

СПОСОБЫ МИНИМИЗАЦИИ ПОТЕНЦИАЛА РОТОРА В СФЕРИЧЕСКОМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОДВЕСЕ

Рассмотрены вопросы минимизации потенциала ротора сферического электростатического подвеса. Проанализирован наведенный потенциал для подвесов на постоянном токе при двух возможных вариантах управления потенциалами на электродах подвеса. Приведены рекомендации по выбору закона управления потенциалами, при котором обеспечивается наименьший наведенный потенциал не только при центральном положении ротора, но и при его смещениях из центра подвеса.

Центрирование подвижной части (сферического ротора) в электростатическом подвесе достигается путем силового взаимодействия заряженных проводников, образующих электродную систему, и проводящей поверхности взвешиваемого тела. Существуют различные конфигурации электродных систем, однако наибольшее практическое применение в настоящее время нашли подвесы с электродами в виде правильных сферических сегментов (рис. 1).

Обозначим проводники рассматриваемого подвеса индексами следующим образом: $i = 0$ — ротор, $i = 7$ — экран (металлизированные межэлектродные промежутки), а $i = 1, \dots, 6$ — электроды.

Как известно [1], сила, действующая на твердое тело в электростатическом поле, представляется в виде

$$F = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \varphi_i \varphi_j \nabla C_{ij}, \quad (1)$$

где n — число проводников (в рассматриваемом подвесе $n = 7$); C_{ij} — коэффициенты электростатической индукции, которые зависят от геометрических размеров проводников (электродов, ротора, экрана) и их взаимного расположения, а следовательно, являются функциями смещения ротора из центра подвеса. Ранее эти коэффициенты для сферического подвеса были получены в работе [2].

Анализируя выражение (1), можно отметить, что сила, действующая на

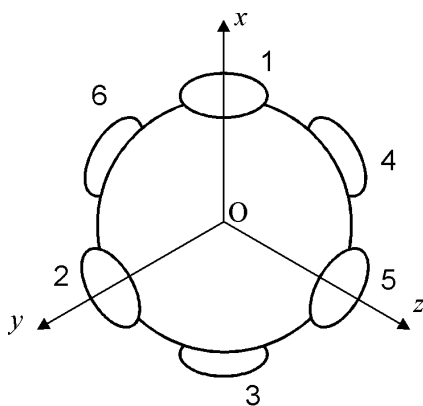


Рис. 1. Конфигурация электродной системы

ротор, является функцией в том числе и потенциала ротора φ_0 . Возникновение этого потенциала обусловлено двумя причинами. Первую обычно связывают с явлением электростатической индукции в условиях, когда на электродах подвеса заданы потенциалы φ_j . Вторая причина состоит в том, что в рабочем зазоре подвеса наблюдается перенос зарядов за счет темновых токов и микрозарядов. Это приводит к возникновению на роторе случайного заряда q_0 . В электростатическом подвесе для простоты его технической реализации систему стабилизации положения ротора реализуют в виде нескольких (в данном случае трех) независимо работающих каналов. Каждый канал регулирует положение ротора по одной из осей x, y, z и включает в себя только два диаметрально противоположных электрода. Так как потенциал ротора зависит от потенциалов всех электродов подвеса, то его значение непосредственно влияет на глубину межканальных связей подвеса, а его нестабильность непосредственно сказывается на нестабильности центрирования ротора. Экспериментальные исследования показывают, что подвесы, в которых потенциал ротора соизмерим с опорным напряжением на электродах, обладают малым запасом устойчивости и низкой перегрузочной способностью. Сказанное выше делает актуальной проблему минимизации потенциала ротора.

Цель настоящей работы — поиск и анализ законов управления потенциалами на электродах подвеса, минимизирующих потенциал ротора, а также оценка степени влияния потенциала ротора на силовые характеристики подвеса.

Выделим две составляющие потенциала ротора:

$$\varphi_0 = -\frac{1}{C_{00}} \sum_{j=1}^n C_{0j} \varphi_j - \frac{q_0}{C_{00}}. \quad (2)$$

Поскольку потенциалы на электродах $\varphi_j, j = 1, \dots, n$, непосредственно не связаны с зарядом q_0 , то минимизацию выражения (2) можно провести, лишь минимизируя по отдельности каждое из его слагаемых.

