

М.А.Павловский, В.В.Кудрявцев,
Ю.Н.Рудик, А.В.Яковенко

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УГЛА

Киев
Издательство при Киевском государственном университете
издательского объединения "Вища школа"
1983

Проектирование и производство электролитических преобразователей угла. М.А.Павловский, В.В.Кудрявцев, И.Н.Рудик, А.В.Яковенко. - Киев: Изд-во при Киев. ун-те, 1983. - 56 с.

В книге описаны физические основы работы электролитических преобразователей угла, их статические и динамические характеристики, выявлен механизм влияния на них температур. Установлены причины газообразования в ампулах ЭПУ и предложены методы его исключения. Исследовано влияние вибрации на работоспособность преобразователей, рассмотрены пути повышения их виброустойчивости.

Предложена методика расчета геометрических и электрических параметров электролитических преобразователей с учетом требований, предъявляемых к точности гироскопических приборов, в которых они используются. Описана разработанная авторами установка для автоматического контроля параметров электролитических преобразователей угла.

Для инженерно-технических работников, связанных с проектированием и изготовлением электромеханических приборов. Может быть полезна студентам технических вузов.

Табл.2. Ил.17. Библиогр: 20 назв.

Рецензенты: А.А.Туник, д-р техн.наук, В.В.Шершун, канд.техн.наук, Л.Ф.Кажж, д-р физ.-мат.наук

Редакция естественной литературы

Зав.редакцией Б.Н.Фляшиков

П 27060000-053 214-83
М 224/04/-83

©

Издательское объединение
"Вища школа", 1983

"Всегда практика должна быть воздвигнута
на хорошей теории"

Леонардо да Винчи

Предисловие

Электролитические преобразователи угла в отечественном авиационном приборостроении впервые были применены в качестве чувствительного элемента системы коррекции авиагоризонта АГК-47Б, разработанного в 1946-1947 гг., и с тех пор прочно удерживают позиции несмотря на постоянно возрастающие требования к эксплуатационным характеристикам систем навигации и управления подвижными объектами.

Одними из первых, кто изучал работу жидкостных уровней, были И.Бонсдорф /1907 г./ и А.Н.Орлов /1912 г./. Исследованием работ электролитических уровней с резистивным преобразователем занимались В.Ю.Торочкин /1962 г./, Г.Ф.Бублик /1966 г./, М.А.Павловский /1966 г./, А.А.Одинцов /1968 г./, А.Н.Шайденко и Г.Д.Овсянников /1969 г./, Н.В.Василенко, Л.А.Кудрявцева, И.Н.Рудик /1974 г./, С.И.Сухов, В.А.Берлянд, Н.П.Клевцов /1970-1975 гг./.

К настоящему времени в литературе решено ограниченное число частных задач, посвященных электролитическим преобразователям, в связи с этим цель настоящей книги состоит:

- в обобщении и развитии теории ЭПУ;
- в анализе физических процессов, протекающих при работе электролитических преобразователей как самостоятельно, так и в системе коррекции гироскопических приборов; оценке их влияния на характер движения газового пузырька;
- выработке рекомендаций по улучшению характеристик преобразователей.

Авторы считали целесообразным, во-первых, представить оригинальный материал, во-вторых, отразить те вопросы, которые необходимы как разработчикам гироскопических приборов, так и специалистам в других областях, проявляющим интерес к такого типа преобразователям угла.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УГЛА

1.1. Общая характеристика конструкции

Электролитические преобразователи предназначены для преобразования механических перемещений его элементов в электрические сигналы. В зависимости от решения конкретных задач их конструкция может быть различной. Общими элементами этих устройств являются электроды, помещенные в электролит.

В электролитическом преобразователе при включении в электрическую цепь происходят сложные электрохимические процессы, которые зависят от того, являются электроды химически активными или же инертными. В последнее время применяют в основном инертные электроды, так как в этом случае ресурс работы преобразователей значительно возрастает.

При введении в электролит инертных электродов, изготовленных, например, из платины отрицательно заряженные ионы будут отдавать свои электроны электроду, сообщая ему отрицательный заряд, а слои электролита, прилегающие к нему, положительный. В результате образуются двойной электрический слой [18] и соответствующий потенциал, значение которого определяется составом и концентрацией электролита.

Если к преобразователю подвести напряжение, то на поверхности электродов будут протекать обратимые электрохимические реакции окисления и восстановления, в результате которых обеспечивается протекание тока в замкнутой цепи источник в.д.с. - электролитический преобразователь.

Так как связь электрода с электролитом осуществляется через переходную емкость электрод-электролит [18] /емкость двойного слоя/, то в общем случае плотность тока j между электродами складывается из плотности токов проводимости и электрического смещения

$$j = \gamma E + \epsilon \frac{dE}{dt},$$

где E - напряженность электрического поля; γ , ϵ - удельная электропроводность и диэлектрическая проницаемость электролита соответственно.

На практике плотностью тока электрического смещения ($\epsilon \frac{dE}{dt}$), возникающего между обкладками конденсатора при перезарядке, всегда можно пренебречь по сравнению с плотностью тока проводимости (γE), так как на электролитические преобразователи подается переменное напряжение частотой порядка сотни /редко тысячи/ герц, а токи смещения будут существенными в электролитах при частотах порядка десятки мегагерц [18]. Поэтому в электролитических преобразователях главным параметром является удельная электропроводность γ , зная которую можно определить электрическое сопротивление R по формуле $R = 1/\gamma S$ или $R = 1/\gamma \epsilon$, где l - расстояние между электродами; S - площадь поперечного сечения проводящего слоя электролита; $\epsilon = S/l$ - геометрическая проводимость пространства между электродами.

Рассмотрим теперь принцип работы устройств, предназначенных для измерения углов. Эти устройства будем называть электролитическими преобразователями угла /ЭПУ/.

В ЭПУ, предназначенном для измерения угла поворота вала /рис. 1, а/, корпус 4, выполненный из изоляционного материала, заполнен электролитом, в который введены неподвижные электроды 1, 2 и подвижный электрод 3, жестко закрепленный на измерительной оси. Преобразователь включен в мостовую схему, составленную из сопротивлений R и сопротивлений R_{1-3} и R_{2-3} участка цепи между его неподвижными и подвижным электродами. Если угол поворота измерительной оси равен нулю, то площади перекрытия электродов 1 и 2 электродом 3 одинаковы, поэтому геометрические проводимости пространства между неподвижными и подвижным электродами равны и, следовательно, равны сопротивления участка цепи между неподвижным и подвижными электродами. При этом мостовая схема сбалансирована, и прибор 5, измеряющий разность падений напряжений на сопротивлениях R , будет показывать нуль. При повороте измерительной оси на некоторый угол ψ изменяется площадь перекрытия электродов 1 и 2 электродом 3, то есть изменяется геометрическая проводимость пространства между электродами, что приводит к нарушению равновесия моста. Разность падений напряжений на сопротивлениях R служит мерой угла поворота измерительной оси.

Во многих конструкциях ЭПУ преобразование угла поворота основано на изменении геометрической проводимости пространства между электродами основано на свойстве свободной поверхности жидкости или поверхности раздела двух несмешивающихся жидкостей сохранять

горизонтальное положение при наклоне корпуса, жестко связанного с основанием. Такого типа устройства представляют собой жидкостные маятники.

Корпус жидкостного маятника может иметь форму кольцевого канала. Нижняя его половина заполняется рабочей жидкостью — электролитом, верхняя — жидкостью с меньшей плотностью для демпфирования колебаний рабочей жидкости. По оси кольцевого канала в электролите размещен платиновый электрод с тремя выводами. Два вывода расположены на уровне поверхности раздела жидкостей /при горизонтальном положении основания/, а третий — внизу посередине между боковыми. Сопротивления участков цепи между боковыми и средним выводами служат плечами мостовой схемы. При наклоне корпуса маятника электролит перемещается относительно платинового электрода, в результате чего нарушается равенство сопротивлений и, следовательно, равновесие мостовой схемы.

Одноосный ЭИУ /рис. 1, б/ представляет собой цилиндрическую ампулу с неподвижными электродами 1, 2 и 3. Расстояние между электродами 1 и 2 выбрано таким, что при горизонтальном положении продольной оси ампулы основание газового пузырька проходит через середины этих электродов, и площади электродов 1 и 2, покрытые электролитом, равны между собой, в силу этого равны сопротивления в цепи электродов 1-3 и 2-3.

При отклонении продольной оси ЭИУ от плоскости горизонта газовый пузырек перемещается вдоль оси ампулы, в результате чего площадь перекрытия электролитом одного из электродов увеличивается, а другого — уменьшается, что приводит к изменению сопротивлений участков цепи между электродами 1-3 и 2-3.

Двухосный ЭИУ выполнен на базе сферического пузырькового уровня. Принцип его работы не отличается от принципа работы одноосного ЭИУ.

Отметим, что из описанных ЭИУ наибольшей чувствительностью обладают пузырьковые ЭИУ. Они имеют небольшие размеры, конструкция их проста. Недостатком таких ЭИУ является малая зона линейности.

ЭИУ, показанный на рис. 1, а, характеризуется большей зоной линейности по сравнению с пузырьковыми, однако у него низкая чувствительность.

Все типы ЭИУ обладают низким /порядка 200-500 Ом/ сопротивлением, что позволяет включать их непосредственно в цепи исполнительных устройств без промежуточного усилителя.

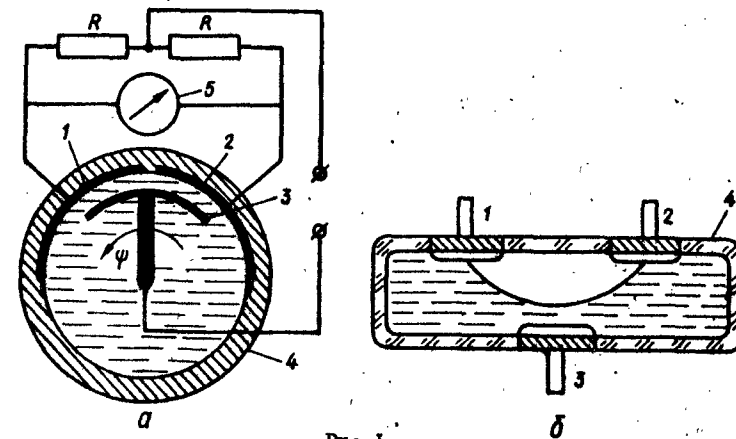


Рис. 1

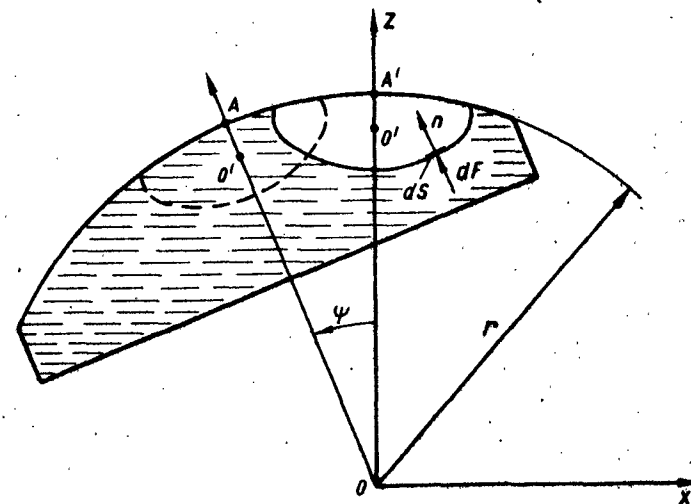


Рис. 2

В дальнейшем при исследовании ЭПУ с целью усовершенствования их характеристик необходимо более глубоко вникать в сложные физико-химические процессы, обусловленные протеканием электрического тока через электролит.

1.2. Уравнения движения жидкостного маятника

Пузырьковые ЭПУ с точки зрения механики представляют собой жидкостные маятники, которые являются системами с бесконечным числом степеней свободы. Как показывает практика, при медленных движениях основания жидкостный маятник можно заменить твердым маятником с соответствующими параметрами, которые, как правило, определяют экспериментально.

Однако при решении задач виброустойчивости ЭПУ в широком диапазоне частот вибрации необходимо рассматривать многие формы колебаний жидкости со свободной поверхностью [7, 8], и в этом случае модель твердого маятника уже не приемлема.

Анализируя перемещения газового пузырька при квазистатическом угловом движении основания, будем предполагать, что форма пузырька остается неизменной.

Так как плотность газа в пузырьке распределена равномерно, то при горизонтальном положении ампулы центр объема и центр масс пузырька совпадают, следовательно, совпадают и линии действия подъемной силы и силы веса. Поэтому главный момент \bar{M}_0 в этом случае /рис.2/ равен нулю. Если ампулу наклонить на угол ψ относительно плоскости горизонта, то возникает восстанавливающий момент

$$M_1 = - (m_1 - m_2) g r \sin \psi, \quad /1.1/$$

где m_1 - масса вытесненной пузырьком жидкости; m_2 - масса пузырька; g - ускорение свободного падения; r - радиус кривизны внутренней поверхности ампулы.

При малых углах поворота ψ в выражении /1.1/ $\sin \psi$ можно заменить на ψ :

$$M_1 = - (m_1 - m_2) g r \psi. \quad /1.2/$$

Под действием момента M_1 пузырек перемещается относительно поверхности ампулы таким образом, что прямая, проходящая через точки o и o' будет вертикальной. Учитывая момент сил инерции, позиционный момент M_1 и момент сил сопротивления, пропорциональ-

ный угловой скорости $\dot{\psi}$, уравнения движения жидкостного маятника запишем в виде

$$(m_2 + m_3) r^2 \ddot{\psi} + h \dot{\psi} + (m_1 - m_2) g r \psi = 0, \quad /1.3/$$

где m_3 - присоединенная масса жидкости.
Обозначив

$$\frac{h}{(m_2 + m_3) r^2} = 2n, \quad \frac{(m_1 - m_2) g}{(m_2 + m_3) r} = k^2, \quad /1.4/$$

перепишем уравнение /1.3/ в форме

$$\ddot{\psi} + 2n\dot{\psi} + k^2\psi = 0. \quad /1.5/$$

Это уравнение описывает свободные колебания пузырька относительно ампулы. Корни характеристического уравнения, соответствующего уравнению /1.5/, равны

$$z_1 = -n + (n^2 - k^2)^{1/2}, \quad z_2 = -n - (n^2 - k^2)^{1/2}. \quad /1.6/$$

Как известно, характер движения пузырька существенно зависит от соотношения величин n и k . Если $n < k$ /случай малого сопротивления/, то корни характеристического уравнения комплексно сопряженные. Если $n \geq k$ /случай большого сопротивления/, корни z_1 и z_2 - вещественные.

Рассмотрим эти случаи более подробно.

