Список литературы

1 **Зеленая, А. С.** Постановка задачи об изгибе прямоугольной трехслойной пластины со сжимаемым заполнителем / А. С. Зеленая // Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы: тез. докладов V Междунар. науч. семинара, Москва, 17–19 октября 2016 г. / МАИ (Национальный исследовательский университет). – М., 2016. – С. 79–80.

2 **Зеленая, А. С.** Деформирование упругой трехслойной прямоугольной пластины со сжимаемым заполнителем / А. С. Зеленая // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. Естественные науки. – 2017. – № 6 (105). – С. 89–95.

3 **Козел, А. Г.** Влияние сдвиговой жёсткости основания на напряжённое состояние сэндвич-пластины / А. Г. Козел // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2018. – № 6 (332). – С. 25–35.

4 **Козел, А. Г.** Уравнения равновесия упругопластической круговой пластины на основании Пастернака / А. Г. Козел // Механика. Исследования и инновации : Междунар. сб. науч. тр. – Гомель : БелГУТ, 2018. – Вып. 11. – С. 127–133.

5 **Леоненко, Д. В.** Собственные колебания трехслойной круговой пластины, скрепленной с инерционным основанием / Д. В. Леоненко // Теоретическая и прикладная механика : Междунар. науч.-техн. сб. – Минск : БНТУ, 2019. − Вып. 34.– С. 143–149.

6 **Леоненко, Д. В.** Импульсные колебания трехслойных стержней на упругом инерционном основании Пастернака / Д. В. Леоненко // Механика. Исследования и инновации : Междунар. сб. науч. тр. / Белорус. гос. ун-т транспорта. – Гомель, 2019. – Вып. 12. – С. 140–145.

7 **Нестерович, А. В.** Уравнения равновесия трехслойной круговой пластины при неосесимметричном нагружении / А. В. Нестерович // Теоретическая и прикладная механика. – 2019. – Вып. 34. – С. 154–159.

8 **Нестерович, А. В.** Деформирование трехслойной круговой пластины при косинусоидальном нагружении в своей плоскости / А. В. Нестерович // Проблемы физики, математики и техники. – 2020. – № 1 (42). – С. 85–90.

9 **Старовойтов, Э. И.** Деформирование упругопластической трехслойной круговой пластины в температурном поле / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // Механика композитных материалов. – 2019. – Т. 55. – № 4. – С. 727–740.

10 **Старовойтов, Э. И.** Нелинейное деформирование трехслойной пластины со сжимаемым заполнителем / Э. И. Старовойтов, Ю. В. Захарчук // Механика машин, механизмов и материалов. – 2019. – № 3 (48). – С. 26–33.

11 **Старовойтов, Э. И.** Изгиб круговой трехслойной пластины с легким сжимаемым заполнителем / Э. И. Старовойтов, Ю. В. Захарчук // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2018. – № 4. – С. 88–97.

УДК 539.3, 539.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ УПРУГОДИФФУЗИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ОРТОТРОПНОЙ ПЛАСТИНЫ КИРХГОФА – ЛЯВА

А. В. ЗЕМСКОВ[1,2], Д. В. ТАРЛАКОВСКИЙ[2,1]

[1]Московский авиационный институт (НИУ),

[2]НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

Рассматривается задача о нестационарных упругодиффузионных колебаниях прямоугольной ортотропной пластины Кирхгофа – Лява, находящейся в поле совместного действия механического и диффузионного полей (рисунок 1).

