

Совершенствование автоматической системы управления замедлением физического объекта в условиях неопределенности

В.В. Шелудченко^{1,*}, Е.М. Гецович², С.Г. Селевич³

¹ Сумский национальный аграрный университет, ул. Кирова, 160, 40021 Сумы, Украина

² Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,
ул. Петровского, 25, 61002 Харьков, Украина

³ Национальный технический университет «ХПИ», ул. Фрунзе, 21, 61002 Харьков, Украина

(Одержано 24.06.2015; у відредагованій формі – 10.06.2015; опубліковано online 20.10.2015)

Выявлено влияние коэффициентов чувствительности и пробных воздействий на показатели качества процесса управления экстренным замедлением физического объекта в условиях существенного изменения формы выходной характеристики и положения оптимума, что позволило определить пути повышения адаптивных свойств систем автоматического управления (САУ) такими объектами. Определена взаимосвязь между рациональными значениями коэффициента пробных воздействий и изменяемыми параметрами объекта управления, что позволило выполнить оптимизацию переменного коэффициента пробных воздействий по критерию отклонения объекта управления от экстремального режима функционирования.

Ключевые слова: САУ, Нестационарность объекта, Замедление, Коэффициент чувствительно и пробных воздействий, Критерий качества, Оптимизация.

PACS number: 89.40.Bb

1. ВСТУПЛЕНИЕ

В работах [1, 2] теоретически и работе [3] экспериментально показано, что обеспечение устойчивости и управляемости объекта при сохранении, или даже улучшении, тормозной эффективности возможно только при недопущении блокирования всех колес и их торможении на грани блокирования. Такой вывод обусловлен как кинематикой автомобиля в целом, так и характером взаимодействия колеса с опорной поверхностью. Для количественной оценки сцепных возможностей физического объекта принято использовать безразмерные коэффициенты сцепления φ_x , φ_y , в контакте объекта с поверхностью. Коэффициенты сцепления φ_x , φ_y являются функциями многих, в том числе и нестационарных, параметров, определяющими из которых являются: относительное продольное скольжение объекта, тип и состояние опорной поверхности, скорость движения, угол бокового смещения объекта и т.д.

Процесс взаимодействия физического объекта с опорной поверхностью в режиме экстренного замедления имеет нелинейный характер, характеристики которого зависят от внешних возмущений, изменяющихся в ходе замедления (флуктуации коэффициента сцепления объекта с опорной поверхностью, колебания поддресоренной и неподдресоренной масс физического объекта, крутильные колебания, непостоянство трения и обуславливают нестационарность объекта управления (ОУ) [4-6]. Описанные особенности физических объектов в режиме замедления, в частности, неизвестность на этапе синтеза систем автоматического управления (САУ) как начальных условий замедления, так динамики и амплитуды изменения сцепных характеристик объекта с опорной поверхностью, дают возможность классифицировать его как нестационарный объект, имеющий зна-

чительную неопределенность в отношении как самого себя, так и действующих на него возмущений. Задача синтеза систем управления нестационарными объектами, которые функционируют в условиях неопределенности, требует использования интеллектуальных систем управления, систем нечеткой логики, поисковых систем и др. Целью данной статьи является попытка совершенствования САУ экстренным замедлением физического объекта в условиях неопределенности путем адаптации процесса управления к переменным режимам функционирования.

2. ОБЗОР СПОСОБОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭКСТРЕННОГО ЗАМЕДЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

На сегодняшний день можно выделить ряд основных научных направлений, посвященных управлению нестационарными объектами, которые функционируют в условиях неопределенности, и классифицировать их в разрезе интерпретации природы неопределенностей.

Принимая во внимание, объем знаний об ОУ, имеющийся на этапе синтеза СУ, форму и характер изменения основных параметров, для выбора управления рационально использовать тот или иной подход. Особенностью ряда ОУ является достаточно высокий темп изменения динамического состояния. В ходе экстренного замедления, который описывается т.н. «фазовой петлей» (зависимость коэффициента сцепления от относительного продольного скольжения или коэффициента буксования $\varphi_{x,y}(S, \delta)$) характеристика $\varphi_{x,y}(S, \delta)$ находится под воздействием возмущений, вследствие чего непрерывно претерпевает изменения. Это обстоятельство, в совокупности с тем, что переход объекта в заблокированное состояние происходит за время $\sim 10^{-1}$ с, не дает возможность

