

Адаптивный алгоритм компенсации нагрузки на основе структуры компенсации сигнала

Нгуен Динь Хань¹, В. Е. Кузнецов²

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹dinhkhanhmta@gmail.com, ²vekuznetsov56@mail.ru

Аннотация. Исследуются гибридные рулевые приводы, работающие в условиях больших внешних нагрузок и с учетом влияния взаимных нагрузок, при их воздействии на общие исполнительные механизмы. Приводится анализ общей математической модели объекта управления и исследуется алгоритм адаптивного управления для компенсации нагрузки в системе на основе специальной структуры компенсации с учетом влияния нелинейностей и неопределенности параметров системы. Приводятся результаты практических исследований на примере управления с компенсацией нагрузки для гибридных систем рулевого привода гражданского авиатранспорта.

Ключевые слова: алгоритм компенсации, адаптивное управление, компенсация нагрузки, разнородные рулевые приводы

I. ВВЕДЕНИЕ

Резервированные системы рулевых приводов поверхностей управления для объединения использует суммирование сил, развиваемых каждым приводом на общем выходном звене. В таких системах исполнительные механизмы подканалов постоянно нагружают друг друга даже при отсутствии внешней нагрузки.

Далее рассматриваются объекты, работающие в сложных средах, подверженных сильному воздействию аэродинамической нагрузки. Основная задача заключается в том, как полностью компенсировать влияние нагрузки, если невозможно измерить или предсказать ее значение.

Для объектов с ограниченной неопределенностью и большим внешним возмущением синтезировано адаптивное управление методом функций Ляпунова, при котором удается эффективно компенсировать внешнюю нагрузку, действующую на исполнительный механизм системы.

Среди моментов сопротивления движению руля в общем случае можно выделить доминирующее влияние аэродинамические нагрузки, кроме инерционной нагрузки (для массивных органов управления полетом). В одноканальном режиме управления (резервный режим управления) привод не имеет достаточной динамической

жесткости для компенсации воздействия нагрузки. Следовательно, необходимо создать некоторое воздействие, которое бы смогло эффективно противодействовать внешнему возмущению, например, в виде компенсационного сигнала, добавляемого к сигналу задания, для компенсации нагрузки, вызывающей ошибку угла поворота рулевого органа.

Подход к решению указанной выше проблемы заключается в построении адаптивной структуры управления с формированием компенсационного воздействия. Структура состоит из виртуальной модели, которая по своим функциям эквивалентна реальной физической системе, и общего контроллера для виртуальной модели и реальной системы. Сигнал ошибки между двумя моделями определяет аргумент функции компенсационного воздействия для внешней нагрузки, действующей на фактическую модель, которая будет адаптирована с помощью скомпенсированной виртуальной модели.

Особенность этого подхода заключается в повышении точности управления системой в области малых сигналов задания, при действии большой внешней нагрузки и ограниченной неопределенности.

II. ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕНСАЦИЕЙ НАГРУЗКИ

A. Анализ общей математической модели объекта управления

Общая постановка задачи адаптивного управления формализуется следующим образом [1].

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\xi}, \mathbf{f}, t), \quad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0 \quad (1)$$

где $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T \in R^n$ – вектор состояния; $\mathbf{u}(t) \in R^m$ – вектор действующих управления; $\boldsymbol{\xi}(t)$ – вектор переменных параметров; $\mathbf{f}(t) \in R^n$ – вектор внешних возмущений. Имеет место ограничение переменных следующим образом: $\mathbf{x} \in \mathbf{H}_x, \mathbf{f} \in \mathbf{H}_f, \mathbf{u} \in \mathbf{H}_u, \boldsymbol{\xi} \in \mathbf{H}_\xi$, где $\mathbf{H}_x, \mathbf{H}_f, \mathbf{H}_u, \mathbf{H}_\xi$ – некоторые ограниченные множества

Предполагается, что $\mathbf{u}(t)$ входит в правую часть (1) линейно и относится к классу кусочно-непрерывных

функций. Тогда возможно представление объекта в следующем виде:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{f}, \quad (2)$$

где $\mathbf{A} = \mathbf{A}(\mathbf{x}, t)$, $\mathbf{B} = \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$ – соответственно, $n \times n$ – и $m \times m$ – мерные функциональные матрицы, непрерывные и ограниченные вместе со своими частными производными для всех \mathbf{x} , t из ограниченной области.

