

УДК 629.1.039

РАЗРАБОТКА ПРИВОДА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

Д.Н. Попов, проф., докт. техн. наук, В.А. Брусов (МГТУ им. Н.Э. Баумана) / А.А. Долгополов, ст. науч. сотр. (Филиал ФГУП ЦАГИ «Московский комплекс ЦАГИ»)

Решение задач управления транспортными средствами на воздушной подушке (ТСВП) во многом зависит от требований, предъявляемых к самим объектам управления. Известны и достаточно широко используются суда на воздушной подушке большой грузоподъемности (свыше 3 т) со скоростями движения до 120 км/ч. Целью исследований, рассматриваемых в данной работе, является управление скоростными ТСВП меньшей грузоподъемностью (около 1 т). Особенность таких исследований состоит в том, что при достаточном весе и габаритах ТСВП (грузоподъемностью свыше 3 т) имеют большую воздушную подушку, которая при скоростном движении по неровной поверхности демпфирует колебания, и сам корпус ТСВП вместе с экипажем не испытывает критических перегрузок. Для судов меньшей грузоподъемности (около 1..2 т) воздушная подушка не успевает гасить колебания. При скоростном движении по неровной поверхности на судно воздействуют перегрузки, выводящие из строя электронную аппаратуру, навигационные приборы и негативно влияющие на экипаж. Вследствие этого ТСВП средней и малой грузоподъемности имеют ограничения по максимальной скорости движения.

Аппараты на воздушной подушке, как объекты регулирования, имеют сравнительно низкие демпфирующие свойства. Движения по тангажу, крену и рысканию характеризуются медленно затухающими колебаниями и большим значением перерегулирования (более 30-40%). Получить требуемые значения декрементов затухания по этим координатам здесь можно только с помощью средств автоматики. Весьма важным является и то, что с изменением скорости ТСВП значительно изменяются постоянные времени и декременты затухания, определяющие динамические свойства ТСВП. Это ограничивает возможность выбора типа корректирующих устройств и в ряде случаев требует изменения настройки регуляторов.

В режиме движения ТСВП подвержены непрерывным случайным внешним воздействиям, обусловленным как неровным рельефом опорной поверхности, так и повышенной турбулентностью воздушных потоков в приземном слое атмосферы. Возмущения, вызываемые порывами ветра, весьма опасны, так как в данном случае, скорости порывов ветра могут быть соизмеримы со скоростями движения. Исследования показывают, что ветер начинает влиять на движение ТСВП при превышении скорости 15 м/с [1]. При управлении скоростью движения ТСВП, в результате изменения силы импульсного сопротивления от засасываемого вентилятором воздуха (для формирования воздушной подушки), возникает момент тангажа, который может переводить неуправляемый ТСВП в недопустимо большие углы тангажа с потерей устойчивости.

Опыт, накопленный в процессе испытаний натуральных образцов ТСВП, показывает, что к регулируемым величинам здесь следует отнести углы крена γ , тангажа ϑ , и рыскания φ . Сохранение заданных значений или законов изменения перечисленных величин и должны обеспечивать системы автоматического управления (САУ). Необходимо отметить, что в данном случае не требуется большая точность стабилизации крена и рыскания. Они вводятся здесь только для ограничения этих параметров, чтобы исключить потерю устойчивости ТСВП при больших колебаниях.

Таким образом, САУ в ТСВП могут иметь три канала управления, соответствующие трем угловым координатам: γ , ϑ , φ . Поскольку для аппаратов рассматриваемого типа (массой порядка 1..2 т) связь между креном и тангажом проявляется очень слабо, контуры указанных каналов стабилизации можно рассматривать как независимые друг от друга. В состав каждого канала, как обычно, входят измерительные элементы, вычислительное или суммиру-