А. Пусть $n < k$. Тогда корни характеристического уравнения

$$z_1 = -n + i k_1, \quad z_2 = -n - i k_1, \quad \text{где } k_1 = (k^2 - n^2)^{1/2}, \quad i = \sqrt{-1}.$$

Общее решение уравнения /1.5/ в этом случае имеет вид

$$\psi = e^{-nt} (C_1 \cos k_1 t + C_2 \sin k_1 t) = e^{-nt} [\psi_0 \cos k_1 t + (\dot{\psi}_0 + n \psi_0) k^{-1} \sin k_1 t], \quad /1.7/$$

где ψ_0 и $\dot{\psi}_0$ - начальные значения координат ψ и $\dot{\psi}$ при $t = 0$.

В частности, в отсутствие сил сопротивления $h = 0$ /решение уравнения /1.5/ имеет вид

$$\psi = \psi_0 \cos kt + \dot{\psi}_0 k^{-1} \sin kt. \quad /1.8/$$

Выражение /1.8/ можно переписать так:

$$\psi = A \sin (kt + \alpha),$$

где

$$A = (\psi_0^2 + \dot{\psi}_0^2 k^{-2})^{1/2}, \quad \alpha = \arctg k \psi_0 / \dot{\psi}_0. \quad /1.9/$$

Рассмотрим подробнее выражение для периода собственных колебаний пузырька

$$T_0 = \frac{2\pi}{k} = 2\pi \sqrt{\frac{(m_2 + m_3)}{(m_1 - m_2)}} \cdot \frac{r}{g} \quad /I.I0/$$

Так как масса жидкости m_1 , вытесненной пузырьком, и приосежденная масса жидкости m_3 намного больше массы газа, заключенного в пузырьке, то формуле для периода можно придать вид

$$T_0 \approx 2\pi \left(\frac{m_3}{m_1} \cdot \frac{r}{g} \right)^{1/2} = T_m \sqrt{\frac{m_3}{m_1}} \quad /I.II/$$

Здесь $T_m = 2\pi \left(\frac{r}{g} \right)^{1/2}$ — период колебаний математического маятника длиной, равной радиусу r .

Обычно m_3 и m_1 соизмеримы, поэтому период собственных колебаний пузырька будет определяться радиусом сферы r . Например, если $m_3/m_1 = 2$; $r = 0,5$ м, то $T_0 = 1,9$ с. Маятники с таким большим периодом целесообразно применять в качестве чувствительных элементов систем коррекции гироскопических приборов.

В общем случае, когда $n \neq k$, решение /I.7/ может быть записано в виде

$$\psi = A e^{-nt} \sin(k_1 t + \alpha) \quad /I.I2/$$

Постоянные A и α определяются из начальных условий

$$A = \left[\psi_0^2 k_1^{-1} + \frac{(\dot{\psi}_0 + n\psi_0)^2}{k_1^2} \right]^{1/2}, \quad \alpha = \arctg \frac{k_1 \psi_0}{\dot{\psi}_0 + n\psi_0}$$

Из уравнения /I.I2/ следует, что $\psi \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$ ($e^{-nt} \rightarrow 0$), то есть движение пузырька в этом случае является затухающим /рис. 3/.

Промежуток времени T_1 между двумя последовательными прохождением пузырька через положение равновесия с одинаковым направлением скорости называют периодом затухающих колебаний. Величина периода $T_1 > T_0$ и вычисляется по формуле

$$T_1 = \frac{2\pi}{(k^2 - n^2)^{1/2}} \cdot \frac{T_0}{(1 - n^2/k^2)^{1/2}}$$

Б. Пусть $n > k$. В этом случае корни характеристического уравнения вещественные и отрицательные: $s_1 = -n + k_1$, $s_2 = -n - k_1$, где $k_1 = (n^2 - k^2)^{1/2}$.

Общее решение уравнения /I.5/ будет иметь вид

$$\psi = e^{-nt} (c_1 e^{k_1 t} + c_2 e^{-k_1 t})$$

Определив постоянные c_1 и c_2 из начальных условий, получим

$$\psi = e^{-nt} \left[\frac{\psi_0(k_1 + n) + \dot{\psi}_0}{2k_1} e^{k_1 t} + \frac{\psi_0(k_1 - n) - \dot{\psi}_0}{2k_1} e^{-k_1 t} \right]$$

Отклонение ψ обращается в нуль, то есть пузырек проходит положение равновесия в моменты времени, определяемые уравнением

$$e^{-nt} \left[\frac{\psi_0(k_1 + n) + \dot{\psi}_0}{2k_1} e^{k_1 t} + \frac{\psi_0(k_1 - n) - \dot{\psi}_0}{2k_1} e^{-k_1 t} \right] = 0$$

Левая часть этого уравнения стремится к нулю, когда $t \rightarrow \infty$, независимо от значений выражения в квадратных скобках. Следовательно, при любых начальных условиях пузырек асимптотически приближается к равновесному состоянию. В зависимости от начальных условий движение пузырька может быть представлено одной из кривых, приведенных на рис. 4 /кривая 1 — $\psi_0 > 0$, $\dot{\psi}_0 > 0$; кривая 2 — $\psi_0 > 0$, $\dot{\psi}_0 < 0$, но $|\dot{\psi}_0| > n\psi_0$; кривая 3 — $\psi_0 > 0$, $\dot{\psi}_0 \leq 0$, но $|\dot{\psi}_0| < n\psi_0$ /.

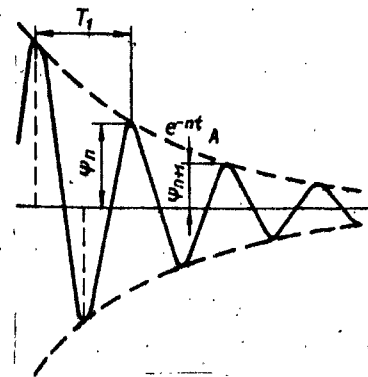


Рис. 3

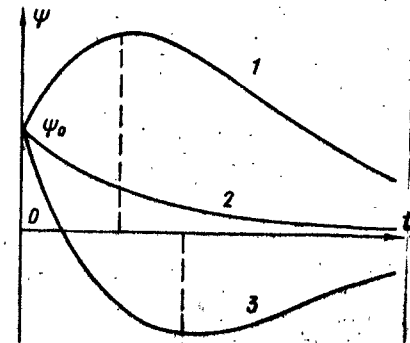


Рис. 4

В. Пусть $\alpha = k$. Тогда корни характеристического уравнения будут вещественными и кратными $\lambda_1 = \lambda_2 = -n$, а общее решение уравнения /1.5/ будет иметь вид $\psi = e^{-nt} (c_1 t + c_2)$.

Движение пузырька будет таким же, как и в предыдущем случае.

Отметим что все случаи свободных затухающих колебаний /переходных процессов/ могут быть реализованы. Однако на практике нашли применение пузырьковые ЭПУ с колебательным переходным процессом ($n < k$), так как они обладают высокой чувствительностью.

II. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭПУ

II.1. Статические и динамические характеристики ЭПУ

На движение пузырька ЭПУ оказывают влияние не только силы, рассмотренные в предыдущем разделе, но и силы, вызванные протеканием тока через электролит. Под воздействием тока в какой-то мере изменяется восстанавливающий момент, что приводит к искажению статической характеристики ЭПУ, представляющей собой зависимость выходного напряжения от угла поворота основания. На выходное напряжение ЭПУ влияют не только его собственные электрические параметры, но и параметры схемы, в которую он включен.

В схемах горизонтальной коррекции гироскопических приборов переменное напряжение подводится к электродам ЭПУ через обмотки моментного двигателя. При этом через преобразователь протекает переменный ток, значение которого определяется геометрической проводимостью участка электрической цепи электрод 1, 2 - электролит - электрод 3: $G = G_0 + k S$, где G_0 - геометрическая проводимость при полном перекрытии электрода газовым пузырьком; S - площадь перекрытия электрода электролитом; k - коэффициент пропорциональности.

Напряжение u_1 на электродах 1-2, характеризующее углы отклонения продольной оси ЭПУ от плоскости горизонта /амплитуда напряжения пропорциональна значению угла, а фаза зависит от направления отклонения /знака угла//, определяется следующим соотношением:

$$u_1 = (i_1 - i_2) z, \quad \text{II.1/}$$

где $z = (R^2 + \omega^2 L^2)^{1/2}$ - полное сопротивление обмоток управления моментного двигателя; i_1 и i_2 - токи, протекающие через электроды ЭПУ.

Токи i_1 и i_2 зависят от геометрических проводимостей цепей 1-3 и 2-3:

$$i_1 = u_1 G_1 = u (G_0 + k S_1);$$

$$i_2 = u_1 G_2 = u (G_0 + k S_2).$$

/II.2/

Подставив выражения /II.2/ в /II.1/, получим

$$u_1 = z k (S_1 - S_2) u.$$

/II.3/

Таким образом, амплитуда выходного напряжения

$$A_1 = z k (S_1 - S_2) A,$$

где A - амплитуда напряжения питания.

При горизонтальном положении ЭПУ $S_1 = S_2$ и $A_1 = 0$.

Статические характеристики ЭПУ МПЖ-2, ДЕМ-9Б и ВКЖ, построенные с использованием уравнения /II.3/, изображены на рис. 5 /кривые 1, 2 и 3 соответственно/. Преобразователь ВКЖ имеет релейную характеристику и в большинстве случаев служит в качестве выключателя коррекции гировертикалей.

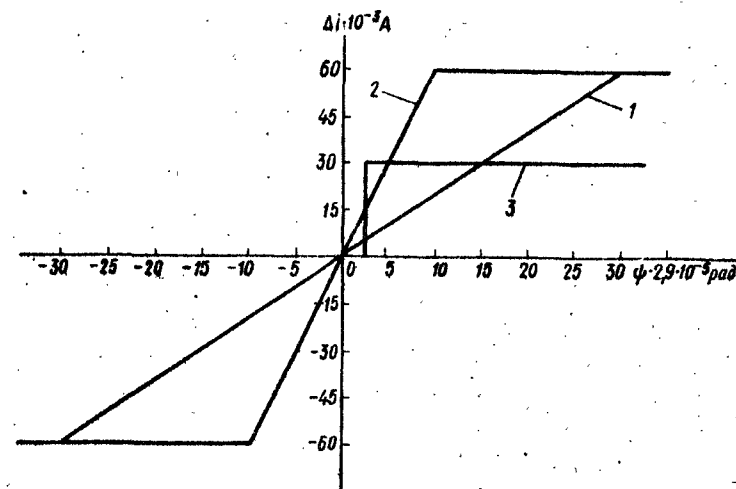


Рис. 5

Полученные зависимости нелинейны, причем нелинейность обусловлена ограничением сигнала преобразователя.

При аналитическом исследовании движения гироскопических приборов, имеющих в своем составе ЭПУ, последний обычно представляет в виде звена, статическая характеристика которого содержит линейный участок [3, 17]. Однако такое представление не всегда правильно.

Экспериментальные характеристики ЭПУ отличаются от расчетных наличием петли гистерезиса, зоны нечувствительности и переменным коэффициентом передачи.

В двухосных ЭПУ, кроме того, коэффициент передачи является функцией угла ψ поворота относительно перекрестной оси [12].

Уравнение, описывающее эту зависимость от угла ψ , имеет вид

$$\begin{aligned} \text{при } |\psi| < \frac{U_{\max}}{k\varphi} \quad U_{\psi} &= 0,4\psi - 0,22\psi + 0,8\psi^2 - 1,2\psi\varphi, \\ \text{при } |\psi| > \frac{U_{\max}}{k\varphi} \quad U_{\psi} &= U_{\max} \operatorname{sign} \psi. \end{aligned}$$

Если принять статическую характеристику при малых углах линейной, то уравнение колебаний напряжения на выходе ЭПУ, вызванное соответствующим колебанием пузырька, можно записать в виде

$$T^2 \frac{d^2 U_{\psi}}{dt^2} + 2T^2 \xi \frac{d U_{\psi}}{dt} + U_{\psi} (t - \tau) = k\psi(t_1), \quad /П.4/$$

где T — постоянная времени; $U_{\psi}(t - \tau)$ — выходное напряжение ЭПУ; ξ — относительный коэффициент затухания; k — коэффициент передачи; $\psi(t) = \psi_0$ при $0 \leq t < \infty$; τ — время запаздывания.

Величины T , ξ и τ характеризуют динамические свойства ЭПУ. При экспериментальном исследовании двухосных ЭПУ МПК-2 были получены следующие значения величин, входящих в уравнение /П.4/: $T = 0,3$ с; $\xi = 0,45$; $k = 0,175$; $\tau = 0,12$ с, при этом период свободных колебаний $T_0 = 2\pi T = 2$ с.

Как видно, уравнение /П.4/ отличается от уравнения колебаний пузырька /1.8/ тем, что оно является уравнением с запаздывающим аргументом, который обусловлен прохождением электрического тока через электролит.

П.2. Влияние температуры на характеристики ЭПУ

В процессе эксплуатации электролитические преобразователи угла, как правило, подвержены влиянию неоднородных температурных полей, которые могут вызвать заметные изменения их параметров. Рассмотрим механизм этого влияния в двух частных случаях: при нагреве ЭПУ по всему объему и при локальном нагреве.

В первом случае вследствие того, что материал, из которого изготовлена ампула, и электролит имеют различные коэффициенты объемного расширения, газовый пузырек с изменением температуры изменяет свой объем. Приращение объема пузырька ΔV можно выразить следующей зависимостью:

$$\Delta V = V - V_0 = (\alpha_1 - \alpha_2) V_0 (T - T_0), \quad /П.5/$$

где V и V_0 — объем газового пузырька при температуре T и T_0 соответственно; α_1 и α_2 — коэффициенты объемного расширения электролита и материала ампулы.

Изменение объема газового пузырька существенно влияет на время переходного процесса ЭПУ и его статическую погрешность /16/, так как изменяется при этом восстанавливающий момент M_1 , выражение для которого с учетом формул /1.6/ и /П.5/ можно записать в виде

$$M_1 = (V_0 \pm \Delta V) (\rho - \rho_1) g r \sin \psi,$$

где ρ_1 — плотность газа в пузырьке.

Кроме того, приращение объема газового пузырька влечет за собой изменение размеров его основания /мениска/, что также является причиной искажения статических характеристик ЭПУ. Действительно, при изменении длины пузырька изменяется отношение площадей контактов, покрытых электролитом и газовым пузырьком, что влияет на длину линейного участка статической характеристики.

К аналогичному результату приводит изменение равновесного краевого угла смачивания при повышении или понижении температуры.

В процессе изготовления внутренняя поверхность ампулы тщательно очищается от поверхностно-активных веществ, которые могут вступить в химическое взаимодействие с электролитом, поэтому в ЭПУ имеет место смачивание, обусловленное молекулярными силами. Влияние температуры T на краевые углы при смачивании описывается следующей зависимостью:

$$\frac{d(\cos \Theta_0)}{dT} = \frac{d}{dT} \left(\frac{W_a}{\sigma_{жг}} \right) = \frac{d}{dT} \left(\frac{P_{нб}}{\sigma_{жг}} \right), \quad /П.6/$$

где Θ_0 - равновесный краевой угол; W_a - работа сил адгезии, характеризующая взаимодействие контактирующих фаз; $\sigma_{жг}$ - поверхностное натяжение на границе раздела жидкость-газ; $P_{нб}$ - поверхностное /двумерное/ давление.