Линеаризованная система в окрестности рабочего, базового режима работы (1) описывается уравнениями вида

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_0\mathbf{x} + \mathbf{B}_0\mathbf{u}, \quad y = \mathbf{C}\mathbf{x}, \quad (3)$$

где $\mathbf{A}_0, \mathbf{B}_0, \mathbf{C}$ – постоянные матрицы, получаемые в результате линеаризации (1) в рабочей точке или при использовании средних значений параметров из диапазонов их изменения, $y(t) \in R^p$ – вектор выходных переменных объекта.

После выделения в (1) линейной стационарной части вида (3) допустимо следующее представление объекта:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_0\mathbf{x} + \mathbf{B}_0\mathbf{u} + \boldsymbol{\sigma}_x + \boldsymbol{\delta}_\varphi, \quad y = \mathbf{C}\mathbf{x}, \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\delta}_\varphi = -\Delta_b\mathbf{u} + \mathbf{f}, \quad \boldsymbol{\sigma}_x = \Delta_a\mathbf{x} \quad (5)$$

где $\boldsymbol{\delta}_\varphi$ – векторная функция приведенных возмущений; $\Delta_a = \mathbf{A} - \mathbf{A}_0$; $\Delta_b = \mathbf{B} - \mathbf{B}_0$ – матрицы ограниченных нестационарных рассогласований относительно усредненных значений в описании (1), отражающие изменение вектора $\boldsymbol{\xi}$.

Предположим, что мы построили адаптивный контроллер (рис. 1) $u = U(\mathbf{x}, t)$, который обеспечивает:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} |y - u_0| = \varepsilon \leq \varepsilon_0 \quad (6)$$

где ε_0 – малое положительное число, u_0 – входной сигнал.

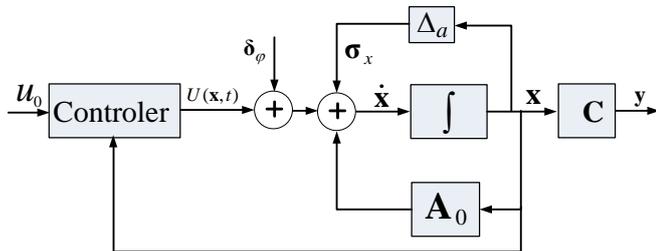


Рис. 1.

Пусть функция $\boldsymbol{\delta}_\varphi$ (на рис. 1) представляет сильное влияние внешней нагрузки на систему, которая с учетом контроллера принимает вид

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_U\mathbf{x} + \boldsymbol{\delta}_\varphi \\ y = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases}, \quad (7)$$

где \mathbf{A}_U – матрица системы с учетом контроллера. Если $\boldsymbol{\delta}_\varphi$ в (7), имеет большое значение, например, воздушная нагрузка, действующая на рулевую поверхность самолета, то адаптивные контроллеры могут полностью и не подавить влияние внешних возмущений нагрузки. Особенно, если система обладает не высокой динамической жесткостью, требует точного управления в небольших углах управляющего сигнала, тогда возможно появление больших статических и динамических ошибок рулевых управляющих органов.

Тогда с учетом большой внешней нагрузки выражение (6) можно представить в виде

$$\lim_{x \rightarrow \infty} |y - u_0| = \varepsilon + \rho, \quad (8)$$

где ρ – компонента, характеризующая влияние внешней нагрузки.

Задача состоит в том, чтобы построить адаптивную систему управления, позволяющую значительно уменьшить влияние внешних нагрузок или полностью их исключить.

В. Построение структуры управления адаптивной компенсацией

Чтобы уменьшить ошибку ρ в (8) необходим «компенсирующий» адаптивный сигнал, добавленный ко входному сигналу задания. Этот компенсационный сигнал формируется путем объединения виртуальной модели (модель без внешней нагрузки) с реальной моделью (модель с учетом внешней нагрузки) (рис. 2).

