

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
ПРИДНЕПРОВСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ
СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ**

На правах рукописи



ГУЛЕВЕЦ Вадим Дмитриевич

**СИСТЕМА ЗАЩИТЫ ОПЕРАТОРОВ ОТ ПАДЕНИЙ НА
ПРИМЕРЕ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

05.26.01 — охрана труда

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Днепропетровск 1996

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в Киевском международном университете гражданской авиации.

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор,
Буриченко Лев Андреевич.

Официальные оппоненты:

— Академик Академии нетрадиционных технологий, доктор геолого — минералогических наук, профессор

Крикунов Геннадий Николаевич;

— кандидат технических наук, доцент

Вильсон Александр Георгиевич.

Ведущая организация — **Государственный международный аэропорт "Борисполь".**

Защита диссертации состоится "**26**" июня 1996 г. в 13.00 часов на заседании специализированного ученого совета к.03.07.02 в Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры по адресу:

320600 г. Днепропетровск, ул. Чернышевского, 24-а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке академии. Автореферат разослан "**24**" мая 1996 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
кандидат технических наук, доцент

 **Шаленный В.Т.**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Анализ актов расследования несчастных случаев (НС) по форме Н-1, составленных по конкретным производственным травмам, имевшим место на предприятиях Аэрофлота (1980–1991 г.г.) в процессе технического обслуживания авиационной техники (ТО АТ) показал, что около 40% НС произошли в результате падения работающих. При этом потеря устойчивости отмечалась как в процессе перемещения, стояния операторов на земле, так и на рабочих площадках, расположенных на различных высотах относительно ее. Детальный анализ производственного травматизма, проведенный в эксплуатационных подразделениях авиапредприятий Украины за период с 1991 г. по 1995 г. также подтверждает этот факт, что свидетельствует о наметившемся постоянстве производственных причин, приводящих к НС рассматриваемой категории. Этими причинами, в соответствии с содержанием актов формы Н-1, являются: психофизиологические – 52% (от общего количества НС), организационные – 30% и технические – 18%.

С развитием научно-технического прогресса среди практических задач охраны труда становятся все более важными исследования, направленные на разработку эффективных методов количественных оценок качества выполнения определенных двигательных задач, определение предельных возможностей человека в реализации подобного рода задач при различных динамических воздействиях (ДВ) (подвижность рабочей площадки для обслуживания основных элементов авиационной техники, ветровая нагрузка и т.п.) Особое место в задачах безопасности труда занимают исследования таких движений человека, за счет которых ему удается, стоя на двух

ногах , поддерживать равновесие тела на опорной поверхности в условиях ДВ. Исследование механизма поддержания равновесия тела оператора проводили В.С.Гурфинкель, В.М.Зациорский, Т.И.Штилькин, Г.С.Кан, Л.А.Макарова, А.А.Трояновский, Lonnie C. von Renner, Martin I.P. и др. Однако механика движений, направленных на поддержание равновесия тела оператора в положении "стоя" в работах указанных авторов не рассматривалась. Современные представления о механизмах поддержания равновесия и соответствующие классификации этих механизмов основаны, как правило, на данных физиологических исследований (Р.А.Гуревич, Е.Г.Котельников, С.В.Фомин, А.И.Литвинцев, Soates R.W., Atha I. и др.)^о без учета механики движений тела оператора, носят описательный характер и не подкреплены количественными оценками как в отношении условий эффективного функционирования указанных механизмов, так и их потенциальных возможностей в реализации рассматриваемой двигательной задачи. Проблемам биомеханики движений человека методами математического моделирования посвящены работы В.В.Белецкого, Н.А.Бернштейна, И.М.Гельфанда, Г.В.Коренева и др. Однако применение более сложных моделей для изучения процессов управления равновесием авторами не проводилось.

На современном этапе исследований недостаточно полно изученными являются динамические свойства тела человека и, соответственно, их роль в построении принципов управления движениями в связи с решением задачи устойчивости. Исследование процессов поддержания равновесия необходимо для выявления общих закономерностей построения движений человека и принципов управления ими, для решения практических вопросов операторской деятельности, протекающей в условиях ДВ, обусловленных

взаимодействием человека—оператора с внешними объектами с целью защиты операторов от падений, а также при разработке и создании для этой цели средств специального применения.

Цель работы заключается в разработке системы защиты операторов от падений на примере процесса ТО АТ с учетом результатов теоретических исследований динамики тела человека и полученных характеристик его статокINETической регуляции (СКР) на основе измерения опорных реакций.

Основные задачи исследований. Для достижения указанной цели возникла необходимость решить следующие задачи: исследовать процессы управления равновесием многозвенной динамической системы тела оператора применительно к задачам безопасности труда работающих при выполнении высотных работ; выявить и изучить различные с позиции механики способы управления движением общего центра масс тела (ОЦМТ) оператора, обеспечивающих поддержание равновесия в положении "стоя" при наличии внешних ДВ; разработать методы определения наиболее эффективных для поддержания равновесия тела оператора законов изменения суставных (межзвенных) углов и опорных реакций; усовершенствовать традиционные методы экспериментального изучения процессов управления движением ОЦМТ оператора; разработать методические рекомендации профессионального отбора операторов, работающих на высоте при ТО АТ.

Научная новизна работы. Впервые разработан и исследован способ поддержания равновесия тела оператора, основанный на управлении ОЦМТ за счет динамического взаимодействия между отдельными звеньями тела оператора; разработаны способы построения оптимальных алгоритмов управления движением ОЦМ многозвенных биомеханических систем применительно к задачам

профилактики падения работающих; разработан принципиально новый подход к применению традиционного стабелографического метода исследования системы СКР оператора на основе полученных аналитических соотношений, связывающих пространственные составляющие опорных реакций с параметрами движения тела оператора; сформулированы научные обоснованные требования к конструкциям специальных средств применения для работы операторов в условиях высоты.

