ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ГРАДИЕНТНЫМ АЛГОРИТМОМ УПРАВЛЕНИЯ

Николай Анатольевич Малёв, к.т.н., доцент
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань

Следящие электроприводы и автоматические системы точного позиционирования находят широкое применение в различных областях науки и техники. Машиностроительная и приборостроительная отрасли, мехатроника и робототехника, гибкие производственные системы и сборочные линии используют следящий электропривод для воспроизведения требуемых траекторий перемещения исполнительных элементов при выполнении разнообразных технологический операций. К позиционным следящим электроприводам предъявляются повышенные требования по точности и стабильности динамических характеристик в изменяющихся условиях функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов. В этой связи исследование работоспособности и качества функционирования следящих электроприводов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях и изменяющихся параметрах является актуальной и важной задачей. Целью данной работы является анализ динамических характеристик следящего электропривода с градиентным алгоритмом управления, обеспечивающего свойства малой чувствительности к параметрическим и координатным возмущениям, а также формирование соответствующих рекомендаций по результатам математического моделирования процессов управления.

Влияние дестабилизирующих факторов приводит к ухудшению показателей качества функционирования следящих электроприводов, нарушает точностные характеристики. Системы управления электроприводов, синтезированные с применением метода подчиненного регулирования и других способов последовательной коррекции обеспечивают заданные показатели качества при номинальных значениях параметров. При этом электроприводы оказываются чувствительными к параметрическими возмущениям и в данных условиях качество и точность функционирования следящего электропривода может не соответствовать предъявляемым требованиям. Обеспечить поддержание требуемого качества функционирования при влиянии дестабилизирующих факторов сравнительно простыми средствами позволяет алгоритм управления, сформированный с применением эталонной модели и градиентного способа вычисления управляющего воздействия. Алгоритм направлен на минимизацию соответствующего функционала показателя качества и обеспечивает параметрическую инвариантность следящего электропривода, а также малую чувствительность к координатным возмущениям различной физической природы.

$$x^{(n)} + \sum_{i=0}^{n-1} a_i x^{(i)} = \sum_{j=0}^{m} b_j u^{(j)}$$ – дифференциальное уравнение объекта исследования

$$x_m^{(N)} + \sum_{v=0}^{N-1} \alpha_v x_m^{(v)} = \sum_{j=0}^{l} \beta_j x_s^{(j)}$$ – дифференциальное уравнение эталонной модели

$$0 \le l \le N, \;\; N \ge n$$

$$\left| x(t) - x_m(t) \right| \le \varepsilon$$

Задача синтеза алгоритма управления требует, чтобы изменение регулируемой координаты $x(t)$ соответствовало эталонному процессу с погрешностью, не превышающей постоянной величины ε, характеризующей динамическую точность следящего электропривода.

$$x(t) \to x_m(t)$$

данное требование будет обеспечиваться наилучшим образом, если управляющая функция $u(t)$ определяется из условия, что значение функционала

$$J\left(u,\dot{u},\ldots,u^{(m)}\right)=\frac{1}{2}\left[x_m^{(n)}(t)-x^{(n)}\left(t,u,\dot{u},\ldots,u^{(m)}\right)\right]^2$$

в каждый момент времени принадлежит малой окрестности экстремума-минимума. Движение в окрестность экстремума-минимума функционала организуется в соответствии с градиентным алгоритмом

$$\frac{du^{(m)}(t)}{dt}=\lambda\frac{\partial J(u,\dot{u},\ldots)}{\partial u^{(m)}},\lambda=\mathrm{const}$$

Старшая производная выходной координаты следящего электропривода

$$x^{(n)}(t,u,\dot{u},\ldots)=\sum_{j=0}^{m}b_j u^{(j)}-\sum_{i=0}^{n-1}a_i x^{(i)}$$

тогда составляющая градиента по $u^{(m)}$

$$\frac{\partial J(u,\dot{u},\ldots)}{\partial u^{(m)}}=-b_m\left[x_m^{(n)}-x^{(n)}\right]$$

Получаем дифференциальный закон управления $u^{(m+1)}=k\left[x_m^{(n)}-x^{(n)}\right],\ k=-\lambda b_m$

и после интегрирования при нулевых начальных значениях координат, окончательно получим выражение для управляющей функции

$$u=k\left[x_m^{(\gamma)}-x^{(\gamma)}\right],\ \gamma=n-m-1$$

Объект управления представляет собой следящий позиционный электропривод с синхронным двигателем с постоянными магнитами. Значения параметров двигателя приведены в табл. 1.

