

На правах рукописи

УДК 62-852

Брусов Василий Андреевич

РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИВОДА ДЛЯ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ
ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

05.04.13 – Гидравлические машины, гидропневмоагрегаты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2010

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

Научный руководитель доктор технических наук,
профессор Попов Д.Н.

Официальные оппоненты доктор технических наук,
профессор Тягунов О.А.

кандидат технических наук,
доцент Маландин Г.Ю.

Ведущее предприятие ООО, предприятие
«АЭРОРИК»

Защита диссертации состоится «15» декабря 2010 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.16 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, 2-я Бауманская ул., 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим высылать по указанному адресу.

Автореферат разослан «___» _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.16
кандидат технических наук

Колосов М.А.

Актуальность темы. Известны и достаточно широко используются транспортные средства на воздушной подушке (ТСВП). При скоростном движении по неровной поверхности на транспортное средство действуют перегрузки, выводящие из строя электронную аппаратуру, навигационные приборы и негативно воздействующие на экипаж.

В связи с требованиями по снижению динамических нагрузок и повышению скорости судна при движении по неровной поверхности при сохранении подводимой к вентиляторным установкам мощности появилась необходимость в управлении продольными колебаниями ТСВП. В этой задаче рассматривается система управления, привод и управляемый объект совместно. Поэтому еще при проектировании следящего привода необходимо разработать математические модели как приводной части, так и управляемого объекта, и выявить связи между ними. Для решения этой задачи конструктор должен определить критерии качества, какими могут быть, например, потребляемая энергия приводом, динамические параметры процесса управления, оптимальная работа вентиляторов, нагнетающих воздух в воздушную подушку.

При этом весь процесс проектирования оптимального варианта управления будет проходить в интерактивном режиме, учитывающем различные по природе и противоречащие друг другу критерии качества.

Цель работы – разработка методики выбора типа и конструкции оптимального по нескольким критериям следящего привода для системы управления продольными колебаниями ТСВП.

Методы исследования. Задачи данной работы решались теоретическими и экспериментальными методами. Теоретические исследования базируются на основных положениях гидродинамики, теории управления и математическом методе определения оптимального варианта по многим критериям (метод ЛП-т поиска).

При численных исследованиях процессов в приводах и управляемом объекте применялся программный пакет «Моделирование в технических устройствах» (МВТУ).

Экспериментальные исследования проводились в гидроканале Филиала ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского «Московский комплекс ЦАГИ». Экспериментальным образцом являлась лабораторная модель ТСВП, динамически подобная натурному образцу, в масштабе 1:2,5.

Научной новизной в работе являются:

- метод управления продольными колебаниями транспортного средства на воздушной подушке, состоящий в распределении массовых расходов воздуха в носовые и кормовые секции воздушной подушки ТСВП с помощью поворотных дроссельных заслонок;

- проблемно-ориентированные математические модели для разработки трех вариантов приводов (однокаскадного электропневматического типа

«сопло-заслонка», электромеханического с двигателем постоянного тока и автономного электрогидравлического с регулируемым аксиально-поршневым насосом), управляющих дроссельными заслонками;

- математические модели для выбора параметров привода по многим критериям, соответствующих оптимальному управлению ТСВП;

- разработка адаптивной системы для управления продольными колебаниями ТСВП.

Практическая ценность работы. Полученные математические модели и методика определения оптимального варианта ориентированы на применение при создании систем управления ТСВП с различными массогабаритными параметрами.

Предлагаемый на базе этих моделей метод позволяет в интерактивном режиме:

- выбирать оптимальное по ряду критериев конструкторское решение следящего привода в условиях использования в системах управления ТСВП;

- рассчитывать статические и динамические характеристики различных проектных вариантов управляемого ТСВП, движущегося по различным типам опорной поверхности (водная, снежная, ледяная, грунтовая, болотистая поверхности) с различной скоростью.

В результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработан адаптивный по отношению к недостаточно определенным внешним воздействиям следящий привод.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением обоснованных допущений, принятых при математическом моделировании, как в приводе, так и в управляемом объекте в целом. Достоверность математических моделей ТСВП, силовых факторов, действующих на дроссельные заслонки, подтверждены путем их сравнения с результатами экспериментальных исследований, проведенных автором на лабораторном образце ТСВП в гидроканале Филиала ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского «Московский комплекс ЦАГИ».

Реализация работы. Результаты диссертационной работы применены при проведении испытаний динамически подобной модели ТСВП в гидроканале Филиала ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского «Московский комплекс ЦАГИ». Кроме того, методика выбора привода будет использована при создании натурального образца транспортного средства.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались:

- на XIX всероссийской школе-семинаре «Аэродинамика летательных аппаратов» в 2008 году;

- на международных конференциях «Гидроависалон-2008» и «Гидроависалон-2010»;

- на международной научно-технической конференции студентов и аспирантов 2008 году;
- на научно-технических семинарах, проводимых Филиалом ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского «Московский комплекс ЦАГИ»;
- на кафедре гидромеханики, гидромашин и гидропневмоавтоматики МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 8 работ, из них 2 в журналах, рецензируемых ВАК РФ. Разработанная методика проектирования привода для управления ТСВП отражена также в отчетах по разработке систем управления летательными аппаратами с шасси на воздушной подушке при разбеге-пробеге по слабоподготовленной взлетно-посадочной полосе.

Объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 58 наименований и приложения. Содержит 174 страниц текста, включающих 14 таблиц и 97 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, определены цель и задачи работы. Приводится классификация существующих видов ТСВП. Дается обзор возможных способов регулирования давления в секциях воздушной подушки. В этой области большой задел был сделан коллективом ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, в частности Долгополовым А.А. и Вашкевичем К.П. На основе разработанной ими принципиально новой схемы воздушной подушки строятся дальнейшие исследования, приведенные в диссертации.

Первая глава посвящена разработке математической модели управляемой воздушной подушки транспортного средства. Рассмотрен принцип действия воздушной подушки и особенности ее создания. ТСВП в целом представлен в обобщенном структурном виде отдельными подсистемами.

Для описания функционирования ТСВП составлены дифференциальные уравнения, к которым относятся:

- уравнения движения объекта в продольной плоскости;
- уравнения баланса массового расхода воздуха в проточной части воздушной подушки, описывающие процесс перетекания воздуха через контрольные объемы соответствующих полостей;
- уравнения динамики нагнетательного агрегата воздушной подушки;
- уравнения изменения формы нагруженных баллонов;
- уравнения движения дроссельных заслонок.

При математическом моделировании были приняты следующие допущения. Давление и плотность воздуха по объему отдельной полости воздушной подушки распределяется равномерно, а термодинамические процессы сжатия воздуха соответствуют политропным процессам. Такое допущение исключает необходимость дополнительного использования уравнений энергии для полостей воздушной подушки. При быстром изменении давления в секциях воздушной подушки, характерном для автоколебательных процессов при движении ТСВП с большой скоростью по неровной опорной поверхности, значение показателя политропы близко к значению показателя адиабаты. Перетекание воздуха между полостями воздушной подушки и из подушки в атмосферу рассматривается в рамках теории стационарного течения газа. Правомерность таких допущений подтверждена экспериментальными, а также расчетными исследованиями схематизированных моделей воздушной подушки.

В уравнениях функционирования ТСВП учтены силы тяжести, аэродинамические силы и моменты, подъемные силы от основной части воздушной подушки и от ее элементов, моменты от импульсной силы.

Возмущающее воздействие неровности на ТСВП в процессе его движения в уравнениях задается через текущие значения зазоров истечения воздуха под элементами гибкого ограждения и скоростей изменения контрольных объемов полостей воздушной подушки. Они обусловлены:

- вертикальными и угловыми перемещениями транспортного средства относительно опорной поверхности;
- изменением формы гибкого ограждения (в частности по его высоте);
- изменением высот неровности опорной поверхности под элементами воздушной подушки;
- изменением составляющих объемов полостей воздушной подушки в зависимости от профиля пути при поступательном движении ТСВП.

Для универсальности математической модели произведен переход к безразмерным переменным. Показано, что в соответствии с теорией подобия достаточно трех базовых величин: m - массы, кг; L - длины, м; g - ускорения свободного падения, m/c^2 . При этом математическая модель выполнена в структурном виде, т.е. в ней можно без особых затрат по времени заменять и добавлять блоки.

Обобщенная структурная схема математической модели транспортного средства включает (рис. 1): 1 – входной сигнал (регулярная волна); 2 – характеристики вентилятора и сети, пересечение которых дает рабочую точку вентилятора; 3 – заслонки, распределяющие массовые расходы на кормовую и носовую часть ТСВП; 4 – «ключ», разделяющий общий массовый расход (носовой или кормовой)

на расходы, поступающие в элементы; 5 – «ключ», разделяющий расход из-под i -го элемента на расход в атмосферу и в основную часть воздушной подушки; 6 – технические параметры ТСВП (масса, момент инерции, геометрические размеры, координаты элементов воздушной подушки); 7 – привод, поворачивающий дроссельные заслонки; 8 – центральная часть воздушной подушки; 9 – уравнения, описывающие движение ТСВП по взволнованной водной поверхности; 10 – ускорение вертикальных колебаний; 11 – скорость вертикальных колебаний; 12 – вертикальное перемещение ТСВП; 13 – угловое ускорение по тангажу; 14 – угловая скорость по тангажу; 15 – угол тангажа; 16 – обратная связь по вертикальным перемещениям; 17 – обратная связь по углу тангажа; 18 – обратная связь по скорости изменения вертикальных перемещений; 19 – обратная связь по скорости изменения угла тангажа.