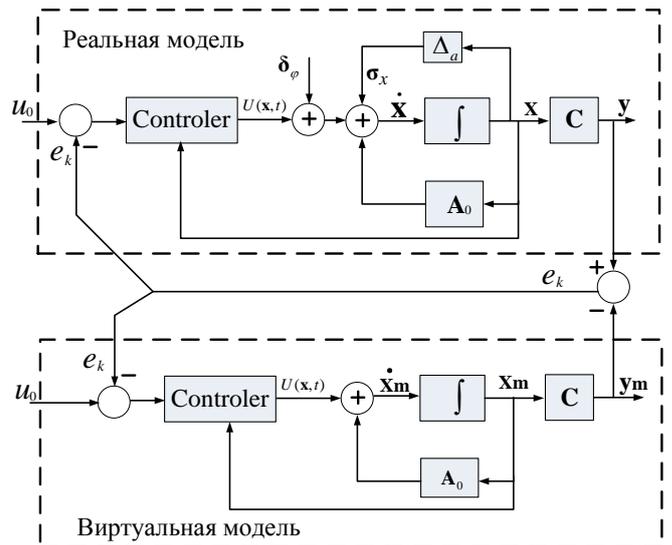


Рис. 2. Структурная схема адаптивного управления для «компенсации» нагрузки

С учетом структуры адаптивного управления для компенсации нагрузки, приведенной на рис. 2, получается следующее выражение для ошибки виртуальной модели:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [y_m - (u_0 - e_k)] = \varepsilon, \quad (9)$$

Ошибка в реальной модели в этом случае имеет вид:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [(y - (u_0 - e_k))] = \varepsilon + \rho, \quad (10)$$

где

$$e_k = y - y_m. \quad (11)$$

Вычитая (10) из (9) получаем

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [(y - (u_0 - e_k))] - \lim_{t \rightarrow \infty} [y_m - (u_0 - e_k)] = \varepsilon + \rho - \varepsilon. \quad (12)$$

Очевидно

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (y - y_m) = \rho. \quad (13)$$

Из (13) следует эквивалентность ошибки e_k и ρ , откуда на основании (10) можно заключить

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (y - u_0) = \varepsilon \quad (14)$$

Из выражения (14), соответствующее структуре управления, показанной на рис. 2, следует, что выходной сигнал y не зависит от внешней нагрузки, входящей в функцию внешнего возмущения δ_φ . Другими словами, внешняя нагрузка как бы «компенсируется» сигналом адаптивного управления, сформированного по ошибке e_k .

III. ПРИМЕР УПРАВЛЕНИЯ С КОМПЕНСАЦИЕЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ СИСТЕМЫ РУЛЕВОГО ПРИВОДА САМОЛЕТА

В целях обеспечения безопасности и повышения надежности системы рулевого управления самолета, используется многоканальная система передачи, действующая на одну и ту же рулевую поверхность. Многоканальная система управления имеет резервный режим работы, активируемый при необходимости. В этом режиме работает только один канал, другой канал работает в режиме отказа или без нагрузки.

Рассматривается пример системы рулевого управления самолета, работающей в резервном режиме. В этом режиме работает электромеханический канал, гидравлический канал не несет на себе нагрузки. В этом случае нагрузка в электромеханическом канале увеличивается, и необходимость в «компенсации нагрузки» возрастает.

Кинематическая схема электромеханического рулевого привода (ЭМРП) учитывает промежуточный редуктор с передаточным числом i_p , моменты трения в электродвигателе и винте шариковинтовой передачи (ШВП) и упругое скручивание винта с зазором δ [2] (рис. 3). Математическая модель ЭМРП [2],[4].

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di}{dt} &= \frac{1}{L}(U - Ri - K_E \omega_1) \\ M_M &= K_M i \\ J_1 \frac{d\omega_1}{dt} &= M_M - M_y - M_{f1} \\ M'_y &= c\theta + b \left(\frac{d\theta(\Delta\varphi)}{dt} \right) = c\theta + b\Delta\omega \left(\frac{d\theta}{d(\Delta\varphi)} \right) \\ \theta &= \begin{cases} \Delta\varphi = \varphi'_1 - \varphi_2, & |\Delta\varphi| \geq \delta/2, \\ 0, & |\Delta\varphi| < \delta/2. \end{cases} \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} &= M'_y - M_2 - M_{f2}(\cdot) \\ M_f(\omega) &= (M_c + (M_s - M_c) e^{-\left(\frac{\omega}{\delta_\omega}\right)^2}) \text{sign}(\omega) \\ M_{f1(f_2)}(\omega) &= \begin{cases} M_f(|\omega| - \delta_\omega) \text{sign}(\omega), & |\omega| > \delta_\omega \\ k\omega, & |\omega| < \delta_\omega, \end{cases} \end{aligned} \right. \quad (15)$$