* qinetiq@ukr.net

разделить задачу во времени на две – идентификации и управления. Однако, для процесса экстремного замедления характерной является экстремальная форма зависимости $\varphi_{x,y}(S, \delta)$, что не редко встречается в технике. Объекты управления, математическая модель которых может быть представлена в виде последовательного соединения нелинейного звена с экстремальной статической характеристикой и звена, описываемого обыкновенным линейным дифференциальным уравнением заданного порядка с известными коэффициентами уравнения, встречаются в: теплотехнике (различные котлоагрегаты по производству горячей воды или пара), металлургии (нагревательные печи различных типов), в ракетной и авиационной технике, химии, экологии и т.п. Построение для них систем автоматической оптимизации позволяет обеспечить функционирование объекта на выгодных режимах. В зависимости от критерия управления на этих режимах достигается максимум коэффициента полезного действия, минимум потребления энергоресурсов, минимум выбросов в атмосферу продуктов сгорания и т.п. Наличие возмущений, обусловленных наличием горизонтального и вертикального дрейфа, в ходе которого статическая характеристика помимо перемещения по координатной плоскости может изменять свою форму. Например, для зависимости $\varphi_{x,y}(S, \delta)$ ордината характеристики становится практически неизменной при переходе через максимум для обледенелой опорной поверхности, приводит к необходимости применения поисковых систем автоматической оптимизации:

$$x_{i+1} = x_i + h \cdot \text{sign} \left(\frac{1}{n} \sum_{y=1}^n y_{j+} - \frac{1}{n} \sum_{y=1}^n y_{j-} \right), \quad (1.1)$$

где x_i, x_{i+1} – текущее и следующее значение входа объекта, n – число измерений выхода объекта; h – величина рабочего шага; y_{j+}, y_{j-} – соответствующие измерения выхода объекта y :

$$y = f(x) + \xi, \quad (1.2)$$

где $f(x)$ – экстремальная зависимость; ξ – случайные возмущения выхода ОУ.

Сложность непосредственного применения разработок в области поисковых систем автоматической оптимизации накладывает специфика ОУ, связанная с тем, что экстремальный параметр $\varphi_x(S, \delta)$ не является непосредственно наблюдаемым, а может лишь быть оценен по величине контролируемого в процессе замедления параметра – продольного замедления физического объекта \dot{V}_X :

$$\varphi_X = \frac{1}{g} \dot{V}_X, \quad (1.3)$$

где \dot{V}_X – величина продольного замедления физического объекта; g – ускорение свободного падения.

С учетом того, что в общем случае положение рабочей точки на координатной плоскости $\varphi_x(S, \delta)$ для каждого физического объекта различно, использова-

ние величины φ_x на входе не представляется возможным.

Таким образом, указанные особенности объекта управления обуславливают трудности в адаптации процесса управления замедлением физического объекта к внешним возмущениям. Это обстоятельство послужило основной посылкой поиска альтернативных подходов для синтеза САУ для таких объектов.

Выполненный в работе [7] анализ изменения в ходе торможения кинематических параметров приводит к выводу о том, что единственным параметром, который, с одной стороны, позволяет заблаговременно выявить тенденцию движущегося объекта к блокированию и, в то же время, является достаточно легко наблюдаемым в ходе замедления, есть угловое ускорение вращающегося объекта $\dot{\omega}$. Однако, кратковременные пульсации $\dot{\omega}$, о которых уже говорилось выше, в сочетании с высокой вероятностью перехода через максимум $\varphi_x(S)$ к заблокированному состоянию не позволяют эффективно использовать угловое ускорение как единственный контролируемый параметр.

В работе [8] предложено для организации автоматического управления торможением одновременно использовать не менее двух контролируемых параметров, один из которых дифференциальный (угловое ускорение), а другой – интегральный (относительное продольное скольжение).

Использование двух контролируемых параметров позволило существенно повысить помехоустойчивость. Однако, такой подход к синтезу СУ нельзя назвать в полной мере адаптивным, поскольку в его логику заложено регулирование динамического состояния движущегося объекта и его фиксация вблизи оптимального состояния, но не заложен поиск этого оптимального состояния. Это обусловлено тем, что действительное значение $\varphi_{x,MAX}$ и $S_{x,KP}$ не только не известно на этапе синтеза СУ, а и может претерпевать изменения даже в ходе однократного замедления, например, при переходе с одной опорной поверхности на другую.