При смачивании работа сил адгезии в широком диапазоне изменения температуры почти не изменяется, поэтому приблизительно влияние температуры на краевые углы характеризует второй член правой части уравнения /П.6/

$$\frac{d}{dT} \left(\frac{P_{нб}}{\sigma_{жг}} \right) = \left(P_{нб} \frac{d\sigma_{жг}}{dT} - \frac{dP_{нб}}{dT} \right) \frac{1}{\sigma_{жг}^2}$$

Так как при смачивании поверхностные давления очень малы /15/, то можно считать, что

$$\frac{d}{dT} \left(\frac{P_{нб}}{\sigma_{жг}} \right) = \frac{1}{\sigma_{жг}^2} \frac{dP_{нб}}{dT}$$

Поверхностное давление тем выше, чем больше адсорбция. При нагреве физическая адсорбция уменьшается, поэтому

$$\frac{dP_{нб}}{dT} < 0.$$

Следовательно, можно считать, что $\frac{d \cos \Theta_0}{dT} > 0$, то есть при увеличении температуры смачивание улучшается вследствие увеличения десорбции молекул жидкости с поверхности ампулы.

Таким образом, повышение температуры токопроводящей жидкости уменьшает краевой угол смачивания, что обуславливает изменение площади перекрытия электродов.

Если ампулу ЭПУ, занимающего горизонтальное положение, нагревать локально таким образом, чтобы на одном торце ампулы температура была выше, чем на другом, то газовый пузырек переместится туда, где температура выше. Скорость перемещения зависит от градиента температуры вдоль продольной оси ампулы. При разности температур торцов ампулы ЭПУ ДЕМ-9Б, равной 10°C , время перемещения

газового пузырька из нулевого положения к нагретому торцу составляет 12 с, а при разности температур около 50°C это время уменьшается до 0,6 с. При выравнивании температуры жидкости в ампуле пузырек возвращается в нулевое положение /6/.

Рассматриваемое перемещение газового пузырька можно объяснить термокапиллярным эффектом /15/. Так как поверхностное натяжение в электролите при увеличении температуры уменьшается, то в этом случае состояние поверхностного слоя жидкости характеризуется градиентом поверхностного натяжения. Под его действием в поверхностном слое жидкости возникает поток, перемещающий газовый пузырек. Кроме потока жидкости, обусловленного термокапиллярным эффектом, возникает конвективное движение, также влияющее на равновесное положение газового пузырька.

При работе ЭПУ в системах горизонтальной коррекции гироскопических приборов градиент температуры токопроводящей жидкости вызывается неравенством токов, протекающих через электроды, и определяется разностью тепловой энергии, выделяемой на электродах, а также условиями теплообмена в ампуле.

Тепловую мощность P , развиваемую в цепи электрода ЭПУ, можно выразить следующей зависимостью:

$$P = I_1^2 R_1 = U^2 R_1 (R + R_1)^{-2},$$

где I_1 , R_1 - соответственно ток и сопротивление в цепи электрода; U - напряжение питания ЭПУ; R - сопротивление нагрузки. Так как сопротивление ЭПУ является функцией угла наклона, то при наклонах ампулы будет изменяться мощность в цепи электродов. На рис. 6 приведена зависимость $P = P(R_1)$, согласно которой максимальное значение мощности будет тогда, когда сопротивление в цепи электрода будет равно сопротивлению нагрузки.

Градиент температур при работе ЭПУ в системе горизонтальной коррекции может вызвать устойчивые автоколебания газового пузырька. Характерной особенностью этих колебаний является большой период /единицы секунд/, поэтому их не сглаживает гироскоп.

Механизм автоколебаний довольно прост. При отклонении ЭПУ на небольшой угол от плоскости горизонта пузырек под действием сил поля тяготения сместится относительно электродов. В результате токи, протекающие через электроды, станут неодинаковыми и нарушат однородность температурного поля. В таких условиях проявляются термокапиллярный эффект и конвекция, вызывающие силы, которые че-

рез определенное время начнут перемещать пузырек к тому электроду, в области которого плотность тока больше. При этом площади перекрытия электродов газовым пузырьком будут выравниваться, разность токов будет уменьшаться и, следовательно, будут уменьшаться градиент температур и силы, обусловленные им. Как только последние станут меньше сил тяготения, пузырек снова начнет двигаться в первоначальном направлении, что нарушит равновесие токов, и весь процесс повторится сначала.

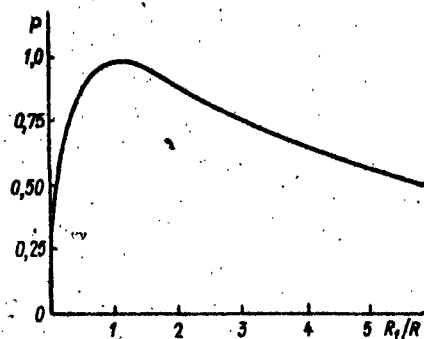


Рис. 6

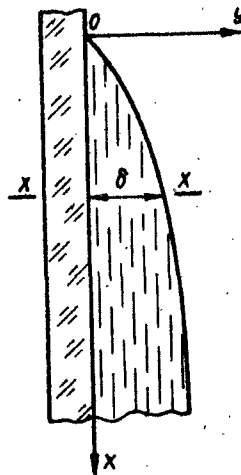


Рис. 7

П.3. Парогазообразование в объеме токопроводящей жидкости при работе ЭПУ ДЕМ и выключателей ВКМ

Одной из причин нарушения работы ЭПУ являются пузырьки газа, которые образуются под действием электрического тока, вызывающего при определенных условиях кипение электролита.

Рассмотрим условия, при которых происходит вскипание электролита. Обычно считают [10], что в герметичном сосуде, содержащем жидкость и посторонний газ над ней, вскипание невозможно, так как не выполняется необходимое условие вскипания — химический потенциал газа μ'_g на поверхности должен быть меньше химического по-

тенициала жидкости $\mu_{ж}$. Однако это утверждение оправдливо только в установившемся режиме общего нагрева жидкости в замкнутом объеме. В начале нагрева всегда выполняется условие вскипания

$\mu'_g < \mu_{ж}$ и имеет место испарение, которое увеличивает концентрацию пара в газовой среде, так как объем замкнутый. При этом в соответствии с выражением [10]

$$\mu_1(P, T) = \mu_1(P, T) + RT \ln x_1$$

где $\mu_1(P, T)$ — химический потенциал чистого 1-го газа, x_1 — концентрация 1-го газа в смеси, увеличивается химический потенциал пара в газовой смеси до тех пор, пока не станет равным химическому потенциалу жидкости $\mu_{ж}$, и кипение прекратится. Очевидно, что равенство $\mu'_g = \mu_{ж}$ будет выполняться только в установившемся режиме нагрева и испарения. В ЭПУ такой режим, как правило, не реализуется. При его работе происходит не общий и медленный, а локальный и быстрый нагрев жидкости, поскольку плотность тока, протекающего через электролит, сравнительно большая и неравномерно распределена по объему жидкости. Естественно, что наибольших значений плотность тока достигает в столбе жидкости между верхним и нижним электродами. И именно в этой области, как показали наблюдения, интенсивность образования пузырьков пара наибольшая. Это дает основание предположить, что в ампуле имеет место особый вид кипения — так называемое ненагретое, или недогретое кипение. Оно характеризуется тем, что в отличие от слоя, непосредственно примыкающего к нагревателю, ядро жидкости остается недогретым до температуры кипения T_k .

Мерой недогрева служит разность температур $\Delta T = T_k - T_0$, где T_0 — температура ядра жидкости.

При незначительных недогревах жидкости локальное кипение мало отличается от кипения насыщенного, например, если $\Delta T = 2^\circ$, то возникающие на поверхности нагревателя пузырьки пара, как и при насыщенном кипении, отрываются, всплывают до верхней границы жидкости и лопаются. Когда же температура недогрева достигает 6° , отрывающийся пузырек вследствие конденсации уменьшается в объеме до полного захлопывания, успевая всплыть лишь на небольшую высоту.

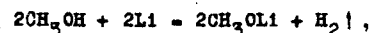
Таким образом, образование пузырьков пара при работе ЭПУ является результатом недогретого кипения токопроводящей жидкости,

а интенсивность этого процесса зависит от разности температур ΔT . Чем больше эта разность, тем меньше вероятность появления пузырьков в электролитическом преобразователе угла.

Исключить явления образования пузырьков в ЭПУ можно двумя путями - подбором электролита с возможно более высокой температурой кипения и увеличением давления во внутренней полости ампулы, так как механическое равновесие в системе жидкость-газовый пузырек обеспечивается при равенстве $P_d + P_g = P_{ж}$, где P_d, P_g - давление пара и газа в пузырьке соответственно, $P_{ж}$ - давление электролита.

Отметим, что начальное давление в полости ампулы определяется внешними условиями, при которых ампула заполняется токопроводящей жидкостью. Естественные колебания температуры окружающей среды и атмосферного давления могут привести к тому, что давление в газовой полости ЭПУ, изготовленных в разное время, будет разное. При одном и том же значении электрического тока /следовательно, и одинаковой температуре локального нагрева токопроводящей жидкости/ условия для недотретоного кипения будут более благоприятными в ЭПУ, заполненном при пониженном атмосферном давлении и повышенной температуре окружающей среды, так как разность ΔT в этом случае будет меньше.

Как показывает опыт эксплуатации ЭПУ, со временем интенсивность образования пузырьков уменьшается. Объясняется это тем, что растет давление во внутренней полости ампулы. Проведенные нами эксперименты позволяют утверждать, что причиной этого роста является электролиз токопроводящей жидкости. В электролитических преобразователях типа ДЖМ-9Б, ВКЖ в качестве электролита используется 2%-ный раствор хлористого лития в метилловом спирте, а электроды выполнены из платины. Такие электроды химически инертны по отношению к электролиту. Их участие в процессе электролиза сводится к тому, что они либо отдают электроны ионам раствора, либо отщепляют их от ионов, находящихся в растворе. При этом на аноде происходит окисление хлора: $2Cl^- - 2e^- = Cl_2$, который растворяется в токопроводящей жидкости. На катоде восстанавливается литий: $Li^+ + e^- = Li$. Так как литий очень активен, в прикатодной области будет происходить реакция



ведущая к образованию водорода. Выделение водорода повышает давление во внутренней полости ЭПУ.

Согласно первому закону Фарадея масса m выделившегося в результате электролиза водорода пропорциональна силе тока I и времени t его протекания через электролит: $m = k \cdot I \cdot t$, где $k = 1,045 \cdot 10^{-8}$ кг/Кл - электрохимический эквивалент водорода. Объем выделившегося газа определяется из соотношения

$$V = m/\rho,$$

где $\rho = 0,0899$ кг/м³.

При этом давление P во внутренней полости ЭПУ после прохождения постоянного тока через токопроводящую жидкость равно

$$P = P_0 + P_H V/V_{2n},$$

где P_0 - начальное давление во внутренней полости; P_H - давление водорода при нормальных условиях; V_{2n} - объем газовой полости в ампуле.

Как показывает опыт, с ростом давления замедляется процесс газообразования в электролите. Полное прекращение "пузырения" в испытуемых преобразователях наблюдается при давлении в газовом пузырьке $P = 1,8-2,5 \cdot 10^5$ Па.

Температура кипения электролита при этом повышается на 12-20°C /3/.

Следует отметить, что кратковременное /10-15 мин/ протекание постоянного тока 15 мА заметного влияния на электрические параметры ЭПУ не оказывает.

П.4. Электрический ток в газовом пузырьке ЭПУ

Опыт эксплуатации ЭПУ типа ДЖМ и ВКЖ показал, что существенное влияние на их рабочие характеристики оказывает электрический ток, протекающий через электрод, находящийся в газовой полости /этот ток называют "нулевым"/. В настоящее время причины, вызывающие ток в газовой полости электролитических преобразователей, изучены мало, и в специальной литературе это явление не остражено.

Газовая полость в ампуле содержит пары электролита, поэтому естественно предположить, что на внутренней стенке ампулы образуется пленка конденсата, соединяющая поверхность электролита с электродом.

Согласно закону Ома плотность тока j , протекающего в пленке конденсата, можно представить в виде

$$j = (F/N_A) z_+ n_{o+} (u_+ + u_-) E, \quad /П.7/$$

где F - число Фарадея; N_A - число Авогадро; z_+ - валентность положительных ионов; n_{o+} - число положительных ионов в единице объема конденсата; u_+, u_- - подвижность соответственно положительного и отрицательного ионов; E - напряженность электрического поля между электродами преобразователя.

Выражение для силы тока в газовой полости ЭПУ можно записать так:

$$I = \int_S j ds, \quad /П.8/$$

где S - площадь поперечного сечения пленки конденсата, зависящая от толщины δ .

Из выражений /П.7/ и /П.8/ следует, что ток в газовой полости определяется напряженностью электрического поля, геометрическими размерами ЭПУ и толщиной пленки конденсата, осевшего на отенках ампулы. Так как площадь поверхности, покрытой конденсатом, для заданной конструкции ЭПУ известна, то задача расчета тока в газовой полости сводится к определению величины δ .

Выражение для величины δ может быть получено из анализа уравнений движения конденсата по внутренней поверхности ампулы и уравнения теплового баланса для участка ампулы, на которой образуется конденсат.

Пусть пар конденсируется на внутренней поверхности ампулы ЭПУ ВКМ при его наклоне не угол 90° . Будем предполагать, что примесь воздуха в объеме пара незначительна/. Рассмотрим участок стенки ампулы /рис.7/ шириной, равной единице. Температуру стенки будем считать постоянной по высоте. Тогда дифференциальное уравнение движения для единичного объема конденсата в пленке можно записать в следующем виде:

$$g(\rho - \rho_1) + \mu \frac{\partial v_x}{\partial y^2} = 0, \quad /П.9/$$

где g - ускорение свободного падения; ρ_1 и ρ - плотность соответственно пара и жидкости; μ - динамический коэффициент вязкости; v_x - скорость движения единичного объема в пленке в сечении $x - x$ /рис.7/.

В уравнении /П.9/ вес единичного объема конденсата $g(\rho - \rho_1)$ уравнивается силой вязкости жидкости. Сила инерции, вызванная ускорением движения конденсата, как величина малая в уравнении не учтена.

