

УДК 629.114:004.94

**СИНТЕЗ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЧЕСКОГО  
УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ  
ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ****О.В. ПУЗАНОВА, В.П. ТАРАСИК***Государственное учреждение**высшего профессионального образования**«Белорусско-Российский университет», г. Могилев*

Потенциальные свойства машины в реальных условиях эксплуатации не используются в полной мере, что снижает ее эффективность. Это объясняется влиянием окружающей среды, создаваемыми этой средой помехами и несовершенством применяемых систем управления. Оптимальное управление позволяет существенно повысить показатели эффективности машины и качества процессов функционирования ее механизмов и систем.

*Объект исследований* – гусеничная машина двойного назначения с гидромеханической передачей полной массой 35 т. *Цель работы* – синтез характеристик адаптивного алгоритма автоматического управления гидромеханической передачей (ГМП) и оценка влияния параметров характеристик автоматической системы на показатели эффективности машины.

В процессе решения поставленной задачи разработана методика синтеза характеристик алгоритма управления ГМП [1], которая включает ряд этапов:

- 1) построение математической модели движения машины в условиях внешней среды с учетом управляющих воздействий водителя;
- 2) обоснование и выбор критериев оптимальности характеристик управления;
- 3) моделирование движения машины в различных дорожных условиях и получение оптимальных характеристик управления по принятым критериям;
- 4) выявление основных факторов (параметров машины, внешней среды и управляющих воздействий), влияющих на полученные характеристики управления;
- 5) корреляционный анализ факторов с целью минимизации количества выбираемых информационных переменных;
- 6) регрессионный анализ результатов математического моделирования движения машины и получение регрессионных моделей, устанавливающих зависимости между параметрами управления и принятыми информационными переменными;
- 7) адаптация характеристик управления к реальным условиям движения;
- 8) оценка эффективности адаптивного алгоритма и корректировка его параметров.

Математическая модель учитывала физические свойства и характеристики всех механизмов и систем машины (двигателя, гидротрансформатора, механических передач трансмиссии, фрикционных механизмов системы управления и др.), оказывающих непосредственное влияние на ее тягово-скоростные свойства [2]. Для выявления влияния внешней среды на процесс движения разработана модель ездового маршрута, в которой учтены переменные характеристики макропрофиля дороги, ее геометрия в плане, дорожные препятствия и ограничения скорости. Для учета управляющих воздействий водителя использована относительная безразмерная координата положения педали акселератора  $\gamma_a$ , изменяемая в пределах  $0 \leq \gamma_a \leq 1$ .

В качестве фазовых координат динамической модели приняты угловые скорости двигателя  $\omega_d$ , турбины гидротрансформатора (ГДТ)  $\omega_t$  и ведущего колеса  $\omega_k$ . Модель

включает дифференциальные уравнения движения сосредоточенных масс  $J_d, J_T, J_k$  и уравнение для определения перемещения машины  $s$  :

