

## ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ПОДВЕС С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПОТЕНЦИАЛОВ И СОВМЕЩЕННЫМ ДАТЧИКОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

С.А. Васюков, Г.Ф. Дробышев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: sa\_vasyukov@mail.ru

*Исследована работа трехосного 12-электродного электростатического подвеса с регулированием высоковольтных потенциалов по закону широтно-импульсной модуляции и совмещенным датчиком перемещений. Рассмотрены вопросы выбора закона управления потенциалами и их влияние на амплитуду вынужденных колебаний ротора. Исследована динамическая погрешность датчика перемещений. Приведены результаты имитационного моделирования вынужденных колебаний для двух вариантов управления и различных значениях высоковольтных опорных напряжений.*

**Ключевые слова:** электростатический подвес, случайный заряд, потенциал ротора, электростатический гироскоп.

## ELECTROSTATIC SUSPENSION WITH PULSE-WIDTH CONTROL OF POTENTIALS AND WITH THE COMPATIBLE TRANSDUCER OF DISPLACEMENTS

S.A. Vasyukov, G.F. Drobyshev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: sa\_vasyukov@mail.ru

*The work of three-axis 12-electrode electrostatic suspension with control of high-voltage potentials by the law of pulse-width modulation and with the compatible transducer of displacements is studied. Issues of choosing a law to control the potentials and their effect on the amplitude of forced rotor oscillations are considered. A dynamical error of the displacement transducer is investigated. The results of simulation of the forced oscillations for two variants of control and for different levels of high reference voltages are given.*

**Keywords:** electrostatic suspension, random charge, rotor potential, electrostatic gyroscope.

Решение современных задач навигации и управления движением при условии снижения стоимости, энергопотребления и массогабаритных характеристик навигационных систем выдвигает задачу создания бескарданных инерциальных измерительных модулей (БИИМ). Одно из перспективных направлений — разработка БИИМ на электростатических гироскопах (ЭСГ). Выбор типа электростатического подвеса (ЭСП) и конфигурации электродной системы во многом определяет стратегию развития прибора в целом. Рассмотрим возможность и основные особенности применения трехосных ЭСП с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) при взвешивании сплошных роторов ЭСГ.

**Измерение линейных перемещений ротора.** Датчик линейных перемещений является одним из центральных звеньев подвеса, поэтому к его характеристикам (масштабному коэффициенту, стабильности нуля, уровню шумов) предъявляются повышенные требования. В настоящее время накоплен большой опыт практического применения емкостных датчиков в подвесах на постоянном токе. Следует отметить, что собственный (без дополнительного усиления) масштабный коэффициент таких датчиков невелик, так как определяется напряжением высокочастотного генератора возбуждения, а оно выбирается на уровне 5...10 В. Увеличение крутизны преобразования за счет возрастания напряжения возбуждения проблематично, поскольку при этом возрастают неконтролируемые силы, действующие на ротор по цепям датчиков. Влияние паразитных емкостей и разделительных конденсаторов снижает невысокий масштабный коэффициент, который в практических схемах подвесов составляет единицы мВ/мкм. Обеспечение стабильности масштабного коэффициента и нулевого сигнала датчика, а также минимизация индуцированного потенциала ротора по цепям датчиков требуют применения многофазных стабилизированных источников переменного напряжения или тока, что существенно усложняет схемотехнику подвеса.

Непосредственный перенос опыта проектирования высокочастотных датчиков перемещений на подвесы с ШИМ по некоторым причинам ограничен. При работе подвеса существуют промежутки времени, в которые выходные высоковольтные транзисторы замыкают электродные емкости на землю. В эти промежутки происходит нарушение условий работы датчика. В выходном напряжении датчика появляется сигнал помехи с частотой ШИМ, причем его значение соизмеримо с уровнем полезного сигнала. Высокий уровень помех в каналах подвеса напрямую влияет на стабильность центрирования ротора. Попытка развязать цепи датчика и формирователя ШИМ высокоомными резисторами лишь частично снимает проблему, так как при этом увеличивается длительность фронтов импульсов и снижается перегрузочная способность подвеса. Более перспективно применение датчика, предложенного в работе [1]. Его действие основано на формировании разности напряжений с электродов на этапе заряда ротор-электродных емкостей с последующим запоминанием этой разности в определенный момент времени в устройстве выборки-хранения или непосредственным преобразованием в цифровой сигнал (более перспективно). Рассмотрим 12-электродный трехосный подвес с разрезными электродами, условная схема одной оси которого приведена на рис. 1. В работе [2] показано, что улучшение равножесткости подвеса на постоянном токе при ненулевом начальном заряде ротора достигается именно при такой конфигурации электродной системы. Примем, что емкости

$C_1, C_3$  и  $C_2, C_4$  диаметрально противоположных электродов при смещениях по оси  $x$  изменяются по закону

$$C_1 = C_3 = \frac{C_0}{1 - \alpha x/h}; \quad C_2 = C_4 = \frac{C_0}{1 + \alpha x/h},$$

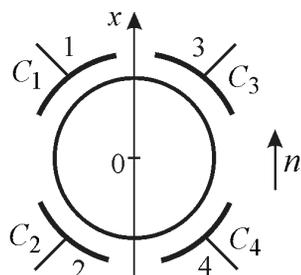
где  $C_0$  – ротор-электродная емкость при центральном положении взвешенного тела;  $\alpha$  – коэффициент формы электрода;  $x$  – смещение;  $h$  – зазор в центральном положении.