Рассмотрим случай $q_0 = 0$, т.е. потенциал ротора индуцируется только окружающими его электродами. Пусть ротор находится в центральном положении. В этом случае для сферического подвеса $C_{0j} = C_{10}^{(0)}$ и выражение (2) сведется к виду

$$\varphi_0 = -\frac{C_{10}^{(0)}}{C_{00}} \sum_{j=1}^n \varphi_j. \quad (3)$$

Очевидно, что потенциал при центральном положении ротора принимает нулевое значение, если сумма всех потенциалов на электродах

подвеса равна нулю. Рассмотрим законы управления потенциалами на электродах подвеса, обеспечивающие минимальный наведенный потенциал ротора не только при его центральном положении, но и при малых (в пределах линейной зоны подвеса), а также при больших (смещение ограничено страховочными упорами) смещениях ротора из центра подвеса.

Управление в подвесах на постоянном токе осуществляется по законам

$$\varphi_i = (\varphi_{i0} - \Delta\varphi_i) \Delta_i; \quad \varphi_j = (\varphi_{i0} + \Delta\varphi_i) \Delta_j. \quad (4)$$

Здесь i, j — номера пар диаметрально противоположных электродов.

Для рассматриваемого подвеса номера пар (i, j) принимают значения (1, 3), (2, 4), (5, 6). Потенциал φ_{i0} является положительной величиной и представляет собой начальную уставку или опорное напряжение на электродах. Приращение потенциала $\Delta\varphi_i$ в статическом режиме пропорционально напряжению на выходе датчика перемещений u_{di} и не превышает по абсолютной величине потенциала уставки φ_{i0} :

$$\Delta\varphi_i = \begin{cases} \varphi_{i0} & \text{при } u_{di} \geq \varphi_{i0}/k_{yi}; \\ k_{yi}u_{di} & \text{при } |u_{di}| \leq \varphi_{i0}/k_{yi}; \\ -\varphi_{i0} & \text{при } u_{di} \leq -\varphi_{i0}/k_{yi}. \end{cases} \quad (5)$$

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

В соответствии с приведенными выше рекомендациями нам необходимо выбрать коэффициенты Δ_i и Δ_j таким образом, чтобы при центральном положении ($\Delta\varphi_i = 0$) потенциал ротора был нулевым. Поскольку число осей подвеса нечетно, то возможны два способа формирования уставок потенциала на электродах.

Сначала проанализируем случай, когда диаметрально противоположные электроды имеют уставки одного знака, например электроды Э1 и Э3 — положительные, а Э2, Э4, Э5, Э6 — отрицательные. Очевидно, что, согласно (2), потенциал ротора при центральном положении ротора будет нулевым, если значение положительной уставки на одной паре электродов в два раза больше значения отрицательной уставки на двух других парах.

Зависимости, характеризующие работу датчиков перемещений при работе подвеса в линейной зоне, получены в работе [3] и могут быть представлены в виде

$$u_{d1} = k_d \bar{x}; \quad u_{d2} = k_d \bar{y}; \quad u_{d5} = k_d \bar{z}, \quad (6)$$

где $\bar{x} = x/h$, $\bar{y} = y/h$, $\bar{z} = z/h$ нормированные (по отношению к зазору h между электродом и ротором) смещения ротора из центра подвеса.

В этом случае законы управления (4), (5) с учетом (6) запишем в виде

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= 2\varphi_{0_3} - \Delta\varphi_1; \quad \varphi_3 = 2\varphi_{0_3} + \Delta\varphi_1; \quad \varphi_2 = -(\varphi_{0_3} - \Delta\varphi_2); \\ \varphi_4 &= -(\varphi_{0_3} + \Delta\varphi_2); \quad \varphi_5 = -(\varphi_{0_3} - \Delta\varphi_5); \quad \varphi_6 = -(\varphi_{0_3} + \Delta\varphi_5); \quad (7) \\ \Delta\varphi_1 &= k\bar{x}; \quad \Delta\varphi_2 = k\bar{y}; \quad \Delta\varphi_5 = k\bar{z}; \quad k = k_x k_y. \end{aligned}$$

