

Синтез адаптивного регулятора для сервосистемы с линейным электродвигателем

В. Е. Кузнецов¹, Фан Тхань Чьунг², А. Н. Лукичев³

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

¹vekuznetsov56@mail.ru, ²chungvcg@gmail.com, ³lukichevan@gmail.com

Аннотация. Представляется построение математической модели линейного электродвигателя перемещения клапана электрогидравлического привода. Приводится аналитическое описание его нелинейной тяговой характеристики, а также результирующей реакции от действия электромагнитной силы и силы упругости центрирующей пружины. Приводятся адаптивные законы управления сервосистемой и сравнительный анализ эффективности адаптивных алгоритмов с параметрической и сигнальной настройками. Исследования проводятся на физических макетах рулевого электрогидропривода и в пакете программы Matlab-Simulink

Ключевые слова: линейный электродвигатель силы; математическая модель; адаптивное управление; следящий электрогидропривод

I. ВВЕДЕНИЕ

Появление новых типов самолетов вызывает необходимость работы рулевых систем с малыми амплитудами перемещений, что увеличивает требования к динамическим характеристикам рулевых приводов и стабильности их характеристик в области малых сигналов. В области малого сигнала существует ряд факторов, которые снижают динамические и статические характеристики системы, а именно: существенные нелинейности в характеристиках линейного (по силе) электродвигателя (ЛЭД) и гидроклапанов [1]. Особенности этих нелинейных характеристик определяются различными значениями крутизны статических характеристик в зависимости от величины входного сигнала. Изменение параметров электрогидравлической системы связано с изменением температуры и давления нагнетания рабочей жидкости, уменьшением числа резервированных каналов управления, а также наличием внешних возмущений [1]. Динамические характеристики следящей системы в этом случае могут изменяться в широких пределах. Повышение чувствительности, качество и стабильности характеристик электрогидравлической рулевой системы в области малых сигналов задания в указанных условиях эффективно решается при помощи адаптивного управления [1, 4].

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

На основе принятых допущений к описанию электромагнитных процессов [5] получена полная

математическая модель линейного электродвигателя, описываемая системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} L(F_i, \bar{x}) \frac{di}{dt} = u - Ri - C_e(F_i, \bar{x}) \frac{dx}{dt}, & F_i = wi, \\ m_{LM} \frac{d^2x}{dt^2} = K_{FI}(\bar{x})i - b_{LM} \frac{dx}{dt} - (C - C_M(\bar{x}))x - f_L, \end{cases} \quad (1)$$

где u (U), i (I), R , w – соответственно, напряжение, ток, сопротивление и число витков обмотки ЛЭД; m_{LM} – масса подвижной части; b_{LM} – коэффициент вязкого трения; C – жесткость центрирующей механической пружины, f_L – внешняя сила.

Сильное влияние на ЛЭД оказывают внутренние нелинейные характеристики [1, 5]:

A. Статическая характеристика силы ЛЭД

Нелинейная статическая механическая характеристика ЛЭД

$$K_{FI}(\bar{x}) = \frac{2kF_M(\bar{R}_M + 1 + \bar{x}^2)w}{(\bar{R}_M + 1 - \bar{x}^2)^2}, \quad (2)$$

где $k = (2\mu_0 S_f R_{x0}^2)^{-1}$, μ_0 – магнитная постоянная, S_f – площадь полюсных наконечников; $R_{x0} = \delta/\mu_0 S_f$, $\bar{x} = x/\delta$, δ – воздушный зазор в среднем положении двигателя, x – абсолютное перемещение якоря ЛЭД; магнитодвижущая сила (МДС) от постоянных магнитов F_M ; $\bar{R}_M = R_M/R_{x0}$; сопротивлений постоянных магнитов $R_M = R_{M1} = R_{M2}$.