Интегрируя выражение /П.9/, получим

$$v_x = \frac{g(\rho - \rho_1)}{2\mu} y^2 + c_1 y + c_2, \quad /П.10/$$

Постоянные интегрирования определим из граничных условий: при

$$y = 0 \quad v_x = 0; \quad \text{при } y = \delta \quad \partial v_x / \partial y = 0 \quad \text{где } \delta -$$

толщина пленки конденсата в сечении $x - x$. Подставив граничные условия в выражение v_x и $\partial v_x / \partial y$ получим $c_2 = 0$,

$$c_1 = g(\rho - \rho_1) \delta / \mu.$$

С учетом значения c_1 и c_2 выражение /П.10/, описывающее распределение скоростей в слое конденсата, примет вид

$$v_x = g(\rho - \rho_1) (y\delta - 0,5y^2) / \mu, \quad /П.11/$$

Количество жидкости, протекающей в единицу времени через сечение $x - x$ /при ширине пленки, равной единице/, определяется формулой

$$Q = \int v_x dy = g(\rho - \rho_1) \delta^3 / 3\mu, \quad /П.12/$$

где ν - кинематический коэффициент вязкости ($\nu = \mu / \rho$).

$$\text{Из выражения /П.12/ найдем } \delta = [30\nu / g(\rho - \rho_1)]^{1/3}.$$

Таким образом, толщина пленки увеличивается с ростом расхода жидкости в пленке по соотношению $\delta = \chi Q^{1/3}$, где χ - коэффициент пропорциональности.

Количество жидкости Q , которое определено соотношением /П.12/, образуется при конденсации пара на всем участке стенки.

Поэтому величина Q может быть получена из уравнения теплового баланса для участка длиной x при ширине сечения, равной единице:

$$q = \int_0^x q dx = \tau Q, \quad /П.13/$$

где q - тепловой поток, переданный стенке на участке ox ; q - плотность теплового потока; τ - теплота фазового перехода.

При ламинарном движении жидкостной пленки теплоперенос через нее осуществляется лишь путем теплопроводности. Если предположить, что температура частиц конденсата, соприкасающихся с паром, равна температуре кипения, то плотность теплового потока определяется выражением

$$q = \lambda (T_k - T_0) / \delta, \quad /П.14/$$

где λ — коэффициент теплопроводности конденсата; T_k — температура кипения жидкости, T_0 — температура стенки.

Подставив в уравнение /П.13/ величину δ из уравнения /П.12/ и q из уравнения /П.14/, получим

$$\lambda (T_k - T_0) \int_0^x \frac{1}{\delta(x)} dx = r_g \frac{\rho - \rho_1}{3\nu} \delta^3(x). \quad /П.15/$$

Поскольку при $x = 0$ толщина пленки равна нулю, то решение уравнения /П.15/ целесообразно искать в виде $\delta = B x^n$.

Подставляя это выражение в /П.15/, находим

$$\frac{\lambda (T_k - T_0)}{B} \frac{x^{1-n}}{1-n} = r_g (\rho - \rho_1) B^3 x^{3n} / 3\nu. \quad /П.16/$$

Состояние /П.16/ должно выполняться при любом x , а это возможно, если показатели степени при x в левой и правой частях равны: $1 - n = 3n$, отсюда $n = 1/4$. Подстановка n в /П.16/ дает

$$B = \left[4\lambda (T_k - T_0) \nu / r_g (\rho - \rho_1) \right]^{1/4}.$$

Таким образом, окончательно

$$\delta = \left[4\lambda (T_k - T_0) \nu x / r_g (\rho - \rho_1) \right]^{1/4}. \quad /П.17/$$

Аналогично можно получить выражение для средней толщины пленки конденсата на внутренней поверхности ампулы электролитического преобразователя при его горизонтальном положении

$$\bar{\delta} = \left[\lambda d_a (T_k - T_0) / r_g (\rho - \rho_1) \right]^{1/4}, \quad /П.18/$$

где d_a — внутренний диаметр ампулы.

Из анализа выражений /П.17/ и /П.18/ следует, что толщина пленки конденсата и, следовательно, "нулевой" ток определяются свой-

ствами жидкости /плотность, вязкость, теплопроводность/ и разностью температур $\Delta T = T_k - T_0$.

Отметим, что в ЭПУ, через которые в течение ограниченного времени пропускали постоянный ток, чтобы исключить образования пузырьков, наблюдается уменьшение "нулевого" тока. Объясняется это, по-видимому, тем, что в газовой полости увеличивается давление неконденсирующегося газа /водорода/, что приводит к уменьшению давления пара, т.е. к замедлению конденсации. В результате толщина пленки конденсата, а о ней и "нулевой" ток становится меньше.

Пример. Раосчитать среднее значение тока в газовом пузырьке ЭПУ при вертикальном положении его продольной оси и температуре $T_0 = 20^\circ\text{C}$, если: высота газового пузырька $h = 8 \cdot 10^{-3}$ м; ширина электрода $a = 4 \cdot 10^{-3}$ м; расстояние между электродами, находящимися в газовом пузырьке и электролите, $l = 2 \cdot 10^{-3}$ м; балластное сопротивление в цепи ЭПУ $R = 1$ кОм; напряжение питания схемы $U = 40$ В.

В качестве электролита используется 2 %-ный раствор хлоритого лития в метиловом спирте, температура кипения которого $T_k = 67,4^\circ\text{C}$; плотность $\rho = 792$ кг/м³; плотность насыщенного пара $\rho_1 = 1,65$ кг/м³. Теплота фазового перехода $r = 113 \cdot 10^4$ Дж/кг; кинематическая вязкость $\nu = 0,8 \cdot 10^{-6}$ м²/с; электропроводность $\gamma = 0,8$ См/м; коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,207$ Вт/м.К.

Среднюю толщину пленки конденсата, образующегося на внутренней поверхности ампулы и электрода, находим из выражения /П.17/:

$$\bar{\delta} = 1,25 \sqrt{\frac{4 \cdot 0,207 / 6,47 - 20 / 8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 \cdot 10^{-6}}{113 \cdot 10^4 \cdot 9,8 / 792 - 1,65}} \text{ м} = 9,02 \cdot 10^{-5} \text{ м}.$$

Площадь S поперечного сечения пленки конденсата на электроде и сопротивление R_n пленки найдем из очевидных соотношений

$$S = a \bar{\delta} = 4 \cdot 10^{-3} \cdot 9,02 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 = 3,61 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2,$$

$$R_n = \frac{1}{\gamma} \frac{1}{S} = \frac{1}{0,8} \cdot \frac{2 \cdot 10^3}{3,61 \cdot 10^{-7}} \text{ Ом} = 6,9 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Среднее значение тока в газовом пузырьке определим, используя закон Ома для участка цепи:

$$I_0 = \frac{U}{R_n + R} = \frac{40}{6,9 \cdot 10^3 + 1000} \text{ А} = 5,06 \cdot 10^{-3} \text{ А}.$$

Полученное значение "нулевого" тока согласуется с экспериментальными данными.

П.5. Влияние вибрации основания на характеристики ЭПУ

Одной из причин, которые ограничивают область применения ЭПУ, является их низкая виброустойчивость. При воздействии поступательной вибрации крутизна статической характеристики ЭПУ резко уменьшается. Экспериментальные исследования показали, что при вибрации выходной сигнал изменяется из-за волнового движения поверхности раздела жидкость-газ, которое приводит к деформации пузырька, следовательно, к изменению отношения площадей перекрытия регистрирующих электродов электролитом и пузырьком.

При некоторой перегрузке газовый пузырек разрушается, причем степень его дробления зависит от частоты. Чем выше частота, тем мельче пузырьки. Выходной сигнал ЭПУ при этом уменьшается до нуля.

После прекращения действия вибрации пузырек начинает восстанавливаться. Картина восстановления существенно зависит от того, включен преобразователь в цепь питания или выключен. В электрическом поле мелкие пузырьки, соединяясь между собой, образуют более крупные, и этот процесс длится до тех пор, пока в ампуле не останется два-три крупных пузырька, после чего процесс восстановления прекращается. При этом площадь электродов, покрытых электролитом, уменьшается. В зависимости от количества несоединившихся пузырьков и от угла наклона выходной сигнал ЭПУ будет разным, но всегда значительно меньшим, чем выходной сигнал ЭПУ при неразрушенном пузырьке.

Процесс восстановления газового пузырька прекращается вследствие того, что хаотичное дробление создает условия, при которых проявляется термокпиллярный эффект /см. п.П.2/. Этот вывод подтверждается тем, что при отключении ЭПУ от сети происходит быстрое /в течение 1 - 3 с/ восстановление пузырька.

Другой интересной особенностью поведения ЭПУ при вибрации является возбуждение низкочастотных колебаний газового пузырька с частотой порядка десятых долей герца. Экспериментально установлено, что такие колебания возникают только при определенных параметрах вибрации. Например, для ЭПУ ДЕМ-9Б такими параметрами являются частота вибрации 28 Гц и виброперегрузка 1,6 g.

Повысить виброустойчивость ЭПУ можно, используя в качестве наполнителя жидкость с большой вязкостью [7]. Однако этот путь не всегда приемлем, так как с ростом вязкости увеличивается статическая погрешность уровня и, кроме того, снижается удельная электропроводность электролита.

Другой путь повышения виброустойчивости - введение демпфирующих устройств. Примером может служить конструкция ЭПУ, в которой применен демпфер в виде цилиндра. Он расположен внутри ампулы, параллельно ее продольной оси [1]. Виброустойчивость такого ЭПУ на 40% выше, чем обычной конструкции.

Помимо прямого назначения демпфер выполняет роль компенсатора температурной погрешности. Как следует из выражения /П.5/, приращение объема электролита при изменении температуры пропорционально начальному объему. Так как при тех же габаритах объем электролита в ЭПУ с демпфером меньше, то и его приращение будет меньше.

III. ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В СИСТЕМАХ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

III.1. Типовые схемы систем горизонтальной коррекции гироскопических приборов

Системы коррекции авиагоризонтов и гировертикалей с двухосным ЭПУ отличаются в основном типом силового элемента, создающего коррекционный момент. В системе коррекции авиагоризонта АГК-47Б такими элементами являются соленоиды, в авиагоризонтах типа АГБ, АГИ, АГД - двухфазные индукционные моментные двигатели с короткозамкнутым ротором, в гировертикалях типа ЦГВ - двухфазные индукционные двигатели с полым немагнитным ротором типа ДИД.

Упрощенная принципиальная электрическая схема системы коррекции гировертикалей с двухосным ЭПУ /В1/ типа ДЕМ и соленоидом /С1/ изображена на рис. 8. На рис. 9 показана упрощенная схема системы коррекции гировертикалей с использованием двухосного электролитического преобразователя угла /В1/ типа ДЕМ и двухфазных индукционных моментных двигателей /М1 и М2/.

Системы коррекции гироскопов направления с двухосным ЭПУ типа ДЕМ и двухфазным индукционным моментным двигателем почти не отличаются от систем коррекции гировертикалей, выполненных на аналогичных элементах.

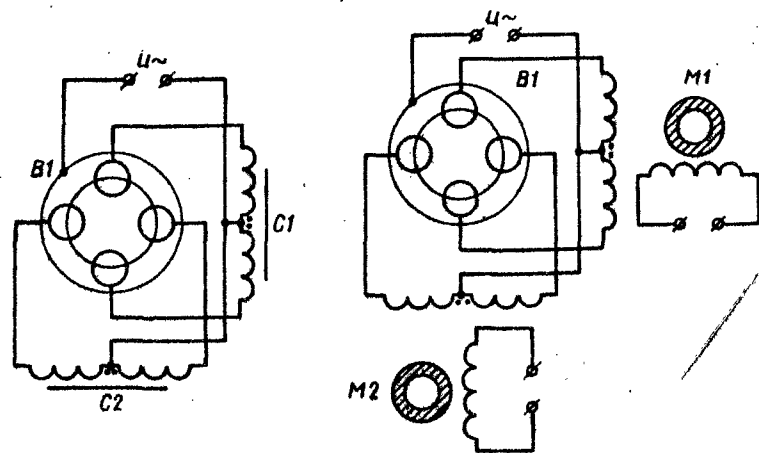


Рис. 8

Рис. 9

В конце 70-х годов были разработаны одноосные ЭПУ ДДМ-9Б, ДДМ-10Б и жидкостный выключатель коррекции ВКЖ. В ЭПУ типа ДДМ ослаблена перекрестная связь, увеличен срок службы, повышена чувствительность.

ЭПУ ДДМ-9Б применяются в современных приборах, а также используются для замены двухосных ЭПУ типа МДМ-2 при ремонте ранее выпущенных гироскопов. ЭПУ ДДМ-10Б предназначены для проектируемых приборов.

Системы коррекции современных гировертикалей, имеющие в своем составе одноосные ЭПУ и выключатели коррекции ВКЖ, отличаются не только типом силового элемента, но и типом чувствительного элемента.

На рис. 10 приведена принципиальная электрическая схема системы коррекции гировертикали. Система продольной коррекции ГВ содержит следующие элементы: два последовательно соединенных выключателя коррекции ВКЖ /В1 и В2/, электролитический преобразователь угла типа ДДМ-9Б /В3/, двухфазный индукционный моментный двигатель с короткозамкнутым ротором /М1/. Обмотки управления моментного двигателя, образующие мостовую схему, включены между собой последовательно-встречно и подсоединены к управляющим электродам уровня В3. Питание к этой схеме подводится через цепочку RC и общую точку обмотки управления двигателя М1.

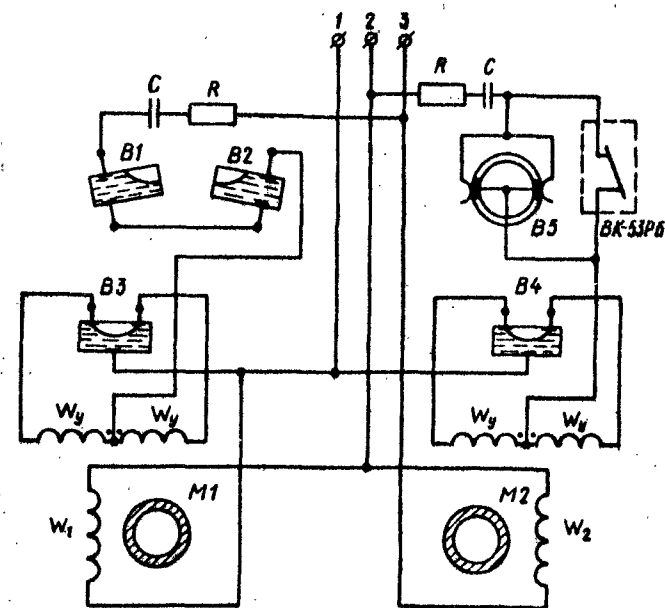


Рис. 10

При действии продольных линейных ускорений $|a| \geq 0,5 \text{ м/с}^2$ коррекционный момент, формируемый схемой продольной коррекции, уменьшается в 8 - 10 раз. Чувствительным элементом схемы, реагирующим на действие линейного ускорения, являются два выключателя ВКЖ /В1 и В2/, установленные под углом $3,5 \pm 0,5^\circ$ относительно плоскости горизонта и включенные последовательно. Переменный ток во время действия продольных линейных ускорений уменьшается в 8 - 10 раз из-за увеличения активного сопротивления на участке цепи, образованном выключателями В1 и В2.