Разность напряжений на электродах, измеренная датчиком в момент времени  $\tau_0 = rC_0$  после начала импульса ( $r$  – резистор, через который проводится заряд емкости) в первом приближении равна

$$u_d = (u_2 - u_1) \Big|_{t=\tau_0} \approx \frac{2\alpha U_{\text{оп}} x}{e} \frac{x}{h} = k_d x.$$

Здесь  $U_{\text{оп}}$  – высоковольтное опорное напряжение (амплитуда ШИМ);  $k_d$  – масштабный коэффициент емкостного датчика. Проводя оценку при  $U_{\text{оп}} = 300 \text{ В}$ ,  $\alpha = 0,9$ ,  $h = 30 \text{ мкм}$ ,  $e = 2,718$ , получаем  $k_d = 6\,620 \text{ мВ/мкм}$ . В практических схемах подвесов вследствие наличия паразитных емкостей наблюдается снижение масштабного коэффициента в 2–3 раза. Кроме того, для согласования уровней сигналов датчика  $u_d$  и входных цепей аналого-цифрового преобразователя (АЦП) требуется введение делителя напряжения с коэффициентом деления не менее 20. Однако, как показывают расчеты и опыт работы с импульсными подвесами поплавковых приборов, даже с учетом этих факторов значение масштабного коэффициента датчика перемещений превышает 100 мВ/мкм. Недостатком такого способа является погрешность измерения, вызванная незначительным изменением ротор-электродных емкостей за время  $\tau_0$ , типовое значение которого составляет 3...4 мкс. Отметим, что эта погрешность играет существенную роль, если выходные данные прибора формируются на основе показаний емкостного датчика, например, при использовании показаний датчика для определения ускорения. В подвесе датчик работает в контуре обратной связи, в связи с чем влияние погрешности незначительно. Тем не менее целесообразно оценить уровень этой погрешности, например с помощью моделирования, что и будет выполнено далее.

Рассмотрим еще одно (кроме высокого масштабного коэффициента) важное преимущество импульсного датчика. Стабильность крутизны его характеристики и нулевого сигнала (может возникать ввиду неравенства паразитных емкостей плеч датчика) напрямую связана



**Рис. 1.** Условная схема одной оси 12-электродного трехосного подвеса с разрезными электродами

со стабильностью опорного напряжения  $U_{оп}$  нерегулируемого высоковольтного источника питания. Применение современных схемотехнических методов проектирования нерегулируемых источников, например многоконтурной стабилизации, позволяет поддерживать это напряжение на уровне не менее 0,01 %, обеспечив высокостабильные характеристики датчика.

Высокая собственная крутизна характеристики датчика перемещений позволяет реализовать цифровой подвес без промежуточного усилителя в контуре стабилизации, т.е. подвес, разность напряжений с электродов в котором поступает после делителя непосредственно на АЦП с дальнейшей цифровой коррекцией в микроконтроллере и формированием управляющих импульсов ШИМ на его выходных портах. Существующие в настоящее время 14- и 16-разрядные АЦП с временем преобразования 1...2 мкс обеспечивают (в пересчете через масштабный коэффициент импульсного датчика) дискретность преобразования не менее 0,001 мкм. В качестве примера можно привести 16-разрядное АЦП AD7980 с максимальной частотой выборки 1 МГц и опорным напряжением от 2,5 В или 14-разрядное АЦП AD7946 с частотой 500 кГц и опорным напряжением от 0,5 В. Их применение в датчике с масштабным коэффициентом  $k_d = 100$  мВ/мкм обеспечивает минимальный шаг преобразования около 0,0003 мкм, что существенно меньше уровня шумов в аналоговых подвесах. Использование 16-разрядных микроконтроллеров с тактовой частотой 20 МГц и более позволяет на практике реализовать цифровой подвес с частотой ШИМ до 20 кГц.

### **Законы управления потенциалами и вынужденные колебания.**

В подвесах с ШИМ возможны два основных варианта управления потенциалами. В первом варианте регулирование длительности импульсов на диаметрально противоположных электродах 1 и 2 (рис. 2, а, б) осуществляется по задним фронтам импульсов. Приращение длительности импульса ШИМ  $\Delta\tau$  ( $nT$ ) формируется в контуре обратной связи подвеса. Минимизация индуцированного потенциала ротора на всем периоде ШИМ достигается за счет подачи на другую пару электродов (3 и 4) этой же оси импульсов той же длительности, но противоположной полярности. Следует отметить, что применение этого варианта ограничено конструкциями с разрезными электродами. Во втором варианте (рис. 2, в, г) регулирование длительности импульсов происходит по заднему фронту на одном, и по переднему — на втором, диаметрально противоположном электроде. Сумма напряжений на электродах каждой пары в любой момент времени постоянна и равна опорному напряжению. Это позволяет за счет выбора знака и опорных напряжений обеспечить равенство нулю мгновенной суммы напряжений на всех электродах и минимизировать таким способом