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\omega_d}{dt} &= [M_d - M_{во} - (M_n + M_{нас}) / (u_{сп} \eta_{сп})] / J_{дн} ; \\ \frac{d\omega_T}{dt} &= [M_T - M_{кп} - M_{\phi i} \text{sign}(\omega_T - \omega_k u_{кп i} u_0) - \\ &\quad - M_{\phi i+1} \text{sign}(\omega_T - \omega_k u_{кп i+1} u_0)] / J_T ; \\ \frac{d\omega_k}{dt} &= \{ [M_{\phi i} u_{кп i} \eta_{кп i} \text{sign}(\omega_T - \omega_k u_{кп i} u_0) + \\ &\quad + M_{\phi i+1} u_{кп i+1} \eta_{кп i+1} \text{sign}(\omega_T - \omega_k u_{кп i+1} u_0)] u_0 \eta_0 - \\ &\quad - M_c - M_{\text{торм}} \} / J_{к.пр1} ; \\ \frac{ds}{dt} &= r_k \omega_k , \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $M_d$  – вращающий момент двигателя;  $M_{во}$  – момент сопротивления приводов вспомогательного оборудования, приведенный к коленчатому валу двигателя;  $M_n$  – вращающий момент на насосном колесе ГДТ;  $M_T$  – вращающий момент на турбинном колесе ГДТ;  $M_{нас}$  – момент сопротивления привода насоса гидравлической системы управления механизмами ГМП;  $M_{кп}$  – момент сопротивления холостой прокрутки ГМП;  $M_{\phi i}, M_{\phi i+1}$  – моменты трения фрикционов;  $M_c$  – суммарный приведенный момент сопротивления, учитывающий дорожное сопротивление и сопротивление воздуха;  $M_{\text{торм}}$  – момент тормозных механизмов (все моменты в Н·м);  $J_{дн}$  – приведенный к маховику двигателя момент инерции, учитывающий моменты инерции двигателя  $J_d$  и насосного колеса ГДТ  $J_n$ ;  $J_{к.пр1}$  – приведенный к ведущим колесам момент инерции, учитывающий моменты инерции трансмиссии, ведущих колес, опорных катков и поступательно движущуюся массу машины  $m_a$ , кг (все моменты инерции в кг·м<sup>2</sup>);  $u_{сп}, \eta_{сп}$  – передаточное число и КПД согласующей передачи;  $u_{кп i}, u_{кп i+1}$  – передаточные числа  $i$ -й и  $(i+1)$ -й ступеней коробки передач;  $\eta_{кп i}, \eta_{кп i+1}$  – КПД этих же ступеней;  $u_0, \eta_0$  – передаточное число и КПД механической части трансмиссии между коробкой передач и ведущим колесом;  $r_k$  – радиус колеса, м.

Важнейшими показателями эффективности использования машины в конкретных условиях являются средняя скорость движения  $v_{ср}$ , км/ч и путевой расход топлива  $Q_s$ , л/100 км [3]. Средняя скорость машины в значительной мере зависит от ее способности быстро разогнаться. Путевой расход топлива характеризует топливную экономичность машины. Применение адаптивного алгоритма обеспечивает достижение высоких показателей эффективности путем корректировки параметров динамичного и экономичного режимов управления и организации смены этих режимов в соответствии с изменяющимися условиями внешней среды и управляющими воздействиями водителя.

Динамичный режим достигается при условии, если ускорение автомобиля будет максимально возможным в течение всего процесса движения. Для этого необходимо, чтобы переключение с  $i$ -й ступени коробки передач (КП) на смежную  $(i+1)$ -ю ступень происходило, как только ускорение на этой ступени окажется выше, чем на  $i$ -й ступени. Аналогичны условия определения моментов блокирования ГДТ. Если при

данной скорости машины блокирование обеспечивает большее ускорение, чем при движении на режиме трансформации момента, то ГДТ необходимо блокировать. Следовательно, критериями оптимальности динамического режима управления являются равенства:

$$a_i(v) = a_{i+1}(v); \tag{2}$$

$$a_i(v) = a_{i\text{Бл}}(v). \tag{3}$$

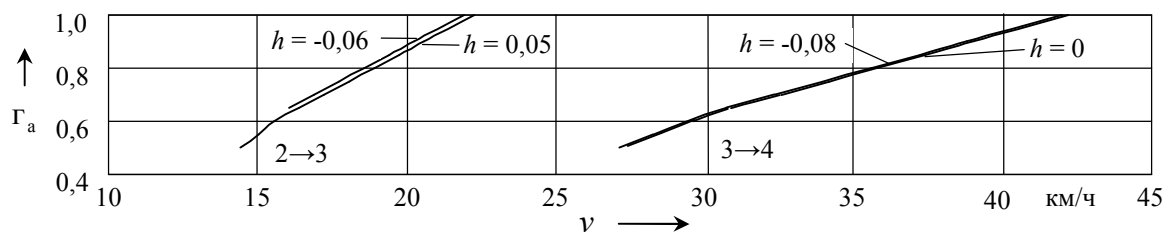
Экономичный режим управления предназначен для обеспечения минимального путевого расхода топлива на маршруте. Следовательно, критерием оптимальности характеристик управления по расходу топлива является равенство функций текущего расхода топлива:

