

## Схемотехника и особенности применения импульсных электростатических подвесов в приборах систем управления движением

77-48211/620477

# 10, октябрь 2013

Васюков С. А.

УДК 621.31(075.8)

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

[sa\\_vasyukov@mail.ru](mailto:sa_vasyukov@mail.ru)

### Введение

Выбор типа электростатического подвеса (ЭСП) во многом определяет точностные характеристики и конструктивную компоновку прибора (гироскопа или акселерометра). Приняв в качестве главных критериев качества подвеса такие показатели, как жесткость, перегрузочная способность, энергоемкость, можно обнаружить прямую связь этих показателей с потенциалом ротора, причем они становятся наилучшими при нулевом его значении. Минимизация потенциала ротора достигается фазировкой источников питания. В подвесах, относящихся к ЭСП переменного тока [1], [2], включая и резонансные, используется свойство симметричности многофазных цепей, при этом для источников напряжения обнуление выполняется только при центральном положении ротора, для источников тока - при смещениях, хотя техническая реализация таких источников затруднена. В подвесах постоянного тока [1], минимизация потенциала ротора достигается использованием разнополярных источников напряжения при четном числе электродов, причем, для трехосных подвесов это достигается разрезными электродами по каждой полуоси чувствительности, а в четырехосных - четностью самих осей чувствительности. Что касается перегрузочной способности, то она у подвесов на

переменном токе в два раза меньше при одной и той же напряженности электрического поля, чем у подвесов на постоянном токе.

Энергетические показатели непосредственно связаны со схемой подвеса и здесь подвесы на переменном токе, в силу их большей простоты и меньшего числа активных элементов, оказываются более предпочтительными, но это преимущество теряется по следующим причинам. В цепях силообразования используются выходные высоковольтные повышающие многовитковые трансформаторы, паразитная межвитковая емкость которых, будучи соизмеримой с емкостью электрод-ротор, оказывает негативное влияние на работу подвеса на переменном токе, особенно при его настройке в резонанс. Так как все схемы измерения линейных перемещений и силообразования являются частотно-зависимыми, то их настройка на оптимальную рабочую точку по этой причине затруднительна. Работа же в неоптимальных условиях резко снижает жесткость подвеса и ухудшает его динамику. Важно отметить, что применение подвесов на переменном токе целесообразно в конструкциях приборов с роторами больших диаметров, когда постоянная времени ротора относительно большая и влияние индуктивности обмоток высоковольтных трансформаторов сильно ослабляется. Это обстоятельство явилось одной из главных причин, побудивших к интенсивным поискам новых типов подвесов, чтобы решить проблему взвешивания роторов малых диаметров.

Импульсные подвесы по своим показателям близки к подвесам на постоянном токе, но обладают рядом существенных преимуществ. У них выше стабильность центрирования ротора и существует принципиальная возможность совмещения цепей силообразования и измерения перемещений. Если из всего многообразия схемотехнических предложений по реализации этого типа подвесов выбрать импульсный подвес на источниках напряжения, то он не нуждается в специальных цепях для разделения сигналов положения и управления, имеет в два раза большую перегрузочную способность, чем подвес на источниках тока и значительно проще подвеса на источниках заряда.

Ранние конструкции электростатических гироскопов (ЭСГ) были ориентированы на применение полых сферических роторов сравнительно большого диаметра, (порядка 40 – 60 мм). Такие приборы нуждаются в индивидуальной доводке

основных узлов конструкции, исключительно высокой степени балансировки, и при сравнительно больших зазорах (порядка 100 – 150 мкм) подвесы должны обеспечивать рабочие напряжения порядка нескольких киловольт. Здесь нашли применение подвесы на переменном токе или выполненные по схеме модулятор-демодулятор. Ясно, что такие приборы отличаются высокой трудоемкостью и низкой серийностью. Оснащение летательных аппаратов и подводных лодок новых типов современными ИНС возможно при высокой степени серийности, поэтому большое внимание было уделено конструкциям со сплошными роторами малых диаметров, что, в свою очередь, привело к принципиально новой идеологии построения подвесов, в частности, импульсных, обеспечивающих переход к интегральной технологии всех электронных цепей подвеса.

В статье исследуется возможность и основные особенности применения электростатических подвесов на постоянном токе и импульсных подвесов при взвешивании полых и сплошных роторов гироскопов и акселерометров. Данная статья является логическим продолжением исследований по подвесам, изложенным в [2].

### **1. Подвесы на постоянном токе**

О возможности создания таких подвесов упоминается, в частности, в работах [3] и [4], относящихся к началу 60-х годов. Подвесы на постоянном токе являются системами стабилизации с внешней обратной связью и содержат все основные элементы, которые использовались А. Нордсиком при формировании схем подвесов на переменном токе. Обладая несомненным достоинством: в два раза большей чем подвес на переменном токе подъемной силой, подвес на постоянном токе в то же время не свободен от ряда серьезных недостатков. Проблемой, с которой сталкиваются разработчики при его реализации, является трудность создания разнополярных высоковольтных усилителей постоянного тока. Другой серьезной проблемой при регулировании на постоянном токе является накопление случайного заряда на роторе, что приводит к расцентровке и появлению неконтролируемых уведящих моментов. Здесь следует отметить ряд работ [5], [6], посвященных исследованию натекания случайного заряда на ротор. Механизм возникновения связан с переносом заряда за счет темновых токов и микрозарядов, причем роль последних является преобладающей. Скорость натекания заряда зависит от напряженности электрического поля и материалов ротора и электродов.

В работе А. С. Анфиногенова, О. И. Парфенова и др. [5] для подвеса на постоянном токе был вскрыт механизм возникновения заряда ротора при его первоначальном всплытии с проводящих упоров. В результате теоретических и экспериментальных исследований было показано, что минимальный заряд на роторе образуется при всплытии ротора в двухполярном электростатическом подвесе. Термин «двухполярный» здесь применен в том плане, что опорное напряжение на электродах одной оси подвеса положительное, а на двух других – отрицательное. Было отмечено, что минимизация начального заряда уменьшает нестабильность прибора при длительной эксплуатации от изменения потенциала ротора вследствие стекания заряда с его поверхности.

В работе [7], посвященной результатам калибровки электростатических гироскопов в бескарданной системе ориентации, было отмечено изменение заряда ротора от запуска к запуску, которое приводило к изменению значений коэффициентов модели ухода гироскопов.

Следует отметить, что в подвесах на постоянном токе всегда требуются специальные измерительные цепи, работающие, как правило, с высокочастотным сигналом. Реализация совмещенного датчика перемещений, где сигнал о смещении формируется в той же электрической цепи, что и высоковольтное управляющее напряжение, здесь принципиально невозможна.

Среди зарубежных публикаций можно отметить две работы [8] и [9], указывающие на создание подвеса на постоянном токе с амплитудным законом регулирования. Схемы подвеса, представленные в этих работах, отличаются, в основном, способом обеспечения нулевого потенциала ротора.

В [9] потенциал ротора минимизировался при помощи использования разнополярных управляемых источников напряжения и четного числа электродов на каждую полуось подвеса (так называемые «разрезные электроды»), рис 1.

При смещении ротора, например по оси  $x$ , всегда соблюдаются условия

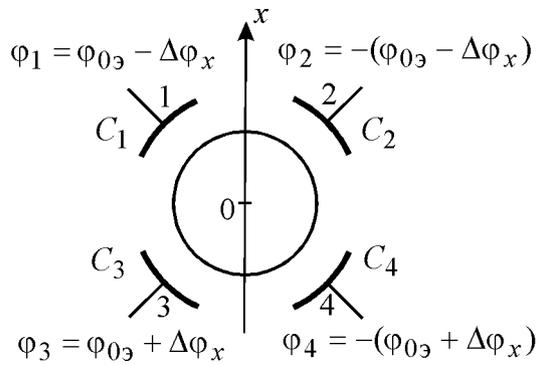


Рис. 1. Подвес на постоянном токе с разрезными электродами

$C_1 = C_2, C_3 = C_4$ . Поэтому, если потенциалы на электроды полуоси подавать в противофазе, то потенциал ротора, наведенный каждой парой электродов, будет равен нулю. Действительно, для электродов оси  $x$

$$\varphi_{0x} = \frac{(\varphi_{0э} - \Delta\varphi_x)C_1 - (\varphi_{0э} - \Delta\varphi_x)C_2 + (\varphi_{0э} + \Delta\varphi_x)C_3 - (\varphi_{0э} + \Delta\varphi_x)C_4}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4} = 0;$$

где  $\varphi_{0x}$  - вклад в потенциал ротора напряжений на электродах оси  $x$ ,  $\varphi_{0э}$  - постоянная уставка потенциала.

