

УДК 531.36

Тестирование качества визуальной стабилизации космических объектов на динамическом стенде с трехуровневой системой управления¹

В.А.Садовничий, В.В.Александров, Л.И.Воронин,
С.С.Лемак

1. Описание глагодвигательных нарушений на орбите. Результаты многолетних исследований, проведенных в Институте медико-биологических проблем группой сотрудников под руководством А.И. Григорьева, как в натурных условиях космических полетов так и модельных экспериментах показали, что невесомость существенно изменяет активность гравитационно зависимых систем и нарушает их привычное, эволюционно обусловленное взаимодействие. Адаптация к условиям невесомости, как правило, сопровождается сенсорными расстройствами, проявлениями которых являются возникновение пространственных иллюзий, затруднения фиксации и прослеживания зрительных объектов, нейрогуморальными нарушениями и вегетативной симптоматикой.

В связи со всем вышесказанным, была осуществлена Программа систематических и последовательных исследований особенностей функционирования систем межсенсорных взаимодействий, управления движениями и, в частности, движениями глаз, в условиях микрогравитации (эксперименты «Оптокинез», «Окулоstim», «Лабиринт», «Оптоверт», «ВОГ», «Анкета», «Монимир», «Статокинетика», «Взор» и др.).

При этом, впервые было показано [2], что пребывание в условиях микрогравитации сопровождается нарушением всех форм зрительного слежения. Даже при неподвижной голове были выявлены [2]:

¹Напечатано в сборнике «Математические вопросы кибернетики», вып. 10, М.: Физматлит, 2001, с. 35–44

— нарушения фиксации взора — дестабилизация глаз, связанная с увеличением медленного дрейфа, появлением большого числа саккадических (скачкообразных) движений, а также возникновением спонтанного нистагма;

— нарушения точности саккадического слежения (особенно в вертикальной плоскости) и развитие новой стратегии саккадического слежения с уменьшением амплитуды первого основного скачка и дополнительными саккадами, постоянно приближающими взор к цели. Результатом этого является увеличение времени решения задачи слежения и, соответственно, снижение частоты стимулов, которые система способна отслеживать (коэффициент эффективности слежения по вертикали уменьшался с 1 до 0,4);

— глубокие нарушения реакций медленного слежения вплоть до полного их разрушения (особенно при вертикальных движениях стимулов) и переходом систем плавного зрительного слежения на стратегию саккадического аппроксимирования, при которой взор приближается к мишени, используя набор малых саккадических движений.

Во всех вышеперечисленных случаях, точность системы зрительного слежения резко снижалась и, соответственно, существенно возрастало время (в 3 и более раз), необходимое для рассматривания и распознавания цели и установки взора на мишенях.

Наиболее выраженные нарушения функции зрительного слежения в условиях микрогравитации отмечались при координации движений глаз и головы. При этом, координация движений глаз и головы, обеспечивающая в норме быстроту и точность этой важнейшей реакции программного слежения за быстро перемещающимися мишенями, полностью разрушается. Реакция установки взора становится гиперметричной, установка взора на мишени достигается серией последовательных саккад. При этом время реакции возрастает в 2–3 и более раз.

Все указанные события развиваются немедленно при переходе к микрогравитации и выражены особенно резко в первый начальный период адаптации к новой гравитационной среде, длительность которого у разных индивидуумов составляет от 5 до 14 и более дней. Процессы адаптации к условиям микрогравитации в системах управления движением глаз обеспечиваются за счет резкого снижения скоростей движений головы при слежении за перемещающимися объектами, реорганизации сенсорного обеспечения глазодвигательных реакций, изменения стратегии слежения и торможения вестибулярных ответов, доминирующих в естественных условиях.

Первая компонента адаптации — произвольная, поведенческая,

проявляется мгновенно. Вторая — центральная, развивается постепенно по механизму мозжечкового торможения активности нейронов вестибулярных ядер (рис 1).

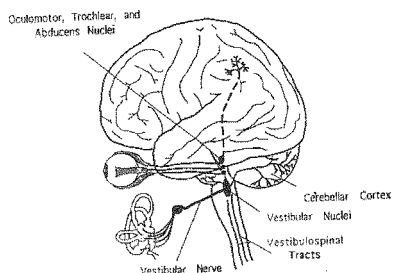


Рис. 1

2. Описание вестибуло-сенсорного конфликта невесомости. Рассмотрим функциональную схему реакции вестибулярной системы на механический стимул. Ограничимся частным случаем — поворот (φ) вокруг боковой оси корпуса испытуемого.