Базовые коэффициенты электростатической индукции C_{ij} , т.е. коэффициенты, на основе которых преобразованием координат можно получить полный набор коэффициентов для всех осей подвеса, приведены в работе [2]. Используем преобразование координат и запишем в общем виде те значения C_{ij} , которые нам понадобятся для формирования выражения потенциала ротора:

$$\begin{aligned} C_{10} &= C_{10}^{(0)} + C_{10}^{\bar{x}}\bar{x} + C_{10}^{\bar{x}^2}\bar{x}^2 + C_{10}^{\bar{y}^2+\bar{z}^2}(\bar{y}^2 + \bar{z}^2); \\ C_{30} &= C_{10}^{(0)} - C_{10}^{\bar{x}}\bar{x} + C_{10}^{\bar{x}^2}\bar{x}^2 + C_{10}^{\bar{y}^2+\bar{z}^2}(\bar{y}^2 + \bar{z}^2); \\ C_{20} &= C_{10}^{(0)} + C_{10}^{\bar{x}}\bar{y} + C_{10}^{\bar{x}^2}\bar{y}^2 + C_{10}^{\bar{y}^2+\bar{z}^2}(\bar{x}^2 + \bar{z}^2); \\ C_{40} &= C_{10}^{(0)} - C_{10}^{\bar{x}}\bar{y} + C_{10}^{\bar{x}^2}\bar{y}^2 + C_{10}^{\bar{y}^2+\bar{z}^2}(\bar{x}^2 + \bar{z}^2); \quad (8) \\ C_{50} &= C_{10}^{(0)} + C_{10}^{\bar{x}}\bar{z} + C_{10}^{\bar{x}^2}\bar{z}^2 + C_{10}^{\bar{y}^2+\bar{z}^2}(\bar{x}^2 + \bar{y}^2); \\ C_{60} &= C_{10}^{(0)} - C_{10}^{\bar{x}}\bar{z} + C_{10}^{\bar{x}^2}\bar{z}^2 + C_{10}^{\bar{y}^2+\bar{z}^2}(\bar{x}^2 + \bar{y}^2); \\ C_{00} &= C_{00}^{(0)} + C_{00}^{\bar{x}^2+\bar{y}^2+\bar{z}^2}(\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + \bar{z}^2). \end{aligned}$$

Подставляя (8) и (7) в (2), получаем следующую зависимость потенциала ротора от нормированных смещений при работе подвеса в линейной зоне (случай малых смещений):

$$\varphi_0 = -2 \frac{\varphi_{0_3} \left(C_{10}^{\bar{x}^2} - C_{10}^{\bar{y}^2} + \bar{z}^2 \right) (2\bar{x}^2 - \bar{y}^2 - \bar{z}^2) + k C_{10}^{\bar{x}} (\bar{y}^2 + \bar{z}^2 - \bar{x}^2)}{C_{00}}. \quad (9)$$

Анализ влияния потенциала ротора на характеристики подвеса удобно провести задавшись некоторыми его характерными размерами. Электростатический подвес является составной частью электростатического гироскопа (ЭСГ). Принято различать ЭСГ по точности, причислив к приборам высокой точности конструкции с полыми роторами больших диаметров (40...60 мм) и к приборам средней точности — со сплошными роторами малых диаметров (10...20 мм). При этом в силу ряда причин был установлен рабочий зазор электрод-ротор соответственно 50...150 мкм и 10...20 мкм. Для конструкций со сплошными роторами наиболее выгодным оказывается использова-

ние четырехосного восьмизлектродного подвеса с электродами в виде сферических треугольников. В приборах с полыми роторами наибольшее применение нашли трехосные подвесы с сегментными электродами (подвес этого типа рассматривается в данной работе). Зададимся рядом характерных размеров для подвеса с полым ротором:

- радиус ротора $a = 20$ мм;
- зазор при центральном положении ротора $h = 120$ мкм;
- угловой размер электрода $\theta^* = 35^\circ$.