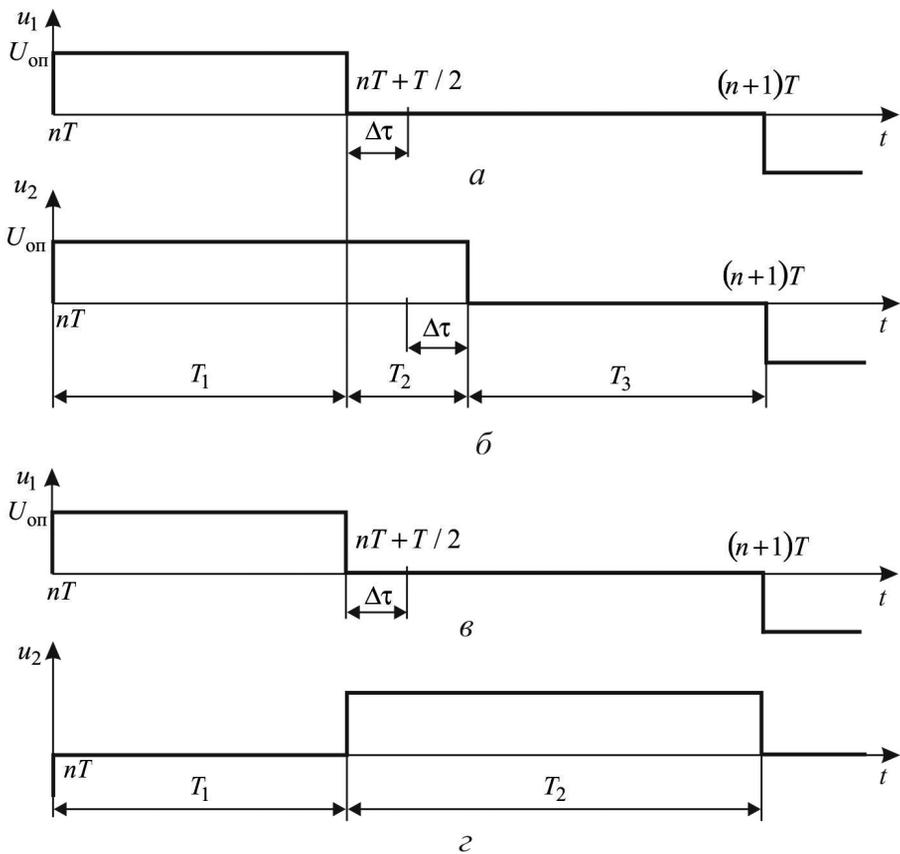


Рис. 2. Первый (а, б) и второй (в, г) варианты управления потенциалами на электродах 1 (а, в) и 2 (б, г)

наведенный потенциал ротора в подвесах как с разрезными, так и с неразрезными электродами.

В рассматриваемых подвесах в силу импульсного характера силового воздействия имеют место вынужденные колебания центра ротора. Основываясь на некоторых допущениях, проведем сравнительный анализ вынужденных колебаний для двух вариантов управления потенциалами.

**Первый вариант управления потенциалами.** Допустим, что на ротор действует переносное ускорение  $ng$  (кратность перегрузки  $n$ ) в положительном направлении оси  $x$  (см. рис. 1). При первом варианте управления это приведет к сокращению на  $\Delta\tau$  длительности импульса на электроде 1 и ее увеличению на электроде 2 (см. рис. 2, а, б). Разобьем период ШИМ на три однородных интервала. На первом интервале  $T_1 = T/2 - \Delta\tau$  высоковольтные напряжения на электродах 1 и 2 равны. При малости смещений ротора из центра подвеса пренебрежем дестабилизирующей (пропорциональной смещению) составляющей поперечной силы. В этих условиях примем, что

электроды 1 и 2 (а также 3 и 4) создают равные и противоположно направленные силы, а ротор смещается только под действием внешней перегрузки  $mng$  ( $m$  – масса сплошного ротора). На третьем интервале  $T_3 = T/2 - \Delta\tau$ , протяженность которого точно такая же, как и первого интервала, ротор движется только под действием перегрузки, так как напряжения на электродах отсутствуют. На втором интервале  $T_2 = 2\Delta\tau$  сила  $F$ , создаваемая электродом 2, противоположна перегрузке. Таким образом, имеются два однородных интервала. На первом интервале протяженностью  $T_1 + T_3 = T - 2\Delta\tau$  движение происходит под воздействием перегрузки  $mng$ , на втором  $T_2 = 2\Delta\tau$  – под действием перегрузки и противоположной ей силе подвеса  $mng - F$ . Поскольку установившееся движение ротора носит периодический характер, достаточно будет проанализировать уравнения движения на одном периоде  $t = 0 \dots T$ .

Рассмотрим упрощенные уравнения движения для каждого интервала, а решения будем определять методом припасовывания. Сдвинем начало временной оси  $t = 0$  на начало интервала  $T_3$ . При  $t = 0$  центр ротора реального подвеса имеет некоторое смещение  $x^*$  относительно центра ротор-электродной полости. Поскольку рассматривается упрощенный случай и интерес представляет только амплитуда вынужденных колебаний, сместим начало координат по оси  $x$  на величину  $x^*$  так, что при  $t = 0$   $x(0) = 0$ . Скорость ротора при  $t = 0$  обозначим  $V_0$  (она пока неизвестна и будет определена методом припасовывания).

