

## АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МЕХАНИКА-ВОДИТЕЛЯ, УПРАВЛЯЮЩЕГО КРИВОЛИНЕЙНЫМ ДВИЖЕНИЕМ БЫСТРОХОДНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ

*О.О. Павловская, С.В. Кондаков*

## DEFINITION ALGORITHM OF MECHANIC-DRIVER MATHEMATIC MODEL PARAMETRS FOR HIGH-SPEED CATERPILLAR MACHINE CURVOLINEAR MOVEMENT

*O.O. Pavlovskay, S.V. Kondakov*

Реализован алгоритм определения параметров математической модели механика-водителя, управляющего криволинейным движением быстроходной гусеничной машины. Приведены результаты имитационного моделирования криволинейного движения машины, управляемой механиком-водителем с назначенными параметрами.

*Ключевые слова:* математическая модель, структурная схема, механик-водитель, быстроходная гусеничная машина, управление криволинейным движением, качество процесса управления.

Realized definition algorithm of mechanic-driver mathematic model for curvilinear movement of high-speed caterpillar machine. Considers the results of researching of machine mobility, driving by man with fixed parametrs.

*Keywords:* mathematic model, high-speed caterpillar machine, hydrostatic drive, turning mechanism, transmitting function, man-operator, mechanic-driver, curvilinear movement driving.

### Введение

Не вызывает сомнения тот факт, что поведение сложной человеко-машинной системы (ЧМС), которой является транспортная машина, зависит как от технических показателей машины (от конструкции машины, ее агрегатов, систем, в том числе автоматических, интеллектуальных), так и от квалификации человека. В отношении к быстроходным гусеничным машинам (БГМ), к которым относят в первую очередь военные машины (танки и боевые машины пехоты), надо согласиться с тем, что каковы бы ни были совершенны технические средства, управляемость машины в целом в большой степени зависит от опыта, квалификации и даже таланта механика-водителя. Поэтому в рамках решения задачи моделирования криволинейного движения БГМ представляет интерес моделирование действий механика-водителя.

Библиография исследований в области моделирования человека, управляющего различными

объектами, включает более тысячи наименований. Действительно, вопросами моделирования человека в составе ЧМС занимались ученые как в СССР (потом в России), так и за рубежом [1–3]. В этих работах главные задачи, решаемые человеком в следящей системе, – вовремя обнаружить цель, вести ее, вовремя дать команду на уничтожение. Задачи, которые решает водитель транспортного средства, существенно отличаются от них. Это слежение за дорогой, предвидение дорожных условий и осуществление изменения положения штурвала управления поворотом заблаговременно в соответствии со своим опытом и техническими особенностями транспортной машины. При этом следует отдельно подчеркнуть, что гусеничная машина ведет себя в повороте не как колесная, хотя внедрение бесступенчатых механизмов поворота в трансмиссии современных БГМ позволяет им поворачивать «по-автомобильному» [4].

---

**Павловская Ольга Олеговна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы управления», Южно-Уральский государственный университет; olyapav@rambler.ru

**Кондаков Сергей Владимирович** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Колесные и гусеничные машины», Южно-Уральский государственный университет; tanksv@mail.ru

---

**Olga O. Pavlovskay** – Candidate of engineering science, Associate professor of the Control Systems Department of the South Urals State University; olyapav@rambler.ru

**Sergey V. Kondakov** – Doctor of engineering science, Professor of the Wheel and Caterpillar Machine Department of the South Urals State University; tanksv@mail.ru

В связи со всем вышеизложенным в данной статье приведен материал, отражающий особенности математической модели механика-водителя, управляющего криволинейным движением БГМ. Для этого еще раз, в дополнение к статье [5], проведен анализ известных моделей человека, управляющего именно транспортным средством, а затем произведены изменения модели, позволяющие более корректно имитировать действия опытного механика-водителя.