В работе [9] показано, что угловое ускорение движущегося объекта $\dot{\omega}$ можно условно разделить на два слагаемых

$$\dot{\omega} = \dot{\omega}' + \dot{\omega}'' \quad (1.4)$$

где

$$\dot{\omega}' = \frac{1-S}{r_\delta} \dot{V}, \quad (1.5)$$

является полезной составляющей, обусловленной замедлением темпа вращения, вследствие снижения скорости объекта, а составляющая

$$\dot{\omega}'' = -\frac{V}{r_\delta} \dot{S}, \quad (1.6)$$

является «вредной», поскольку вызывает неустойчивость динамического состояния объекта, т.е. изменение его относительного продольного скольжения. Таким образом, при $\dot{\omega}'' = 0$, а $\dot{\omega} = \dot{\omega}'$, следовательно динамическое состояние движущегося объекта

устойчиво в любой точке $\varphi_x(S)$ в случае постоянных нагрузочно-сцепных условий, в том числе и в точке, соответствующей $\varphi_{x,MAX}$ и $S_{x,CR}$. Этот подход к синтезу САУ получил развитие в работах авторов, синтезированные на его основе САУ были названы дуальными адаптивными. Так, в соответствии с методом пробных воздействий, общей теории адаптивных систем, регулирование динамического состояния объекта осуществляется пропорционально абсолютной величине и с учетом знака рассогласования между $\dot{\omega}$ и $\dot{\omega}'$ [10] по условию

$$\dot{P} = K_{\dot{q}} \left(\dot{\omega} - \frac{K_{IP}}{T_D} \dot{V} \right), \quad (1.7)$$

где $K_{\dot{q}}$ – коэффициент чувствительности; K_{IP} – коэффициент пробных воздействий, позволяющий организовать движение рабочей точки в направлении возрастания нагрузочно-сцепных условий.

Следует также отметить, что для выработки управляющих воздействий в соответствии с основной ветвью регулирования используется два параметра $\dot{\omega}$ и \dot{V} , которые являются относительно легко контролируемы в ходе замедления, что существенно упрощает реализацию, а также повышает помехоустойчивость. Изложенный подход к синтезу СУ процессом замедления физического объекта можно в полной мере считать адаптивным, поскольку в его логику заложены стабилизация неустойчивого объекта и непрерывный поиск оптимального состояния.

3. АДАПТАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ К ОСОБЕННОСТЯМ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ И ВНЕШНИМ ВОЗМУЩЕНИЯМ

Как следует из анализа основных особенностей при замедлении с $\varphi_x \approx \varphi_{x,MAX}$, сохраняется запас боковой устойчивости. Это обстоятельство дает возможность для анализа адаптивных свойств САУ в качестве математической модели ОУ использовать дифференциальные уравнения, описывающие динамику прямолинейного замедления одиночного объекта с учетом его взаимодействия с опорной поверхностью. Такой подход позволяет сконцентрировать внимание на задаче адаптации САУ на упрощенной модели, а затем выполнить комплексную оценку предлагаемых совершенствований на пространственной математической модели процесса замедления физического объекта.

Таким образом, для оценки адаптивных свойств дуальной адаптивной САУ с постоянными коэффициентами была использована математическая модель процесса замедления (см. рис. 1).

При этом для получения критерия оценки всего процесса замедления необходимо определить среднее значение K за весь период замедления по формуле:

$$K = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n K_i \cdot T_i \quad (1.8)$$

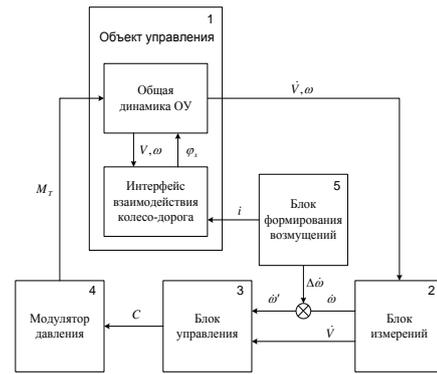


Рис. 1 – Структурная схема математической модели: блок описания ОУ(1), блок управления (3), измерительной (2) и исполнительной (4) частей САУ, блок формирования возмущений (5)

где T – время замедления с включенной антиблокировочной системой; n – число циклов регулирования.

Приведенный критерий имеет преимущества поскольку оценивает степень приближения фазовой кривой к ее оптимальному значению, заданному с помощью S_{CR} . Использование приведенного критерия идеально подходит для оценки качества регулирования релейных и циклических алгоритмов функционирования адаптивных систем. Для дуальных адаптивных алгоритмов с постоянными коэффициентами его применение связано с введением понятия условного цикла и соответствующего расчета временных интервалов.

С целью уменьшения числа вспомогательных расчетов на каждом шаге моделирования был использован упрощенный вариант критерия, выполняющий на каждом шаге моделирования расчет длины вектора r по формуле:

$$r = \sqrt{(\varphi_{x,MAX,j} - \varphi_{x,j})^2 + (S_{CR,j} - S_j)^2} \quad (1.9)$$

где j – номер шага моделирования, который вычисляет величину ошибки положения рабочей точки на плоскости $\varphi - S$ (см. рис. 2).