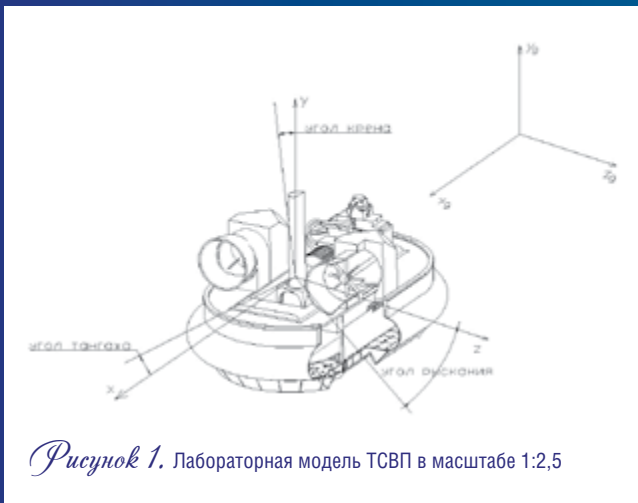


Рисунок 1. Лабораторная модель ТСВП в масштабе 1:2,5

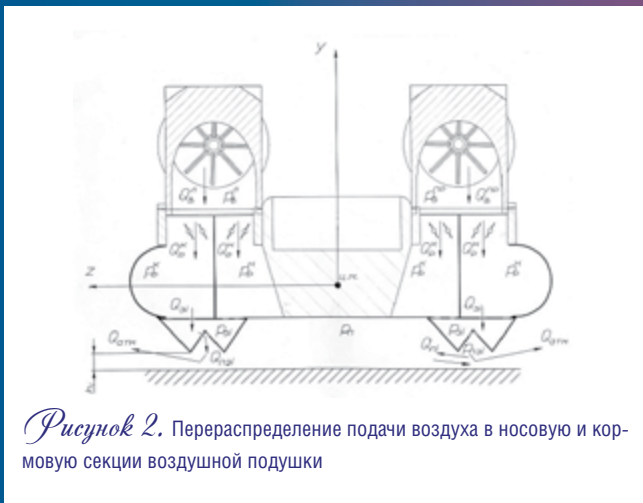


Рисунок 2. Перераспределение подачи воздуха в носовую и кормовую секции воздушной подушки

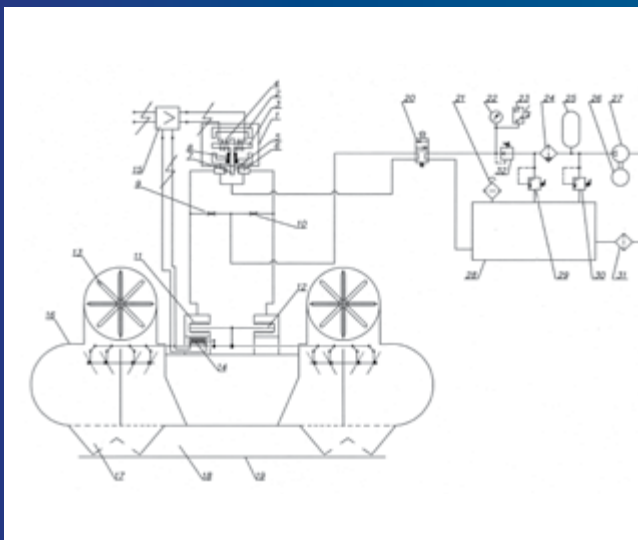


Рисунок 3. Схема регулирования давления в воздушной подушке ТСВП

Основные элементы: 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 — экран; 20 — пневмораспределитель, включающий систему регулирования; 21 — фильтр-сапун; 22 — манометр; 23 — аварийная лампочка; 24 — фильтр-влажотделитель; 25 — пневмоаккумулятор; 26 — электродвигатель; 27 — компрессор; 28 — бак; 29, 30 — предохранительные клапаны; 31 — фильтр; 32 — редукционный клапан

ющее устройство, усилитель, рулевой привод, цепи обратной связи.

Для расчетов была выбрана лабораторная модель ТСВП в масштабе 1:2,5 по отношению к натурному образцу (рис. 1).