На защиту выносятся: построение и анализ уравнений движения базисной модели оператора; решение задач управления движением ОЦМТ модели оператора; теоретически обоснованные методы исследования двигательной активности операторов в условиях ДВ; разработка системы защиты операторов от падений на примере процесса ТО АТ.

Практическая значимость работы. Решение системы уравнений биомеханики оператора, анализ результатов проведенных экспериментов по перемещению ОЦМТ оператора методом стабелографии положены в основу при разработках: "Рекомендации по снижению опасного фактора — падение рабочих и инженерно-технических работников при техническом обслуживании воздушных судов гражданской авиации", утвержденных 30.10.91 г. Министерством гражданской авиации СССР; "Технические условия. Стремянка. 24—9012—0 ТУ", утвержденных 27.08.92 г. Департаментом воздушного транспорта РСФСР и внедренных во всех эксплуатационных и ремонтных предприятиях гражданской авиации Украины и РСФСР, а также в Государственном отраслевом нормативном акте об охране труда Украины "Правила безопасности труда при техническом обслуживании и ремонте авиационной техники".

Среди наиболее важных направлений практического применения результатов работы следует отметить: разработку необходимых критериев для безопасного выполнения операторской работы, используемых при реконструкции и создании новых средств специального применения для работы на высоте в процессе ТО АТ; разработку методических рекомендаций по профессиональному отбору операторов, работающих на высоте в условиях процесса ТО АТ; разработку методического пособия для студентов – дипломников авиационных специальностей "Безопасность труда при работе на высоте в процессе технического обслуживания воздушных судов". Кроме того, результаты исследований настоящей работы представляют интерес для решения фундаментальных задач биомеханики, связанных с изучением системы координации движений оператора в процессе труда.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на Всесоюзной конференции "Проблемы проектирования, строительства, механизации и эксплуатации аэропортов" (Киев, 1985г.), V научной конференции "Проблемы охраны труда" (Рубежное, 1986 г.), Всесоюзном семинаре "Комплексная механизация и автоматизация производственных процессов в аэропортах" (Киев, 1986 г.), Всесоюзной конференции "Актуальные вопросы охраны труда и природопользования при авиатранспортных процессах" (Киев, 1987г.), Всесоюзном семинаре "Безопасность жизнедеятельности (охрана труда, здоровья, окружающей среды) в технологических процессах ГА" (Киев, 1990 г.), Отчетных научно-технических конференциях научных коллективов Киевского международного университета гражданской авиации за 1994–1995 г.г. (Киев, 1995 г. и 1996 г.).

Публикации по работе. Результаты диссертационных исследований опубликованы в 8 печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, основных результатов работы, списка литературы и приложения. Работа содержит 153 страниц машинописного текста, 57 страниц рисунков, 6 таблиц. Библиографический список включает 107 наименований литературных источников.

Вклад автора состоит: в построении уравнений движения базисной модели с учетом активных связей в шарнирах, упруго-вязких свойств одного из шарниров; в постановке задач оптимального управления ОЦМ модели; в нахождении оптимальных управлений и построении областей обратимости в задачах поддержания равновесия модели; в исследовании процесса управления равновесием оператора при импульсных ДВ; в разработке системы защиты операторов от падений на примере процесса ТО АТ; в обсуждении и публикации результатов теоретических и экспериментальных исследований по данной проблеме.

Объект исследования: транспортный процесс технического обслуживания авиационной техники.

Предмет исследования: процессы управления равновесием многозвенной динамической системы тела оператора при импульсных ДВ.

Методы исследования: поставленные задачи решались методами математического моделирования. Особое внимание было уделено представлению конечных результатов в аналитическом виде, наиболее удобном для практической реализации. Для отыскания оптимальных законов изменения суставных углов и опорных реакций в задачах управления движением ОЦМТ оператора был использован математический аппарат принципа максимума. Для измерения

перемещений ОЦМТ оператора при работе на высоте впервые применялся метод стабилографии.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы. Показана важность выполненных в работе исследований по проблеме защиты операторов от падений в условиях ТО АТ с учетом результатов теоретических исследований динамики тела оператора и полученных характеристик его системы СКР на основе измерения опорных реакций. Сформулирована цель проведенных исследований, их научная новизна и практическая ценность.

В первой главе проведен анализ производственного травматизма в процессе ТО АТ в период с 1980 г. по 1995 г. Исследовано влияние на уровень производственного травматизма различных показателей, характеризующих как самого пострадавшего, так и окружающую обстановку и условия, при которых произошел НС.

Основным травмирующим фактором из года в год продолжает оставаться фактор падения работающих. На его долю приходится 40% от общего числа пострадавших. Из них: падение с высотных рабочих мест составляет 30%; падение на поверхности земли – 10%. Как показал анализ производственного травматизма, главной причиной падения работающих является потеря устойчивости оператора при использовании средств специального применения, не соответствующих требованиям техники безопасности, а также

нарушения технологии в результате неправильных, ошибочных его действий.

Задача устойчивости равновесия в экстремальных условиях может быть решена на основе исследования динамики процессов управления равновесием тела оператора. С этой целью был проведен анализ современного состояния исследований биомеханики движений человека, рассмотрены действующие экспериментальные методики. На основании выполненного анализа выявлен ряд актуальных нерешенных вопросов биомеханики оператора, сформулированы задачи исследований и намечены пути их решения.

Глава 2 посвящена выбору основной (базисной) модели, ее обоснованию, построению на основе базисной совокупности упрощенных моделей, соответствующих наиболее частным типам движения тела оператора, а также выбору обобщенных координат, выводу уравнений движения моделей, их анализу и линеаризации.

