

**СИНТЕЗ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ РУЛЯ АВТОМОБИЛЯ****Г. Л. Никулин, Г. А. Французова***Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск
E-mail: frants@ac.cs.nstu.ru*

Представлен вариант построения системы управления безредукторным электромеханическим усилителем руля легкового автомобиля. Предложен алгоритм расчета модифицированного пропорционально-дифференциального (ПД) регулятора, основанный на методе локализации, для упрощенной математической модели объекта управления в виде классической двухмассовой системы «рулевое колесо–торсион–рулевой механизм». Результаты моделирования показали, что применение подобного ПД-регулятора позволяет обеспечить требуемое быстродействие системы и демпфировать колебания, порождаемые объектом управления.

Введение. К системе рулевого управления современным легковым автомобилем предъявляются высокие требования. Особое внимание уделяется уменьшению работы, совершаемой водителем во время парковки. Как правило, для повышения маневренности автомобиля используются реечные передачи с малым числом оборотов рулевого колеса, что придает рулю «остроту» и одновременно делает его более тяжелым для водителя. Повышение комфортности вождения достигается производителями с помощью специальных устройств – усилителей рулевого управления. Для решения этой задачи традиционно долгое время применялись гидравлические усилители. В последнее время вместо них используются электромеханические усилители рулевого управления (ЭМУР) различного исполнения, в которых вспомогательное усилие вырабатывается электродвигателем.

С учетом достоинств ЭМУР [1] и возросшего к ним интереса со стороны зарубежных и отечественных автомобилестроителей [1–4] задача построения системы управления для ЭМУР представляется актуальной и составляет предмет данной работы.

Постановка задачи. В предлагаемой работе рассматривается безредукторный электромеханический усилитель рулевой колонки, встраиваемый в рулевой вал легкового автомобиля. В состав такого ЭМУР входят два вала, соединенные упругой связью торсионного типа. На первый вал крепится рулевое колесо, второй вал жестко соединен с ротором исполнительного электродвигателя и соосен ему. При этом ЭМУР оказывается параллельным звеном в функциональной схеме системы рулевого управления (рис. 1).

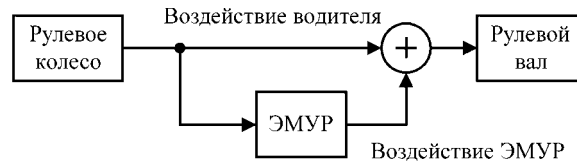


Рис. 1

Водитель, прикладывая усилия к рулевому колесу, заставляет торсион скручиваться. Измеряя этот момент, можно получить информацию о воздействии водителя и сформировать с помощью исполнительного электродвигателя вспомогательное усилие на валу рулевого механизма в соответствии с требованиями к функционированию системы.

В данной работе будем рассматривать только парковочный режим: система управления должна обеспечить комфортный для человека уровень быстродействия и свести к минимуму колебательность процессов на рулевом валу, т. е. показатели качества работы замкнутой системы (максимальное время переходного процесса t_n и перерегулирование σ) должны соответствовать значениям

$$\begin{cases} t_n \leq 0,1 \text{ с,} \\ \sigma \approx 0. \end{cases} \quad (1)$$

Необходимо синтезировать регулятор, обеспечивающий выполнение технических требований (1) в системе управления ЭМУР.

Электромеханический усилитель руля как объект управления. В работе [5] показано, что систему рулевого управления со встроенным электромеханическим усилителем можно рассматривать как классическую двухмассовую систему. Ее структурная схема показана на рис. 2, где $J_1, J_2, \varphi_1, \varphi_2$ – моменты инерции и угловые положения рулевого колеса и рулевого механизма соответственно; M_p – момент воздействия водителя на рулевое колесо; M_d – момент воздействия исполнительного двигателя; M_{τ_1} – момент скручивания торсиона; M_{c_1} – суммарный момент сопротивления вращению рулевого колеса; M_{c_2} – суммарный момент сопротивления рулевого механизма, включающий в себя также воздействие дорожного покрытия; C_{τ_1} – коэффициент жесткости торсиона; C_{τ_2} – коэффициент внутреннего трения торсиона.