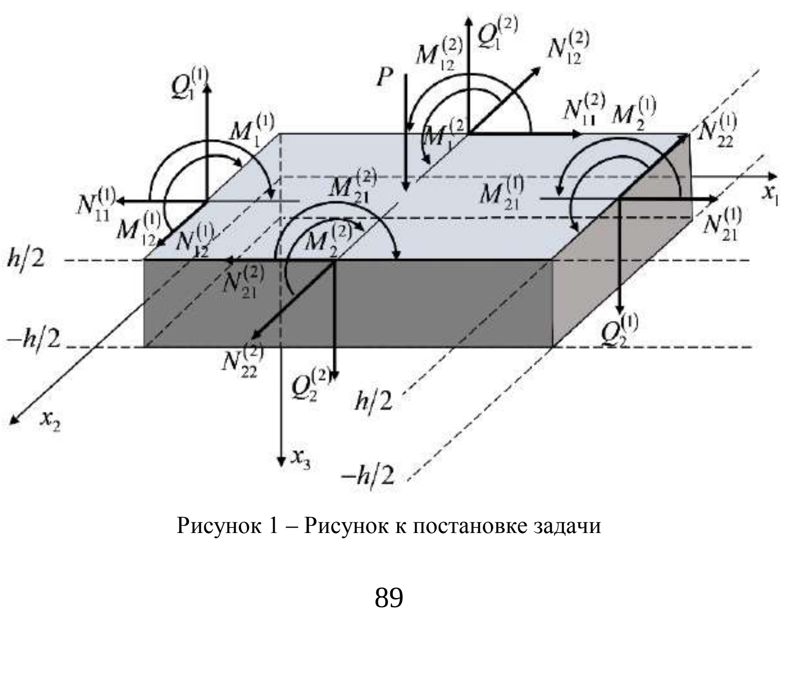

Рисунок 1 – Рисунок к постановке задачи

Для математической постановки задачи используется система уравнений механодиффузии для анизотропных сплошных сред [1–6]. Из неё, с помощью вариационного принципа Даламбера, получена модель упругодиффузионных поперечных колебаний ортотропной прямоугольной пластины [7, 8]:

$$
\begin{gathered}
\frac{\partial^2 \ddot{w}}{\partial x_1^2}+\frac{\partial^2 \ddot{w}}{\partial x_2^2}-\frac{12}{h^2}\ddot{w}=\frac{\partial^4 w}{\partial x_1^4}+2\left(C_{12}+2C_{66}\right)\frac{\partial^4 w}{\partial x_1^2\partial x_2^2}+C_{22}\frac{\partial^4 w}{\partial x_2^4}+ \\
+\sum_{q=1}^{N}\left(\alpha_1^{(q)}\frac{\partial^2 H_q}{\partial x_1^2}+\alpha_2^{(q)}\frac{\partial^2 H_q}{\partial x_2^2}\right)-\frac{12}{h^3}\left(\frac{\partial m_2}{\partial x_2}+\frac{\partial m_1}{\partial x_1}+q\right), \\
\dot{H}_q+\tau_q\ddot{H}_q=D_1^{(q)}\frac{\partial^2 H_q}{\partial x_1^2}+D_2^{(q)}\frac{\partial^2 H_q}{\partial x_2^2}+\Lambda_{11}^{(q)}\frac{\partial^4 w}{\partial x_1^4}+\left(\Lambda_{12}^{(q)}+\Lambda_{21}^{(q)}\right)\frac{\partial^4 w}{\partial x_1^2\partial x_2^2}+\Lambda_{22}^{(q)}\frac{\partial^4 w}{\partial x_2^4}+\frac{12}{h^3}z_q.
\end{gathered}
\tag{1}
$$

Здесь точки обозначают производную по времени. Все величины в выражении (1) являются безразмерными. Для них приняты следующие обозначения

$$
\begin{gathered}
x_i=\frac{x_i^*}{l},\; w=\frac{w^*}{l},\; \tau=\frac{Ct}{l},\; C_{ij}=\frac{C_{ij}^*}{C_{11}^*},\; C^2=\frac{C_{11}^*}{\rho},\; l_m=\frac{l_m^*}{l},\; \tau_q=\frac{C\tau^{(q)}}{l},\; m_i=\frac{m_i^*}{C_{11}^*}, \\
\alpha_i^{(q)}=\frac{\alpha_i^{*(q)}}{C_{11}^*},\; D_i^{(q)}=\frac{D_i^{*(q)}}{Cl},\; \Lambda_{ij}^{(q)}=\frac{m^{(q)}D_i^{*(q)}\alpha_j^{*(q)}n_0^{(q)}}{\rho RT_0 Cl},\; q=\frac{q^*}{C_{11}^*},\; z_q=\frac{Lz^{(q)}}{C},\; h=\frac{h^*}{l},
\end{gathered}
$$