### 1. Анализ известных моделей

В качестве математической модели механика-водителя, управляющего БГМ, в первом приближении может быть использована модель водителя автомобиля Уиера и Мак-Рюера [6]. Структурная схема системы управления автомобилем, предложенная этими авторами, представлена на рис. 1.

Рассматривая реакцию на боковой ветер при скорости около 100 км/ч и используя довольно сложную систему уравнений, связывающих направляющий угол  $\varphi$  и поперечное положение  $y$  с углом поворота рулевого колеса  $\sigma$ , общепринятую в работах по динамике автомобиля, Уиер и Мак-Рюер получили следующие оценки:

$$Y_{\text{нф}} = 0,56 \exp\{-0,4j\omega\}$$

при переходной частоте 2,3 рад/с в контуре управления направлением движения, и  $Y_{\text{ну}} = 0,57$  при переходной частоте 0,9 рад/с в контуре управления положением.

Однако авторами получена модель и оценочные значения параметров модели осторожного и опытного водителя применительно к задаче управления конкретным видом транспортного средства, и неясно, как изменится модель и/или числовые

значения параметров модели при изменении объекта управления. Также здесь не учитывается стохастичность действий водителя.

Анализ возможности использования универсальных линейных моделей для моделирования поведения механика-водителя БГМ, осуществляющего сопровождающее слежение и управление криволинейным движением машины с предвидением, показал, что математическая модель последнего может быть представлена структурной схемой (рис. 2) [5].

Однако авторами при имитационном моделировании не учитывалась стохастичность управляющих движений механика-водителя, а также остались без ответа два вопроса. Во-первых, как объяснить наблюдаемую при имитационном моделировании системы управления БГМ в VisSim особенность реакции системы в начальный момент времени (рис. 3), не согласующуюся с ситуацией слежения с предвидением. Во-вторых, непонятно, каким образом следует назначать числовые значения параметров модели и насколько эти параметры будут соответствовать физическим возможностям человека.

### 2. Измененная математическая модель механика-водителя

Для получения адекватной реакции системы при сопровождающем слежении с предвидением из модели человека-оператора следует исключить звено чистого запаздывания (рис. 4), так как механик-водитель, предвидя изменение входного сигнала и зная, что не сможет на это изменение отреагировать мгновенно, начинает изменение траектории движения БГМ заранее. Иначе говоря, механик-водитель осуществляет управление с упреж-