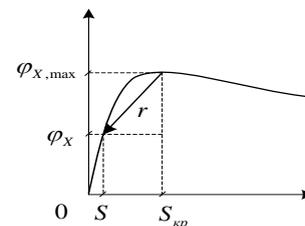


Рис. 2 – К вопросу определения вектора r

Для получения количественной оценки качества регулирования вычислялся интеграл

$$K_{КАЧ} = \int_0^T r dt \quad (1.10)$$

Из (1.10) следует, что при $\varphi_x \rightarrow \varphi_{x,MAX}$ и $S \rightarrow S_{CR}$ величина показателя качества $K_{КАЧ} \rightarrow 0$. Так критерий (1.9)-(1.10) по степени приближения величины K к нулю позволяет оценить качество регулирования, не переходя к расчету промежуточных средних зна-

чений или условных циклов, что значительно упрощает процесс моделирования.

Кроме того, основным критерием эффективности замедления является величина пути до полной остановки объекта S_T , которая тоже может быть использована для оценки качества процесса регулирования.

Дуальная адаптивная САУ замедлением позволяет «нащупывать» оптимальное значение нагрузочно-сцепных условий, однако, исследование способности алгоритма адаптироваться к его изменению и анализ качественных характеристик процесса управления без предварительной оптимизации постоянных параметров $Kч$ и $K_{ПР}$ выполнить затруднительно. При этом, успешное решение (сходимость) задачи оптимизации и эффективность поиска (количество вычислений функции), как известно, во многом зависит от вида целевой функции, выбранного метода и начальных условий. В качестве целевой функции была принята минимизация оценки (1.10)

$$K_{КАЧ} = \min \quad (1.11)$$

на модели одиночного объекта в режиме замедления для трех типов опорной поверхности: лед, мокрый асфальтобетон и сухой асфальтобетон.

Несмотря на разнообразие методов оптимизации был использован симплекс-метод прямого поиска Нелдера-Мида [11], позволяющий отказаться от вычисления градиента и производных функции, а свести задачу, в данном случае, к построению симплекса в двумерном пространстве с тремя вершинами. При этом на каждом шаге поиска генерируется новая точка или текущий симплекс. Значение функции в новой точке сравнивается со значениями функций в вершинах симплекса и, как правило, одна из вершин становится новой точкой, образующей новый симплекс. Этот шаг повторяется до тех пор, пока диаметр симплекса не будет меньше заданной точности.

На основании сведений, приведенных в [12], можно сделать вывод о том, что при вычислении функции цели оптимизации поверхность отклика содержит локальные минимумы с пологими склонами, и близко расположенные максимумы не могут существенно отличаться по величине. В этом случае не столь важно, какой из минимумов будет определен, а существенно различающиеся по величине минимумы удалены друг от друга на значительное расстояние. При этом значения функции цели оптимизации в точках, выбранных вблизи таких максимумов, также существенно отличаются.

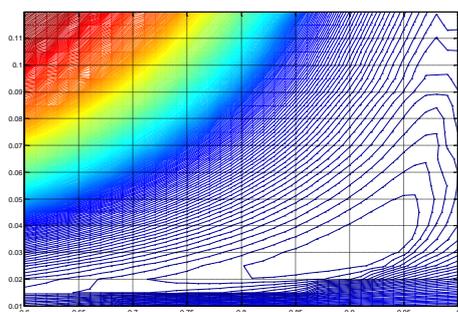


Рис. 3 – Линии уровня функции $K_{КАЧ} = f(K_{ПР}, Kч)$ для сухого асфальтобетона

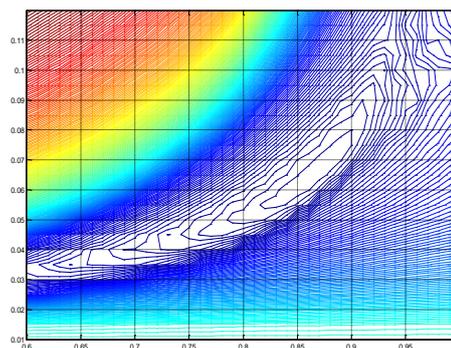
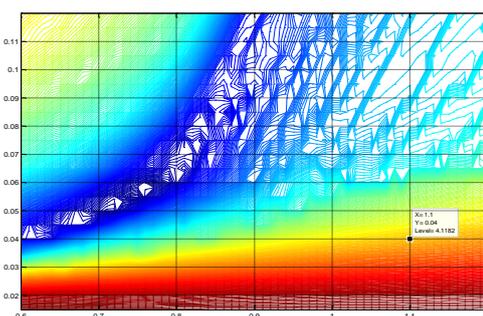
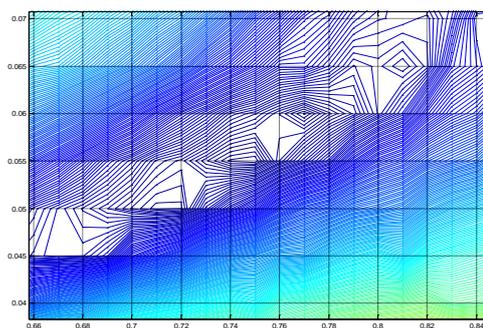