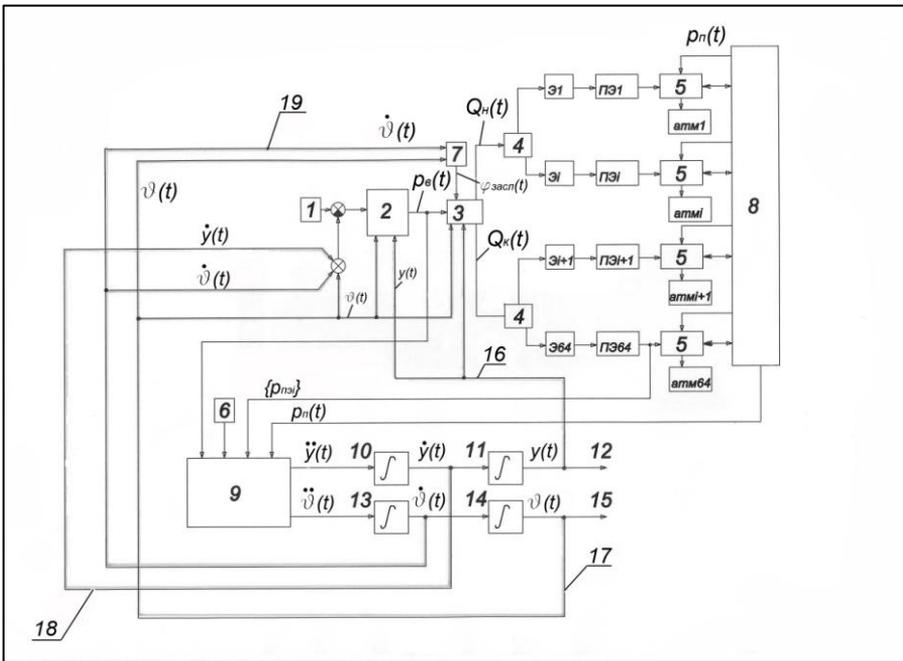


Рис. 1. Структурная схема математической модели управляемого по давлению в элементах воздушной подушки ТСВП

В структурной схеме обозначено: $y(t)$ - вертикальное перемещение ТСВП; $\dot{y}(t)$ - скорость изменения вертикальных перемещений; $\ddot{y}(t)$ - вторая производная вертикальных перемещений по времени;

$\mathcal{G}(t)$ - угол тангажа; $\dot{\mathcal{G}}(t)$ - скорость изменения угла тангажа;
 $\ddot{\mathcal{G}}(t)$ - вторая производная продольных колебаний по времени;
 $p_B(t)$ - статическое давление вентилятора; $p_{II}(t)$ - давление в центральной части воздушной подушки; $p_{nэ1}, \dots, p_{nэi}, \dots, p_{nэ64}$ - давление в элементах воздушной подушки; $\varphi_{засл}$ - угол поворота дроссельных заслонок; $Q_H(t)$, $Q_K(t)$ - объемные расходы в носовую и кормовую части воздушной подушки; \mathcal{E}_i - i -ый элемент воздушной подушки; $П\mathcal{E}_i$ - i -ый подэлемент воздушной подушки; $АТМ_i$ - расход, поступающий из i -го подэлемента в атмосферу.

Приведено экспериментальное подтверждение расчетов математической модели для лабораторной модели ТСВП в масштабе 1:2,5 с нерегулируемой воздушной подушкой.

Во второй главе рассматривается несколько различных конструкций приводов для управления дроссельными заслонками лабораторной модели ТСВП:

- однокаскадный электропневматический привод типа «сопло-заслонка» с исполнительным механизмом в виде двух сильфонов (ЭПСП);
- электромеханический привод с двигателем постоянного тока (ЭМПСТ);
- автономный электрогидравлический привод, имеющий аксиально-поршневой насос с саморегулирующимся ходом поршеньков на нагнетании (АЭГСП).

В основу математического описания АЭГСП и ЭМПСТ положены линейные модели, которые позволяют известными методами находить структуры и параметры, обеспечивающие оптимальное управление лабораторной модели ТСВП. Методика может быть использована и для более сложных нелинейных математических моделей, как в случае ЭПСП, математическая модель которого предусматривает возможность двух режимов течения воздуха в каналах привода: критического и докритического.

Принципиальная схема системы регулирования давления в воздушной подушке с помощью ЭПСП содержит следующие элементы (рис. 2): 1 – электромеханический преобразователь; 2 - постоянный магнит; 3 – якорь; 4 – обмотки управления; 5 – устройство «сопло-заслонка»; 6 – сопло; 7 – заслонка; 8 – упругая (разделительная) трубка; 9, 10 – дроссели гидравлического моста; 11 – исполнительный пневмодвигатель (сильфон); 12 – шток; 13 – вентилятор, подающий

воздух в ресивер; 14 – датчик обратной связи; 15 – усилитель электрических сигналов; 16 - ресивер; 17 – элемент воздушной подушки; 18 – воздушная подушка; 19 – опорная поверхность; 20 – пневмораспределитель; 21 – фильтр-сапун; 22 – манометр; 23 – световой сигнал аварийной ситуации; 24 – фильтр-влагоотделитель; 25 – пневмоаккумулятор; 26 – электродвигатель; 27 – компрессор; 28 – бак; 29, 30 – предохранительные клапаны; 31 – фильтр; 32 – редукционный клапан.

