

Максим Вячеславович Палкин родился в 1980 г., окончил в 2003 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Заместитель начальника отдела ФГУП “НПО машиностроения”. Автор 7 научных работ в области систем автоматического управления.

M.V. Palkin (b. 1980) graduated from the Bauman Moscow State Technical University n.a. Bauman in 2003. Deputy chief of the department at the Federal State Unitary Enterprise “NPO mashinostroeniya”. Author of 7 publications in the field of automatic control systems.



НАВИГАЦИОННЫЕ И ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.31(075.8)

С. А. В а с ю к о в, Г. Ф. Д р о б ы ш е в

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛАМИ НА ЭЛЕКТРОДАХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОДВЕСА

Рассмотрены способы регулирования потенциалами в подвесах с роторами цилиндрической и сферической формы. Особое внимание уделено подвесам с регулированием потенциалов по закону широтно-импульсной модуляции. Рассмотрены организация емкостных датчиков перемещения ротора и влияние на крутизну и нулевой сигнал датчиков “паразитных” емкостей подвеса.

Существует несколько законов управления потенциалами на электродах подвеса. Каким же требованиям должны отвечать эти законы? В первую очередь они должны обеспечивать устойчивость, а также наилучшие рабочие характеристики: перегрузочную способность, жесткость и стабильность центрирования подвесов. Законы регулирования не должны быть слишком сложны в технической реализации. Известно, что наилучшие характеристики имеют подвесы с нулевым потенциалом ротора. Следовательно, законы управления должны обеспечивать минимальный наведенный потенциал ротора.

Система регулирования потенциалов на электродах подвеса включает несколько каналов стабилизации. Число каналов равно, как правило, числу пар диаметрально противоположных электродов. Так, цилиндрический подвес (рис. 1, а) имеет пять каналов стабилизации, из них четыре регулируют положение ротора в радиальном направлении и

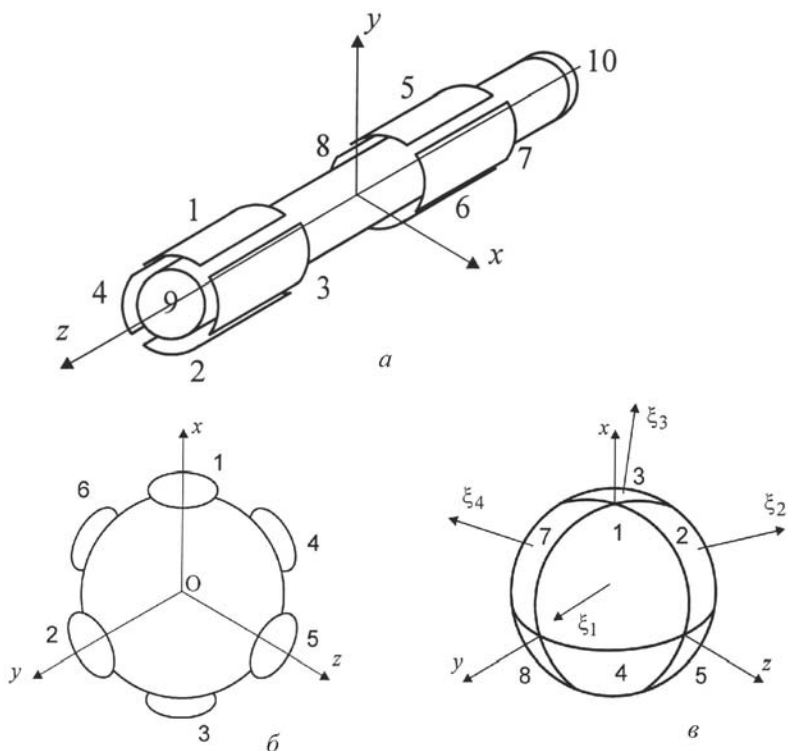


Рис. 1. Подвесы:

a — цилиндрический; *б* и *в* — сферические с шестью электродами и треугольными электродами соответственно

его угловое положение, один — в осевом. Сферический подвес с шестью электродами (рис. 1, б) содержит три канала стабилизации по осям x , y , z , а подвес с треугольными электродами (рис. 1, в) — четыре канала по осям ξ_1 , ξ_2 , ξ_3 , ξ_4 . Канал стабилизации включает датчик перемещения и выходной высоковольтный каскад, подключенные к паре диаметрально противоположных электродов, а также блок усиления и коррекции. Регулирование потенциалов в большинстве практических схем подвесов осуществляется в противофазе. Так, например, в подвесах с амплитудным регулированием в зависимости от смещения ротора напряжение на одном из пары электродов возрастает на определенную величину и на столько же уменьшается напряжение на втором электроде, что создает соответствующую восстанавливающую силу.

Рассмотрим законы управления потенциалами в электростатических подвесах.

Управление в подвесах на постоянном токе осуществляется по законам

$$\varphi_i = (\varphi_{i0} - \Delta\varphi_i)\Delta_i; \quad \varphi_j = (\varphi_{j0} + \Delta\varphi_i)\Delta_j; \quad (1)$$

здесь i, j — номера пар диаметрально противоположных электродов.

