

УДК 681.5.007

На правах рукописи

Устюжанин Александр Дмитриевич

**ДИНАМИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ОЦЕНИВАНИЕ
СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА
В СИСТЕМАХ «ЧЕЛОВЕК-МАШИНА»**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(в технических системах) (технические науки)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор
Пупков Константин Александрович

Официальные оппоненты: Член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор ФГУП «ГосНИИАС»
Себряков Герман Георгиевич

Кандидат технических наук, доцент
ОАО «ВПК НПО Машиностроение»
Суханов Эдуард Дмитриевич

Ведущая организация: Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН

Защита состоится «16» ноября 2010г. в 14:30 час. на заседании
Диссертационного совета Д 212.141.02 в Московском государственном
техническом университете имени Н.Э. Баумана
по адресу 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
государственного технического университета имени Н.Э. Баумана

Автореферат разослан «___» _____ 2010г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

В.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Сложность объектов управления непрерывно растет. Это связано с тем, что цели, которые ставятся перед этими объектами, являются более многогранными и должны достигаться при различных, порой экстремальных воздействиях окружающей среды. В огромном числе случаев в управлении объектами участвует человек. Будем называть его «человек-оператор». События последних лет показывают, что для эффективного действия объектов в этих случаях необходимо уделять особое внимание изучению динамических свойств человека-оператора, обучению и адаптации его к воздействию окружающей среды для достижения цели, поставленной перед системой «человек-машина».

Часть функций управления в современных системах берет на «себя» компьютер, однако, это не исключает человека из решения задачи управления, а освобождает его для решения самых сложных проблем, неподдающихся автоматизации. Поэтому задачи исследования динамики человека-оператора в человеко-машинных системах, его обучение и адаптация не упрощаются, а наоборот, становятся более сложными. В связи с этим разработка методов динамической идентификации характеристик человека-оператора и оценки его состояния с целью определения допустимых параметров при управлении объектами различного типа, разработка методов синтеза желаемых характеристик человека-оператора, методов оценки степени его обученности, обеспечивающей достижение цели, поставленной перед системой человек-машина, является весьма актуальной. Кроме того, важно уметь оценивать влияние внешних воздействий на эффективность работы человека-оператора, таких как вибрация. Важное значение имеет также разработка и создание инструментальных средств и программного обеспечения, позволяющих реализовать указанные методы.

Именно рассмотрению указанных задач посвящена данная диссертация. Интерес к исследованию динамических характеристик человека-оператора существует с давних пор:

В отечественной практике определенные результаты получены в работах Л.Н. Преснухина по описанию операторской деятельности при управлении артиллерийским зенитным огнем, С.М. Фёдорова по автоматизированному управлению самолетами и вертолетами, Г.Г. Берегового, А.И. Яковлева, В.М. Васильца, А.В. Туманова, Э.Д. Суханова, посвященных моделированию систем полуавтоматического управления космических кораблей и других авторов.

К результатам, полученным зарубежными авторами, следует отнести работы П.Т. Мак-Руэра, Е.С. Крендела, Т.Б. Шеридана, В.Р. Феррела и других авторов. Следует заметить, что во всех этих исследованиях человек-оператор рассматривался как линейное динамическое звено системы «человек-машина», параметры которого определялись экспериментально на отдельных конкретных

системах. Лишь передаточная функция с переменными параметрами человека-оператора была получена Т.Б. Шериданом на специальном стенде.

Тем не менее, результаты исследований динамических свойств человека-оператора показывают, что при больших уровнях возбуждения как по информационному каналу, так и по каналу восприятия вибрации проявляются его нелинейные свойства. Поэтому в данной работе рассмотрен другой подход к исследованию динамических свойств человека-оператора как нелинейного звена системы «человек-машина». Он основан на применении в качестве математической модели динамики человека-оператора ряда из ортогональных G-функционалов Винера. Этот подход предложен и разработан К.А. Пупковым. Именно на применении такого подхода развивалось исследование в данной работе.

К числу других работ, посвященных исследованию динамики человека-оператора и систем «человек-машина» следует отнести работы В.И. Капалина, С.Н. Музыкина, Г.Г. Себрякова, А.С. Ющенко, проблемам создания учебно-тренировочных комплексов и разработке методик обучения посвящены результаты А.В. Пономаренко, В.М. Васильца, В.В. Михайлова, А.И. Наумова, Ю.Г. Оболенского, О.А. Пащенко, В.М. Холтобина, дающие научно-методическое и инженерно-психологическое обоснование структуры и обучающих характеристик интеллектуального интерактивного учебно-тренировочного комплекса.

Целью работы является создание теоретических основ динамической идентификации характеристик человека-оператора и методов, позволяющих определить предельные значения параметров этих характеристик для обеспечения устойчивости и желаемого качества систем «человек-машина» при управлении объектами различного типа.

Задачами работы являются:

1. Анализ и обобщение методов идентификации линейных и нелинейных систем на основе функционального ряда Винера при статистических воздействиях.
2. Разработка регуляризованных алгоритмов определения ядер G-функционалов Винера.
3. Разработка методики определения ядер G-функционалов Винера человека-оператора по экспериментальным данным.
4. Исследование влияния параметров передаточной функции человека-оператора на устойчивость и качество работы системы «человек-машина» при управлении объектами различного типа.
5. Исследование влияния вибрации на динамические свойства и эффективность деятельности человека-оператора.
6. Оптимизация взаимодействия человека и техники в системах «человек-машина».