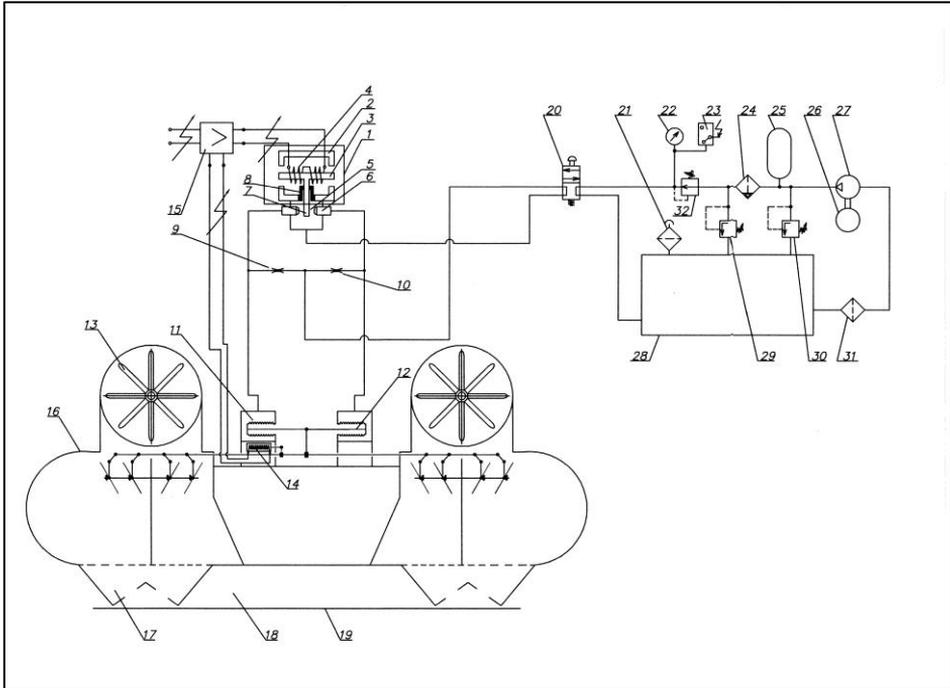


Рис. 2. Схема регулирования давления в воздушной подушке ТСВП с помощью ЭПС

Представлены основные положения метода ЛП-т для многокритериального поиска. Выбранный метод, изложенный в работах Соболя И.М. и Статникова Р.Б., является эффективным инструментом нахождения оптимальных параметров при решении трудноформализуемых задач.

При этом был изучен практический опыт Боровина Г.К. и Попова Д.Н. применения этого метода для нахождения оптимальных параметров гидравлических приводов в условиях многокритериальности поставленной задачи.

В соответствии с алгоритмом метода ЛП-т поиска выбраны критерии качества движения ТСВП по неровной опорной поверхности:

- динамический параметр движения:

$$I = \int_0^T (\ddot{\vartheta} + \alpha \cdot \ddot{y}) \cdot t \cdot dt \rightarrow \min, \text{ где: } T - \text{ время интегрирования; } \ddot{\vartheta} - \text{ вторая}$$

производная угла тангажа; \ddot{y} - ускорение ТСВП по вертикальной оси;
 α - весовой коэффициент;

- мощность, потребляемая приводом, $N_{пр} \rightarrow \min$;

- коэффициент полезного действия вентиляторов, нагнетающих воздух в подушку $\eta \rightarrow \max$.

Выбрана оптимальная конструкция следящего привода для каждого типа.

В третьей главе дано описание экспериментальной установки и методики проведения эксперимента для верификации численных исследований движения ТСВП.

Эксперимент состоял из статических и динамических испытаний модели ТСВП, имеющейся в гидроканале Филиала ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского «Московский комплекс ЦАГИ».

Модель представляет собой динамически подобный катер в масштабе 1:2,5, оснащенный поворотными дроссельными заслонками, которые перераспределяют массовый расход воздуха от вентиляторов в носовые и кормовые секции (рис. 3 - 4). При этом заслонки с каждого борта соединены общим рычажным механизмом, который прикреплен к штоку привода. В качестве исполнительного органа используется электромеханический привод постоянного тока, рассмотренный во второй главе диссертации.

Заслонки устанавливаются внутрь корпусов нагнетателей, по четыре на один нагнетатель. Воздушный поток, попадающий в нагнетатель, разделяется между двумя отсеками с помощью перегородок особой конструкции.

Правый нагнетатель обеспечивает подачу воздуха в ресиверы под номерами I и II, а левый – в III и IV (рис. 3). При создании такой системы управления необходимо, чтобы перегородки надежно разделяли отсеки, то есть утечки воздуха из одного отсека в другой не допускаются.