При этом роль механического стимула играют: для отолитового органа — массовые силы $m(\vec{w} - \vec{g})$, где \vec{w} — абсолютное ускорение расчетной точки утрикулуса (или саккулуса), \vec{g} — ускорение свободного падения, действующие на отолитову мембрану; для полукружного канала — давление эндолимфы на купулу (рис. 2). При этом x — линейное отклонение отолитовой мембраны вдоль оси чувствительности, а ξ — линейное отклонение купулы полукружного канала.

В обоих случаях — и при смещении отолитовой мембраны и при деформации купулы — происходит деформация чувствительных волос-

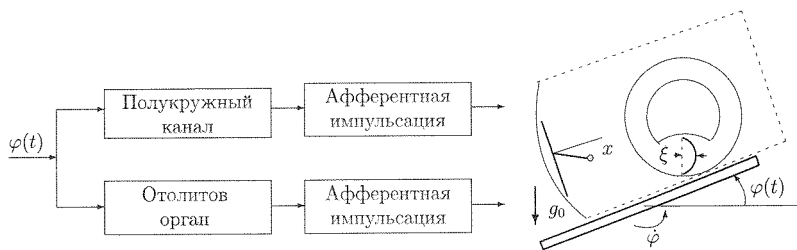


Рис. 2

ков — стереоцилий, являющихся частью рецепторных клеток (рис. 3).

При этом в каналах стереоцилий происходит изменение потока ионов, поступающих из эндолимфы внутрь волосковой клетки (рис. 3). Это приводит к изменению проводимости мембраны клетки и как следствие — к переходным процессам выходящих и входящих токов клетки.

В результате происходит изменение мембранного потенциала и концентрации ионов кальция и соответственно выделение нейромедиатора в синаптическую щель (рис. 3). Изменение потока нейромедиатора приводит к изменению генераторного потенциала аксона афферентной нервной клетки, что в свою очередь приводит к изменению частоты автоколебаний (импульсов) на границе немиелинизированной и миелинизированной частей аксона.

Заканчивается этот процесс распространением афферентной импульсации по первому волокну к ганглиям нервных клеток вестибулярного ядра (рис. 1, рис. 4).

В условиях невесомости на орбите резко изменяется характер поступающей в в вестибулярные ядра первичной информации, что и приводит к вестибуло-сенсорному конфликту.

3. Моделирование сенсорного конфликта невесомости. Для моделирования внутрилабиринтного и межканализаторного конфликта (рассогласования) при движениях в невесомости нами разработан способ имитации условий космического полета и алгоритм его воспроизведения на стенде-тренажере ЦФ-18.

Стенд ЦФ-18 представляет собой центрифугу с кабиной в кардановом подвесе (рис. 5.). Консоль центрифуги может вращаться вокруг вертикальной оси, проходящей через один конец консоли. На другом конце консоли находится карданов подвес. Внешнее полукольцо («вилка») карданова подвеса может поворачиваться вокруг продольной оси консоли, но в данном случае оно закреплено. Во внешнем полукольце перпендикулярно его оси вращения расположена горизонтально (в исходном положении) ось поворота внутреннего кольца. Во внутреннем кольце перпендикулярно его оси поворота находится ось поворота кабины. Начальное положение частей карданова подве-

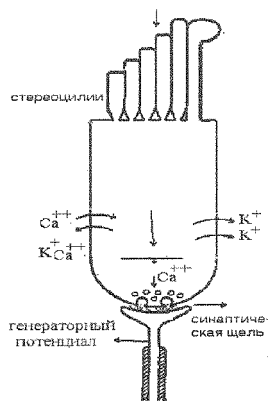


Рис. 3

са изображено на рис. 5.

Пусть ψ, γ — углы поворота внутреннего кольца и кабины соответственно от начального положения первого этапа и ω — угловая скорость вращения консоли.

Переход от одной системы координат к другой осуществляется с помощью поворотов, представленных на рис. 5, где показан пресчет компонент вектора перегрузки (g_c — вектор ускорения свободного падения на поверхности Земли, l — длина консоли).