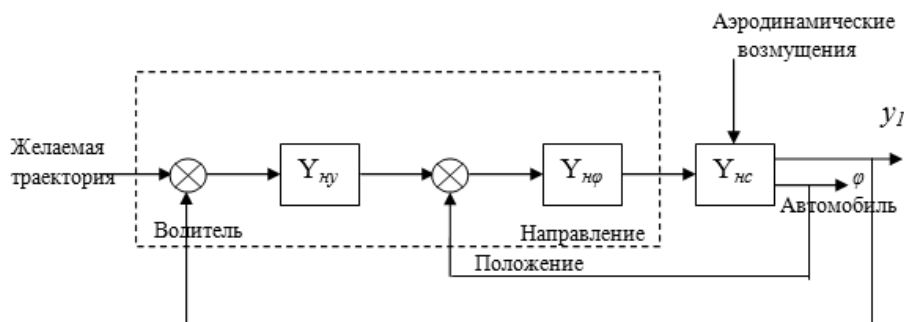


Рис. 1. Система управления автомобилем

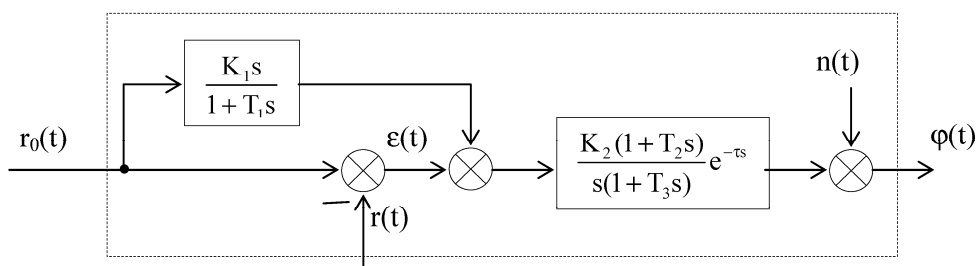


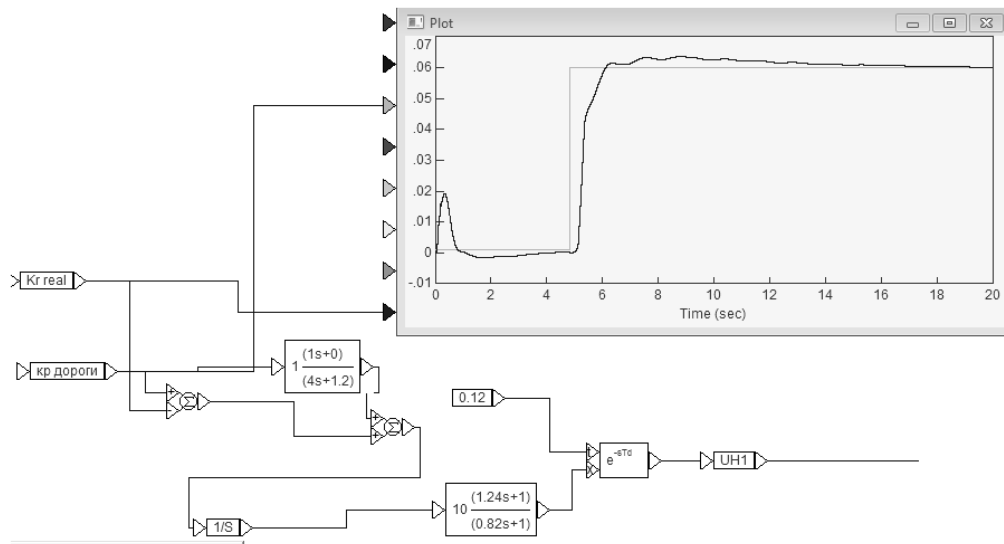
Рис. 2. Математическая модель механика-водителя

дением, компенсируя тем самым непроизвольное запаздывание своей реакции.

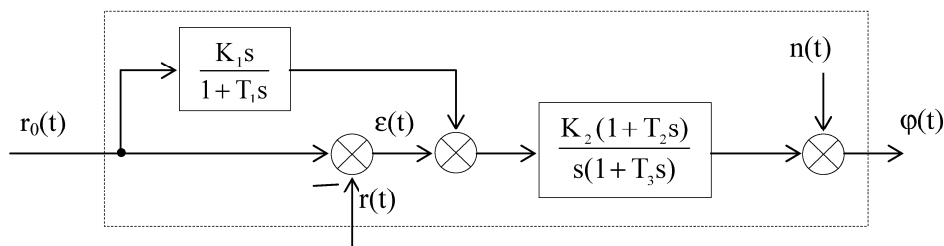
Подтверждением корректности данного изменения математической модели механика-водителя, осуществляющего сопровождающее слежение с предвидением, являются результаты моделирования системы управления БГМ в VisSim (рис. 5).