Для этих типоразмеров константы при коэффициентах электростатической индукции (8) равны:

$$C_{10}^{(0)} = -33,722 \cdot 10^{-12} \Phi; \quad C_{10}^{\bar{x}} = -30,856 \cdot 10^{-12} \Phi;$$

$$C_{10}^{\bar{x}^2} = -28,141 \cdot 10^{-12} \Phi; \quad C_{10}^{\bar{y}^2 + \bar{z}^2} = -2,79 \cdot 10^{-12} \Phi;$$

$$C_{00}^{(0)} = 372,93 \cdot 10^{-12} \Phi; \quad C_{10}^{\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + \bar{z}^2} = 124,31 \cdot 10^{-12} \Phi.$$

Пусть $\varphi_{0z} = \Delta\varphi_{\max} = 800$ В (такое опорное напряжение обеспечивает трехкратную перегрузочную способность подвеса) и максимальное смещение, при котором еще сохраняется пропорциональное регулирование (линейная зона), составляет 10% зазора: $|\bar{x}_{\max}| = |\bar{y}_{\max}| = |\bar{z}_{\max}| = 0,1$. Тогда, коэффициент усиления следящей системы $k = \Delta\varphi_{\max} / |\bar{x}_{\max}| = 8000$. Максимальная оценка потенциала при смещениях ротора в линейной зоне составляет $\varphi_0 \approx 20$ В и по сравнению с уставкой потенциала является величиной незначительной.

Исследуем, как изменяется потенциал ротора при больших смещениях, когда приращения потенциалов на электродах (5) выходят на насыщение. Будем задавать смещение d центра ротора O_1 из центра подвеса O ($d = OO_1$) в различных направлениях, которые определяются в сферической системе координат (рис. 2) углами ψ_0 и θ_0 . Линейные смещения по осям x, y, z можно представить в виде

$$x = d \cos \theta_0, \quad y = d \sin \theta_0 \cos \psi_0,$$

$$z = d \sin \theta_0 \sin \psi_0, \quad d = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

В случае закона управления потенциалами (7) (будем называть его в дальнейшем первым вариантом управления) изменение потенциала представлено на рис. 3. Максимального значения 0,09 нормированный потенциал φ_0 / φ_{0z} достигает при смещении

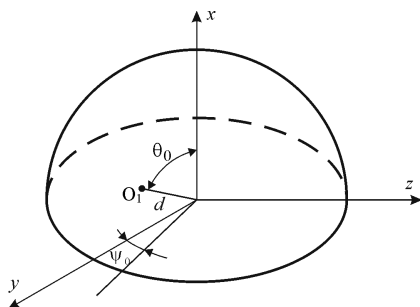


Рис. 2. Система координат

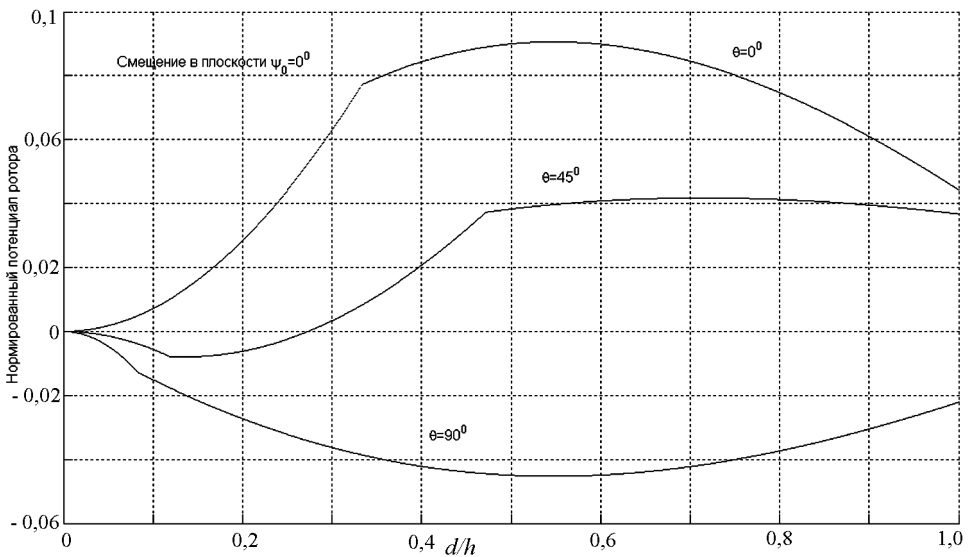


Рис. 3. Нормированный потенциал ротора подвеса с сегментными электродами при первом варианте управления

в направлении электрода Э1 (см. рис. 1). Этому случаю соответствуют углы $\psi_0 = 0^\circ$ и $\theta_0 = 0^\circ$. При смещении в линейной зоне ($d/h \leq 0,1$) нормированный потенциал для любого направления смещения не превышает 0,02.

