= НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ =

УДК 629.3.027

РАЗРАБОТКА ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОДРЕССОРИВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ

© 2021 г. З. А. Годжаев¹, В. А. Кузьмин^{1,*}, Т. З. Годжаев¹

¹ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия *e-mail: Kuzmin.viktor92@mail.ru

> Поступила в редакцию 16.06.2021 г. После доработки 11.08.2021 г. Принята к публикации 24.08.2021 г.

В настоящей статье рассмотрена разработка гидравлической системы подрессоривания транспортных средств на основе различных законов управления. Представлены два подхода к разработке алгоритма управления для нелинейных систем. В одном подходе используется метод наименьших квадратов для расчета параметров контроллера линеаризованной модели динамической системы. В другом подходе применяется нейронная сеть типа многослойный перцептрон, используемая для моделирования и оценки фактических параметров нелинейной системы. Основная идея заключается в том, чтобы показать, как применяется оценка фактических параметров из нелинейной обучаемой нейронной модели в контроллере линеаризованной модели с расчетом в режиме реального времени.

Ключевые слова: система подрессоривания, активная система подрессоривания, гидравлическая рессора, контроллер системы подрессоривания, математическая модель, нейронные сети

DOI: 10.31857/S0235711921060080

Создание новых перспективных транспортных средств – одна из приоритетных задач современной науки о машинах [1–4]. Важным узлом колесных и гусеничных машин является система подрессоривания [5–8].

В настоящей статье ставится задача построения устройства, в котором можно реализовывать различные подходы к управлению гидравлической системой подрессоривания.

Рассматриваемая гидравлическая система подрессоривания транспортных средств представляет собой совокупность двух резервуаров (рис. 1). Гидравлическую рессору (рис. 1а), можно представить как схему гидравлической системы (рис. 1б).

На рис. 1: $h_1(t)$, м — уровень воды в цилиндрическом резервуаре; $h_{1\max}(t)$, м — максимальный уровень воды в цилиндрическом резервуаре; $h_2(t)$, м — уровень воды в сферическом резервуаре; $h_{2\max}(t)$, м — максимальный уровень воды в сферическом резервуаре; $M_1(t)$, кг/с — массовый приток в цилиндрический резервуар; $M_2(t)$, кг/с — массовый приток в сферический резервуар; $M_3(t)$, кг/с — массовый отток из сферического резервуара; $M_{Z1}(t)$, кг/с — изменение массы в цилиндрическом резервуаре; $M_{Z2}(t)$, кг/с изменение массы сферического резервуара; $u_1(t)$ — функция входа для массового изменения в цилиндрического резервуаре; S, м² — площадь дна цилиндрического резер-



Рис. 1. Гидравлическая рессора – (а); модель гидравлической системы – (б).

вуара; S_1 , м² – площадь выходного отверстия цилиндрического резервуара; R, м – диаметр сферического резервуара; S_2 , м² – площадь выходного отверстия сферического резервуара.

Для изменения уровней $h_1(t)$ и $h_2(t)$ в соответствии с [11] предполагается

$$\rho S \frac{dh_1(t)}{dt} = M_1(t) - M_2(t) + M_{z1}(t),$$

$$\rho \pi (2Rh_2(t) - h_2^2(t)) \frac{dh_2(t)}{dt} = M_2(t) - M_3(t) + M_{z2}(t),$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Массовый расход $M_1(t)$, $M_2(t)$ и $M_3(t)$ можно описать уравнениями

$$M_1(t) = k_{v1}f(u_1(t))M_{1\max}, \quad M_2(t) = \rho S_1\sqrt{2gh_1(t)}, \quad M_3(t) = \rho S_2\sqrt{2gh_2(t)},$$

где k_{V1} – константа входного отверстия цилиндрического резервуара, а $f(u_1(t))$ – характеристическая функция клапана V_1 .

Массовый прирост $M_1(t)$ зависит от значения $u_1(t) \in [0,1]$ М_{1max}.

Пусть функция $f(u_1(t))$ будет линейной. Тогда уравнение для массового прироста можно записать как

$$M_1(t) = k_{v1}u_1(t)M_{1\,\text{max}}$$

Уравнение (1), описывает динамику изменения взаимодействия в двух резервуарах [12]

$$\frac{dh_{l}(t)}{dt} = \frac{k_{v1}u_{l}(t)M_{1\max} - \rho S_{1}\sqrt{2gh_{l}(t)} + M_{z1}(t)}{\rho S},$$

$$\frac{dh_{2}(t)}{dt} = \frac{\rho S_{1}\sqrt{2gh_{l}(t)} - \rho S_{2}\sqrt{2gh_{2}(t)} + M_{z2}(t)}{\rho \pi (2Rh_{2}(t) - h_{2}^{2}(t))},$$
(1)

где g – ускорение свободного падения, м/с².

