



Модель сервопоршня агрегата дозирования топлива с использованием матричного подхода и нейронной сети

Денисова Е.В., Черникова М.А.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

В работе рассмотрена модель сервопоршня агрегата дозирования топлива на основе матричного подхода с использованием нейронных сетей. Для разработки модели сервопоршня используется зависимость начального отклонения поршня от управляющего сигнала при различных значениях жиклеров. Данная зависимость представляется в виде матрицы и используется в нейронной сети. Этот подход позволяет описать перемещение сервопоршня с достаточной степенью точности. Так как учет изменения площадей регулировочных жиклеров служит источником параметрической неопределенности, что при работе системы автоматического управления может привести к падению качества управления, то такой учет является актуальным. Модель сервопоршня предлагается использовать в структуре системы автоматического управления газотурбинным двигателем и для полунатурных стендов.

Ключевые слова: агрегат дозирования топлива, сервопоршень, матричный подход, нейронная сеть, моделирование

1. Введение

Математическое моделирование в последнее время является неотъемлемой частью при оценке эффективности любого подхода, методологии в сфере авиационной промышленности. Появление новых поколений двигателей ставит перед разработчиками важную задачу по согласованию управляющей (электронной) и исполнительной (гидромеханической) частей системы автоматического управления (САУ) двигателей. Существует большое количество подходов к расчетам процессов, протекающих в гидромеханической части САУ. Эти подходы, в основном, ориентированы на решение систем нелинейных уравнений, что требует больших временных затрат, и, следовательно, они не могут быть использованы при полунатурных или натурных испытаниях САУ. Поскольку гидромеханические системы используются в настоящее время в

авиационной промышленности, а сервопоршень агрегата дозирования топлива (АДТ) является одним из ключевых элементов, то моделирование его работы является необходимым для получения согласования работы исполнительной и электронной частей. Если не учитывать процессы, происходящие при работе сервопоршня, которые являются нелинейными и сложными, это может привести к потере управляемости двигателем.

Целью настоящей работы является разработка модели сервопоршня агрегата дозирования топлива с использованием матричного подхода и нейронной сети (НС).

2. Постановка задачи

Рассмотрим конструктивную схему АДТ в силовую установку беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Более подробное описание работы АДТ можно найти в статье [1]. На рис. 1 показана часть схемы АДТ, разъясняющая работу поршня с точки зрения его перемещения в функции управляющего сигнала от электромагнитного клапана (ЭМК).

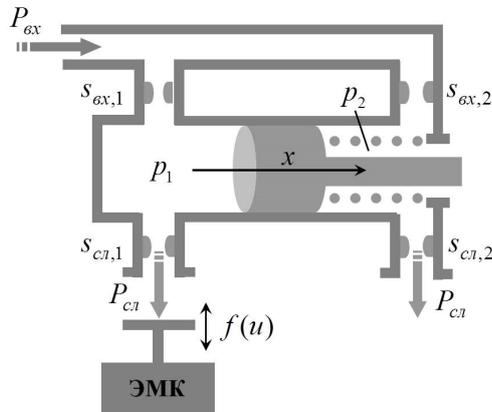


Рис. 1. Принципиальная схема АДТ, где $s_{вх,i}$, ($i = 1, 2$) – площадь прохода жидкости на входе (в жиклерах); $s_{сл,i}$, ($i = 1, 2$) – площадь прохода жидкости на сливе; $P_{вх}$ – давление жидкости на входе в полость сервопоршня; $P_{сл}$ – давление жидкости на выходе (сливе) из полости сервопоршня; p_1 и p_2 – давления в левой и правой полостях сервопоршня соответственно

Модель всего АДТ достаточно сложная и представляет собой блок, на вход которого поступает управляющий сигнал u , а на выходе формируется сигнал расхода топлива Q . Для того чтобы найти расход топлива используют формулу

$$Q = a\mu f\sqrt{\Delta P} \quad (1)$$

Расход топлива определяется несколькими параметрами: $a = \sqrt{2/\rho}$ – коэффициент, зависящий от плотности топлива ρ , который, в свою очередь, зависит от температуры топлива (T). Коэффициент a нельзя принимать постоянной величиной, так как температура топлива меняется при различных режимах работы исполнительного механизма. Еще один коэффициент в формуле (1) это μ – коэффициент истечения жидкости, который характеризуется как отношение возможного расхода топлива к реальному. Этот коэффициент будем считать постоянным и равным $\mu = 0,7$. Параметр f – площадь дроссельной иглы – считается величиной переменной, если неизвестно точное положение сервопоршня; ΔP – перепад давления – величина переменная, хотя считается, что она поддерживается клапаном постоянного перепада давления.

