

О НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЯХ В УПРАВЛЯЮЩИХ ДЕЙСТВИЯХ ВОДИТЕЛЯ АВТОМОБИЛЯ

Р. В. РОТЕНБЕРГ, А. Б. АРЦИХОВСКИЙ-КУЗНЕЦОВ, И. И. ГОЛЬДИН,
Ш. И. ХУБЕЛАШВИЛИ*
Кафедра «Детали Машин» Московского Автомобильно-Дорожного Института

(Поступила 29. 10. 1975)

Представлена д. т. н. профессором Золтаном Леваи

К постановке задачи. Рассматриваемая задача связана с проблемой безопасности дорожного движения. Рост числа автомобилей, повышение плотности транспортных потоков сопровождается большим числом дорожно-транспортных происшествий (ДТП).

Исследования, проведенные в ряде стран, приводят к единому выводу о том, что в 65—90% случаев основной причиной ДТП является водитель. Для решения многих практических задач, например, связанных с согласованием параметров автомобиля и возможностей человека для исследования транспортных потоков, для обучения и диагностики профессиональных качеств водителя, необходима формализация действий водителя, выявление их структуры, математическое моделирование.

Водитель является управляющим звеном в системе «водитель-автомобиль-дорога» (ВАД) и может рассматриваться как человек-оператор. Формализации трудовой деятельности человека-оператора посвящено большое число работ, предложено свыше двух десятков его математических моделей (1).

Однако деятельность водителя автомобиля имеет ряд особенностей, которые должны учитываться при формировании его математических моделей. В данном случае представляет интерес то, что даже при отсутствии внешнего возмущения действия водителя вызывают колебательные движения автомобиля, часто нелинейные и нестационарные.

Необходимым условием решения задачи является достаточно точная информация об управляющих действиях водителя. Получение ее в реальных условиях затруднительно и часто небезопасно. Поэтому целесообразно получение экспериментальных характеристик водителя, исходных для построения его математических моделей, на комплексе, моделирующем систему ВАД.

Моделируется движение автомобиля за автомобилем-лидером в плотном транспортном потоке, предполагающее непрерывное двумерное слежение за траекторией и за скоростью (безопасной дистанцией) лидера.

* Статья была прочитана в форме лекций по кафедре Автомобилей БТУ, 24 октября 1974 г. при пребывании автора на кафедре.

Выделение двумерного слежения из числа возможных действий водителя автомобиля имеет практические основания, поскольку до 60% ДТП обусловлено ошибками водителя в слежении за траекторией и скоростью движения. Создание моделирующего комплекса связано со значительными трудностями, так как требовалось обеспечить с приемлемой точностью моделирование внешней структуры действий водителя и динамики движения автомобиля, загрузку водителя информацией в пределах всего его сенсорного пространства, регулирование нагрузки на водителя от малой до весьма значительной, обеспечение непредсказуемого характера всей поступающей к водителю информации.

Таким образом, основой комплекса явились три замкнутых контура: I — управления траекторией движения; II — управления продольной скоростью автомобиля; III — внешних воздействий на водителя (7).

Уже первые результаты, полученные с помощью комплекса, моделирующего систему ВАД, представляют определенный интерес.

Случайный характер действий водителя естественно заставляет обратиться к корреляционно-спектральному анализу, позволяющему более тонко оценить процессы управления (3). Подход к построению математических моделей деятельности водителя, преследующий формирование структуры его действий, был начат по двум направлениям: с анализа опытных данных и практических наблюдений, априорных заключений и их проверки; с использования методов идентификации динамических систем (6).

Формирование структуры действий водителя. Модели

Исследование слежения водителем за впереди идущим автомобилем-лидером применительно к транспортному потоку средней и высокой интенсивности проводилось в дорожных условиях и более детально на комплексе, моделирующем систему ВАД. Оказалось, что действия водителя в контуре II являются существенно нелинейными, а ошибку дистанции следования можно считать квазирегулярной.