Уравнение движения и начальные условия на первом интервале (протяженность  $T_1 + T_3 = T - 2\Delta\tau$ , действует только перегрузка  $mng$ ):

$$m\ddot{x} = mng; \quad x(0) = 0; \quad \dot{x}(0) = V_0; \quad 0 \leq t \leq T - 2\Delta\tau. \quad (1)$$

Решение (1) имеет вид  $\dot{x} = V_0 + ngt$ ;  $x = V_0t + \frac{ngt^2}{2}$ .

В конце первого интервала скорость и координата принимают значения

$$\begin{aligned} \dot{x}(T - 2\Delta\tau) &= V_1 = V_0 + ng(T - 2\Delta\tau); \\ x(T - 2\Delta\tau) &= x_1 = V_0T - 2V_0\Delta\tau + \frac{ngT^2}{2} - 2ngT\Delta\tau + 2ng\Delta\tau^2. \end{aligned}$$

Для упрощения записи уравнений для второго интервала (протяженность  $T_2 = 2\Delta\tau$ , действует как перегрузка, так и сила подвеса  $mng - F$ ) совместим начало оси времени с началом второго интервала:

$$m\ddot{x} = mng - F; \quad x(0) = x_1; \quad \dot{x}(0) = V_1; \quad T - 2\Delta\tau \leq t \leq T. \quad (2)$$

Интегрируя (2), получаем уравнение для скорости на втором интервале

$$\dot{x} = V_1 + \left( ng - \frac{F}{m} \right) t = V_0 + ng(T - 2\Delta\tau) + \left( ng - \frac{F}{m} \right) t. \quad (3)$$

Учитывая, что скорость в конце второго интервала  $\dot{x}(T)$  должна быть равна скорости  $V_0$  в начале первого интервала, из уравнения (1) запишем соотношение

$$\frac{F}{m} = ng \frac{T}{2\Delta\tau}. \quad (4)$$

Из условия равенства координат в конце второго интервала и в начале первого  $x(0) = 0 = x(T)$  определяем значение скорости

$$V_0 = -ng \left( \frac{T}{2} - \Delta\tau \right). \quad (5)$$

Пусть подвес рассчитан на перегрузку кратностью  $n_{\max}$ , при которой приращение длительности импульса составит  $\Delta\tau_{\max} = T/2$ . Тогда

$$\Delta\tau = \frac{n}{n_{\max}} \frac{T}{2}. \quad (6)$$

В соответствии с (4)–(6) уравнения движения при первом варианте управления потенциалами принимают вид

$$\begin{aligned} x(t) &= -ng \frac{T}{2} \left( 1 - \frac{n}{n_{\max}} \right) t + \frac{ngt^2}{2} \quad \text{при } 0 \leq t \leq T \left( 1 - \frac{n}{n_{\max}} \right); \\ x(t) &= ng \frac{T}{2} \left( 1 - \frac{n}{n_{\max}} \right) \left[ t - T \left( 1 - \frac{n}{n_{\max}} \right) \right] + \\ &+ ng \left( 1 - \frac{n_{\max}}{n} \right) \left[ t - T \left( 1 - \frac{n}{n_{\max}} \right) \right]^2 \quad \text{при } T \left( 1 - \frac{n}{n_{\max}} \right) \leq t \leq T. \end{aligned} \quad (7)$$

**Второй вариант управления потенциалами.** Расчеты, проведенные при тех же допущениях, что и при первом варианте управления, позволяют получить следующие уравнения движения для второго варианта:

$$\begin{aligned} x(t) &= g \frac{T}{4} \left( \frac{n^2}{n_{\max}} - n_{\max} \right) t + \\ &+ ng \left( 1 + \frac{n_{\max}}{n} \right) \frac{t^2}{2} \quad \text{при } 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \left( 1 - \frac{n}{n_{\max}} \right); \\ x(t) &= ng \frac{T}{4} \left( \frac{n_{\max}}{n} - \frac{n}{n_{\max}} \right) \left[ t - \frac{T}{2} \left( 1 - \frac{n}{n_{\max}} \right) \right] + \end{aligned} \quad (8)$$

$$+ \frac{ng}{2} \left(1 - \frac{n_{\max}}{n}\right) \left[ t - \frac{T}{2} \left(1 - \frac{n}{n_{\max}}\right) \right]^2 \quad (8)$$

