

Синтез нестационарной системы автоматического управления торможением колес транспортного средства

Н.В. Решетникова

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического
приборостроения*

Аннотация: В статье приводится анализ влияния нестационарных параметров на качество управления системой торможения колес тяжелого транспортного средства, а также рассмотрен синтез параметров регулятора с использованием обобщенного метода Галеркина. Рассматриваемый метод обращен для решения задачи синтеза нестационарной системы, чье желаемое программное движение задано на выходе нелинейного элемента. Приведены результаты исследования влияния нестационарности параметров неизменяемой части системы (объекта) на ухудшение показателей качества переходного процесса. Для случаев критического режима работы произведен пересчет параметров регулятора, оценены результаты учета нестационарности и повторного синтеза.

Ключевые слова: система автоматического управления, регулятор, тормозная система, нестационарность параметров, обобщенный метод Галеркина.

Введение

Системы автоматического управления торможением колес (САУ ТК), а в особенности колес тяжелых транспортных средств (ТС), являются существенно нелинейными системами с большим количеством нестационарных зависимостей параметров неизменяемой части системы [1]. Повсеместно растущие требования к точности и безотказности работы сложных систем побуждают производителей использовать все более сложные принципы управления, однако, единых методов решения нелинейных дифференциальных уравнений не существует [2]. Обращение прямого вариационного обобщенного метода Галеркина позволяет исходя из фиксированной структуры системы управления определять варьируемые параметры, обеспечивающие в системе требуемый режим работы на основании приближенного решения нелинейного дифференциального уравнения. Важно отметить, что структура регулятора перед решением задачи синтеза задается с некоторой избыточностью исходя из инженерного

опыта разработчика, и впоследствии может быть упрощена (понижена в порядке).

Синтез нестационарной САУ ТК ТС

В системах торможения существенная нестационарность параметров обусловлена множеством факторов – клиновидным износом колодок, деформацией шин, проскальзыванием колеса, аэродинамическим сопротивлением и т.д., что в комплексе обязывает разработчика учитывать дрейф параметров при синтезе регулятора. В системах торможения коэффициент сцепления колеса μ нелинейно зависит от проскальзывания S , скорости ТС, состояния опорной поверхности и многих других факторов, в связи с чем САУ ТК следует считать многорежимной [3]. С целью определения величины скольжения S тормозного колеса необходимо измерять скорость «свободного» (не тормозящего) колеса ω_k .

При торможении на сухой опорной поверхности САУ ТК ТС имеет экспоненциальный вид переходного процесса, а при торможении на мокрой опорной поверхности – колебательный. Параметрический синтез систем торможения проводится при постоянной угловой скорости свободно катящегося колеса ω_c (соответствующей максимальной скорости 96,3 рад/с, двум третям и одной трети от нее соответственно).

На рис. 1 представлена упрощенная структурная схема синтезируемой САУ ТК ТС, где управляемой величиной является разность скоростей свободно катящегося и не тормозящего колес $\Delta\omega$ [4]. Нестационарными величинами, которые входят в математическую модель синтезируемой системы и для которых проводится дополнительное экспериментальное исследование, являются: $K_T(t)$ – коэффициент передачи исполнительной части; $T_T(t)$ – постоянная времени тормоза; $K_{ст}(t)$ – коэффициент передачи стойки; $T_1(t)$ – постоянная времени стойки; $\xi_1(t)$ – показатель колебательности стойки.