$$Q_i(v) = Q_{i+1}(v). \tag{4}$$

$$Q_i(v) = Q_{i\text{Бл}}(v). \tag{5}$$

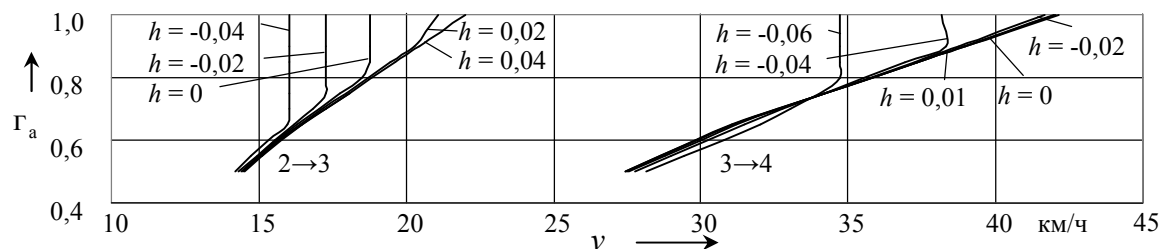
Скорости автомобиля, при которых достигаются равенства (2) или (4), представляют собой параметры оптимальных характеристик автоматического переключения с  $i$ -й на  $(i+1)$ -ю ступень КП  $v(i \rightarrow i+1)$ . Параметры оптимальных характеристик блокирования ГДТ на  $i$ -й ступени КП  $v(i \rightarrow i\text{Бл})$  соответствуют условиям (3) или (5). Поиск значений искомых параметров осуществляется посредством интегрирования системы уравнений (1).

На рис. 1 приведены полученные характеристики переключения передач при различных значениях продольных уклонов дороги  $h$ , определяющих уровень нагрузки двигателя машины. Они представляют собой зависимости между положением педали акселератора  $\gamma_a$  и скоростью автомобиля  $v$  на различных ступенях КП. Характеристики блокирования ГДТ имеют подобный вид.



a)

Рис. 1а. Характеристики переключения передач по критерию динамичности



б)

Рис. 1б. Характеристики переключения передач по критерию экономичности

Анализируя характеристики управления ГМП, можно отметить следующие их особенности. Параметры динамического режима практически не зависят от нагрузки

двигателя, а параметры экономичного режима – существенно зависят от нагрузки. Чем выше нагрузка, тем при большей скорости необходимо переключать передачи и блокировать ГДТ. Процесс разгона на каждой передаче начинается на режиме трансформации момента ГДТ, а затем продолжается с заблокированным ГДТ до очередного переключения передачи. Время движения с заблокированным ГДТ на экономичном режиме больше, чем на динамичном.

Оценка значимости факторов внешней среды и управляющих воздействий, оказывающих существенное влияние на параметры характеристик управления, осуществлена на основе корреляционного анализа. Определены линейные корреляционные связи между каждой парой исследуемых информационных переменных  $x_i$  и  $x_j$ , а также между параметрами характеристик управления  $v_k$  и каждой информационной переменной  $x_i$ . В результате анализа в качестве основных информационных переменных адаптивного алгоритма управления ГМП гусеничной машины приняты скорость  $v$  и ускорение  $a$  машины, координата положения педали акселератора  $\gamma_a$  и скорость ее изменения  $\dot{\gamma}_a$ , характеризующая особенности стиля управления водителем. При этом установлено, что ускорение машины в достаточно полной мере характеризует влияние условий внешней среды и полезной нагрузки машины на характеристики управления.