Один из возможных алгоритмов имитации заключается в переводе полукольца (вилки) карданова подвеса из горизонтального положения при имитации стартовых перегрузок в исходное вертикальное положение. Ось внутреннего кольца в исходном положении вертикальна, и кольцо закреплено в течение всего этапа имитации орбитального полета. Ось поворота кабины в исходном положении горизонтальна и все три оси составляют ортогональный трехгранник. В течение всего этапа имитации орбитального полета консоль центрифуги вращается с угловой скоростью $\omega = \omega_0 + \omega_1 \sin(2\pi\nu t)$, где $\max(\frac{1}{g}\omega^2 l) = 0,1 \div 0,4$, $\nu = 0,1 \div 0,3$ Гц, а внешнее полукольцо и кабина поворачиваются по закону

$$\psi = \arctg \frac{\omega^2 l}{|g_c|},$$

$$\gamma = -\arctg \frac{\omega^2 l}{\sqrt{g_c^2 + \dot{\omega} l^2}},$$

Благодаря этому алгоритму в заданном диапазоне частот изменение результирующего вектора перегрузки происходит при сохранении его направления ортогонально фронтальной плоскости испытуемого. Таким образом, в данной ситуации практически отсутствует инфор-

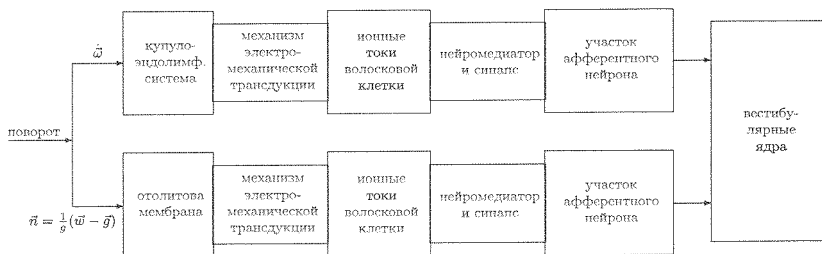


Рис. 4

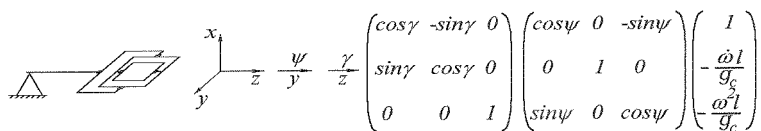


Рис. 5.

мация с отолитового аппарата и других анализаторов пространства об изменении положения на фоне раздражения полукружных каналов вестибулярной системы. При отклонениях центробежного вектора от гравитационного в диапазоне, например, 0 - 20 градусов его величина изменяется в пределах 6 % от исходного (т.е. колеблется в диапазоне 1,0 : 1,06G). Учитывая, что человек в этих условиях находится в кабине центрифуги в положении "лежа" и 6-процентное изменение веса распределяется на относительно большую площадь опоры профилированного ложементов для головы, туловища, рук и ног, он не ощущает изменений ни величины ни направления гравитоинерционного вектора. И это доказано экспериментально. В физиологическом аспекте в рассмотренных условиях моделирования раздражаются рецепторы полукружных каналов, что имеет место в условиях невесомости, но практически исключается информация с отолитов и других анализаторов пространственного положения об изменении направления гравитоинерционной «вертикали», что тоже имеет место в условиях невесомости, но до сих пор не моделировалось ни на одном из наземных стендов. Человек в рассмотренных условиях моделирования синхронно совершает маятникообразные колебания в 3-х взаимноперпендикулярных плоскостях и при этом на фоне раздражения рецепторов полукружных каналов не ощущает другими сенсорными системами перемещений в пространстве.

Рассмотрим обоснование алгоритма моделирования вестибуло-сенсорного конфликта в частном случае механического стимула в виде угловых колебаний в сагитальной плоскости на угол $\varphi(t)$ (рис. 2). Выпишем уравнения функционирования саккулюса

$$\ddot{x} + \frac{\nu}{m} \dot{x} + \frac{\gamma + \dot{\varphi}^2(t)}{m} x(w - g)_{\perp} \cos \varphi(t),$$

$$\ddot{\xi} + \frac{8\nu}{a_1^2} \dot{\xi} + \frac{\gamma}{m_1 k^4} \xi = -\frac{1}{k^2} \left(1 + \frac{l}{L}\right) R \ddot{\varphi}.$$

Здесь x — линейное отклонение отолитовой мембраны вдоль оси чувствительности; ν — кинематическая вязкость эндолимфы; w — аб-

солютное ускорение расчетной точки; g — ускорение свободного падения; $(w - g)_\perp$ — проекция кажущегося ускорения на ось чувствительности саккулюса; γ — коэффициент, описывающий жесткость стереоцилий и киноцилий волосковых клеток; ξ — линейное отклонение купулы полукружного канала; a_1 — внутренний радиус канала; $k = \frac{a_0}{a_1}$, где a_0 — радиус ампулы канала ($k > 1$); $\mathcal{L} = 2\pi R$; l — длина полукружного канала; m_1 — приведенная масса эндолимфы в канале.

