

УДК 62-752.2; 62-752.6

doi: 10.18698/0536-1044-2023-7-12-21

Стабилизирующая активная подвеска вращающейся антенны аэростатной радиолокационной станции

С.Н. Саяпин

ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН»

Stabilizing active suspension of the aerostat radar station rotating antenna

S.N. Sayapin

Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Рассмотрена проблема прецизионной точной угловой ориентации и стабилизации вращающейся антенны радиолокационной станции, подвешенной к привязанному аэростату в условиях внешних вибрационных воздействий, способных приводить к значительным амплитудам низкочастотных колебаний по крену и тангажу ($\pm 15^\circ$) при угловой скорости 10 с^{-1} . Анализ известных решений этой проблемы показал, что все они сводятся к стабилизаторам самого аэростата в виде хвостового оперения, а также к использованию пассивных или активных стабилизирующих подвесок. Отмечено, что в пассивных подвесках использован карданный или другой подвес с образованием физического маятника, не способных обеспечить современные требования по точности ориентации и стабилизации оси вращения антенны радиолокационной станции аэростатного базирования (не более $6'$). Дополнительное использование следящих электроприводов с самотормозящимися механическими передачами или создание активной подвески на базе трипода в комбинации с маятниковой подвеской неизбежно приведут к увеличению массы, энергопотребления и стоимости. Показана возможность решения этой проблемы на примере стабилизирующей активной подвески, построенной с применением элементов систем пневмоавтоматики. Предложена стабилизирующая активная подвеска вращающейся антенны радиолокационной станции аэростатного базирования, выполненная в виде двухстепенного карданного подвеса с установленными враспор следящими пневматическими приводами. Предлагаемая подвеска универсальна и может быть использована в других областях, например, в подъемно-транспортных устройствах, предназначенных для работы с объектами повышенной опасности, а также при выполнении точных монтажных работ в труднодоступных местах, например, с применением вертолетов или высотных кранов.

Ключевые слова: аэростатная радиолокационная станция, стабилизирующая активная подвеска, элементы пневмоавтоматики, защита от низкочастотных вибраций

The paper considers the problem of the precision accurate angular orientation and stabilization of the radar station rotating antenna suspended from the tethered balloon and exposed to external vibrational influences capable of leading to significant amplitudes of the low-frequency oscillations in roll and pitch ($\pm 15^\circ$) at the angular velocity of 10 s^{-1} . Analysis of the known solutions to this problem demonstrated that they all were reduced to the aerostat stabilizers in the form of the tail assembly, as well as to using passive or active stabilizing suspensions. It was noted that gimbal or other suspension with formation of a physical pen-

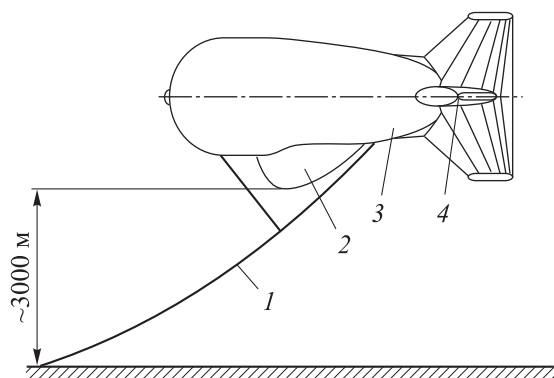
dulum was used in passive suspensions that were unable to meet modern requirements for accuracy of orientation and stabilization of the rotation axis of the aerostat radar antenna (no more than 6'). Additional use of the servo drives with the self-braking mechanical gears or introduction of the active suspension based on a tripod in combination with the pendulum suspension would inevitably lead to an increase in mass, energy consumption and cost. Possibility of solving this problem is shown on the example of a stabilizing active suspension constructed using the pneumatic automation system elements. A stabilizing active suspension for the rotating antenna of an aerostat radar station is proposed. The proposed suspension is universal and could be used in other areas, for example, in lifting and transport systems designed to work with the objects of increased hazard, as well as in precise installation works in the hard-to-reach locations, for example, with using helicopters or high-altitude cranes.

Keywords: aerostat radar, stabilizing active suspension, pneumatic automation elements, protection against low-frequency oscillation

Сравнительный анализ современных подвесок антенн радиолокационных станций (РЛС) аэростатного базирования. В отличие от самолетов, вращающиеся антенны (ВА) РЛС аэростатного базирования обладают способностью круглосуточного обнаружения низколетящих объектов, а также подводных, надводных и

наземных подвижных объектов на дальнем расстоянии (200...300 км), имеют меньше ограничений по погодным условиям и экономические преимущества [1-3].

Такие особенности позволяют располагать подобные РЛС вне зоны досягаемости средствами ПВО противника и передавать сведения



а



б



в



г

Рис. 1. Внешний вид ПА:

а — без швартовых устройств (1 — кабель-трос с растяжками; 2 — обтекатель ВА РЛС; 3 — ПА; 4 — хвостовое оперение); б, в и г — со швартовыми устройствами, установленными на колесной, стационарной наземной и морской платформе соответственно

об обнаруженных объектах в режиме реального времени, что делает актуальным их боевое применение, например, в зоне СВО.