Система поперечной коррекции ГВ содержит следующие элементы: контактный преобразователь угла /В5/, ЭПУ ДДМ-9Б /В4/ и двухфазный индукционный моментный двигатель с короткозамкнутым ротором /М2/. Обмотки управления двигателя, образующие мостовую схему, включены между собой последовательно-встречно и подсоединены к управляющим электродам преобразователя В4. Питание подается к схеме через цепочку RC и общую точку обмоток управления двигателя М2.

При развороте самолета с угловой скоростью $\omega_y = 0,05 - 0,15^\circ/\text{с}$ и угле крена до 13° поперечная коррекция ГВ выключается с помощью реле выключателя коррекции типа ВК-53 РБ, ВК-90 и др., а при углах крена более 23° - контактным преобразователем угла В5.

Отметим, что в сравнительно грубых гировертикалях в качестве чувствительных элементов системы коррекции целесообразно использовать выключатели типа ВК. Принципиальная электрическая схема такой системы коррекции показана на рис. II.

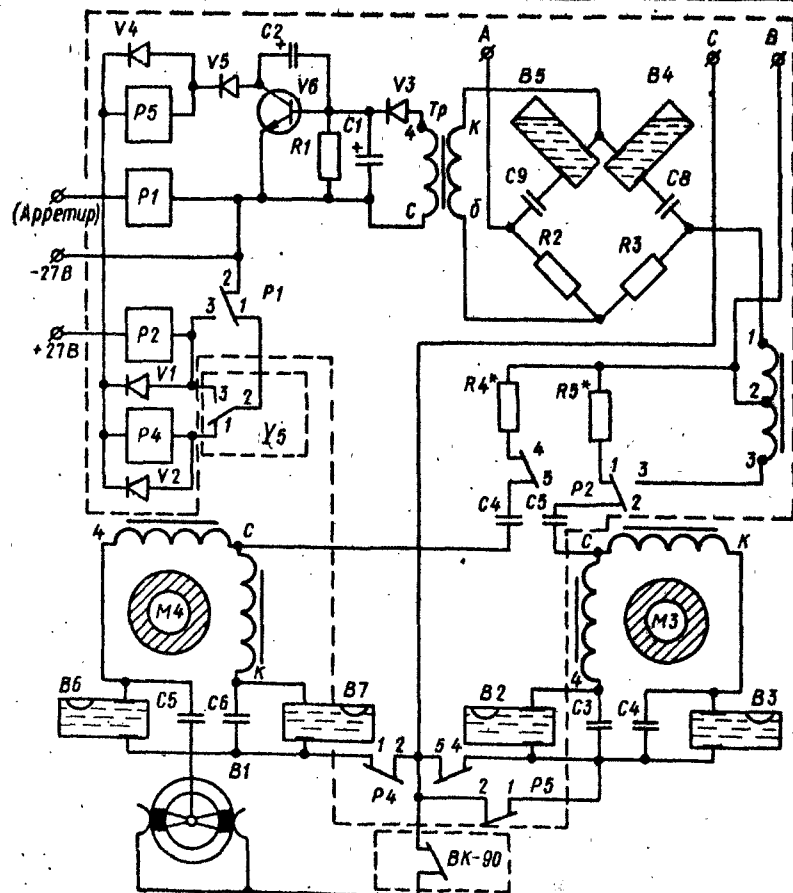


Рис. II

Система продольной коррекции ГВ содержит следующие элементы: выключатели коррекции типа ВК /В4, В5 и В2, В3/, секторный двухфазный индукционный моментный двигатель М3, фазосдвигающие конденсаторы С3 и С4, включенные параллельно управляющим электродам преобразователей В2 и В3. Для защиты выключателей от постоянной составляющей тока, вызывающей электролиз токопроводящей жидкости, в схему введен конденсатор С5.

При действии линейных продольных ускорений $a \geq \pm 0,5 \text{ м/с}^2$ продольная коррекция отключается контактами 1, 2 реле Р5. Чувствительным элементом, реагирующим на продольное линейное ускорение, являются два выключателя типа ВК /В4 и В5/, установленные под углом $3,5 \pm 0,5^\circ$ относительно плоскости горизонта и включенные по мостовой схеме совместно с резисторами R2 и R3. При появлении ускорений контакт одного из выключателей В4 или В5 в зависимости от знака ускорения размыкается. Равновесие мостовой схемы нарушается, и на первичную обмотку трансформатора Tr поступает переменное напряжение 30 В, 400 Гц. Это напряжение понижается в трансформаторе, выпрямляется диодом V3 и отпирает транзистор V6. Реле Р5, включенное в коллекторную цепь транзистора V6, срабатывает и контактами 1, 2 отключает цепь продольной коррекции. Конденсатор C1 является сглаживающим фильтром. Конденсатор C2 создает временную задержку отпускания реле Р5, исключая ложные срабатывания при случайных кратковременных изменениях проводимости выключателей В4 и В5 в разомкнутом положении. Диод V5 защищает транзистор V6 при обратной полярности постоянного напряжения. Диод V4 служит для снятия перенапряжений на коллекторе транзистора V6, возникающих в момент отпускания реле Р5.

Система поперечной коррекции ГВ /рис. II/ содержит следующие элементы: контактный преобразователь угла /В1/, два выключателя коррекции типа ВК /В6, В7/, секторный двухфазный индукционный моментный двигатель М4, фазосдвигающие конденсаторы С5 и С6, включенные параллельно управляющим электродам преобразователей В6 и В7. Для защиты выключателей от постоянной составляющей тока, как и в схеме продольной коррекции, применен конденсатор С4. При развороте самолета с угловой скоростью $\omega_y = 0,05 - 0,15^\circ/\text{с}$ и крене не более 9° поперечная коррекция выключается с помощью реле выключателя коррекции типа ВК-90, а при углах крена более 9° - контактным преобразователем угла В1.

При подаче напряжения питания срабатывает реле Р2, и в систему коррекции подается повышенное переменное напряжение 180 В с

автотрансформатора Тр. При этом укоренная поперечная и продольная системы коррекции обеспечивают угловую скорость прецессии гироскопа не менее 30 °/мин и приведение главной оси гироскопа к вертикали за время, не превышающее 90 с.

Особенности примененных моментных двигателей сводятся в основном к оледущему. В пазах отаторов двигателей МЗ и М4 уложены две обмотки управления, магнитные оси которых одвинуты в пространстве на угол 90°. Обмотки возбуждения отсутствуют. Ротором является стальное кольцо, покрытое снаружн слоем меди. Последовательно с каждой обмоткой управления моментного двигателя включен контур, состоящий из параллельно соединенных конденсатора и выключателя коррекции. Значение и направление корректирующего момента определяются амплитудой и фазовым соотношением токов в обмотках управления.

Приведенные охемы систем горизонтальной коррекции отражают тенденцию роста их сложности, что обусловлено повышением требований к современным гироскопическим приборам.

Ш.2. Влияние инерционности ЭПУ на автоколебания гировертикалей

Во многих случаях при тщательных лабораторных испытаниях наблюдаются автоколебания гировертикалей /ГВ/ и курсовых гироскопов с системой коррекции, в которой в качестве чувствительных элементов применяют одно-, двухосные ЭПУ и выключатели коррекции типа ВКМ. Отличительной особенностью автоколебаний является малая амплитуда, не превышающая нескольких угловых минут, и большой период — десятки секунд [3]. При работе гироскопов в режиме разгона ротора амплитуда автоколебаний на начальном этапе достигает нескольких градусов, а период уменьшается до нескольких секунд. Это существенно влияет на точность показаний гировертикалей /см. рис.12/. Инерционность ЭПУ при наличии моментов сил сухого трения в опорах карданового подвеса является основной причиной устойчивых автоколебаний гировертикали относительно положения равновесия.

Ограничимся анализом поведения ГВ с двухосным ЭПУ типа МПЖ-2. Рассмотрим движение ГВ в режиме разгона ротора. Уравнения движения ГВ вблизи положения равновесия запишем в виде [12]

$$H\ddot{\alpha} - K_1\dot{\alpha} + M_{2T} \text{sign}\beta = 0,$$

$$-H\ddot{\beta} - H\dot{\beta} + K_{2T}\dot{\beta} + M_{1T} \text{sign}\alpha = 0. \quad /Ш.1/$$

К ним необходимо добавить уравнения движения ЭПУ в пределах зонн пропорциональности

$$\begin{aligned} (T^2 p^2 + 2\xi T p + 1)\gamma_\alpha &= -(T^2 p^2 + 1)\alpha, \\ (T^2 p^2 + 2\xi T p + 1)\gamma_\beta &= -(T^2 p^2 + 1)\beta. \end{aligned} \quad /Ш.2/$$

где T, ξ — постоянная времени и относительный коэффициент демпфирования ЭПУ, $T = 0,4$ с, $\xi = 6$ [3].

Системы уравнения /Ш.1/, /Ш.2/ содержат нелинейные члены, обусловленные трением, которое может стать одной из причин автоколебаний гировертикалей. Покажем это. Используя метод гармонической линеаризации, выражения, содержащие трение, представим в виде

$$\omega_{1T} \text{sign}\alpha = q_1 p \alpha, \quad \omega_{2T} \text{sign}\beta = q_2 p \beta, \quad /Ш.3/$$

где $q_1 = 4M_{1T}/\lambda a H \omega$, $q_2 = 4M_{2T}/\lambda b H \omega$; a, b — амплитуда колебаний соответственно наружной и внутренней рамок; ω — частота автоколебаний.

Подставив /Ш.3/ в исходные уравнения, после преобразований получим следующее характеристическое уравнение систем:

$$\begin{aligned} a_0 p^6 + a_1 p^5 + a_2 p^4 + a_3 p^3 + a_4 p^2 + a_5 p + a_6 &= 0, \quad /Ш.4/ \\ \text{где} \\ a_0 &= T^4, \quad a_1 = 4\xi T^3 + (K_1 + K_2) T^4 + K_0 T^4; \\ a_2 &= 2\xi T^3 (K_1 + K_2) + T^4 K_1 K_2 + 2T^2 (1 + 2\xi^2) + K_0 K_1 T^4 + 4\xi T^3 K_0; \\ a_3 &= 4\xi T^2 + 2 (K_1 + K_2) T^2 + 4\xi^2 T^2 K_0 + 2T^2 K_0 + K_0 K_1^2 \xi T^3; \\ a_4 &= 0 + 2K_1 K_2 T^2 + 2\xi T (K_1 + K_2) + 4\xi T K_0 + 2K_0 K_1 T^2; \\ a_5 &= K_1 + K_2 + K_0 + 2\xi T K_0 K_1; \quad a_6 = K_1 K_2 + K_0 K_1; \\ K_{1,2} &= K_{1,2}/H; \quad K_0 = H/H; \quad 0 = 1 + q_1 q_2. \end{aligned}$$

автотрансформатора Тр. При этом ускоренная поперечная и продольная системы коррекции обеспечивают угловую скорость прецессии гироскопа не менее 30 °/мин и приведение главной оси гироскопа к вертикали за время, не превышающее 90 с.

Особенности примененных моментных двигателей сводятся в основном к следующему. В пазах статоров двигателей МЗ и М4 уложены две обмотки управления, магнитные оси которых сдвинуты в пространстве на угол 90°. Обмотки возбуждения отсутствуют. Ротором является стальное кольцо, покрытое снаружи слоем меди. Последовательно с каждой обмоткой управления моментного двигателя включен контур, состоящий из параллельно соединенных конденсатора и выключателя коррекции. Значение и направление корректирующего момента определяются амплитудой и фазовым соотношением токов в обмотках управления.

Приведенные схемы систем горизонтальной коррекции отражают тенденцию роста их сложности, что обусловлено повышением требований к современным гироскопическим приборам.

Ш.2. Влияние инерционности ЭПУ на автоколебания гировертикалей

Во многих случаях при тщательных лабораторных испытаниях наблюдаются автоколебания гировертикалей /ГВ/ и курсовых гироскопов с системой коррекции, в которой в качестве чувствительных элементов применяют одно-, двухосные ЭПУ и выключатели коррекции типа ВКЖ. Отличительной особенностью автоколебаний является малая амплитуда, не превышающая нескольких угловых минут, и большой период — десятки секунд [3]. При работе гироскопов в режиме разгона ротора амплитуда автоколебаний на начальном этапе достигает нескольких градусов, а период уменьшается до нескольких секунд. Это существенно влияет на точность показаний гировертикалей /см. рис.12/. Инерционность ЭПУ при наличии моментов сил сухого трения в опорах карданового подвеса является основной причиной устойчивых автоколебаний гировертикали относительно положения равновесия.

Ограничимся анализом поведения ГВ с двухосным ЭПУ типа МПЖ-2. Рассмотрим движение ГВ в режиме разгона ротора. Уравнения движения ГВ вблизи положения равновесия запишем в виде [12]

$$n\ddot{\alpha} - k_1\ddot{\alpha} + M_{2T} \text{sign}\beta = 0,$$

$$-n\ddot{\beta} - \ddot{\beta} + k_{2T}\ddot{\beta} + M_{1T} \text{sign}\alpha = 0. \quad /Ш.1/$$

К ним необходимо добавить уравнения движения ЭПУ в пределах зон пропорциональности

$$\begin{aligned} (T^2 p^2 + 2\xi T p + 1)\gamma_\alpha &= -(T^2 p^2 + 1)\alpha, \\ (T^2 p^2 + 2\xi T p + 1)\gamma_\beta &= -(T^2 p^2 + 1)\beta, \end{aligned} \quad /Ш.2/$$

где T, ξ — постоянная времени и относительный коэффициент демпфирования ЭПУ, $T = 0,4$ с, $\xi = 6$ [3].

Системы уравнений /Ш.1/, /Ш.2/ содержат нелинейные члены, обусловленные трением, которое может стать одной из причин автоколебаний гировертикалей. Покажем это. Используя метод гармонической линеаризации, выражения, содержащие трение, представим в виде

$$\omega_{1T} \text{sign}\dot{\alpha} = q_1 p \alpha, \quad \omega_{2T} \text{sign}\dot{\beta} = q_2 p \beta, \quad /Ш.3/$$

где $q_1 = 4M_{1T}/\lambda a n \omega$, $q_2 = 4M_{2T}/\lambda b \omega n$; a, b — амплитуда колебаний соответственно наружной и внутренней рамок; ω — частота автоколебаний.