B. Суммарная сила электромагнитной и механической пружин

Суммарная сила электромагнитной и механической пружин:

$$C_{lm}(\bar{x})x = [C_M(\bar{x}) - C]x = \left(\frac{4kF_M^2}{(\bar{R}_M + 1 - \bar{x}^2)^2 \delta} - C \right) x. \quad (3)$$

С. Коэффициент ЭДС

$$C_e(\bar{x}) = \frac{wF_M(\bar{R}_M + 1 + \bar{x}^2)}{R_{x0}(\bar{R}_M + 1 - \bar{x}^2)^2 \delta} \quad (4)$$

Наибольшее влияние оказывает суммарная сила упругости $C_{lm}(\bar{x})x$, характеристика которой представлена на рис. 1. Ее крутизна изменяется в зависимости от жесткости механических пружины C и имеет два экстремума, при достижении которых ЛЭД снижает статическую жесткость. При ограничении хода ЛЭД равного 1/3 рабочего зазора, где градиент изменения угла наклона незначителен, характеристика линейна.

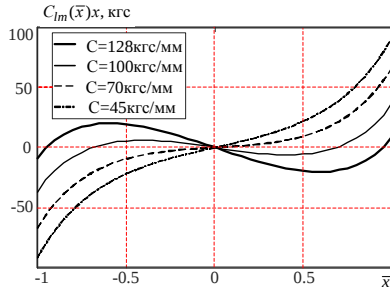


Рис. 1. Вид нелинейной результирующей силы упругости магнитной и механической пружин при различных жесткостях C

На рис. 2 представлена структурная схема следящей системы (SS) с полной нелинейной моделью ЛЭД, учитывающей вышеперечисленные дестабилизирующие факторы. На схеме обозначены: k_i – коэффициент усиления регулятора тока, k_e , T_i – коэффициенты усиления, соответственно, ошибки по положению и регулятора тока, k_{vx} – коэффициент скоростной характеристики, k_u , T_u – коэффициент и постоянная времени усилителя мощности k_{ui} , k_{ux} – коэффициенты датчиков тока и положения.

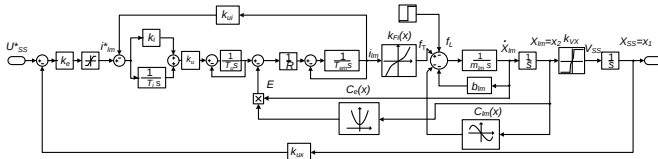


Рис. 2. Математическая модель сервопривода с учетом нелинейных характеристик ЛЭД

III. СИНТЕЗ АДАПТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ

Согласно приведенному выше анализу, система представляет собой систему достаточно высокого порядка, включающую нелинейные коэффициенты: C_e , k_{FI} , C_{lm} , k_{vx} может быть представлена в виде управления в пространстве состояний:

$$\dot{x} = A(x, t)x + B(x, t)u; \quad y = Cx, \quad (5)$$

где x – n -мерный вектор состояния; y – p -мерный вектор выходов; u – m -мерный вектор управления; $A(x, t)$, $B(x, t)$ – нестационарные матрицы, C – постоянная матрица выхода.

Согласно прикладной теории построения электромеханических систем управления [2] для построения адаптивных алгоритмов необходимо выполнить следующие шаги:

- построение эталонной модели,
- построение наблюдателя состояния системы,
- разработка адаптивного механизма для системы.

А. Построение эталонной модели

Для удовлетворения заданным требованиям к системе эталонная модель имеет желаемые характеристики. В качестве эталонной модели используется линеаризованное представление следящей системы с добавлением модального регулятора.

Линейная модель представлена на рис. 3. Модель линеаризуется в рабочих точках характеристик. Схема на рис. 3 содержит контур тока с ПИ-регулятором.

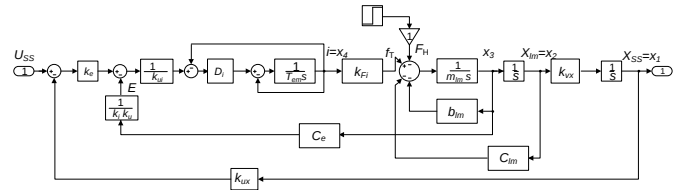


Рис. 3. Линейная система

На рис. 3 обозначены: $D_i = k_{ui}k_i k_u r^{-1}$, U_{ss} – задание следящей системы, $x_1 = x_{ss}$ – положение следящей системы; x_2 – преобразование якоря линейного электродвигателя; x_3 – скорость якоря линейного электродвигателя; x_4 – ток обмотки линейного электродвигателя.