На рис. 1а представлены часть записей характерной ошибки выдерживания безопасной дистанции следования (ΔD) и угла отклонения педали (α) управления скоростью (относительно установившегося значения) при следовании за лидером, скорость которого $V_A = 60$ км/час = const.

На рис. 1б представлены нормированная корреляционная функция и спектральная плотность ошибки ΔD . Нетрудно заметить, что максимум узкополосного спектра близок к частоте квазирегулярной составляющей $f = 0,019$ гц (незатухающая ветвь корреляционной функции).

Предполагая, что наличие квазирегулярной составляющей связано с возникновением автоколебаний в нелинейном контуре II, проведем его

исследование частотным графо-аналитическим методом (5). Анализ реакции водителя на ступенчатое и синусоидальные воздействия позволил представить линейную часть звена «водитель» (рис. 2а) моделью, которая близка к широко известной и достаточно хорошо проверенной (1) модели вида:

$$W_{ВЛ}(p) = \frac{K\theta \cdot e^{-p\tau}}{T\theta p + 1}$$

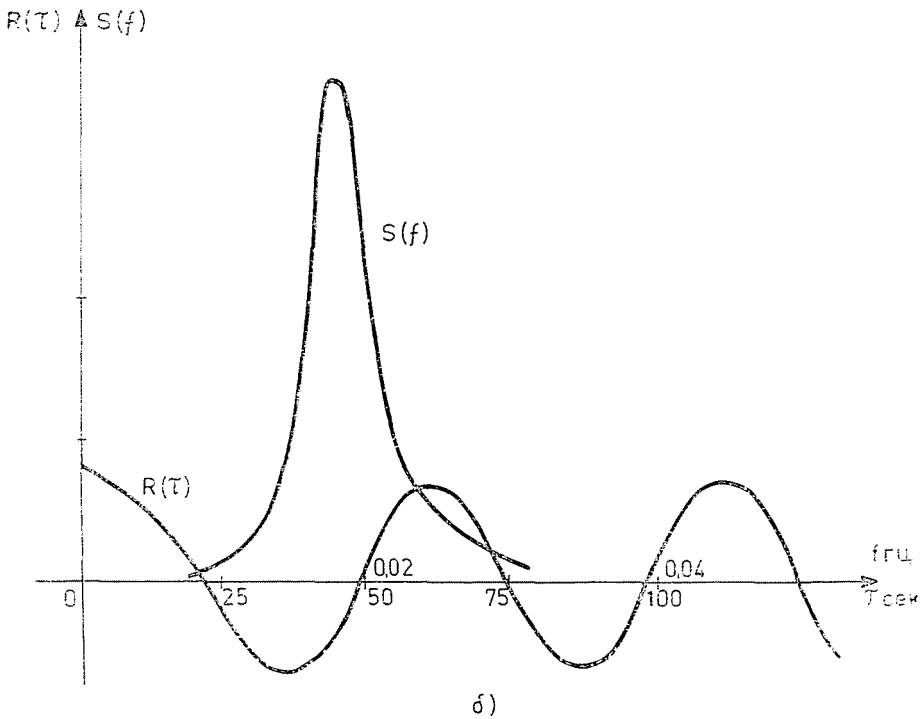
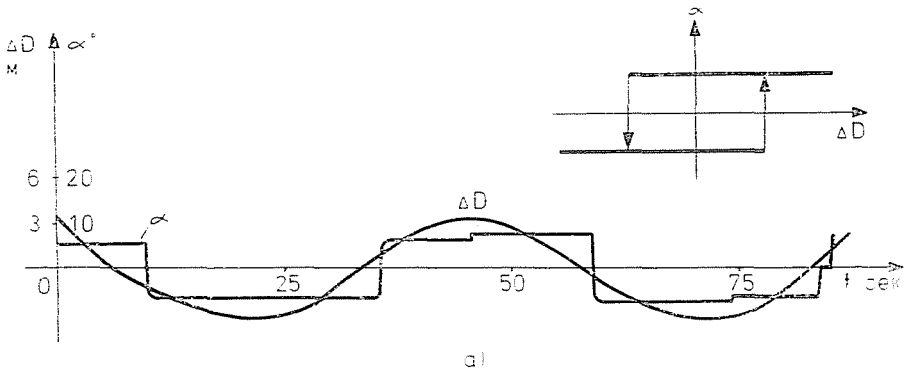