Рис. 4 – Линии уровня функции $K_{КАЧ} = f(K_{ПР}, Kч)$ для мокрого асфальтобетона



а



б

Рис.5 – Линии уровня функции $K_{КАЧ} = f(K_{ПР}, Kч)$ для льда

Внутри областей с минимальными значениями функции было зафиксировано по две начальные точки вблизи левых и правых их краев. Результаты выбора сведены в таблице 1.

Минимизация функции нескольких (двух) переменных симплекс методом Нелдера-Мида была выполнена в пакете MatLab расширение Optimization Toolbox, с помощью функции fminsearch.

Перечень режимов, в которых проводилось моделирование, представлен в первых двух столбцах: где i – неизменный в ходе замедления тип опорной поверхности; j – тип опорной поверхности, для которого были оптимизированы значения $Kч$ и $K_{ПР}$; 1 – сухой асфальтобетон, 2 – мокрый асфальтобетон; 3 – лед. Помимо значений критерия качества, в таблице 3 приведены: величина пути до полной остановки объекта S_i [м]; показатель $K_{БЛ}$, фиксирующий момент перехода объекта из вращающегося в заблокированное состояние по следующей шкале: «нет» – блокировка не была достигнута в течении всего замедле-

ния; «в конце» – объект достиг блокировки в конце замедления (при $V_x < 5$ км/ч); «период» – объект периодически скатывалось в блок на скоростях $V_x > 5$ км/ч; «да» – объект достиг блокировки на скоростях $V_x < 5$ км/ч и дальнейшее замедление осуществлялось с блоком. В последних двух столбцах таблицы приведены абсолютные изменения критерия качества $\Delta K_{КАЧ} = K_{КАЧj} - K_{Чi}$ и тормозного пути $\Delta S_i = S_{ij} - S_i$.

Таблица 1 – Начальные условия для минимизации функции $K_{КАЧ} = f(K_{ПР}, K_{Ч})$

Тип опорной поверхности	$K_{ПР0}$	$K_{Ч0}$
Лед	0,720	0,051
Лед	0,750	0,055
Лед	0,770	0,060
Лед	0,810	0,065
Лед	0,810	0,075
Лед	0,830	0,075
Лед	0,840	0,085
Лед	0,870	0,085
Лед	0,885	0,090
Мокрый асфальтобетон	0,830	0,055
Мокрый асфальтобетон	0,890	0,075
Сухой асфальтобетон	0,820	0,025
Сухой асфальтобетон	0,950	0,050

Поиск оптимальных значений $K_{КАЧ}$ прекращался на шаге, когда диаметр симплекса становился менее 10^{-4} . Результаты минимизации приведены в таблице 2. Заливкой выделены строки с минимальным значением критерия качества для каждого типа опорной поверхности.

Следует отметить, что процесс регулирования носит колебательный характер вследствие наличия запаздываний в исполнительных элементах системы автоматического управления. Колебательный характер снижает эффективность замедления объекта, осложняя процесс достижения оптимума и фиксации рабочей точки в его окрестности, но позволяет определить момент времени, в который следует прекратить регулирование, обеспечив переход на устойчивую ветвь, а также вывести объект регулирования из неустойчивой зоны в устойчивую.

Таблица 2 – Результаты минимизации функции $K_{КАЧ} = f(K_{ПР}, K_{Ч})$

Тип опорной поверхности	$K_{ПР0}$	$K_{Ч0}$	$K_{ПР}$	$K_{Ч}$	$K_{КАЧ}$
Лед	0,72	0,051	0,749	0,055	0,5701
Лед	0,75	0,055	0,747	0,055	0,5695
Лед	0,77	0,060	0,766	0,058	0,5712
Лед	0,81	0,065	0,762	0,057	0,5711
Лед	0,81	0,075	0,817	0,075	0,8422
Лед	0,83	0,075	0,826	0,070	0,8770
Лед	0,84	0,085	0,841	0,084	0,9513
Лед	0,87	0,085	0,867	0,084	0,9979
Лед	0,89	0,090	0,844	0,085	0,9551
Мокрый асф.	0,83	0,055	0,877	0,069	0,2729
Мокрый асф.	0,89	0,075	0,875	0,068	0,2727
Сухой асф.	0,82	0,025	0,907	0,031	0,3164
Сухой асф.	0,95	0,05	0,905	0,031	0,3164

Полученные значения постоянных коэффициентов САУ и критерия качества существенно отличаются для различных опорных поверхностей. Этот факт вносит неопределенность в выбор значений коэффициентов $K_{Ч}$ и $K_{ПР}$ на этапе синтеза САУ.