Внешний вид привязного аэростата (ПА) без швартовых устройств показан на рис. 1, *а*. При этом устройства для его швартовки могут быть наземного и морского базирования (рис. 1, *б-г*).

Например, в компании ТСОМ (США) для ПА наземного базирования тактического класса (длиной 12 и 17 м) используют швартовые устройства, установленные на колесных платформах (см. рис. 1, *б*). Для ПА оперативного (22 и 28 м) и стратегического (71 и 74 м) классов наземного базирования (см. рис. 1, *в*), включая аэростаты морского базирования (см. рис. 1, *г*), применяют стационарные швартовые устройства [4].

В то же время ПА подвержены низкочастотным колебаниям тангажа и крена, амплитуда которых может достигать $\pm 15^\circ$ при угловой

скорости до 10 с^{-1} [3, 5]. Это приводит к отклонению оси вращения ВА РЛС от заданного положения, что недопустимо. Защиту от низкочастотных вибраций обеспечивают стабилизаторы ПА в виде хвостового оперения (см. рис. 1), пассивные [1, 2, 4, 6], активные [3, 7–11] и комбинированные [12, 13] стабилизирующие подвески, включая построенные на основе пространственных механизмов параллельной структуры [7, 8, 12–15].

Пассивные подвески. В таких подвесках антенны РЛС закрепляют на ПА с помощью растяжек (рис. 2, *а*), карданного или другого подвеса с образованием физического маятника, либо непосредственно на несущей конструкции ПА (рис. 2, *б и в*) [1, 2, 4, 6].

Пассивные подвески, имеющие низкие собственные частоты, неспособны совместно с хвостовым оперением защитить ВА РЛС от низкочастотных колебаний и, как следствие,

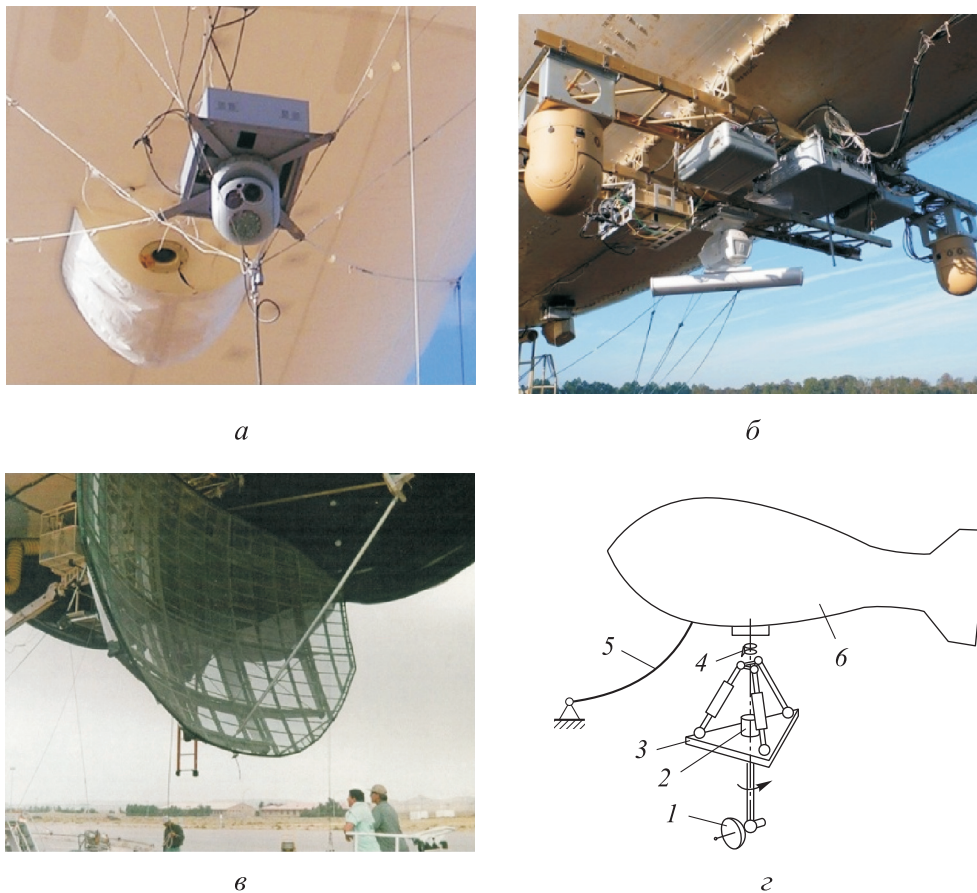


Рис. 2. Примеры крепления антенн РЛС к несущей конструкции ПА:

а — тросовая подвеска аэростата СОМ 17М (США); *б и в* — непосредственное крепление к несущей конструкции ПА СОМ 22М и Т СОМ 71М (США); *г* — комбинированная подвеска разработки Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (1 и 2 — антенна РЛС и ее привод; 3 — трипод с двумя линейными приводами; 4 — карданный подвес; 5 — кабель-трос; 6 — ПА)

обеспечить современные требования по точности ориентации и стабилизации ее оси вращения (не более $6'$). Антенну РЛС можно закрепить на ПА с помощью тросовой подвески (см. рис. 2, а) или непосредственно на его несущей конструкции (см. рис. 2, б и в) [4].