В работе [8] подвес на постоянном токе применяется для взвешивания сферического тела, являющегося чувствительным элементом (подвижной массой) электростатического акселерометра. Электродная система подвеса схематично изображена (в разрезе) на рис.2. Силовые электроды 1, 3, 5, 7, 9, 11 (третья ось подвеса на рисунке не показана) имеют вид сферических сегментов. Измерительные электроды 2, 4, 6, 8, 10, 12 отделенные от силовых и корпуса 13 диэлектрическими вставками 14, имеют вид колец, охватывающих соответствующие силовые электроды. Поверхность камеры, свободная от силовых и измерительных электродов, объединена в один электрод, который назовем экранирующим или нулевым. Условная схема подачи силовых и измерительных сигналов в один канал подвеса, показана на рис. 3.

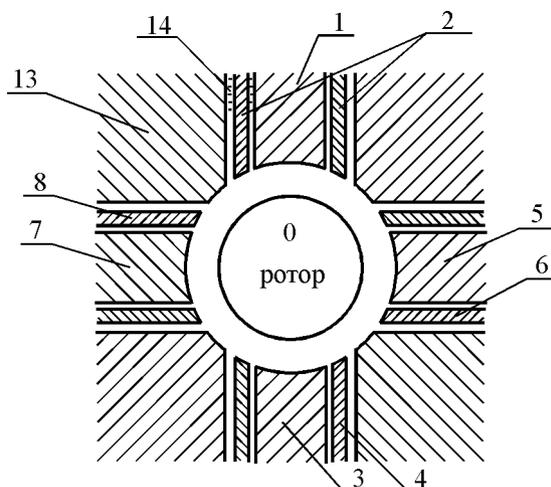


Рис. 2. Подвес на постоянном токе с отдельными силовыми и измерительными электродами. 1, 3, 5, 7 – силовые электроды, 2, 4, 6, 8 – измерительные электроды, 13 – корпус, 14 – диэлектрическая вставка.

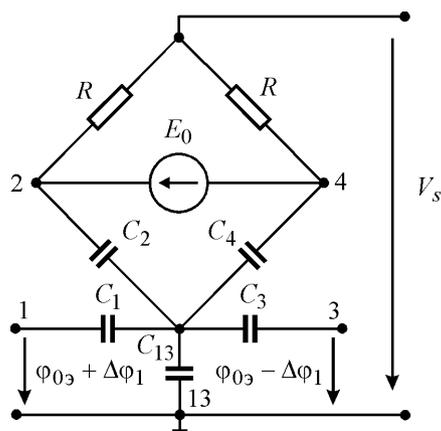


Рис. 3. Условная схема подачи силовых и измерительных сигналов

Здесь генератор переменного напряжения  $E_0$  включен в диагональ мостовой схемы, в двух плечах которой находятся емкости  $C_2$  и  $C_4$ , образующиеся между измерительными электродами 2, 4 и поверхностью ротора. Сигнал  $V_s$ , пропорциональный смещению ротора и измеренный между точкой соединения резисторов  $R$  и землей, демодулируется, фильтруется, проходит через

корректирующую интегро-дифференцирующую цепочку, а затем поступает на высоковольтные усилители постоянного напряжения. Сигнал с выхода усилителей подается непосредственно на силовые электроды 1 и 3, которые образуют с ротором емкости  $C_1$  и  $C_3$  соответственно. Между ротором и землей также расположена емкость  $C_{13}$  экранирующего электрода. Схема датчика перемещений трехфазная, ее необходимость диктуется условиями минимизации потенциала ротора по переменному току. Для минимизации потенциала ротора по постоянному току используется то обстоятельство, что емкость экранирующего электрода много больше ротор-электродных емкостей. Для потенциала ротора в условиях принятой модели справедливо следующее выражение

$$\varphi_0 = [(\varphi_{0э} + \Delta\varphi_1)C_1 + (\varphi_{0э} - \Delta\varphi_1)C_3 + (\varphi_{0э} + \Delta\varphi_2)C_5 + (\varphi_{0э} - \Delta\varphi_2)C_7 + (\varphi_{0э} + \Delta\varphi_3)C_9 + (\varphi_{0э} - \Delta\varphi_3)C_{11}] / [(C_1 + C_3 + C_5 + C_7 + C_9 + C_{11}) + C_{13}]$$

В конструкции, рассматриваемой в [8], при центральном положении ротора емкости силовых электродов имеют величину 2,2 пФ, а экранирующая емкость – величину порядка 400 пФ. Ясно, что в этих условиях величина потенциала ротора незначительна. Более подробно конструкция рассмотренного электростатического акселерометра изложена в работе [9].

Ряд отечественных публикаций посвящен подвесам на постоянном токе, работающим по принципу «модуляции-демодуляции». Типичный вариант схемы подвеса, построенный по данному принципу, представлен на рис. 4.

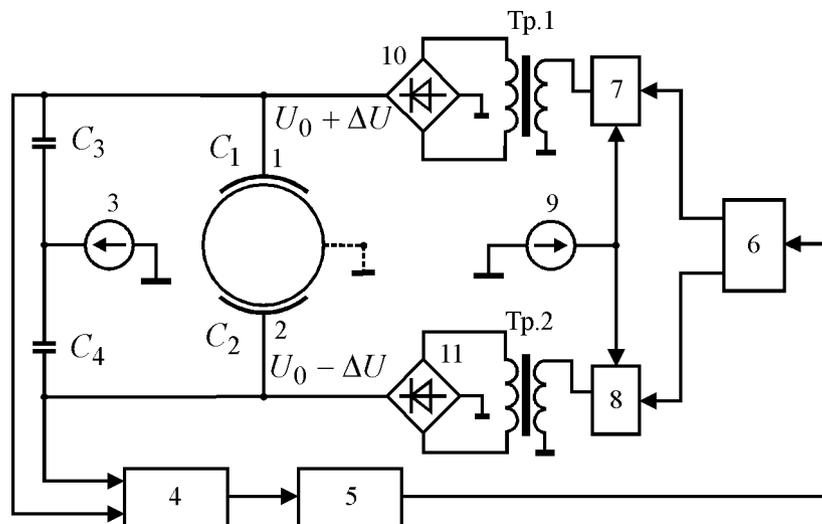


Рис. 4. Подвес на постоянном токе, построенный по принципу «модуляции-демодуляции». 1, 2 – ротор – электродные емкости, 3 – высокочастотный генератор, 4 – демодулятор, 5 – корректирующая цепь, 6 – дифференциальный усилитель, 7, 8 – модуляторы, 9 – низкочастотный генератор, 10, 11 – выпрямители.

Датчик перемещения мостового типа, включающий емкости  $C_1, C_2, C_3, C_4$ , запитывается от высокочастотного генератора 3. Сигнал постоянного тока, пропорциональный смещению, с выхода демодулятора 4 поступает на корректирующую цепь 5, а затем на низковольтный дифференциальный усилитель 6. Управляющие напряжения, модулируясь в схемах 7 и 8, попадают на повышающие трансформаторы Тр.1 и Тр.2. Сформированные на вторичных обмотках трансформаторов высоковольтные сигналы после демодуляции (выпрямления) на диодных мостах 10 и 11 ( $U_0 + \Delta U$  и  $U_0 - \Delta U$ ), поступает непосредственно на электроды. Данная схема позволяет легко реализовать управляемые разнополярные высоковольтные сигналы. К недостаткам данного подвеса следует отнести значительные фазовые сдвиги, вносимые контуром стабилизации, что затрудняет обеспечение устойчивости и снижает динамический диапазон подвеса.