### 3. Алгоритм определения числовых значений параметров математической модели механика-водителя

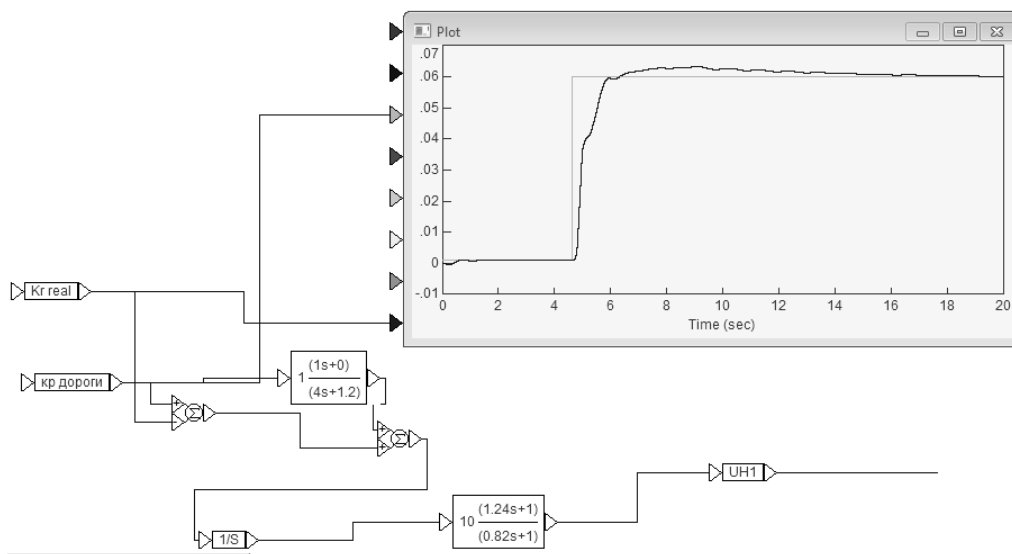
Следует учитывать, что механик-водитель в среднем действует, как действовал бы хорошо сконструированный серворегулятор. Действительно, достаточно натренированный механик-води-



**Рис. 3. Реакция системы управления БГМ на единичный ступенчатый сигнал при наличии звена чистого запаздывания в модели механика-водителя**



**Рис. 4. Измененная модель механика-водителя БГМ**



**Рис. 5. Реакция системы управления БГМ на единичный ступенчатый сигнал с исключением звена чистого запаздывания из модели механика-водителя**

тель, зная свои собственные динамические характеристики, динамические характеристики управляемого процесса, характеристики своей собственной вариабельности и внешних возмущений, а также критерий, описывающий наилучшее управление, будет действовать оптимально, выдавая наилучшие управляющие воздействия. При этом некоторые параметры его модели можно считать априорно известными (например, нервно-мышечное запаздывание реакции человека уже оценено экспериментально [3, с. 175], поэтому в зависимости от степени натренированности водителя  $T_3$  следует выбирать из диапазона 0,1...0,2 с, пусть  $T_3=0,2$  с; постоянная времени  $T_1$  должна быть настолько мала, чтобы не влиять на динамику всей системы, поэтому пусть  $K_1=1$ ,  $T_1=0,002$  с). Остальные параметры модели человека-оператора настраиваются последним под условия задачи управления, так как механик-водитель, в отличие от машинного блока, обладает свойством адаптивности и после тренировки приобретает те навыки, которые позволяют управлять ему объектом с заданным качеством.

Определение параметров  $K_2$  и  $T_2$ , характеризующих адаптивные свойства механика-водителя, можно проводить по различным критериям, сходным с критерием среднеквадратической минимизации в теории сервосистем. Например, можно определять параметры  $K_2$  и  $T_2$  исходя из условия обеспечения требуемых запасов устойчивости системы по фазе [3], однако нет единого мнения о величинах этого запаса устойчивости. Поэтому далее предложено определять неизвестные параметры модели по критерию минимума улучшенной интегральной квадратичной оценки (УИКО) системы вида

$$I = \int_0^{\infty} (\varepsilon^2 + (T\dot{\varepsilon})^2) dt,$$

где  $T$  – некоторая постоянная времени, величина которой определяется из условия желаемого качества переходного процесса системы. В нашем случае следует взять  $T=0,12$  с.