Комбинированная подвеска на основе активного трипода и карданного подвеса. В работах [12, 13] описана комбинированная подвеска (рис. 2, г), выполненная на основе активного трипода и карданного подвеса. Привод вращения ВА РЛС прикреплен к основанию двухприводного трипода (активного подвеса), а его вершина через карданный подвес (пассивный подвес — физический маятник) — к несущей конструкции ПА. Антенна установлена с помощью маятникового подвеса на платформе в виде активного трипода с двумя линейными приводами. Благодаря активному триподу отслеживаются колебания карданного подвеса, и повышается точность стабилизации положения оси вращения ВА РЛС.

Использование гидравлических приводов потребует размещения на подвеске насосной станции и сопутствующего оборудования, что приведет к увеличению массы, энергопотребления и необходимости поддержания требуемых температурных условий.

В случае применения быстродействующих электромеханических линейных приводов потребуются усилить несущие элементы конструкции самотормозящими передачами, а также обеспечить электропитание через кабель-трос длиной в несколько километров, что также увеличит массу и энергопотребление системы в целом.

При этом комбинированная подвеска способна гасить лишь единичные возмущающие воздействия, возникающие в результате порывов ветра, и требует поддержания необходимых температурных условий и защиты от резонанса.

Цель исследования — разработка концепции стабилизирующей активной подвески (САП) ВА азростатной РЛС (АРЛС), обеспечивающей не только пространственное позиционирование и стабилизацию оси вращения ВА, но и ее активную виброзащиту от внешних возбуждающих факторов.

Для достижения поставленной цели в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН разработана концепция САП ВА АРЛС, построенная на основе активного двухстепен-

ного карданного подвеса (АДКП) в сочетании с элементами пневмоавтоматики.

Описание САП ВА АРЛС и ее функционирование. САП ВА АРЛС построена на основе АДКП и элементов пневмоавтоматики. АДКП выполнен в виде ферменного основания 4 (рис. 3), внутри которого расположена наружная рамка карданного подвеса 11 с возможностью поворота относительно ферменного основания [9]. В свою очередь внутри наружной рамки карданного подвеса шарнирно установлена с возможностью поворота относительно нее внутренняя рамка карданного подвеса 15.

При этом наружная рамка карданного подвеса шарнирно связана с ферменным основанием установленными враспор следящими пневмоприводами в виде передней многосекционной рабочей камеры из резинокордных оболочек (МРКРК) 9 и задней МРКРК 13. Аналогично внутренняя рамка карданного подвеса шарнирно связана с наружной рамкой карданного подвеса через левую МРКРК 8 и правую МРКРК 10.

Каждая из МРКРК соединена соответствующим пневмопроводом с источником сжатого воздуха и устройствами пневмоавтоматики, выполненными из стандартных элементов, выпускаемых отечественной автомобильной промышленностью. Эти элементы отвечают жестким климатическим требованиям, предъявляемым к автомобильному транспорту, эксплуатируемому на территории государств-членов Евразийского экономического союза с предельной рабочей температурой внешней среды от плюс 50 до минус 70 °С [16].

Ориентация и стабилизация оси вращения ВА по крену и тангажу в условиях внешних вибрационных воздействий осуществляется по показаниям датчика в виде двухступенного прецизионного гироскопа (на рис. 3 не показан), который жестко установлен вместе с приводом вращения 3 ВА на платформе 14 внутренней рамки карданного подвеса.

Также на этой платформе размещены ресиверы 12, связанные пневмопроводами с компрессором и соответствующими пневмораспределительными устройствами с электромеханическими преобразователями (на рис. 3 не показаны).

При этом обратная связь по угловому положению платформы относительно ферменного основания АДКП каждой из стабилизирующих