Следует отметить работы Некрасова Я. А. [10], [11], в которых описаны подвесы на постоянном токе, работающие по принципу модуляции-демодуляции в цепи

силообразования, и совмещенной с ней схемы измерения перемещений, работающей за счет пульсаций выпрямленного напряжения на электродах.

Ряд работ [12], [13], [14] рассматривают подвесы на постоянном напряжении и токе при релейном законе управления.

Схема трехосного подвеса, предложенная в [14], содержит сферический ротор, окруженный системой двенадцати электродов (разрезные электроды, по два электрода на полуось). Эти электроды образуют с ротором емкости  $C_1 \div C_{12}$ . Длительность подключения источников постоянного напряжения  $U_1 \div U_{12}$  к соответствующим электродам регулируется с помощью групп ключей, которые управляются сигналами обратной связи. Ротор имеет нулевой потенциал по постоянному току, так как на электроды каждой полуоси подвеса подаются равные по величине, но противоположные по знаку напряжения.

Схема одного канала (оси) подвеса приведена на рис. 5. Для измерения смещений ротора применен датчик положения, так называемого «резонансного типа».

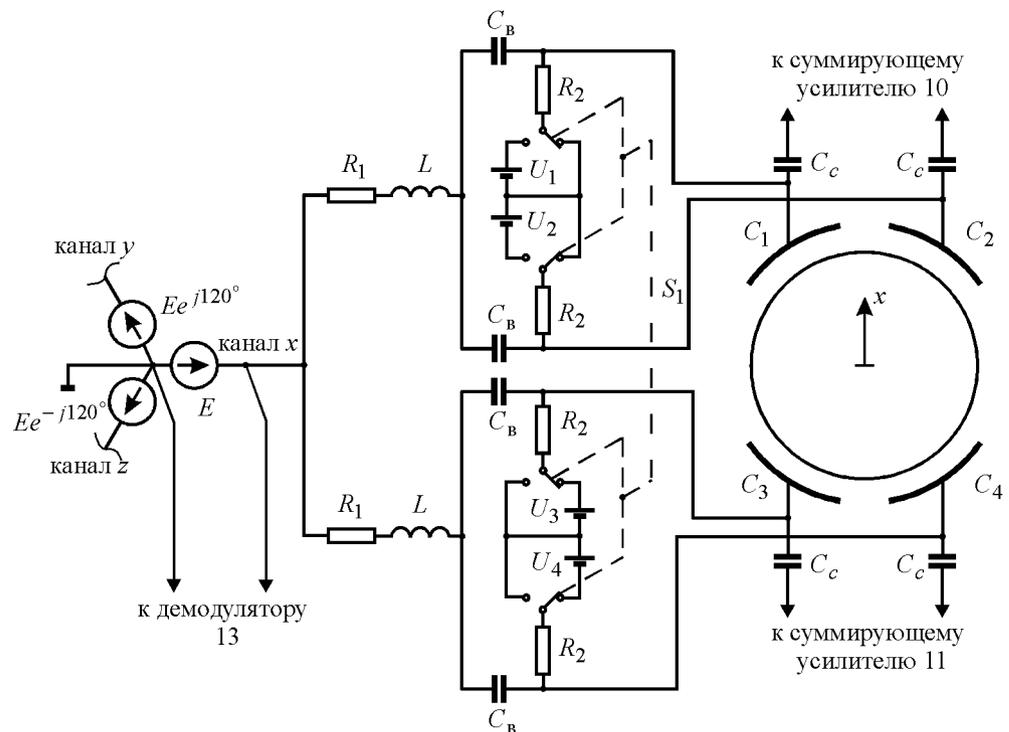


Рис. 5. Подвес на постоянном токе с резонансным датчиком перемещения и релейным законом управления

Ротор-электродные емкости  $C_1 \div C_4$  через разделительные конденсаторы  $C_B$  подключаются к катушкам индуктивности  $L$  и сопротивлениям  $R_1$ , образуя два последовательных резонансных контура. Датчик питается от трехфазного высокочастотного источника э.д.с. с целью обеспечения нулевого потенциала ротора по переменному сигналу датчика. Частота источника выбрана в зарезонансной области, в этом случае при движении ротора к электроду амплитуда высокочастотного напряжения на нем уменьшается, а на диаметрально противоположном – увеличивается. На рис. 6 представлена цепь обратной связи одного канала подвеса. Сигнал положения через разделительные конденсаторы  $C_C$  поступает на сумматоры 10, 11, 12, а далее на фазочувствительный демодулятор 13, который выделяет огибающую высокочастотного сигнала, пропорциональную положению ротора. Корректирующая цепь постоянного тока состоит из дифференциатора и сумматора 17. Аналоговый сигнал управления вида  $ax + b\dot{x}$  с выхода корректирующей цепи поступает на компаратор 18, который считывает знак этого выражения. Равенство  $ax = -b\dot{x}$  определяет границу переключения в фазовом пространстве.

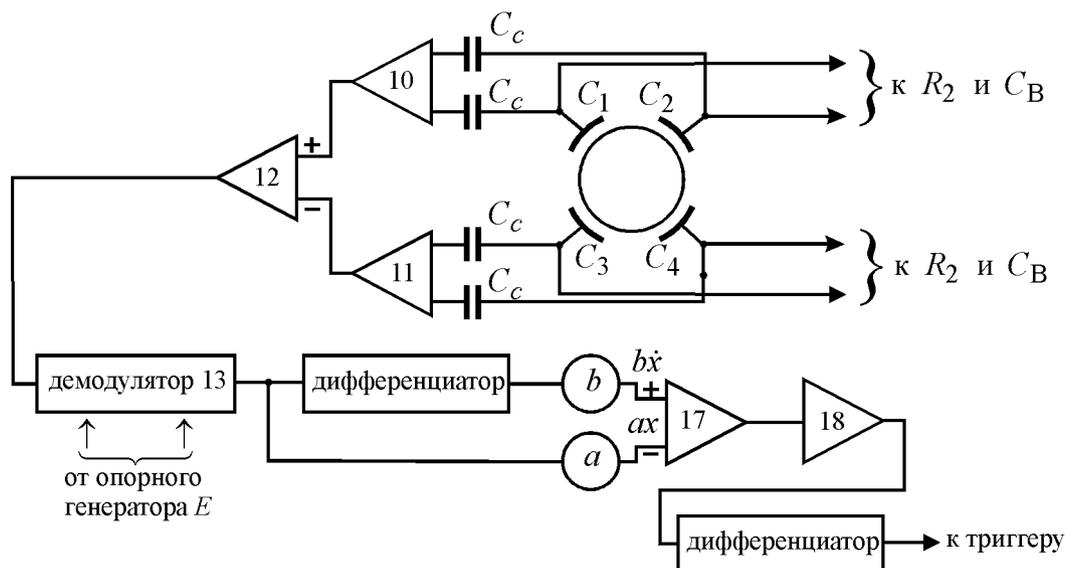


Рис. 6. Цепь обратной связи подвеса. 10, 11, 12, 17 – сумматоры,  
18 – компаратор