7. Разработка методики оценки степени обученности человека-оператора.
8. Создание макета стенда для динамической идентификации и оценки состояния человека-оператора.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Получены регуляризованные алгоритмы определения ядер G-функционалов Винера по экспериментальным данным.
2. Решена задача определения предельных значений параметров динамических характеристик человека-оператора, обеспечивающих устойчивость и желаемое качество при управлении объектами различного типа в системах «человек-машина».
3. Получена амплитудно-частотная характеристика человека-оператора по отношению к вибрации и, соответственно, передаточная функция.
4. Разработана методика оценки эффективности работы человека-оператора при одновременном получении сведений по информационному каналу и воздействию вибрации. Показано, что при одинаковых уровнях спектральной плотности воздействия по информационному каналу и по вибрации средний квадрат отклонения регулируемой величины по вибрации выше, чем средний квадрат ошибки слежения.
5. Разработана методика синтеза желаемой передаточной функции человека-оператора в системе человек-машина при заданном времени переходного процесса, коэффициентах ошибки воспроизведения регулярного сигнала и спектральных плотностей полезного сигнала и помех.
6. Разработана методика оценки степени обученности человека-оператора.

Практическая ценность работы.

Результаты работы позволяют:

- Осуществлять динамическую идентификацию и оценивание состояния человека-оператора в человеко-машинных системах;
- Судить о готовности работы человека-оператора для реализации управления тем или иным динамическим объектом;
- Синтезировать желаемые динамические характеристики человека-оператора при сложных воздействиях окружающей среды на систему «человек-машина»;
- Оценивать степень обученности человека-оператора;
- Разработать техническое задание на проектирование образца стенда динамической идентификации и моделирования систем «человек-машина».

Внедрение результатов.

Результаты работы использованы в курсе «Моделирование и испытание систем автоматического управления», будут использованы при проектировании систем управления летательных аппаратов МКБ им. А.И. Микояна, П.О. Сухого и другими организациями. А также при оценке степени обученности при подготовке летного состава на тренажерах.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод динамической идентификации и оценивания состояния человека-оператора в системах «человек-машина».
2. Решение задачи определения предельных значений динамических характеристик человека-оператора при управлении объектами различного типа.
3. Результаты исследования влияния вибрации и определение амплитудно-частотной характеристики и передаточной функции человека-оператора по отношению к вибрации.
4. Результаты исследования совместного воздействия на человека-оператора по информационному каналу и по вибрации на точность работы системы «человек-машина».
5. Метод оценки степени обученности человека-оператора по результатам испытаний.
6. Стенд для испытаний деятельности человека-оператора и математического моделирования систем «человек-машина».

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались:

1. V Международный симпозиум «Интеллектуальные системы», г. Калуга, 2002г.
2. VI Международный симпозиум «Интеллектуальные системы», г. Саратов, 2004г.
3. European Conference for Aerospace Sciences, г.Москва, 2005г.
4. VII Международный симпозиум «Интеллектуальные системы», г. Краснодар, 2006г.
5. VIII Международный симпозиум «Интеллектуальные системы», г. Нижний Новгород, 2008г.
6. XXVIII-XXXIV Академические чтения по космонавтике «Актуальные проблемы российской космонавтики», г. Москва, 2004-2010гг.
7. VI Международная конференция «Кибернетика и высокие технологии XXI век», г. Воронеж, 2005г.
8. VII Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2008», г. Москва, 2008г.
9. «Инженерные системы - 2010», г. Москва, 2010г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 работ, среди них 6 научных статей в изданиях, включенных в список ВАК и 13 публикаций в научных трудах и материалах международных и всероссийских конференции, симпозиумов и чтений; научно-исследовательские отчеты:

- По проекту «Комплексирование робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления в интеллектуальных системах высокой точности и надежности» по аналитической ведомственной целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы (2006-2008 годы)», Гос. Рег. темы №01200611718, отчет №02200606722 и др.
- По проекту «Динамическая идентификация и оценивание состояния человека-оператора в человеко-машинных системах» Российского Фонда Фундаментальных Исследований № 07-08-00262, 2008г., Гос. Регистрация темы № 01200802509, отчет №02200801715.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Работа состоит из введения, пяти глав, выводов, заключения и приложения.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, рассмотрена концептуальная схема системы «человек-машина». В данной работе ставится задача более полного описания динамических свойств человека-оператора как нелинейного звена системы. Кроме того, во введении сформулированы цели и задачи работы, связанные с исследованием устойчивости и качества систем «человек-машина» в зависимости от параметров динамических характеристик человека-оператора для различных типов объектов управления, влиянием вибрации на точность управления, решением задачи синтеза желаемых динамических характеристик человека-оператора.

Первая глава диссертации посвящена обсуждению проблемы динамической идентификации нелинейных систем методом Винера.