Для цилиндрического подвеса номера (i, j) пар электродов принимают значения $(1, 2), (3, 4), (5, 6), (7, 8), (9, 10)$; для сферического подвеса с шестью электродами — $(1, 3), (2, 4), (5, 6)$, а для сферического подвеса с восьмью электродами — $(1, 6), (2, 8), (3, 4), (7, 5)$. Коэффициенты Δ_i и Δ_j принимают значения $+1$ или -1 , их выбирают таким образом, чтобы обеспечить минимальный наведенный потенциал ротора. Потенциал φ_{i0} является положительной величиной и представляет собой начальную уставку или опорное напряжение на электродах. Величина уставки выбирается с учетом максимально допустимого по пробую напряжения на электродах подвеса. Приращение потенциала $\Delta\varphi_i$ в статическом режиме пропорционально напряжению на выходе датчика перемещений u_{di} и не превышает по абсолютной величине потенциала уставки:

$$\Delta\varphi_i = \begin{cases} \varphi_{i0} & \text{при } u_{di} \geq \varphi_{i0}/k_{yi}; \\ k_{yi}u_{di} & \text{при } |u_{di}| \leq \varphi_{i0}/k_{yi}; \\ -\varphi_{i0} & \text{при } u_{di} \leq -\varphi_{i0}/k_{yi}; \end{cases} \quad (2)$$

здесь k_{yi} — коэффициент усиления следящей системы, подключенной к паре электродов (i, j) .

Для подвесов на переменном токе законы управления запишем в виде

$$\begin{cases} \varphi_i(t) = (\varphi_{im} - \Delta\varphi_i) \sin(\omega t + \psi_i); \\ \varphi_j(t) = (\varphi_{im} + \Delta\varphi_i) \sin(\omega t + \psi_j); \end{cases} \quad (3)$$

здесь φ_{im} — опорная амплитуда напряжения. Приращения амплитуды $\Delta\varphi_i$ формируются по закону (2), значения начальных фаз ψ_i, ψ_j подбираются при минимизации потенциала ротора.

В последнее время начали широко применяться подвесы, в которых, вместо непрерывных или аналоговых систем регулирования, используются импульсные или дискретные системы. Рассмотрим импульсные законы управления электростатическими подвесами, потенциалы на электродах которых регулируются по принципу широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Для более простой формы записи будем считать импульсы прямоугольными, т.е. изображать их без учета конечной длительности фронтов. Это допущение оправдано тем, что в реальных схемах подвесов постоянные времени заряда и разряда, как правило, много меньше периода квантования и неучет фронтов не вносит существенной погрешности в силовые характеристики подвесов.

Рассмотрим несколько вариантов законов управления импульсными подвесами.

Вариант 1. Потенциалы на паре электродов изменяются по закону

$$\varphi_i = \begin{cases} \varphi_{i0}\Delta_i & \text{при } nT \leq t \leq nT + T/2 - \Delta\tau_i(nT); \\ 0 & \text{при } nT + T/2 - \Delta\tau_i(nT) \leq t \leq (n+1)T; \end{cases} \quad (4)$$

$$\varphi_j = \begin{cases} \varphi_{i0}\Delta_j & \text{при } nT \leq t \leq nT + T/2 + \Delta\tau_i(nT); \\ 0 & \text{при } nT + T/2 + \Delta\tau_i(nT) \leq t \leq (n+1)T. \end{cases}$$

Приращение длительности $\Delta\tau_i(nT)$ импульсов ШИМ пропорционально напряжению датчика перемещений и формируется в виде

$$\Delta\tau_i(nT) = \begin{cases} \Delta\tau_{\max} & \text{при } u_{di} \geq \Delta\tau_{\max}/k_{yi}; \\ k_{yi}u_{di} [(n-1)T + \tau_0] & \text{при } |u_{di}| \leq \Delta\tau_{\max}/k_{yi}; \\ -\Delta\tau_{\max} & \text{при } u_{di} \leq -\Delta\tau_{\max}/k_{yi}, \end{cases} \quad (5)$$

где τ_0 — фиксированный промежуток времени, выбор которого будет рассмотрен несколько позже.

Величина $\Delta\tau_{\max}$ не должна достигать значения половины периода квантования или превышать его, так как в противном случае импульсы на электродах вырождаются в постоянный уровень, что нарушает работу импульсных датчиков перемещения.

Смысл коэффициентов Δ_i и Δ_j тот же, что и в подвесах на постоянном и переменном токе. Графическая иллюстрация закона управления одним из каналов подвеса при $\Delta_i = \Delta_j = 1$ приведена на рис. 2, а.

На диаграммах I и II (см. рис. 2, а) показаны импульсы напряжения на электродах при центральном положении ротора, а диаграммы III и IV, приведенные на рис. 2, а, иллюстрируют случай, при котором $u_{di} > 0$, что соответствует смещению ротора по направлению к i -му электроду. При этом для создания восстанавливающей силы длительность импульса на i -м электроде уменьшается, а на j -м — увеличивается на $\Delta\tau_i$. Регулирование в данном случае осуществляется по задним фронтам импульсов.