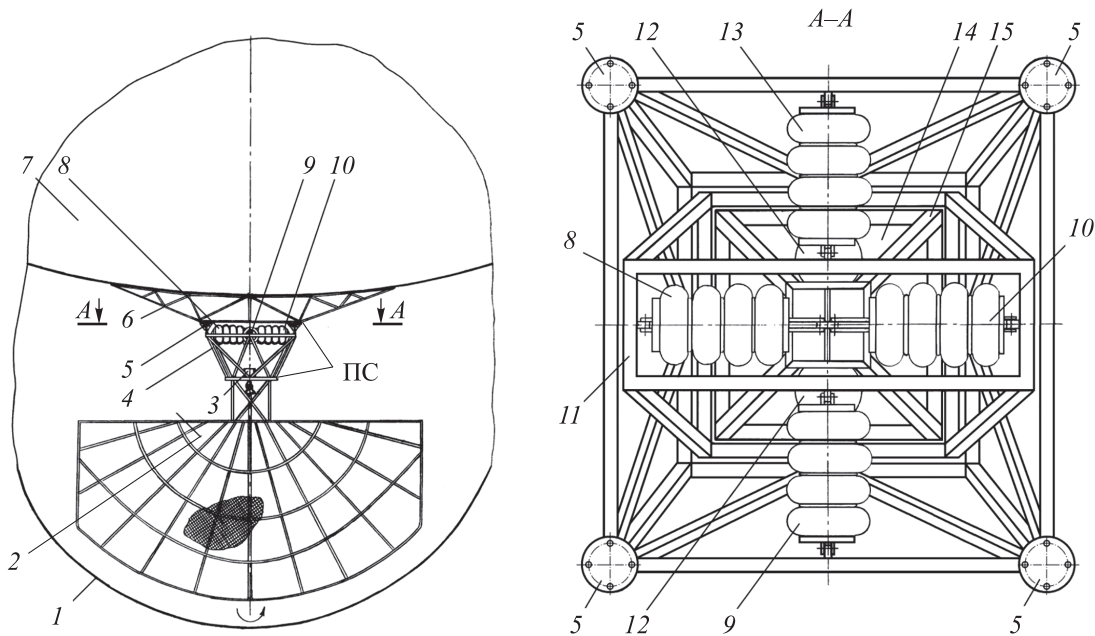


Рис. 3. Схема САП ВА АРЛС в мидельном сечении ПА:

- 1 — обтекатель ВА; 2 — ВА; 3 — привод вращения ВА; 4 — ферменное основание АДКП; 5 — узел крепления; 6 — несущая ферма; 7 — ПА; 8 и 10 — левая и правая МРКРК; 9 и 13 — передняя и задняя МРКРК; 11 и 15 — наружная и внутренняя рамки карданного подвеса; 12 — ресивер компрессорной системы; 14 — платформа; ПС — плоскость стыковки

систем (по углам крена и тангажа) выполнена в виде потенциметрических датчиков (на рис. 3 не показаны), кинематически связанных с соответствующими осями вращения наружной и внутренней рамок карданного подвеса.

Работа предлагаемой САП ВА АРЛС рассмотрена на примере одностепенного аналога — маятниковой подвески (МП), способной обеспечить ориентацию и стабилизацию оси вращения ВА по крену или тангажу [8, 9]. Функциональная схема одностепенного аналога САП ВА АРЛС приведена на рис. 4.

По команде с пункта управления кабельтрос отпускается, и ПА поднимается на заданную высоту (см. рис. 1, а). При этом управление САП ВА АРЛС (см. рис. 4), осуществляемое от прецизионного гироскопа 10 и потенциметрических датчиков 6 углового положения платформы 8, отключено, а избыточное одинаковое давление газа в установленных враспор левой 7 и правой 9 МРКРК обеспечивает требуемую жесткость конструкции САП ВА АРЛС и фиксацию ее углового положения относительно ферменного основания (на рис. 4 не показано).

После подъема ПА на заданную высоту по команде с пункта управления включается управление САП ВА АРЛС от прецизионного гироскопа и потенциметрических датчиков. В случае отклонения ПА с ферменным основа-

нием САП ВА АРЛС по углу крена (или тангажа) прецизионный гироскоп вырабатывает управляющие сигналы. Последние через соответствующие сумматор 5, инвертор 1 и усилитель мощности 2 подаются на соответствующие электромеханические преобразователи 3, управляющие положением рабочих органов пневмораспределительных устройств 4.

Пневмораспределительное устройство левой МРКРК соединяет его рабочую камеру с пневмопроводом, и происходит его наполнение из

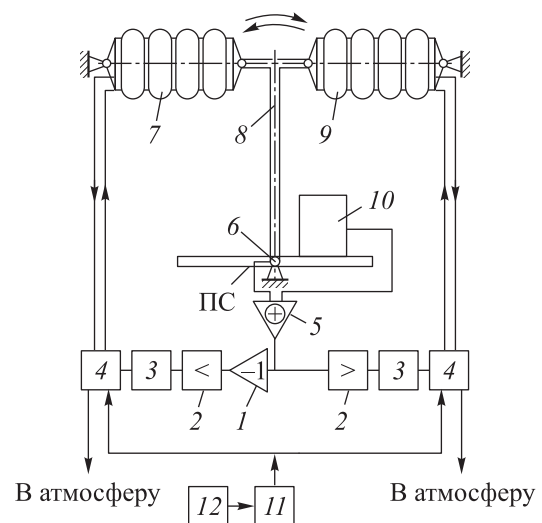


Рис. 4. Функциональная схема одностепенного аналога САП ВА АРЛС (ПС — плоскость стыковки)

ресивера 11 сжатым газом, поддержание рабочего давления которого осуществляется автоматически периодическим включением компрессора 12 от датчика давления, установленного на пневмопроводе. Пневмораспределительное устройство правой МРКРК связывает его рабочую камеру с атмосферой, обеспечивая стравливание из нее сжатого газа.

В результате происходит согласованное увеличение длины левой МРКРК и уменьшение длины правой МРКРК. При повороте ПА по углу крена в обратном направлении, наоборот, становится большей длина правой МРКРК и меньшей длина левой МРКРК.

Согласованное изменение длин левой и правой МРКРК, внутренние торцы которых шарнирно связаны с рычагом внутренней рамки с платформой, а внешние — с наружной рамкой, обеспечивает поворот внутренней рамки с платформой относительно наружной рамки и ферменного основания САП ВА АРЛС в противоположном от поворота ПА направлении, но с одинаковой угловой скоростью.

