

Электростатический подвес с широтно-импульсным регулированием потенциалов и совмещенным датчиком перемещений.

10, октябрь 2012

DOI: 10.7463/1012.0476229

Васюков С. А.

УДК 621.31(075.8)

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана
sa_vasyukov@mail.ru

Введение

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). Одним из перспективных направлений считается разработка БИИМ на электростатических гироскопах (ЭСГ). Выбор типа электростатического подвеса (ЭСП) и конфигурации электродной системы во многом определяет стратегию развития прибора в целом. В статье исследуется возможность и основные особенности применения трехосных ЭСП с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) при взвешивании сплошных роторов ЭСГ.

1. Измерение линейных перемещений ротора

Датчик линейных перемещений является одним из центральных звеньев подвеса и 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, которое выбирается на уровне 5–10 В.

Увеличение крутизны преобразования за счет роста напряжения возбуждения проблематично, так как при этом растут неконтролируемые силы, действующие на ротор по цепям датчиков. Влияние паразитных емкостей и разделительных конденсаторов снижает и так 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 требует применения многофазных стабилизированных источников переменного напряжения или тока, что существенно усложняет схемотехнику подвеса.

Непосредственный перенос опыта проектирования высокочастотных датчиков перемещений на подвесы с ШИМ ограничен по ряду причин. 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 величина соизмерима с уровнем полезного сигнала. Большой 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 перспективным является 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, что более перспективно, непосредственным преобразованием в цифровой сигнал. Рассмотрим 12-ти электродный трехосный подвес с разрезными электродами, условная схема одной оси которого показана на рис. 1.

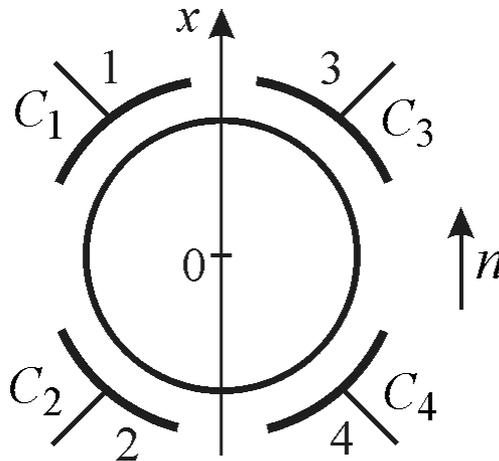


Рис. 1. Электродная система одного канала электростатического подвеса

В работе [2] показано, что улучшение равновесности 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

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

где C_0 – емкость электрод-ротор при центральном положении взвешенного тела, x – смещение, h – зазор в центральном положении, α – коэффициент формы электрода.

Разность напряжений с электродов, измеренная в момент $\tau_0 = rC_0$ после начала импульса, где r – резистор, через который проводится заряд емкости, в первом приближении равна

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

Здесь $U_{\text{оп}}$ – высоковольтное опорное напряжение (амплитуда ШИМ), k_d – масштабный коэффициент емкостного датчика. Проводя оценку при $U_{\text{оп}} = 300 \text{ В}$, $\alpha = 0,9$, $h = 30 \text{ мкм}$, $e = 2,718$, получим $k_d = 6620 \text{ мВ/мкм}$. В практических схемах подвесов из-за наличия паразитных емкостей наблюдается снижение масштабного коэффициента в 2–3 раза. Кроме этого 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 даже с учетом этих факторов масштабный коэффициент датчика перемещений, как показывают расчеты и опыт работы с импульсными подвесами поплавковых приборов, превышает 100 мВ/мкм. Недостатком такого способа является ошибка измерения, вызванная незначительным изменением ротор - электродных емкостей за время τ_0 , типовое значение которого составляет 3–4 мкс. Сразу же отметим, что эта ошибка играла бы существенную роль, если бы на основе показаний емкостного датчика формировались выходные данные прибора. Например, при использовании показаний датчика для определения ускорения. В подвесе же датчик работает в контуре обратной связи и влияние ошибки незначительно. Тем не менее, представляется целесообразным оценить уровень этой ошибки, например путем моделирования, что и будет сделано ниже.