Вариант 2. Потенциалы на паре электродов изменяются по закону

$$\varphi_i = \begin{cases} \varphi_{i0}\Delta_i & \text{при } nT \leq t \leq nT + T/2 - \Delta\tau_i(nT); \\ 0 & \text{при } nT + T/2 - \Delta\tau_i(nT) \leq t \leq (n+1)T; \end{cases} \quad (6)$$

$$\varphi_j = \begin{cases} 0 & \text{при } nT \leq t \leq nT + T/2 - \Delta\tau_i(nT); \\ \varphi_{i0}\Delta_i & \text{при } nT + T/2 - \Delta\tau_i(nT) \leq t \leq (n+1)T. \end{cases}$$

Приращение $\Delta\tau_i$ формируется по уравнениям (5), т.е. как и в варианте 1 при $\Delta_i = 1$ (рис. 2, б). Диаграммы I и II соответствуют несмещенному положению, а диаграммы III и IV — смещенному при $u_{di} > 0$.

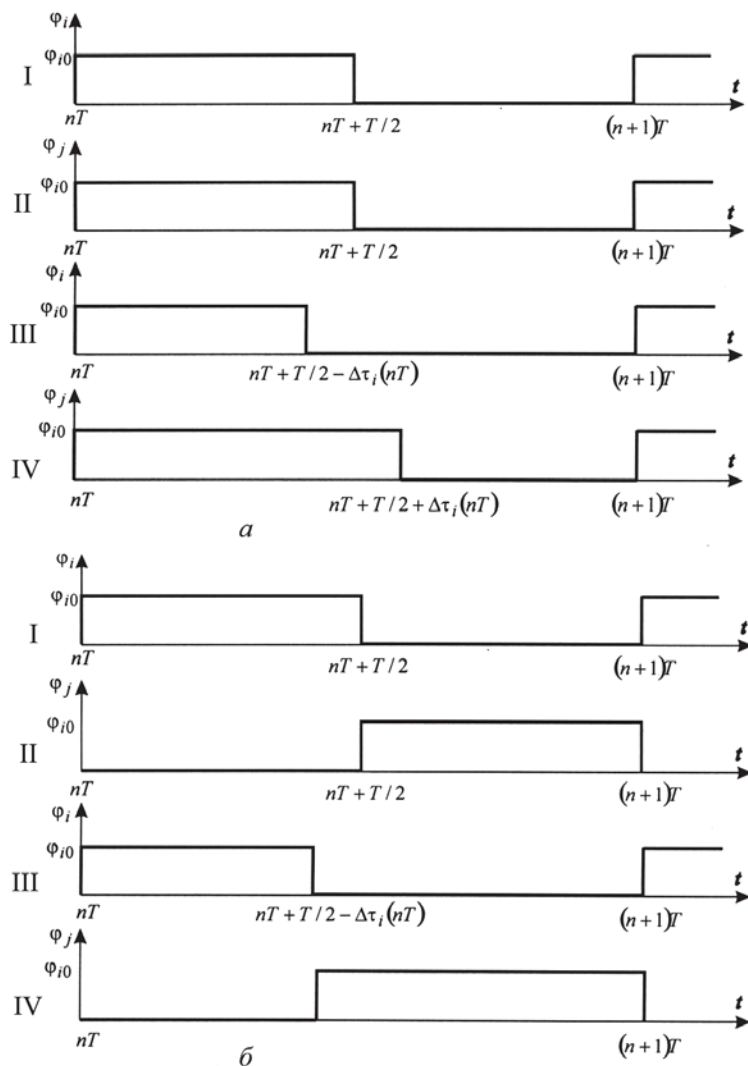


Рис. 2. Диаграммы импульсов напряжения на электродах при центральном (I, II) и смещенном (III, IV) положениях ротора

Регулирование на i -м электроде осуществляется по заднему, а на j -м — по переднему фронтам импульса.

Учитывая, что подвес в значительной степени зависит от организации датчиков перемещения, необходимо подробно остановиться на их работе.

В соответствии с классификацией различают датчики совмещенного и несомещенного типов. В системах стабилизации с датчиками несомещенного типа цепи силообразования и измерения перемещений работают независимо. В системах с датчиками совмещенного типа измерение перемещений осуществляется в той же цепи, в которой формируются силообразующие сигналы [1]. В импульсных подвесах, где потенциалы на электродах регулируются по закону ШИМ, целесо-