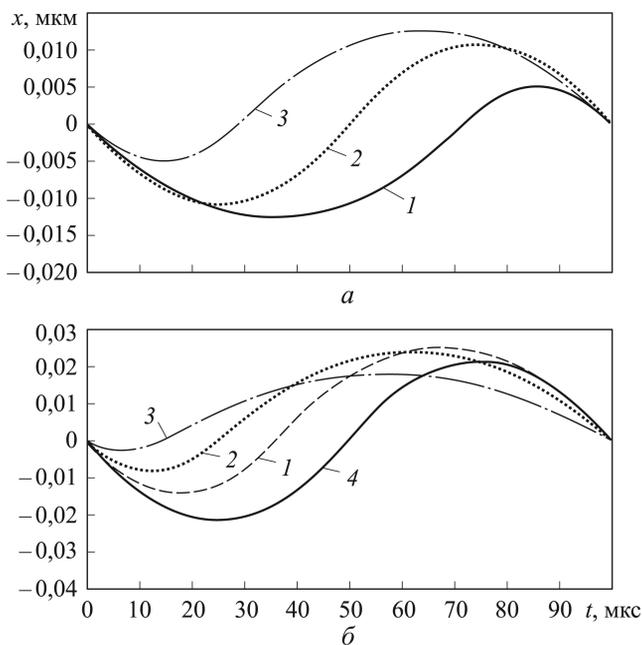
при  $\frac{T}{2} \left(1 - \frac{n}{n_{\max}}\right) \leq t \leq T$ .

На рис. 3 приведены кривые изменения вынужденных колебаний для первого и второго варианта управления потенциалами, построенные при  $n_{\max} = 7$ , частоте ШИМ 10 кГц для различных значений перегрузок  $n$ .

При первом варианте управления максимальное значение амплитуды колебаний  $x_{1\max} \approx 0,011$  мкм достигается при  $n = n_{\max}/2 = 3,5$ . При нулевой ( $n = 0$ ) и максимальной ( $n = n_{\max}$ ) перегрузках колебания исчезают. Снижение перегрузочной способности подвеса приводит к пропорциональному снижению вынужденных колебаний.

При втором варианте управления колебания достигают максимального значения  $x_{2\max} \approx 0,022$  мкм при  $n = 0$  и уменьшаются до нуля при максимальной перегрузке.

Сравнительный анализ показал, что максимальный уровень вынужденных колебаний при первом варианте управления в 2 раза ниже, чем при втором варианте. Кроме того, применение первого варианта управления исключает колебания при отсутствии перегрузок, что оправдывает применение этого варианта на объектах, работающих



**Рис. 3. Вынужденные колебания при первом (а) и втором (б) вариантах управления потенциалами на электродах подвеса для  $n = 2$  (1), 3,5 (2), 5 (3) и 0 (4)**

длительное время при нулевых или минимальных перегрузках. Соотношения (7) и (8) получены с учетом некоторых допущений, поэтому необходима их проверка путем математического моделирования.

**Моделирование.** Модель одноосного подвеса, выполненная в пакете MATLAB 2006, приведена на рис. 4. В основу модели положены расчетные соотношения. В частности, вычисление мгновенных значений проекции силы  $F_x$  и потенциала ротора осуществлялось как

$$F_x = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 (u_i - \varphi_0)^2 \frac{\partial C_i}{\partial x}; \quad \varphi_0 = \frac{q_0 + \sum_{i=1}^4 u_i C_i}{\sum_{i=1}^4 C_i},$$

где  $u_i$ ,  $i = 1, \dots, 4$  — мгновенные значения импульсных потенциалов на электродах, приращение длительности которых формируется на основе управляющего сигнала  $u_{\text{упр}}$  в блоке ШИМ;  $\varphi_0$  — мгновенное значение потенциала ротора с учетом его заряда  $q_0$ . Сигнал датчика перемещений формировался путем измерения разности напряжений с электродов 1 и 2 на этапе их заряда

$$\begin{aligned} u_d(nT) &= \frac{u_2 - u_1}{k_{\text{дел}}} \Big|_{t=nT+\tau_0} = \\ &= \frac{1}{k_{\text{дел}}} \left[ U_{\text{оп}} \left( 1 - \exp \frac{-t}{rC_2} \right) - U_{\text{оп}} \left( 1 - \exp \frac{-t}{rC_1} \right) \right] \Big|_{t=\tau_0}, \quad (9) \end{aligned}$$

где  $k_{\text{дел}}$  — коэффициент делителя, согласующего высоковольтные и низковольтные цепи.

Сигнал датчика дополнительно квантовался по уровню и фиксировался на период экстраполятором нулевого порядка. Для обеспечения устойчивости по положению в модели применяли дискретный аналог интегро-дифференцирующего звена

$$W_{\text{кк}}(z) = \frac{(z - d_2)}{(z - d_1)},$$

коэффициенты  $d_1$ ,  $d_2$  которого рассчитывались в процессе параметрической оптимизации.

В качестве примера моделирования рассматривали подвес сплошного ротора массой  $m = 1$  г, зазор в центральном положении  $h = 30$  мкм, ротор-электродная емкость  $C_0 = 4,2$  пФ, частота ШИМ  $f = 10$  кГц. Линейная зона работы подвеса, при которой приращения длительности импульсов не превышали  $\Delta\tau = T/2$ , соответствовала смещению ротора на 10% от зазора.