Из сравнения входных воздействий на Земле, орбите и центрифуге с управляемым кардановым подвесом видно (рис. 2), что механический стимул на орбите и на центрифуге при выбранном алгоритме имитации имеет один и тот же вид. Этот факт позволяет утверждать о принципиальной возможности моделирования вестибуло-сенсорного конфликта в земных условиях на динамических стендах типа центрифуги с управляемым кардановым подвесом.

Для моделирования перераспределения жидких сред в направлении к голове создается избыточное давление на нижнюю половину тела испытуемого. Для этого используется полускафандр, сохраняющий внешнее давление воздуха в нем постоянным. Что касается верхней части тела испытуемого, то внешнее давление изменяется благодаря системе регулирования давления воздуха в кабине. Для нахождения наиболее рационального закона изменения давления в кабине была использована математическая модель перераспределения циркулирующей крови [1]. Путем математического моделирования при параметрах, приведенных в [3] и экспериментальной проверки был выбран закон изменения давления воздуха в кабине, приведенный на рис. 6.

Таким образом, динамическая имитация орбитального полета заключается в имитации вестибуло-сенсорного конфликта невесомости и перераспределения циркулирующей крови.

Рассмотренная динамическая имитация условий орбитального полета была апробирована с участием 11 космонавтов. При этом в течение 1 часа гемодинамические эффекты невесомости создавались полускафандром величиной 40 мм рт.ст., а при моделировании внутрилабиринтного и межканализаторного сенсорного конфликта радиальный вектор колебался в диапазоне 0,05-0,6G с частотой 0,12 герц (диапазон колебаний тангенциального и суммарного вектора - производные от частоты и диапазона

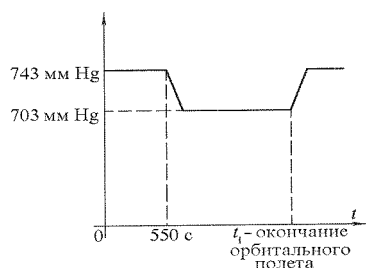


Рис. 6.

колебаний радиального вектора). Перед моделированием орбитального полета создавалась перегрузка по штатному графику выведения космического корабля "Союз-ТМ". Способ показал близость индивидуальных субъективных и объективных реакций на реальные и моделированные условия космического полета, т.е. у 5 космонавтов отчетливые симптомы болезни движения (БД) были и в моделированных и в реальных условиях космического полета. У 5 космонавтов никаких признаков БД не было ни в космосе ни в условиях данной модели и у одного космонавта тоже не было БД ни в реальных ни в моделированных условиях, однако при сравнении в реальных условиях он чувствовал себя более комфортно, чем в моделированных. При этом переход от воздействия перегрузки к моделируемым условиям орбитального полета сопровождался иллюзией перевернутого вниз и назад (антиортостатического) положения, которая сохранялась у всех космонавтов в течение всего времени моделирования орбитального полета.

На основе изложенного выше тренажер для приобретения навыков по визуальному управлению космическими объектами должен состоять из:

- центрифуги с кабиной в управляемом кардановом подвесе;
- полускафандра;
- динамического кресла с подвижной спинкой и подвижным сиденьем или установленным на подвижной по местной вертикали платформе;
- монитора или специальных очков для визуальной имитации;
- пульта управления космическим модулем.

Базовое алгоритмическое обеспечение второго уровня управления движением такого тренажера состоит из следующих алгоритмов:

- а) алгоритм имитации сенсорных нарушений в условиях микрогравитации;
- б) алгоритм имитации линейных ускорений (с помощью подвижных кресла и платформы в кабине центрифуги);
- в) алгоритм имитации перегрузок управляемого спуска с орбиты.