Рис. 1

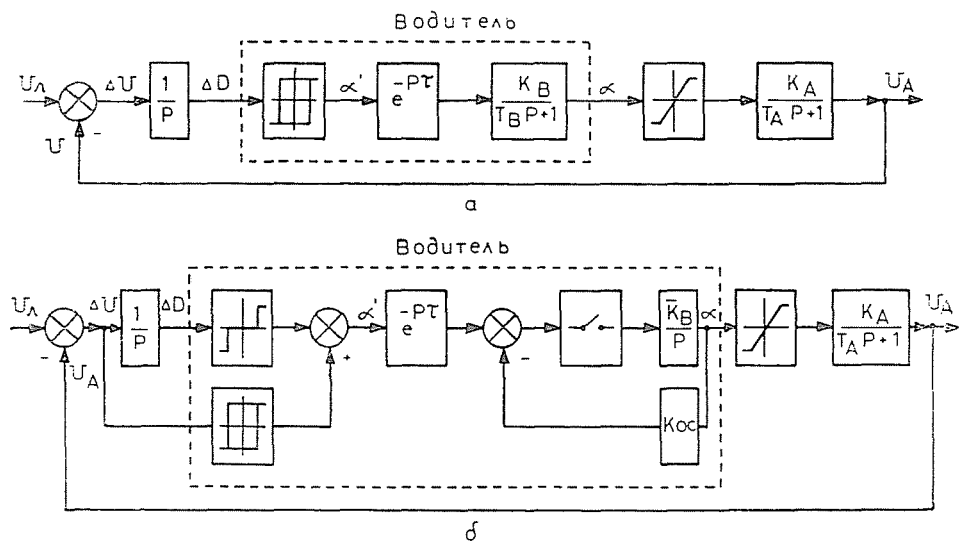


Рис. 2

Нелинейная часть (рис. 2а) структуры «водителя» ближе всего соответствует нелинейности вида:

$$F(\Delta D) = \begin{cases} -C \text{ при } \Delta D - d < 0 \\ C \text{ при } \Delta D - d > 0 \end{cases} \text{ при } \frac{d\Delta D}{dt} > 0 \\ \begin{cases} -C \text{ при } \Delta D + d > 0 \\ C \text{ при } \Delta D + d < 0 \end{cases} \text{ при } \frac{d\Delta D}{dt} < 0$$

где d — порог чувствительности по управляющему воздействию;
 c — ответная реакция водителя (уровень раздражения рецептора).

Подобная нелинейность действий водителя может быть объяснена как результат реализации им одного из наиболее общих принципов оптимального управления: выбора цен (веса) многих характеристик системы ВАД и прежде всего, ошибок слежения и размера управляющих воздействий, с последующей адаптивной подстройкой своих параметров для минимизации общей цели. При установившемся процессе слежения можно считать, что минимизация общей цели преследует цель минимизации потребляемой мощности, необходимой для выполнения задачи слежения, связанной с сенсомоторными действиями (4).

На рис. 2а приведена общая блок-схема замкнутого контура II, сформированного на основе приведенных соображений.

Параметры τ , T_B , d , c , K_B характеризуют внутренние свойства водителя и являются случайными дискретными величинами:

- τ — время реакции водителя;
- $T\theta$ — постоянная инерционности действия водителя;
- $K\theta$ — коэффициент передачи исполнительного привода, образованного нейронно-мышечной структурой.