В работе в связи с этим рассматривается наиболее общий метод непараметрической нелинейной идентификации, к которому относится метод Винера. Он заключается в аппроксимации точной модели объекта $y = F(x)$ (1) с помощью отрезка ряда, составленного из ортогональных функциональных полиномов, называемых полиномами Винера, или G-функционалами Винера. В (1) F - некоторый оператор точной модели «черного ящика», а x и y - входной и выходной сигналы соответственно. Здесь осуществлен вывод уравнения для полиномов Винера в предположении, что $x(t)$ – стационарный гауссов процесс с нулевым математическим ожиданием и корреляционной функцией $R_x(\tau)$. Полученные ортогональные полиномы $G_i[k_i, x]$ были впервые построены для процесса Броуновского движения Н.Винером, а ряд

$$\hat{y} = \sum_{i=0}^{\infty} G_i[k_i, x], \quad (2)$$

составленный из них, будем называть рядом Винера, где

k_i - ядра G-функционалов Винера,

$x(t)$ - белый Гауссов процесс с интенсивностью c^2 ,

$\hat{y}(t)$ - оценка реакции реальной нелинейной динамической системы на входной сигнал.

Полученная форма для G-функционалов принимают вид

$$\begin{aligned} G_0[k_0, x] &= k_0, \\ G_1[k_1, x] &= \int_{-\infty}^{\infty} k_1(\tau) x(t - \tau) d\tau, \\ G_2[k_2, x] &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} k_2(\tau_1, \tau_2) \prod_{r=1}^2 x(t - \tau_r) d\tau_1 d\tau_2 - c^2 \int_{-\infty}^{\infty} k_2(\tau_2) d\tau_2. \end{aligned} \quad (3)$$

и т. д.

Задача идентификации методом Винера состоит в определении ядер функционалов модели (2) по измерениям реализаций входного и выходного сигналов системы (1).

Ю.В. Ли и М. Шетцен показали, что для определения ядер по измеренным реализациям можно использовать формулу:

$$k_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) = \frac{1}{c^{2n} n!} \overline{\left\{ y(t) - \sum_{m=0}^{n-1} G_m[k_m, x(t)] \right\} x(t - \tau_1) x(t - \tau_2) \dots x(t - \tau_n)}, \quad (4)$$

где черта означает среднее по времени.

Эта формула используется в дальнейшем при построении методики определения ядер k_n .

В данной главе рассмотрены также проблемы сходимости ряда Винера и оценка точности аппроксимации. Выяснено, будут ли малым погрешностям в определении ядер соответствовать малые отклонения приближенного решения $\hat{y}$ от точного $y = F(x)$, то есть рассмотрена проблема устойчивости суммирования ряда.

Показано, что точность аппроксимации Δ^2 при ограниченном числе первых членов разложения будет иметь вид (5), где D_y и $D_{\hat{y}}$ - дисперсии реального выхода и оценки соответственно.

$$\Delta_N^2 = \left\| F[x] - \sum_{i=0}^N G_i[k_i, x] \right\|^2 = D_y - D_{\hat{y}} \quad (5)$$

Если набор ядер Винера $\{k_i(\tau_1, \dots, \tau_i)\}$ – точные ядра модели, и $\{\tilde{k}_i(\tau_1, \dots, \tau_i)\}$ – ядра модели, измеренные приближенно по экспериментальным данным, мало отличаются друг от друга, т.е., если $\exists \varepsilon > 0$ такое, что

$$\sum_{i=0}^{\infty} \|k_i(\tau_1, \dots, \tau_i) - \tilde{k}_i(\tau_1, \dots, \tau_i)\|^2 \leq \varepsilon, \quad (6)$$

то вследствие изометрии будут мало отличаться соответствующие суммы рядов Винера

$$\Delta^2 = M\{(\hat{y} - \tilde{y})^2\} \leq \varepsilon. \quad (7)$$

здесь $\tilde{y} = \sum_{i=0}^{\infty} G_i[\tilde{k}_i, x]$ – выходной сигнал модели с приближенно определенными ядрами $\{\tilde{k}_i(\tau_1, \dots, \tau_i)\}$. Это показывает, что процедура суммирования ряда Винера в среднем квадратичном устойчива к малым погрешностям в задании ядер.

В данной главе рассмотрены также регуляризованные алгоритмы определения ядер Винера по экспериментальным данным. Регуляризованные алгоритмы определения ядер Винера рассмотрены в частотной области. Спектр помех ε_n при измерении обычно значительно шире, чем спектр полезного сигнала S_x . Поэтому применение формулы

$$K_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n) = \frac{S_{yH}(j\omega_1, \dots, j\omega_n)}{n! \prod_{r=1}^n S_x(\omega_r)}, \quad n=1, 2, \dots \quad (8)$$

для нахождения ядер Винера в частотной области может привести к операции деления на нуль или на близкое к нулю значение на тех частотах, на которых $S_x(\omega)$ близка к нулю, а ε_n отличается от нуля. В результате отклонения приближенного ядра Винера от точного может быть сколь угодно велико, то есть задача определения ядер Винера по экспериментальным данным относится к числу некорректных.

Регуляризованные семейства приближенных решений находятся по формулам

$$K_n^{\alpha}(j\omega_1, \dots, j\omega_n) = \frac{S_{yH}(j\omega_1, \dots, j\omega_n)}{n! \left[\prod_{r=1}^n S_x(\omega_r) + \alpha_n \sum_{r=1}^n \omega_r^{2p} \right]}, \quad n=1, 2, \dots \quad (9)$$

Здесь α_n – параметр регуляризации, а число $p = 0, 1, 2, \dots$ определяет порядок регуляризации.