где J_1 – суммарный момент инерции ротора и приведенный к валу двигателя момент инерции редуктора, M_M – момент двигателя, $M_{f1}(\cdot)$ – функции моментов трения, ω_1 – скорость двигателя, M_y – упругий момент от силы упругости и силы трения, M'_y – момент упругий, действующий на вторую массу, c – коэффициент упругости, b – коэффициент трения, J_2 – суммарный момент инерции винта и приведенный ко второй массе момент инерции другой части ШВП, ω_2 – скорость второй массы, M_2 – момент нагрузки на вторую массу со стороны следующей массы механической передачи, $M_{f2}(\cdot)$ – функция момента трения, δ – зазор в кинематической передаче, θ – угол скручивания механической передачи, M_s – максимальный момент трения, M_c – момента трения скольжения, $k = 1/\delta_\omega$ – крутизна функции трения в линейной области ее изменения δ_ω , K_g – коэффициента передачи в ШВП [3].

Будем математическую модель поверхности управления [2] описывать следующим образом:

$$\begin{cases} F_m = K_m(x_m - x_r) \\ F_m r_r = J_r \ddot{\theta}_r + b_r \dot{\theta}_r + M_{Load} \end{cases} \quad (16)$$

где J_r и θ_r – эквивалентный момент инерции и угловое положение руля, соответственно, r_r – плечо к поверхности руля управления, F_m , x_m – развиваемая сила и перемещение ЭМРП, соответственно, x_r – перемещение руля; K_m – коэффициенты жесткости соединения ЭМРП с рулевой поверхностью, b_r – коэффициент демпфирования руля; M_{Load} – внешняя нагрузка на руль.

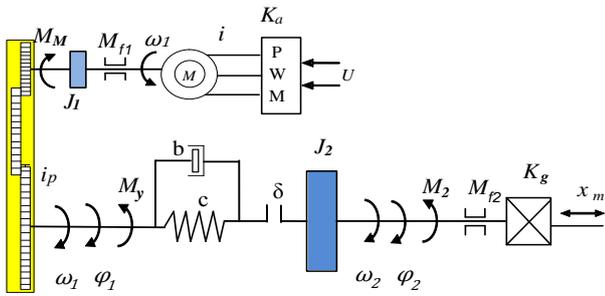


Рис. 3. Кинематическая схема ЕМА

Адаптивный контроллер компенсации нагрузки для системы рулевого управления самолета синтезируется в два этапа. Первый шаг – синтез контроллера без учета внешних факторов нагрузки основан на теории адаптивного обратного управления (adaptive backstepping) [5]. Задачей адаптивного управления является стабилизация системы в условиях неопределенности параметров и влиянии нелинейностей, и обеспечение заданной траектории движения рулевого органа.

Вторым уровнем адаптивного управления считается использование структуры для «компенсации» нагрузки, показанной на рис. 2.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исследование переходных процессов по выходному положению электромеханического рулевого привода при ступенчатом входном воздействии по управлению, и ступенчатом воздействии сил внешних нагрузок на 0.5 с проведено с помощью моделирования в MatLab/Simulink.

Приводится сравнение влияния внешней нагрузки на рулевую систему при малых сигналах задания положения.

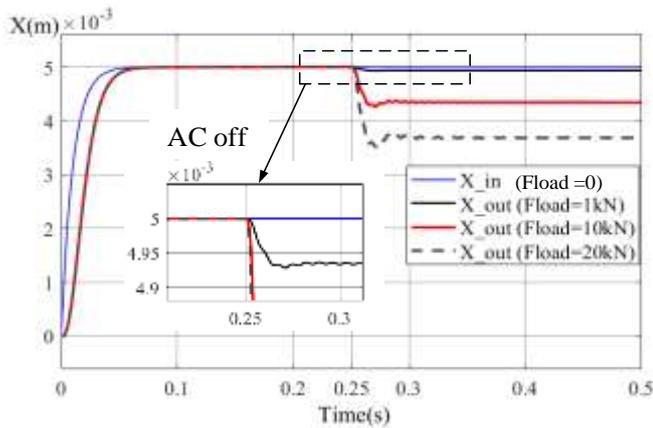


Рис. 4. Реакция по положению X_m без АР (адаптивного регулятора) компенсации нагрузки