При моделировании имитировалось первоначальное всплытие ротора с упоров при пониженном опорном напряжении  $U_{\text{оп}} = 300$  В и его последующем возрастании до  $U_{\text{оп}} = 800$  В. Такой вариант позволяет исключить пробой ротор-электродного промежутка при первоначальном всплытии и обеспечивает близкие по значениям перегрузочные

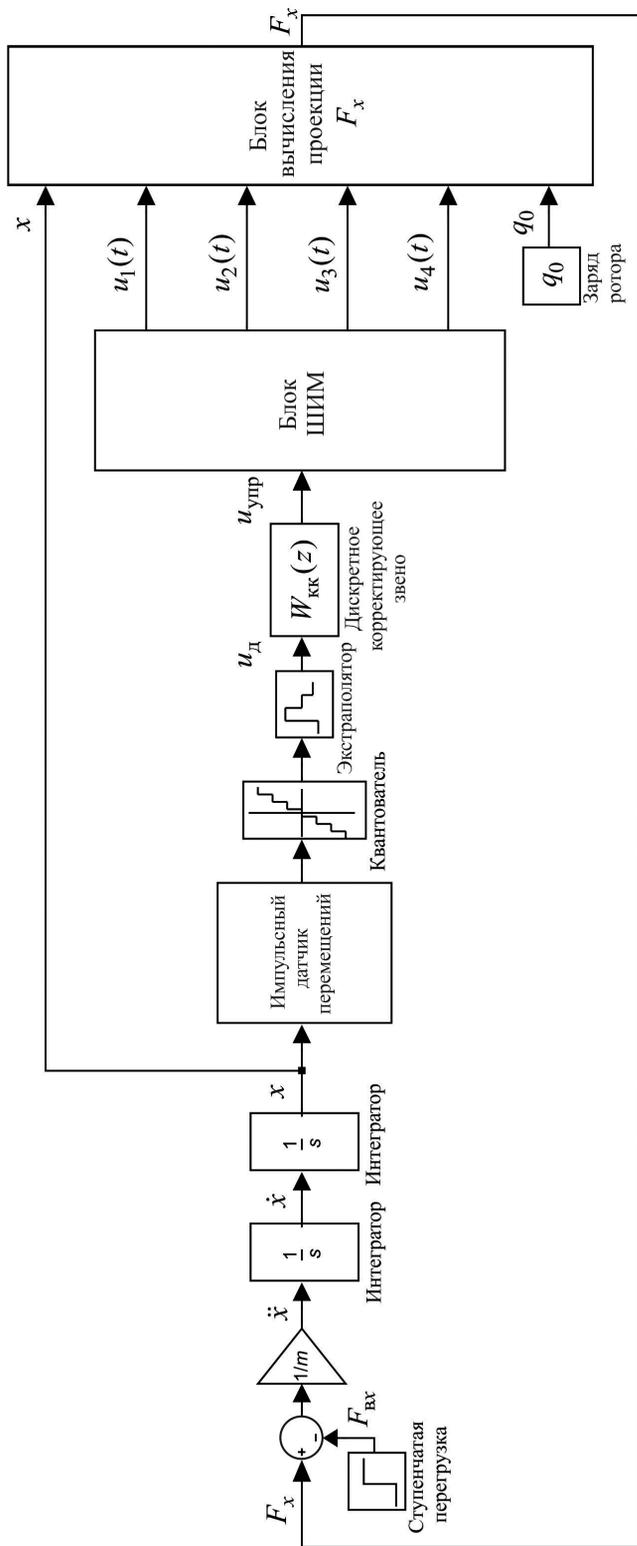
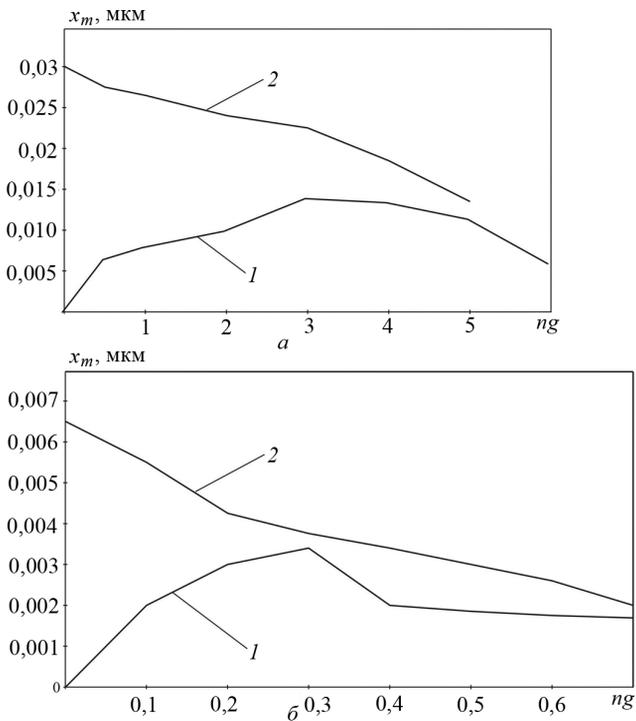