Во **второй главе** диссертации рассмотрены проблемы моделирования и идентификации человека-оператора в системах «человек-машина». Здесь дана постановка задачи слежения и определены типы дисплеев, на которых отображается информация и виды органов управления. Определены и сформулированы общие принципы изучения таких систем. Далее в этой главе рассматривается метод описания динамических свойств человека-оператора как нелинейного «звена», который был предложен и разработан К.А. Пупковым. Метод основан на использовании экспериментальных данных. Человек-оператор рассматривается как «черный ящик», на вход которого подается случайный процесс со спектральной плотностью $S_{x_1}(\omega) = c^2/2\pi$ и корреляционной функцией $R_{x_1}(\tau) = c^2\delta(\tau)$, то есть человек-оператор воспринимает тестовый сигнал в виде реализации «белого» гауссова процесса, в отличие от суммы гармоник, а выходом $y(t)$ будет реакция человека-оператора также в виде реализации случайного процесса. Тест типа «белого» гауссова процесса обладает полнотой по определению.

На основе теоретических результатов, приведенных в главе 1 диссертации, математическую модель человека-оператора можно представить формулой (2), в которую входят ортогональные G-функционалы Винера (3). Проблема построения оценки $\hat{y}(t)$ реакции человека-оператора состоит в необходимости определения ядер G-функционалов Винера.

Если известны ядра k_i , оценку реакции человека-оператора можно получить в виде:

$$\begin{aligned} \hat{y}(t) = & k_0 + \int_{-\infty}^{\infty} k_1(\tau)x(t-\tau)d\tau + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} k_2(\tau_1, \tau_2)x(t-\tau_1) \times \\ & \times x(t-\tau_2)d\tau_1d\tau_2 - c^2 \int_{-\infty}^{\infty} k_2(\tau_2, \tau_2)d\tau_2 + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \end{aligned} \quad (10)$$

Приближение оценки (10) к истинной реакции $y(t)$ дает возможность судить, какое число ядер k_i надо определить, чтобы адекватно определить динамические свойства человека-оператора, естественно, в смысле минимума какого-либо критерия, например, минимума среднего квадрата разности (5).

Заметим, что G-функционалы есть не что иное, как интегралы свертки, а k_1 описывает линейные динамические свойства человека-оператора, ядра более высокого порядка – нелинейные.

Соответственно, можно считать, что преобразование Фурье от $k_1(\tau)$ – передаточная функция человека-оператора:

$$W(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} k_1(\tau)e^{-j\omega\tau}d\tau \quad (11)$$

Далее в этой главе дан вывод формул для определения ядер G-функционалов Винера по экспериментальным данным (4).

По эти формулам были в результате эксперимента определены ядра функционалов первого порядка для двух операторов и, соответственно, получены передаточные функции вида:

$$W_1'(s) = K_{II}' e^{-\tau_n' s} \frac{\tau_1' s + 1}{T_1'^2 s^2 + 2\xi_1' T_1' s + 1}, \quad (12)$$

где $K_{II}' = 0,33$; $\tau_n' = 0,16$; $\tau_1' = 0,36$; $T_1' = 0,4$ и $\xi_1' = 0,6$

$$\text{и} \quad W_1''(s) = K_{II}'' e^{-\tau_n'' s} \frac{\tau_1'' s + 1}{T_1''^2 s^2 + 2\xi_1'' T_1'' s + 1}, \quad (13)$$

где $K_{II}'' = 0,25$, $\tau_n'' = 0,22$, $\tau_1'' = 0,2$, $T_1'' = 0,27$; $\xi_1'' = 0,6$.

Далее в главе приведены результаты исследования влияния параметров передаточной функции человека-оператора на устойчивость и качество системы «человек-машина». Для различных типов объектов, передаточные функции которых приведены в таблице 1 диссертации, построены области устойчивости и определено допустимое чистое запаздывание в зависимости от добротности контура управления и величины постоянной времени дифференцирующего звена, при котором обеспечивается запас устойчивости по фазе не менее 30% и желаемое качество переходного процесса.

В качестве примера для объекта с передаточной функцией

$$W_{об}(s) = \frac{1}{s - 1/T_{ЛА}} = \frac{r(s)}{u(s)} \quad T_{ЛА} = 1 \quad (14)$$

- управление углом атаки статически неустойчивого самолета с помощью руля высоты - приведены область устойчивости (рис. 1) и значения чистого запаздывания $\tau_{\max}^{оп}$ (таблица 5 диссертации).

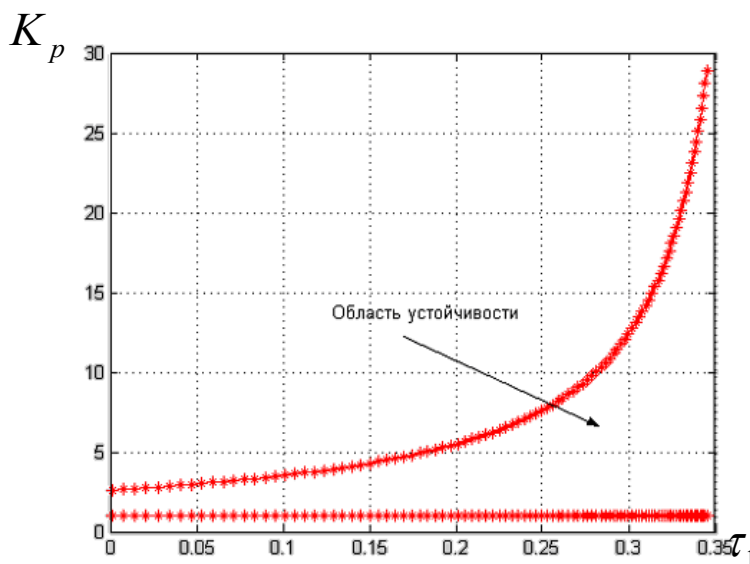


Рис. 1.
Область устойчивости

Третья глава посвящена исследованию воздействия вибрации на человека-оператора. В диссертации рассмотрено, каким образом можно оценить воздействие вибрации на динамические свойства человека-оператора и на эффективность его деятельности при получении сведений по информационным каналам при управлении тем или иным объектом или процессом. Здесь же разработана и показана структурная схема установки для измерения ядер функционалов Винера как при воздействиях по информационному каналу, по вибрации и при совместном восприятии информации и вибрационных воздействий.