Отметим другое важное преимущество импульсного датчика. Стабильность его масштабного коэффициента и нулевого сигнала (смещение нуля может возникать из-за неравенства паразитных емкостей плеч датчика) напрямую связана со стабильностью напряжения $U_{оп}$ нерегулируемого высоковольтного источника питания. Применение современных схемотехнических методов проектирования нерегулируемых источников, например, многоконтурной стабилизации, позволяет поддерживать это напряжение на уровне не хуже 0,01 %, обеспечивая высокостабильные характеристики датчика.

Высокий масштабный коэффициент 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 14–16 разрядные АЦП с временем преобразования 1–2 мкс обеспечивают (в пересчете через масштабный коэффициент датчика) дискретность преобразования не хуже 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 AD7946 с частотой 500 кГц и опорным напряжением от 0,5 В. Их применение в датчике с $k_d = 100$ мВ/мкм обеспечивает минимальный шаг преобразования порядка 0,0003 мкм, что существенно меньше уровня шумов в аналоговых подвесах. Использование 16 разрядных микроконтроллеров с тактовой частотой 20 МГц и выше, позволяет практически реализовать цифровой подвес с частотой ШИМ до 20 кГц.

2. Законы управления потенциалами и вынужденные колебания

В подвесах с ШИМ возможны два основных варианта регулирования потенциалов. 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 здесь достигается за счет подачи на другую пару (3 и 4) электродов этой же оси импульсов той же длительности, но противоположной полярности.

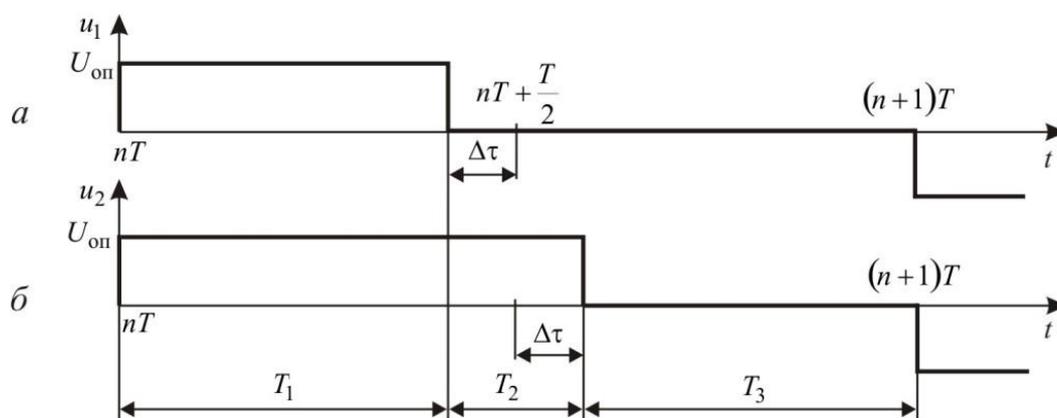


Рис. 2. Первый вариант управления потенциалами: а – на электроде 1; б – на электроде 2

Следует отметить, что применение этого варианта ограничено конструкциями с разрезными электродами. Во втором варианте, рис. 3 а, б, регулирование происходит по заднему фронту на одном, и по переднему на втором, диаметрально противоположном электроде.

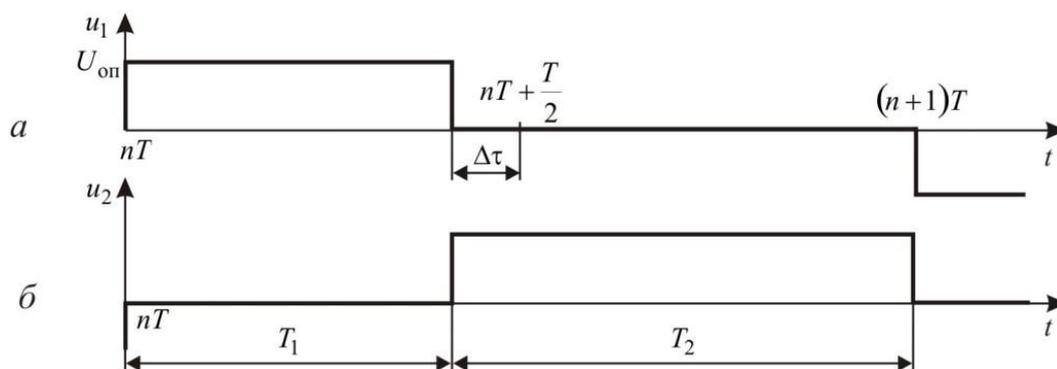


Рис. 3. Второй вариант управления потенциалами: а – на электроде 1; б – на электроде 2