При этом предполагается, что первый уровень управления осуществляет стабилизацию или отслеживание имитирующих движений, построенных на втором уровне. В программное обеспечение системы управления тренажером должен входить пакет программ по трехмерной анимации управляемого объекта. Заметим, что использование только системы визуальной имитации космического полета не приводит к тем вестибуло-сенсорным нарушениям, которые имеют место на орбите. Это связано с тем, что механорецепторы организма оператора, находящегося на неподвижном тренажере, не испытывают механиче-

ского стимула и поэтому отсутствуют и вестибуло-глазодвигательные нарушения.

Таким образом, предлагается формировать тренажеры по визуальному управлению космическими объектами на базе центрифуги с управляемым кардановым подвесом. Система визуальной имитации при этом входит во второй уровень управления наряду с программным обеспечением, реализующим алгоритмы акселерационной имитации. Это программное обеспечение является по сути дела управляющей программой, формирующей выходную информацию об имитирующих движениях для соответствующих исполнительных органов динамического тренажера. На рис. 7 показана схема такой программы, разработанной в МГУ.

4. Постановка задачи контроля качества и описание функциональной схемы тестирующего динамического тренажера

Пусть математическая модель возмущаемой динамики управле-



Рис. 7

мого объекта имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{y} = f(y, u, v, t) & y(t_0) \in Y \\ u(\cdot) \in \mathcal{U} \\ v(\cdot) \in V \end{cases} \quad (1)$$

Включения $y(t_0) \in Y$, $v \in V$, $u \in \mathcal{U}$, описывают ресурсы возмущений (начальных и постоянно действующих) и управлений. Предположим, что качество управления описывается функционалом $J(u(\cdot), v(\cdot), y(t_0))$. Требуется оценить в смысле функционала J качество управления. При этом считается, что алгоритм управления не известен. Имеется лишь возможность знать выходной сигнал системы управления, то есть система управления является «черным ящиком». Кроме того естественно предположить, что часть сенсоров системы управления, поставляющих информацию о движении объекта, расположена внутри черного ящика. Это предположение приводит к необходимости создания условий для функционирования сенсоров, аналогичных условиям реального движения. Обычно это осуществляется с помощью имитационного динамического стенда(ИДС).

Будем рассматривать визуальное управление движением космических объектов, когда космонавт выполняет функции пилота или оператора. В случае операторного управления имеется ввиду ситуация, когда космонавт находится на орбитальной станции и осуществляет визуальное управление космическим манипулятором, перемещающимся космическим модулем или их комбинацией. В случае пилотного управления имеется ввиду визуальное управление движением космического объекта, на котором находится космонавт. Например, это ручное управление спуском с орбиты, управление устройством для спасения космонавта.

Имитацию движения управляемого космического объекта естественно разделить на акселерационную и визуальную. Визуальная имитация движения управляемого объекта заключается в анимации соответствующей графики на мониторе или специальных очках. Акселерационная имитация движения объекта, на котором находится космонавт, осуществляется на ИДС, имеющем соответствующую кинематическую схему. Для имитации управляемого движения в космосе наиболее подходящим является ИДС типа центрифуги с кабиной в управляемом кардановом подвесе. В состав ИДС входят: центрифуга с кабиной в управляемом кардановом подвесе; полускафандр; динамическое кресло, имеющее подвижную спинку и подвижное сиденье, или установленное на подвижной платформе; монитор или специаль-

ные очки для визуальной имитации; пульт управления космическим объектом (рис. 8).

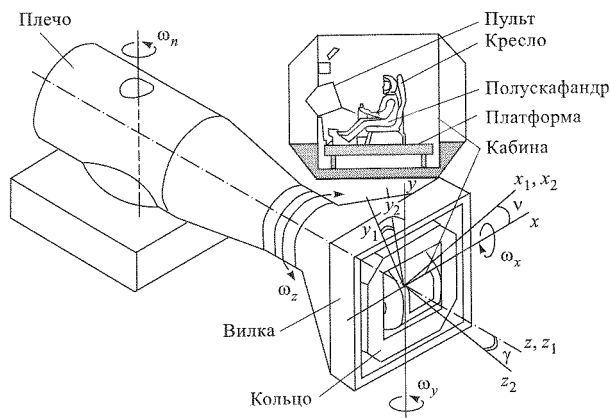


Рис. 8

Если космонавт является только оператором, то осуществляется акселерационная имитация движения того объекта, на котором он находится (например, орбитальная станция). Визуальная имитация при этом соответствует управляемому им объекту (например, дистанционное управление космическим модулем).