На выходе компаратора формируются положительные и отрицательные прямоугольные импульсы, причем длительность положительных импульсов равна времени подключения к источникам одной пары электродов (например,  $C_1$  и  $C_2$ ), а длительность отрицательных импульсов определяет время подключения к источникам электродов, диаметрально противоположных первой паре (например,  $C_3$  и  $C_4$ ). Если на какой-либо оси подвеса не действует внешнее возмущение (этим возмущением может быть или проекция силы веса или переносное ускорение), то длительности положительных и отрицательных импульсов равны и ротор находится в центре подвеса. При действии возмущения длительности импульсов изменяются ровно на столько, чтобы удерживать ротор в центре подвеса. Ключевой схемой  $S_1$ , рис. 5, управляет триггер, который переключается короткими импульсами, возникающими при дифференцировании сигнала с выхода компаратора. При такой организации подвеса ротор все время колеблется около центрального положения. Частота предельного цикла колебаний  $\omega$ , следовательно, и их амплитуда определяются суммарным временем запаздывания сигнала в контуре стабилизации и зависят от быстродействия датчика положения, времени перезаряда ротор-электродных емкостей, и т.д. Среди недостатков подвеса можно отметить значительные трудности, возникающие при согласовании цепей датчиков положения с высоковольтными цепями перезаряда ротор – электродных емкостей. Действительно, с точки зрения повышения эффективности подвеса стремятся уменьшать значения постоянных времени заряда и разряда электродных емкостей. Так, постоянная времени заряда емкости  $C_1$  равна  $\tau_1 = R_2(C_1 + C_B)$ , а  $C_2$  -  $\tau_2 = R_2(C_2 + C_B)$ , следовательно, для их уменьшения необходимо снижать величины емкости разделительного конденсатора  $C_B$  и сопротивление резистора  $R_2$  в цепи заряда. С другой стороны, емкость  $C_B$  включена в резонансную цепь последовательно с ротор - электродной емкостью, если ее выбрать малой, то большая часть высокочастотного сигнала придется на  $C_B$ , что приведет к значительному снижению коэффициента передачи (крутизны) датчика. Для цепи датчика сопротивление  $R_2$  шунтирует электродную емкость, следовательно,  $R_2$  должно быть как можно больше. Но это приведет к затягиванию заряда и разряда и сразу вызывает увеличение амплитуды и уменьшение частоты предельного

цикла колебаний ротора, что крайне нежелательно. Конечно, какой-то компромисс здесь достигим, но параметры подвеса при этом явно не оптимальны. Все эти рассуждения показывают, что аналоговые датчики и ключевые высоковольтные каскады плохо совместимы.

Рассмотренные подвесы с постоянными источниками содержали в выходных каскадах управляемые источники напряжения, которым характерна малая величина выходного сопротивления. В работах [12], [13] в выходных каскадах подвеса чувствительного элемента акселерометра используются управляемые источники постоянного тока. При этом сила, действующая на чувствительный элемент (плоскую пластину в упругом подвесе), зависит только от управляющего сигнала и не зависит от величины смещения элемента из центра. Это позволяет получить хорошую линейность выходной характеристики акселерометра, что труднодостижимо при использовании подвесов на источниках напряжения.

## **2. Импульсные и аналогово-импульсные подвесы.**

Приступая к анализу схем импульсных подвесов, следует отметить, что применение ранее рассмотренных подвесов на переменном токе и подвесов на постоянном токе, построенных по принципу «модуляции-демодуляции» целесообразно в конструкциях приборов с роторами больших диаметров. Постоянная времени ротора в таких приборах относительно большая и влияние индуктивности обмоток высоковольтных трансформаторов и межвитковых емкостей сильно ослаблено. Взвешивание сплошных роторов малых диаметров и получение хороших динамических характеристик в подвесах такого типа проблематично и это обстоятельство явилось одной из главных причин, побудивших к интенсивным поискам новых типов подвесов.

В ходе разработки импульсных подвесов проявились многие их положительные качества: высокая стабильность центрирования, малые габариты, вес, энергоемкость, высокая надежность. Эти схемы получили большое распространение в связи с разработкой электростатических гироскопов с роторами малых диаметров, порядка 6 – 10 мм для применения в БИНС. В подобных конструкциях из-за малой площади поверхности камеры технологически оправданной оказалась октантная (восьмиэлектродная) система с

электродами в виде правильных сферических треугольников. При этом каждый электрод образуется путем деления полусферы на четыре равные части. Подвес ротора осуществляется по четырем осям.

В работе [15] представлен подвес с импульсными источниками тока в силообразующих цепях. Схема подвеса приведена на рис. 7, где условно изображены четыре оси подвеса, образованные парами диаметрально противоположных электродов (+1, -1), (+2, -2), (+3, -3), (+4, -4). С выхода опорного генератора 3 прямоугольные импульсы  $e_r(t)$  с нулевой начальной фазой поступают на первый и четвертый, а с фазой  $180^\circ$  - во второй и третий каналы. В каждом канале опорное напряжение преобразуется в блоке 1 в импульсы тока, модулированные по длительности и амплитуде в соответствии с сигналом обратной связи, поступающим с блока 2. Канал обратной связи включает датчик перемещений, корректирующие цепи и модулятор. Схема блока высоковольтных формирователей импульсов тока для одного канала подвеса приведена на рис. 8 и содержит две пары усилителей 4, 5 и 6, 7, работающих в режиме управляемых источников тока. Данный режим обеспечивается за счет глубокой отрицательной обратной связи по выходному току.

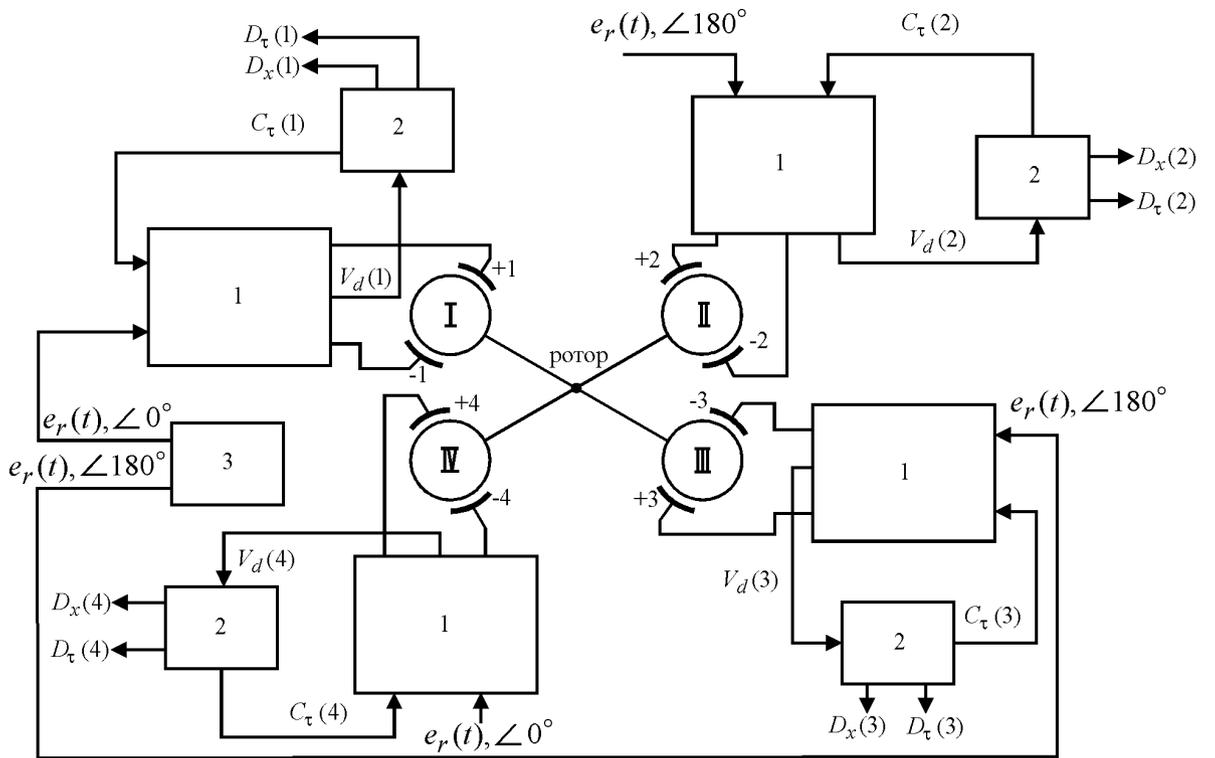


Рис. 7. Импульсный четырехосный подвес. 1 – блок формирования высоковольтных импульсов, 2 – блок обратной связи, 3 – опорный генератор