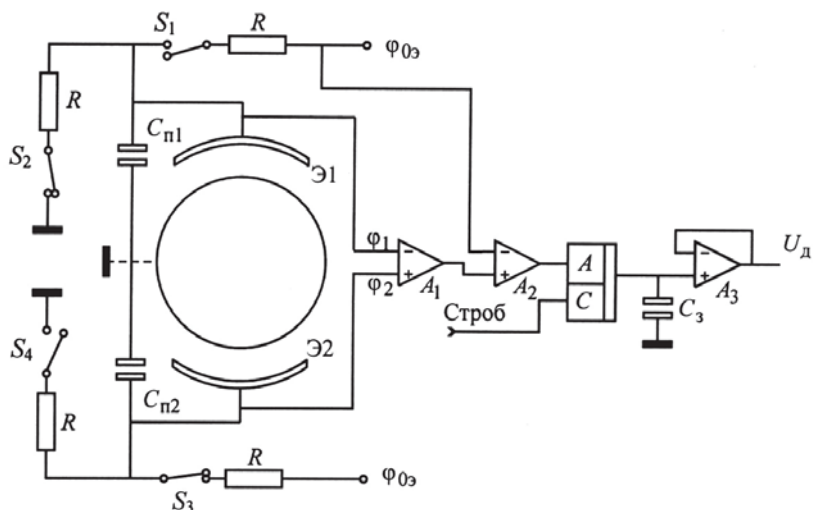


Рис. 3. Схема датчика

образно применять датчик перемещений совмещенного типа. В работе [2] предложен способ организации датчика, основанный на измерении разности напряжений с диаметрально противоположных электродов подвеса с последующим стробированием этой разности в заданные моменты времени. Этот способ получил дальнейшее развитие [1] и был использован в рассмотренных далее импульсных подвесах.

Схема датчика приведена на рис. 3, временные диаграммы, поясняющие работу схемы, — на рис. 4. На диаграммах (см. рис. 4, а и б) указаны импульсы напряжения на электродах э1 и э2, длительность которых формируется в соответствии с сигналом обратной связи посредством ключей S_1, S_2, S_3, S_4 . Анализ работы датчика будем проводить,

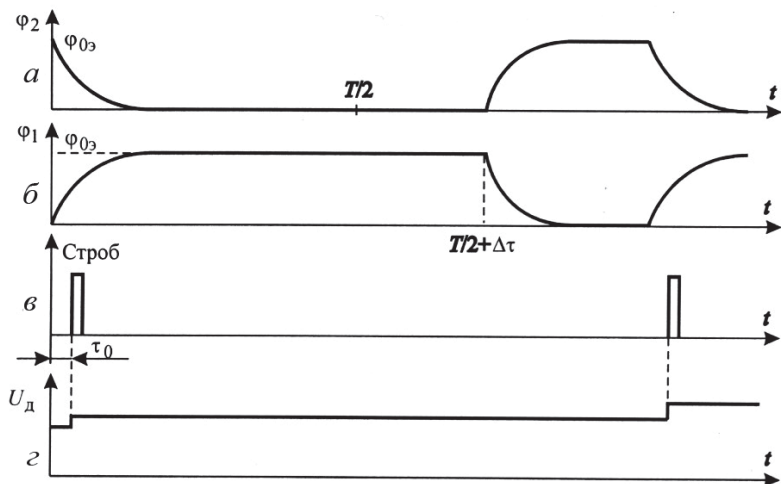


Рис. 4. Временные диаграммы импульсов напряжения на электродах э1 и э2

считая, что приняты надлежащие меры по минимизации потенциала ротора, т.е. $\varphi_0 \cong 0$.

Рассмотрим промежуток времени $(0, t)$, на котором происходит заряд электродной емкости э1 и разряд емкости э2, при этом

$$\varphi_1(t) = \varphi_{0э} (1 - e^{-t/\tau_{э1}}); \quad \varphi_2(t) = \varphi_{0э} e^{-t/\tau_{э2}},$$

где $\tau_{э1}$ и $\tau_{э2}$ — постоянные времени заряда-разряда электродных емкостей.

Параметры цепей выбраны так, чтобы постоянные времени заряда одной и разряда другой (и наоборот) электродных емкостей были равны при центральном положении ротора. Операционные усилители A_1 и A_2 (см. рис. 3) формируют сигнал $u = [\varphi_1(t) + \varphi_2(t) - \varphi_{0э}] / k_{\text{дел}}$, поступающий на аналоговый вход A коммутатора сигналов. Здесь $k_{\text{дел}}$ — коэффициент ослабления, он введен для согласования высоковольтного напряжения на электродах с низковольтными входами операционных усилителей.

В фиксированный относительно начала каждого периода момент времени τ_0 вырабатывается строб (рис. 4, в), который открывает на короткое время коммутатор аналоговых сигналов, и запоминающая емкость заряжается до величины разностного напряжения:

$$u_{\text{д}} = u|_{t=\tau_0} \cong \varphi_{0э} (e^{-\tau_0/\tau_{э2}} - e^{-\tau_0/\tau_{э1}}) / k_{\text{дел}}. \quad (7)$$

Можно показать, что датчик имеет максимальную крутизну, если время τ_0 равно постоянной времени заряда-разряда при центральном положении ротора.

Усилитель A_3 работает в режиме повторителя, на его выходе окончательно формируется сигнал датчика (см. рис. 4, з).