Подставив /Ш.3/ в исходные уравнения, после преобразований получим следующее характеристическое уравнение системы:

$$\begin{aligned} a_0 p^6 + a_1 p^5 + a_2 p^4 + a_3 p^3 + a_4 p^2 + a_5 p + a_6 &= 0, \quad /Ш.4/ \\ \text{где} \quad a_0 &= T^4, \quad a_1 = 4\xi T^3 + (K_1 + K_2) T^4 + K_0 T^4; \\ a_2 &= 2\xi T^3 (K_1 + K_2) + T^4 K_1 K_2 + 2T^2 (1 + 2\xi^2) + K_0 K_1 T^4 + 4\xi T^3 K_0; \\ a_3 &= 4\xi T + 2(K_1 + K_2) T^2 + 4\xi^2 T^2 K_0 + 2T^2 K_0 + K_0 K_1^2 \xi T^3; \\ a_4 &= 0 + 2K_1 K_2 T^2 + 2\xi T (K_1 + K_2) + 4\xi T K_0 + 2K_0 K_1 T^2; \\ a_5 &= K_1 + K_2 + K_0 + 2\xi T K_0 K_1; \quad a_6 = K_1 K_2 + K_0 K_1; \\ K_{1,2} &= K_{1,2}/n; \quad K_0 = \dot{n}/n; \quad 0 = 1 + q_1 q_2. \end{aligned}$$

Для отыскания параметров автоколебаний подставим в характеристическое уравнение /Ш.4/ $p = j\omega$ и приравняем вещественную и мнимую его части нулю

$$a_1 \omega^5 - a_3 \omega^3 + a_5 \omega = 0 \quad /Ш.5/$$

$$-a_0 \omega^6 + a_2 \omega^4 - a_4 \omega^2 + a_6 = 0$$

Из первого уравнения /Ш.5/ следует

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{a_3}{2a_1} \pm \left[\left(\frac{a_3}{2a_1} \right)^2 - \frac{a_5}{a_1} \right]^{1/2}$$

Подставляя в это выражение значения коэффициентов характеристического уравнения и учитывая, что $K_0 \ll K_{1,2}$, $(K_1 + K_2) T^4 \ll 4\xi T^0$, после преобразований приходим к следующей приближенной формуле для определения частоты автоколебаний:

$$\omega_1^2 \approx \frac{1}{T}, \quad \omega_2^2 = \frac{K_1 + K_2 + K_0 + 2\xi T K_0 K_1}{4\xi T^0} \quad /Ш.6/$$

Подставляя значение частот /Ш.6/ во второе уравнение /Ш.5/, легко убедиться, что при частоте $\omega = \omega_1$ значение коэффициента $C=0$, что не имеет физического смысла. При частоте $\omega = \omega_2$ получается следующее уравнение для определения амплитуды автоколебаний:

$$b_0 a^2 + b_1 a + b_2 = 0 \quad /Ш.7/$$

где $b_0 = a_6 a^2 - \alpha$; $b_1 = 2T^2 (1 + 2\xi^2) - \alpha (a_4 - a)$;

$$b_2 = a_2 - 2T^2 a (1 + 2\xi^2) - T^4/2; \quad \alpha = 4\xi T / (K_1 + K_2)$$

Очевидно, что при указанных значениях параметров ЭПУ /или близких к ним/ $b_1 > 0$, $b_2 > 0$:

Необходимым и достаточным условием существования автоколебаний при $\sigma = 1 + q_1 q_2$ будет неравенство $\sigma > 1$, которое может выполняться как при $b_0 > 0$, так и при $b_0 < 0$. Можно показать, что условие $\sigma > 1$ сводится к неравенствам

$$|b_2| > (b_0 - b_1) > 0 \quad \text{при } b_0 > 0,$$

$$|b_2| > (b_0 - b_1)$$

$$\text{при } b_0 < 0$$

которые выполняются в довольно широком диапазоне параметров гиравертикалей.

Отметим, что автоколебания будут наблюдаться и в том случае, когда один канал системы коррекции отключен, но частота их будет меньше.

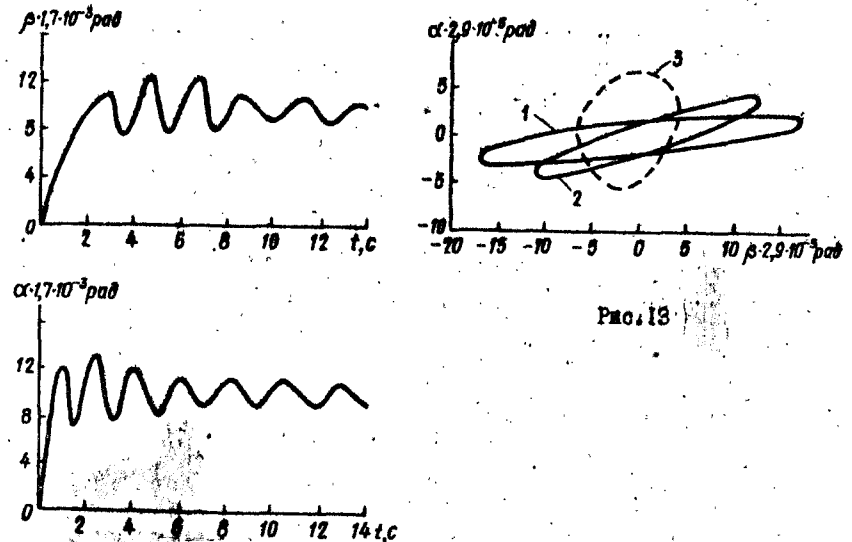


Рис. 13

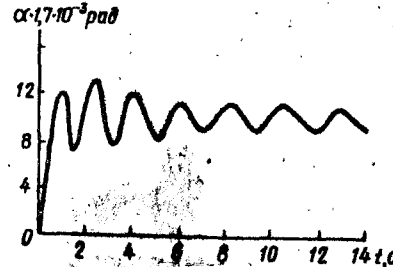


Рис. 12

Полученные формулы для расчета частоты и амплитуды автоколебаний являются довольно сложными. В некоторых случаях определенное упрощение дает следующее представление уравнений движения ЭПУ /З/:

$$(T_2 p + 1) \gamma_\alpha = -\alpha, \quad (T_2 p + 1) \gamma_\beta = -\beta \quad /Ш.8/$$

где $T_2 = 2 T$.

Тогда характеристическое уравнение примет вид

$$a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4 = 0 \quad /Ш.9/$$

$$\begin{aligned} \text{где } a_0 &= T_2^2 c; \quad a_1 = 2T_2 c + K_0 T_2^2; \\ a_2 &= c + (K_1 + K_2) T_2 + 2T_2 K_0; \\ a_3 &= K_1 + K_2 + K_0 + T_2 K_0 K_1; \quad a_4 = K_1 K_2 + K_0 K_1. \end{aligned}$$

Частоту автоколебаний можно найти из выражения

$$\omega = \left[(K_1 + K_2 + K_0 + T_2 K_0 K_1) / (2T_2 c + K_0 T_2^2) \right]^{1/2}, \quad / \text{Ш.10}/$$

которое с точностью до величин второго порядка малости совпадает с выражением /Ш.6/.

Амплитуду автоколебаний можно определить из равенства

$$c \approx T_2 a_3^2 / 2 (2T_2 a_4 - a_3). \quad / \text{Ш.11}/$$

После элементарных преобразований, пренебрегая влиянием проекции момента реакции статора на наружную ось ($K_0 = 0$), получаем

$$\omega = \frac{1}{T_2} \sqrt{2T_2 \frac{K_1 K_2}{K_1 K_2} - 1}, \quad / \text{Ш.12}/$$

$$a \cdot b = \frac{32}{K^2} \frac{\omega_{1T} \omega_{2T} T_2^2 (K_1 + K_2)}{(K_1 K_2)^2 T_2 - 4T_2 K_1 K_2 + 2(K_1 + K_2)}.$$

Если предположить, исходя из физических соображений, что

$$a / b = \omega_{2T} / \omega_{1T}, \quad / \text{Ш.13}/$$

то амплитуды автоколебаний рамок гировертикали можно определить по формулам

$$a = 4\omega_{2T} \Delta / K, \quad b = 4\omega_{1T} \Delta / K, \quad / \text{Ш.14}/$$

где

$$\Delta = \sqrt{\frac{2T_2^2 (K_1 + K_2)}{(K_1 + K_2)^2 T_2^2 - 4T_2 K_1 K_2 + 2(K_1 + K_2)}}.$$

Из формулы /Ш.12/ следует, что автоколебания возможны только при $2K_1 K_2 / (K_1 + K_2) > T^{-2}$. В случае равенства угловых скоростей коррекции $K_1 = K_2 = K_3$ приходим к $K > T^{-2}$. Последнее неравенство можно представить в виде

$$\omega_K > \sqrt{1 - \alpha, \beta} T^{-2} \quad (1 - \alpha, \beta), \quad / \text{Ш.15}/$$

удобном для численных оценок.

Согласно формуле /Ш.12/ при отключении одного канала системы коррекции автоколебания исчезают, что противоречит ранее приведенным экспериментальным результатам. Следовательно, уравнениями /Ш.8/ движения ЭПУ можно пользоваться только при качественном анализе автоколебаний ГВ. Для анализа автоколебаний курсовых гироскопов о системой коррекции, включающей ЭПУ, или же автоколебаний ГВ при отключении одного канала системы коррекции уравнения ЭПУ необходимо записать в форме /Ш.2/.

Пример. Вычислим период и амплитуду автоколебаний указанных приборов с устоявшимся кинетическим моментом при следующих параметрах ГВ: $\omega_{1K} = \omega_{2K} = 2,91 \cdot 10^{-4} \text{ рад/с}$; $\omega_n = 8 \cdot 10^{-4} \text{ рад/с}$;

$\nu_{\text{ам}} = \nu_{\text{рм}} = 15,2,91 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$; $\omega_{2T} = 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ рад/с}$ курсового гироскопа: $\omega_{1K} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ рад/с}$; $\nu_{\text{рм}} = 15,2,91 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$; $T_2 = 4,8 \text{ с}$; $T = 0,4 \text{ с}$; $\xi = 6$.

Используя очевидное соотношение $K_1 = \omega_K / \nu$, получим в ГВ $K_1 = K_2 = K = 0,62 \text{ 1/с}$, в курсовом гироскопе $K_1 = 0,34 \text{ 1/с}$. При этом период автоколебаний ГВ

$$T_0 = \frac{2K}{T_2 K - 1} = \frac{2K T_2}{T_2 K - 1} = 20 \text{ с},$$

а амплитуда автоколебаний

$$a = 4\omega_{2T} T_2 / K = 4,88 \cdot 10^{-4} \text{ рад}; \quad b = 4\omega_{1T} T_2 / K = 48,8 \cdot 10^{-4} \text{ рад}.$$

Для оценки периода автоколебаний курсового гироскопа воспользуемся формулой /Ш.5/, считая, что параметр c является общим для ГВ и курсового гироскопа. В этом случае расчетное значение периода около 40 с.

Автоколебания гировертикалей и курсовых гироскопов с параметрами, близкими к приведенным в примере, исследованы экспериментально. При этом были получены следующие результаты: период автоколебаний ГВ 14 с, а курсового гироскопа - 30 с; амплитуда автоколебаний внутренней рамки ГВ $b = 12,3 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$, а курсового гироскопа - $18-10/3 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$. Амплитуда автоколебаний наружной рамки ГВ $a = 1,5,3 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$.

Отметим, что на практике наблюдается ошущественная зависимость амплитуды колебаний от моментов дебаланса /рис. 13/. Фазовая траек-

тория изображающей точки I соответствует сбалансированному прибору, траектория 3 - ГВ с моментом дебаланса относительно оси наружной рамки, равным $28 \cdot 10^{-3}$ Н.м, и траектория 2 - ГВ с моментом дебаланса относительно оси наружной рамки, равным $19,2 \cdot 10^{-5}$ Н.м. Влияние момента дебаланса на амплитуды автоколебаний объясняется тем, что крутизна статической характеристики ЭПУ зависит от его угла наклона относительно перекрестной оси /см. П.1/. Под действием моментов дебаланса центр колебаний жидкости смещается на фазовой плоскости относительно начала координат. Амплитуда колебаний будет уменьшаться как при убывании, так и при росте моментов дебаланса.

Анализ формул для частоты и амплитуды автоколебаний показывает, что с точностью до величин второго порядка малости проекция момента реакции статора на ось вращения наружной рамки не оказывает существенного влияния на параметры автоколебаний. Это позволяет использовать одни и те же формулы для определения частоты и амплитуды автоколебаний ГВ в установившемся режиме вращения ротора и в процессе разгона. Поскольку сразу же после разарретирования кинетический момент мал, то амплитуда и частота автоколебаний будут сравнительно большими /рис. 12/.

Таким образом, для повышения точности гиросприборов, в системах горизонтальной коррекции которых применяются ЭПУ, необходимо стремиться к уменьшению их постоянных времени и увеличению зоны пропорциональности их статических характеристик.

III.3. Расчет параметров одноосного ЭПУ

При расчете параметров ЭПУ необходимо учитывать особенности электрической схемы коррекции, в которой он применяется, а также влияние изменения положения центра масс ЭПУ на возмущающие моменты прибора в условиях эксплуатации и испытания. Если ЭПУ служит чувствительным элементом системы коррекции курсового гироскопа, то следует учитывать моменты дебаланса M_{∂} относительно оси вращения внутренней рамки, которые, как известно, вызывают азимутальный уход гироскопа.

В качестве исходных данных используем:

- максимальный момент дебаланса M_{∂} ;
- максимальный угол регулирования ψ_n ;
- плотность электролита ρ ;
- удельную электропроводность электролита γ ;

- допустимую температуру нагрева электролита ЭПУ;
- максимальный ток в обмотке управления моментного двигателя;
- параметры моментного двигателя;
- напряжение и частоту источника питания.

Для проектирования ЭПУ необходимо определить следующие параметры ЭПУ и системы коррекции:

- внутреннее сопротивление ЭПУ;
- геометрические размеры ампулы;
- геометрические размеры электродов и их расположение в ампуле;
- объем газового пузырька;
- максимальный ток, протекающий через электроды.

Расчет внутреннего сопротивления и геометрической проводимости ЭПУ. При определении первой характеристики нужно принимать во внимание, что токопроводящая жидкость /ТЖ/ имеет отрицательный температурный коэффициент сопротивления. Эту особенность целесообразно использовать для температурной компенсации изменения сопротивления обмотки управления при одинаковых температурах перегрева ЭПУ и моментного двигателя.

Зная активное сопротивление обмотки управления $R_{\text{оу}}$ моментного двигателя, можно вычислить значение внутреннего сопротивления ЭПУ, занимающего горизонтальное положение:

$$R_{1-3} = R_{2-3} = R_{\text{оу}} \beta_{\text{ж}} / \beta_{\text{тжж}} \quad \text{III.16/}$$

где $R_{1-3} = R_{2-3}$ - внутреннее сопротивление ЭПУ между электродами; $\beta_{\text{ж}}$ - температурный коэффициент сопротивления медного провода; $\beta_{\text{тжж}}$ - температурный коэффициент сопротивления ТЖ.