Таким образом, расход топлива есть величина, зависящая от нескольких факторов одновременно.

Представим модель сервопоршня АДТ как функцию $x = f(u)$ на основе матричного подхода и нейронной сети. В дальнейшем планируется

разработать модель всего АДТ с учетом работы всех элементов.

3. Методы решения

Для разработки модели сервопоршня АДТ используем результаты, ранее полученные в работе [2], где динамическая модель АДТ была реализована с помощью решения системы нелинейных дифференциальных уравнений. Сервопоршень является основным элементом, так как именно с его помощью производится согласование электронной и гидромеханической частей системы управления.

Между управляющим сигналом u и перемещением сервопоршня x устанавливается однозначная связь, далее перемещение преобразуется в расход топлива. Результаты моделирования показали наличие следующих недостатков, связанных с особенностями конструкции: расслоение статических характеристик, образование «метелки», что в работе САУ БПЛА недопустимо. Полученные результаты полностью подтверждены экспериментальными данными. Далее, для использования модели в полунатурном стенде, предлагается следующий подход: представить отклонение сервопоршня от начального положения $\Delta x/x_0$ в зависимости от управляющего сигнала u (рис. 2) в виде матрицы и реализовать на ее основе НС в виде блока в *Simulink*.

На полунатурном стенде можно проводить целенаправленное изменение площади жиклера, что позволяет выбрать наиболее приемлемую статическую характеристику элемента. При работе АДТ подобное изменение может произойти и случайно, например, при попадании механической частицы в рабочую жидкость, в частности из-за появления кавитационных режимов. В процессе работы эле-

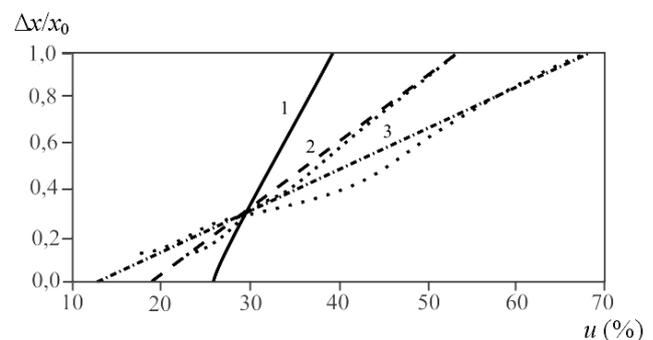


Рис. 2. Отклонение сервопоршня от начального положения $\Delta x/x_0$ в зависимости от управляющего сигнала u для различных значений жиклеров $s_{вх,i}/\alpha$, $s_{сл,i}/\alpha$ ($i = 1, 2$): 1 – $\alpha = 1$; 2 – $\alpha = 2,5$, 3 – $\alpha = 4$, полученные при численных расчетах (линии) и экспериментально (круги)

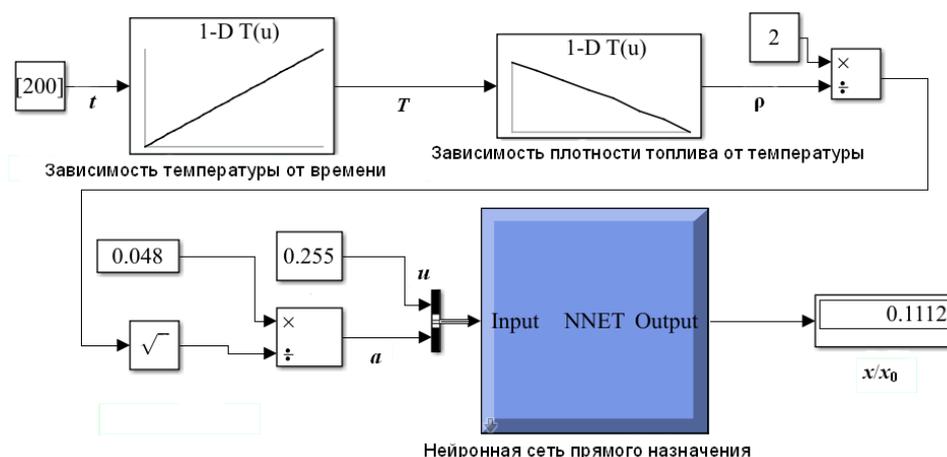


Рис. 3. Модель сервопоршня АДТ в среде имитационного моделирования *Simulink*

мента достаточно часто происходит разрушение поверхностей поршня и обечайки в силу их трения друг с другом, а также кавитационные разрушения рабочих поверхностей.