Для нахождения и оценки параметров автоколебаний в контуре II были построены годографы его линейной и нелинейной части. При этом были взяты средние значения, замеренные по нескольким реализациям процесса слежения, следующих параметров:

$$d = 1,5 \text{ м}; c = 5 \text{ град}; \tau = 0,25 \text{ сек}; T\theta = 0,15 \text{ сек};$$

$$K_A = 1,4 \frac{\text{км/час}}{\text{град}}; K\theta = 1 \text{ при } \frac{\alpha_{\max} - \alpha_0}{2} \leq 20 \text{ град.}$$

Модель автомобиля в аналитическом расчете отклонений относительно установившегося значения в подобном контуре может быть с достаточной точностью аппроксимирована аperiodическим звеном с постоянной $T_A = 25$ сек (4).

Выражение для годографов имеет следующий вид:
линейная часть:

$$\text{модуль } |W_{BA}(j\omega)| = \frac{K\theta \cdot K_A}{\omega \cdot \sqrt{(1 + T_B^2 \omega^2)(1 + T_A^2 \omega^2)}}$$

$$\text{фаза } \varphi(\omega) = -90^\circ - \text{arc tg } \omega T_B - \text{arc tg } T_A \omega - \omega\tau$$

Нелинейная часть:

$$Re(A) = -\frac{\pi \cdot A}{4c} \sqrt{1 - \frac{d^2}{A^2}} \text{ — действительная часть}$$

$$Im(A) = -\frac{\pi d}{4c} \text{ — мнимая часть}$$

A — амплитуда входного сигнала на входе нелинейности.

В контуре II возникают устойчивые автоколебания (пересечение годографов на рис. 3) с параметрами $\omega = 0,12$; $A = 3,5$ м. При этом частота и амплитуда автоколебаний особенно критичны к изменению параметров d и C . Совпадение параметров расчетных автоколебаний с амплитудно-частотными параметрами спектра ошибки ΔD при эксперименте ($\omega = 0,13$; $A = 3,7$ м) дает основание считать, что переменную регулярную ошибку ΔD (ремнанту) при неизменном входном сигнале ($V_A = \text{const}$) порождают автоколебания в контуре управления автомобилем. Однако, как отмечалось выше, нами выбраны средние значения случайных параметров структуры. Дисперсия этих параметров и их стационарность определяются опытом и надежностью води-