Проведен регрессионный анализ результатов вычислительных экспериментов. Получены регрессионные модели, которые представляют собой зависимости между параметрами характеристик управления ( $v_3^*$  и  $v_3^{**}$  – по критерию экономичности,  $v_d$  – по критерию динамичности) и выбранными информационными переменными. Для описания характеристик переключения передач приняты уравнения регрессий:

$$v_3^*(i \rightarrow i+1) = b_{i0}^* + b_{i1}^* a + b_{i2}^* a^2; \quad (6)$$

$$v_3^{**}(i \rightarrow i+1) = b_{i0}^{**} + b_{i1}^{**} a + b_{i2}^{**} \gamma_a; \quad (7)$$

$$v_d(i \rightarrow i+1) = b_{i0}^{**} + b_{i2}^{**} \gamma_a, \quad (8)$$

а для характеристик блокирования ГДТ:

$$v_3^*(i \rightarrow i\text{Бл}) = b_{i0}^* + b_{i1}^* a; \quad (9)$$

$$v_3^{**}(i \rightarrow i\text{Бл}) = b_{i0}^{**} + b_{i1}^{**} a + b_{i2}^{**} \gamma_a; \quad (10)$$

$$v_d(i \rightarrow i\text{Бл}) = b_{i0}^*, \quad (11)$$

где  $b_{i0}^*, b_{i1}^*, b_{i2}^*, b_{i0}^{**}, b_{i1}^{**}, b_{i2}^{**}$  – коэффициенты регрессий.

Экономичный режим соответствует выражениям (6), (7), (9), (10) и активизируется при неполном использовании мощности двигателя (частичное нажатие на педаль акселератора). Формирование сигнала на переключение осуществляется по меньшему из значений  $v_3^*(2 \rightarrow 3)$  и  $v_3^{**}(2 \rightarrow 3)$  путем сравнения его со скоростью машины. Характеристики управления на динамичном режиме определяются выражениями (8) или (11). Переход от экономичного режима к динамичному осуществляется при достижении порогового значения положения педали акселератора  $\gamma_{ап}$ , т. е. при  $\gamma_a \geq \gamma_{ап}$ , причем значение  $\gamma_{ап}$  переменное и зависит от характера управляющего воздействия (плавное или резкое).

Полученные регрессионные модели характеристик управления адаптированы к реальным режимам движения гусеничной машины. При этом учтены возможные

диапазоны изменения информационных переменных, исключена работа двигателя на неустойчивых режимах и неоправданно частые переключения, т. е. локализована область изменения параметров характеристик управления и получено их математическое описание для построения алгоритмов управления. На рисунке 2 приведены характеристики переключения передач со второй на третью  $2 \rightarrow 3$ , построенные по уравнениям (6)–(8) при различных значениях ускорений.