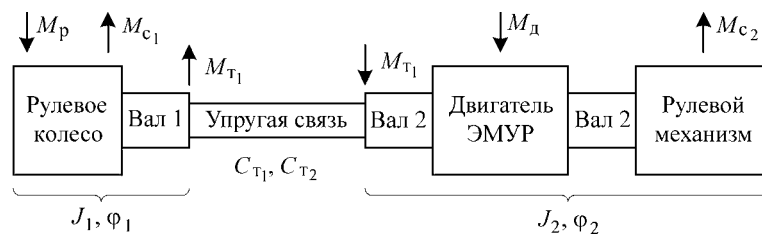


Рис. 2

В качестве исполнительного двигателя используется высокомоментный синхронный электродвигатель с постоянными магнитами (СДПМ). Проведенные ранее исследования [5] показали, что быстродействие применяемого электродвигателя существенно выше, чем быстродействие механической подсистемы. Это позволяет в соответствии с методом разделения движений [6] рассматривать равновесное значение подсистемы формирования момента исполнительного двигателя, пренебрегая ее динамикой. В результате обоснованных упрощений [5] сокращенная математическая модель ЭМУР в составе системы управления принимает вид

$$\ddot{M}_{\tau_1}(t) + C_{\tau_2} \left(\frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_2} \right) \dot{M}_{\tau_1}(t) + C_{\tau_1} \left(\frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_2} \right) M_{\tau_1}(t) = -\frac{C_{\tau_1}}{J_2} M_d(t) + \frac{C_{\tau_1}}{J_1} M_p(t). \quad (2)$$

Как видно, описание (2) соответствует типовому звену 2-го порядка и может быть представлено в виде

$$\ddot{M}_{\tau_1}(t) + \frac{2d_0}{T_0} \dot{M}_{\tau_1}(t) + \frac{1}{T_0^2} M_{\tau_1}(t) = -\frac{C_{\tau_1}}{J_2} M_d(t) + \frac{C_{\tau_1}}{J_1} M_p(t),$$

где $T_0 = \frac{1}{\sqrt{C_{\tau_1}(J_1^{-1} + J_2^{-1})}}$ – постоянная времени; $d_0 = \frac{1}{2} C_{\tau_2} \sqrt{\frac{J_1^{-1} + J_2^{-1}}{C_{\tau_1}}}$ – ко-

эффициент демпфирования.

Графики процессов в объекте (2), полученные путем моделирования в среде Matlab, для нулевых начальных условий при типовых значениях его параметров ($T_0 \cong 0,014$ с и $d_0 \cong 0,065$) показаны на рис. 3. Воздействие водителя представлено в виде ступенчатой функции со скачкообразными изменениями в моменты времени $t=0$ и $t=1$ с.

Реакция объекта управления имеет явно выраженный колебательный характер, что обусловлено малым значением коэффициента демпфирования d_0 .

Система управления ЭМУР. С целью обеспечения требуемых свойств в системе управления ЭМУР предлагается использовать типовой закон управления, а именно пропорционально-дифференциальный (ПД) регулятор, процедура расчета которого представлена в работе [7]. При этом коэффициент пропорциональной составляющей k_1 задается исходя из требований к величине вспомогательного усилия ЭМУР, а коэффициент дифференциальной составляющей k_2 рассчитывается на основе требований к качеству динамических процессов в замкнутой системе. Для реализации такого регулятора оценку дифференциальной составляющей предлагается осуществлять с помощью дифференцирующего фильтра (ДФ) 1-го порядка [6]. В результате передаточная функция регулятора принимает вид

$$W_{\text{пер}}(p) = \frac{M_d(p)}{M_{\tau_1}(p)} = \frac{k_2 p + k_1}{\tau p + 1}. \quad (3)$$