Рис. 4. Имитационная модель одноосного подвеса

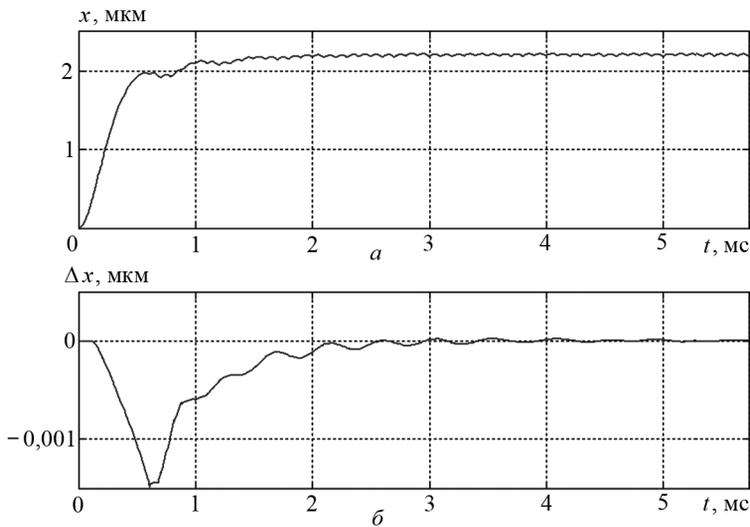


**Рис. 5. Зависимость амплитуды вынужденных колебаний от коэффициента перегрузки при  $U_{он} = 800$  (а) и  $300$  В (б) для первого (1) и второго (2) вариантов управления потенциалами**

способности импульсного подвеса и подвеса на постоянном токе с опорным напряжением  $400$  В (максимальное напряжение на электродах  $800$  В).

**Результаты моделирования.** Зависимости амплитуды вынужденных колебаний от коэффициента перегрузки для двух вариантов управления и при опорных напряжениях  $800$  и  $300$  В приведены на рис. 5. Значения амплитуд и тенденция их изменения подтверждают правильность расчетных соотношений (7) и (8). При первом варианте управления и  $U_{он} = 300$  В амплитуда колебаний не превышает  $0,0035$  мкм, а при  $U_{он} = 800$  В —  $0,013$  мкм (расчетное значение  $0,011$  мкм). Такой уровень колебаний соизмерим с уровнем шумов. Кроме того, применение авторефлекторных датчиков измерения углового положения оси ротора, включенных по дифференциальной схеме, ослабляет влияние линейных смещений (следовательно, и колебаний) центра ротора.

Как было отмечено ранее, погрешность измерения датчика перемещений возникает вследствие смещения центра ротора за время  $\tau_0$ , причем значение этой погрешности увеличивается с возрастанием скорости смещения ротора. Примем, что скорость смещения достигает наибольшего значения при воздействии ступенчатой перегрузки, близкой к максимальной. Для оценки погрешности последовательно модели-



**Рис. 6.** Результаты моделирования переходного процесса при действии перегрузки (а) и погрешности импульсного датчика перемещений (б)

ровались два переходных процесса смещения центра при воздействии перегрузки  $6g$  (подвес рассчитан на максимальную перегрузку  $7g$ ). Первый переходный процесс  $x(t)$  (рис. 6, а) получен на модели (см. рис. 4), имеющей в составе блок импульсного датчика перемещений, который реализован путем измерения разности напряжений с электродов 1 и 2 на этапе их заряда (см. (9)).

Второй переходный процесс  $\bar{x}(t)$  был получен на той же модели (см. рис. 4), но блок импульсного датчика, был заменен безынерционным звеном с коэффициентом передачи, равным статическому коэффициенту усиления импульсного датчика. Разность переходных процессов (погрешность измерения)  $\Delta x(t) = x(t) - \bar{x}(t)$  показана на рис. 6, б и не превышает  $0,0015$  мкм, что соизмеримо с уровнем шумов.

Заряд на роторе электростатического подвеса возникает или на этапе первоначального всплытия (если используются заземленные упоры) или в процессе эксплуатации в результате действия темновых токов и микрозарядов. В работе [2] было доказано, что применение в подвесе на постоянном токе разрезных электродов по каждой полуоси с разнополярными опорными напряжениями позволяет не только уменьшить заряд ротора, приобретаемый при первоначальном всплытии, но и в значительной степени ослабить его влияние на точность центрирования. В рассматриваемом варианте подвеса также применяются разрезные электроды и разнополярные источники, поэтому выводы, приведенные в работе [2], можно распространить и на импульсный подвес. Точность центрирования зависит в основном от двух факторов: 1) коэффициента усиления в контуре стабилизации, который

определяет статическую погрешность центрирования; 2) смещения нуля датчика перемещений. В идеальном подвесе, сочетающем в себе астатический регулятор с идеальным (без смещения нуля) датчиком, ротор находится точно в геометрическом центре подвеса и изменение заряда ротора не приводит к расцентровке. В реальном подвесе со статическим регулятором и смещением нуля даже при полном отсутствии перегрузки положение центра ротора не будет совпадать с электрическим нулем датчика перемещений.