Электромеханические приводы с помощью системы рычагов приводят в движение поводки, которые в свою очередь скреплены с осями заслонок. Таким образом, при отклонении рычага рулевой машинки вправо поводки тоже будут отклоняться вправо, поворачивая заслонки. При этом частично перекрывается доступ воздуха в ресивер под номером IV и увеличивается его приток в ресивер номер III.

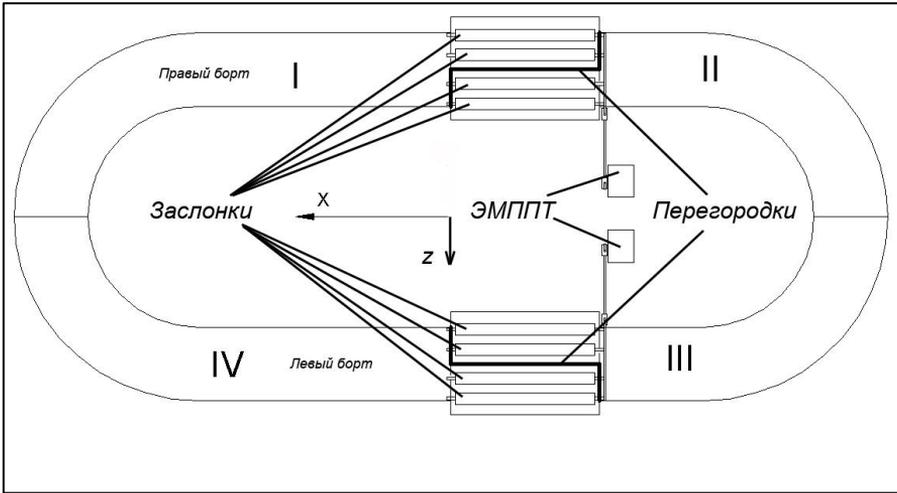


Рис. 3. Схема расположения поворотных дроссельных заслонок в корпусе нагнетателей модели ТСВП. Вид сверху

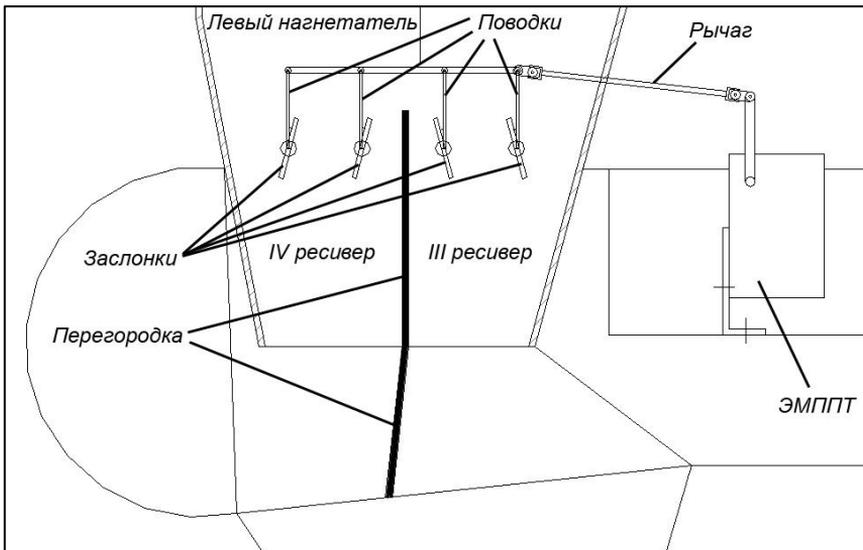


Рис. 4. Привод механизма поворота заслонками. Левый нагнетатель

Совместная работа ЭМППТ позволит попеременно осуществлять увеличенную подачу воздуха в носовые или кормовые отсеки, обеспечивая, таким образом, возможность управления продольным моментом ТСВП и соответственно углом тангажа модели.

Канал обратной связи в экспериментальных исследованиях формировался по следующим величинам:

$$\varphi_{засл} = \varphi_{засл0} + k_g \cdot \vartheta + k_{d\vartheta/dt} \cdot \dot{\vartheta},$$

где: $\varphi_{засл}$ - угол поворота дроссельных заслонок; $\varphi_{засл0}$ - начальный угол установки заслонок; ϑ - угол тангажа; $\dot{\vartheta}$ - производная по времени угла тангажа; k_{ϑ} , $k_{d\vartheta/dt}$ - коэффициенты обратной связи по углу тангажа и его производной соответственно. В эксперименте значения этих коэффициентов варьировались для получения оптимального управления моделью ТСВП.

Математическую модель управляемого ТСВП можно считать верифицированной и использовать ее в дальнейших научных исследованиях, связанных с разработкой натуральных ТСВП с воздушной подушкой камерного типа грузоподъемностью (1..5) тонн.

Четвертая глава посвящена выбору оптимального варианта и конструкции привода для натурального образца ТСВП. При этом использовался уже апробированный метод решения многокритериального поиска – метод ЛП-т поиска.