Отметим, что при рассмотренном законе управления подвес будет неравновесным. Это следует хотя бы из того, что потенциал ротора (9) в разной степени изменяется при смещениях в различных направлениях, и является существенным недостатком подвеса.

Очевидно, что равновесности подвеса можно добиться, вводя уставки противоположного знака на диаметрально противоположных электродах (назовем этот случай вторым законом управления):

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \varphi_{03} - \Delta\varphi_1; & \varphi_3 &= -(\varphi_{03} + \Delta\varphi_1); & \varphi_2 &= \varphi_{03} - \Delta\varphi_2; \\ \varphi_4 &= -(\varphi_{03} + \Delta\varphi_2); & \varphi_5 &= \varphi_{03} - \Delta\varphi_5; & \varphi_6 &= -(\varphi_{03} + \Delta\varphi_5). \end{aligned} \quad (10)$$

Из (10), (8) и (2) следует, что

$$\begin{aligned} \varphi_0 &= -2 \{ (\varphi_{03} C_{10}^{\bar{x}} - kC_{10}^{(0)}) (\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}) - kC_{10}^{\bar{x}^2} (\bar{x}^3 + \bar{y}^3 + \bar{z}^3) - \\ &- kC_{10}^{\bar{y}^2 + \bar{z}^2} [\bar{x}(\bar{y}^2 + \bar{z}^2) + \bar{y}(\bar{x}^2 + \bar{z}^2) + \bar{z}(\bar{x}^2 + \bar{y}^2)] \} / C_{00}. \end{aligned}$$

Однако здесь (рис. 4) даже в линейной зоне подвеса наблюдаются большие значения потенциала, а максимальное значение при смещении в направлении электрода Э1 ($\psi_0 = 45^\circ$ и $\theta_0 = 0^\circ$) достигает почти $0,5\varphi_{03}$.

С точки зрения приведенного потенциала ротора второй вариант управления несомненно хуже, сложнее он и в технической реализа-

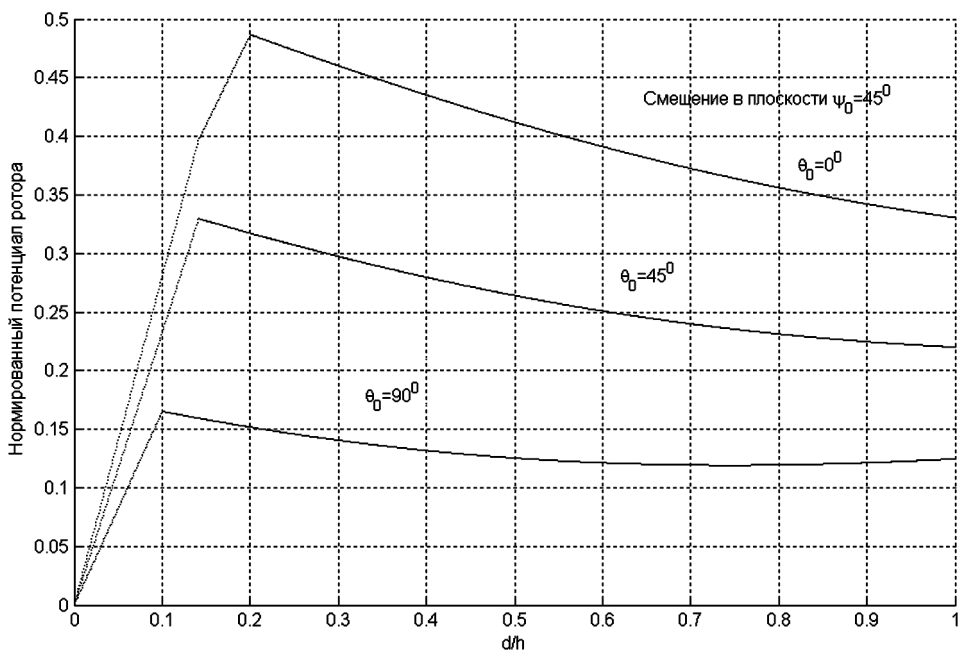


Рис. 4. Нормированный потенциал ротора подвеса с сегментными электродами при втором законе управления

ции. Однако этот вариант обеспечивает лучшую равновесность без дополнительного подбора коэффициентов усиления каналов подвеса. Чтобы сделать окончательные выводы о предпочтительности того или иного варианта управления, рассмотрим влияние потенциала ротора на силовые характеристики подвеса.