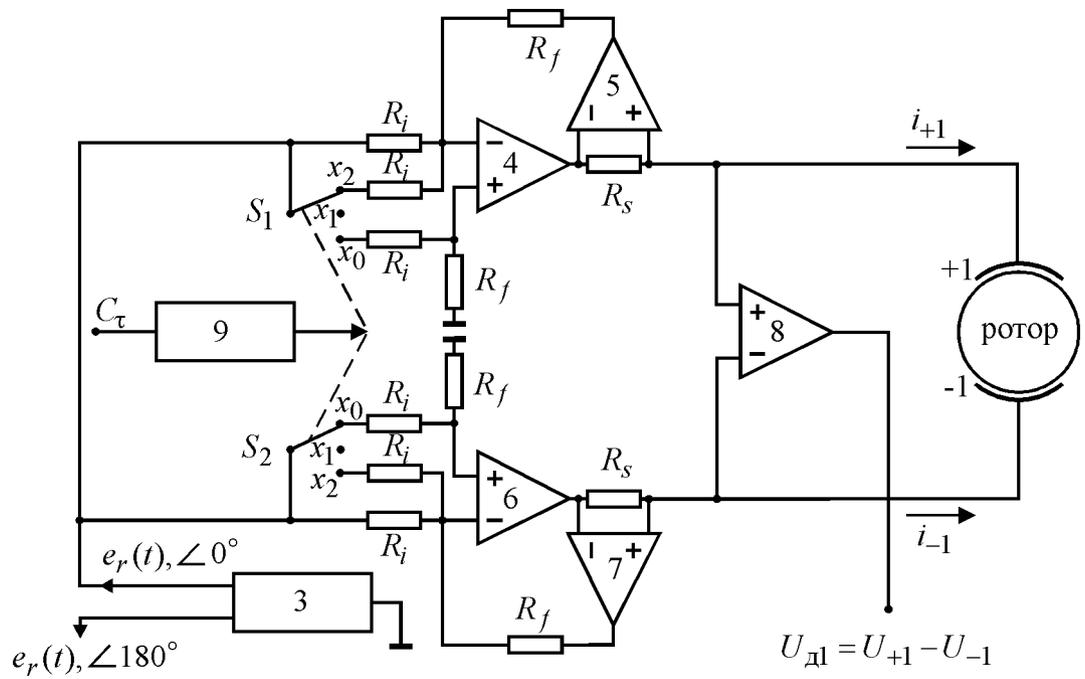


Рис. 8. Высоковольтные формирователи импульсов четырехосного подвеса. 3 – опорный генератор, 4, 5 и 6, 7 – усилители, 8 – дифференциальный усилитель, 9 – опорный генератор.

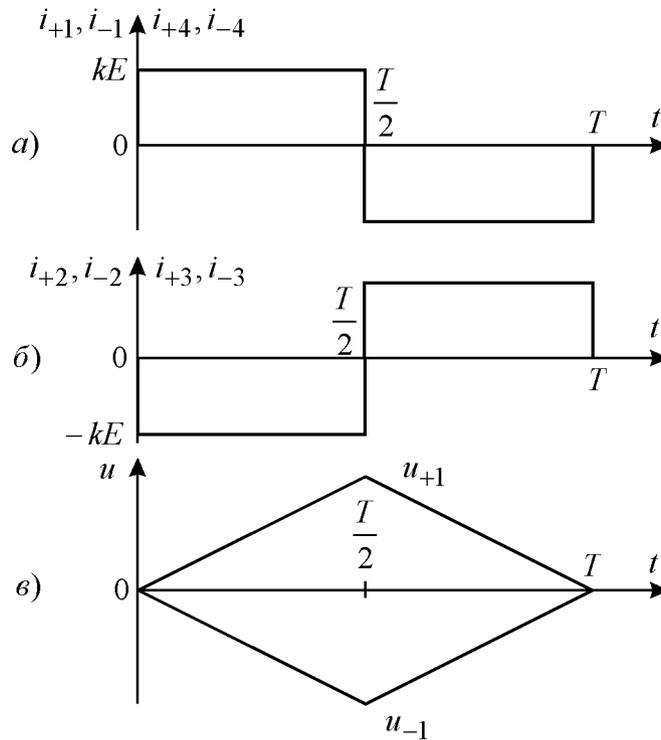


Рис. 9. Временные диаграммы импульсов на электродах при центральном положении ротора.

Коммутатор 9, управляемый сигналом обратной связи подвеса  $C_\tau$ , подключает сигнал опорного генератора к трехпозиционным входам  $x_0, x_1, x_2$  усилителей 4 и 6. Если ротор находится в центре подвеса, ключи  $S_1$  и  $S_2$  занимают позицию  $x_1$  и на электроды +1 и -1 подвеса подаются импульсы тока с амплитудой  $I_0 = kE$ , рис. 9 а. Такие же импульсы поступают на электроды +4, -4. Для второго и третьего каналов фаза импульсов тока отличается на  $180^\circ$ , рис. 9 б. Напряжения на электродах подвеса показаны на рис. 9 в. Сумма токов через электроды в любой момент времени равна нулю, следовательно, будет также равен нулю и наведенный потенциал ротора. При распределении токов, показанном на рис. 9, равнодействующая всех сил, приложенных к ротору, равна нулю.

Датчик положения организован следующим образом: в моменты времени  $t = nT + T/2, n = 0, 1, 2, \dots$  происходит вычитание напряжений с диаметрально противоположных электродов с помощью дифференциального усилителя 8, рис. 8, с

последующим запоминанием разности на период квантования. Из временных диаграмм напряжений на электродах при центральном положении следует, что

$$U_{di} = U_{+i} - U_{-i} = 0, \quad i = 1 \dots 4. \quad (1)$$

При смещении ротора из центра подвеса цепь обратной связи управляет ключами  $S_1$  и  $S_2$  так, что они на определенный интервал времени занимают одно из крайних положений. Например, при смещении ротора в направлении электрода  $-1$ , ключ  $S_1$  займет положение  $x_2$ , а ключ  $S_2$  – положение  $x_0$ . При этом на промежуток времени  $t_1, t_2$  на выходе усилителя 4 появится ток двойной амплитуды, рис. 10 а. Это происходит за счет двукратного уменьшения сопротивления на инвертирующем входе 4 путем параллельного включения двух сопротивлений  $R_i$ . На выходе усилителя 6, рис. 10 б, в тот же промежуток времени ток будет отсутствовать, так как в положении  $x_0$  на инвертирующий и неинвертирующий входы усилителя поступает одно и то же напряжение. Суммарный ток через электроды и в этом случае равен нулю, а, значит, потенциал ротора будет нулевым и при смещениях. На рис. 10 в показаны временные диаграммы напряжений на электродах  $+1$  и  $-1$  при смещенном положении ротора.

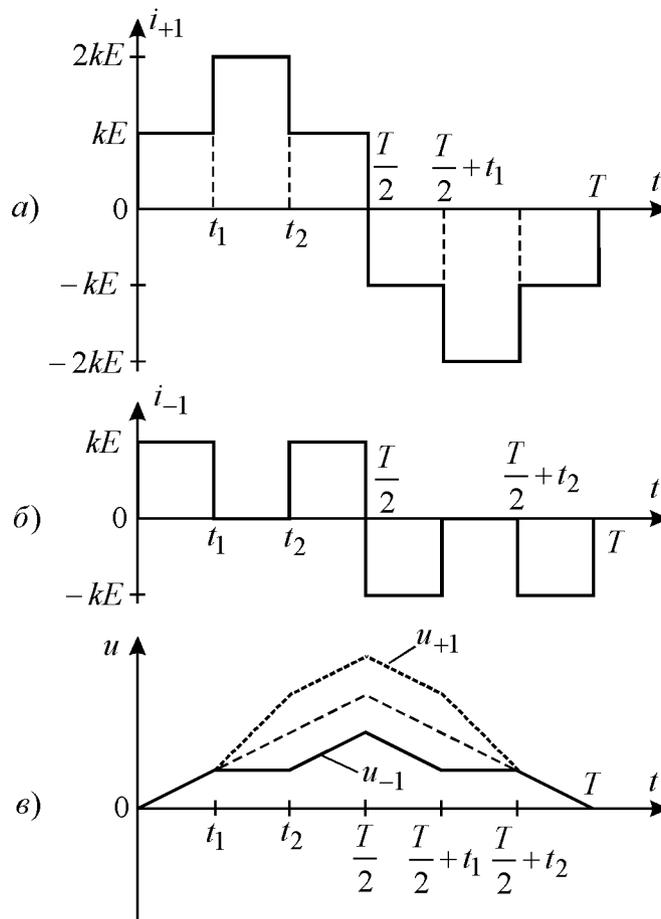


Рис. 10. Временные диаграммы импульсов на электродах при смещении ротора.