В качестве базисной выбрана модель, звенья которой имитируют соответственно стопу, голень, бедро, туловище и руки оператора (рис.1). Ее структурные элементы с обозначениями параметров приведены на рис.2. Базисная модель плоская и предназначена в основном для изучения движений в сагиттальной плоскости. Она состоит из семи звеньев, что позволяет исследовать с ее помощью практически любые движения человека в сагиттальной плоскости при соответствующем выборе параметров звеньев и выполнении необходимых упрощений. Для описания модели введены следующие обозначения: M – общая масса модели; M_i – масса i -го звена; J_i – главный момент инерции i -го звена относительно оси, перпендикулярной плоскости движения; l_i – линейный размер i -го звена, определяемый как расстояние между осями прилегающих к нему шарниров; r_i – расстояние от оси шарнира с меньшим

индексом до ОЦМ i -го звена; g — ускорение свободного падения; $P(t)$ — внешняя сосредоточенная сила; $f(t)$ — сила перемещения опорной платформы; γ_i — угловые перемещения i -го звена. Линеиные $b, I_i, I_{i,p}, b_i$ и угловые $\gamma_{i,0}, \Delta p_i$ параметры опорного звена модели приведены на рис. 2. Для исследования конкретных типов движения тела человека построены соответствующие им упрощенные модели (рис. 3) на основании рассмотренной выше базисной.

В качестве исходного уравнения движения базисной модели (рис. 1) выбрано уравнение моментов относительно начала координат подвижной системы координат $\{X, Y, Z\}$. При рассмотрении в качестве обобщенных координат функций угловых перемещений: $\gamma_i = \gamma_i' - p_i$ ($i = 1, 2, 3, \dots, 7$), где параметры p_i соответствуют начальным значениям межзвенных углов, уравнение движения имеет следующий вид:

$$\sum_{j=1}^7 A_j(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_7) \ddot{\gamma}_j - \sum_{i,j=1}^7 B_{i,j}(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_7) \dot{\gamma}_i \cdot \dot{\gamma}_j - A(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_7) + \epsilon(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_7) \dot{f}(t) - h \cdot P(t) + b \cdot N_2 = 0 \quad (1)$$

Точками в уравнении (1) обозначены производные соответствующих функций во времени, а коэффициенты $A_j, B_{i,j}, A$ и ϵ уравнения являются нелинейными функциями обобщенных координат γ_i ($i = 1, 2, \dots, 7$).

При исследованиях движений ОЦМТ оператора представляется целесообразным ввести в структуру уравнения движения переменные, непосредственно характеризующие перемещение ОЦМТ. В данном случае такой переменной является обобщенная координата x . В силу того, что координата γ_i не связана непосредственно ни с одним шарниром модели, то наиболее приемлемой системой обобщенных координат для рассматриваемых

здесь задач является $\{x, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_7\}$. Необходимая замена переменных может быть сделана с помощью очевидного соотношения:

$$x = l_1 \sin \gamma'_1 + \sum_{i=2}^5 R_i \sin \left[\sum_{j=1}^i \gamma'_j \right] + \sum_{i=6}^7 R_i \sin \left[\sum_{j=1}^5 \gamma'_j + \sum_{j=6}^i \gamma'_j \right] \quad (2)$$

Из соображений удобства оперирования с полученным уравнением в работе применяется следующая более простая форма записи:

$$\ddot{x} - H_1 \dot{x}^2 + \dot{x} \sum_{i=k+1}^7 H_{1,i} \dot{\gamma}_i - \mu^2 x + \sum_{\substack{i,j=k+1 \\ i \neq j}}^7 W_{i,j} \dot{\gamma}_i \cdot \dot{\gamma}_j + \sum_{i=k+1}^7 Q_i \cdot \ddot{\gamma}_i + \varepsilon_0 \ddot{f}(t) - h_0 P(t) + Q_1 N_2 = 0 \quad (3)$$

Коэффициенты H_1 , $H_{1,i}$ ($i=k+1, \dots, 7$); $W_{i,j}$ ($i \leq j$; $i, j=k+1, \dots, 7$), Q_i ($i=k+1, \dots, 7$), ε_0 , h_0 и Q_1 в каждом конкретном случае могут быть найдены путем сопоставления соответствующих уравнений.

Некоторые результаты количественных оценок коэффициентов уравнения (3) для рассматриваемых в работе моделей (рис.3) представлены графически на рис. 6+10. Прежде всего, следует отметить относительно слабую зависимость коэффициента μ^2 от параметров состояния моделей, таких как межзвенные углы γ_i и координата x ОЦМТ (рис. 4 и 5). При изменениях указанных параметров состояния моделей в пределах, соответствующих реальным изменениям аналогичных параметров состояния тела оператора для рассматриваемых в работе двигательных задач, значение коэффициента μ^2 уравнения (3) лежат в диапазоне от 8 до 10 с^{-1} . Коэффициент Q_1 находится с коэффициентом μ^2 в соотношении:

$$Q_1 = b \cdot \mu^2 / (M \cdot g) \quad (4)$$

Поэтому сказанное выше относительно коэффициента μ^2 справедливо и для Q_1 . Значения коэффициентов H_1 и $H_{1,i}$