Сумма напряжений на электродах каждой пары в любой момент времени остается постоянной и равной по величине опорному напряжению. Это позволяет за счет выбора знака и величины опорных напряжений обеспечить равной нулю мгновенную сумму напряжений всех электродов и минимизировать, таким образом, 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. Проведем, основываясь на некоторых допущениях, сравнительный анализ вынужденных колебаний для двух вариантов управления.

Допустим, что на ротор действует переносное ускорение ng (кратность перегрузки n) в положительном направлении оси x , рис. 1. При первом варианте управления это приведет к сокращению на $\Delta\tau$ длительности импульса на электроде 1 и увеличению на электроде 2, рис. 2 а, б. Разобьем период ШИМ на три однородных промежутка. На первом промежутке $T_1 = T/2 - \Delta\tau$ высоковольтные напряжения и на 1-м и на 2-м электродах равны. При малости смещений ротора из центра подвеса пренебрежем дестабилизирующей (пропорциональной смещению) составляющей пондеромоторной силы. В этих условиях будем считать, что электроды 1 и 2 (а также 3 и 4) создают равные и противоположно направленные силы, а ротор на этом промежутке смещается только под действием внешней перегрузки.

На участке $T_2 = 2\Delta\tau$ сила, создаваемая электродом 2, противоположна перегрузке, а на третьем участке $T_3 = T/2 - \Delta\tau$, протяженность которого точно такая же, как и участка 1, ротор опять движется только под действием перегрузки. Очевидно, что при нулевой $n=0$ и максимальной $n=n_{\max}$ перегрузке колебания исчезают. Применение первого варианта управления исключает колебания при отсутствии перегрузок, что оправдывает использование этого варианта на объектах, работающих длительное время при нулевых или минимальных перегрузках.

При втором варианте управления максимальный уровень вынужденных колебаний будет наблюдаться при отсутствии перегрузок, а по мере увеличения перегрузки амплитуда колебаний падает. Проверим эти выводы путем математического моделирования.

3. Моделирование

Модель одноосного подвеса, выполненная в пакете Матлаб-2006, представлена на рис. 4.