Найдем проекции сил F_x , F_y , F_z , вычисляя градиенты коэффициентов электростатической индукции в (1) по соответствующим координатам $F_x \leftrightarrow \nabla_x C_{ij}$, $F_y \leftrightarrow \nabla_y C_{ij}$, $F_z \leftrightarrow \nabla_z C_{ij}$. Результирующий вектор силы по модулю будет равен $F_s = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$, а угол ψ между вектором силы и направлением смещения ротора можно вычислить как

$$\psi = \arccos \frac{F_x x + F_y y + F_z z}{F_s d}.$$

Очевидно, что полезная составляющая силы противоположна направлению смещения. Действительно, для возвращения ротора в центр подвеса необходимо, чтобы сила и смещение имели разные знаки. Назовем полезную составляющую восстанавливающей силой и будем вычислять ее как $F = F_s \cos \psi$. Сила будет восстанавливающей в том диапазоне смещений, где $F < 0$. Для обеспечения равновесности подвеса при работе в линейной зоне, мы вынуждены будем по оси x , где имеется двойная уставка напряжения, установить коэффициент усиления примерно в два раза меньший, чем по осям y и z , т.е.

$k_x = 0,5k_y = 0,5k_z$. Поскольку

$$k_y = \frac{\varphi_{0z}}{\bar{y}_{\max}}, \quad k_z = \frac{\varphi_{0z}}{\bar{z}_{\max}}, \quad k_x = \frac{2\varphi_{0z}}{\bar{x}_{\max}},$$

то протяженность линейной зоны по оси x оказывается в четыре раза больше, чем по осям y и z .

Статические силовые характеристики, построенные для выбранных типоразмеров подвеса при смещении в плоскости $\psi_0 = 0^\circ$, приведены на рис. 5. Здесь $\theta_0 = 0^\circ$ соответствует смещению по оси x в направлении электрода Э1 (см. рис. 1), а $\theta_0 = 90^\circ$ — по оси y в направлении электрода Э2. Остальные углы определяют промежуточные направления смещения. Анализ кривых показывает, что характеристики практически равножестки при смещении в линейной зоне.

Важной характеристикой подвеса является предельное смещение, при котором сохраняются восстанавливающие свойства подвеса ($F < 0$). Как видно на рис. 5, максимальное относительное смещение при перемещении в любом направлении $(d/h)_{\max} \leq 0,66$. Это свойство подвеса следует учитывать при проектировании упоров, с которых осуществляется первоначальное всплытие ротора. Расчеты также показывают, что при перемещении в плоскости $\psi_0 = 45^\circ$ максимальное смещение возрастает до 0,7.

Статические силовые характеристики при втором варианте управления и смещении в плоскости $\psi_0 = 0^\circ$ приведены на рис. 6. Подвес