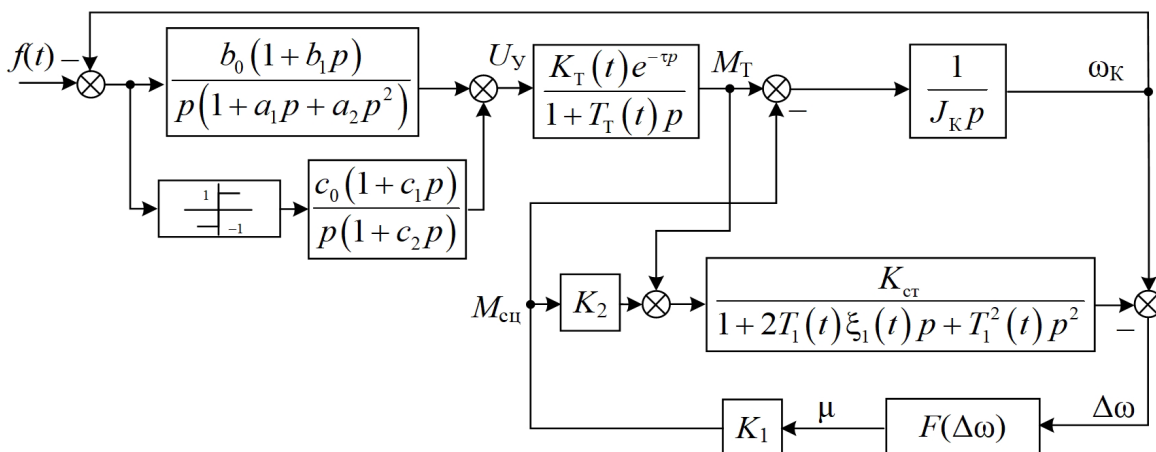


Рис. 1. Структурная схема упрощенной модели САУ ТК ТС

Для решения задачи параметрического синтеза обобщенным методом Галеркина для каждого типа поверхности задается желаемое программное движение, описывающее желаемый вид процесса на выходе нелинейного элемента. К требуемым показателям качества переходного процесса синтезируемой системы относятся – время переходного процесса при торможении на сухой поверхности ($t_{пп} \leq 2$ с), амплитуда колебаний при торможении на мокрой опорной поверхности A (которая не должна превышать 20% от величины $\Delta\omega_э$). Как было упомянуто выше, рассматриваемая система является многорежимной, в связи с чем параметрический синтез производится для трех значений ω_c [5, 6]. Показатели качества синтезированной системы для каждого значения скорости не тормозящего колеса приведены в табл. 1, где также указаны σ – перерегулирование и T – период колебаний.

На рис. 2-4 приведены кривые разгона для рассматриваемых значений скорости свободно катящегося колеса в стационарном режиме (без учета дрейфа параметров), где кривая 1 – торможение на сухой поверхности, кривая 2 – торможение на мокрой поверхности.

Таблица №1

Показатели качества системы для различных угловых скоростей свободно катящегося колеса

	σ , %	A , рад/с	$t_{пп}$, с	T , с
$\omega_c = 96,3$ рад/с	0	3,395	1,856	0,592
$\omega_c = 64,2$ рад/с	0	0,837	1,870	0,503
$\omega_c = 32,1$ рад/с	0	0,1455	1,968	0,461