Смысл выражения (7) можно раскрыть на конкретных типах подвесов. Так, для цилиндрического подвеса, расчетная схема которого приведена на рис. 5, в постоянные времени $\tau_{э1}$, $\tau_{э2}$, τ_0 входят электродные емкости, являющиеся входными емкостями относительно вводов э1 и э2. Входные емкости близки по своим значениям к собственным коэффициентам электростатической индукции:

$$C_{\text{вх.э1}} = C_{11}, \quad C_{\text{вх.э2}} = C_{22}.$$

Значительное влияние на параметры датчиков оказывают так называемые паразитные емкости, они включают в себя емкости монтажа, емкости $(p-n)$ -переходов и являются величинами, сравнимыми с ротор-электродными емкостями. В эквивалентной схеме паразитные емкости плеч датчика $C_{п1}$ и $C_{п2}$ шунтируют входные емкости, поэтому с их учетом можно записать

$$\tau_0 = RC_{11}^{(0)}; \quad \tau_{э1} = R(C_{11} + C_{п1}); \quad \tau_{э2} = R(C_{22} + C_{п2}). \quad (8)$$

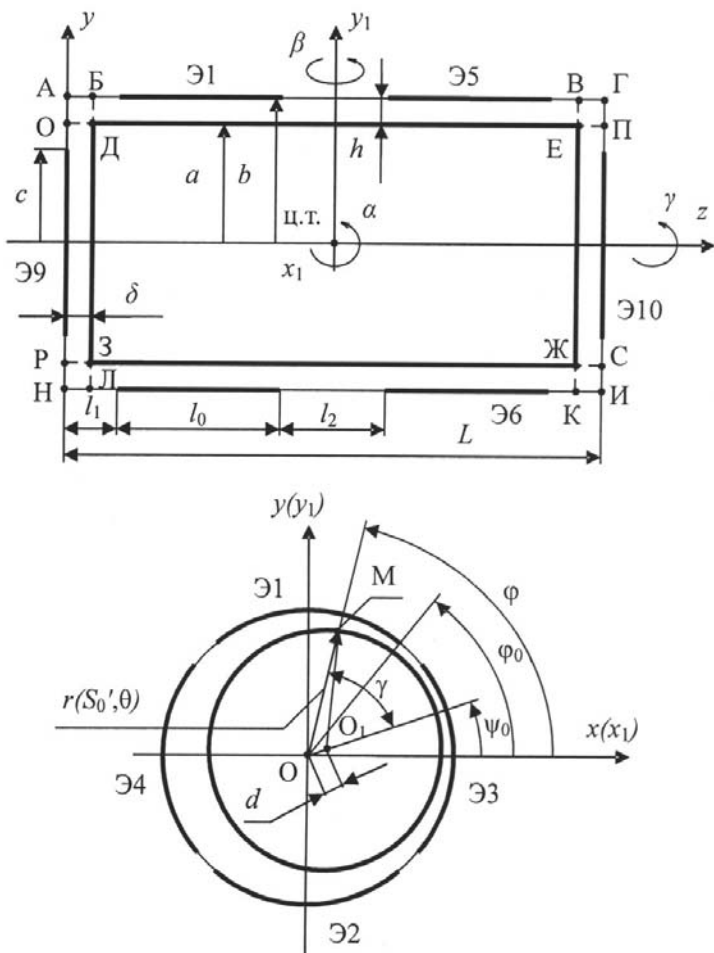


Рис. 5. Расчетная схема цилиндрического подвеса

В работе [3] были получены выражения для коэффициентов электростатической индукции C_{11} и C_{22} в функции нормированных линейных \bar{x} , \bar{y} и угловых $\bar{\alpha}$, $\bar{\beta}$ смещений ротора из центра подвеса:

$$\begin{aligned}
 C_{11} &= C_{11}^{(0)} + C_{11}^{\bar{y}} \bar{y} + C_{11}^{\bar{y}^2} \bar{y}^2 + C_{11}^{\bar{x}^2} \bar{x}^2 + C_{11}^{\bar{\alpha}} \bar{\alpha} + \\
 &+ C_{11}^{\bar{\alpha}^2} \bar{\alpha}^2 + C_{11}^{\bar{\beta}^2} \bar{\beta}^2 + C_{11}^{\bar{\alpha}\bar{y}} \bar{\alpha}\bar{y} + C_{11}^{\bar{\beta}\bar{x}} \bar{\beta}\bar{x}; \\
 C_{22} &= C_{11}^{(0)} - C_{11}^{\bar{y}} \bar{y} + C_{11}^{\bar{y}^2} \bar{y}^2 + C_{11}^{\bar{x}^2} \bar{x}^2 - C_{11}^{\bar{\alpha}} \bar{\alpha} + \\
 &+ C_{11}^{\bar{\alpha}^2} \bar{\alpha}^2 + C_{11}^{\bar{\beta}^2} \bar{\beta}^2 + C_{11}^{\bar{\alpha}\bar{y}} \bar{\alpha}\bar{y} + C_{11}^{\bar{\beta}\bar{x}} \bar{\beta}\bar{x}; \\
 \bar{x} &= d \cos \psi_0 / h; \quad \bar{y} = d \sin \psi_0 / h; \quad \bar{\alpha} = \alpha L / h; \quad \bar{\beta} = \beta L / h.
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Подставим в уравнение (7) выражения (8) и (9), далее разложим его в ряд Тейлора по степеням смещений и отбросим нелинейные члены.