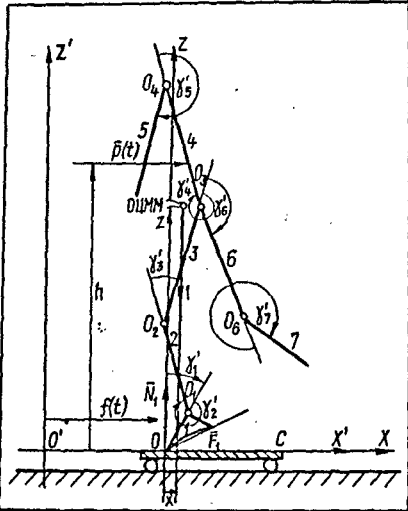


Рис. 1. Базисная модель тела человека

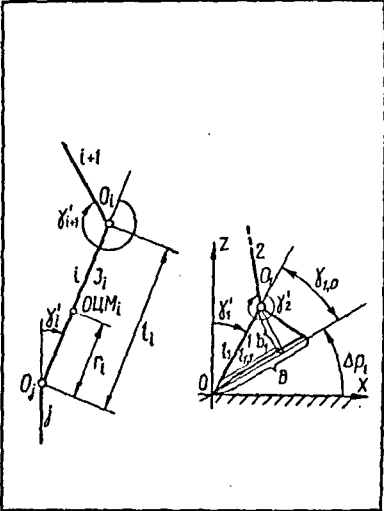


Рис. 2. Структурные элементы базисной модели

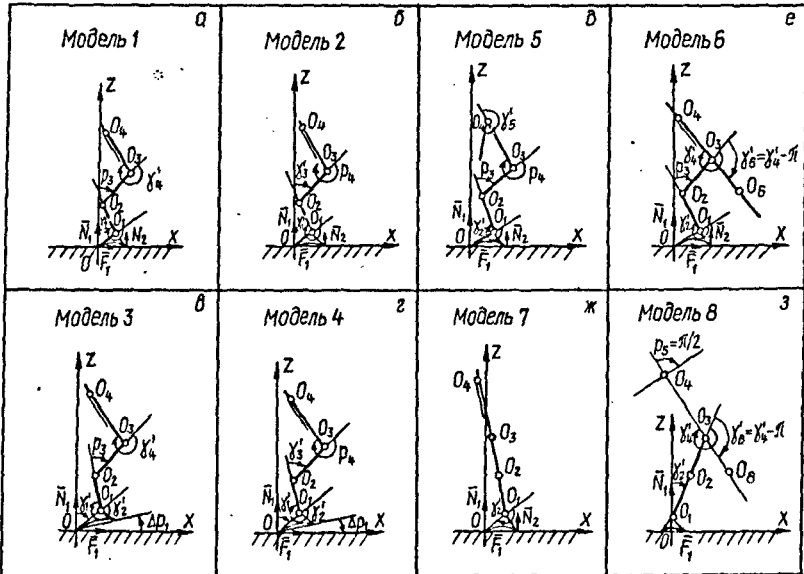


Рис. 3. Упрощенные модели для исследования некоторых частных видов движения тела человека (незатрированными оставлены шарниры, в которых сохранила подвижность)

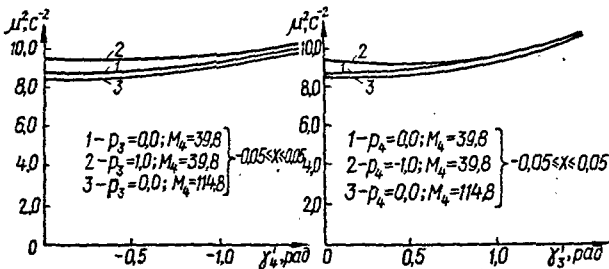


Рис. 4. Зависимость коэффициента μ^2 уравнения (3) от углового параметра γ_4 для модели 1 при различных значениях параметров ρ_3, M_4 .

Рис. 5. Зависимость коэффициента μ^2 уравнения (3) от углового параметра γ_3 для модели 1 при различных значениях параметров ρ_4 и M_4 .

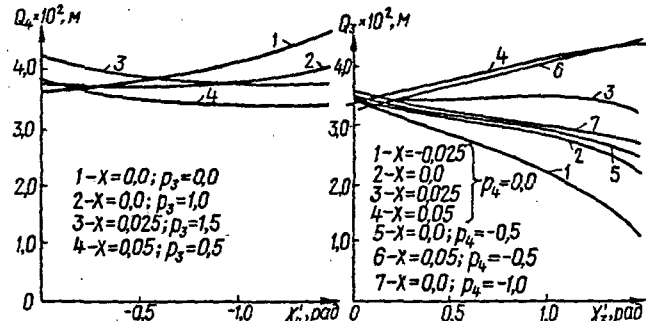


Рис. 6. Зависимость коэффициента Q_4 уравнения (3) от углового параметра γ_4 для модели 1 при различных значениях параметров ρ_3 и χ .

Рис. 7. Зависимость коэффициента Q_3 уравнения (3) от углового параметра γ_3 для модели 1 при различных значениях параметров ρ_4 и χ .

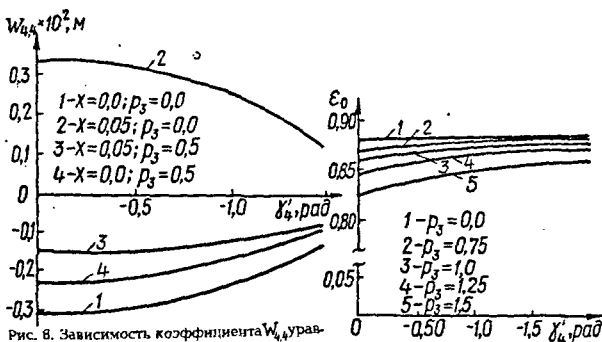


Рис. 8. Зависимость коэффициента W_4 уравнения (3) от углового параметра γ_4 для модели 1 при различных значениях параметров ρ_3 и χ .

Рис. 10. Зависимость коэффициента ϵ_0 уравнения (3) от углового параметра γ_4 для модели 1 при различных значениях параметра ρ_3 ($-0.05 \leq \rho_3 \leq 0.05$).

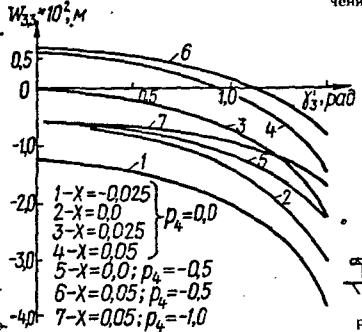


Рис. 9. Зависимость коэффициента W_3 уравнения (3) от углового параметра γ_3 для модели 2 при различных значениях параметров ρ_4 и χ .