Включения $y(t_0) \in Y$, $v \in V$ находятся в распоряжении тестирующей системы (или инструктора). Таким образом, можно говорить о тестирующей системе как о третьем уровне управления движением ИДС. Причем третий уровень имеет возможность влиять на второй уровень управления ИДС в том смысле, что формирует информацию о начальных и постоянно-действующих возмущениях, что приводит к изменению в динамике имитируемого объекта. Кроме того, система тестирования, являющаяся третьим уровнем управления ИДС, осуществляет соответствующую коррекцию и системы визуальной имитации. Если космонавт является оператором, то в распоряжении системы тестирования остается система визуальной имитации для корректировки движения управляемого объекта и система акселерационной имитации (ИДС) для корректировки движения объекта, на котором находится оператор (например, орбитальной станции).

Приведенные рассуждения можно представить в виде (рис. 9) функциональной схемы тестирующего динамического тренажера (ТДТ), имеющего трехуровневую систему управления. (Первый уро-

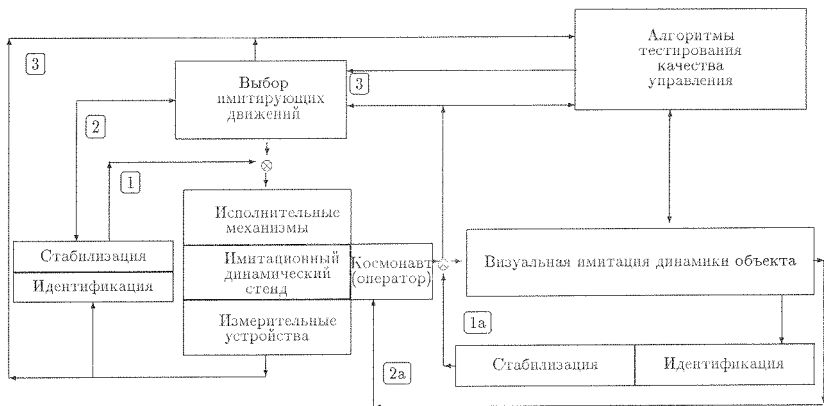


Рис. 9

вень, осуществляющий стабилизацию или отслеживание имитирующего движения здесь не рассматривается). При этом сам ТДТ можно рассматривать как биомехатронную систему, состоящую из:

- ИДС с 3-х уровневой системой управления движением;
- космонавта в полускафандре;
- динамического кресла (возможно с подвижной платформой);
- системы визуальной имитации.

В случае контроля качества визуального управления, осуществляемого космонавтом-оператором, кроме математической модели (1) необходимо также математическое описание динамики космического объекта, на котором находится космонавт-оператор.

Дадим теперь постановку задачи максиминного контроля качества визуального управления движением. Под задачей максиминного контроля будем понимать задачу, состоящую из трех подзадач или этапов.

Этап 1. Нахождение нижней (наилучшей) оценки качества управления и оптимальной контрстратегии поведения внешних возмущений $y(t_0) \in Y$ и $v(\cdot) \in V$ с помощью компьютерного решения максиминной задачи

$$\inf_{u(\cdot) \in U} J(w, u) \rightarrow \sup_{w(\cdot) \in W}$$

где $w = (v(\cdot), y(t_0))$, $W = V \times Y$.

Этап 2 — тренировки космонавта на ТДТ при реализации стратегии тестирования, использующей найденную на первом этапе оптимальную контрстратегию возмущений и определение реальной оценки качества управления.

Этап 3 — сравнение наилучшей и реальных оценок и выработка рекомендаций с использованием нейрофизиологических тестов по дальнейшим тренировкам.

Рассмотрим более детально характеристики 1-го, 2-го и 3-го этапов.