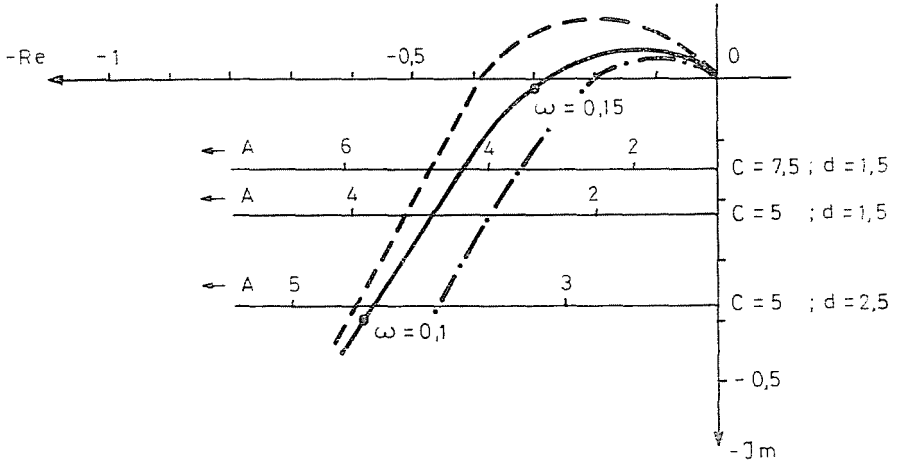


Рис. 3

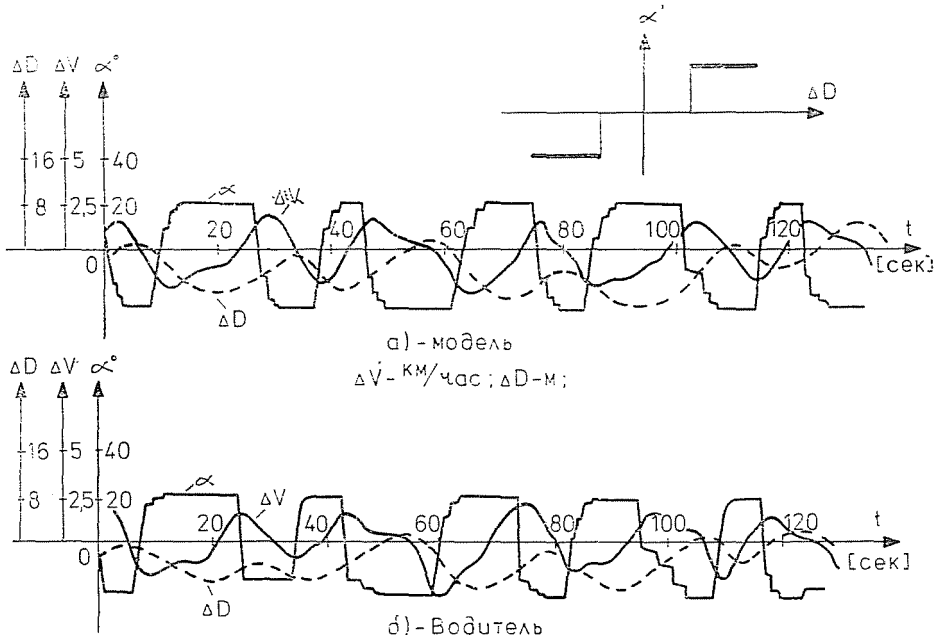


Рис. 4

теля. Поэтому с увеличением опыта у водителя спектр его ошибок может сужаться, приближаясь в пределе к расчетной частоте автоколебаний.

В случае непредсказуемого входного сигнала ($V_A = var$) действия водителя приобретают более сложный нелинейный и дискретный характер: суммарное управление α становится пропорциональным не только ошибке ΔD , но и ее производной ΔV .

При выдержании заданной скорости и постоянной дистанции следования имеем (рис. 4б):

$$F(\Delta V) = \begin{cases} \left. \begin{array}{l} -C_1 \text{ при } \Delta V - d_1 < 0 \\ C_1 \text{ при } \Delta V - d_1 > 0 \end{array} \right\} \text{ при } \frac{d\Delta V}{dt} > 0 \\ \left. \begin{array}{l} C_1 \text{ при } \Delta V + d_1 > 0 \\ -C_1 \text{ при } \Delta V + d_1 < 0 \end{array} \right\} \text{ при } \frac{d\Delta V}{dt} < 0 \end{cases}$$

$$F(\Delta D) = \begin{cases} C_2 \text{ при } \Delta D \geq d_2 \\ -C_2 \text{ при } \Delta D \leq -d_2 \\ 0 \text{ при } -d_2 < \Delta D < d_2. \end{cases}$$

В общем случае положительные и отрицательные значения параметров C и d могут быть различными по модулю.

Дискретный элемент (рис. 4б) имитирует (при $|\alpha| > 0,6$ $|\alpha \max|$) дискретный характер управляющих действий, вызванный, видимо, отсутствием жесткой кинетической обратной связи во внутреннем исполнительном контуре слежения звена «водитель». Частота дискретизации составляет $f_g = 0,3 \div 1,2$ гц.

Для проверки описанной модели воспользуемся реализацией процессов слежения при непредсказуемом управляющем воздействии, когда

$$V_A = 60 + \sum_{i=1}^3 A_i \sin 2\pi f_i t \text{ км/час.}$$

При оценке достоверности модели звена «водитель» явно недостаточно применения распространенного критерия минимума дисперсии ошибки водителя и его модели, применяемого при идентификации по методу «отслеживающего параметра», поскольку не может быть учтено число перемещений педали управления скоростью автомобиля (педаль управления дросселем), характеризующей суммарную мощность, затрачиваемую водителем на управление.