Так, целесообразно провести оценку изменения критерия $K_{КАЧ}$ и работоспособности алгоритма в целом при использовании в ходе замедления оптимизированных значений постоянных коэффициентов для иного, по отношению к текущему, типу опорной поверхности. Результаты такого анализа сведены в таблице 3.

В работе [13] авторами определены параметры процесса замедления, позволяющие идентифицировать тип опорной поверхности в ходе регулирования, а также предложен способ задания $K_{ПР}$ в функции от этих параметров. Такой способ автоматического регулирования торможения колесной машины был запатентован авторами в [14].

Поскольку, при сведениях к минимуму рассогласования между реальным значением $\dot{\omega}$ и его полезной составляющей $(1-S)\dot{V}/r_d$, обеспечивается замедление по кривой квазиустойчивых состояний, а при $\dot{\omega} = (1-S_{КР})\dot{V}/r_d$ – замедление происходит на оптимальном нагружено-сцепных условий [9], значение $K_{ПР} = 1 - S_{КР}$ соответствует отсутствию пробного воздействия. Это позволяет сформулировать требования к величине $K_{ПР}$ в ходе управления.

Таблица 3 – Анализ изменения критерия $K_{КАЧ}$

i	j	$K_{ПР}$	$K_{Ч}$	$K_{КАЧ}$	S_i	$K_{БЛ}$	$\Delta K_{КАЧ}$	ΔS_i
3	3	0,75	0,06	0,5695	63,3	в конце		
3	2	0,876	0,07	1,4410	67,4	период	0,872	4,19
3	1	0,905	0,03	4,4430	65,0	да	3,874	1,69
2	2	0,876	0,07	0,2727	29,4	в конце		
2	3	0,748	0,06	0,5711	30,5	в конце	0,298	1,10
2	1	0,905	0,03	1,7910	29,7	да	1,183	0,35
1	1	0,905	0,03	0,3164	19,5	нет		
1	3	0,748	0,06	1,2470	29,6	нет	0,931	10,0
1	2	0,876	0,07	0,7097	20,9	нет	0,393	1,33

Так, при $0 \leq S \leq S_K$ для ускорения вывода процесса регулирования на максимум зависимости $\phi_x = \phi_x(S)$ величину $K_{ПР}$ следует задавать достаточно большой, при $S = S_{КР}$ пробное воздействие можно прекратить, то есть принять $K_{ПР} = 1 - S_{КР}$, а при $S > S_{КР}$ величину следует снизить до $K_{ПР} < 1 - S_{КР}$ с целью быстрого вывода объекта регулирования из неустойчивой зоны.

Так, при скачкообразном изменении типа (состояния) опорной поверхности, в направлении ухудшения сцепных свойств, следует отметить, что перерегулирование в начальной стадии перенастройки САУ на новый максимум не приводит к блокировке объекта, а величина пути до полной остановки и, в некоторых случаях, показателя качества регулирования $K_{КАЧ}$ существенно ниже по отношению к рассмотренным САУ с постоянными параметрами. При переходе на опорную поверхность с более высокими сцепными свойствами использование переменного $K_{ПР}$ позволяет снизить путь до полной остановки. Результаты моделирования исследуемых режимов

движения объекта приведены в таблице 4. Обозначения столбцов аналогичны таблице 3.

Таблица 4 – Анализ качества регулирования с переменным коэффициентом $K_{ПР}$ и $K_{Ч} = 0,03$ при неизменном типе опорной поверхности и его скачкообразном изменении

i_1	i_2	$K_{КАЧ}$	S_t	$K_{БЛ}$
1	1	0,46	17,17	нет
2	2	0,42	28,80	нет
3	3	0,94	62,85	нет
1	2	0,62	20,49	в конце
1	3	1,05	29,85	в конце
2	1	0,59	26,31	в конце
2	3	0,69	39,98	в конце
3	1	0,83	37,02	нет
3	2	0,55	41,73	в конце

Отсутствие блокировки объекта, вплоть до отключения САУ на малых скоростях, при условии скачкообразного изменения типа (состояния) опорной поверхности свидетельствует о способности САУ адаптироваться к дрейфу экстремальной характеристики в широком диапазоне и достаточном быстродействии, а повышение качества регулирования и уменьшение пути до полной остановки – о снижении влияния нестационарности ОУ.