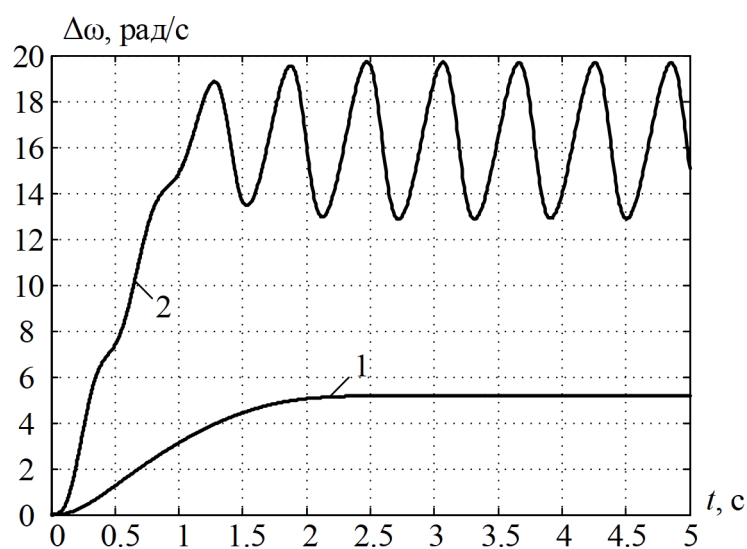


Рис. 2. Кривые разгона при $\omega_c = 96,3$ рад/с

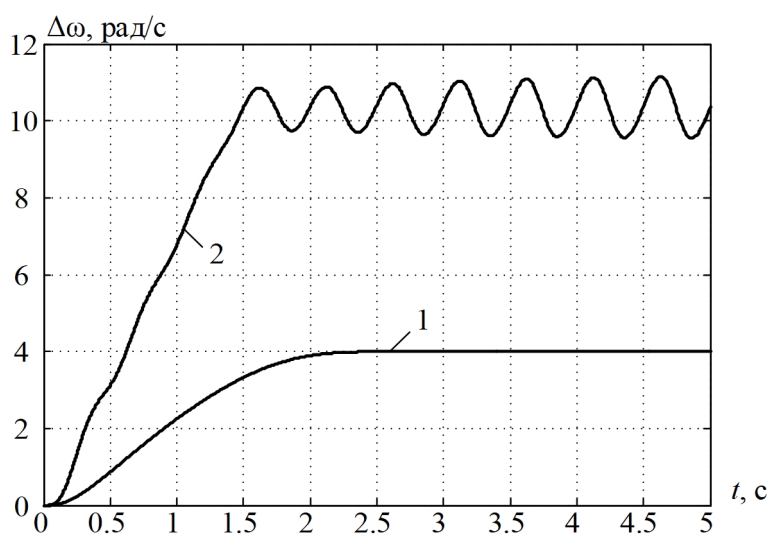


Рис. 3. Кривые разгона при $\omega_c = 64,2$ рад/с

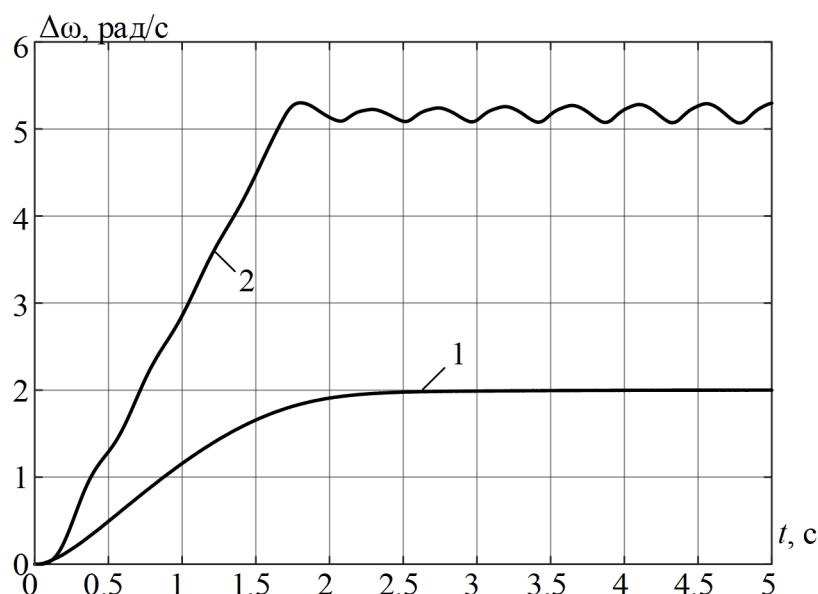


Рис. 4. Кривые разгона при $\omega_c = 32,1$ рад/с

Как было упомянуто выше, параметры неизменяемой части системы могут быть подвержены дрейфу, который обусловлен скоростью срабатывания механизмов, геометрическими параметрами колес, конструктивными особенностями, состоянием поверхности и другими причинами [7]-[9]. Факторы, влияющие на нестационарность параметров, определяют необходимость проведения экспериментальных исследований по влиянию дрейфа на ухудшение показателей качества.

Экспериментальные исследования проводились в программном пакете *Matlab/Simulink* путем моделирования дрейфа нестационарных параметров. Анализ влияния «отрицательного» дрейфа на показатели качества управления показал, что уменьшение постоянной времени тормоза $T_T(t)$ до 20% приводит к увеличению амплитуды колебаний при торможении на мокрой опорной поверхности до $A = 4$ рад/с, уменьшение коэффициента передачи исполнительной части $K_T(t)$ до 20% приводит к увеличению времени регулирования до $t_{пп} = 2,53$ с.

В случае наступления рассматриваемых режимов работы оборудование может выйти из строя, что повлечет за собой, например, выкат за пределы взлетно-посадочной полосы. Следовательно, для рассмотренных критических режимов необходимо повторно выполнить расчет параметров регулятора.

В результате повторного параметрического синтеза обобщенным методом Галеркина с учетом критической нестационарности указанных параметров показатели качества синтезированной системы стали соответствовать требуемым значениям ($t_{пп} \leq 1,89$ с, $A \leq 3,075$ рад/с).

Анализ влияния «положительного» дрейфа на показатели качества управления показал, что увеличение коэффициента передачи исполнительной части $K_T(t)$ до 20% приводит к незначительному увеличению времени регулирования до $t_{пп} = 2,019$ с, а увеличение коэффициента передачи модели стойки $K_{ст}(t)$ до 20% приводит к увеличению амплитуды колебаний при торможении на мокрой опорной поверхности до $A = 4,84$ рад/с.

В результате повторного параметрического синтеза обобщенным методом Галеркина с учетом критической нестационарности указанных параметров показатели качества синтезированной системы стали соответствовать требуемым значениям ($t_{пп} \leq 1,98$ с, $A \leq 3,46$ рад/с).

Таким образом, в результате параметрического синтеза САУ ТК ТС и моделирования дрейфа параметров системы можно сделать вывод о том, что дрейф величин $T_T(t)$ и $K_T(t)$ приводит к значительному ухудшению показателей качества, что обеспечивает необходимость учета нестационарности и выполнения повторной процедуры синтеза параметров изменяемой части системы.