Описанный выше алгоритм назначения параметров  $K_2$  и  $T_2$  математической модели механика-водителя реализован на C++. В результате расчета получено, что при  $K_2=6,5$  и  $T_2=0,06$  с наблюдается  $I_{\min}=0,0101$ .

Реакция системы управления БГМ на единичный ступенчатый сигнал, полученная при  $K_1=1$ ,  $K_2=6,5$ ;  $T_1=0,002$  с;  $T_2=0,06$  с;  $T_3=0,2$  с, представлена на рис. 6. По монотонной переходной характеристике системы определено время переходного процесса:  $t_{\text{ин}} = 0,8$  с, что соответствует требованиям к качеству процесса управления БГМ.

Таким образом, определена математическая модель «среднестатистического» механика-водителя, которая позволяет количественно сформулировать требования к скорости его адаптации к ситуации на дороге. Также при имитационном моделировании следует учесть стохастичность управляющих движений механика-водителя в связи непостоянством его психофизиологического состояния введением в модель случайной составляющей реакции  $n(t)$  (стационарного белого шума со следующими параметрами: математическое ожидание 0,2 с; среднеквадратическое отклонение 0,08 с).

Результаты моделирования в VisSim системы управления БГМ с учётом стохастичности управляющих движений механика-водителя представлены на рис. 7.

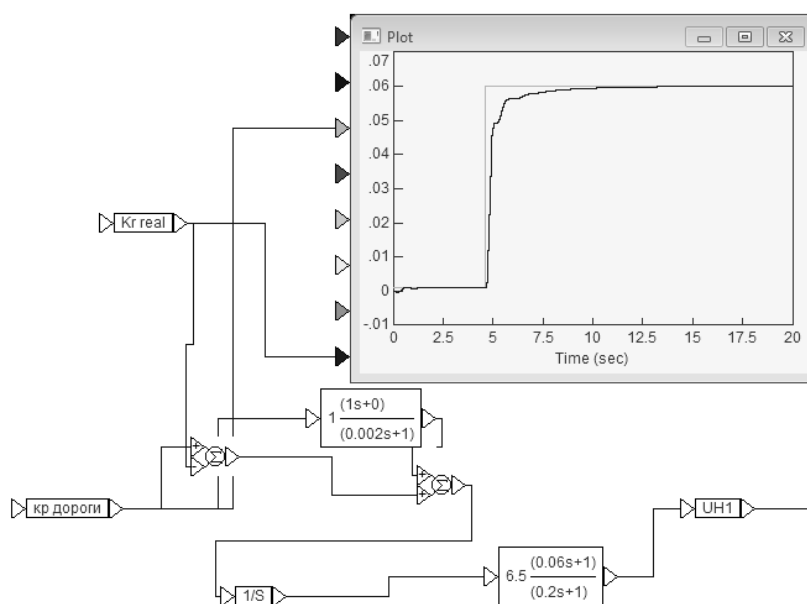
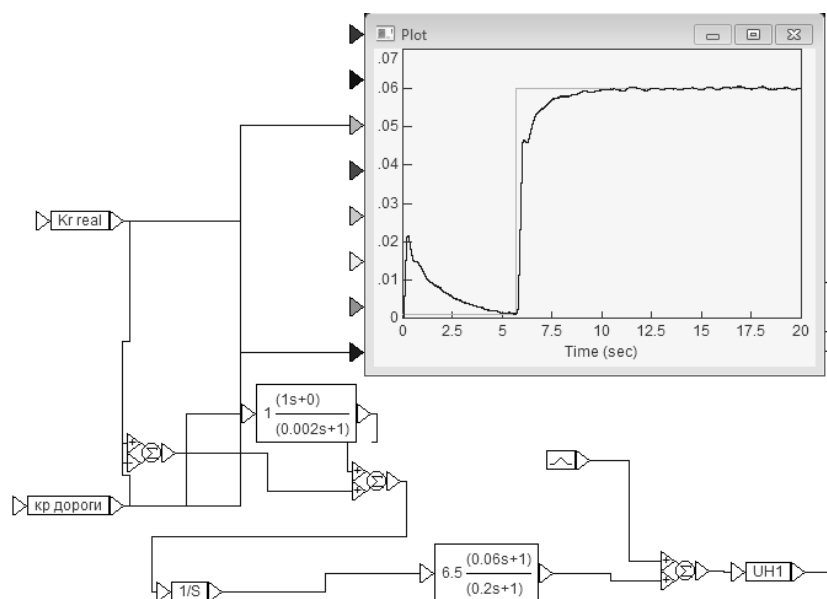