1-й этап. Определим множества U_0, W_0 таким образом, что множество $U \subset U_0$ а $W_0 \subset W$ и существуют седловая точка и цена (например, в силу теоремы Н.Н. Красовского) следующей динамической игры

$$\begin{aligned} \max_{w(\cdot) \in W_0} \min_{u(\cdot) \in U_0} J(u(\cdot), w(\cdot)) &= \min_{u(\cdot) \in U_0} \max_{w(\cdot) \in W_0} J(u(\cdot), w(\cdot)) = \\ &= J(u^0(y, t), w^0(u, y, t)) = J_0 \end{aligned} \quad (2)$$

Цена игры (2) J_0 является нижней оценкой качества управления \tilde{u} так как

$$J_0 \min_{u(\cdot) \in U} J(u, w^0) = J(\tilde{u}, w^0) = \tilde{J}, \quad (3)$$

где \tilde{u} — реальное управление. Будем считать, что J_0 — нижняя оценка — является наилучшей оценкой, позволяющей осуществить сравнение с результатом \tilde{J} реального управления. Таким образом, на первом этапе получаем наилучшую оценку (цену игры J_0) и оптимальную контрстратегию $w^0(u, y, t)$ поведения возмущений. Если $U = U_0$ и $W = W_0$, то найденную контрстратегию можно применить на втором этапе в силу (3), при этом наличие возможной дискриминации, заключающейся в использовании тестирующей системой информации об управлении u и координатах y является естественным фактом для задач гарантированного контроля с помощью ТДТ.

Если же мы не имеем совпадения множеств $U = U_0$ и $W = W_0$ или (и) отсутствует седловая точка, то найденное значение J_0 по прежнему можно использовать как наилучшую оценку. Для нахождения стратегии тестирования необходимо в этом случае решать задачу экстремального синтеза:

$$J(u, w) \rightarrow \max_{w(\cdot) \in W}$$

при известном законе управления u .

Второй этап — этап тестирования — осуществляется непосредственно на ТДТ (рис. 9) в соответствии со схемой (рис. 10).



Рис. 10

Алгоритм тестирования при наличии седловой точки заключается в реализации оптимальной контрстратегии поведения возмущений, действующих на управляемый объект.

Назовем их внешними возмущениями. Под внутренними возмущениями будем понимать погрешности сенсоров системы управления объектом. Внутренние возмущения, присущие сенсорам, находящимся в «черном ящике» (например, механорецепторы космонавта) реализуются благодаря имитирующим движениям ТДТ, так как критерием формирования этих движений в реальном времени является минимизация рассогласования реакции сенсоров на стенде и в реальном движении. При наличии сенсоров, находящихся вне «черного ящика», т.е. имеющих известные математические модели функционирования может быть поставлена и решена задача о нахождении наихудших инструментальных погрешностей этих сенсоров. На втором этапе одновременно с тестированием происходят тренировки космонавтов. Их повторения позволяют собрать статистику для вероятностной оценки качества управления как точечной, так и интервальной.

Третий этап (заключительный) — это этап сравнения результатов, полученных на первых двух этапах по десятибальной или столбальной шкале:

$$\varkappa = \frac{J_0}{\tilde{J}} \cdot 10 \quad (\varkappa = \frac{J_0}{\tilde{J}} \cdot 100),$$

ж — точечная оценка качества управления. При наличии стохастических возмущений дополнительно осуществляется сравнение с интервальной оценкой. При необходимости для улучшения интервальной оценки осуществляются повторные тренировки и проводится нейрофизиологическое тестирование. Таким образом, решение задачи максиминного контроля качества заключается в реализации трех этапов:

а) получение нижней (наилучшей) оценки и оптимальной контрстратегии поведения возмущений; б) тренировки и тестирование на ТДТ; в) сравнение наилучшей оценки с точечной и интервальными оценками, полученными на втором этапе, и выработка рекомендаций.

Авторы выражают благодарность РФФИ (грант 01-01-00415) за частичную финансовую поддержку работы.

Литература

1. Александров В. В., Воронин Л. И., Глазков Ю. Н., Ишлинский А. Ю., Садовничий В. А. Математические задачи динамической имитации аэрокосмических полетов. Изд. Моск. ун-та 1995, 158 стр.
2. Корнилова Л. Н. Вестибулярная функция и межсенсорное взаимодействие в условиях измененной гравитации. Дисс. на соискание ученой степени доктора медицинских наук, Москва 1998 г.
3. Садовничий В. А., Александров В. В., Александрова Т. Б., Астахова Т. Г., Мамасуева Ю. О., Воронин Л. Н., Мамасуев А. Н. Математическое моделирование физиологических систем и динамическая имитация сенсорного конфликта невесомости // *Фундаментальная и прикладная математика*, М.: 1997 г., Т. 3, вып. 1, с. 129–149.