Длительность добавочных импульсов тока есть функция сигнала обратной связи. Таким образом, широтная модуляция здесь осуществляется под действием амплитуды управляющего сигнала, а амплитудная под действием знака управляющего сигнала. В подвесе применен комбинированный ШИМ+АИМ закон управления.

Напряжение датчика перемещений при движении к электроду  $-1$ , с учетом (1) будет равно

$$U_{д1} = 2 \frac{\alpha kTE}{h C_0} \cdot x + 2 \frac{kE}{C_0} \cdot \tau \quad (2)$$

где  $\tau = t_2 - t_1$  – длительность добавочного импульса тока.

Анализ выражения (2) показывает, что здесь мы опять, как и в аналоговых подвесах с совмещенными датчиками положения, сталкиваемся с проблемой отделения сигнала положения  $x$  от сигнала управления  $\tau$ . Добавочные вычислительные операции по выделению сигнала, пропорционального смещению, осуществляются в цифровой форме в блоке обратной связи 2. Блок схема устройства, реализующего эту операцию, приведена на рис. 11. Сигнал  $U_d$  с выхода дифференциального усилителя поступает на аналогово-цифровой преобразователь 9, а затем на первый вход цифрового вычитающего устройства 10. На выходе этого устройства в цифровой форме отображается информация о положении  $D_x$ . Эта информация используется для формирования закона управления  $\tau = k(x + ax\dot{)}$ , который реализуется в цифровом корректирующем устройстве 12. Управляющий сигнал  $D_\tau$ , проходя через линию задержки 11, поступает на второй вход цифрового вычитающего устройства 10. Кроме того, на основе управляющего сигнала в импульсном модуляторе 13 формируется закон управления  $c_\tau$ , поступающий в преобразователь 9 для управления ключами  $S_1$  и  $S_2$ .

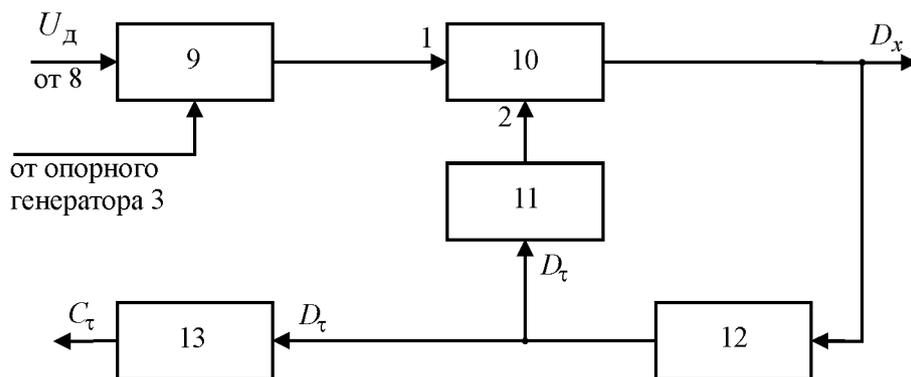


Рис. 11. Схема разделения сигналов положения и управления. 9 – аналогово-цифровой преобразователь, 10 – цифровое вычитающее устройство, 11 – линия задержки, 12 – цифровое корректирующее устройство, 13 – импульсный модулятор.

В качестве положительных моментов, присущих рассмотренной схеме, можно отметить то, что при ее реализации не требуются такие непрецизионные элементы, как

разделительные конденсаторы, индуктивности и др. Подвес обладает хорошей помехозащищенностью и стабильностью характеристик.

В работах [16], [17] представлен четырехосный подвес, в котором используются регулируемые импульсные источники заряда в силообразующих цепях. Эта схема нашла применение в миниатюрных ЭСГ бесплатформенной инерциальной навигационной системы «Микрон».

Схема формирования заряда на электродах одного канала подвеса приведена на рис. 12. Принцип организации источников заряда тот же, что и описанный ранее. Последовательно с ротор-электродными емкостями  $C_{+1}$  и  $C_{-1}$  включены буферные емкости  $C_B$ . Напряжение на  $C_B$  регулируется в соответствии с законом управления, а, так как емкости неизменны, то можно утверждать, что по тому же закону регулируется и их заряд, равный заряду ротор-электродных емкостей. Заряд, формируемый на электроде +1, пропорционален напряжению на выходе сумматора 7. Это напряжение представляет собой суперпозицию сигналов  $\pm k_1 Q_p$  и  $\pm k_1 Q_{s1}$ , которые формируются в контуре стабилизации и через ключи 1...6 попадают на вход сумматора. Выходной сигнал 7 через согласующий трансформатор 8, развязывающий низковольтные и высоковольтные цепи, подается на один из входов дифференциального усилителя 9. Другой вывод вторичной обмотки 8 подключен к точке соединения резистора  $R_1$ , емкости  $C_B$  и нулевой точке источника, которая находится под «плавающим» потенциалом  $\varphi_g$ . Вторичная обмотка 8 обеспечивает подачу напряжения  $U_a$  (по отношению к «плавающей» земле) на усилитель 9. Сигнал с этого усилителя подается на высоковольтный усилитель тока 10, который будет заряжать емкость  $C_B$  до тех пор, пока напряжение на ней не станет равным  $U_a$ . Применение источника питания 11 с «плавающей» землей позволяет использовать в высоковольтных цепях в качестве усилителя 9 и повторителя 12 обычные низковольтные операционные усилители. Резистор  $R_2$  необходим для устранения ошибок, вызванных токами утечки. Когда ротор находится в центральном положении постоянная времени разряда ротор электродной емкости  $C_{+1}$  и резистора  $R_2$  равна постоянной времени емкости  $C_B$  и резистора  $R_1$ . При этом ток утечки через резистор  $R_2$  компенсируется

током утечки через резистор  $R_1$ , в результате суммарный ток утечки на электрод равен нулю.

На рис. 13 а представлены временные диаграммы заряда  $Q_{+1}$  и  $Q_{-1}$  на диаметрально противоположных емкостях  $C_{+1}$  и  $C_{-1}$  при центральном положении ротора. Амплитуда импульсов заряда  $Q_p$  пропорциональна напряжению, подаваемому на вход сумматора 7 через ключи 1, 2, 3. Такой же заряд формируется на электродах канала 3. В целях обеспечения нулевого потенциала ротора в каналы 2 и 4 заряд подается в противофазе по отношению к каналам 1 и 3. В промежутки времени  $0 - T_1$  и  $T_4 - T_5$  заряд на электродах равен нулю. Это необходимо для изменения режимов работы высоковольтных источников тока.