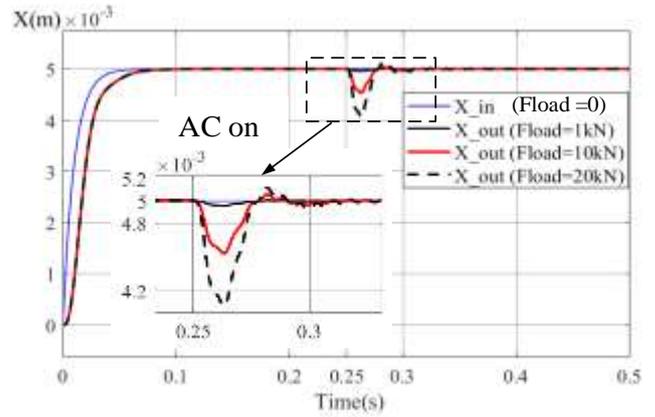


Рис. 5. Реакция по положению X_m с включением АР компенсации нагрузки

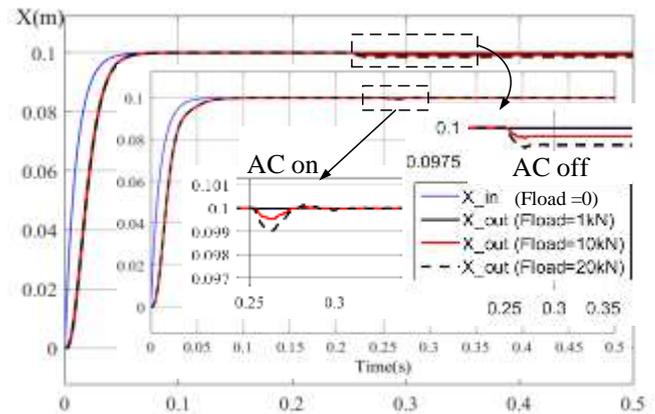


Рис. 6. Реакция по положению X_m при большом входном сигнале

На рис. 4 приведены результаты сравнения действия нагрузки без адаптивной компенсации нагрузки (без АР адаптивного регулятора (AC off)). На рис. 5 приведены результаты сравнения действия нагрузки с адаптивной компенсацией нагрузки (с АР, AC on).

При изменении нагрузки от 1 кН до 20 кН возникают большие статические ошибки по положению рулевого органа без АР (рис. 4) и при включении АР (рис. 5) имеется только динамическая составляющая ошибки с быстрым восстановлением положения.

При больших управляющих сигналах (рис. 6) процессы по возмущению сопоставимы с предыдущими экспериментами, улучшаясь при включении адаптивного управления.

Отсутствие статической составляющей ошибки в положении рулевого привода позволяет говорить о полной или частичной компенсации нагрузки при применении адаптивной системы управления по компенсации нагрузки

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Адаптивный алгоритм компенсации нагрузки на основе структуры компенсации сигнала представляет собой пример построения адаптивного регулятора с неявной

эталонной моделью и «сигнальной настройкой», определяющей безынерционность механизма адаптации, и обеспечивающий инвариантность системы к действию внешних возмущений (нагрузки) в области малых управляющих сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Системы электрогидравлических рулевых приводов комплексов управления полетом самолета / С.В. Константинов, В.Е. Кузнецов, и др. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019, 518 с.
- [2] Kuznetsov V.E., Khanh N.D. and Lukichev A.N., "System for Synchronizing Forces of Dissimilar Flight Control Actuators with a Common Controller," 2020 XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), St. Petersburg, Russia, 2020, pp. 137-140, doi: 10.1109/SCM50615.2020.9198768.
- [3] Xingjian Wang, Rui Liao, Cun Shi and Sh. Wang, et al Linear Extended State Observer-Based Motion Synchronization Control for Hybrid Actuation System of More Electric Aircraft, Sensors 2017, 17, 2444
- [4] Серебряный В.В, Бошляков А.А, Огородник А.И. Математическая модель исполнительных модулей захватных устройств роботов. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2019, №6, 123 с.
- [5] Miroslav Krstic, Ioannis Kanellakopoulos, Petar V. Kokotovic. Nonlinear and Adaptive Control Design. Энергоатомиздат. 1995. 564 с.