4. ВЫВОДЫ

1. Экстремальная характеристика объекта управления изменяется под воздействием возмущений, проявляющихся в виде пульсаций углового ускорения колеса $\Delta \dot{\omega}$, обуславливающих нестационарность ОУ и описанных с помощью кусочно-линейной функции с постоянными параметрами, и возмущений, которые являются следствием скачкоо-

образных изменений нагрузочно-сцепных условий и обуславливают априорную неопределенность формы экстремальной характеристики и положения оптимума. Такие возмущения описаны с помощью эмпирических данных положения оптимума для трёх основных типов опорной поверхности.

2. Математическая модель объекта управления, отражает основные особенности ОУ: наличие неустойчивого постоянно дрейфующего в широком диапазоне оптимума, несимметричность экстремальной характеристики, нестационарность ОУ. В состав математической модели входят, кроме линейных зависимостей, нелинейные зависимости и логические условия, что требует применения численных методов решения.

3. В результате выполненной оптимизации параметров дугльной адаптивной САУ с постоянными коэффициентами по критерию отклонения объекта от экстремального режима функционирования получены существенно различные оптимальные значения $K_{Ч}$ и $K_{ПР}$ для трех основных типов опорной поверхности. Это не позволяет минимизировать критерий качества регулирования в условиях априорной неопределенности типа опорной поверхности.

4. Предложенный способ задания $K_{ПР}$ в функции от контролируемых в ходе замедления параметров позволяет достичь целей адаптации: своевременная реакция на возмущения, являющиеся следствием скачкообразных изменений нагрузочно-сцепных условий, и снижение влияния нестационарности объекта управления на качество управления. При этом линейная аппроксимация функции $K_{ПР}$ позволяет получить близкие к оптимальным значения $K_{ПР}$ для большинства типов (состояний) опорной поверхности.

Вдосконалення автоматичної системи управління рухом фізичного об'єкту в умовах невизначеності

В.В. Шелудченко¹, Е.М. Гецович², С.Г. Селевич³

¹ Сумський національний аграрний університет, вул. Кірова, 160, 40021 Суми, Україна

² Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Петровського, 25, 61002 Харків, Україна

³ Національний технічний університет «ХПІ», вул. Фрунзе, 21, 61002 Харків, Україна

Виявлено вплив коефіцієнтів чутливості і пробних впливів на показники якості процесу управління екстремним уповільненням фізичного об'єкта в умовах істотної зміни форми вихідної характеристики і положення оптимуму, що дозволило визначити шляхи підвищення адаптивних властивостей систем автоматичного управління (САУ) такими об'єктами. Визначено взаємозв'язок між раціональними значеннями коефіцієнта пробних впливів і вимірюваними параметрами об'єкта управління, що дозволило виконати оптимізацію змінного коефіцієнта пробних впливів за критерієм відхилення об'єкта управління від екстремального режиму функціонування.

Ключові слова: САУ, Нестационарність об'єкта, Уповільнення, Коефіцієнт чутливо і пробних впливів, Критерій якості, Оптимізація.

Improvement of the Automatic System for Control of the Motion of a Physical Object under Uncertainty

V.V. Sheludchenko¹, E.M. Getsovich², S.G. Selevich³

¹ *Sumy National Agrarian University, 160, Kirov Str., 40021 Sumy, Ukraine*

² *Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Petrovskogo Str., 61002 Kharkiv, Ukraine*

³ *National Technical University "KhPI", 21, Frunze Str., 61002 Kharkiv, Ukraine*

The effect of the coefficients of sensitivity and test impacts on the criterion of quality of the emergency deceleration control process of a physical object in terms of a significant change in the shape of the output characteristics and the position of the optimum that allowed to identify ways to improve the adaptive properties of automatic control systems (ACS) of such objects is revealed. The relationship between the rational values of the ratio of trial stress and the measured parameters of the control object, which allowed to perform the optimization variable coefficient test impacts on the criterion of deviation of the control object from the extreme mode of operation is defined.