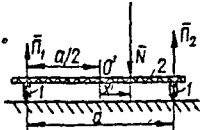


Рис. 11. Схема простейшего стабиллографа 1 - стойки с тензочувствительными элементами, 2 - опорная платформа

($i=k+1, \dots, 7$) уравнения (3), а также координаты x ОЦМТ и ее производной \dot{x} для рассматриваемых в работе задач изменяются в следующих пределах:

$$\begin{cases} |H_i| \leq 0,14 & [M^{-1}] \\ |H_{i,i}| \leq 2 \cdot 10^{-2} & [M^{-1}] \quad (i = k+1, \dots, 7) \\ |x| \leq 0,05 & [M] \\ |\dot{x}| \leq 0,2 & [M \cdot c^{-1}] \end{cases} \quad (5)$$

С учетом соотношений (5) для членов $H_i \cdot \dot{x}^2$ и $\dot{x} \cdot \sum_{i=k+1}^7 H_{i,i} \cdot \dot{\gamma}_i$

уравнения (3) получается следующая количественная оценка:

$$|H_i \cdot \dot{x}^2| < 6 \cdot 10^{-3} [M \cdot c^{-2}]; \quad |\dot{x} \cdot \sum_{i=k+1}^7 H_{i,i} \cdot \dot{\gamma}_i| < 4 \cdot 10^{-3} \cdot \sum_{i=k+1}^7 |\dot{\gamma}_i| [M \cdot c^{-2}].$$

Наибольшую величину имеет коэффициент Q_4 для моделей 6 и 8 (соответственно $7 \cdot 10^{-2} M + 8 \cdot 10^{-2} M$ и $8 \cdot 10^{-2} + 10 \cdot 10^{-2} M$). Для моделей 1 и 3 коэффициент Q_4 в среднем составляет $4 \cdot 10^{-2} M$. Несколько меньшее значение у коэффициента Q_3 для моделей 2 и 4. Значения коэффициента Q_2 для моделей 3 и 4, а также Q_5 для моделей 5 лежат в диапазоне от $1 \cdot 10^{-2} M$ до $2 \cdot 10^{-2} M$.

В результате проведенного анализа уравнения (3) была получена следующая линеаризованная его форма:

$$\ddot{x} - \mu^2 \cdot x = - \sum_{i=k+1}^7 Q_i \cdot \ddot{\gamma}_i - Q_1 \cdot N_2 - \varepsilon_0 \cdot \ddot{f}(t) + h_0 \cdot P(t) \quad (6)$$

где μ^2 , Q_i ($i=1; k+1; k+2; \dots, 7$) и ε_0 — постоянные коэффициенты, определяемые соотношениями:

$$\begin{aligned} \mu^2 &= Mg \cdot \frac{\partial x}{\partial \gamma_k} / A_k, & \gamma_j &= 0, \quad x=0, \\ Q_i &= [A_i \cdot \frac{\partial x}{\partial \gamma_k} / A_k - \frac{\partial x}{\partial \gamma_i}], & \gamma_j &= 0, \quad x=0, \quad (i=k+1, \dots, 7), \\ Q_1 &= b \cdot \frac{\partial x}{\partial \gamma_k} / A_k, & \gamma_j &= 0, \quad x=0, \\ \varepsilon_0 &= \varepsilon \cdot \frac{\partial x}{\partial \gamma_k} / A_k, & \gamma_j &= 0, \quad x=0, \end{aligned}$$

$$h_0 = h \frac{\partial x}{\partial t_k} A_k$$

$$\dot{\gamma} = 0, x = 0,$$

В главе 3 проведена формализация задач управления движением ОЦМ базисной модели, сформулированы критерии оптимальности управлений, осуществляемых посредством изменения межзвенных (суставных) углов и опорных реакций.

Оптимальная задача решалась с помощью систем неоднородных дифференциальных уравнений первого порядка с постоянными коэффициентами, эквивалентных линейаризованному уравнению (6) при $f(t) = 0$ и $P(t) = 0$:

$$\frac{\partial y_i}{\partial t} = f(y_i, u_j), \quad i=1, 2, \dots, n, \quad j=1, 2, \dots, q, \quad (7)$$

где y_i — фазовые координаты системы в n -мерном пространстве Y , u_j — управляющие параметры, определяемые на q -мерной замкнутой области U евклидова пространства. Двумерное пространство фазовых координат y_1 и y_2 обозначено как Y_2 .

Для движений базисной модели, описываемых уравнением (6) система (7) рассмотрена при управлении по двум параметрам u_α и u_β , т.е. $q = 2$ и $n = 6$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial y_1}{\partial t} = y_1; \\ \frac{\partial y_2}{\partial t} = \mu^2 y_1 - Q_1 u_1 - Q_\alpha u_\alpha - Q_\beta u_\beta; \\ \frac{\partial y_3}{\partial t} = y_4; \\ \frac{\partial y_4}{\partial t} = u_\alpha; \\ \frac{\partial y_5}{\partial t} = y_6; \\ \frac{\partial y_6}{\partial t} = u_\beta, \end{array} \right. \quad (8)$$

где $y_1 = x$, $y_2 = \dot{x}$; $y_3 = \gamma_\alpha$, $y_4 = \dot{\gamma}_\alpha$; $y_5 = \gamma_\beta$, $y_6 = \dot{\gamma}_\beta$; $u_1 = N_2$; $u_\alpha = \dot{\gamma}_\alpha$; $u_\beta = \dot{\gamma}_\beta$; $\{\alpha = k + 1, \dots, 7$;
 $\beta = k + 2, \dots, 7$; $\alpha < \beta$.

С помощью системы (8) в работе определены оптимальные функции изменений межзвенных углов для задач управления движением ОЦМ упрощенных моделей, представленных на рис.3, при наличии только активных связей в соответствующих подвижных шарнирах этих моделей.