После того как определено внутреннее сопротивление ЭПУ, легко найти при заданной удельной электропроводности γ ТЖ значение геометрической проводимости G_{1-3} и G_{2-3} между электродами по формулам

$$G_{1-3} = 1 / R_{1-3} \gamma, \quad G_{2-3} = 1 / R_{2-3} \gamma \quad \text{III.17/}$$

Расчет геометрических размеров ампулы, электродов и объема газового пузырька. Геометрические размеры ампулы определим, исходя из того, что при наклонах ЭПУ на угол $\psi = \pm 90^\circ$ ток в цепи электродов 1-3 и 2-3 должен быть равен нулю, так как электроды 1 или 2 полностью находятся в газовом пузырьке.

В качестве базового размера в ЭПУ прием внутренний диаметр ампулы d_a , выражая все основные геометрические размеры через него.

Для того чтобы зона линейности статической характеристики ЭПУ рассматриваемой конструкции была наибольшей, объем газового пузырька должен быть таким, чтобы при горизонтальном положении ЭПУ пузырек перекрывал электроды до их середины /рис. 14/. При смещении пузырька в крайнее, например, левое положение верхний электрод шириной a должен находиться в газовом пузырьке. Для этого ампулу в вертикальном положении / $\psi = \pm 90^\circ$ / нужно заполнять электролитом так, чтобы зазор между краем электрода и краем мениска токопроводящей жидкости равнялся Δ . Расстояние Δ от края ампулы до электрода выбирают обычно равным 0,2 диаметра d_a , что обусловлено особенностями технологии. Тогда при вертикальном положении ампулы высота h ее части, не заполненной жидкостью, будет равна

$$h = a + 2\Delta = 1,4 d_a. \quad /Ш.18/$$

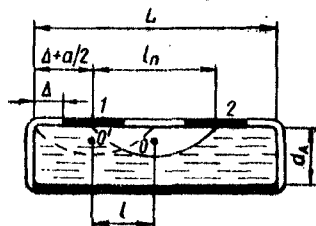


Рис. 14

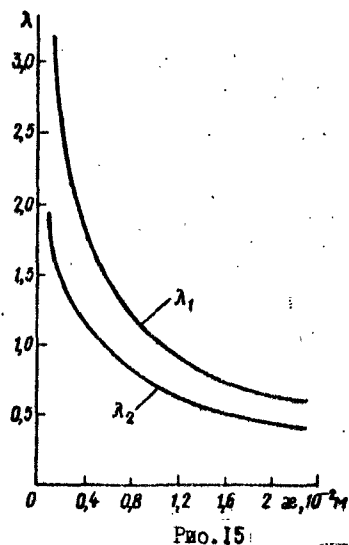


Рис. 15

Объем газовой полости в соответствии с рис. 15 равен

$$V = \pi d_a^2 h / 4 = 1,4 \pi d_a^2 / 4 = 0,35 \pi d_a^2. \quad /Ш.19/$$

Как известно, объем газовой полости влияет на момент дебаланса, который возникает при перемещении пузырька. Этот момент не должен превышать допустимого значения момента дебаланса $M_{g\delta}$ согласно выражению

$$V_2 \rho g l < M_{g\delta}, \quad /Ш.20/$$

где ρ — плотность ППЖ; g — ускорение свободного падения; l — максимальное перемещение центра тяжести жидкости; $V_2 \rho$ — масса токопроводящей жидкости в объеме, соответствующем объему газового пузырька.

Величину l , входящую в формулу /Ш.20/, с точностью до величины второго порядка малости легко определить из соотношения

$$l \approx 0,5 a + \Delta = 0,5 d_a + 0,2 d_a = 0,7 d_a,$$

которое следует непосредственно из рис. 14.

Теперь при заданном допустимом моменте дебаланса $M_{g\delta}$ найдем объем газового пузырька

$$V = M_{g\delta} / 0,7 \rho g d_a. \quad /Ш.21/$$

Сравнивая формулы /Ш.21/ и /Ш.19/, представим диаметр ампулы d_a через заданный момент дебаланса и плотность жидкости:

$$d_a = (M_{g\delta} / 0,3 \rho g)^{1/4}. \quad /Ш.22/$$

Известно, чем больше радиус r кривизны внутренней поверхности ампулы, тем чувствительнее ЭПУ. Этот радиус легко определить из соотношения

$$r \psi_n = 0,5 d_a, \quad /Ш.23/$$

отражающего тот факт, что при максимальном значении угла регулирования ψ_n пузырек омеотится так, что полностью перекроет один из электродов.

Для определения расстояния l_n между геометрическими центрами верхних электродов 1 и 2 при заданной температуре токопроводящей жидкости в рабочем режиме воспользуемся следующей формулой [5]:

$$l_n = 2,5 V_g / d_a^2, \quad /Ш.24/$$

где V_g — объем газового пузырька.

Учитывая найденное значение геометрической проводимости G определим теперь размеры электродов a , b и расстояние между ними x .

Для решения этой задачи воспользуемся соотношениями, приведенными в табл. I, которые охватывают практически все известные разновидности конструкций ЭПУ. Применительно к рассматриваемой конструкции одноосного ЭПУ с цилиндрической ампулой выберем, исходя из простоты изготовления, электроды прямоугольной формы шириной b /в табл. I размер b направлен перпендикулярно к плоскости чертежа/.

Длина a верхних электродов 1 и 2, как показано выше, равна $a = d_a$, а нижнего 3 - длине ампулы. Среднее значение расстояния между электродами $x \approx d_a$.

Для такой конструкции ЭПУ согласно табл. I -

$$G = ab/x + a\lambda_1 + b\lambda_2 + x\lambda_1\lambda_2, \quad /Ш.25/$$

где λ_1 и λ_2 - коэффициенты, зависящие от x , определяются из рис. 15.

Учитывая, что $x = a - d_a$, формулу /Ш.25/ перепишем в виде

$$a = b(1 + \lambda_1) + \lambda_1(1 + \lambda_1)d_a, \quad /Ш.26/$$

откуда

$$b = [a - \lambda_1(1 + \lambda_1)d_a] / (1 + \lambda_1). \quad /Ш.27/$$



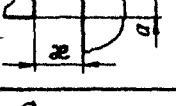
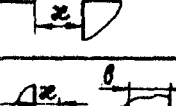
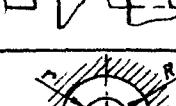

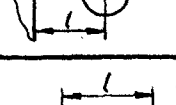
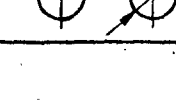
Расчет максимального тока, протекающего через ЭПУ. Максимальный ток, протекающий через электролит между электродами 1-3 или 2-3, определяется допустимой температурой $\Theta_{доп}$ перегрева электролита.

Для определения температуры перегрева электролита Θ относительно окружающей среды воспользуемся уравнением теплового баланса одноосного ЭПУ, которое представим в форме

$$0,24 \cdot 10^{-5} W_{1-3} dt = c d\Theta + \nu S \Theta dt + \gamma \Theta dt, \quad /Ш.28/$$

где $0,24 \cdot 10^{-5} W_{1-3}$ - тепловая энергия, выделяемая в преобразователе; c - теплоемкость ЭПУ; ν - коэффициент теплоотдачи в окружающую среду; S - поверхность охлаждения; γ - тепловая проводимость узлов крепления.

Таблица 1

Форма электродов	Расчетные формулы
	$G = \frac{ab}{x} + a\lambda_1 + b\lambda_2 + x\lambda_1\lambda_2$
	$G = \frac{ab}{x} + a\lambda_1 + b\lambda_2 + x\lambda_1\lambda_2$
	$G = \frac{ab}{x} + a\lambda_1 + b\lambda_2 + x\lambda_1\lambda_2$
	$G = b\lambda_1 + x\lambda_1\lambda_2$
	$G = \frac{ab}{x} + a\lambda_1 + b\lambda_2 + (-\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2})^2 x$
	$G = \frac{2\pi b}{\ln R/r}$
	$G = \frac{2\pi b}{\ln \frac{1 + \sqrt{1 + r^2}}{r^2}}$
	$G = \frac{\pi b}{\ln \frac{1 + \sqrt{1 + d^2}}{d}}$

Решение уравнения /Ш.28/ имеет вид

$$\theta = D e^{-t/T} + 0,24 \frac{1_{1-3}^2 R_{1-3}}{(\sqrt{s} + Y)} \quad /Ш.29/$$

При нулевых условиях постоянная интегрирования D равна

$$D = -0,24 \frac{1_{1-3}^2 R_{1-3}}{(\sqrt{s} + Y)}$$

Окончательно решение уравнения записывается в форме

$$\theta = (1 - e^{-t/T}) 0,24 \frac{1_{1-3}^2 R_{1-3}}{(\sqrt{s} + Y)}$$

Отсюда установившееся значение температуры перегрева будет равно

$$\theta_{уст} = 0,24 \frac{1_{1-3}^2 R_{1-3}}{(\sqrt{s} + Y)} \quad /Ш.30/$$

Как видно из формулы /Ш.30/, установившееся значение температуры перегрева наружной поверхности ампулы относительно окружающей среды зависит от соотношения \sqrt{s} и Y . Тепловая проводимость узлов крепления и регулировки ампулы ЭПУ, в свою очередь, зависит от их конструкции. При приближенных расчетах, если $\theta_{уст} < 70 - 80^\circ\text{C}$, можно воспользоваться следующим соотношением:

$$\sqrt{s} + Y = \sqrt{s} (1 + Y/\sqrt{s}) = \sqrt{s} (1 + K_3),$$

где $K_3 = 0,10 - 0,25$.

С учетом этого соотношения выражение /Ш.30/ перепишем в виде

$$\theta_{уст} = 0,24 \frac{1_{1-3}^2 R_{1-3}}{\sqrt{s} (1 + K_3)} \quad /Ш.31/$$

Отсюда, положив $\theta_{уст} = \theta_{гор}$, найдем допустимое значение тока, протекающего через электроды ЭПУ, в положении "электрического горизонта" по следующей формуле:

$$1_{1-3} = 1_{2-3} = \left[\frac{\theta_{гор} \sqrt{s} (1 + K_3)}{0,24 R_{1-3}} \right]^{1/2} /Ш.32/$$

Входящая в формулу /Ш.32/ поверхность охлаждения ампулы определяется из соотношения

$$S_{бок} + 2S_{торца} = \pi d^2 (L/d + 0,5)$$

Здесь d - наружный диаметр ампулы $d = d_a + 2l_1$, где l_1 - толщина стенки ампулы, L - длина ампулы, равная $L = 2\Delta + l_n + d_a$.

Пример. Определить основные геометрические размеры одноосного ЭПУ с углом регулирования $\psi = \pm 10^\circ$ при допустимом моменте дебаланса $M_{дб} = 9,8 \cdot 10^{-6}$ Н.м, температуре перегрева относительно окружающей среды $\theta = 65^\circ\text{C}$. Электролитом является токопроводящая

жидкость ТМ-13 / $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$; $\gamma = 0,8 \text{ См/м}$. ЭПУ предназначен для управления двухфазным индукционным моментным двигателем с двумя дифференциально действующими обмотками управления.

Основные характеристики двигателя: напряжение питания обмотки управления $u = 40 \text{ В}$ при частоте 400 Гц ; максимальный ток управления $i = 0,08 \text{ А}$; $\cos \varphi = 0,7$.

I. Активные и индуктивные сопротивления обмоток управления моментного двигателя

$$R_{0y} = u \cos \varphi / i = 40 \cdot 0,7 / 0,08 \text{ Ом} = 350 \text{ Ом},$$

$$(\omega L)_{0y} = u \sin \varphi / i = 40 \cdot 0,715 / 0,08 \text{ Ом} = 376 \text{ Ом}.$$

2. Внутреннее сопротивление ЭПУ на участке I-2 или I-3 электродов в горизонтальном положении ампулы

$$R_{1-3} = R_{2-3} = 350 \frac{0,004}{0,012} \text{ Ом} = 117 \text{ Ом}.$$

3. Необходимая геометрическая проводимость на участке I-3 или 2-3 электродов

$$\sigma_{1-3} = \sigma_{2-3} = \frac{1}{0,8 \cdot 117} \text{ м} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

4. Внутренний диаметр ампулы

$$d_a = (M_{дб} / 0,8 \rho g)^{1/4} = \frac{1 \cdot 10^{-4}}{0,8 \cdot 0,8 \cdot 9,8} \text{ м} = 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

5. Длина верхних электродов I и 2

$$a = d_a = 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

6. Ширина электродов

$$b = \frac{\sigma - \lambda_1 d_a (1 - \lambda_1)}{1 + \lambda_1} = \frac{1 \cdot 10^{-2} - 0,5 \cdot 6,3 \cdot 10^{-3} (1 + 0,5)}{1 + 0,5} \text{ м} = 0,55 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

7. Расстояние от края электрода I или 2 до торца ампулы

$$\Delta = 0,2 d_a = 0,2 \cdot 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

8. Радиус кривизны внутренней поверхности ампулы

$$r = \frac{360 \cdot 60 d_a}{2 \pi 2 \psi_n} = \frac{360 \cdot 60 \cdot 6,3 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 10} \text{ м} = 1,082 \text{ м}.$$

9. Объем газового пузыря

$$V_2 = 0,35 \pi d_a^3 = 0,35 \cdot 3,14 (6,5 \cdot 10^{-3})^3 = 274,8 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3.$$

10. Длина газового пузыря

$$l_n = 2,5 \frac{V_2}{d_a^2} = 2,5 \frac{274,8 \cdot 10^{-9}}{(6,5 \cdot 10^{-3})^2} \text{ м} = 17,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

11. Длина ампулы

$$L = 2\Delta + l_n + d_a = (2,02 \cdot 6,5 \cdot 10^{-3} + 17,3 \cdot 10^{-3} + 6,5 \cdot 10^{-3}) \text{ м} = 26,12 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

12. Поверхность охлаждения ампулы при $k = d/d_a = 1,26$

$$S_{охл} = \pi k^2 d_a^2 (L / k d_a + 0,5) = 750 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

13. Предельно допустимое значение тока, протекающего через электроды ЭПУ, находящегося в положении "электрического горизонта":

$$I_{1-3} = I_{2-3} = \frac{65 \cdot I_1 / I + 0,25 / 750 \cdot 10^{-6}}{0,24 \cdot 117} \text{ А} = 0,055 \text{ А}.$$

Как видно из приведенного примера, расчетные значения параметров ЭПУ близки к реальным.

IV. О КАЧЕСТВЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

IV.1. О требованиях к материалам и конструкции ЭПУ

Качество ЭПУ является интегральным показателем, включающим его точность, надежность, ресурс, стабильность работы, и зависит от выбора материалов конструкции ЭПУ и режима их работы.

Оно характеризуется выходными параметрами, которые контролируются при выполнении технологических операций и приемо-сдаточных испытаниях ЭПУ.

В предыдущих разделах большинство явлений и процессов, обусловленных прохождением тока в ЭПУ, рассматривалось с точки зрения их влияния на статические и динамические характеристики в предположении, что в материалах и конструкции ЭПУ не происходит никаких изменений. Однако на самом деле несовершенства технологического процесса изготовления ампул, образование неоднородных температурных полей в ЭПУ при его работе, электролиз, повышающий давление внутри ампулы, могут вызвать разгерметизацию ампулы в местах вывода электродов, необратимые искажения формы ампулы.