Временные диаграммы для смещенного положения ротора приведены на рис. 13 б и в. Приращение амплитуды заряда  $\pm Q_s$  пропорционально сигналу обратной связи. Изменение заряда происходит в промежутки времени  $T_1 - T_2, T_3 - T_4$  и  $T_5 - T_6, T_7 - T_8$  с помощью ключей 4, 5, 6. В промежутках времени  $T_2 - T_3$  и  $T_6 - T_7$ , как это видно из временных диаграмм, рис. 13, заряд на электродах сохраняется равным  $Q_p$ . В эти интервалы происходит определение положения ротора. С этой целью измеряется напряжение  $U_d$  между точками  $A$  и  $B$ , рис. 12. Такой способ организации датчика положения позволяет получать информацию о перемещении ротора без дополнительных вычислительных операций. Измерение перемещения происходит два раза за период.

$$\begin{aligned}
 U_d &= (U_{СБ} + U_{C_{+1}}) - (U_{СБ} + U_{C_{-1}}) = \frac{Q_p}{C_{+1}} - \frac{Q_p}{C_{-1}} = \\
 &= \frac{Q_p(1 - \frac{\alpha}{h}x)}{C_0} - \frac{Q_p(1 + \frac{\alpha}{h}x)}{C_0} = -\frac{2Q_p}{C_0} \frac{\alpha}{h} x
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

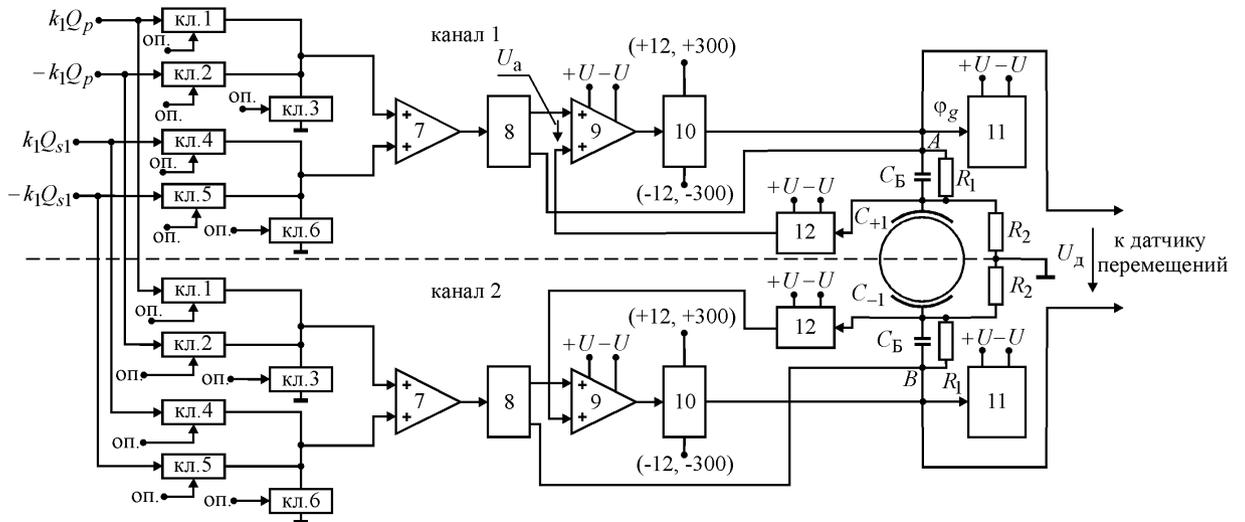


Рис. 12. Четырехосный импульсный подвес на источниках заряда. 1...6 – ключи, 7 – сумматор, 8 – согласующий трансформатор, 9 – дифференциальный усилитель, 10 – высоковольтный усилитель тока, 11 – источника питания с «плавающей» землей, 12 – повторитель напряжения.

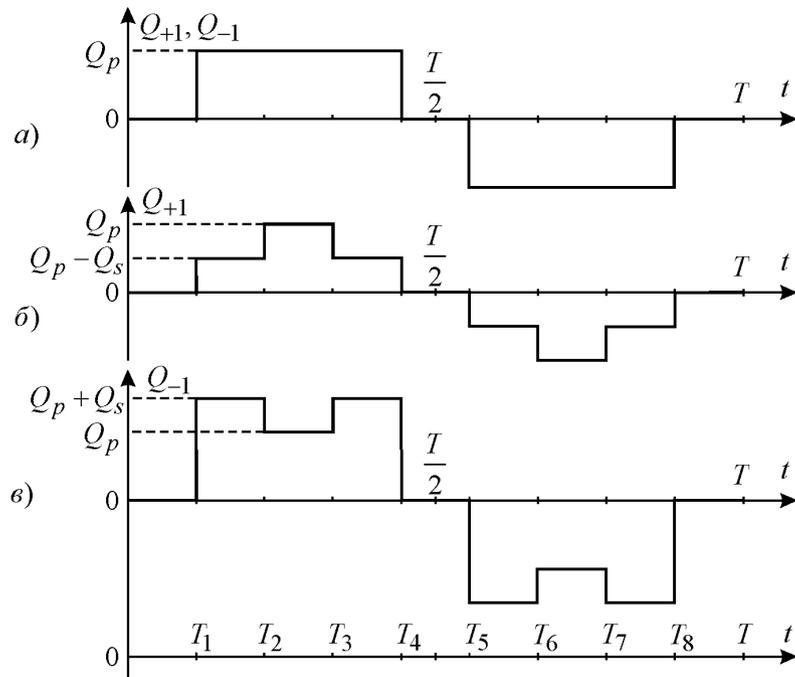


Рис. 13. Временные диаграммы импульсов на электродах четырехосного подвеса на источниках заряда.

После обработки сигнала положения в дискретном корректирующем устройстве формируется управляющий сигнал  $kQ_s$ , который и подается на входы каналов заряда, рис. 12.

Схемы аналогово-импульсных подвесов с регулированием высоковольтного напряжения по закону ШИМ и совмещенным датчиком перемещений впервые предложены в работах С. Н. Грибовой и Г. Ф. Дробышева [18], [19] и получили дальнейшее развитие в их совместных работах с автором [20], [21], [22].

Первоочередная проблема, с которой пришлось столкнуться при разработке импульсных подвесов – плохая совместимость импульсных высоковольтных каскадов и аналоговых датчиков перемещения. Это привело к необходимости применения датчиков совмещенного типа. В частности, в [18] предложен способ организации датчика, основанный на измерении суммы напряжений с диаметрально противоположных электродов подвеса в моменты времени заряда-разряда ротор-электродных емкостей с последующим стробированием ее в заданные моменты времени.

Схема датчика показана на рис. 14, временные диаграммы, поясняющие работу схемы, приведены на рис. 15. На диаграммах рис. 15 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, 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

$$\varphi_1(t) = \varphi_{0Э} (1 - e^{-t/\tau_{Э1}}), \quad \varphi_2(t) = \varphi_{0Э} e^{-t/\tau_{Э2}}, \quad (4)$$

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. 14) формируют сигнал,

$$u = [\varphi_1(t) + \varphi_2(t) - \varphi_{0Э}] / k_{\text{дел}}, \quad (5)$$

поступающий на аналоговый вход А 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  $\tau_0$  вырабатывается строб (рис. 15, в), который открывает на короткое время коммутатор аналоговых сигналов и запоминающая емкость заряжается до величины разностного напряжения, пропорционального смещению по рассматриваемой оси:

$$u_{\text{д}} = u|_{t=\tau_0} \cong \varphi_{0Э} (e^{-\tau_0/\tau_{Э2}} - e^{-\tau_0/\tau_{Э1}}) / k_{\text{дел}}. \quad (6)$$