Это обеспечивает стабилизацию пространственного положения платформы и, соответственно, вертикальное направление оси вращения ВА АРЛС независимо от колебаний ПА по углу крена. Аналогично работает САП ВА АРЛС при колебаниях ПА с ВА АРЛС по углу тангажа.

Периодически для проведения профилактических работ осуществляют спуск ПА. При этом кабель-трос наматывается на барабан лебедки причального устройства, а САП ВА АРЛС работает, как и при подъеме, обеспечивая жесткую угловую фиксацию платформы с ВА относительно ферменного основания САП ВА АРЛС.

Регулировка пневмораспределительных устройств исключает возможность изменения давления газа в левой и правой МРКРК за допустимые пределы. Электропитание осуществляется от бортовой энергосистемы или по кабель-тросу ПА.

Анализ результатов динамических расчетов показал следующее [15]:

- система — устойчивая и следящая;
- максимальный коэффициент передачи — 2,2;
- резонансная частота — 2 Гц.

Для защиты рассмотренной системы от резонансной частоты разработаны способ и устройство, позволяющие повысить точность угловой стабилизации ВА АРЛС, обеспечить ее защиту от резонансных колебаний при эксплуа-

тации, а также увеличить надежность и снизить массогабаритные характеристики МП [10].

Предлагаемое решение является развитием описанного варианта (см. рис. 3, 4). Суть его состоит в том, что для защиты ВА АРЛС на МП от резонансных колебаний в процессе ее эксплуатации автоматически регулируют частоту ее собственных колебаний.

При этом выполняют контроль частот возбуждения от действия на МП внешних и внутренних возмущающих факторов. Далее их сравнивают с собственной частотой МП и при возникновении их критического сближения изменяют жесткость установленных враспор МРКРК 11 (рис. 5) и, как следствие, собственную частоту МП путем согласованного увеличения или уменьшения давления сжатого газа p в их МРКРК.

Давление сжатого газа определяется следующими выражениями [17]:

- при малом изменении объема МРКРК относительно начального объема

$$p = [mlV(4\pi^2\lambda^2 - g)] / (2nS^2a^2); \quad (1)$$

- при изменении площади МРКРК вследствие ее перемещения

$$p = \frac{m(4\pi^2\lambda^2 - g) + 2a^2p_0(\partial S/\partial \delta_{\delta=0})}{2a^2[nS^2 + V(\partial S/\partial \delta_{\delta=0})]}, \quad (2)$$

где m — масса МП, кг; l — расстояние от центра тяжести МП до оси ее вращения, м; V — начальный объем пневмоупругого элемента, м³; λ — частота собственных колебаний МП, Гц;

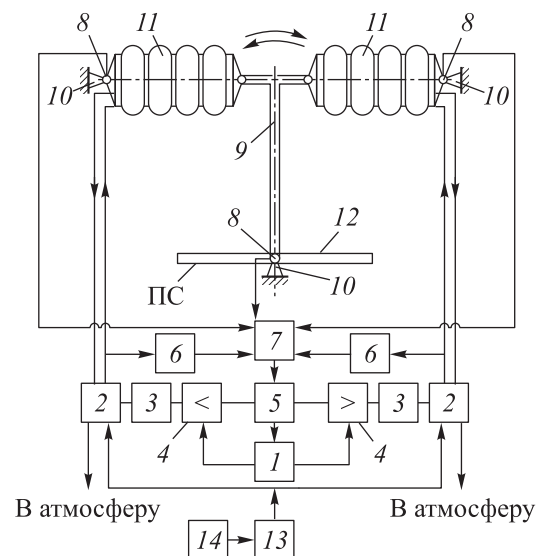


Рис. 5. Функциональная схема устройства защиты от резонансных колебаний САП ВА АРЛС (ПС — плоскость стыковки)

g — ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; n — показатель политропы, ($1 \leq n \leq 1,4$), для частот до 1,5 Гц $n = 1$, для частот более 1,5 Гц $n = 1,4$ [17]; S — площадь поршня МРКРК, м^2 ; a — расстояние от оси вращения МП до точек крепления к ней установленных враспор пневмоупругих элементов МРКРК, м; p_0 — атмосферное давление, Па; δ — перемещение МРКРК, м.

Функциональная схема устройства защиты от резонансных колебаний САП ВА АРЛС приведена на рис. 5. МП представляет собой одноступенной жесткий маятник 9 с платформой 12, один конец которого шарнирно прикреплен к несущей конструкции 10 САП ВА АРЛС, а другой — к МРКРК 11, шарнирно установленным враспор относительно нее.

Каждый из МРКРК связан через пневмопроводы с соответствующим пневмораспределительным устройством 2, соединенным с источником сжатого газа, например с ресивером 13 компрессора 14, и атмосферой с одной стороны и с электромеханическим преобразователем 3 — с другой. В точке подвеса жесткого маятника и в узлах соединения МРКРК с несущей конструкцией САП ВА АРЛС установлены акселерометры 8, выходы которых подключены через блок аналого-цифровых преобразователей (АЦП) 7 к входу блока управления (БУ) 5.