Анализ систем уравнения (8) проводился в предположении, что на параметры управления наложены ограничения вида

$$-\tilde{\gamma}_{1,i} \leq \tilde{\gamma}_i(t) \leq \tilde{\gamma}_{2,i} \quad (9)$$

где $\tilde{\gamma}_{j,i}$ ($i=k+1, \dots, 7$; $j=1, 2$) — действительные неотрицательные числа:

$$-M_{1,i} \leq u_i \leq M_{2,i} \quad (i=k+1, \dots, 7); \quad (10)$$

$$0 \leq u_1 \leq M_1 \quad (11)$$

где $M_{j,i}$ ($j=1, 2$; $i=k+1, \dots, 7$) и M_1 — неотрицательные числа.

При отыскании оптимальных режимов движения исследуемых моделей в качестве допустимых управлений $u_j(t)$ рассмотрены кусочно-непрерывные функции с точками разрыва первого рода на отрезке $[0; T]$, который назван интервалом управления T . Для каждого момента времени t ($t \in T$) управляющим параметрам $u_j(t)$ ($j=1, 2, \dots, q$) поставлена в соответствие некоторая точка $u(t) = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_q(t))$ области U . Считается, что функция $u(t) = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_q(t))$ непрерывна на концах интервала T и, кроме того, в каждой точке разрыва ее значение равно пределу слева. Для решения оптимальной задачи необходимо введение еще одной функции $f_0(y, u)$, которая вместе с частными производными $\frac{\partial f_i(y, u)}{\partial y_i}$ ($i=1, 2, \dots, n$) определена и непрерывна на прямом произведении $Y \times U$. Любая из рассматриваемых задач управления движением ОЦММ состоит в отыскании такого управления $u(t) \in U$, которое переводит фазовую

точку $y(t)$ из некоторого начального состояния $y(0) \in S_0$ в конечное $Y(T) \in S_1$ и при этом придает минимальное значение функционалу:

$$I = \int_0^T f(y(t), u(t)) dt \quad (12)$$

Для задач поддержания равновесием функция $f_0(y, u)$ в общем случае имеет вид:

$$f_0(y, u) = - \sum_{i=2}^{n/2} \xi_{2i-1} \cdot y_{2i-1}(t) \quad (13)$$

где коэффициент ξ_{2i-1} принимает значение, равное единице или нулю, в зависимости от того, предполагается ли перемещение межзвенного угла в шарнире модели, соответствующего функции $y_{2i-1}(t)$ или указанный шарнир зафиксирован.

Функционал I в этом случае может быть записан в виде:

$$I = - \sum_{i=2}^{n/2} \xi_{2i-1} \cdot y_{2i-1}(t) \quad (14)$$

При решении указанных задач были использованы следующие соотношения, выражающие необходимые условия оптимальности определяемых управлений:

$$\text{Sup}_{u \in U} H(\psi(t), y(t), u) = 0 \quad (15)$$

$$u \in U$$

$$\psi_0(t) = \text{const} \leq 0 \quad (16)$$

где вектор — функция $\psi(t) = (\psi_0(t), \psi_1(t), \dots, \psi_n(t))$ и функция $H(\psi(t), y(t), u)$ определяется эквивалентными соотношениями:

$$H(\psi(t), y(t), u) = \sum_{i=0}^n \Psi_i(t) \cdot f_i(y(t), u), \quad (17)$$

$$\frac{d\Psi_i(t)}{dt} = - \frac{\partial H}{\partial y_i} = - \sum_{j=0}^n \mathcal{F}_j(y(t), u) \cdot \Psi_j(t), \quad (18)$$

где $y_0(t) = \int_0^t f_0(y(t), u) dt$, $i = 0, 1, \dots, n$.

Представленные результаты свидетельствуют о применимости линеаризованных уравнений с постоянными коэффициентами для получения количественных оценок в прикладных задачах управления движением ОЦМТ оператора.

Все без исключения управления $u_i(t)$ ($i=k+1, \dots, 7$) движением ОЦМ базисной модели, получены в предположении, что функции $\dot{\gamma}_i(t)$ ($i=k+1, \dots, 7$), соответствующие угловым перемещениям в шарнирах модели, могут иметь кусочно – непрерывный вид с точками разрыва первого рода. Подобное допущение вполне позволяет выявить предельные возможности структуры тела оператора в управлении движением его ОЦМ, однако в реальных ситуациях функции $\dot{\gamma}_i(t)$ такого вида не могут быть реализованы. Поэтому представляется важным провести оценку возможных поправок к полученным для оптимальных управлений соотношениям при рассмотрении в качестве управлений $u_a(t)$ таких функций, которые могут быть практически реализованы биомеханическими системами.

В главе 4 работы оптимальные управления движением ОЦМТ базисной модели анализируются с учетом реальных возможностей системы СКР оператора.

Реализуемые биомеханическими системами управления движением ОЦМТ отличаются от полученных в главе 3 настоящей работы оптимальных управлений. Это отличие обусловлено принятыми в работе допущениями о разрывности функций, описывающих угловые ускорения в шарнирах модели. Реальные функции управления для человека являются непрерывными. Вследствие этого представляется важным провести качественную оценку потенциальных возможностей реальных биомеханических систем в управлении движением ОЦМТ с учетом указанной их

особенности, которая формально может быть выражена следующим образом:

$$\left| \frac{d\tilde{\gamma}_i(t)}{dt} \right| \leq \delta_i, \quad (19)$$

где $\tilde{\gamma}_i(t)$ функции суставных угловых перемещений, имеющие тот же смысл, что и ранее; $\delta_i = \frac{M_i}{\Delta t_i}$ — некоторые неотрицательные числа, характеризующие предельные значения скоростей изменения мышечных моментов в суставах оператора (Δt_i — предельное время достижения максимального значения M_i функции $|\dot{\tilde{\gamma}}_i(t)|$).