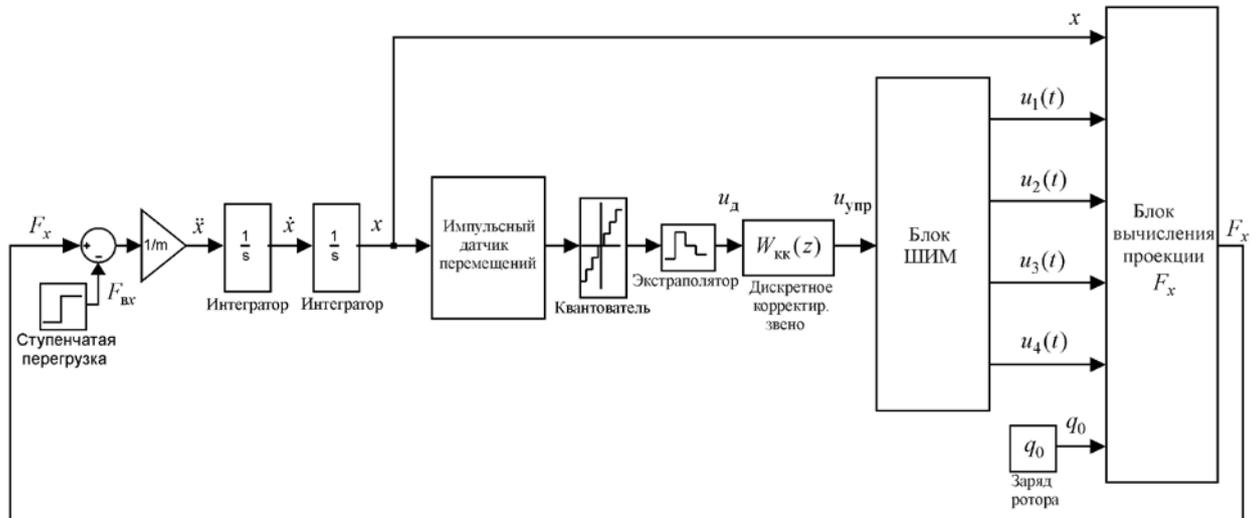


Рис. 4. Имитационная модель подвеса с ШИМ

В основу модели положен ряд расчетных соотношений. В частности, вычисление мгновенных значений проекции силы F_x и потенциала ротора осуществлялось как

$$F_x = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 (u_i - \varphi_0)^2 \frac{\partial C_i}{\partial x}; \varphi_0 = \frac{q_0 + \sum_{i=1}^4 u_i C_i}{\sum_{i=1}^4 C_i}, \quad (3)$$

где $u_i, i=1...4$ – мгновенные значения импульсных потенциалов на электродах, приращение длительности которых формируется на основе управляющего сигнала $u_{упр}$ в блоке ШИМ, φ_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

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

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 использовался 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 рассматривался подвес сплошного ротора массой $m = 1$ г, зазор в центральном положении $h = 30$ мкм, емкость электрод-ротор $C_0 = 4,2$ 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 увеличении до $U_{\text{оп}} = 800$ В. Такой вариант позволяет исключить пробой ротор-электродного промежутка при первоначальном всплытии и обеспечивает близкие по значениям перегрузочные способности импульсного подвеса и подвеса на постоянном токе с опорным напряжением 400 В (максимальное напряжение на электродах 800 В).

4. Результаты моделирования

1. Вынужденные колебания

На рис. 5 и рис. 6 приведены графики изменения амплитуд вынужденных колебаний в функции коэффициента перегрузки для двух вариантов управления и опорных напряжениях 800 В и 300 В соответственно.

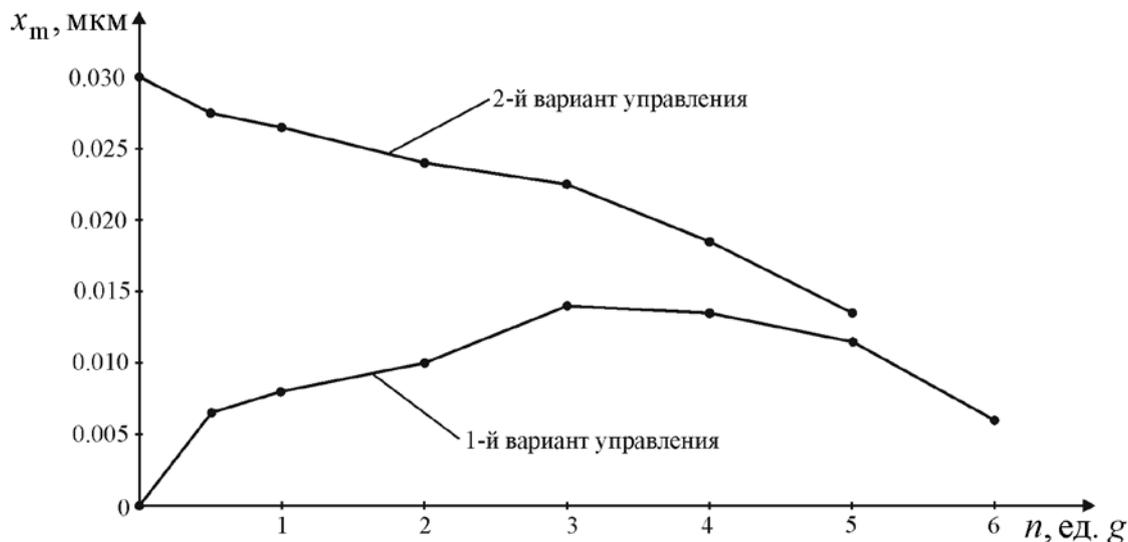


Рис. 5. Результаты моделирования вынужденных колебаний при $U_{оп} = 800 \text{ В}$