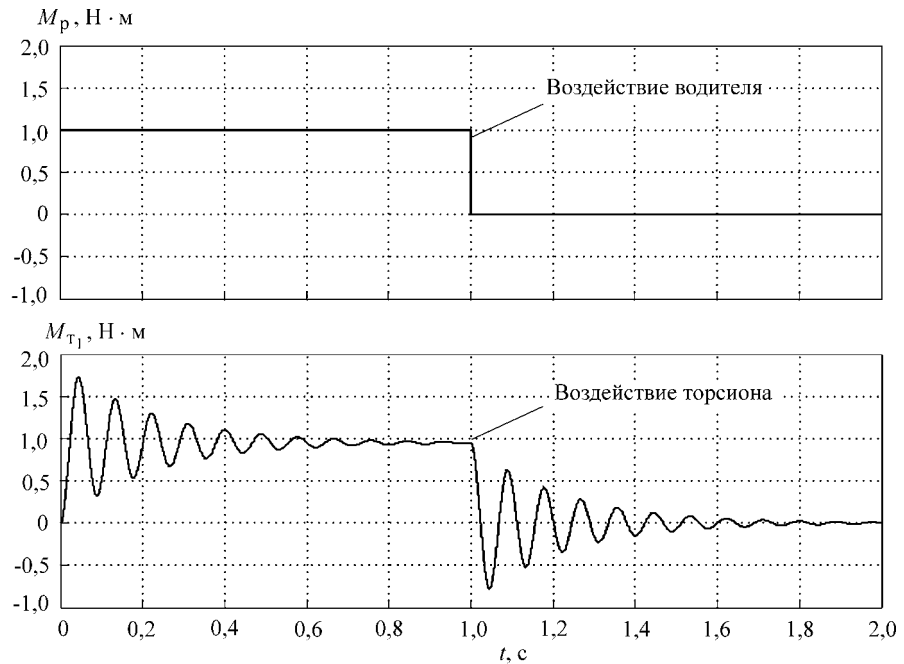


Рис. 3

Структурная схема замкнутой системы управления, включающей в себя объект (2) и регулятор (3), показана на рис. 4.

Исследование свойств замкнутой системы проводилось с помощью имитационного моделирования в среде Matlab. В ходе вычислительного эксперимента использовалась модель объекта (2) со следующими числовыми параметрами:

$$\ddot{M}_{T_1}(t) + 9,187 \dot{M}_{T_1}(t) + 5013 M_{T_1}(t) = -238,7 M_d(t) + 4775 M_p(t).$$

Передаточная функция регулятора рассчитана в соответствии с процедурой [7] и имеет вид

$$W_{\text{рег}}(p) = \frac{0,5092p + 4}{0,001p + 1}.$$

Процессы в системе при воздействии водителя M_p , имитируемом в виде ступенчатой функции, показаны на рис. 5. Моменты сопротивления M_{c_1} и M_{c_2} принимаются равными нулю, поскольку на данном этапе исследуются только динамические свойства замкнутой системы и не рассматриваются ее статические характеристики.

Как видно, процессы в системе с рассчитанным ПД-регулятором заканчиваются за время, не превышающее t_n , и имеют монотонный характер, т. е. удовлетворяют предъявленным требованиям (1).

Поскольку предлагаемый ПД-регулятор имеет фиксированные коэффициенты, интерес представляет поведение системы при отклонении параметров объекта от номинальных значений, что неизбежно возникает при массо-