Выход БУ через шину выходных данных связан со входом блока цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) 1, выходы которого подключены соответственно ко входам последовательно соединенных усилителей мощности 4, электромеханических преобразователей и пневмораспределительных устройств. При этом МРКРК связаны с датчиками давления 6, выходы которых подключены к соответствующим входам блока АЦП.

Устройство защиты САП ВА АРЛС от резонансных колебаний работает следующим образом. В процессе эксплуатации САП ВА АРЛС в виде жесткого маятника и платформы с защищаемым объектом (на рис. 5 не показан) с помощью акселерометров осуществляется непрерывный контроль характеристик возбуждающих частот от действия на САП ВА АРЛС внешних и внутренних возмущающих факторов. При этом сигналы от акселерометров поступают через блок АЦП в БУ, где после их обработки происходит сравнение характеристик возбуждающих частот с собственной частотой МП.

В случае их критического сближения в БУ вырабатываются управляющие сигналы, которые через блок ЦАП и усилители мощности поступают на исполнительные органы — электромеханические преобразователи, связанные с пневмораспределительными устройствами.

В зависимости от необходимости повышения или понижения собственной частоты МП осуществляется соответственно увеличение или уменьшение жесткости МРКРК за счет соединения их рабочих камер посредством пневмораспределительных устройств с атмосферой или ресивером, в котором необходимый уровень давления газа поддерживает компрессор.

Давление газа p в МРКРК связано с параметрами МП выражениями (1) и (2), выведенными из известных формул, которые, с одной стороны, связывают частоту собственных колебаний жесткого маятника с массой, геометрическими параметрами и жесткостью его упругих элементов, установленных враспор [18], а с другой — жесткость МРКРК с давлением газа в рабочих камерах и их геометрическими параметрами с учетом показателя политропы n [17].

Рассмотрим зависимость частоты собственных колебаний МП λ от давления газа p в рабочих камерах МРКРК при следующих параметрах: масса МП $m = 100 \text{ кг}$; расстояние от центра тяжести МП до оси вращения $l = 0,5 \text{ м}$; начальный объем пневмоупругого элемента $V = 0,01 \text{ м}^3$; показатель политропы $n = 1,4$; площадь поршня пневмоупругого элемента $S = 0,018 \text{ м}^2$; расстояние от оси вращения МП до точек крепления к ней установленных враспор пневмоупругих элементов $a = 1 \text{ м}$.

Получены следующие результаты:

- при $\lambda = 1 \text{ Гц}$

$$p = 61,2 \text{ кПа (0,612 атм);}$$

- при $\lambda = 2 \text{ Гц}$

$$p = 407,1 \text{ кПа (4,071 атм);}$$

- при $\lambda = 3 \text{ Гц}$

$$p = 983,6 \text{ кПа (9,836 атм).}$$

Применение в предлагаемой системе исполнительных органов в виде МРКРК позволит упростить ее конструкцию и уменьшить габаритные размеры и массу [19]. Это достигается тем, что в МРКРК (см. рис. 5) демпферная и рабочая камеры образованы путем разделения

секций между собой перегородкой с межкамерным дросселем и имеют равные эффективные площади поперечного сечения.

При этом объем демпферной камеры составляет не менее двух объемов рабочей камеры, причем обе камеры снабжены штуцерами, соединенными с общей системой накачки и выпуска воздуха, расходные сечения которых пропорциональны отношению объемов камер.

Выводы

1. Предлагаемая САП ВА АРЛС позволит повысить точность угловой стабилизации оси вращения ВА и защитить САП от колебаний и ударных нагрузок в процессе эксплуатации, обеспечить (при необходимости) угловое наведение ВА и исключить люфты в их шарнирных соединениях благодаря установке соответствующих пар МРКРК враспор.

2. Система, снабженная МРКРК, обеспечивает перед системами, включающими в себя традиционные гидравлические и электромеханические исполнительные органы, следующие

преимущества: простоту конструкции, малую массу, надежность, значительный срок службы и хранения, хорошую готовность к действию и высокую скорость срабатывания, возможность работы в сложных условиях внешней среды (при значительном изменении температуры и давления газа, при радиации и высоких магнитных полях), нечувствительность к перегрузкам, при которых происходит остановка устройства без поломок.

3. Представленную систему можно эффективно использовать не только для МП и прецизионной угловой ориентации и стабилизации аэростатной платформы с ВА РЛС, но и в подъемно-транспортных устройствах, предназначенных для работы с объектами (грузами) повышенной опасности, при проведении высокоточных монтажных работ в труднодоступных местах (например, с использованием вертолетов или высотных кранов).

4. В дальнейшем запланированы работы в направлении повышения автономности САП ВА АРЛС, а также расширения ее функциональных возможностей.