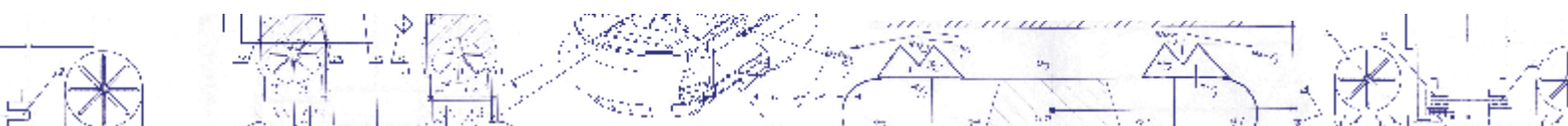
Эта модель оснащена дроссельными заслонками, посредством которых перераспределяется подача воздуха в нос и корму транспортного средства (рис. 2).

Управление ТСВП осуществляется поворотом дроссельных заслонок. Ими обеспечивается регулирование давления в секциях воздушной подушки. В качестве основного варианта привода был выбран электропневматический следящий привод с сильфонным исполнительным двигателем (рис. 3).

Алгоритм определения оптимального проектного варианта электропневматического следящего привода (ЭПС) можно построить, применив метод ЛП —

т поиска [2], [3]. В этом случае задача ставится следующим образом.

Пусть качество ЭПС характеризуется некоторой совокупностью критериальных функций $Q = (q_1, q_2, \dots, q_5)$ и конструктивных параметров $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$. Координаты вектора A можно варьировать, изменяя конструктивные параметры системы и соответственно получая различные показатели ее качества. Конкретные значения A выбирают из некоторой области $D (a_i \in D)$. Область D определяется совокупностью ограничений на варьируемые параметры типа равенства $a_i = a_{i0}$ и/или неравенства $a_{i \min} \leq a_i \leq a_{i \max}$, а также функциональными ограничениями $F_m(A) \leq 0$. Ограничения назначаются на основании технических, эксплуатационных и других требований. Т.е. из полученного множества $M_d = (S_1, S_2, \dots, S_p)$ допустимые проектные решения, которые обеспечивают наилучшие в задан-



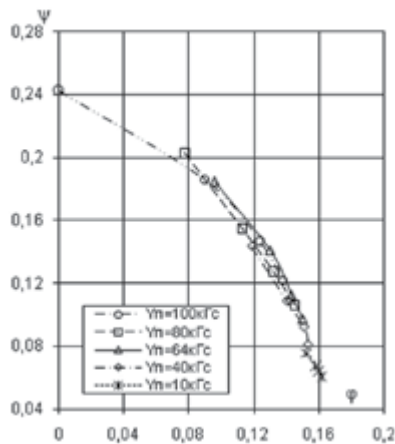


Рисунок 4. Безразмерная характеристика вентилятора

ном смысле значения Q , образуют подмножество M_0 оптимальных вариантов $M_0 \leq M_d$. В указанной постановке задачу оптимального проектирования можно представить в следующем виде:

$$Q = (q_1, q_2, \dots, q_n) \rightarrow opt$$

$$D: q_i = q_i(A), 1 \leq i \leq s$$

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_m), a_j = a_{j0}, j = (1, 2, \dots, r)$$

$$a_{l_{min}} \leq a_l \leq a_{l_{max}}, l = (1, 2, \dots, k), l \neq j, r + k = m$$

$$F_m(A) \leq 0, m = 1, 2, \dots, v$$

где opt — оператор, реализующий принцип оптимизации.

В алгоритме поиска оптимального решения используются математические модели ЭПСП, которые состоят из дифференциальных и алгебраических уравнений [4]:

$$dX / dt = f(X, t), R = R(X, A, t)$$

где $X = X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ — n -мерный вектор переменных состояния; $A = A(a_1, a_2, \dots, a_m)$ — m -мерный вектор конструктивных (варьируемых) параметров ЭПСП; t — время.

При решении этой системы уравнений параметры ЭПСП должны быть выбраны так, чтобы они наилучшим образом удовлетворяли техническим требованиям, сформулированным в виде критериев качества ЭПСП и совокупности ограничений.