Моделирование влияния заряда ротора проводилось для импульсного двухполярного подвеса с опорным напряжением 800 В. В датчик перемещений (см. рис. 4) вводилось смещение нуля  $x_0$ . Ось  $x$  устанавливалась невесовой (коэффициент перегрузки  $n = 0$ ). Проводилось центрирование ротора при различных значениях заряда  $q_0$  (или потенциала ротора  $\varphi_0$ , определяемого этим зарядом) и фиксировалось положение центра  $x^*$ . Результаты моделирования приведены ниже:

$\varphi_0$ , В .....	0	100	200	300
$x^*$ , мкм при значении $x_0$ , мкм:				
1 .....	1,243	1,252	1,280	1,326
2 .....	2,471	2,487	2,537	2,625

При отсутствии перегрузки, но при наличии смещения нуля датчика изменение заряда приводит к смещению центра ротора. Тот же самый эффект наблюдается при воздействии перегрузок в подвесе с датчиком без смещения нуля. Одна и та же перегрузка при различном заряде ротора вызывает разные смещения его центра. Таким образом, можно утверждать, что применение разрезных электродов с разнополярным напряжением значительно ослабляет, но не исключает влияние заряда ротора. Важен начальный заряд ротора и его временная стабильность. В работе [3] было экспериментально доказано, что в двухполярных импульсных подвесах со сменой знака потенциала на каждом электроде происходит минимизация натекания заряда на ротор в процессе эксплуатации. Это является несомненным преимуществом импульсного подвеса по сравнению с подвесом на постоянном токе.

Стабилизация скорости вращения ротора импульсным ЭСП не рассматривается в рамках настоящей статьи, однако она принципиально выполнима. Это приведено в некоторых работах, где описаны пассивный (с использованием режекторных фильтров) или активный способ стабилизации. В частности в работе [4] подробно рассмотрен активный способ стабилизации скорости вращения сплошного ротора в подвесе с импульсными источниками заряда. Подвес такого типа со стабилизацией скорости вращения применен, в частности, в корабельной бесплатформенной инерциальной навигационной системе N2000.

**Выводы.** Рассмотрены вопросы выбора законов управления потенциалами в подвесе с ШИМ сплошного ротора ЭСГ. Проведен анализ вынужденных колебаний, по итогам которого установлено следующее: применение закона управления по задним фронтам импульсов позволяет минимизировать амплитуду вынужденных колебаний, а при отсутствии перегрузки — полностью их исключить. Математическое моделирование показало, что при частотах ШИМ более 10 кГц амплитуды колебаний и динамическая погрешность импульсного датчика перемещений соизмеримы с уровнем шумов.

Импульсный датчик перемещений обладает крутизной преобразования более 100 мВ/мкм, что позволяет при использовании современных 14- и 16-разрядных АЦП практически реализовать полностью цифровой подвес без промежуточных аналоговых усилителей. Высокая стабильность центрирования в таком подвесе базируется на применении нерегулируемых стабилизированных на уровне не менее 0,01 % высоковольтных источников питания. Применение закона управления со сменой знака напряжения на каждом электроде позволяет минимизировать натекание заряда на ротор в процессе эксплуатации ЭСГ.

Подвесы с ШИМ обладают необходимым потенциалом для улучшения долговременной стабильности центрирования, особенно в приборах, работающих при малом уровне перегрузок.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *А.с. 1331219 СССР, МКИ G01C 19/24. Способ центрирования ротора электростатического гироскопа / С.А. Васюков, Г.Ф. Дробышев, Н.А. Орлов (СССР). № 3931438/40-23; 1987.*
2. *Буравлев А.П., Кузин В.М., Ландау Б.Е., Сумароков В.В. Бескарданный электростатический гироскоп с подвесом на двойных электродах: Доклад на XXVI науч.-техн. конф. памяти Н.Н. Острякова. Санкт-Петербург, 2008.*
3. *Васюков С.А. О влиянии заряда ротора на стабильность центрирования в цилиндрическом электростатическом подвесе // Гироскопия и навигация. 2008. № 3. С. 64–69.*
4. *Пат. No 3955426 США, МКИ G01C 19/28. Mass unbalance modulation pickoff attenuation and speed control in electrostatic gyroscope system / J.F. Klinchuch (США); North American Rockwell Corp. (США) No. 480786; Заявлено 19.06.74; Оpubл. 11.05.76; НКИ 74.5.6.*

## REFERENCES

- [1] Vasyukov S.A., Drobyshev G.F., Orlov N.A. Sposob tsentrirovaniya rotora elektrostatischeeskogo giroskopa [A method for centering an electrostatic gyroscope]. Inventor's Certificate SU, no. 3931438/40-23, 1987.
- [2] Buravlev A.P., Kuzin V.M., Landau B.E., Sumarokov V.V. A gimballess electrostatic gyroscope suspended on twin electrodes. *Tr. 26 Nauch. Tekhn. Konf. pamyati N.N. Ostryakova* [Proc. 26th Sci. Tech. Conf. in memory of N.N. Ostryakov]. St. Petersburg, 2008 (in Russ.).

- [3] Vasyukov S.A. The influence of the rotor charge on centering stability in a cylindrical electrostatic suspension. *Giroskopiya i Navig.* [Gyroscopy and Navig.], 2008, 3, pp. 64–69 (in Russ.).
- [4] Klinchuch J.F. Mass unbalance modulation pickoff attenuation and speed control in electrostatic gyroscope system. Patent US, no. 3955426, 1976.

Статья поступила в редакцию 24.10.2011

Сергей Александрович Васюков — д-р техн. наук, профессор кафедры “Электротехника и промышленная электроника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области электростатических подвесов и датчиков автосигнализаций. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

S.A. Vasyukov — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Electrical Engineering and Industrial Electronics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications in the field of electrostatic suspensions and car alarm sensors. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Георгий Федорович Дробышев — 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. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

G.F. Drobyshev — Dr. Sci. (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. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.