Нами при нахождении параметров модели звена «водитель» используется минимизация комплексного критерия I :

$$I = F(|\varepsilon| \times |\Delta K|)$$

где ε — приведенная разность дисперсий ошибок слежения водителя и его модели;

F — нелинейная зависимость вида:

$$F(|\varepsilon|) = \begin{cases} 1 \text{ при } |\varepsilon| \leq B \\ 0 \text{ при } |\varepsilon| > B. \end{cases}$$

B — параметр, характеризующий все ошибки слежения в критерии;
 ΔK — приведенная разность числа переключений органа управления водителя и его модели.

Необходимо заметить, что при выбранной относительной точности по ошибке слежения, задаваемой параметром B использование критерия I справедливо только при условии $F(|\varepsilon|) = I$.

При нахождении параметров модели звена «водитель» амплитуды и частоты задающего непредсказуемого воздействия, т.е. V_A , выбрались исходя из спектра «шума ускорения» транспортного потока и изменялись в диапазоне $f = 0,015 \div 0,3$ гц при $|V_A - 60| \leq 10$ км/час.

Окончательно из условия минимизации критерия I при относительной 10% точности ($B = 0,1$) получены следующие средние значения параметров модели водителя автобуса (рис. 2б):

$$d_1 = 1,4 \text{ км/час}; C_1 = 22 \text{ град}; d_2 = 5 \text{ м}$$

$$C_2 = 14 \text{ град}; \bar{K}v = 0,85; K_{vv} = 1; \tau = 0,3 \text{ сек}$$

$$\text{при } \frac{\alpha_{\max} - \alpha_0}{2} \leq 22 \text{ град};$$

В заключение необходимо отметить, что ближайшими задачами являются:

- получение полных статистических данных о разбросе параметров описанных моделей;
- количественное выявление оценок нестационарности и надежности действий водителя;
- введение в структуру действий водителя команд управления, пропорциональных более высоким производным входных воздействий и учет взаимовлияния контуров.

Применение методов идентификации

При исследовании звена «водитель» как сложного биодинамического объекта, исходными данными являются результаты испытаний — входные возмущения и реакции водителя, полученные на комплексе. Они позволяют перейти к частотным и временным характеристикам исследуемого звена «водитель». Идентификация в широком смысле должна решить более сложные задачи, в частности, определение степени и формы связи между входными и выходными переменными, дать количественную оценку степени нелинейности, позволить построить модели в классе линейных операторов.

Применение методов идентификации проводится на примере I контура управления (слежение за траекторией), где рассматривается суммарное

входное возмущение $\psi_d(t)$ задаваемое лидером, и угол поворота $\Theta(t)$ рулевого колеса как выходная функция. Взаимный анализ процессов ψ_d и Θ в частотной области показал, что функция когерентности $E(f)$ и фазовая характеристика $\varphi(f)$ при $0,02 \leq f \leq 0,04$ гц соответственно равны $E = 1$ и $\varphi = \pi/2$.

Можно полагать, что входное возмущение линейно связано с реакцией водителя, хотя коэффициент усиления на этих частотах невелик.

В частотном диапазоне $f > 0,04 \div 0,36$ гц имеем $E \approx 0,4$ и $\varphi = -\pi/2$, что позволяет думать о нелинейной связи между рассматриваемыми процессами с более значительным коэффициентом усиления звена «водитель».