На основании экспериментальных данных впервые удалось получить передаточную функцию человека-оператора по вибрации. Используются данные спектральной плотности виброускорения на рабочем месте летчика и измерения уровня виброускорения на его голове в вертикальном направлении.

Эта передаточная функция имеет следующий вид:

$$W'_{ч.о.}(s) = \frac{K_4 K_5 K_6}{(T_4^2 s^2 + 2\xi_4 T_4 s + 1)(T_5^2 s^2 + 2\xi_5 T_5 s + 1)(T_6^2 s^2 + 2\xi_6 T_6 s + 1)}, \quad (15)$$

где $T_4 = \frac{1}{8\pi} c$; $T_5 = \frac{1}{32\pi} c$; $T_6 = \frac{1}{64\pi} c$; $\xi_4 = 0,385$; $\xi_5 = 0,021$; $\xi_6 = 0,005$; $K_4 K_5 K_6 = 1,33$.

Амплитудная частотная характеристика человека-оператора по отношению к вибрации имеет вид, показанный на рис. 3.10 диссертации.

Далее в этой главе произведена оценка влияния воздействия вибрации на точность работы системы «человек-машина». Рассматривалась система, структурная схема которой приведена на рис. 2.

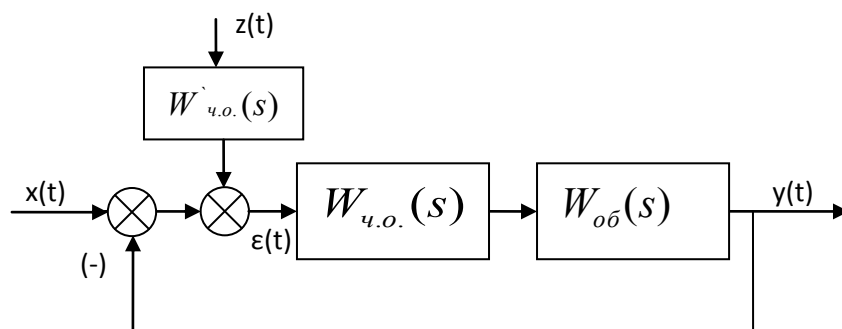


Рис. 2

Структурная схема системы «человек-машина» с учетом вибрации

На этом рисунке: $x(t)$ – входной сигнал по информационному каналу; $z(t)$ – вибрация на рабочем месте оператора; $\varepsilon(t)$ – ошибка системы; $y(t)$ – выходной сигнал; $W_{ч.о.}(s)$ – передаточная функция человека-оператора; $W'_{ч.о.}(s)$ –

передаточная функция по вибрации; $W_{o\delta}(s) = \frac{K_{ЛА}}{s}$ - передаточная функция объекта управления.

Оценивалась дисперсия ошибки $\varepsilon(t) - \sigma_\varepsilon^2$ и дисперсия выходного сигнала $y(t) - \sigma_y^2$, обусловленная воздействием вибрации, то есть:

$$\sigma_\varepsilon^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |\Phi_\varepsilon(j\omega)|^2 S_x(\omega) d\omega$$

и

$$\sigma_y^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |\Phi_y(j\omega)|^2 S_z(\omega) d\omega, \quad (16)$$

где $\Phi_\varepsilon(j\omega)$ и $\Phi_y(j\omega)$ – передаточные функции замкнутой в системы

Показано, что вес ошибки при воздействии вибрации при одинаковом уровне спектральных плоскостей c_x^2 и c_z^2 выше, чем вес ошибки при получении сведений по информационному каналу, то есть

$$\sigma_\varepsilon^2 = 0,35c_x^2$$

$$\sigma_y^2 = 0,5c_z^2.$$

Четвертая глава посвящена проблемам оптимизации взаимосвязи человека и техники в системах «человек-машина». Здесь изначально поставлена задача синтеза системы «человек-машина» при условии обеспечения тех или иных критериев эффективности достижения цели. Из полученного решения выделяется та часть динамики, которая должна обеспечиваться действиями человека-оператора. Структура задачи приведена на рисунке 3.