Все это ведет к изменениям параметров ЭПУ. Чтобы эти изменения были небольшими, необходимо, чтобы материал и конструкция ампулы имели малую величину деформируемости /отношения коэффициента теплопроводности к коэффициенту линейного расширения материала/, высокую герметичность и стабильность во времени.

Более всего этим требованиям удовлетворяет стекло Л-80, которое содержит специальные приоадки, влияющие на его структуру.

В качестве материала для электродов чаще всего применяют платину /например, в ЭПУ типа ДЖМ и ВЖМ/. В последнее время на поверхность электрода, соприкасающуюся со стеклом, наносят тонкий слой хрома. При вваривании электрода в ампулу хром окисляется. Образовавшаяся в результате пористая пленка окиси хрома улучшает герметичность спая.

Изменение геометрической формы и размеров ампулы обуславливается следующими причинами: во-первых, наличием в материале ампулы остаточных внутренних напряжений, возникающих при механической обработке, вваривании электродов и формировании торцов ампулы; во-вторых, нестабильностью структуры стекла /обусловленной переходом с течением времени структуры кристаллической решетки присадок в более устойчивые формы/.

Для понижения остаточных напряжений до минимального уровня и стабилизации структуры материала ампулы необходимо применять циклическую термообработку, которая включает отжиг и отарение.

Заливаемый в ЭПУ электролит, помимо свойств, которые определяются требованиями, предъявляемыми к наполнителям обычных уровней /малая вязкость и неагрессивность по отношению к материалам ампулы/, должен обладать высокой удельной электропроводностью. Причем, в соответствии с техническими условиями, значения электропроводности и вязкости должны сохраняться неизменными в широком диапазоне температур $-60^\circ\text{C} \dots +80^\circ\text{C}$.

В настоящее время в ЭПУ в качестве электролитов используют раствор хлористого лития в метиловом спирте и раствор иодистого калия в диметилформамиде. Основные характеристики этих электролитов приведены в табл. 2.

Как видно из таблицы, электролиты ТПЖ-15, ТПЖ-16, в качестве растворителя которых служат диметилформамид, обладают хорошей электропроводностью, однако они не находят широкого применения из-за сравнительно высокой плотности и недостаточно низкой температуры замерзания.

Таблица 2

Марка электролита	Плотность при 20°C, кг/м³	Удельная электропроводность, См/м	Температурный диапазон, °C	Состав
ТИЕ-II	800	1,1	-60...+80	2% LiCl + метиловый спирт
ТИЕ-13	800	0,8	-60...+80	1,5% LiCl + метиловый спирт
ТИЕ-15	1001	1,5	-40...+150	2,5% KI + 3,8% I ₂ + диметилформамид
ТИЕ-16	1143	2,4	-40...+80	8,7% KI + 3,8% I ₂ + диметилформамид

Таким образом, для обеспечения требуемого качества ЭПУ на стадии проектирования необходимо учитывать много противоречивых требований, предъявляемых к материалам. Одним из путей решения этой сложной задачи является расчет режимов работы ЭПУ с учетом химических и физических процессов, протекающих при его работе.

IV.2. Контроль электрических параметров ЭПУ

Одной из самых трудоемких операций при изготовлении ЭПУ является контроль электрических параметров после регулирования размеров газового пузырька и при паспортизации готовых изделий.

В основу методики контроля электрических параметров положена проверка цены деления пузырьковых уровней [16]. Согласно этой методике экспериментально исследуется статическая характеристика ЭПУ $u = u(\psi)$, где u — выходной сигнал ЭПУ; ψ — угол наклона опорной плоскости.

При контроле электрических параметров ЭПУ ДМ-9Б в серийном производстве применяют комплект аппаратуры, содержащий:

- оптическую делительную головку ОДГ-1, предназначенную для установок проверяемых ЭПУ на программные углы;
- электрический пульт, представляющий собой мостовую измерительную схему, два плеча которой образованы сопротивлениями контролируемого преобразователя.

Электрическая схема пульта показана на рис. 16. Питание пульта осуществляется от сети переменного напряжения 36 В, 400 Гц через

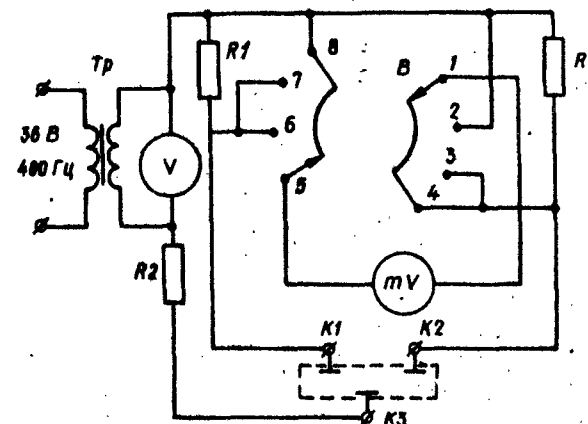


Рис. 16

трансформатор Tr для исключения постоянной составляющей тока.

Переключатель B служит для коммутации милливольтметра. При измерении падений напряжений на сопротивлениях $R1$ в режиме "электрического горизонта" ($u(\psi) = 0$) замыкаются контакты 1, 4 и 5, 8, 1, 2 и 5, 7. При измерении напряжений в диагонали моста, образованного сопротивлениями между электродами ЭПУ ($K1, K3$ и $K2, K3$) и сопротивлениями $R1$, замыкаются контакты 1, 3 и 5, 6.

Методика проверки согласно техническим условиям на преобразователь ДМ-9Б заключается в следующем: проверяемый ЭПУ устанавливается в специальном кронштейне на измерительной оси делительной головки и включают в мостовую схему / клеммы $K1, K2, K3$ /. Вращением ручки делительной головки ЭПУ переводят в положение "электрического горизонта", а затем последовательно наклоняют на программные углы $\pm \psi_1, \dots, \pm \psi_i, \dots, \pm \psi_n$ и измеряют соответствующее им напряжение. По результатам измерений строят график функции $u(\psi)$.

Как показывает опыт, методическая погрешность измерений при использовании описанной выше методики составляет 70%. Эта погрешность вызвана тем, что при отклонении опорной плоскости ЭПУ от плоскости горизонта в области электродов 1 и 2 температура электролита разная и зависит от времени, в течение которого производится

Блок-схема устройства состоит из следующих основных узлов: проверяемого преобразователя ДЭМ, следящего привода СП, поворотной платформы ПП, программного устройства ПУ, привода поворотной плат-

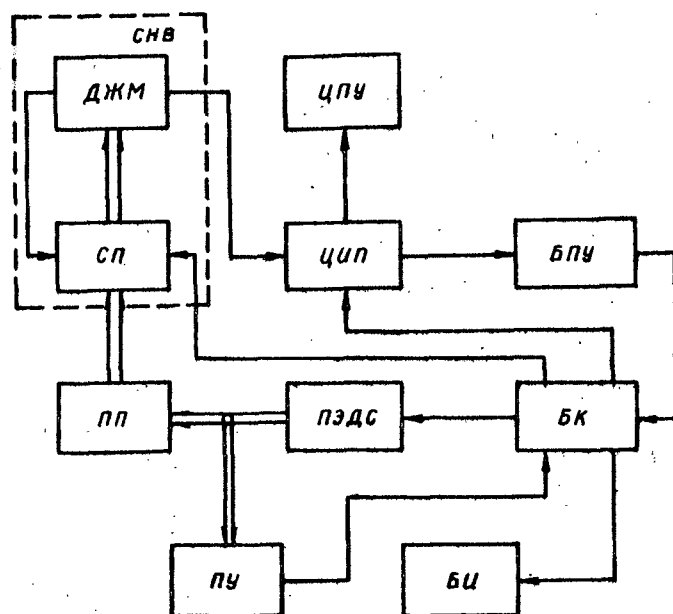


Рис. 17

Как показывает опыт, применение описанной установки АКП для контроля параметров ЭПУ позволяет не только исключить упомянутые методические погрешности, но и повысить не менее чем в 5 раз производительность труда при контроле.

При комплексном исследовании электролитических преобразователей угла, интерес к которым все возрастает, авторы ставили перед

собой задачу учесть сложные физико-химические процессы, обусловленные протеканием электрического тока в существенно неоднородной среде. Такой подход позволил получить ряд новых результатов. Наиболее существенными представляются следующие.

1. Составлены уравнения движения пузырьковых электролитических преобразователей угла и экспериментальным путем определены их коэффициенты. Получена аналитическая формула, позволяющая с достаточной для практики точностью оценивать частоту собственных колебаний /или период/ пузырьковых маятников.

2. Впервые выявлены и объяснены особенности работы электролитических преобразователей угла с учетом тепломассопереноса, парогазообразования, электролиза, смачивания и др. физических процессов. В частности, установлено, что:

а/ общий нагрев электролита приводит к уменьшению поверхностного натяжения, которое заметно изменяет статическую характеристику ЭПУ;

б/ локальный нагрев электролита из-за неравенства токов, протекающих через электроды, обуславливает градиент поверхностного натяжения, который совместно с конвекцией вызывает поток жидкости, являющийся основной причиной устойчивых низкочастотных автоколебаний газового пузырька, не сглаживаемых гироскопом из-за большого /несколько секунд/ периода;

в/ образование пузырьков в ЭПУ при изменении атмосферных условий является следствием неустойчивого кипения электролита, возникающего также при локальном нагреве жидкости;

г/ "нулевые" токи, протекающие через электроды, полностью перекрываются газовым пузырьком, в ЭПУ типа ДЕМ и ВКЖ возникают вследствие образования пленки конденсата, толщина которой, следовательно, и "нулевой" ток определяются свойствами жидкости /теплопроводностью, плотностью, вязкостью/ и градиентом температур между электролитом и стенкой ампулы.

3. Показано, что радикальным способом исключения образования пузырьков в ЭПУ является повышение давления газа в ампуле при кратковременном /несколько минут/ протекании малого постоянного тока через электролит. При этом уменьшается также "нулевой" ток.

4. Определены интенсивность и частотный диапазон вибрации, при которой разрушается пузырек. Установлено, что протекание электрического тока через раздробленный газовый пузырек вызывает термический эффект, который препятствует восстановлению формы пузырька.

Описана оригинальная конструкция ЭПУ с демпфером, позволяющая заметно повысить виброустойчивость ЭПУ.

5. Показано, что инерционность ЭПУ и моменты сил сухого трения в гироскопических приборах являются причиной развития их устойчивых автоколебаний. Получены формулы для оценки параметров этих автоколебаний.

6. Разработана методика расчета ЭПУ, позволяющая, с учетом параметров системы коррекции гироскопов, определять все основные геометрические и электрические параметры ЭПУ.

7. Описана разработанная авторами высокопроизводительная установка, позволяющая автоматизировать контроль параметров собранных ЭПУ.

8. Показано, что для создания высокоточных ЭПУ и исключения вредного влияния указанных выше физических и электрохимических процессов целесообразно использовать малые /по сравнению с применяемыми/ токи.

Учет исследованных в работе процессов и явлений позволит целенаправленно совершенствовать известные и разрабатывать новые электролитические преобразователи углов.

Список использованной литературы

1. А.с. 785766 /СССР/. Ампула жидкостного электролитического маятника/ Рудик Ю.Н., Берлянд В.А., Клевцев Н.П. и др. Опубл. в Б.И., 1980, № 45.
2. Бабаков И.М. Тесная колебаний. М., Наука, 1968. 628 с.
3. Бублик Г.Ф., Одинцов А.А., Павловский М.А. Об автоколебаниях гироскопов и гироскопов направления с коррекцией от жидкостного маятникового переключателя. - Изв. вузов. Приборостроение, 1968, II, № 1, с.67-70.
4. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам жидкостей. М., Наука, 1972. 720 с.
5. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика. М., Машиностроение, 1978. 456 с.
6. Кудрявцев В.В., Рудик Ю.Н. Методические указания к изучению курса "Проектирование гироскопических приборов и устройств". Изд. Киев. политехн. ин-та. 1980. 47 с.

7. Кудрявцева Л.А., Павловский М.А., Рудик Ю.Н. и др. О виброустойчивости жидкостных маятниковых переключателей. - Вестн. Киев. политехн. ин-та. Приборостроение, 1977, вып.7, с.10-11.

8. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М., Наука, 1970. 904 с.

9. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М., Энергия, 1977. 342 с.

10. Несис Е.И. Кипение жидкостей. М., Наука, 1973. 152 с.

11. Орлов А.Я. Изобретные труды. Киев, Изд-во АН УССР, 1961. 42 с.

12. Павловский М.А. Влияние погрешностей изготовления и сборки гиросприборов на их точность. Изд-во Киев. ун-та, 1973. 192 с.

13. Пельпор Д.С. Гироскопические системы. М., Высш. школа, 1971. Ч.1. 568 с.

14. Рудик Ю.Н. Исследования электрического тока в газовой полости электролитических датчиков. - Вестн. Киев. политехн. ин-та. Приборостроение, 1980, вып.10, с.43-45.

15. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. М., Химия, 1976. 232 с.

16. Товчигречко С.С. Уровни и методы их исследования. М., Изд-во стандартов, 1965. 108 с.

17. Торочкив В.Ю. Об инерционности электролитического датчика коррекции. - Изв. вузов. Приборостроение, 1962, 5, № 5, с.85-89.

18. Туричин А.М. Электрические измерения неэлектрических величин. М., Энергия, 1975. 576 с.

19. Шайденоко А.Я. Статические и динамические свойства электролитических датчиков вертикали. - Изв. вузов. Приборостроение, 1969, 3, № 3, с.94-97.

20. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Милковская Л.Б. Курс лекций по физике. М., Высш. школа, 1960. 422 с.

Оглавление

Предисловие	3
I. Физические основы работы электролитических преобразователей угла	4
I.1. Общая характеристика конструкции	4
I.2. Уравнения движения жидкостного маятника	8
II. Электрические характеристики ЭПУ	12
II.1. Статические и динамические характеристики ЭПУ	12
II.2. Влияние температуры на характеристики ЭПУ	15
II.3. Парогазообразование в объеме токопроводящей жидкости при работе ЭПУ ДЕМ и выключателей ВКЖ	18
II.4. Электрический ток в газовом пузырьке ЭПУ	21
II.5. Влияние вибрации основания на характеристики ЭПУ	26
III. Электролитические преобразователи в системах горизонтальной коррекции гироскопических приборов	27
III.1. Типовые схемы систем горизонтальной коррекции гироскопических приборов	27
III.2. Влияние инерционности ЭПУ на автоколебания гироскопов	32
III.3. Расчет параметров одноосного ЭПУ	38
IV. О качестве электролитических преобразователей	46
IV.1. О требованиях к материалам и конструкции ЭПУ	46
IV.2. Контроль электрических параметров ЭПУ	48
Заключение	51