Уравнения линеаризованной системы

$$\dot{x} = A_0 x + B_0 u; \quad y = C_0 x,$$

где:

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & k_{vx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{C_{lm}}{m_{lm}} & -\frac{b_{lm}}{m_{lm}} & -\frac{k_{FI}}{m_{lm}} \\ -\frac{k_{ux}k_e D_i}{k_{ui}T_{em}} & 0 & -\frac{C_e}{rT_{em}} & -\frac{(D_i + 1)}{T_{em}} \end{bmatrix};$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{k_e D_i}{k_{ui}T_{em}} \end{bmatrix}^T; \quad C_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0].$$

Матрицы A_0, B_0 являются результатом линеаризации системы.

Эталонная модель: $\dot{x}_M = A_M x + B_M u; \quad y = Cx_M$,

где $A_M = A_0 - BK$; $B_M = B_0$; $K = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4]$. K – матрица коэффициентов модального регулятора. Для

определения коэффициентов модального регулятора выбрано распределение корней характеристического уравнения по стандартной форме Баттерворта, или Ньютона, обеспечивающего минимум интеграла от квадрата ошибки.

$$H_0(p) = a_0 p^4 + a_1 \omega_0 p^3 + a_2 \omega_0^2 p^2 + a_3 \omega_0^3 p + a_4 \omega_0^4,$$

где a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 – коэффициенты полиномов Баттерворта или Ньютона.

В. Построение наблюдателя состояния системы

Для получения информации состоянии системы при отсутствии датчиков, используется наблюдатель.

Уравнения наблюдателя состояния:

$$\dot{\hat{x}} = A_0 \hat{x} + B_0 u + G(y - \hat{y}); \quad \hat{y} = C \hat{x},$$

где $\hat{x}$ – вектор оценок переменных состояния; G – векторкоэффициентов обратных связей наблюдателя.

Определение матрицы G определяется по уравнению:

$$\det[pI - A + GC] = H_g(p),$$

$$H_g(p) = a_0 p^4 + a_1 \omega_g p^3 + a_2 \omega_g^2 p^2 + a_3 \omega_g^3 p + a_4 \omega_g^4,$$

$$\omega_g = (3 \div 5) \omega_0.$$

С. Разработка адаптивного механизма для системы

Проектирование алгоритма настройки коэффициентов регулятора, осуществляется при условии:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} (x - x_M) = 0, \quad (6)$$

где $e = x - x_M$ или $e = \hat{x} - x_M$.

Для асимптотической сходимости решения необходимо соблюдение условий согласованности

$$BB^+(A - A_M)x = (A - A_M)x; BB^+(B - B_M)x = (B - B_M)x,$$

где $B^+ = B^T(B^T B)^{-1}$ псевдообратная матрица, если B прямоугольная.

1) Параметрический алгоритм адаптации

Выполнение условия (6) может быть обеспечено при параметрическом алгоритме настройки [6]

$$z = K_A x + K_B g,$$

где

$$\dot{K}_A = -\Gamma_A B_M^T P e x^T - L_A K_A;$$

$$\dot{K}_B = -\Gamma_B B_M^T P e g^T - L_B K_B,$$

где K_A и $K_B - (m \times n), (m \times m)$ -матрицы настраиваемых коэффициентов, при этом, $\Gamma_A, \Gamma_B, L_A, L_B - (m \times m)$ -мерные, симметричные положительные определенные диагональные матрицы постоянных коэффициентов усиления алгоритма; $P -$ симметричная ($P = P^T > 0$)

положительно определенная $(n \times n)$ матрица, определенная из уравнения Ляпунова $PA_M + A_M^T P = -Q$, где $Q -$ диагональная, положительно определенная матрица.

Конкретные значения элементов матрицы Q выбираются в соответствии с методикой, которая рассмотрена в [2]. Разработана программа оптимального выбора значений матрицы Q , которая определяет значения ее диагональных элементов на основании выполнения условия минимизации отношения между наибольшими и наименьшими собственными значениями матрицы P .