Литература

- [1] Сборник ВИНТИ. *Итоги науки и техники. Сер. Воздушный транспорт*. Т. 18. Москва, ВИНТИ, 1989, с. 169–172.
- [2] Бойко Ю.С. *Воздухоплавание в изобретениях*. Москва, Транспорт, 1999. 352 с.
- [3] Саяпин С.Н., Синев А.В., Лебедев В.Н. и др. Проблема прецизионной угловой ориентации и стабилизации подвешенной к летательному аппарату полезной нагрузки. *Тр. Третьего межд. аэрокосмического конгресса IAC'2000*. Москва, МФП МГАТУ, 2004, с. 17–20.
- [4] TCOM gallery. *tcomlp.com: веб-сайт*. <https://tcomlp.com/gallery/> (дата обращения: 28.04.2023).
- [5] De Laurier J. Prediction of tethered-aerostat response to atmospheric turbulence. *J. Aircr.*, 1977, vol. 14, no. 4, pp. 407–409, doi: <https://doi.org/10.2514/3.44602>
- [6] Кисилев Ю.М., Трепов Г.В., Учватов В.И. и др. *Устройство для радиолокационного картографирования ледового покрова*. Патент СССР 1803343. Заявл. 20.02.1991, опубл. 23.03.1993.
- [7] Синев А.В., Саяпин С.Н., Кудрявцев Л.И. и др. *Устройство для стабилизации информационно-энергетических систем на базе аэростатных платформ*. Патент РФ 2266444. Заявл. 02.09.2003, опубл. 20.12.2005.
- [8] Саяпин С.Н. *Анализ и синтез раскрываемых на орбите прецизионных крупногабаритных механизмов и конструкций космических радиотелескопов лепесткового типа*. Дисс. ... док. тех. наук. Москва, ИМАШ РАН, 2003. 457 с.
- [9] Саяпин С.Н., Синев А.В., Лебедев В.Н. и др. *Устройство угловой стабилизации подвешенного объекта на транспортном средстве*. Патент РФ 2181683. Заявл. 14.04.2000, опубл. 27.04.2002.
- [10] Саяпин С.Н., Синев А.В. *Способ защиты объекта на маятниковой подвеске от резонансных колебаний и устройство для его осуществления*. Патент РФ 2245470. Заявл. 17.02.2003, опубл. 27.01.2005.
- [11] Синев А.В., Лебедеко И.Б., Саяпин С.Н. Концепция построения системы стабилизации шарнирно подвешенных объектов средствами пневмоавтоматики с учетом не-

- линейных факторов. Тез. докл. XIII Симп. Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем. Москва-Звенигород, ИМАШ РАН, 2001, с. 84–85.
- [12] Никулин Д.К. Управление активной стабилизацией антенного комплекса на основе механизма параллельной кинематики. *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2007, № 2, с. 80–85.
- [13] Никулин Д.К. Активное гашение колебаний локаторов, размещаемых на привязных аэростатах с использованием механизмов параллельной кинематики. Дисс. ... док. тех. наук. Москва, ИМАШ РАН, 2008. 115 с.
- [14] Глазунов В.А. Механизмы параллельной структуры и их применение. Москва-Ижевск, ИКИ, 2018. 1036 с.
- [15] Глазунов В.А., Чунихин А.Д. Развитие исследований механизмов параллельной структуры. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2014, № 3, с. 37–43.
- [16] ГОСТ Р 50992-2019. Автомобильные транспортные средства. Климатическая безопасность. Технические требования и методы испытаний. Москва, Стандартинформ, 2019. 28 с.
- [17] Синева А.В., Соловьев В.С. Повышение внутреннего демпфирования пневматических пружин систем виброизоляции введением элементов отрицательной жесткости. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 1995, № 3, с. 27–28.
- [18] Уманский А.А., ред. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Москва, Стройиздат, 1960, с. 965–996.
- [19] Галашин В.А., Лебедев И.Б., Саяпин С.Н. и др. Пневматическая подвеска. Тез. док. Восьмой междунауч.-тех. конф. по динамике и прочности автомобиля. Москва, МАМИ, 2000, с. 27–28.