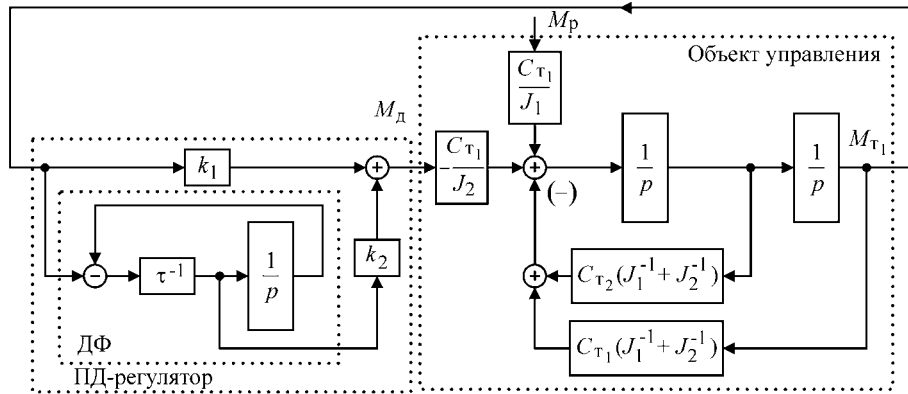


Рис. 4

вом выпуске изделий. Далее в качестве выборочного примера приводятся данные моделирования реакции замкнутой системы на воздействие водителя для разных значений жесткости торсиона (рис. 6, 7). Для наглядности коэффициент жесткости торсиона C_{T_1} изменялся в пределах $\pm 50\%$ от номинального ($C_{T_1} = 1,5C_{T_1 \text{ ном}}$ (см. рис. 6) и $C_{T_1} = 0,5C_{T_1 \text{ ном}}$ (см. рис. 7)), что на практике недопустимо. Анализ результатов исследования позволяет сделать вывод, что даже в таких экстремальных условиях система функционирует удовлетворительно.