2) Сигнальный алгоритм адаптации

Для системы (5) алгоритм сигнальной адаптации следующий [6]: $u(t) = g + z(t)$, $z(t) = -h \operatorname{sgn}(B_M^T P e)$,

где $g(t) -$ программное задание, $z(t) -$ алгоритм сигнальной адаптации, $h -$ коэффициент усиления, характеризующий амплитуду (ограничение) релейного управления, $h = \operatorname{const} > 0$.

В [2] обосновано работоспособность алгоритма и сохранение асимптотической устойчивости системы.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Параметры моделирования:

$$k_e = 1.5; k_i = 3; T_i = 0.1; r = 12; T_{em} = 0.12; k_{FI} = 0.12; C_e = 162;$$

$$b_{lm} = 1.99; m_{lm} = 0.017; k_{vx} = 450000; k_{ux} = 1; C_{lm} = 21820.$$

В процессе исследования следящей системы сравниваются следующие переменные: положение исходной следящей системы (Исходная), эталонной модели (ЭМ) и положение следящей системы с адаптивным регулятором с сигнальной настройкой (АРСН) и с адаптивным регулятором с параметрической настройкой (АРПН).

Система на рис.4 имеет настройку эталонной модели по быстрдействию равную быстрдействию скоростной части следящей системы (контур тока $k_i=3$). Работа алгоритмов АРСН и АРПН приводит к удовлетворительному совпадению движения следящей системы к эталонной модели.

При уменьшении быстрдействия контура тока (увеличение его постоянного времени) ($k_i=0.5$) переходные процессы группируются вокруг движения эталонной модели (рис. 5). Работа АРСН и АРПН удовлетворительна. Параметрическая настройка ближе приближает положение следящей системы к эталонной модели, чем сигнальная настройка.

При увеличении быстрдействия механической части следящей системы (рис. 6). Частота резонанса ЛЭД в 2 раза больше чем в исходной. Параметрическая адаптация сближает движение следящей системы к эталонной модели ближе чем АРСН.

При уменьшении частоты резонанса ЛЭД в два раза (рис. 7) параметрическая адаптация сближает движение

следящей системы к эталонному ближе чем АРСН. При правильной настройке подсистемы скоростикой части следящей системы (контур тока имеет сниженный коэффициент усиления $k_i=2$), следящая система имеет необходимые запасы устойчивости по амплитуде и фазе, что позволяет улучшить в её динамические свойства средствами АРСН и АРПН.

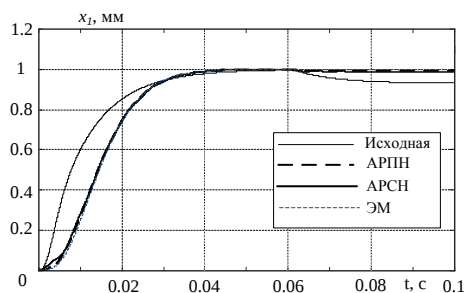


Рис. 4. Работа следящей системы с максимальным быстродействием по скорости ($k_i=3$, $C=C_{lm}$)

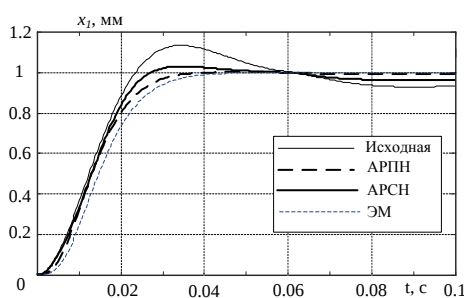


Рис. 5. Работа следящей системы при сниженном быстродействии по скорости ($k_i=0.5$, $C=C_{lm}$)

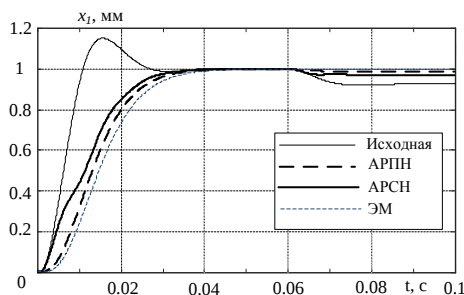


Рис. 6. Работа следящей системы при изменении параметров упругой части ЛЭД ($k_i=2$, $C=0.5C_{lm}$)