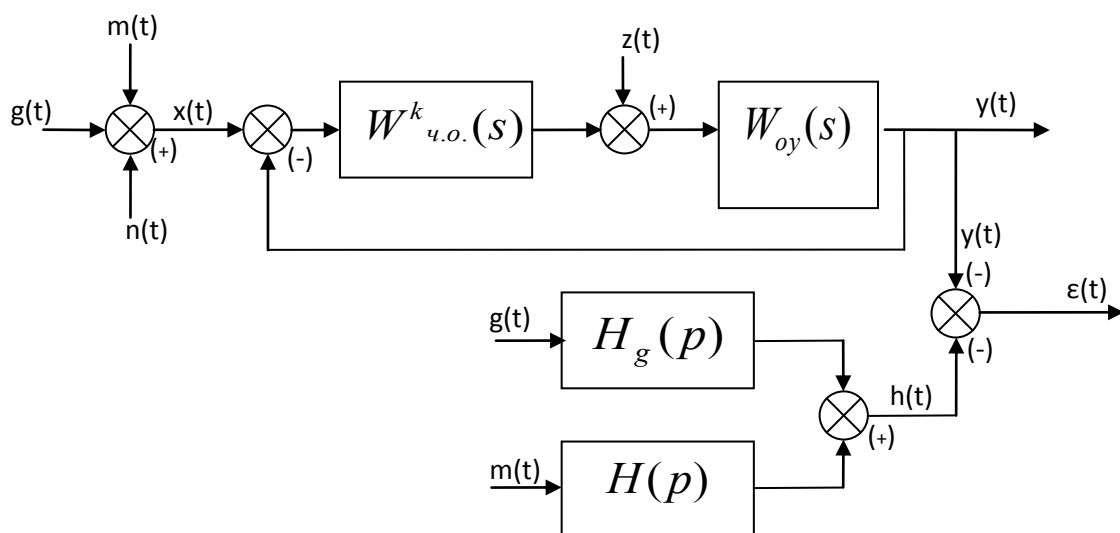


Рис. 3.

Схема получения ошибки воспроизведения

Задача ставится следующим образом: при известной динамике объекта управления $W_{o\delta}(s)$, заданных характеристиках воздействия на систему:

полезного регулярного сигнала $g(t)$, полезного случайного сигнала $m(t)$, случайной помехи $n(t)$ и случайной вибрации $z(t)$, заданных также желаемых операторах преобразования полезного сигнала $H_g(p)$ и $H(p)$, при заданных коэффициентах ошибки воспроизведения сигнала $g(t)$ и времени переходного процесса T синтезировать желаемую передаточную функцию человека-оператора $W_{ч.о.}^K(s)$.

Цель задачи состоит в отыскании такой импульсной переходной функции замкнутой системы «человек-машина», при которой обеспечивается минимум среднего квадрата разности $\bar{\varepsilon}^2(t)$ между выходом реальной системы $y(t)$ и желаемым сигналом $h(t)$ при соблюдении ограничивающих условий.

Задача решается на условный минимум. Согласно известному правилу необходимо найти минимум функционала (4.14 в диссертации), а решение интегрального уравнения (4.16 в диссертации) дает возможность получить искомую ИПФ $K(\tau)$, при которой обеспечиваются необходимые и достаточные условия минимума $\bar{\varepsilon}^2(t)$.

В данной главе приведено практическое решение задачи для объекта управления 2 в таблице 1 диссертации. Полученная желаемая передаточная функция человека-оператора

$$W_{ч.о.}^K(s) = \frac{1}{K_{ла}} \frac{\left(\frac{T^2}{10} - \frac{1}{2}C_2\right)s^2 + \frac{1}{2}Ts + 1}{\frac{T^3s}{120} + \frac{1}{2}C_2} \quad (17)$$

свидетельствует о высоких требованиях по динамике, предъявляемых к человеку-оператору при управлении объектом данного типа.

В **пятой главе** рассматривается задача создания стенда для динамической идентификации и оценки состояния человека-оператора. Разработана структура стенда и определен его состав и программное обеспечение. Принципиальная схема стенда приведена на рис. 4, а общий вид стенда показан на рис. 5. Существенным является то, что с помощью стенда можно не только оценивать динамические свойства отдельно взятого человека-оператора, но и проводить математическое моделирование системы управления динамическими объектами различного типа с целью оценки устойчивости и качества решения задач управления. Реализации тестового сигнала и сигнала реакции человека-оператора, а также ядро первого порядка, рассчитанные по результатам эксперимента приведены на рис. 6.

В заключение в этой главе показаны проблемы обучения и оценки обученности человека-оператора, которые имеют двоякое проявление: с одной стороны необходимо обучать и тренировать человека с целью достижения им требуемых динамических характеристик, а с другой – для эффективного выполнения заданий, поставленных перед системой «человек-машина». В работе дана методика оценки обученности и построения плана

успешных и неуспешных результатов испытания. Аппроксимирующая функция результатов испытания обучающего будет иметь вид:

$$K_i^* = b \cdot i - c \left(1 - e^{-i/a}\right), \quad (18)$$

где i – номер испытаний $i=1,2,3,\dots,N$, параметры a , b и c определяются благодаря минимизации функционала (5.18 в диссертации), а оценка степени обученности человека-оператора определяется как вероятность успешной работы к i -ому испытанию

