

- [1]. Кошур В.Д., Немировский Ю.В. *Континуальные и дискретные модели динамического деформирования элементов конструкций*. Новосибирск, Наука, 1990, 198.
- [2]. Koshur V.D. Active and Passive Neural Network Control of Shock Waves Transformations in Laminated Metal-Ceramic Composites, Concept of the Matrix Electronic Materials (MEM). *Modelling and Control of Adaptive Structures*, Edited by U. Gabbert, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 11, Nr. 268, Dusseldorf, VDI Verlag 1998, 361-366.
- [3]. Кошур В.Д. Моделирование процессов управления трансформацией упругих волн в слоистых металлокерамических композитах, концепция матричных электронных материалов. *Доклады Академии наук, РАН*, 1998, том 363, № 2, 181-183.
- [4]. Кошур В.Д. Применение нейронных сетей для управления трансформацией деформационных волн в слоистых пьезоэлектрических композитах. *Труды Всероссийской научно-технической конференции: Нейроинформатика-99, Часть 2*, МИФИ, Москва, 1999, 236-244.

- [5]. Кошур В.Д. Проектирование и компьютерное моделирование интеллектуальных матричных электронных материалов на основе двухуровневого нейросетевого управления. *Труды второй Всероссийской научно-технической конференции: Нейроинформатика-2000, Часть 1*, МИФИ, Москва, 2000, 249-254.
- [6]. Шокин Ю.И., Яненко Н.Н. *Метод дифференциального приближения*. Новосибирск, Наука, 1985, 365.
- [7]. Hanselka H. Realization of Smart Structure by Using Fiber Composite Materials. *Proceeding of the Second Scientific Conference Smart Mechanical Systems - Adaptronics*, Otto-von-Guericke University of Magdeburg, 18-19 March 1997, Published by University of Magdeburg, 1997, 1-10.