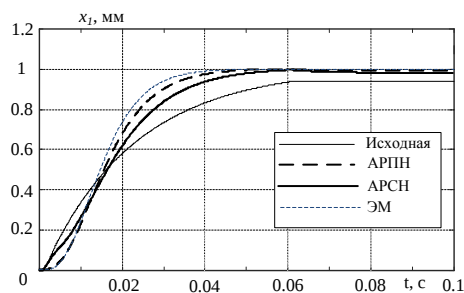


Рис. 7. Работа следящей системы при изменении параметров упругой части ЛЭД ($k_i=2$, $C=2C_{lm}$)

V. THE RESULTS OF THE EXPERIMENTS ON THE TEST BENCH OF ELECTRO-HYDRAULIC SERVO ACTUATORS

На рис. 8 и рис. 9 показаны результаты сравнительного экспериментального исследования привода с адаптивным регулятором (рис. 9) и без него (рис. 8) на разных уровнях (менее 0,03 мм и более 0,2 мм) контрольное действие. Существует расширение полосы пропускания следящей системы с помощью адаптивного регулятора. При включении адаптивного регулятора наблюдается плотный кластер высокочастотных ответвлений.

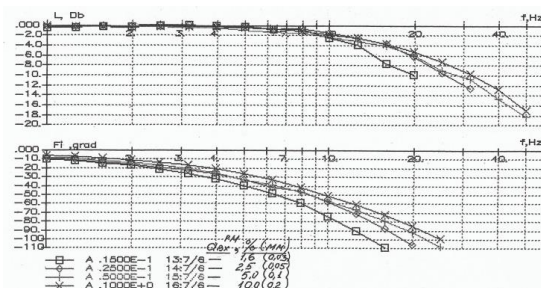


Рис. 8. Характеристики следящей системы (управляющее воздействие 0.03, 0.05, 0.1, 0.2 мм), без адаптивного контроллер

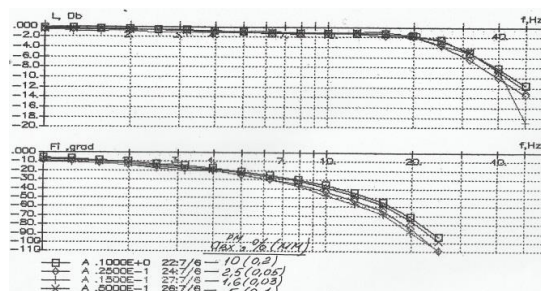


Рис. 9. Характеристики следящей системы (задание 0.03, 0.05, 0.1, 0.2 мм) с адаптивным регулятором с сигнальной адаптацией

VI. Вывод

При оптимальной настройке быстродействия следящей системы и динамики ЭМ адаптивные регуляторы с АРСН и АРПН обеспечивают хорошую сходимость выходной переменной системы к эталонной модели при изменении параметров следящей системы: быстродействию токового контура ЛЭД и резонанса механической части ЛЭД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Константинов СВ, Кузнецов ВЕ, Поляхов НД, Редько ПГ, Трифонова ОИ. Электрогидравлические рулевые приводы с адаптивным управлением маневренных самолетов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011.
- [2] Борцов ЮА, Поляхов НД, Путов ВВ. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние; 1984, 216 с.
- [3] Адаптивное управление техническим объектом на основе экзомодели / Кузнецов В. Е., Поляхов Н.Д. // (SCM-2015), 19–21 мая 2015 г. СПб., 2015. Т.1. С.277–280.

- [4] Адаптивное управление рулевой следящей системой на основе экзомодели/ В.Е. Кузнецов. Сборник докладов X Всероссийской научн.техн.конф. 26.6.2015, МАИ – М.: МАИ, 2015. С.204–208.
- [5] Kuznetsov VE, Chung PT, Lukichev AN, Ha NH. A Linear Electric Motor Servo System with the Adaptive Controller Based on Exo-model. (EIConRus) 2019 Jan 28 (pp. 584-589). IEEE.
- [6] Путов ВВ, Шелудько ВН. Системы управления многостепенными механическими объектами с упругими деформациями: Учеб. пособие. СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2009.
- [7] Кузнецов ВЕ, Фан Тхань Чьунг. Программа расчета параметров сигнального адаптивного алгоритма для следящей электрогидравлической системы/ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018664091, М, 12.11.2018