References

- [1] Sbornik VINITI. *Itogi nauki i tekhniki. Ser. Vozdushnyy transport*. T. 18 [VINITI collection. Outcomes of science and technology. Ser. Air transport. Vol. 18]. Moscow, VINITI Publ., 1989, pp. 169–172. (In Russ.).
- [2] Boyko Yu.S. *Vozdukhoplavanie v izobreteniyakh* [Air navigation in inventions]. Moscow, Transport Publ., 1999. 352 p. (In Russ.).
- [3] Sayapin S.N., Sinev A.V., Lebedev V.N. et al. [Problem of precision angular orientation and stabilization of payloads suspended from an aircraft]. *Tr. Tretyego Mezhd. Aerokosmicheskogo Kongressa IAC'2000* [Proc. 3rd Int. Aerospace Congress IAC'06.]. Moscow, MFP MGATU Publ., 2004, pp. 17–20. (In Russ.).
- [4] TCOM gallery. *tcomlp.com: website*. <https://tcomlp.com/gallery/> (accessed: 28.04.2023).
- [5] De Laurier J. Prediction of tethered-aerostat response to atmospheric turbulence. *J. Aircr.*, 1977, vol. 14, no. 4, pp. 407–409, doi: <https://doi.org/10.2514/3.44602>
- [6] Kisilev Yu.M., Trepov G.V., Uchvatov V.I. et al. *Ustroystvo dlya radiolokatsionnogo kartografirovaniya ledovogo pokrova* [Device for radar mapping of ice cover]. Patent USSR 1803343. Appl. 20.02.1991, publ. 23.03.1993. (In Russ.).
- [7] Sinev A.V., Sayapin S.N., Kudryavtsev L.I. et al. *Ustroystvo dlya stabilizatsii informatsionno-energeticheskikh sistem na baze aerostatnykh platform* [Device for stabilizing informative-energetic systems]. Patent RU 2266444. Appl. 02.09.2003, publ. 20.12.2005. (In Russ.).
- [8] Sayapin S.N. *Analiz i sintez raskryvaemykh na orbite pretsizionnykh krupnogabaritnykh mekhanizmov i konstruktsiy kosmicheskikh radioteleskopov lepestkovogo tipa*. Diss. dok. tekhn. nauk [Analysis and synthesis of the precision large-scale mechanisms and structures of the space radio telescopes of lobe type in orbit. Doc. tech. sci. diss.]. Moscow, IMASH RAN Publ., 2003. 457 p. (In Russ.).
- [9] Sayapin S.N., Sinev A.V., Lebedev V.N. et al. *Ustroystvo uglovoy stabilizatsii podveshennogo obekta na transportnom sredstve* [Device for attitude stabilization of suspended object on transport facility]. Patent RU 2181683. Appl. 14.04.2000, publ. 27.04.2002. (In Russ.).
- [10] Sayapin S.N., Sinev A.V. *Sposob zashchity obekta na mayatnikovoy podveske ot rezonansnykh kolebaniy i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method and device for protecting object against resonance oscillation]. Patent Ru 2245470. Appl. 17.02.2003, publ. 27.01.2005. (In Russ.).

- [11] Sinev A.V., Lebedenko I.B., Sayapin S.N. [Concept of construction of stabilization system of articulated objects by pneumoautomatics with regard for nonlinear factors]. *Tez. dokl. XIII Simpoz. Dinamika vibroudarnykh (silno nelineynykh) sistem* [Abs. XIII Symp. Dynamics of vibration shock (strongly nonlinear) systems]. Moscow-Zvenigorod, IMASh RAN Publ., 2001, pp. 84–85. (In Russ.).
- [12] Nikulin D.K. Control of active stabilization of an antenna complex based on parallel kinematics mechanism. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*, 2007, no. 2, pp. 80–85. (In Russ.).
- [13] Nikulin D.K. *Aktivnoe gashenie kolebaniy lokatorov, razmeshchaemykh na privyaznykh aerostatakh s ispolzovaniem mekhanizmov parallelnoy kinematiki*. Diss. dok. tekhn. nauk [Active damping of locators oscillations placed on tethered aerostats using mechanisms of parallel kinematics. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, IMASh RAN Publ., 2008. 115 p. (In Russ.).
- [14] Glazunov V.A. *Mekhanizmy parallelnoy struktury i ikh primeneniye* [Parallel structure mechanisms and their application]. Moscow-Izhevsk, IKI Publ., 2018. 1036 p. (In Russ.).
- [15] Glazunov V.A., Chunikhin A.D. Development of mechanisms of parallel structure. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2014, no. 3, pp. 37–43. (In Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2014, vol. 43, no. 3, pp. 211–216, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618814030030>)
- [16] GOST R 50992-2019. *Avtomobilnye transportnye sredstva. Klimaticheskaya bezopasnost. Tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy* [State standard GOST R 50992-2019. Motor vehicles. Climatic safety. Technical requirements and test methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 28 p. (In Russ.).
- [17] Sinev A.V., Solovyev V.S. Increasing internal damping of pneumatic springs of vibration isolation systems by introducing negative stiffness elements. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 1995, no. 3, pp. 27–28. (In Russ.).
- [18] Umanskiy A.A., ed. *Spravochnik proektirovshchika promyshlennykh, zhilykh i obshchestvennykh zdaniy i sooruzheniy* [Handbook for designer of industrial, residential and public buildings and constructions]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1960, pp. 965–996. (In Russ.).
- [19] Galashin V.A., Lebedenko I.B., Sayapin S.N. et al. [Pneumatic suspension]. *Tez. dokl. Vostroy mezhd. nauch.-tekhn. konf. po dinamike i prochnosti avtomobilya* [Abs. 8th Int. Conf. on Dynamics and Strength of a Car]. Moscow, MAMI Publ., 2000, pp. 27–28. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 10.05.2023

Информация об авторе

САЯПИН Сергей Николаевич — доктор технических наук, главный научный сотрудник. ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН» (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский пер., д. 4, e-mail: S.Sayapin@rambler.ru).

Information about the author

SAYAPIN Sergey Nikolaevich — Doctor of Science (Eng.), Chief Research. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonyevskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: S.Sayapin@rambler.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Саяпин С.Н. Стабилизирующая активная подвеска вращающейся антенны аэростатной радиолокационной станции. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 7, с. 12–21, doi: [10.18698/0536-1044-2023-7-12-21](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-7-12-21)

Please cite this article in English as:

Sayapin S.N. Stabilizing active suspension of the aerostat radar station rotating antenna. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 7, pp. 12–21, doi: [10.18698/0536-1044-2023-7-12-21](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-7-12-21)