Варьируемые параметры привода:

- 1) p_n — давление питания привода;
- 2) d_c — диаметр сопла в электропневматическом усилителе;

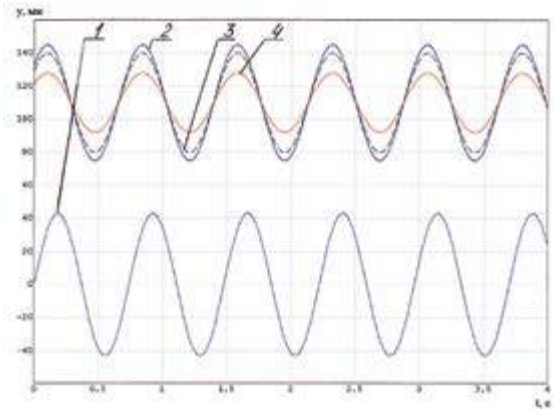


Рисунок 5. Движение ТСВП на регулярной волне. Вертикальное перемещение

Параметры движения нерегулируемого и регулируемого ТСВП. 1 — возмущение; 2 — вертикальное перемещение при неуправляемом движении (эксперимент); 3 — вертикальное перемещение при неуправляемом движении (расчет); 4 — вертикальное перемещение при управляемом движении (расчет) $v = m / c$, $h_s = 86$ мм, $L_s = 7,3$ м, $n = 6000$ об/мин, $G = Y_n = 640$ Н

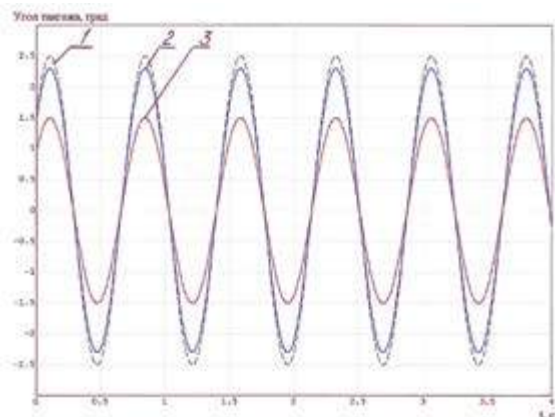


Рисунок 6. Движение ТСВП на регулярной волне. Угол тангажа

Параметры движения нерегулируемого и регулируемого ТСВП. 1 — угол тангажа при неуправляемом движении (эксперимент); 2 — угол тангажа при неуправляемом движении (расчет); 3 — угол тангажа при управляемом движении (расчет) $v = m / c$, $h_s = 86$ мм, $L_s = 7,3$ м, $n = 6000$ об/мин, $G = Y_n = 640$ Н

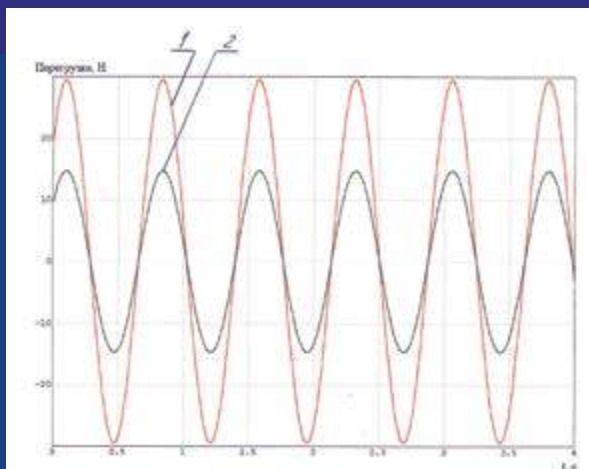


Рисунок 7. Движение ТСВП на регулярной волне. Перегрузка
 Параметры движения нерегулируемого и регулируемого ТСВП.
 1 — суммарная перегрузка при неуправляемом движении (расчет); 2 — суммарная перегрузка при управляемом движении (расчет)
 $v = \text{м/с}$, $h_s = 86 \text{ мм}$, $L_s = 7,3 \text{ м}$, $n = 6000 \text{ об/мин}$, $G = Y_n = 640 \text{ Н}$

- 3) D — диаметр сиффона;
- 4) $i_{y_{max}}$ — максимальный ток управления в обмотках электромеханического преобразователя;
- 5) c_{mp} — жесткость упругой трубки, l_{mp} — длина упругой трубки.