где t – время; x_i^* – прямоугольные декартовы координаты; w^* – прогибы пластины; l – характерный линейный размер в задаче (в данном случае – диагональ пластины, которая имеет размеры $l_1^*\times l_2^*$ и толщину h^*); $\eta^{(q)}=x_3H_q$ – приращение концентрации q-й компоненты вещества в составе N-компонентной среды; $n_0^{(q)}$ – начальная концентрация q-го вещества; C_{ij}^* – упругие постоянные; ρ – плотность; $\alpha_i^{*(q)}$ – коэффициенты, характеризующие объёмное изменение среды за счёт диффузии; $D_i^{*(q)}$ – коэффициенты самодиффузии; R – универсальная газовая постоянная; T_0 – температура среды; $m^{(q)}$ – молярная масса q-го вещества; $\tau^{(q)}$ – время релаксации диффузионных потоков; m_i^* – распределенные по поверхности моменты; q^* – распределенная по поверхности поперечная нагрузка; $z^{(q)}$ – распределённая по поверхности плотность объемных источников массопереноса.

Замыкают постановку начально-краевые условия, которые в случае чистого изгиба под действием изгибающих моментов $M_k^{(l)}$, изображенных на рисунке 1, имеют вид

$$
\begin{gathered}
\left.\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2}+C_{12}\frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2}+\sum_{q=1}^{N}\alpha_1^{(q)}H_q\right)\right|_{x_1=0}=f_{111},\;\left.\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2}+C_{12}\frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2}+\sum_{q=1}^{N}\alpha_1^{(q)}H_q\right)\right|_{x_1=l_1}=f_{112}, \\
\left.\left(C_{12}\frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2}+C_{22}\frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2}+\sum_{q=1}^{N}\alpha_2^{(q)}H_q\right)\right|_{x_2=0}=f_{121},\;\left.\left(C_{12}\frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2}+C_{22}\frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2}+\sum_{q=1}^{N}\alpha_2^{(q)}H_q\right)\right|_{x_2=l_2}=f_{122}, \\
w\big|_{x_1=0}=f_{211}(x_2,\tau),\quad w\big|_{x_1=l_1}=f_{212}(x_2,\tau),\quad w\big|_{x_2=0}=f_{221}(x_1,\tau),\quad w\big|_{x_2=l_2}=f_{222}(x_1,\tau), \\
H_q\big|_{x_1=0}=f_{q+2,11}(x_2,\tau),\, H_q\big|_{x_1=l_1}=f_{q+2,12}(x_2,\tau),\, H_q\big|_{x_2=0}=f_{q+2,21}(x_1,\tau),\, H_q\big|_{x_2=l_2}=f_{q+2,22}(x_1,\tau), \\
f_{111}(x_2,\tau)=-\frac{12}{h^3}M_1^{(1)}(x_2,\tau),\quad f_{112}(x_2,\tau)=-\frac{12}{h^3}M_2^{(1)}(x_2,\tau), \\
f_{121}(x_1,\tau)=-\frac{12}{h^3}M_1^{(2)}(x_1,\tau),\quad f_{122}(x_1,\tau)=-\frac{12}{h^3}M_2^{(2)}(x_1,\tau).
\end{gathered}
\tag{2}
$$

Начальные условия полагаем нулевыми.

Решения задачи (1), (2) ищется в интегральной форме. Ядрами интегральных представлений являются функции Грина, для нахождения которых используются разложения двойные тригонометрические ряды Фурье и преобразование Лапласа по времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №20-08-00589 А).