$$P_i^*(E_1) = \frac{\partial K_i^*}{\partial i}. \quad (19)$$

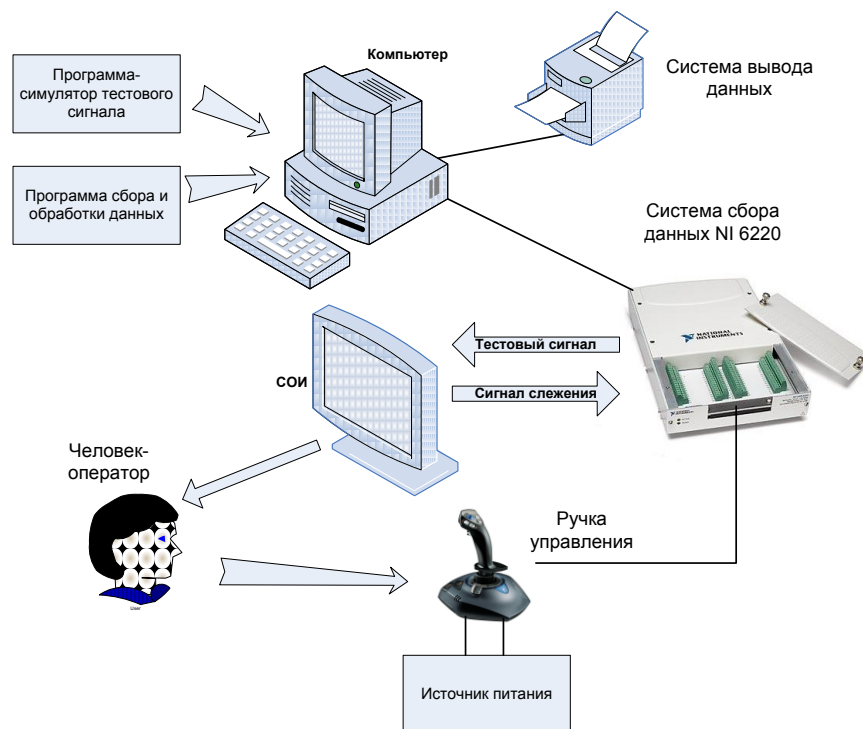


Рис. 4.
Принципиальная схема стенда

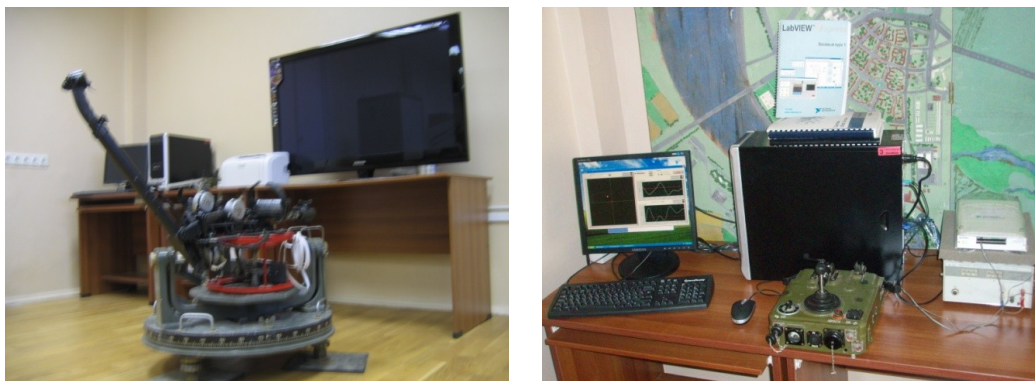


Рис. 5.
Общий вид исследовательского стенда

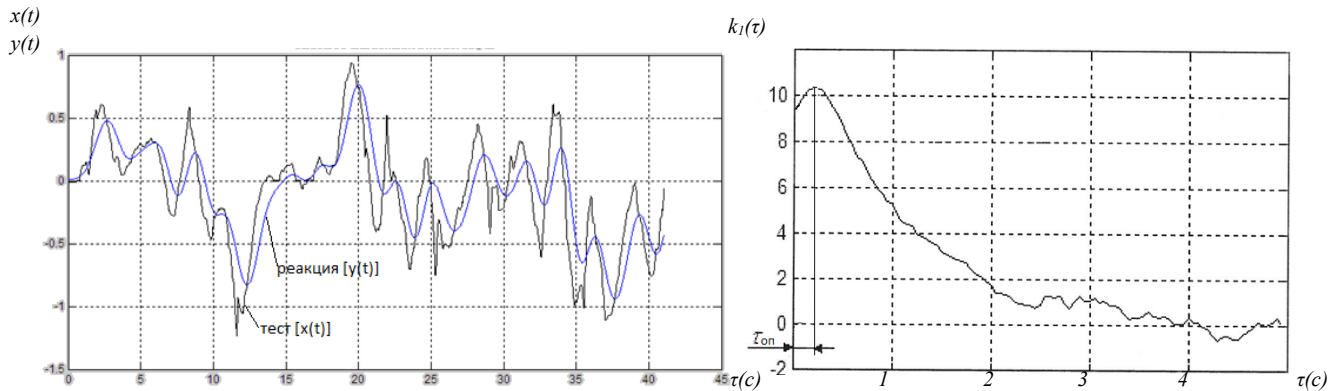


Рис. 6.

Реализация тестового сигнала $x(t)$, реализация сигнала реакции оператора $y(t)$, вычисленное ядро первого порядка