Алгоритм управления должен обеспечить выполнение следующих требований: 1) в установившемся режиме динамическая погрешность между выходной угловой координатой электропривода и сигналом задания в диапазоне рабочих частот не должна превышать допустимый уровень; 2) длительность переходного процесса и перерегулирование при ступенчатом задающем воздействии должны быть не больше заданных значений; 3) требуемая динамическая точность должна обеспечиваться при воздействии момента сопротивления нагрузки, величина и характер изменения которого определяются условиями функционирования электропривода; 4) электропривод должен обладать малой чувствительностью к изменению параметров объекта управления и управляющего алгоритма.

Таблица 1. Номинальные параметры двигателя

Напряжение U, В	Сопротивление обмотки статора R_f, Ом	Индуктивность по оси d L_d, Гн	Индуктивность по оси q L_q, Гн	Коэффициент потока c, Вб	Момент инерции J, кг·м^2
200	0,205	0,00525	0,001886	0,11	0,078

$$W_o(s) = \frac{\Theta(s)}{U(s)} = \frac{b_0}{s^3 + a_2 s^2 + a_1 s}$$

$$b_0 = \frac{K_\alpha c}{L_q J} \qquad a_2 = \frac{R_f}{L_q} \qquad a_1 = \frac{c^2}{L_q J}$$

$$W_m(s) = \frac{\beta_1 s + \beta_0}{s^3 + \alpha_2 s^2}$$

$$\beta_0 = \frac{K_\varepsilon}{T_{2m}} \quad \beta_1 = \frac{K_\varepsilon T_{1m}}{T_{2m}} \quad \alpha_0 = \beta_0 \quad \alpha_1 = \beta_1 \quad \alpha_2 = \frac{1}{T_{2m}}$$

$$J(u) = \frac{1}{2}\left[\ddot{\theta}_m(t) - \ddot{\theta}(t,u)\right]^2$$

$$\frac{du(t)}{dt} = \lambda \frac{\partial J(u)}{\partial u}, \lambda = \text{const}$$

$$\frac{du(t)}{dt} = k_\theta\left(\ddot{\theta}_m - \ddot{\theta}\right),\ k_\theta = -\lambda b_0$$

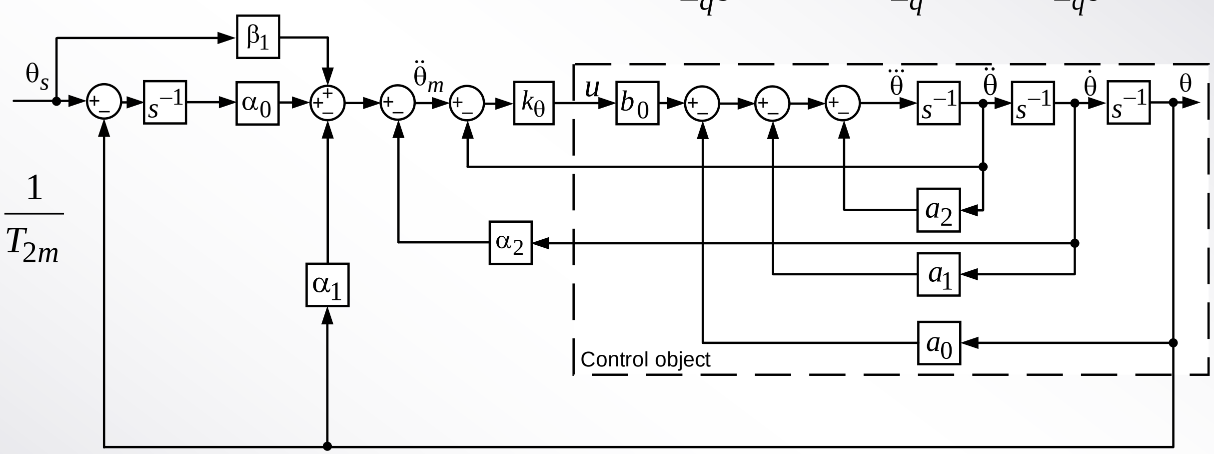

Рис 1. Структурная схема следящего электропривода с градиентным алгоритмом управления

$$u(t) = k_\theta\left(\ddot{\theta}_m - \ddot{\theta}\right)$$

$$\dddot{\theta}_m + \alpha_2\ddot{\theta}_m + \alpha_1\dot{\theta}_m + \alpha_0\theta_m = \beta_1\dot{\theta}_s + \beta_0\theta_s$$

$$\ddot{\theta}_m(t) = \alpha_0\int_0^t(\theta_s - \theta)dt + \beta_1\theta_s - \alpha_1\theta - \alpha_2\dot{\theta}$$