Параметрические ограничения:

- 1) $p_n = (0,1 \dots 1,5) \text{ МПа}$;
- 2) $d_c = (0,5 \dots 3,0) \text{ мм}$;
- 3) $D = (10 \dots 100) \text{ мм}$;
- 4) $i_{y_{max}} = (5 \dots 100) \text{ мА}$;
- 5) $c_{mp} = (1 \cdot 10^3 \dots 10 \cdot 10^3) \text{ Н/м}$, $l_{mp} = (0,01 \dots 0,05) \text{ м}$.

Оптимизация проводится при гармонических колебаниях волны (постоянные частота и амплитуда).

Критерии качества:

- 1а) Динамический параметр
 $I = \int (\ddot{\vartheta} + \alpha \cdot \dot{y}) \cdot t \cdot dt \rightarrow \min$,

где I — динамический критерий качества; $T = (1 \dots 5) \text{ с}$ — время интегрирования; $\ddot{\vartheta} = \ddot{\vartheta} / (1 \text{ рад/с}^2)$ — ускорение изменения угла тангажа, представленное в безразмерном виде; $\dot{y} = \dot{y} / g$ — ускорение по вертикальной оси «Оу», представленное в безразмерном виде (отнесено к ускорению свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$); $\alpha \geq 1 = 1,4$ — весовой коэффициент.

- 1б) Ограничение амплитуд выходных величин угла тангажа и вертикальных колебаний

$$\ddot{\vartheta}_{max} \rightarrow \min, \dot{y}_{max} \rightarrow \min$$

- 2) Мощность, потребляемая приводом

$$N_{np} \rightarrow \min, N_{np} = P_{шт} \cdot v_{шт}$$

где $P_{шт} = p_n \cdot ((\pi \cdot D_{cp}^4) / 4)$ — сила на штоке электропневматического привода; p_n — давление питания электропневматического привода; D_{cp} — средний диаметр сиффона; $v_{шт} = y_{шт}$ — скорость штока;

$$\bar{N}_{np} = N_{np} / N_{усл}$$

- 3) Коэффициент полезного действия вентилятора, нагнетающего воздух в воздушную подушку

$$\eta \rightarrow \max$$

На лабораторную модель транспортного средства для создания воздушной подушки установлено два осевых вентилятора, имеющих по восемь лопаток. Выбор вентилятора обусловлен приемлемой для создания воздушной подушки формой характеристики $\psi = f(\varphi)$ исключающей возникновение режимов помпажа (рис. 4).

Критерии, определяющие максимальную величину КПД вентиляторов:

$$\bar{p}_a = \psi = [0,2 \dots 0,08] \rightarrow 0,16 \text{ или}$$

$$Q_a = \varphi = [0,07 \dots 0,15] \rightarrow 0,11$$

Показано, что при регулировании давления в воздушной подушке амплитуды угла тангажа, вертикальных колебаний и инерционных перегрузок на 20% меньше, чем при неуправляемом движении (рисунки 5, 6 и 7). Такой результат достигнут за счет внедрения в систему управления адаптивного привода, устойчивого к внешним воздействиям и к недостаточной определенности управляемого объекта. Привод был оптимизирован по трем критериям качества с помощью метода ЛП — τ поиска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Злобин Г.П., Симонов Ю.А. Суда на воздушной подушке. — Л.: Судостроение, 1971. — 212 с.
2. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями: учебное пособие для вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Дрофа, 2006. — 175 с.
3. Боровин Г.К., Малышев В.Н., Попов Д.Н. Многокритериальная оптимизация гидросистем: учебное пособие. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. — 94 с.
4. Попов Д.Н. Механика гидро- и пневмоприводов: учебник для вузов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 320 с.