Тогда получим

$$\begin{aligned}
 u_{д1} &= u_{д0}^{(1)} + C_{11}^{(0)} (C_{11}^{\bar{y}} \bar{y} + C_{11}^{\bar{\alpha}} \bar{\alpha}) u_{д1}^{(1)}, \\
 u_{д0}^{(1)} &= \frac{\varphi_{0э}}{k_{дел}} \left[\exp\left(-\frac{C_{11}^{(0)}}{C_{11}^{(0)} + C_{п1}}\right) - \exp\left(-\frac{C_{11}^{(0)}}{C_{11}^{(0)} + C_{п2}}\right) \right]; \\
 u_{д1}^{(1)} &= \frac{\varphi_{0э}}{k_{дел}} \left[\exp\left(-\frac{C_{11}^{(0)}}{C_{11}^{(0)} + C_{п1}}\right) / (C_{11}^{(0)} + C_{п1})^2 - \right. \\
 &\quad \left. - \exp\left(-\frac{C_{11}^{(0)}}{C_{11}^{(0)} + C_{п2}}\right) / (C_{11}^{(0)} + C_{п2})^2 \right];
 \end{aligned} \tag{10}$$

здесь $u_{д0}^{(1)}$ — смещение нуля (ненулевой сигнал) датчика, верхний индекс относится к номеру канала регулирования.

Введем обозначения

$$k_{д1}^{(1)} = C_{11}^{(0)} C_{11}^{\bar{y}} u_{д1}^{(1)}; \quad k_{д2}^{(1)} = -C_{11}^{(0)} C_{11}^{\bar{\alpha}} u_{д1}^{(1)}. \tag{11}$$

Тогда с учетом (11) можно записать

$$u_{д1} = u_{д0}^{(1)} + k_{д1}^{(1)} \bar{y} - k_{д2}^{(1)} \bar{\alpha},$$

где $k_{д1}^{(1)}$ и $k_{д2}^{(1)}$ можно трактовать как крутизну датчика по линейным и угловым смещениям.

Оценим влияние паразитных емкостей на крутизну датчика и ненулевой сигнал при следующих параметрах и типоразмерах подвеса (см. рис. 5): $h = 5 \cdot 10^{-5}$ м; $L = 55 \cdot 10^{-3}$ м; $l_1 = 10^{-3}$ м; $l_0 = 11 \cdot 10^{-3}$ м; $\varphi_0 = 50^\circ$; $a = 7,5 \cdot 10^{-3}$ м; $\varphi_{0э} = 250$ В; $k_{дел} = 50$; $\varepsilon = 2$, где $\varepsilon = 2$ учитывает, что ротор подвеса находится в вязкой жидкости (в дальнейшем этот вариант будем называть базовым при численных оценках характеристик подвесов).

При этом $C_{11}^{(0)} = 44,54$ пФ, $C_{11}^{\bar{y}} = 39,26$ пФ, $C_{11}^{\bar{\alpha}} = -14,98$ пФ.

В табл. 1 приведены значения крутизны $k_{д1}^{(1)}$ при изменении паразитных емкостей от 0 до 50 пФ. В расчетах принимаем $C_{п1} = C_{п2}$, т.е. плечи датчика симметричны.

Расчеты показывают, что крутизна датчика значительно снижается с ростом паразитных емкостей (до 38 % номинального значения при $C_{п} = 50$ пФ).

Из выражений (10) следует, что датчик имеет ненулевой сигнал только при неравенстве паразитных емкостей плеч датчика. Введем рассогласование $\Delta C_{п} = C_{п1} - C_{п2}$ и исследуем ненулевой сигнал в функции этого параметра (табл. 2).

$C_{п}, \text{ пФ}$	0	5	10	15	20	25	30	50
$k_{д1}^{(1)}, \text{ В}$	3,24	2,90	2,60	2,33	2,10	1,91	1,73	1,22

Таблица 2

$\Delta C_{п}, \text{ пФ}$	0	2	4	6	8	10
$u_{д0}^{(1)}, \text{ В}$	0	0,065	0,127	0,186	0,243	0,298

Так, при $C_{п1} = 20 \text{ пФ}$, $C_{п2} = 10 \text{ пФ}$ ($\Delta C_{п} = 10 \text{ пФ}$) крутизна датчика в соответствии с выражениями (10) и (11) составит $k_{д1}^{(1)} = 2,35 \text{ В}$, что при $u_{д0}^{(1)} = 0,298 \text{ В}$ и $h = 50 \text{ мкм}$ эквивалентно смещению электрического нуля датчика из центра подвеса на $6,4 \text{ мкм}$, т.е. на 1 пФ рассогласования паразитных емкостей приходится примерно $0,64 \text{ мкм}$ смещения электрического нуля датчика.

Следовательно, для совпадения электрического нуля датчика с геометрическим центром подвеса необходима дополнительная симметрия плеч датчика по паразитным емкостям.