Список литературы

1 **Еремеев, В. С.** Диффузия и напряжения / В. С. Еремеев. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 182 с.

2 **Igumnov, L. A.** A two-dimensional nonstationary problem of elastic diffusion for an orthotropic one-component layer / L. A. Igumnov, D. V. Tarlakovskii, A. V. Zemskov // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2017. – Vol. 38, no. 5. – P. 808–817.

3 **Князева, А. Г.** Введение в термодинамику необратимых процессов / А. Г. Князева. – Томск : Иван Федоров, 2014. – 172 с.

4 **Aouadi, M.** Analytical and numerical results for a dynamic contact problem with two stops in thermoelastic diffusion theory / M. Aouadi, M. I. M. Copetti // ZAMM Z. Angew. Math. Mech. – 2016. – Vol. 96, no. 3. – P. 361–384.

5 **Deswal, S.** A two-dimensional generalized electro-magneto-thermoviscoelastic problem for a half-space with diffusion / S. Deswal, K. Kalkal // International Journal of Thermal Sciences. – 2011. – Vol. 50, no. 5. – P. 749–759.

6 **Elhagary, M. A.** A two-dimensional generalized thermoelastic diffusion problem for a half-space subjected to harmonically varying heating / M. A. Elhagary // Acta Mech. – 2013. – Vol. 224. – P. 3057–3069.

7 **Afanasieva, O. A.** Unsteady Elastic-Diffusion Oscillations of a Simply Supported Kirchhoff Plate Under the Distributed Transverse Load Action / O. A. Afanasieva, A. V. Zemskov // In: Gdoutos E. [et al.] : Proceedings of the Third International Conference on Theoretical, Applied and Experimental Mechanics. ICTAEM 2020. Structural Integrity. – Vol. 16. –Springer, Cham, 2020. – P. 181–186.

8 **Земсков, А. В.** Изотропная многокомпонентная пластина Кирхгофа под действием нестационарных упругодиффузионных возмущений / А. В Земсков, Д. В. Тарлаковский // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред : материалы XXVI Междунар. симпозиума им. А. Г. Горшкова. Т. 2. – М. : ООО «ТРП», 2020. – С. 155–161.

УДК 519.876.5 + 62-551.454

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ КАК МОЩНЫЙ ИНСТРУМЕНТ СИНТЕЗА СУБОПТИМАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

А. Г. КАПУСТИН, К. В. ТЕРЕЩЕНКО
Белорусская государственная академия авиации, г. Минск

В настоящее время, по известным причинам, применяющиеся аналоговые регуляторы практически исчерпали свои возможности корректного регулирования выходных параметров автоматических систем управления [1, 2]. В работе рассмотрены вопросы проектирования регуляторов нового поколения – нечетких регуляторов систем автоматического управления в пакете *Fuzzy Logic Toolbox* вычислительной среды *Matlab.* Регуляторы *Fuzzy Logic* или нечеткие регуляторы синтезируются с помощью теории нечеткой логики, являющейся разделом машинного обучения. В общем случае машинное обучение используется для поиска математической формулы, которая при применении к набору входных данных дает желаемые результаты изменения выходных параметров системы. Виртуальная среда программирования *Matlab* позволяет создать программу синтеза аналогового регулятора нового поколения на основе нечеткой логики «*fuzzy*» (один из инструментов машинного обучения) [1–3]. В работе выполнен синтез нечеткого ПИД-регулятора напряжения для синхронного генератора мощностью 30 кВ·А.

Особенности процесса синтеза ПИД-регулятора напряжения с логикой «*fuzzy*» для *Matlab*-модели синхронного генератора следующие. В блоке *Fuzzy Logic Controler* модели генератора задается ссылка на *fis*-файл с прописанными правилами управления при помощи «*fuzzy*» логики. Данный файл создается в виде скрипта в окне программы *Matlab* и там же задается тип *mamdani*-файла.

В настройках системы указывается: количество входов и выходов регулятора; задается количество правил; описываются методы регулирования (таблица 1).