Следует отметить тот факт, что изменение проливов (площадей) регулировочных жиклеров также приводит к появлению параметрической неопределенности, в том числе и к появлению так называемой «метелки» (см. рис. 2) – расслоению статических характеристик, что в принципе недопустимо. В свою очередь, подобное изменение проливов может возникнуть в процессе функционирования топливного агрегата как из-за попадания микрочастиц от корпусных деталей в силу их старения, так и из-за появления «воздушных» пробок в топливе.

Для учета расслоения статических характеристик искусственно введем информационный параметр a . Этот параметр позволит изменить величины a и f комплексно, не выделяя отдельно изменение каждого значения.

Для того чтобы найти отклонение сервопоршня от начального положения, воспользуемся матричным подходом [3] и представим отклонение $\Delta x/x_0$ в зависимости от управляющего сигнала u в виде матрицы, где третьим параметром в матрице будет a . Полученную матрицу используем в НС.

Для аппроксимации заданного набора входных–выходных данных можно воспользоваться различными подходами. Чтобы не искать явный вид функциональной зависимости, используем для ее описания НС, которые являются универсальными аппроксиматорами [4]. Для обучения НС необходимо выполнить предобработку исходных данных, которая заключается в нормализации данных, то есть необходимо привести числовые значения к конкретному диапазону. В данном

случае исходные данные следующие: X меняется от 0,125 до 4, Y – от 0 до 0,66, где X – вектор входных параметров (u, a), а Y – выходной параметр ($\Delta x/x_0$).

Для решения поставленной задачи выберем многослойный перцептрон, обучаемый согласно алгоритму обратного распространения ошибки.

Число нейронов во входном и выходном слоях соответствует числу входных и выходных параметров (во входном слое – 2, в выходном – 1).

Также введен один скрытый слой, т.к. согласно теореме об универсальной аппроксимации многослойного перцептрона с одним скрытым слоем достаточно для построения равномерной аппроксимации с точностью ϵ для любого обучающего множества. Количество нейронов в скрытом слое примем 50 [5]. Выбранное количество нейронов обеспечивает необходимую точность аппроксимации и низкие затраты на время обучения НС, что подтверждается представленными далее результатами.

Во входном слое используем сигмоидальную функцию активации, в выходном – линейную, что обусловлено простотой применения, обучения и статистического анализа.

В дальнейшем планируется разработать полную модель АДТ с учетом работы всех элементов. Модель будет представлять блок, на вход которого поступает управляющий сигнал u , на выходе формируется сигнал расхода топлива Q .

На рис. 3 показана работа блока модели сервопоршня АДТ в среде имитационного моделирования *Simulink*. Модель сервопоршня АДТ работает следующим образом: на вход блока «Зависимость температуры от времени» поступает расчетный момент времени (t , сек), в который необходимо найти