Keywords: ACS, Object nonstationarity, Deceleration coefficients of sensitivity and test impacts, Criterion of quality, Optimization.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Е.М. Гецович, С.Г. Селевич, Т.В. Мартинец, *Вісник НТУ "ХПІ"* № 59, 63 (2005) (E.M. Hetsovych, S.H. Selevych, T.V. Martynets, *Visnyk NTU "KHPI"* No 59, 63 (2005)) [in Russian].
2. С.И. Ломака, Е.М. Гецович, *Известия ВУЗов. Машиностроение* № 4, 77 (1982) (S.I. Lomaka, Ye.M. Getsovich, *Izvestiya VUZov. Mashinostroyeniye* No 4, 77 (1982)) [in Russian].
3. И.К. Пчелин, *Динамика процесса торможения автомобиля*. Автореф. дис. д.т.н. (05.05.03) – М., 1984. – 39 с. граф. (I.K. Pchelin, *Dinamika protsesssa tormozheniya avtomobilya*. Avtoref. dis. d.t.n. (05.05.03) – М., 1984. – 39 s. graf.) [in Russian].
4. И.К. Пчелин, В.А. Иларионов, *Автомобильная промышленность* № 3, 20 (1979) (I.K. Pchelin, V.A. Parionov, *Avtomobil'naya promyshlennost'* No 3, 20 (1979)) [in Russian].
5. Е.М. Гецович, *Анот. в ВУ ВИНТИ "Деponированные научные работы"*, № 5 (139), 86 (1983) (Ye.M. Getsovich, *Anot. v BU VINITI "Deponirovannyye nauchnyye raboty"*, No 5 (139), 86 (1983)) [in Russian].
6. Е.М. Гецович, *Адаптивные тормозные системы колесных машин* (Харьков: ХГПУ: ISBN 5-7763-9674-3: 1999) (Ye.M. Getsovich, *Adaptivnyye tormoznyye sistemy kolesnykh mashin* (Khar'kov: KHGPU: ISBN 5-7763-9674-3: 1999)) [in Russian].
7. С.И. Ломака, Е.М. Гецович и др., *Конструкции автомобилей*, № 12 (М.: НИИНавтопром.: 1982) (S.I. Lomaka, Ye.M. Getsovich i dr., *Konstruktsii avtomobiley*, No 12 (M.: NIINavtoprom.: 1982)) [in Russian].
8. Е.М. Гецович, *Способ управления торможением колеса*, А.с. №1172782 СССР, МКИ В 60 Т 8/00 (Ye.M. Getsovich, *Sposob upravleniya tormozheniyem kolesa*, A.s. №1172782 SSSR, MKI V 60 T 8/00) [in Russian].
9. А.С. Федосов, *Безопасность и надежность автомобиля* Вып. 1, 62 (1977) (A.S. Fedosov, *Bezopasnost' i nadezhnost' avtomobilya* No 1, 62 (1977)) [in Russian].
10. Е.М. Гецович, Е.Е. Александров, *Механика та машинобудування* № 1, 140 (1999) (E.M. Hetsovych, E.E. Aleksandrov, *Mekhanika ta mashynobuduvannya* No 1, 140 (1999)) [in Russian].
11. J.C. Lagarias, J.A. Reeds, M.H. Wright, P.E. Wright, *SIAM J. Optimization* 9 No 1, 112 (1998).
12. И.К. Пчелин, В.А. Иларионов, *Безопасность и надежность автомобиля* Вып. 1, 93 (1977) (I.K. Pchelin, V.A. Parionov, *Bezopasnost' i nadezhnost' avtomobilya* No 1, 93 (1977)) [in Russian].
13. Е.М. Гецович, А.И. Бондаренко, В.В. Шелудченко, *Восточно-Европейский журнал передовых технологий* № 1/5 (37) (2009) (Ye.M. Hetsovych, A.I. Bondarenko, V.V. Sheludchenko, *Vostochno-Evropeyskyu zhurnal peredovykh tekhnolohyy* No 1/5 (37) (2009)) [in Russian].
14. Е.М. Гецович, С.Г. Селевич, В.В. Шелудченко, Патент України на винахід №87699, МПК В60Т 8/00. Публікація 10.08.2009, бюл. №15, 2009р. (E.M. Hetsovych, S.H. Selevych, V.V. Sheludchenko, Patent Ukrainy na vynakhid No 87699, MPK V60T 8/00. Publikatsiya 10.08.2009, byul. No 15, 2009.) [in Ukrainian].
15. Е.М. Гецович, С.Г. Селевич, Т.В. Мартинец, *Автомобильный транспорт* Вып. 25, 52 (2009) (Ye.M. Getsovich, S.G. Selevich, T.V. Martynets, *Avtomobil'nyu transport* No 25, 52 (2009)) [in Russian].
16. Е.М. Гецович, Т.В. Мартинец, С.Г. Селевич, *Вісник НТУ "ХПІ"* № 6, 71 (2006) (E.M. Hetsovych, T.V. Martynets, S.H. Selevych, *Visnyk NTU "KHPI"* No 6, 71 (2006)) [in Russian].
17. M. Burckhardt, *Fahrwerktechnik: Radschlupf-Regelsysteme* (Wurzburg: Vogel Verlag: 1993).
18. M.J. Short, *Distributed Embedded Systems: An Automotiv Testbed* (Embedded Systems Laboratory university of Leicester: At Embedded Systems Show, Birmingham: 2004).
19. F. Yu, J.Z. Feng, *Int. J. Automotive Technol.* 3, No 4, 165 (2002).