Рассмотрим классический подход к расчету оптимизационной функции управления. Цель управления — снижение уровня вибронагруженности транспортного средства за счет изменения давления (уровня жидкости во втором резервуаре) в гидрорессорах системы подрессоривания. На входе мы имеем объемно-габаритные, массовые характеристики гидрорессоры, функцию, имитирующую неровности дорожного покрытия (белый шум). Выходом системы является уровень жидкости во втором резервуаре.

Расчет оптимизационной функции управления для *k*-го шага (являющегося шагом дискретизации) можно рассматривать как

$$J(k) = \sum_{j=N_1}^{N_2} e^2(k+j/k) + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda \Delta u^2(k+j/k),$$
(2)

где $N_1 \ge 1$, $N_2 \ge N_1$, $1 \le N_u \le N_2$, λ – это положительный весовой коэффициент, $e\left(k + \frac{j}{k}\right) = \hat{y}\left(k + \frac{j}{k}\right) - r\left(k + \frac{j}{k}\right)$ это ошибка предсказания, $\hat{y}\left(k + \frac{j}{k}\right)$ – это прогнозируе-

мое выходное значение системы и $r\left(k+\frac{j}{k}\right)$ – это требуемое значение выхода системы [7].

С помощью модификации стандартного блока нелинейной модели Matlab/Simulink (Nonlinear ARX Model) можно получить модель авторегрессивного интегрального скользящего среднего (или модель Бокса–Дженкинса), которую можно использовать в формировании алгоритма управления, эта функция представлена в формуле (3) [12, 13]

$$A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})u(k-1) + \frac{C(q^{-1})}{\Delta}\xi(k),$$
(3)

где, $A(q^{-1}), B(q^{-1}), C(q^{-1})$ являются многочленами оператора задержки q^{-1}

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_{na} q^{-na},$$

$$B(q^{(-1)}) = b_0 + b_1 q^{(-1)} + b_2 q^{(-2)} + \dots + b_{nb} b q^{(-nb)},$$

$$C(q^{(-1)}) = 1 + c_1 q^{(-1)} + c_2 q^{(-2)} + \dots + a_{nc} c q^{(-nc)}.$$

В уравнении (3) $\xi(k)$ – белый шум с нулевым средним и $\Delta = 1 - q^{-1}$.

Для проверки разработанного алгоритма управления разработана имитационная модель [8, 13]. Параметрами имитационной модели гидросистемы являются: $M_{1max} = 4900$ Hm; $h_{1max} = 6$ m; S = 7.07 m²; $S_1 = 0.0314$ м²; R = 1.5 m; $S_2 = 0.0314$ м²; $\rho = 1000$ кг/м³.

Для расчета параметров линеаризованной модели использовался метод наименьших квадратов, который соответствует фактическому значению выходной функции $h_2(t)$. Таким образом, можно получить полиномы $A(q^{-1})$ и $B(q^{-1})$ дискретной модели авторегрессивнного интегрального скользящего среднего (6). Порядок расположения полиномов дискретной модели принимается na = 2, nb = 2 и nc = 0.

Ограничения для значения контрольного сигнала принимаются в соответствии с областью допустимых значений $u_1(t) \in [0,1], h_2(t) \in [0,3]$. Весовые коэффициенты значения управляющего сигнала $\Delta u(t) - \lambda = 0.1$.

На выходе системы возникают помехи в виде белого шума, имитирующие погрешность измерения. Также на систему действуют величины M_{Z1} и M_{Z2} . Значение $M_{Z1} = 500$ Нм в период времени 2500–3500 с. Значение $M_{Z2} = 200$ Нм в период времени 6500–7500 с.

Результат ref(t) — целевое значение зависимости изменения высоты h_2 от времени и выходной функции системы $h_2(t)$ с использованием алгоритма управления приведен на рис. 2.

Далее представим подход к формированию функции управления на основе нейронной модели. Рассмотрим алгоритм управления нелинейной системой (гидравлическая система подрессоривания, состоящая из двух резервуаров). Система состоит из управляемой нелинейной гидравлической системы, описываемой уравнениями (1), ней-



Рис. 2. Отслеживание ref(t) выходной функции $h_2(t)$.