В натурном ТСВП была принята такая же схема регулирования подачи воздуха в воздушной подушке, как и для модели. В соответствии с теорией геометрического и кинематического подобия произведен расчет сил, которые действуют на поворотные дроссельные заслонки.

Геометрический коэффициент подобия равен: $k_L = \frac{L_H}{L_M} = 2,5$,

где L_M , L_H - линейные геометрические размеры модели и натурны.

В связи с тем, что суммарные силы на исполнительном механизме привода для натурального образца составляют порядка 1500Н, был проработан вариант АЭГСП.

В качестве критериев качества движения ТСВП взяты те же критерии. Для привода назначены варьируемые параметры с наложенными параметрическими ограничениями.

Оптимизация проводится при гармонических колебаниях волны (постоянные частота и амплитуда): $h_{нер}^* = 0,14м$ - высота волны;

$L = 7,85м$ - длина волны; $v = 11,1 \frac{м}{с} = 40 \frac{км}{ч}$ - скорость ТСВП; профиль

неровности под каждым элементом воздушной подушки определяется соотношением:

$$h_{нер.i} = h_{нер}^* \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{v}{L} \cdot t + 2 \cdot \pi \cdot \frac{x_{эi}}{L}\right).$$

В численном эксперименте, было получено 425 точек проектного варианта привода, удовлетворяющих требованиям параметрических

ограничений. При этом весь массив распределения критериев качества представлен как на графиках, так и в табличном виде. На рис. 5 - 7 изображено распределение критериев качества на плоскостях: мощность, потребляемая приводом, N_{np} , динамический параметр I и коэффициент полезного действия вентиляторов, нагнетающих воздух в подушку.