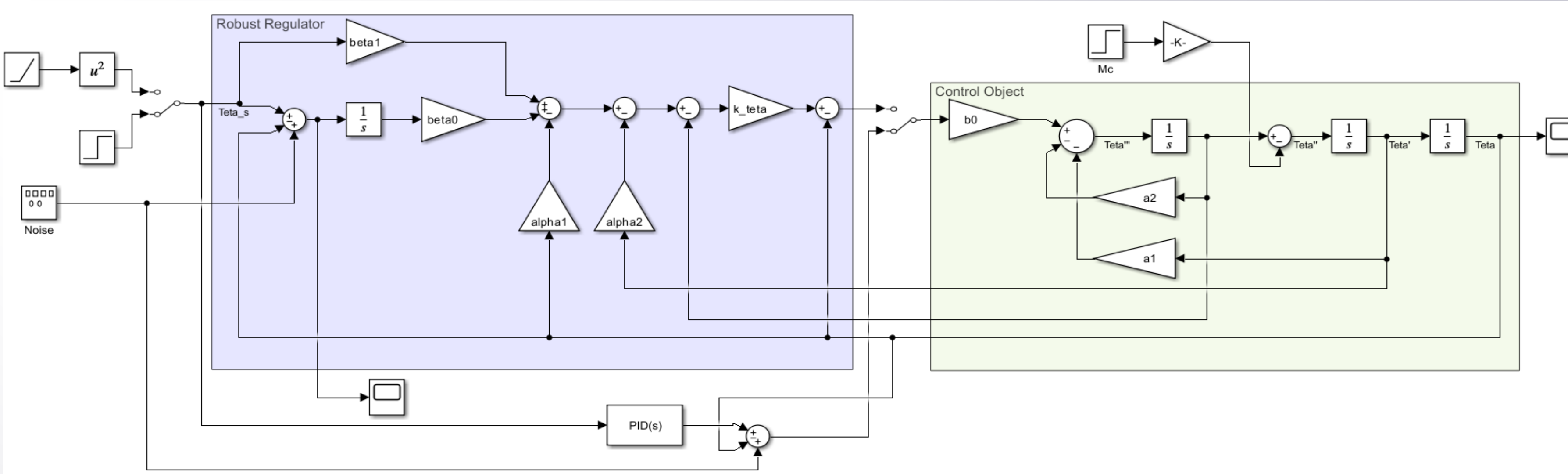

Рис. 2. Simulink-модель следящего электропривода

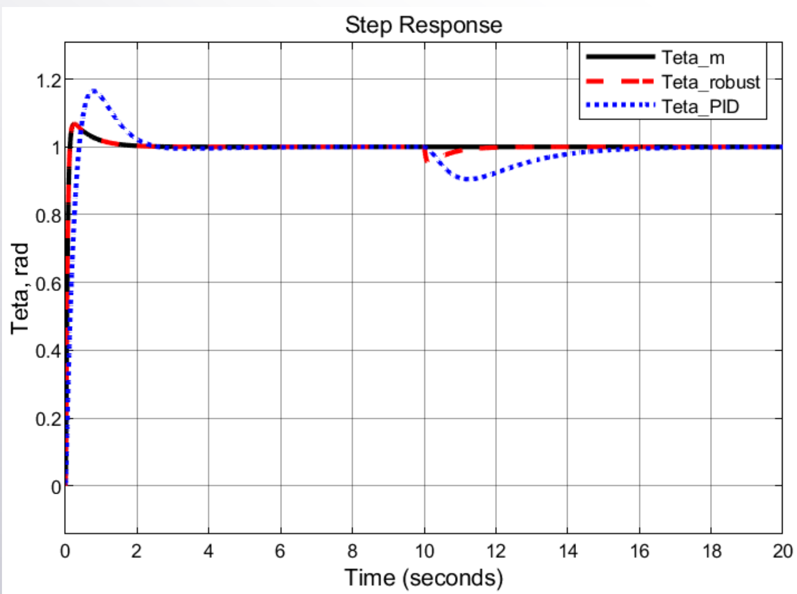

Рис. 3. Переходные характеристики следящего электропривода

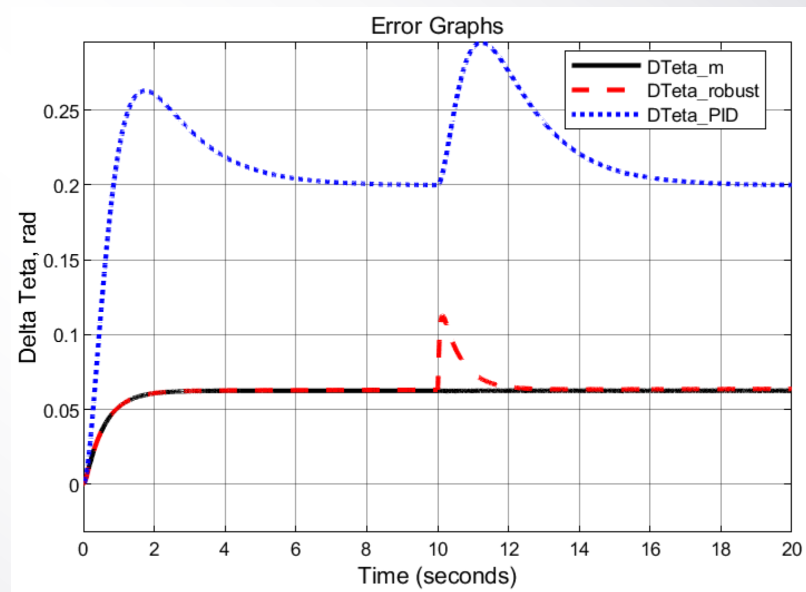

Рис. 4. Графики ошибок следящего электропривода

Исследуемый градиентный алгоритм управления предполагает минимизацию квадратичных функционалов вида

$$J\left(u,\dot{u},...,u^{(m)}\right)=\frac{1}{2}\left[x_m^{(n)}(t)-x^{(n)}\left(t,u,\dot{u},...,u^{(m)}\right)\right]^2$$

Минимизируемые функционалы записываются для разности старших производных выходных регулируемых координат объекта управления и эталонной модели. Требуемые точность и качество функционирования следящего электропривода достигаются благодаря тому, что в каждый момент времени значения минимизируемых функционалов удерживаются в малой окрестности экстремума-минимума.

Для объекта с соответствующим математическим описанием в окрестности фазовой траектории эталонной модели можно синтезировать (m+1) различных структур алгоритмов робастного управления, которые соответствуют дифференциальным законам изменения управляющей функции

$$\frac{du^{(l)}(t)}{dt}=\lambda\frac{\partial J\left(u,\dot{u},...\right)}{\partial u^{(l)}}=k\left[x_m^{(l)}-x^{(l)}\right],\ l=0,1,...,m;\ k=-\lambda b_s.$$

Структуры указанных алгоритмов определяются уравнениями

$$u=k\left[x_m^{(v)}-x^{(v)}\right],$$