Рис. 6. Реакция системы управления БГМ на единичный ступенчатый сигнал при найденных программным путем параметрах модели механика-водителя



**Рис. 7. Реакция системы управления БГМ на единичный ступенчатый сигнал с учетом стохастичности управляющих движений механика-водителя**

В дальнейшем следует исследовать влияние изменения параметров модели для случая управления БГМ механиками-водителями с разными уровнями натренированности на качество процесса управления.

### Выводы

1. Обоснована необходимость исключения из математической модели механика-водителя, осуществляющего сопровождающее слежение с предвидением траектории движения БГМ, звена чисто-го запаздывания.

2. Исходя из утверждения, что механик-водитель – аналог автоматического управляющего устройства, который обеспечивает требуемое качество процесса управления, следует одни параметры его модели считать априорно известными ( $T_3=0,2$  с;  $K_1=1$ ;  $T_1=0,002$  с), а другие параметры ( $K_2$  и  $T_2$ ), характеризующие адаптацию навыков механика-водителя после тренировки под условия задачи, следует определять из условия минимума улучшенной интегральной оценки качества системы с параметром  $T=0,12$  с.

3. Для автоматизации процедуры нахождения параметров математической модели механика-водителя ( $K_2$  и  $T_2$ ) на языке C++ создан программный продукт.

4. Математическое моделирование системы управления БГМ с найденными параметрами ( $K_2=6,5$  и  $T_2=0,06$  с) показало, что при монотонном переходном процессе время переходного процесса составляет 0,8 с, что соответствует требованиям к качеству процесса управления БГМ.

5. Проведено моделирование в VisSim системы управления БГМ с найденными параметрами математической модели и с учётом стохастичности управляющих движений «среднестатистиче-

ского» механика-водителя путем введения в модель белого шума (математическое ожидание 0,2 с; среднеквадратическое отклонение 0,08 с). В дальнейшем следует учесть влияние изменения параметров модели для случая управления БГМ механиками-водителями с разными уровнями натренированности на качество процесса управления.

### Литература

1. Дружинин, Г.В. Учет свойств человека в моделях технологий / Г.В. Дружинин. – М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2000. – 327 с.
2. Цибулевский, И.Е. Человек как звено следящей системы / И.Е. Цибулевский. – М.: Наука, 1981. – 288 с.
3. Шеридан, Т.Б. Системы человек-машина: модели обработки информации, управления и принятия решений человеком-оператором / Т.Б. Шеридан, У.Р. Феррел; под ред. К.В. Фролова; пер. с англ. А.А. Кобринского. – М.: Машиностроение, 1980. – 400 с.
4. Кондаков, С.В. Повышение подвижности быстроходной гусеничной машины путем автоматизации системы управления криволинейным движением: моногр. / С.В. Кондаков. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009. – 108 с.
5. Имитационное моделирование движения быстроходной гусеничной машины механиком-водителем / С.В. Кондаков, Н.Н. Корнаева, О.О. Павловская, С.И. Черепанов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2010. – Вып. 16. – № 29(205). – С. 59–64.
6. Weir, D.H. Models for Steering Control of Motor Vehicles / D.H. Weir, D.T. McRuer // Proc. 4<sup>th</sup> Annual NASA, 1968. – 192 с.

Поступила в редакцию 30 июля 2011 г.