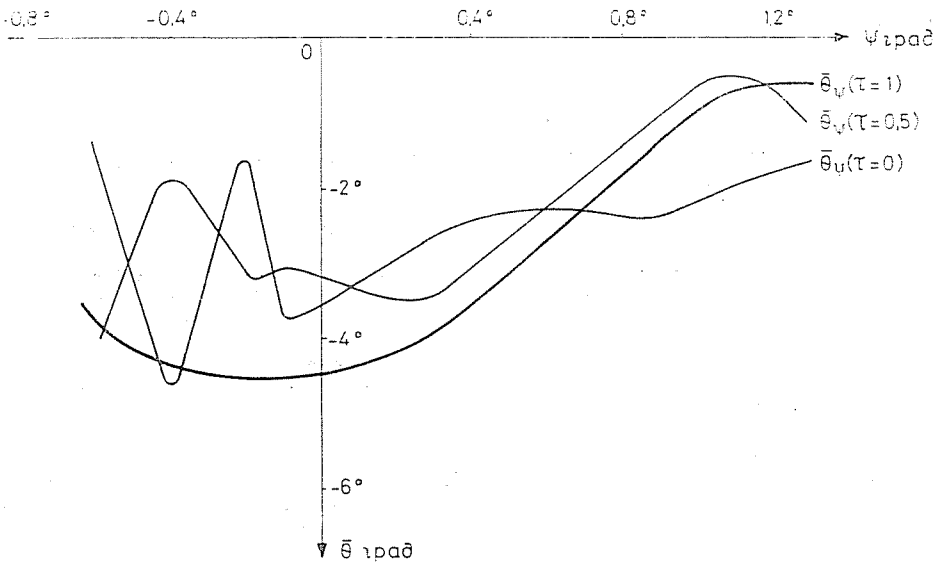


Рис. 5

О форме нелинейности между ψ_d и Θ можно судить по их условным математическим ожиданиям, приведенным на рис. 5, при сдвиге $\tau = 0$ и $\tau = 1,5$ сек.

По данным наших исследований с вероятностью 0,95 можно считать зависимость между входом и выходом близкой линейной при $0,1 \leq \tau \leq 0,75$ сек и существенно нелинейной (степень нелинейности по критерию Фишера 0,85) при $\tau > 0,75$ сек (6).

Однако изложенные соображения носят частично гипотетический характер и вопрос о линейности и нелинейности участков действий водителя требует дальнейших уточнений.

Первые испытания водителей на комплексе, моделирующем систему ВАД, указывают на большие перспективы такого метода изучения водителя автомобиля и формализации его действий в связи с проблемой безопасности дорожного движения.

Резюме

Рассматриваемая задача связана с проблемой безопасности дорожного движения. Рост числа автомобилей, повышение плотности транспортных потоков сопровождается большим числом дорожно — транспортных происшествий.

Исследования, проведенные в ряде стран, приводят к единому выводу о том, что в 65—90% случаев основной причиной является водитель.

Водитель является управляющим звеном в системе «водитель—автомобиль—дорога» и может рассматриваться как человек-оператор.

При исследовании звена «водитель» как сложного биодинамического объекта, исходными данными являются результаты испытаний. Они позволяют перейти к частотным и временным характеристикам исследуемого звена «водитель».

Применяемый метод идентификация в широком смысле должна решить и более сложные задачи, в частности, определить степени и формы связи между выходными и входными переменными, дать количественную оценку степени нелинейности, позволить построить модели в классе линейных операторов.

Литература

1. Ахутин В. М.—Нафтумльев А. И.: Математическое моделирование деятельности человека-оператора при разработке эргатических систем. В книге: Человек и общество. Вып. XI, Ленинград, (1972).
2. Гельфанбейм Я. И.: Кибернетическая диагностика динамических систем. «Зинайте», Рига, (1970).
3. Гольдин И. И.—Ротенберг Р. В.—Хубелашвили Ш. И.: Анализ точности действий водителя методами теории случайных процессов. Сб. Пути повышения безопасности дорожного движения. 2-я Всесоюзная межвузовская научно-техническая конференция. Москва (1975).
4. Милсум Дж.: Анализ биологических систем управления. «Мир», Москва (1968).
5. Попов Е. П.—Бесекерский В. А.: Теория систем автоматического регулирования. «Наука». Москва (1966).
6. Райбман Н. С.—Чадаев В. М.: Адаптивные модели в системах управления. «Советское радио», Москва (1966).
7. Ротенберг Р. В.—Арциховский/Кузнецов А. Б.: Предпосылки моделирования системы «водитель—автомобиль—дорога» для исследования надежности и безопасности действий водителя. Сб. Пути повышения безопасности дорожного движения. 2-я Всесоюзная межвузовская научно-техническая конференция. Москва (1975).

Р. В. Ротенберг	} 125319 Москва А-319 Ленинградский пр. 64 СССР.
А. Б. Арциховский	
И. И. Гольдин	
Ш. И. Хубелашвили	