На основе анализа уравнений движения базисной модели и результатов, полученных при решении оптимальных задач, рассмотрены возможные с позиций механики способы управления движением ОЦМТ, обеспечивающие поддержание равновесия тела оператора в положении "стоя", а также условия их эффективного функционирования. Кроме того, в этой главе дан анализ двигательной активности оператора на различных фазах взаимодействия с импульсными ДВ, приложенными к корпусу оператора и к подвижной опорной платформе. Помимо этого, в данной главе работы получены соотношения, раскрывающие связь стабилиграфического сигнала с основными параметрами движения тела оператора.

Зависимость стабилиграфического сигнала от параметров движения тела оператора имеет вид:

$$\Phi^*(t) - \Delta \Phi^* = \eta \left[\mu^2 x - \ddot{x} - \sum_{i=k+1}^7 Q_i \cdot \tilde{\gamma}_i - \varepsilon_0 \cdot \tilde{f}(t) \right], \quad (20)$$

где $\Delta \Phi^* = \{(d_2 - d_1) + \Delta x \cdot (d_1 + d_2) / a\} \cdot M \cdot g / 2$;
 $\eta = \frac{(d_1 + d_2) \cdot b}{a \cdot Q_1}$; (d_1 и d_2 — константы).

Рассмотрены приложения теоретических результатов к разработке методики экспериментального изучения системы СКР оператора с помощью стабиллографии. Один из методов исследования системы СКР оператора, выявление особенностей ее функционирования и диагностики возможных нарушений основан на гармоническом анализе стабиллограмм. Проведенными исследованиями изучена устойчивость стояния операторов на ограниченной площадке размером 35×40 (см) (см. рис. 11) в зависимости от уровня ее расположения над полом. Исследования проводились при стоянии на площадке при соответствующих высотах: 0 м; 0,5 м; 1,0 м; 1,5 м.

Полученный материал позволяет сделать вывод, что высота 1,5 м является тем минимальным уровнем, на котором механизмы равновесия начинают декомпенсироваться и предъявляют организму повышенные требования, направленные на устойчивое стояние. Сюда можно отнести также энергозатраты, связанные с повышенной активностью мышц, обеспечивающих перемещение туловища в пространстве. Анализ контурограмм движения проекции центра тяжести на плоскость опоры отчетливо указывает на увеличение поверхности (границ) перемещения центра тяжести в 3—5 раз, что на высоте 1,5 м сопровождается некоторым смещением центра тяжести. Результаты этих исследований, как и анализ смещения центра тяжести в сагиттальной и фронтальной плоскостях с большой убедительностью говорит о повышенном расходе энергии мышц при стоянии и работе на высоте 1,5 м, а смещение центра вперед — о включении новых механизмов и переноса нагрузки на другие мышцы.

В главе 5 на основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана система защиты

операторов от падений при выполнении операций в процессе ТО АТ, включающая подсистемы конструктивных мер; технических способов и средств защиты; организационно – технические мероприятия (рис.12). Разработана и обоснована методика профессионального отбора авиатехников с учетом результатов теоретических исследований динамики тела оператора и полученных характеристик его системы СКР методом стабиллографии.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Определены и исследованы принципиально возможные с позиций механики способы управления движением ОЦМ многозвенных биомеханических систем.

2. Показана применимость линеаризованных уравнений с постоянными коэффициентами для описания процессов управления движением ОЦМТ человека при изменениях суставных углов до $1+1,5$ радиан.

3. Определено значение динамических свойств тела оператора в управлении движением ОЦМТ в задачах поддержания равновесия. Установлен принципиально новый эффект сохранения равновесия при выходе проекции ОЦМТ за пределы опорного контура без нарушения первоначальных границ этого контура.

4. Разработаны критерии оптимальности управления движением ОЦМ многозвенных биомеханических систем, учитывающие особенности таких систем достигать цели управления при минимальных угловых перемещениях в межзвенных сочленениях.

5. Разработаны методы нахождения оптимальных функций управления движением ОЦМ многозвенных биомеханических систем.

6. Исследованы теоретические вопросы стабиллографии. Выявлена тонкая структура стабиллограмм и определены способы выявления из стабиллограмм некоторых параметров, обусловленных функцией перемещений ОЦМТ. На основании анализа результатов теоретических исследований предложен метод экспериментального определения непосредственно функций перемещений ОЦМТ оператора.

7. Исследованы вопросы применения математического аппарата теории оптимального управления для решения некоторых задач взаимодействия человека с телами конечной массы.

8. Впервые в практике ТО АТ разработана и внедрена система защиты авиаспециалистов от падений, позволяющая снизить вероятность производственных травм.

9. Определены принципы профессионального отбора лиц по эксплуатации и ремонту АТ с помощью комплекса разработанных уравнений и полученных характеристик его системы СКР методом стабилографии.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. Гулевец В.Д., Буриченко Л.А. Теоретические предпосылки исследования безопасности труда при авиатранспортных процессах. — Тезисы докладов V научной конференции "Проблемы охраны труда", Рубежное, 1986 г., стр. 52–53. (Доля автора составляет 80%. Разработка модели комплексной количественной оценки безопасности труда).

2. Буриченко Л.А., Гулевец В.Д. Вопросы безопасности труда в связи с интенсификацией авиатранспортных процессов аэропорта. — В сб. Проблемы охраны труда и окружающей среды при интенсификации производства гражданской авиации. — Киев, КИИГА, 1986 г., стр. 3–6. (Доля автора — 80%. Решение проблемы вероятного получения травмы оператором при ТО АТ средствами наземного обеспечения).

3. Гулевец В.Д. Оценка опасной ситуации в системе "Оператор — авиационно — наземная техника — воздушное судно". — В сб. Системы безопасности труда в технологических процессах гражданской авиации. — Киев, КИИГА, 1988 г., стр. 22–29.