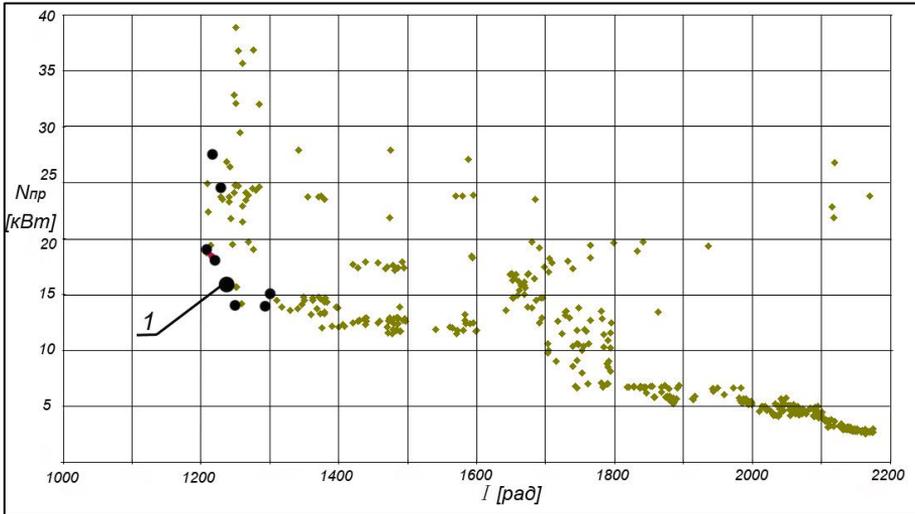


Рис. 5. Распределение критериев качества $N_{np}(I)$

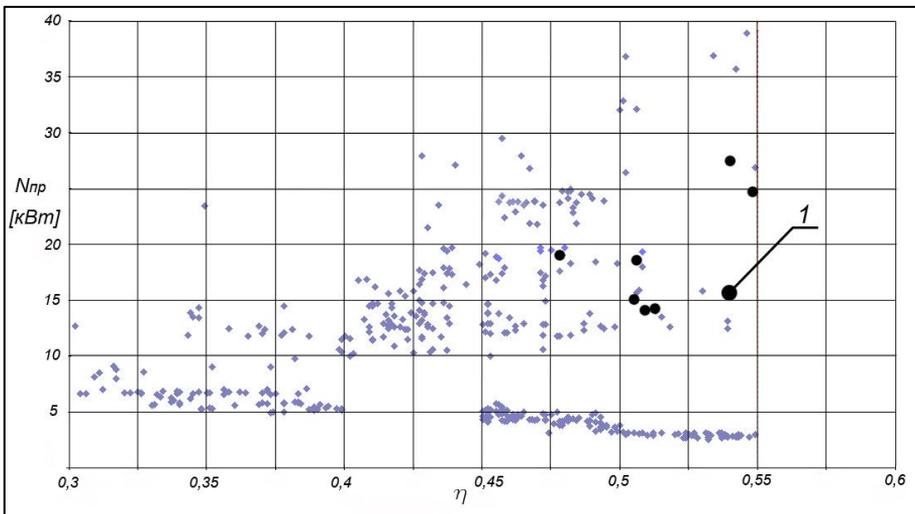


Рис. 6. Распределение критериев качества $N_{np}(\eta)$

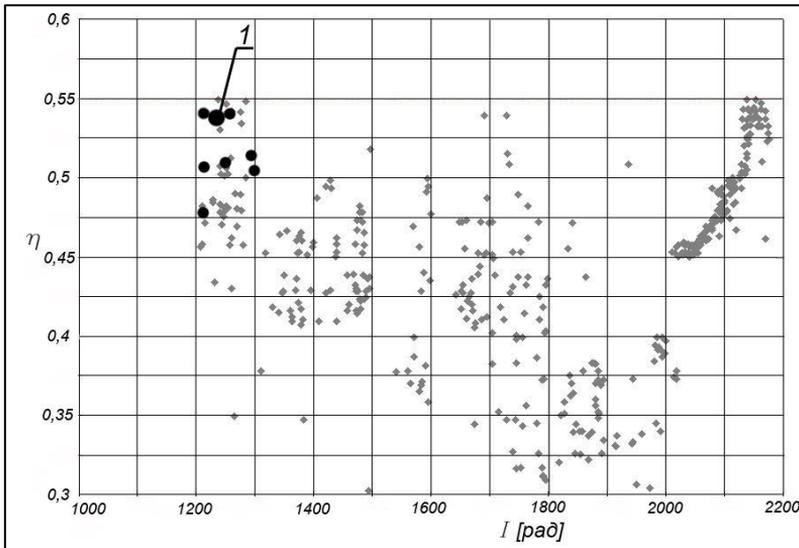


Рис. 7. Распределение критериев качества $\eta(I)$

Анализ результатов решений, позволяет найти оптимальное проектное решение АЭГСП. На рис. 5 - 7 жирным шрифтом показаны расчетные точки проектного варианта привода, лежащие рядом с кривой Парето или на ней. Оптимальный вариант обозначен позицией «1». По совокупности трех критериев качества он имеет преимущество перед точками, выделенными жирным шрифтом.

Введение системы регулирования давления в системе воздушной подушки позволяет уменьшить угловые (по тангажу) и вертикальные колебания ТСВП при заданных условиях движения. При этом вертикальные перегрузки удалось снизить более чем на 50%. Рассматриваемый тип АЭГСП серийно выпускает машиностроительный завод «Восход» (г. Павлово).

Пятая глава посвящена разработке адаптивной системы управления давлением в элементах воздушной подушки натурального образца, учитывая недостаточную определенность управляемого объекта.

Автором были исследованы современные вопросы теории управления и, в частности, работы Норенкова И.П. в этой области.

Параллельно основному контуру управления подключена эталонная электронная модель, подстраивающаяся к изменяющимся параметрам движения транспортного средства.

Как показали численные исследования, натуральный ТСВП с адаптивной системой управления движется по взволнованной водной поверхности более плавно, чем ТСВП без такой системы (рис. 8). Перегрузки ТСВП, оснащенного системой управления с электронной

эталонной моделью, на больших скоростях ($v \geq 90 \frac{M}{c}$) меньше, приблизительно, на (20...25)%, чем у ТСВП, оснащенного обычной системой управления, учитывающем сигналы рассогласования по углу тангажа и вертикальным колебаниям.

В качестве эталонной модели было выбрано колебательное звено второго порядка с подстраивающимися под параметры движения ТСВП коэффициентами. Причем эти коэффициенты рассчитываются таким образом, чтобы качественные показатели функционирования объекта управления стремились к своим оптимальным значениям.

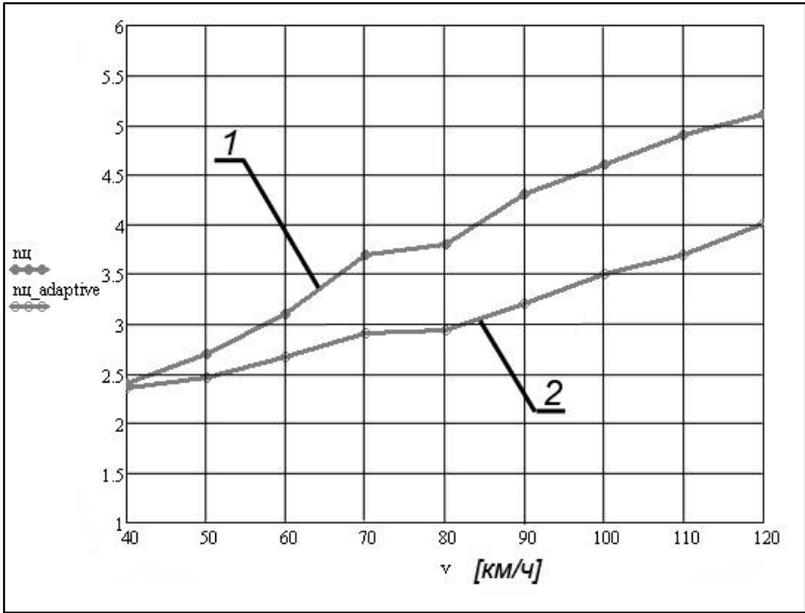


Рис. 8. Зависимость вертикальной перегрузки от скорости движения ТСВП: 1 – перегрузка ТСВП с обычной системой управления; 2 – перегрузка ТСВП с адаптивной системой управления