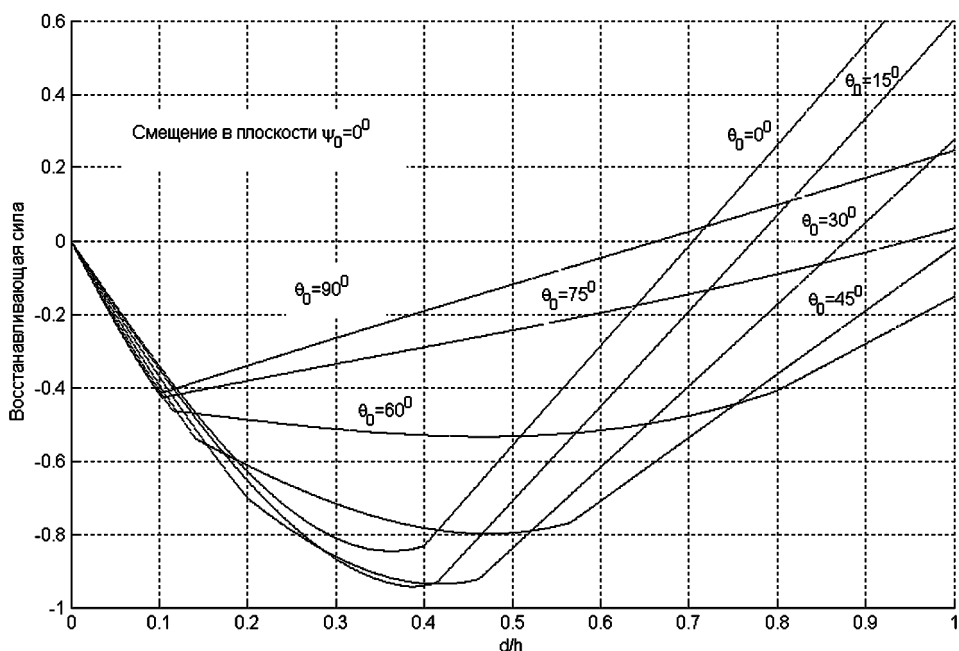


Рис. 5. Статические силовые характеристики подвеса с сегментными электродами при первом варианте управления

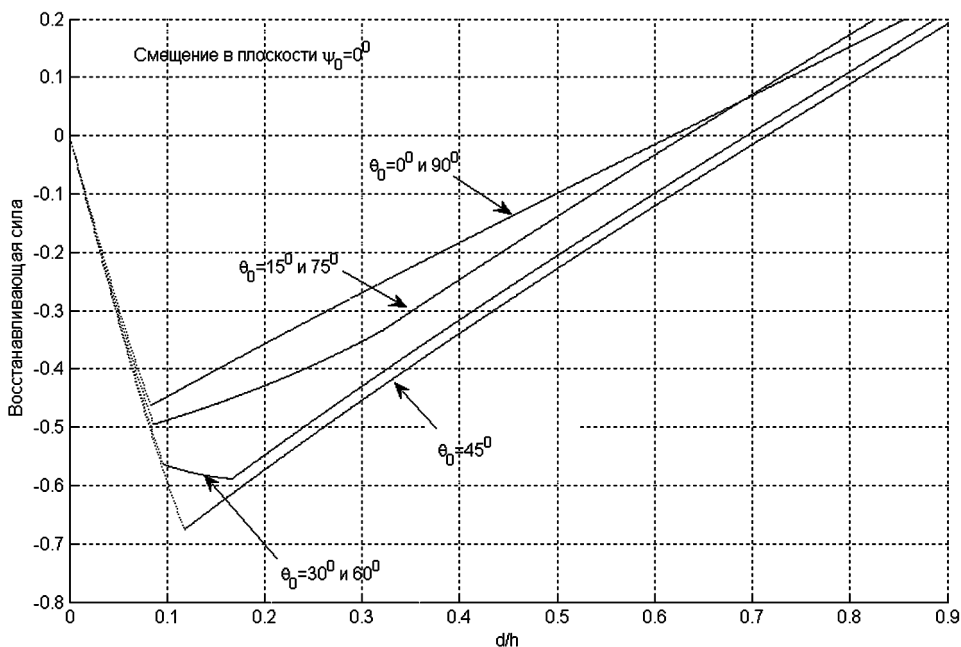


Рис. 6. Статические силовые характеристики подвеса с сегментными электродами при втором варианте управления

равножесткий при смещениях в любом направлении. Однако предельные величины смещений при которых сохраняется восстанавливающая сила подвеса, здесь ниже, чем у первого варианта управления: $(d/h)_{\max} \leq 0,62$ (против $0,66$ в первом варианте) при смещении в плоскости $\psi_0 = 0^\circ$ и $(d/h)_{\max} \leq 0,56$ (против $0,7$) при смещении в плоскости $\psi_0 = 45^\circ$.

Оценим теперь степень влияния потенциала ротора. Расчет силовых характеристик показывает, что при первом варианте управления учет или не учет потенциала ротора при вычислениях силовых характеристик несущественен. При втором варианте (рис. 7) наблюдается значительное влияние наведенного потенциала на вид статических силовых характеристик, приводящее к уменьшению диапазона действия восстанавливающей силы. Подвес при втором варианте управления более чувствителен к изменениям потенциала ротора. Если потенциал ротора нестабилен, а это может быть вызвано наличием неконтролируемого случайного заряда ротора q_0 (вторая составляющая в выражении (2)), то эта нестабильность напрямую перейдет в нестабильность силовой характеристики, а следовательно, и центрирования ротора.