4. Гулевец В.Д., Протоерейский А.С. Обеспечение безопасности работ при техническом обслуживании воздушных судов. — в сб. Вопросы охраны труда и окружающей среды в процессе технического обслуживания и ремонта авиационной техники. — Киев, КИИГА, 1993 г., стр. 80–82. (Доля автора — 90%. Динамические свойства человека как путь к повышению устойчивости оператора при падении).

5. Гулевец В.Д. Моделирование стратегии поддержания равновесием вертикальной позы авиаспециалистов на высоте при техническом обслуживании воздушных судов. — Тезисы докладов. Отчетная научно — техническая конференция научных коллективов университета за 1994 г. Киев, КМУГА, 1995 г., стр. 129.

6. Буриченко Л.А., Гулевец В.Д. Обеспечение безопасности труда авиаспециалистов при техническом обслуживании авиационной техники. — Тезисы докладов. Отчетная научно — техническая конференция научных коллективов университета за 1994 г. — Киев, КМУГА, 1995 г., стр. 131. (Доля автора — 80%. Разработка методики экспериментального изучения системы статокINETической регуляции оператора).

7. Буриченко А.А., Гулевец В.Д., Иванов А.А., Протоерейский А.С. *Безопасность труда при работе на высоте в процессе технического обслуживания воздушных судов. – Методические указания. – Киев, КМУГА, 1995 г., 16 стр.* (Доля автора – 45%. Система обеспечения безопасности при работах на высоте).

8. Гулевец В.Д. *О системе защиты операторов от падений при выполнении высотных работ. – Тезисы докладов XVI отчетная научно-техническая конференция научных коллективов университета за 1995 г. – Киев, КМУГА, 1996 г., стр.146*

Гулевец В.Д. Система захисту операторів від падіння на прикладі процесу технічного обслуговування авіаційної техніки.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук по спеціальності 05.26.01 - Охорона праці, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Дніпропетровськ, 1996.

Захищається 8 наукових праць, в яких містяться теоретичні дослідження процесів керування рівновагою багатоланкової динамічної системи тіла оператора, а також результати експериментальних досліджень. Установлен принципово новий ефект зберігання рівноваги при виході проекції загального центру мас тіла оператора за межі опорного контуру без порушень первопочаткових границь цього контуру. Вперше в практиці технічного обслуговування авіаційної техніки розроблена система захисту операторів від падіння.

Gulevets V.D. *System of defence of operators an example of process the Aircraft Equipment Maintenance.*

Thesis for a Master's Degree in the speciality 05.26.01 – Protection of labor, Pridneprovsk State Academy of Construction and Architecture, Dnepropetrovsk, 1996.

It is defended 8th scientific works that contain theoretical researches of the equilibrium control processes of the multilink dynamic system of the operator body, and also the results of the experimental researches. It was established new on principle effect of the equilibrium conservation at the output bearing plane projection of the operator body mass general centre, outside the bearing contour, without breakdown of this contour initial limits.

First in the practice of the aircraft equipment maintenance it was elaborated the system of operators fall protection.

Ключові слова: технічне обслуговування, авіаційна техніка, оператор, загальний центр мас, динамічний вплив, система статокінетичного регулювання.

Система защиты операторов от падений при ТО АТ

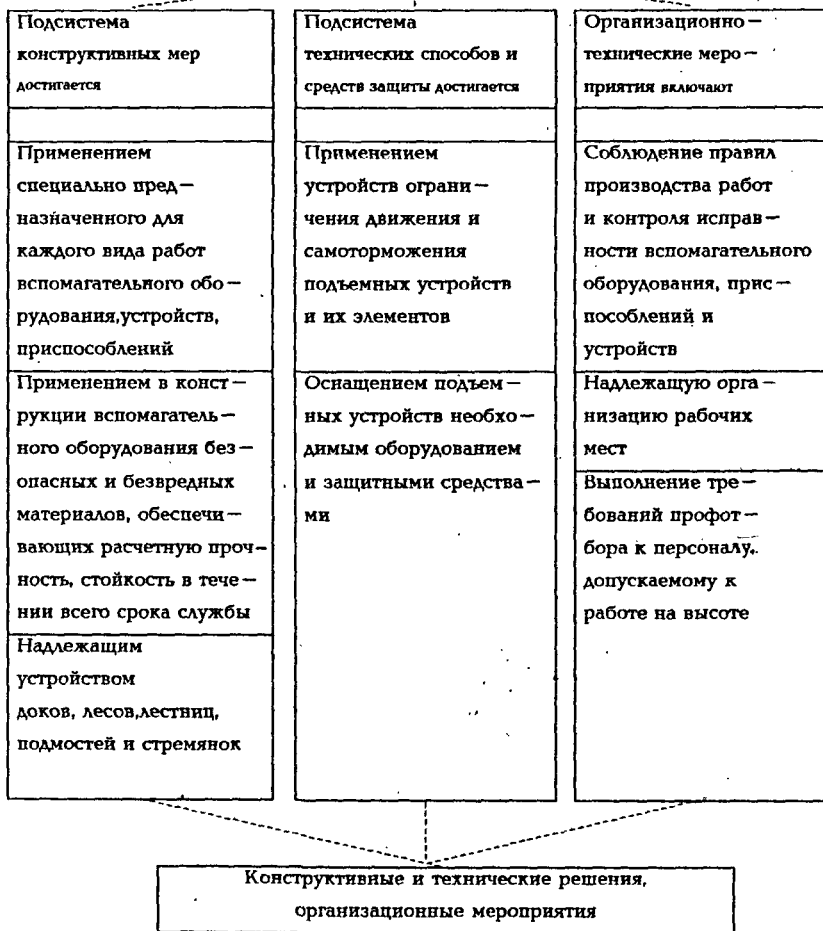


Рис. 12. Структурная схема повышения эффективности работы в системе защиты операторов от падений.