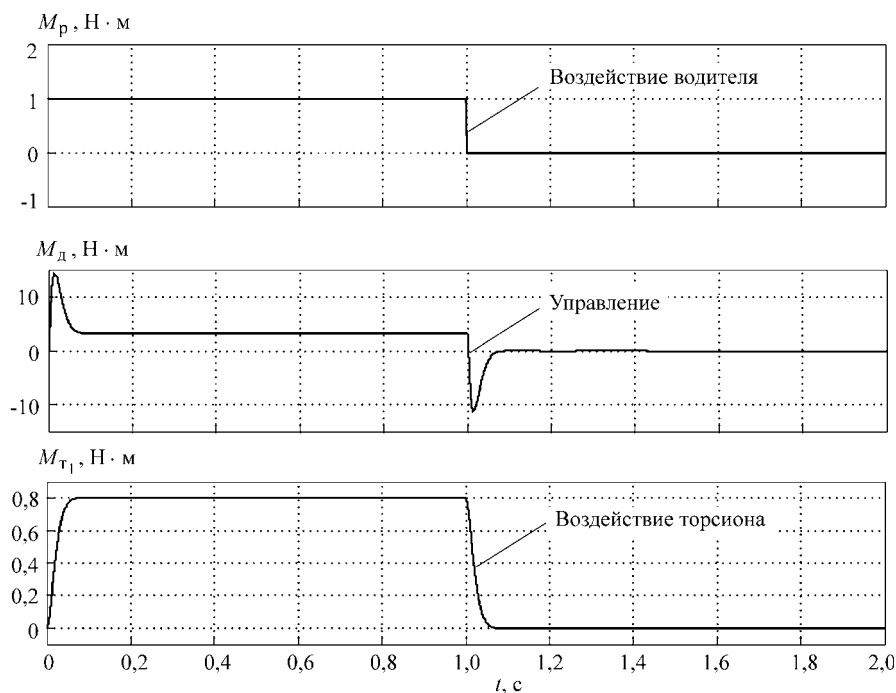


Рис. 5

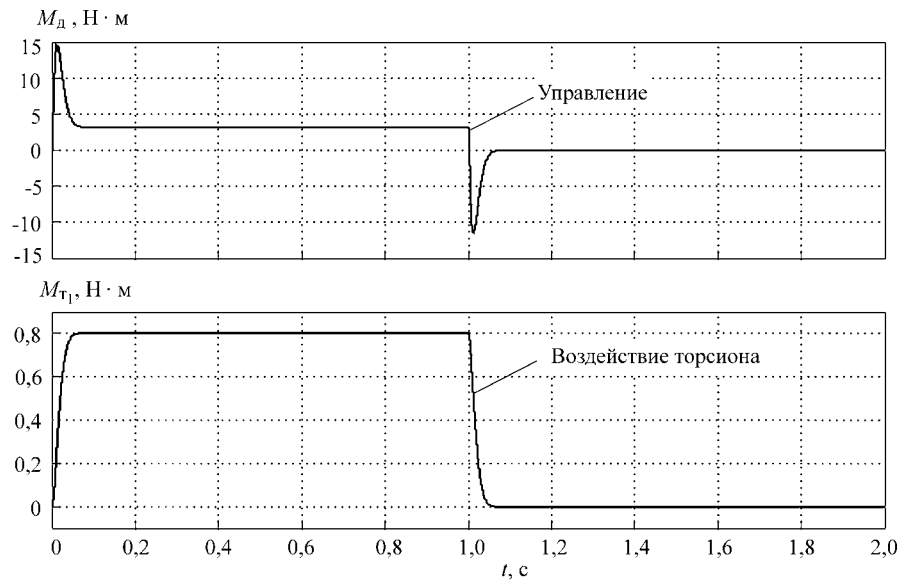


Рис. 6

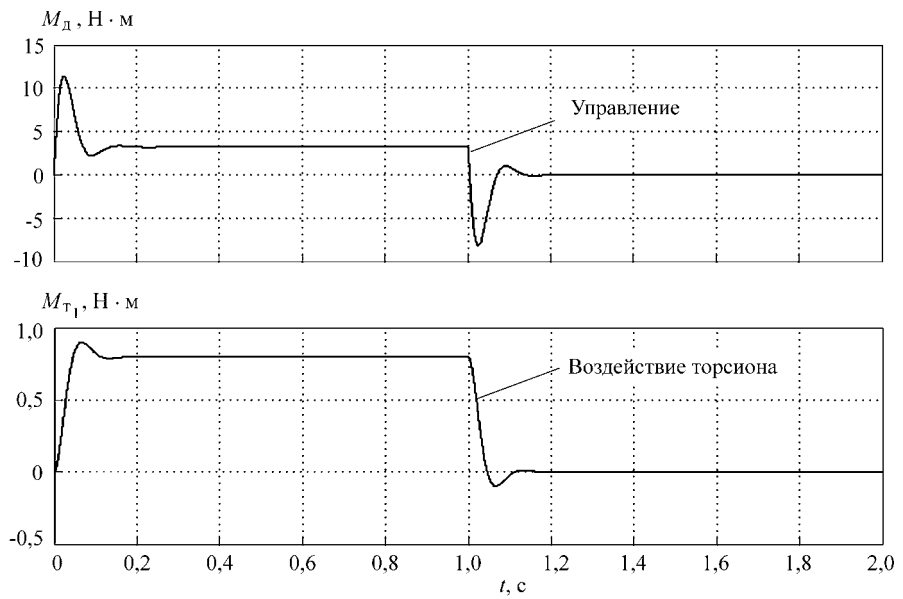


Рис. 7

Таким образом, предлагаемый регулятор обеспечивает решение поставленной задачи с требуемым качеством.

Заключение. В данной работе рассмотрена возможность применения ПД-регулятора для управления электромеханическим усилителем руля автомобиля. Необходимая коррекция переходного процесса осуществляется с помощью дифференциальной составляющей, поэтому для ее оценки используется специальный дифференцирующий фильтр, параметры которого сле-

дует определять одновременно с коэффициентами регулятора в соответствии с предложенной в работе [7] модифицированной процедурой расчета.

Результаты моделирования показали работоспособность системы управления в ситуации, когда параметры электромеханического усилителя руля произвольным образом изменялись в ограниченном диапазоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Badawy A., Zuraski J., Bolourchi F., Chandy A.** Modelling and analysis of an electric power steering system // <http://www.sae.org/technical/papers/982878>
2. **Kurishige M., Kifuku T.** Static steering-control system for electric-power steering // <http://global.mitsubishielectric.com/company/rd/advance/pdf/vol94/vol94.pdf>
3. **Zaremba A., Davis R. I.** Dynamic analysis and stability of a power assist steering system // http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=532736
4. **Zaremba A. T., Liubakka M. K., Stuntz R. M.** Control and steering feel issues in the design of an electric power steering system // <http://ieeexplore.ieee.org/ie14/5651/15174/00694623.pdf?arnumber=694623>
5. **Никулин Г. Л., Французова Г. А.** Упрощенная математическая модель электроусилителя руля автомобиля // Сб. науч. тр. НГТУ. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. Вып. 1(39). С. 15.
6. **Востриков А. С.** Синтез нелинейных систем методом локализации. Новосибирск: Изд-во НГУ, 1990.
7. **Никулин Г. Л., Французова Г. А.** Система управления для электромеханического усилителя рулевого управления автомобиля // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 10. С. 21.

Поступила в редакцию 8 июня 2007 г.