

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 «ТРИ», 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 Controller* 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 *tamdani*-файла.

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

Таблица 1 – Пример создания скрипта нечеткого регулятора

Настройки системы	Входные данные	Выходные данные
[System] Name='F_PID' Type='mamdani' Version=2.0 NumInputs=3 NumOutputs=1 NumRules=12 AndMethod='min' OrMethod='max' ImpMethod='min' AggMethod='max' DefuzzMethod='centroid'	[Input1] Name='error' Range=[0 2] NumMFs=2 MF1='hight':'trapmf',[-1.8 -0.2 0.2 1.8] MF2='low':'trapmf',[0.2 1.8 2.2 3.6]	[Output1] Name='out' Range=[0 1] NumMFs=6 MF1='Hi(FR)':'smf',[0 0.06] MF2='Hi(F)Aver(R)':'smf',[-0.00249 0.0975] MF3='Aver(F)Hi(R)':'smf',[0 0.25] MF4='Low(F)Hi(R)':'smf',[0 1.4] MF5='Low(F)Aver(R)':'smf',[0 1.2] MF6='Aver(F)Aver(R)':'smf',[0 0.3]
	[Input2] Name='faster' Range=[0 2] NumMFs=3 MF1='hight':'gaussmf',[0.4246 -1.11e-17] MF2='average':'gaussmf',[0.4246 1] MF3='low':'gaussmf',[0.4246 2]	
	[Input3] Name='robust' Range=[0 2] NumMFs=3 MF1='hight':'gaussmf',[0.4246 -1.11e-17] MF2='average':'gaussmf',[0.4246 1] MF3='low':'gaussmf',[0.4246 2]	

Далее описываются входные данные (в нашем случае входных сигнала три – ошибка регулирования, быстродействие и робастность). Для каждого входа задается диапазон [0 2] и количество кривых (графиков) регулирования (для ошибки – два, а для быстродействия и робастности – по три).

На основе выбранной кривой ПИД-регулирования определяются и задаются рамки установления каждого входного сигнала. Для формирования выходного сигнала необходимо определить диапазон требуемого сигнала [0 1] и определить основные типы установления (регулирования) сигнала, в зависимости от входных данных [4].

Создание правил, определяющих закон регулирования (рисунок 1), формируется в программе, где цифры первого столбца характеризуют ошибку (1 – низкая, 2 – высокая), цифры второго и третьего столбцов – быстродействие и робастность (1 – высокое, 2 – среднее, 3 – низкое значения), четвертый столбец – выбор соответствующей кривой выходного сигнала, пятый столбец – границы регулирования:

[Rules]				
1	1	1,	1	(1) : 1 2 1 1, 1 (1) : 1
1	1	2,	2	(1) : 1 2 1 2, 2 (1) : 1
1	2	1,	3	(1) : 1 2 2 1, 3 (1) : 1
1	3	1,	4	(1) : 1 2 3 1, 4 (1) : 1
1	3	2,	5	(1) : 1 2 3 2, 5 (1) : 1
1	2	2,	6	(1) : 1 2 2 2, 6 (1) : 1

Рисунок 1 – Правила регулирования для системы с нечеткой логикой

Исследование системы «синхронный генератор + fuzzy-регулятор» проводилось во временных, частотных и импульсных областях при работе генератора на асинхронную, импульсно-периодическую, выпрямительную нагрузки.

Анализ свойств системы «синхронный генератор + fuzzy-регулятор» осуществлен по результатам имитационного моделирования в среде *Matlab* во временных, частотных и импульсных областях при работе генератора на асинхронную, импульсно-периодическую, выпрямительную нагрузки, при подаче на вход системы различных возмущений: ступенчатого (*step*), пульсирующего (*pulse generator*) и случайного (*random number*). Анализ свойств fuzzy-регулятора в сравнении с существующим аналоговым регулятором показал, что качество управления объектом у спроектированной системы лучше (время регулирования сокращено приблизительно в 2 раза: время отклика си-

стемы на дельта функцию уменьшилось в 1,35–1,52 раза: запас устойчивости системы по амплитуде и фазе увеличился в 0,75–2,1 раза: система обладает высокой робастностью - в реальной ситуации вывести систему с эталонной моделью на границу устойчивости практически невозможно).