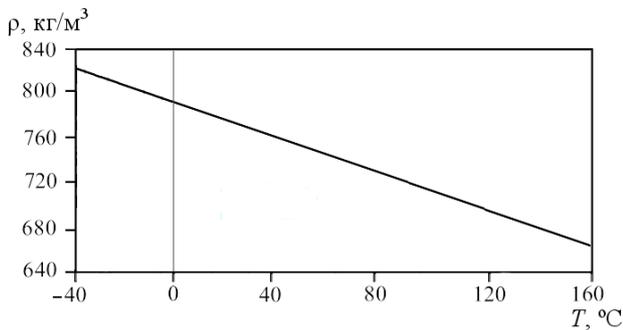


Рис. 4. Зависимость плотности ρ керосина от температуры T

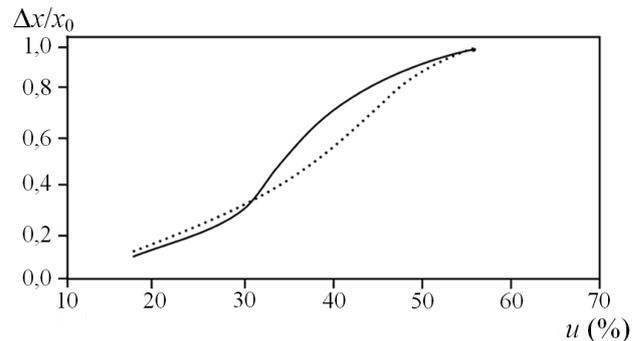


Рис. 5. Сравнение результатов НС (сплошная линия) с экспериментальными данными (пунктирная линия)

желаемое значение температуры (T), затем полученное значение T поступает на вход блока расчета плотности топлива (ρ) (рис. 4). В дальнейшем блоки модели АДТ, используя полученное значение плотности, рассчитывают необходимые компоненты уравнения (1), которое позволяет найти расход топлива Q при заданном сигнале управления u .

Как видно из рис. 5 результаты тестирования НС, сформированной на основе данных, полученных в ходе экспериментов динамической модели сервопоршня (рис. 2), и экспериментальные данные близки. Поэтому для сокращения времени расчетов и построения более быстрых моделей сервопоршня АДТ была синтезирована НС, использующая матричный подход при обработке данных.

Адекватность модели сервопоршня АДТ подтверждается результатами, представленными в табл. 1, где на входе в модель показан управляющий сигнал, а на выходе получено отклонение сервопоршня от начального положения.

Таблица 1. Сравнение полученных результатов $\Delta x/x_0$ с экспериментальными данными для значения $\alpha = 2.5$

№ п/п	$u, \%$	$\Delta x/x_0$	$\Delta x/x_0$ эксперимент
1	24	0,1154	0,12
2	25	0,1395	0,145
3	30	0,3472	0,3
4	35	0,6404	0,41
5	40	0,9855	0,59
6	50	0,9489	0,91
7	55	0,9431	0,99

4. Результаты

Искусственно введен параметр, характеризующий степень возможного расслоения статических характеристик сервопоршня, позволяющий учитывать такое расслоение. Введение параметра α позволило использовать матричный подход и НС при моделированию сервопоршня АДТ в среде имитационного моделирования *Simulink*.

5. Заключение

Полученная модель может использоваться при моделировании всей САУ БПЛА, что позволит улучшить качество управления системой в целом.

Список литературы

- [1] Насибуллаева Э.Ш., Денисова Е.В. Динамическая модель агрегата дозирования топлива в силовую установку беспилотного летательного аппарата // Вестник РФФИ. 2012. № 2–3(74–75). С. 60–68. (http://www.rfbr.ru/rffi/ru/bulletin/o_1774291#62)
- [2] Денисова Е.В., Насибуллаева Э.Ш., Насибуллаев И.Ш. Исследование динамических процессов в элементах топливной автоматики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 5(158). С. 31–36. (<http://novtex.ru/mech/mech2014/annot05.html#5>)
- [3] Денисова Е.В., Мигранов А.Б., Черникова М.А. Матричный подход к моделированию газотурбинного двигателя с использованием нейронных сетей // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 3. С. 35–40. (<https://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=36933>)
- [4] Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под редакцией Н.Д. Егупова. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 744 с.
- [5] Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание.: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.



The model of the servo piston of the fuel metering unit using matrix approach and neural network

Denisova E.V., Chernikova M.A.

Mavlutov Institute of Mechanics, UFRC RAS, Ufa

In the paper, the model of a servo piston of a fuel metering unit based on a matrix approach using neural networks is considered. To develop the model of a servo piston, the dependence of the initial piston deviation on the control signal for different values of the nozzles is used. This dependence is represented in the form of a matrix and is used in the neural network. This approach allows describing the movement of the servo piston with a sufficient degree of accuracy. As a record of change squares adjustment of the nozzles is a source of parametric uncertainty in the operation of the automatic control system can lead to a drop in the quality of control, such accounting is relevant. The model of the servo piston is proposed to be used in the structure of the automatic control system for a gas turbine engine and for semi-natural stands.

Keywords: fuel metering unit, servo piston, matrix approach, neural network, simulation