Выводы

1. Разработана концептуальная модель системы «человек-машина», описывающая восприятие человеком-оператором сведений по информационному каналу и учитывающую воздействие на него вибрации, что соответствует реальным условиям его работы.
2. Рассмотрен и исследован метод Винера непараметрической идентификации нелинейных динамических систем. Дана обобщенная теория построения ортогональных функционалов ряда Винера, исследована сходимость ряда, дана оценка точности. Получены регуляризованные алгоритмы определения ядер Винера.
3. Разработана методика определения ядер Винера для человека-оператора по экспериментальным данным. Показано, что ядра первого порядка определяют линейные динамические свойства человека-оператора.
4. Для класса объектов управления определены требования к параметрам передаточной функции человека-оператора, при которых обеспечивается устойчивость системы «человек-машина» и желаемое качество системы.
5. Впервые получена передаточная функция человека-оператора по вибрации, причем резонансный пик на частоте 4Гц характеризует динамику тела человека, как вязкоупругой механической системы, а на частоте 16Гц – резонансные свойства его позвоночника.
6. Разработана схема стенда для исследования динамических свойств человека-оператора при воздействии вибрации, включая имитатор сигнала по информационному каналу и имитатор воздействия вибровозбудителя.
7. Получены соотношения, позволяющие оценить погрешность работы оператора по информационному каналу и оценить также влияние вибрации на эффективность его работы. Показано, что вес ошибки системы при одинаковом уровне спектральной плотности воздействий по вибрации и по информационному каналу восприятия сведений выше из-за воздействия вибрации.
8. Исследована проблема оптимизации взаимосвязи человека и техники в человеко-машинных системах. На основе теории оптимальной

фильтрации решена задача определения желаемых динамических характеристик человека-оператора при управлении объектами различного типа.

9. Разработана методика, позволяющая оценивать степень обученности человека-оператора по вероятности успешной работы при выполнении заданий на тренажерах.

10. Создан исследовательский стенд, позволяющий осуществлять динамическую идентификацию и оценку характеристик человека-оператора по экспериментальным данным.

Список публикаций по теме диссертации

1. Пупков К.А., Устюжанин А.Д. Идентификация и оценка обученности в динамических человеко-машинных системах // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Приборостроение.- 2003.- №4.- С.95-103.
2. Устюжанин А.Д. Предельные значения динамических характеристик человека-оператора при управлении объектами различного типа // Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана. Приборостроение.- 2006.- №1.- С. 117-124.
3. Пупков К.А., Устюжанин А.Д., Шашурин В.Д. Оценка влияния вибрации на эффективность работы человека-оператора в человеко-машинных системах // Вестник МГТУ имени Н.Э.Баумана. Приборостроение.- 2006.- №2.- С. 30-36.
4. Устюжанин А.Д. Коррекция частотных характеристик датчиков виброускорений // Автоматизация и современные технологии.- 2007.- №8.- С. 6-10.
5. Пупков К.А., Устюжанин А.Д. Предельные значения динамических характеристик человека-оператора при управлении объектами различного типа // Вестник РУДН. Инженерные исследования.- 2007.- №4.- С. 96-106.
6. Пупков К.А., Устюжанин А.Д. Оценка эффективности работы человека-оператора в человеко-машинных системах под воздействием вибрации // Вестник РУДН. Инженерные исследования.- 2009.- №4.- С. 23-28.
7. Pupkov K.A., Ustyuzhanin A.D. Learning and Adaptation in Man-Machine systems. Intelligent systems // Proceedings of the Fifth International Symposium.- М., 2002.- P.106-111.
8. Устюжанин А.Д. Исследование динамики систем «человек-машина» при воздействии вибрации // Интеллектуальные системы: Труды 6 международного симпозиума.- М., 2004.- С.125-127.
9. Пупков К.А., Устюжанин А.Д. Идентификация и оценка степени обученности в системах «человек-машина» // Актуальные проблемы развития отечественной космонавтики: Труды 28 Академических чтений по космонавтике.- М., 2004.- С. 380-381.
10. Limited parameters of dynamic characteristics of a human-operator when operating objects of different types [электронный ресурс] / A.D. Ustyuzhanin [и др.] // European Conference for Aerospace Sciences.- 2005.- EUCASS URL:

<http://www.onera.fr/eucass/2005/flight-dynamics-GNC.html> (дата обращения: 03.03.2010).

11. Устюжанин, А.Д. Предельные параметры динамических характеристик человека-оператора при управлении объектами различного типа // Материалы 29 академических чтений по космонавтике.- М., 2005.- С. 398-399.
12. Устюжанин, А.Д. Оценка влияния вибрации на динамические свойства человека-оператора и эффективность его деятельности в человеко-машинных системах // Материалы 30 академических чтений по космонавтике.- М., 2006.- С. 373-374.
13. Пупков К.А., Устюжанин А.Д. Динамическая идентификация и оценивания состояния человека-оператора в системах управления космическими аппаратами // Материалы 32 академических чтений по космонавтике.- М., 2008.- С. 431.
14. Устюжанин, А.Д. Оценка влияния вибрации на и эффективность работы человека-оператора в человеко-машинных системах // Материалы 33 академических чтений по космонавтике.- М., 2009.- С. 468.
15. Пупков К.А., Устюжанин А.Д. Оптимизация взаимосвязи человека и техники при управлении космическими объектами // Материалы 34 академических чтений по космонавтике.- М., 2010.- С. 488-489.
16. Pupkov K.A., Ustyuzhanin A.D. Intelligent Systems // Proceedings of the International Scientific Conferences Intelligent Systems and Intelligent CAD's.- 2005.- vol.3.- P. 90-95.
17. Пупков К.А., Устюжанин А.Д. О предельных значениях динамических характеристик человека-оператора при управлении объектами различного типа // Седьмая международная конференция «Авиация и Космонавтика-2008».- М., 2008.- С. 127-128.
18. Пупков К.А., Устюжанин А.Д. Оптимизация взаимосвязи человека и техники при управлении космическими объектами // Материалы 17 Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.- СПб., 2010.- С. 238-240.