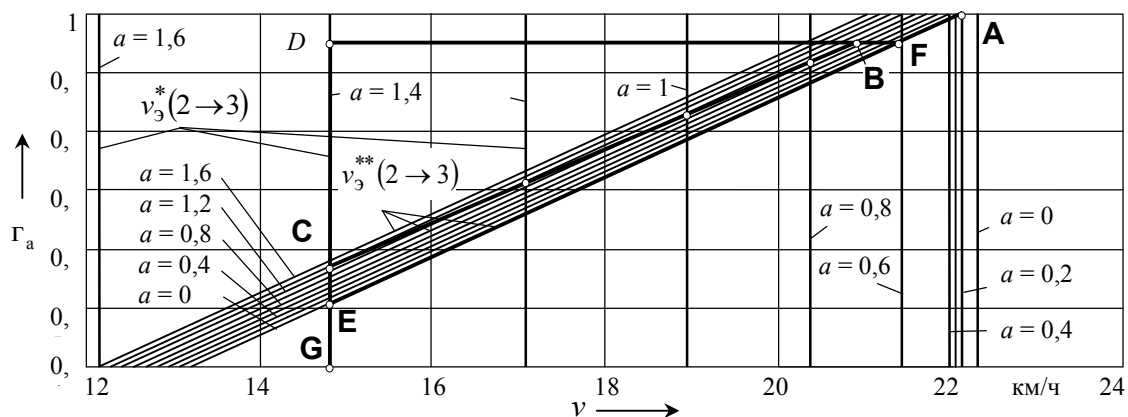


Рис. 2. Характеристики переключения передач  $2 \rightarrow 3$

Характеристики переключения передач адаптивной системы управления локализуются в области  $DFED$ , а также ограничиваются отрезками прямых  $AF$  и  $EG$ . В области  $DFED$  переключение передач осуществляется по критерию экономичности. Эта область состоит из двух подобластей:  $BCDB$  и  $BCEFB$ . В подобласти  $BCDB$  формирование параметра  $v_3(2 \rightarrow 3)$  характеристики переключения осуществляется по уравнению (6), а в подобласти  $BCEFB$  — по уравнению (7). При  $\gamma_a \geq \gamma_{ан}$  обеспечивается переключение передач по критерию динамичности. Условием формирования сигнала на переключение при этом является превышение скорости машины значения, определяемого линией  $AF$ , соответствующей выражению (8). Резкое нажатие на педаль акселератора может вызвать более ранний переход на динамичный режим, т. е. в некоторой промежуточной точке на линии  $EF$ . При  $\gamma_a < \gamma_{amin}$  (в нашем случае  $\gamma_{amin} = 0,5$ ) переключение возможно, если значение скорости машины окажется правее линии  $EG$ . Однако вероятность такого режима движения мала.

В процессе движения машины осуществляется регистрация информационных переменных:  $v$ ,  $a$ ,  $\gamma_a$  и  $\dot{\gamma}_a$ . Микропроцессор системы автоматического управления вычисляет параметры управления по формулам (6)–(11) и формирует соответствующие сигналы управления.

Переключения передач с высших на низшие должны происходить при меньших значениях скорости машины, чем с низших на высшие. Это необходимо для исключения чрезмерно частых необоснованных переключений. Аналогично, характеристики блокирования и разблокирования ГДТ должны выполняться с гистерезисом. Определены оптимальные параметры гистерезиса характеристик переключения передач и блокирования гидротрансформатора.

Оценка эффективности управления машиной выполнялась на основе моделирования ее движения в типовых эксплуатационных условиях по разработанному маршруту. Исследования показали высокую эффективность описываемого алгоритма по сравнению с командным управлением. Средняя скорость машины  $v_{cp}$  возрастает на 5...10 %, а путевой расход топлива  $Q_s$  снижается на 7...15 %. Существенно упрощается управление машиной, повышается безопасность ее движения.

Стендовые испытания подтвердили эффективность использования адаптивного алгоритма автоматического управления, синтезированного на основе разработанных характеристик. Изготавливается опытный образец указанной системы автоматического управления для установки на гусеничную машину ГМ-352М1Е. Запланированы дорожные испытания данной машины с целью проверки результатов, полученных аналитическим путем, в реальных режимах эксплуатации машины.

### **Литература**

1. Тарасик, В.П. Методология синтеза адаптивных алгоритмов управления мобильными машинами /В.П. Тарасик, О.В. Пузанова //Вестник МГТУ. – 2003. – № 2. – С. 154-158.
2. Тарасик, В.П. Математическое моделирование технических систем /В.П. Тарасик. – Мн.: ДизайнПРО, 2004. – 640 с.: ил.
3. Тарасик, В.П. Многопрограммная система управления ГМП /В.П. Тарасик, О.В. Пузанова //Автомобильная промышленность. – 2004. – № 1. – С. 16-20.

*Получено 02.07.2004 г.*