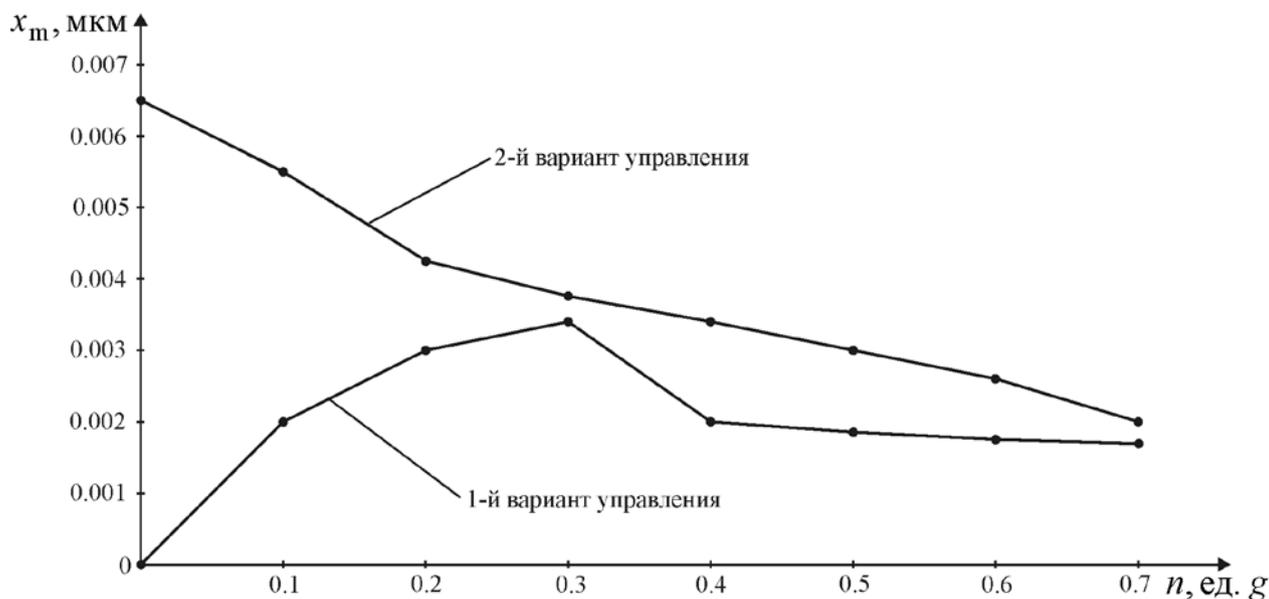


Рис. 6. Результаты моделирования вынужденных колебаний при $U_{оп} = 300 \text{ В}$

При первом варианте управления и пониженном опорном напряжении амплитуда колебаний не превышает 0,0035 мкм, а при $U_{оп} = 800 \text{ В}$ не превосходит 0,013 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 (а, следовательно, и колебаний) центра ротора.

2. Динамическая погрешность датчика перемещений

Эта погрешность, как было отмечено ранее, возникает из-за смещения центра ротора за время τ_0 , причем величина этой погрешности увеличивается с ростом скорости смещения ротора. Будем считать, что скорость смещения достигает наибольшего значения при воздействии ступенчатой перегрузки близкой к максимальной. Для оценки погрешности последовательно моделировались два переходных процесса смещения центра при воздействии перегрузки в 6g. Первый переходный процесс $x(t)$, рис. 7 а, получен на модели с импульсным датчиком перемещений. Второй переходный процесс $\bar{x}(t)$ был получен на модели, в которой блок импульсного датчика, рис. 4, был заменен безинерционным звеном с коэффициентом передачи, в точности равным статическому коэффициенту усиления импульсного датчика. Разность переходных процессов (динамическая ошибка) $\Delta x(t) = x(t) - \bar{x}(t)$ показана на рис. 7 б и не превышает 0,0015 мкм, что соизмеримо с уровнем шумов.