Таким образом, можно констатировать, что применение второго варианта управления (10) приводит как к большому значению наведенного потенциала ротора φ_0 , так и к менее стабильным силовым характеристикам со сниженным диапазоном действия восстанавливающей силы. Исходя из этого, использование закона (10) в конкретных

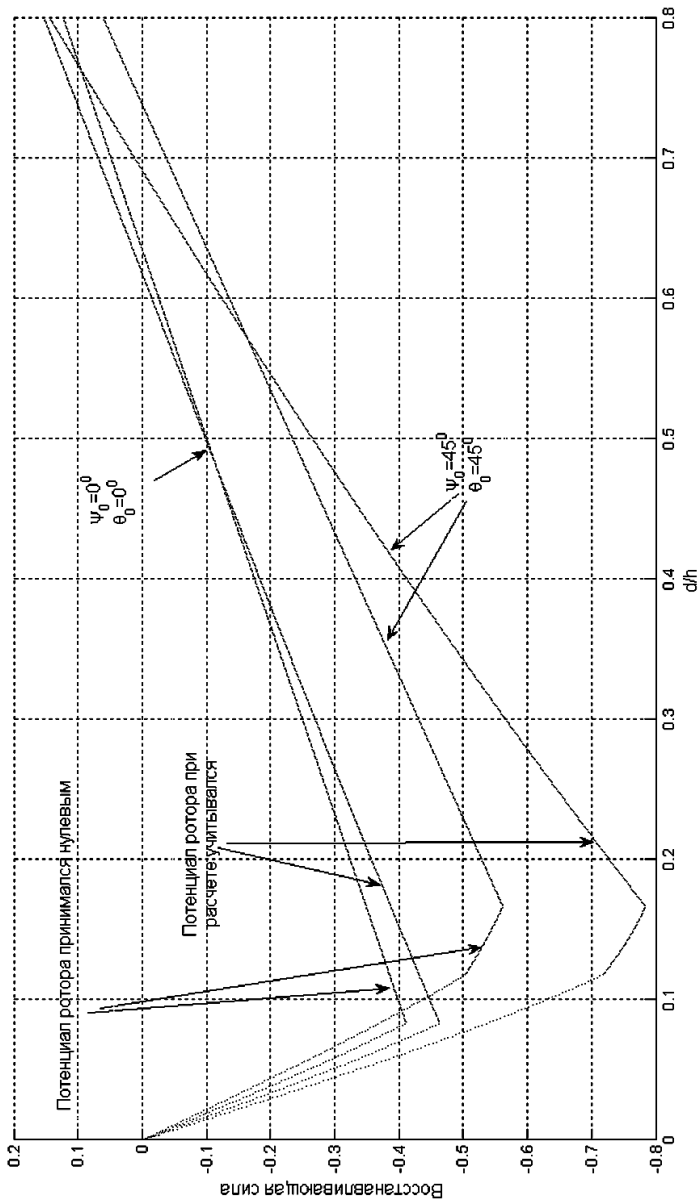


Рис. 7. Иллюстрация влияния потенциала ротора при расчете силовых характеристик подвеса с сегментными электродами при втором варианте управления

образцах приборов представляется нецелесообразным, несмотря на то, что при нем обеспечивается равновесность подвеса.

Потенциал ротора и силовые характеристики были получены и проанализированы для конкретных типоразмеров подвеса. Расчеты, проведенные для других типоразмеров, при изменении диаметров роторов (от 40 до 60 мм), зазоров (от 50 до 150 мкм), диапазона перегрузок (1...10)g дают иные значения уставок потенциалов на электродах подвеса, абсолютных значений потенциала ротора, максимальных значений сил, однако:

— кривые изменения относительного потенциала ротора остаются практически теми же, что и ранее, и при первом, и при втором варианте управления;

— при изменении абсолютных значений сил диапазон действия восстанавливающей силы (в долях зазора) остается практически тем же;

— остается практически той же степень влияния изменений потенциала ротора на силовые характеристики подвеса.

Все это позволяет говорить о том, что выводы, приведенные выше, справедливы для широкого диапазона типоразмеров шестиэлектродных подвесов с полыми роторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тамм И. Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1966.
2. 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.
3. Васюков С. А., Дробышев Г. Ф. Алгоритмы управления потенциалами на электродах электростатического подвеса // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Приборостроение”. – 2007. – № 2.– С.69–81.

Статья поступила в редакцию 13.09.2007

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 suspensions and sensors of autosignalling.