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В заключении изложены результаты проведенных исследований, которые состоят в следующем:

1. Для управляемого по давлению ТСВП составлена нелинейная математическая модель движения по неровной опорной поверхности.
2. В качестве исполнительных механизмов, поворачивающих дроссельные заслонки, рассмотрены три различных типа привода: ЭПСР, ЭМППТ и АЭГСП. Для каждого привода составлена объектно-ориентированная математическая модель и с помощью метода ЛП-т поиска, алгоритм которого включен в расчетную модель, проведена многокритериальная оптимизация их параметров.
3. Проведены экспериментальные исследования статических и динамических испытаний лабораторной модели ТСВП в масштабе 1:2,5 с управлением электромеханическим приводом. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов подтверждает адекватность математической модели нерегулируемого и регулируемого ТСВП.
4. Применение данного метода управления на лабораторной модели при ее движении по водной взволнованной поверхности позволило уменьшить амплитуды вертикальных колебаний и угла тангажа, и как следствие, уменьшить вертикальные перегрузки и увеличить плавность хода ТСВП.
5. Разработанная методика управления модели ТСВП пересчитана на натурный образец, для которого разработан оптимальный вариант проектного решения АЭГСП.
6. Учитывая, что ТСВП может двигаться по различным поверхностям (вода, грунт, песок, снег, болото) с многообразными неровностями, в системе управления предусмотрен адаптивный контур, подстраивающийся к параметрам движения транспортного средства. В условиях недостаточной определенности объекта или входных возмущений адаптивный контур представлен в виде электронной эталонной модели с изменяющимися коэффициентами. Показано, что у ТСВП с адаптивной системой управления при движении по различным видам неровностей повышается плавность хода, вертикальные перегрузки уменьшаются на 15...20% , по сравнению с ТСВП без системы регулирования давления в секциях воздушной подушки.
7. Разработанная в диссертации и отработанная в экспериментальных исследованиях система управления лабораторной модели ТСВП, а также выбор оптимального проектного решения привода натурального

образца предложены заказчику (ЗАО «Комвен») для модернизации натурального ТСВП и оснащения его адаптивной системой управления.

Основные результаты диссертации отражены в перечисленных ниже работах:

1. Попов Д.Н., Брусов В.А., Долгополов А.А. О выборе оптимальной структуры привода для системы управления летательным аппаратом с шасси на воздушной подушке в условиях недостаточной определенности объекта // *Авиационная промышленность*. 2010. №3. С. 3-7.
2. Попов Д.Н., Брусов В.А., Долгополов А.А. Разработка привода для управления продольными колебаниями транспортного средства на воздушной подушке // *Журнал Автомобильных Инженеров (ААИ)*. 2010. №4. С. 32-35.
3. Управляемость самолетом с шасси на воздушной подушке «Динго» на режимах рулежки / В.А. Брусов [и др.] // *Аэродинамика летательных аппаратов: Материалы XIX всерос. школы-семинара*. Москва, 2008. С. 82-84.
4. Особенности управляемости самолета с шасси на воздушной подушке «Динго» на взлете-посадке / В.А. Брусов [и др.] // *Гидроависалон-2008: Сб. докладов VII международной научной конференций по гидроавиации*. Москва, 2008. Часть I. С. 169-177.
5. Снижение динамической нагруженности ЛА с ШВП при движении по неровным грунтовым и взволнованным водным поверхностям управлением характеристиками ШВП / В.А. Брусов [и др.] // *Гидроависалон-2008: Сб. докладов VII международной научной конференций по гидроавиации*. Москва, 2008. Часть I. С. 191-196.
6. Брусов В.А., Попов Д.Н. О выборе оптимальной структуры привода для системы управления транспортным средством на воздушной подушке // *Гидромашины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика: Тез. докл. XII всерос. студенческой научно-технической конф.* Москва, 2008. С. 7.
7. Многокритериальная оптимизация электропневматического следящего привода для управления продольными колебаниями ЛА с ШВП в условиях недостаточной определенности входных возмущений / В.А. Брусов [и др.] // *Гидроависалон – 2010: Сб. докладов VIII международной научной конференции по гидроавиации*. Москва, 2010. Часть I. С. 299-305.

8. Разработка средств и законов управления ЛА с комбинированным шасси при рулежке, разбеге и пробеге в условиях бокового ветра и при уклонах ВПП / В.А. Брусов [и др.] // Гидроавиасалон – 2010: Сб. докладов VIII международной научной конференции по гидроавиации. Москва, 2010. Часть I. С. 306-313.

Подписано к печати 01.11.10. Заказ №
Объем 1,0 печ.л. Тираж 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская, д. 5.
263-62-01