Для остальных каналов подвеса получим

$$u_{д3} = u_{д0}^{(3)} + k_{д1}^{(3)} \bar{x} + k_{д2}^{(3)} \bar{\beta};$$

$$u_{д5} = u_{д0}^{(5)} + k_{д1}^{(5)} \bar{y} + k_{д2}^{(5)} \bar{\alpha};$$

$$u_{д7} = u_{д0}^{(7)} + k_{д1}^{(7)} \bar{x} - k_{д2}^{(7)} \bar{\beta},$$

где $u_{д0}^{(i)}$, $k_{д1}^{(i)}$, $k_{д2}^{(i)}$ при $i = 3, 5, 7$ вычисляются аналогично $u_{д0}^{(1)}$, $k_{д1}^{(1)}$, $k_{д2}^{(1)}$ только при своих значениях паразитных емкостей.

В осевом канале (электроды э9 и э10, см. рис. 5) собственные коэффициенты электростатической индукции, полученные в работе [3], имеют вид

$$C_{99} = C_{99}^{(0)} + C_{99}^{\bar{z}} \bar{z} + C_{99}^{\bar{z}^2} \bar{z}^2; \quad C_{1010} = C_{99}^{(0)} - C_{99}^{\bar{z}} \bar{z} + C_{99}^{\bar{z}^2} \bar{z}^2,$$

поэтому сигнал датчика содержит только составляющую от нормированного перемещения по оси z :

$$u_{д9} = u_{д0}^{(9)} - C_{99}^{(0)} C_{99}^{\bar{z}} u_{д1}^{(9)} \bar{z} = u_{д0}^{(9)} - k_{д3} \bar{z}; \quad k_{д3} = C_{99}^{(0)} C_{99}^{\bar{z}} u_{д1}^{(9)}, \quad (12)$$

где напряжение $u_{д0}^{(9)}$ может быть получено из $u_{д0}^{(1)}$, а $u_{д1}^{(9)}$ — из $u_{д1}^{(1)}$ заменой $C_{11}^{(0)}$ на $C_{99}^{(0)}$ и $C_{п1}$, $C_{п2}$ на $C_{п9}$, $C_{п10}$ соответственно.

В дальнейших расчетах будем считать каналы симметричными, т.е. $u_{д0}^{(i)} = 0$, $i = 1, 3, 5, 7, 9$, а также, что паразитные емкости всех плеч

датчика одинаковы; тогда $k_{д1}^{(i)} = k_{д1}$, $k_{д2}^{(i)} = k_{д2}$ и

$$\begin{cases} u_{д1} = k_{д1}\bar{y} - k_{д2}\bar{\alpha}; \\ u_{д3} = k_{д1}\bar{x} + k_{д2}\bar{\beta}; \\ u_{д5} = k_{д1}\bar{y} + k_{д2}\bar{\alpha}; \\ u_{д7} = k_{д1}\bar{x} - k_{д2}\bar{\beta}; \\ u_{д9} = -k_{д3}\bar{z}. \end{cases} \quad (13)$$

На практике часто из-за конструктивной особенности подвижной части приборов с цилиндрическим электростатическим подвесом не удается обеспечить идентичность размеров левого и правого подвесов, что приводит к отклонениям зазоров в подвесах от их номинального значения. Для оценки этого явления введем коэффициенты c_1 и c_2 неидентичности левого и правого подвесов соответственно. Если номинальный зазор при центральном положении ротора равен h , то с введенными коэффициентами зазоры левого и правого подвесов представим в виде

$$h_{л} = h/c_1; \quad h_{п} = h/c_2. \quad (14)$$

Если учесть неидентичность подвесов в виде равенств (14), считая $C_{п1}$, $C_{п2}$ малыми по сравнению с $C_{11}^{(0)}$, то справедлива следующая система соотношений:

$$\begin{cases} u_{д1} = c_1 (k_{д1}\bar{y} - k_{д2}\bar{\alpha}); \\ u_{д3} = c_1 (k_{д1}\bar{x} + k_{д2}\bar{\beta}); \\ u_{д5} = c_2 (k_{д1}\bar{y} + k_{д2}\bar{\alpha}); \\ u_{д7} = c_2 (k_{д1}\bar{x} - k_{д2}\bar{\beta}); \\ u_{д9} = -k_{д3}\bar{z}, \end{cases} \quad (15)$$

где $k_{д1} = 2\varphi_{03}e^{-1}C_{11}^{\bar{y}}/C_{11}^{(0)}$; $k_{д2} = 2\varphi_{03}e^{-1}C_{11}^{\bar{\alpha}}/C_{11}^{(0)}$;
 $k_{д3} = 2\varphi_{03}e^{-1}C_{99}^{\bar{z}}/C_{99}^{(0)}$.