$$x_m^{(n-l)}=\frac{1}{s^{N-v}}\left[\sum_{j=0}^{q}\beta_j x_s^{(j)}-\sum_{\mu=0}^{N-1}\alpha_\mu x^{(\mu)}\right],$$

$$l=0,1,...,m;\ v=n-l-1.$$

Электропривод с подобными алгоритмами теоретически допускает неограниченное повышение уровня усиления в контуре управляющей функции, что гарантирует идентичность динамических характеристик объекта управления и эталонной модели независимо от изменения параметров электропривода. Необходимая для практических приложений степень приближения динамических характеристик объекта управления и эталонной модели достигается при конечных значениях коэффициента усиления, величина которого может сравнительно небольшой, если добротность исследуемой системы соизмерима с добротностью эталонной модели. Решение о наиболее предпочтительной структуре алгоритма управления следует принимать по результатам исследования динамических характеристик системы с учетом возможных диапазонов изменения параметров объекта управления. Указанное обстоятельство относится и к выбору эталонной модели, структура которой определяется также особенностями технологического процесса, в котором функционирует объект управления, характером изменения задающих сигналов и видом возмущающих воздействий. Отмеченные особенности позволяют успешно применять рассмотренный алгоритм управления при проектировании систем управления электроприводов, функционирующих в различных режимах в условиях параметрических и координатных возмущений.