Заключение

Как показывают исследования, учет влияния нестационарности неизменяемой части системы – критически важный этап, необходимый при решении задачи синтеза [10]. В САУ ТК дрейф коэффициента передачи

стойки, коэффициента передачи исполнительной части и постоянной времени тормоза приводит к уходу показателей качества за пределы требуемых значений, что вызывает необходимость пересчета регулятора. Системы, чьи характеристики не могут быть подвержены обычной линеаризации, а параметры нелинейно изменяются во времени, нуждаются в дополнительных исследованиях и пересчете регулятора в критических режимах работы. Игнорирование влияния дрейфа параметров в сложных САУ – это риск вывода дорогостоящей техники из строя.

Использование обобщенного метода Галеркина для решения синтеза нестационарных систем управления на примере САУ ТК ТС показало свою эффективность и достаточную универсальность, поскольку позволяет алгебраическим путем рассчитать варьируемые параметры для нелинейной системы с достаточной точностью получаемого результата.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Литература

1. Асанов А.З. Аналитический синтез алгоритма управления электрической системой торможения колеса шасси воздушного судна. Известия ЮФУ. Технические науки. 2021. № 7(224). С. 51-63.
2. Ortega R., YI B., Bobtsov A., Pyrkin A., Sinetova M. Adaptive state observers for a class of nonlinear systems: The non-triangular and non-state-affine case. Systems & Control Letters. 2025. Vol. 196. P. 106020.
3. Шишляков В.Ф., Решетникова Н.В., Ватаева Е.Ю., Шишляков Д.В. Синтез нестационарных непрерывных нелинейных систем автоматического

управления обобщенным методом Галеркина. Наукоемкие технологии. 2021. Т. 22, № 8. С. 75-79.

4. Никитин А.В., Шишлаков В.Ф. Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления. Санкт-Петербург: ГУАП. 2003. 358 с.

5. Шахрай Е.А., Лубенцов Е.А. Анализ методов для синтеза многорежимных систем управления динамическими объектами. Технические и технологические системы. Материалы двенадцатой Международной научной конференции. Краснодар. 2021. С. 107-113.

6. Смирнова С.А. Комплекс имитационного моделирования систем адаптивно-робастного управления многорежимными объектами с переключениями. Информатика и системы управления. 2023. № 3(77). С. 29-40.

7. Круглов С.П. Математическое обоснование эффективности торможения с постоянным значением коэффициента запаса по нажатию. Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2023. № 3(91). С. 159-168.

8. Pyatkov S.G. Identification of Thermophysical Parameters in Mathematical Models of Heat and Mass Transfer. Journal of Computational and Engineering Mathematics. 2022. Vol. 9, No. 2. pp. 52-66.

9. Лоскутов А.И., Клыков В.А. Татаренков А.Н. Методика контроля технического состояния бортовой аппаратуры объектов ракетно-космической техники с формированием признаков состояний на основе нейросетевого анализа телеметрируемых процессов. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 4. С. 285-294.

10. Горлатов Д.В., Томчин Д.А., Токарева О.И., Свенцицкая Т.А. Адаптивный регулятор сигнального типа для управления нестационарной электромеханической системой. Инженерный вестник Дона. 2025. № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2025/10064.

References

1. Asanov A.Z. Izvestiya YuFU. Texnicheskie nauki. 2021. № 7(224). Pp. 51-63.
2. Ortega R., YI B., Bobtsov A., Pyrkin A., Sinetova M. Systems & Control Letters. 2025. Vol. 196. P. 106020.
3. Shishlakov V.F., Reshetnikova N.V., Vataeva E.Yu., Shishlakov D.V. Naukoemkie tehnologii. 2021. T. 22, № 8. Pp. 75-79.
4. Nikitin A.V., Shishlakov V.F. Parametricheskij sintez nelinejny`x sistem avtomaticheskogo upravleniya. Sankt-Peterburg: GUAP. 2003. 358 p.
5. Shaxraj E.A., Lubenczov E.A. Materialy` dvenadczatoj Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. Krasnodar. 2021. Pp. 107-113.
6. Smirnova S.A. Informatika i sistemy` upravleniya. 2023. № 3(77). Pp. 29-40.
7. Kruglov S.P. Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya. 2023. № 3(91). Pp. 159-168.
8. Pyatkov S.G. Journal of Computational and Engineering Mathematics. 2022. Vol. 9, No. 2. pp. 52-66.
9. Loskutov A.I., Kly`kov V.A. Tatarenkov A.N. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Texnicheskie nauki. 2023. № 4. Pp. 285-294.
10. Gorlatov D.V., Tomchin D.A., Tokareva O.I., Svenciczka T.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2025/10064.

Дата поступления: 8.08.2025

Дата публикации: 25.09.2025