Список литературы

- 1 **Маслолюбов, Ю. П.** Введение в Neural Network Toolbox [Электронный ресурс] / Ю. П. Маслолюбов. – Режим доступа : <http://matlab.exponenta.ru/neuralnetwork/book1/index.php>. – Дата доступа: 26.05.2017.
- 2 **Терещенко, К. В.** Применение среды MATLAB/SIMULINK для оценки влияния характера нагрузки на характеристики синхронного генератора / К. В. Терещенко // Перші кроки в науку : матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф. студентів та молодих вчених. – Вінниця : ТОВ «Нілан-ЛТД», 2017. – С. 35–40.
- 3 **Васильев, Д.** Системы автоматического управления / Д. Васильев, В. Чуич. – Рига : Академическое издание Палмарий, 2012. – 200 с.
- 4 **Терещенко, К. В.** Исследование ПИД-регуляторов с использованием высокоуровневого интерпретируемого языка программирования Matlab R2016b / К. В. Терещенко // Научные разработки: перспективы XXI века : материалы V Международ. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых, Краматорск, 19 апреля 2017 г. – Винниця : ТОВ «Нілан-ЛТД», 2017. – С. 7–11.

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТЕЛ

В. Г. КАРНАУХОВ, В. И. КОЗЛОВ, Л. П. ЗИНЧУК
Институт механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины, г. Киев

Разнообразные конструктивные элементы из композитных пьезоэлектрических материалов широко используются в различных отраслях науки и техники. В процессе эксплуатации они могут находиться под действием продольных динамических нагрузок, что и обуславливает значительный интерес к проблемам параметрических колебаний таких элементов.

При изучении параметрических колебаний элементов конструкций основными вопросами являются построение областей динамической неустойчивости и исследования колебательных процессов в этих областях. Для решения первого вопроса используется линеаризованная теория, а для решения второго нужно исследовать теорию колебаний с учетом геометрической нелинейности.

В данной работе использована теория колебаний пространственных вязкоупругих пьезоэлектрических тел с учетом геометрической нелинейности. Эта теория является основой для построения линеаризованных моделей параметрических колебаний пространственных пьезоэлектрических тел. Такие модели используются для расчета областей динамической неустойчивости.

Рассматриваются параметрические колебания слоистых трехмерных тел из пьезоэлектрического вязкоупругого материала при воздействии на них гармонических во времени механической и электрической нагрузок. При этом основное внимание сосредоточено на исследовании главной области динамической неустойчивости, которая имеет наибольшее практическое значение.

Для расчета области динамической неустойчивости при параметрических колебаниях трехмерного тела сначала решалась задача электровязкоупругости, и вычислялись компоненты тензора начальных напряжений σ_{ij}^0 . Затем решалась обобщенная задача на собственные значения (вычислялись собственные частоты и формы колебаний) и задача устойчивости рассматриваемого тела с начальными напряжениями σ_{ij}^0 для определения критической нагрузки. Зная минимальную собственную частоту колебаний тела, критическое усилие и параметры возбуждающей нагрузки, можно построить главную область динамической неустойчивости. Эти задачи решаются с использованием метода конечных элементов [3]. Для этого с применением уравнений Лагранжа приведена вариационная формулировка задач электромеханики для трехмерных пьезоэлектрических тел с учетом предварительного деформирования.

Задача решается в декартовой системе координат, при этом ось oz выбирается в направлении силовых линий электрического поля предварительной поляризации. Линеаризованное вариационное уравнение можно представить в виде