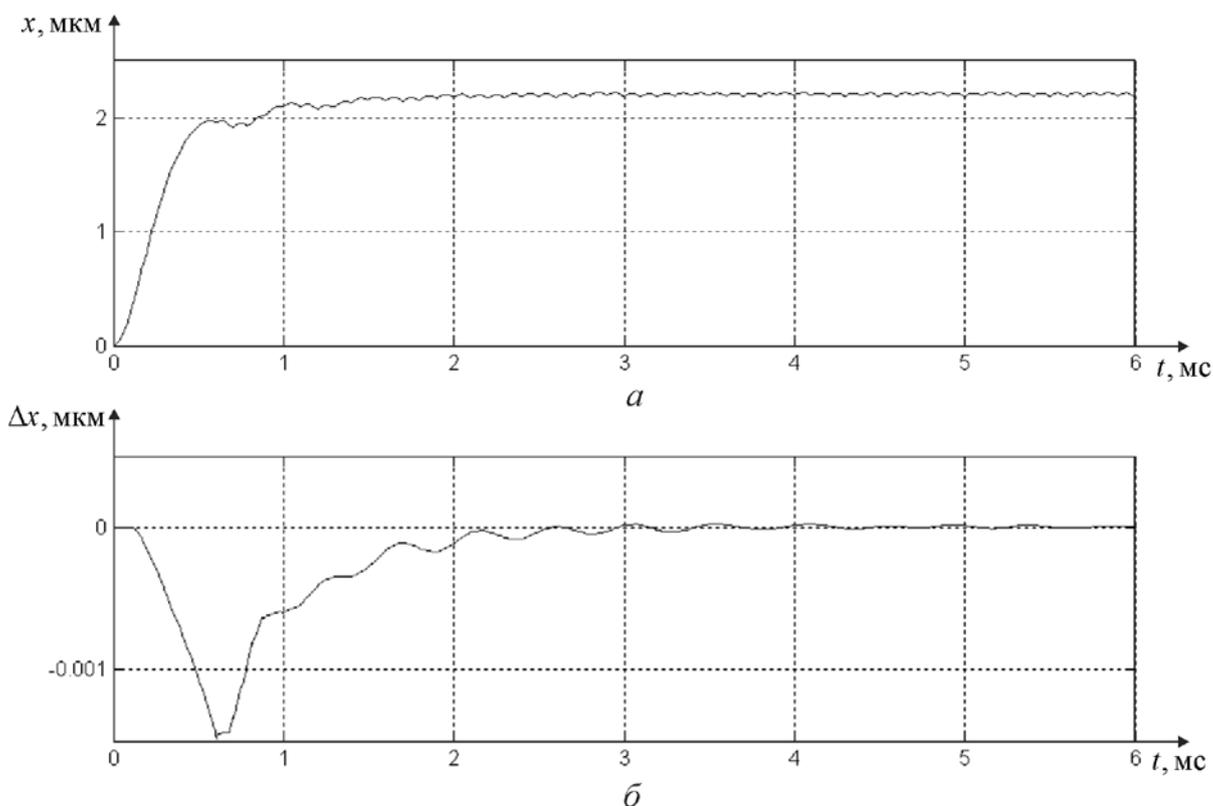


Рис. 7. Результаты моделирования: а – переходный процесс при действии перегрузки; б – динамическая ошибка импульсного датчика перемещений

3. Влияние заряда ротора

Заряд на роторе электростатического подвеса возникает или на этапе первоначального всплытия (если используются заземленные упоры) или в процессе эксплуатации из-за 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. Так как в рассматриваемом варианте подвеса также используются разрезные электроды и разнополярные источники, то выводы, сделанные в [2], можно распространить и на импульсный подвес. Точность центрирования зависит в основном от двух факторов: величины коэффициента усиления в контуре стабилизации, которая определяет статическую ошибку центрирования, и от 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 описанной выше модели вводилось смещение нуля x_0 . Ось x устанавливалась невесовой (коэффициент перегрузки $n=0$). Проводилось центрирование ротора при различных величинах заряда q_0 (или потенциала ротора φ_0 , определяемого этим зарядом) и фиксировалось положение центра x^* . Результаты моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1