ронной модели и управляющего контроллера. Поскольку алгоритму управления требуются параметры линейной модели динамической системы, в настоящей статье проводится расчет матрицы весовых коэффициентов динамической модели. Параметры и критерии оптимизации контроллера определяются функцией минимизации изменения высоты в резервуаре от целевого значения высоты (2) [7, 14, 15].

Выходом системы является уровень воды во втором резервуаре $y(t) = h_2(t)$. Рассматривается модель нейронной системы с четырьмя входами и шестью нейронами в скрытом слое. Функции активации в скрытом слое являются тангентсальными (*гипер*-



Рис. 3. Сравнительная оценка целевого значения выхода системы $h_{2ref}(t)$ и фактического значения $h_2(t)$.

болический тангенс, определяемый функцией $f(x) = \text{th } x = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1)$ функциями, а в выходном слое выбрана линейная функция [15, 16].

Представим результаты оценки (оценка производилась по критерию минимизации расхождений между целевым значением функции и фактическим, полученным в результате моделирования) параметров системы из автономной обучаемой нейронной модели и их применение в алгоритме управления для нелинейной системы взаимодействия двух резервуаров (1).

Результаты использования обучаемой нейронной модели показаны на рис. 3. На графике (рис. 3) сравниваются целевой выход системы $h_{2ref}(t)$ и фактический выход системы $h_2(t)$.

Заключение. На основании изложенного можно утверждать следующее. Если математическая модель динамической системы неизвестна, то целесообразно использовать подход, основанный на нейронной модели. В настоящей статье нейронная модель обучена как одноступенчатый перцептрон, соответствующий нелинейной системе. После обучения такую модель можно использовать для *on-line* оценки параметров системы. Полученные параметры системы были использованы для решения задачи оптимизации алгоритма управления. В противном случае (если математическая модель динамической системы известна), более эффективна будет работа классической модели формирования управляющего сигнала.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Ганиев Р.Ф. О современном состоянии и перспективах развития ИМАШ РАН // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 3. С. 11.
- 2. Глазунов В.А., Филиппов Г.С., Ганиев Р.Ф. Актуальные проблемы машиноведения и пути их решения. Волновые и аддитивные технологии, станкостроение, роботохирургия // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 5. С. 16.
- 3. Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А. Перспективы теории машин в связи с развитием современного машиностроения // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2015. № 5 (218). С. 3.
- 4. Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А. Актуальные проблемы машиноведения и пути их решения // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2015. № 11. С. 1.
- 5. Kotiev G.O., Stadukhin A.A., Kositsyn B.B., Miroshnichenko A.V. Determination of mechanical characteristics of high-speed tracked vehicles traction motor with individual drive wheels // Journal of Physics: Conference Series. 2019. C. 1177.
- Крайнев А.Ф. Механизмы машин. Функция, структура, действие. М.: Изд. дом "Спектр". 2016. 176 с.
- 7. *Oledzki A.A.* New kind of impact damped-from Simulation to Real Design // Mechanism and machine Theory. 1981. P. 247.
- 8. *Randall S.E., Haldsted D.M., Taylor D.L.* Optimum vibration absorbers for linear damped systems. ASME // Journal of Mechanical Design. 1981. V. 103. № 4. P. 908.
- 9. *Shibata K., Shinohara H., Kurokawa H.* Study on the damping of Magnetic Vibration-Proof Device // Japan society of precision engineering. 1984. P. 337.
- 10. *Soom A*. Ming-san-Lee optimal Design of Linear and Nonlinear Vibration Absorbers for Damped System // ASME. 1983. V. 105. № 1. P. 112.
- 11. Кузьмин В.А., Федоткин Р.С., Крючков В.А. Искусственная нейронная сеть для обоснования параметров ходовых систем тракторов // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2017. № 4. С. 24.

- 12. *Попов Д.Н.* Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. М.: Машиностроение, 1987. 232 с.
- Прогнозирующий контроллер нейронной сети в Simulink-MATLAB & Simulink [Электронный pecypc]. URL: https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ug/design-neural-networkpredictive-controller-in-simulink.html
- 14. *Иванович Г.В., Владимировна А.Е.* Два подхода к обучению радиально-базисных нейронных сетей при решении дифференциальных уравнений в частных производных // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2007. № 2. С. 56.
- 15. Башта Т.М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика. Учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1972. 242 с.
- 16. Шеховцов В.В. и др. Стенд с гидравлическим замыканием силового контура для испытания силовых передач колесных и гусеничных машин // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 2. С. 55.