Рассмотрим работу совмещенного датчика перемещений в подвесе с электродами в виде правильных сферических треугольников (см. рис. 1, в). Подвес этого типа состоит из четырех идентичных каналов стабилизации, поэтому достаточно рассмотреть работу датчика в одном из каналов. Для примера, рассмотрим канал, работающий с диаметрально расположенными электродами э1 и э6. Воспользуемся полученными в работе [4] выражениями для коэффициентов электро-

статической индукции C_{11} и C_{66} :

$$C_{11} = C_{11}^{(0)} + C_{11}^{\bar{x}}(\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}) + \\ + C_{11}^{\bar{x}^2}(\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + \bar{z}^2) + C_{11}^{\bar{x}\bar{y}}(\bar{x}\bar{y} + \bar{x}\bar{z} + \bar{y}\bar{z}); \\ C_{66} = C_{11}^{(0)} - C_{11}^{\bar{x}}(\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}) + \\ + C_{11}^{\bar{x}^2}(\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + \bar{z}^2) + C_{11}^{\bar{x}\bar{y}}(\bar{x}\bar{y} + \bar{x}\bar{z} + \bar{y}\bar{z}).$$

Выполняя те же вычисления, что и для цилиндрического ротора, получим

$$u_{д1} = u_{д0}^{(1)} + C_{11}^{(0)} C_{11}^{\bar{x}} u_{д1}^{(1)} (\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}),$$

где $u_{д0}^{(1)}$ и $u_{д1}^{(1)}$ определяются по выражениям (10) с заменой $C_{п2}$ на $C_{п6}$.

Для симметричных датчиков, используя преобразования координат, можно записать

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{д1} = k_{д} (\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}); \\ u_{д2} = k_{д} (\bar{x} - \bar{y} + \bar{z}); \\ u_{д3} = k_{д} (\bar{x} - \bar{y} - \bar{z}); \\ u_{д7} = k_{д} (\bar{x} + \bar{y} - \bar{z}); \\ k_{д} = C_{11}^{(0)} C_{11}^{\bar{x}} u_{д1}^{(1)}. \end{array} \right. \quad (16)$$

Для сферического подвеса с электродами в виде сферических сегментов (см. рис. 2) с учетом выражений для собственных коэффициентов электростатической индукции C_{ii} , $i = 1, \dots, 6$, полученных в работе [4], справедливы соотношения

$$u_{д1} = k_{д}\bar{x}; \quad u_{д2} = k_{д}\bar{y}; \quad u_{д3} = k_{д}\bar{z}. \quad (17)$$

В подвесах на постоянном и переменном токе применяются датчики несомещенного типа. В работе [5] для измерения перемещения емкость ротор-электрод включена в резонансный контур. Структуры соотношений для датчиков несомещенного типа схожи со структурами совмещенных датчиков, поэтому при анализе электростатических подвесов можно использовать обобщенные соотношения в формах (13), (16) и (17).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 1241825 СССР, МКИ G01C19/24. Электростатический подвес / С.Н. Грибова, Г.Ф. Дробышев (СССР). № 3771062/40-23, 1986.
2. А. с. 1149726 СССР, МКИ G01C19/24. Способ управления подвесом электростатического гироскопа / С.Н. Грибова, Г.Ф. Дробышев (СССР). № 3474539/40-23, 1984.

3. Васюков С. А., Дробышев Г. Ф.. Математическая модель цилиндрического электростатического подвеса как системы заряженных проводников // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. “Естественные науки”. – 2007. – № 1. – С. 72–87.
4. Васюков С. А., Дробышев Г. Ф.. Распределение потенциала и коэффициенты электростатической индукции в сферическом электростатическом подвесе // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. “Естественные науки”. – 2007. – № 2. – С. 101–112.
5. Патент 3412618 США. МКИ G01C19/30. Control apparatus for inertial instruments / R.S. Staats (США); Honewell ink. (США). № 301326; Заявл. 12.08.63; Опубли. 26.10.68; НКИ 74-5.7.

Статья поступила в редакцию 3.10.2006

Сергей Александрович Васюков родился в 1958 г., окончил в 1981 г. МВТУ им. Н.Э.Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Электротехника и промышленная электроника” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор 32 научных работ в области электростатических подвесов и датчиков автосигнализаций.

S.A. Vasyukov (b. 1958) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1981. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Electrical Engineering and Industrial Electronics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 32 publications in the field of electrostatic suspension and sensor of automobile signaling system.

Георгий Федорович Дробышев родился в 1933 г., окончил в 1957 г. Московский энергетический институт. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Электротехника и промышленная электроника” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор 80 научных работ в области расчета электростатических гироскопов и акселерометров, физики полупроводниковых приборов.

G.F. Drobyshev (b.1933) graduated from the Moscow Institute for Power Engineering in 1957. D. Sc. (Eng.), professor of “Electrical Engineering and Industrial Electronics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 80 publications in the field of design of electrostatic gyroscopes and accelerometers, physics of semiconductor instruments.

В издательстве МГТУ им. Н.Э.Баумана в 2007 г. вышла в свет книга

Матричные методы расчета и проектирования сложных систем автоматического управления для инженеров / Под ред. К.А.Пупкова и Н.Д.Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2007. – 664 с.

Решение задач исследования, синтеза регуляторов и оптимизации САУ, поведение которых описывается системами нелинейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами высокого порядка, предполагает реализацию следующих этапов: построение адекватной математической модели, разработка методов, построение алгоритмов и их программная реализация.

Авторы стремились избегать громоздких и строгих процедур, а основное внимание уделено описанию идей и конструктивным подходам к их применению. Поэтому книга содержит большое число иллюстраций и технических приложений и ориентирована, в первую очередь, для применения инженерами-проектировщиками, создающими сложные автоматические системы.

По вопросам приобретения обращаться по тел. 263-60-45;
e-mail: press@bmstu.ru