$\varphi_0, \text{В}$		00	00	00
$x^*, \text{мкм}$ при $x_0 = 1 \text{ мкм}$,243	,252	,280	,326
$x^*, \text{мкм}$ при $x_0 = 2 \text{ мкм}$,471	,487	,537	,625

Видно, что при отсутствии перегрузки, но 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 разном заряде ротора вызывает разные смещения его центра. Таким образом, можно говорить о том, что применение разрезных электродов с разнополярным напряжением значительно ослабляет, но полностью не исключает влияние заряда ротора. Важен не только начальный заряд ротора, но 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 электростатическим подвесом не рассматривается в рамках данной статьи, но она принципиально осуществима. На это указывает на ряд работ, где описывается или пассивный (с использованием режекторных фильтров) или активный способы стабилизации. В частности в работе [4] подробно описан активный способ стабилизации скорости вращения сплошного ротора в подвесе с импульсными источниками заряда. Подвес этого типа со стабилизацией скорости вращения применен, в частности, в корабельной БИНС N2000.

Выводы

Рассмотрены вопросы выбора законов управления потенциалами в подвесе с ШИМ сплошного ротора ЭСГ. Проведен анализ вынужденных колебаний, по итогам которого установлено, что 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 ошибка импульсного датчика перемещений соизмеримы с уровнем шумов.

Импульсный датчик перемещений обладает масштабным коэффициентом более 100 мВ/мкм, что позволяет при использовании современных 14–16 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 хуже 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 при использовании в приборах, работающих при малом уровне перегрузок.

Список литературы

1. Васюков С.А., Дробышев Г.Ф., Орлов Н.А. Способ центрирования ротора электростатического гироскопа: а. с. 1331219 СССР, МКИ G01C 19/24. № 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 // XXVI научно-техническая конференция памяти Н.Н. Острякова: доклады. 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. Klinchuch J.F. Mass unbalance modulation pickoff attenuation and speed control in electrostatic gyroscope system: пат. №3955426 США, МКИ G01C 19/28. / North American Rockwell Corp. № 480786; заявлено 19.06.74; опубл. 11.05.76.

Electrostatic suspension with pulse width (PW) control of potentials and combined displacement sensors

10, October 2012

DOI: **10.7463/1012.0476229**

Vasyukov S.A.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

sa_vasyukov@mail.ru

The author studies the operation of a three-axle 12-electrode electrostatic suspension with regulation of high potentials according to the PW control law and with combined displacement sensors. The author considers problems of choosing the law of potentials control and their impact on the amplitude of forced vibrations of the rotor. The dynamic motion sensor error is studied. The results of simulation of forced oscillations for two management options and different levels of high voltage reference are presented in the article.

Publications with keywords:[electrostatic suspension](#), [rotor potential](#), [random charge](#)

Publications with words:[electrostatic suspension](#), [rotor potential](#), [random charge](#)

References

1. Vasiukov S.A., Drobyshv G.F., Orlov N.A. *Sposob tsentrirovaniia rotora elektrosticheskogo giroskopa* [Method of centering the rotor of an electrostatic gyroscope]. Author's certificate USSR no.1331219, 1987.
2. Buravlev A.P., Kuzin V.M., Landau B.E., Sumarokov V.V. Beskardannyi elektrosticheskii giroskop s podvesom na dvoinykh elektrodakh [Without cardan electrostatic gyroscope suspension on double electrodes]. *26 nauchno-tekhnicheskaia konferentsiia pamiati N.N. Ostriakova: doklady* [26th Science and Technology Conference of memory NN Ostryakov: reports]. Sankt-Peterburg, 2008.
3. Vasiukov S.A. O vliianii zariada rotora na stabil'nost' tsentrirovaniia v tsilindricheskom elektrosticheskom podvese [The effect of the charge of the rotor on the stability of centring in the cylindrical electrostatic suspension]. *Giroskopiia i navigatsiia* [Gyroscopy and navigation], 2008, no. 3, pp. 64–69.
4. Klinchuch J.F. *Mass unbalance modulation pickoff attenuation and speed control in electrostatic gyroscope system*. Patent USA no. 3955426, 1976.