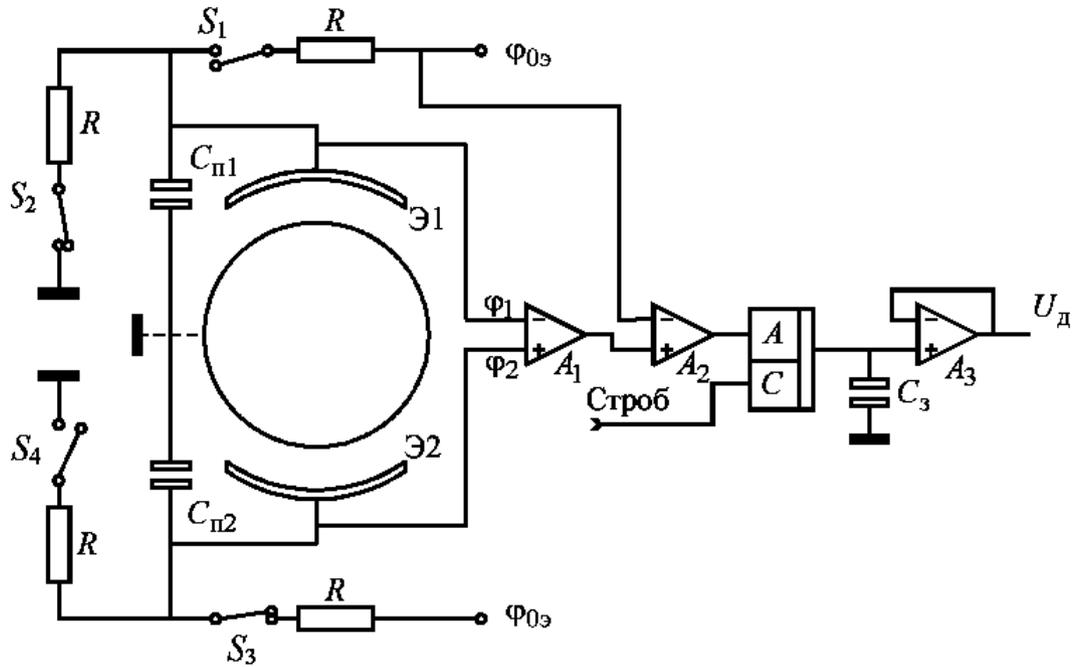


Рис. 14. Расчетная схема импульсного датчика со стробированием

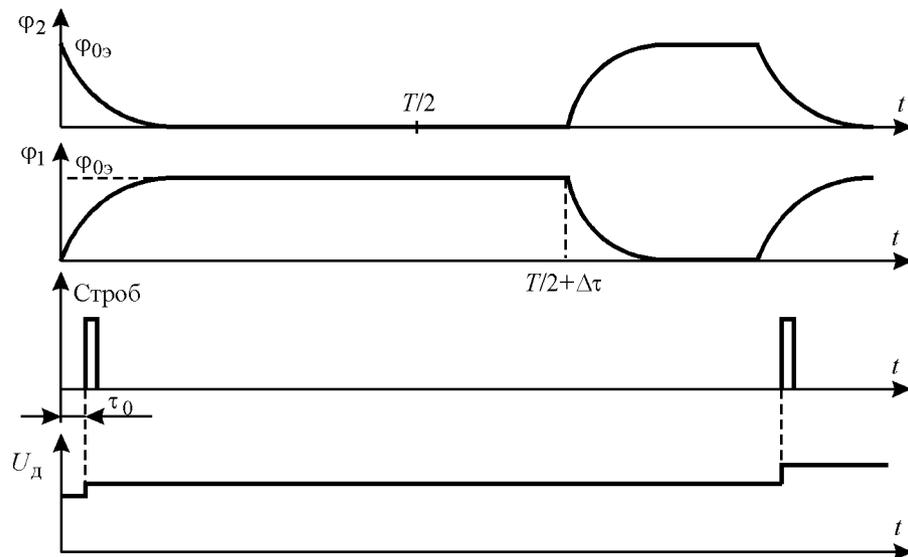


Рис. 15. Временные диаграммы импульсного датчика со стробированием

В [18] показано, что датчик имеет максимальную крутизну, если время  $\tau_0$  равно постоянной времени заряда-разряда при центральном положении ротора. Усилитель  $A_3$  работает в режиме повторителя, на его выходе окончательно формируется сигнал датчика (рис. 15, г).

Дальнейшее увеличение стабильности и точности центрирования, улучшение эксплуатационных характеристик связано с переходом к цифровым подвесам. Однако применение цифрового регулирования в электростатических подвесах наталкивается на ряд проблем, основной из которых является высокие (сотни герц) собственные частоты роторов.

На рис. 16 показана функциональная схема цифровой системы стабилизации электростатического подвеса с управлением высоковольтными потенциалами на электродах по принципу ШИМ.

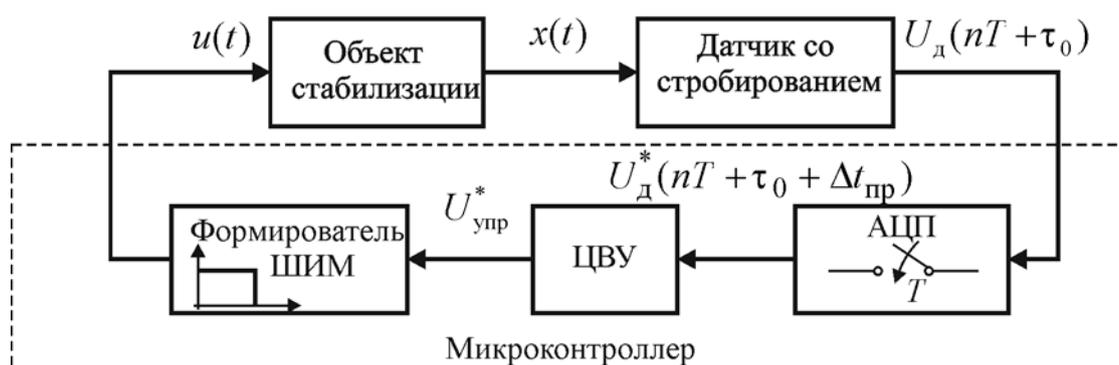


Рис.16. Функциональная схема цифрового подвеса

Выходные аналоговые сигналы датчиков перемещения, зафиксированные в устройствах выборки-хранения (УВХ) в моменты времени  $nT + \tau_0$  при помощи аналого-цифрового преобразователя (АЦП) преобразуются в цифровой сигнал  $U_d^*(nT + \tau_0 + \Delta t_{пр})$ . Здесь  $T$  - период ШИМ,  $\Delta t_{пр}$  - время преобразования сигнала. Далее сигнал обрабатывается в цифровом вычислительном устройстве (ЦВУ) в соответствии с заложенным в нем алгоритмом (дискретная коррекция) и преобразуется в импульсы ШИМ.

При проектировании цифровых подвесов возникает проблема выбора периода дискретизации  $T$  и параметров дискретного корректирующего устройства. Для того чтобы понять, какие ограничения налагаются на эти параметры, предварительно рассмотрим работу аналогово-импульсного подвеса с ШИМ. Принципиальная схема подвеса показана на рис. 17, временные диаграммы, поясняющие ее работу, приведены на рис. 18.

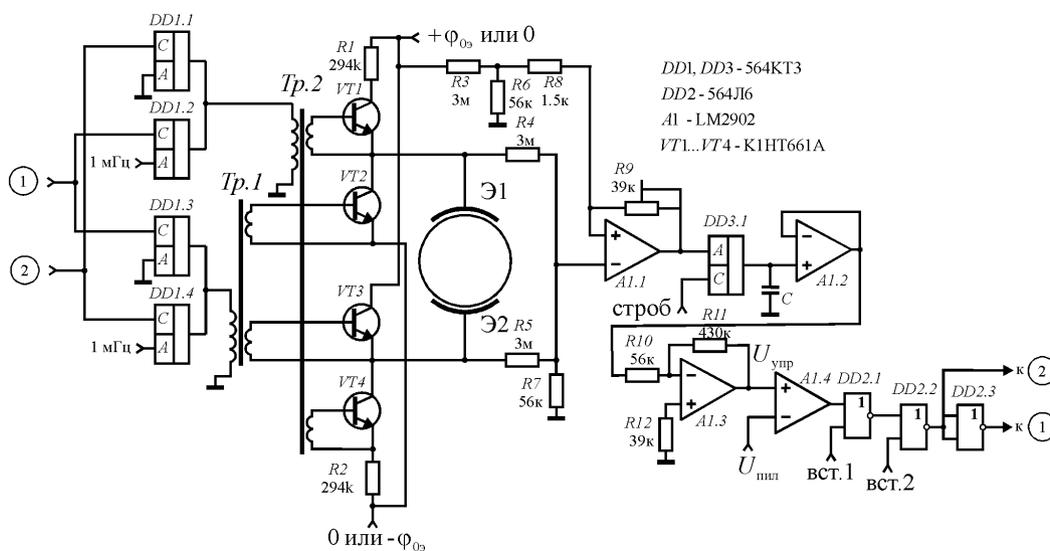


Рис. 17. Принципиальная схема импульсного подвеса

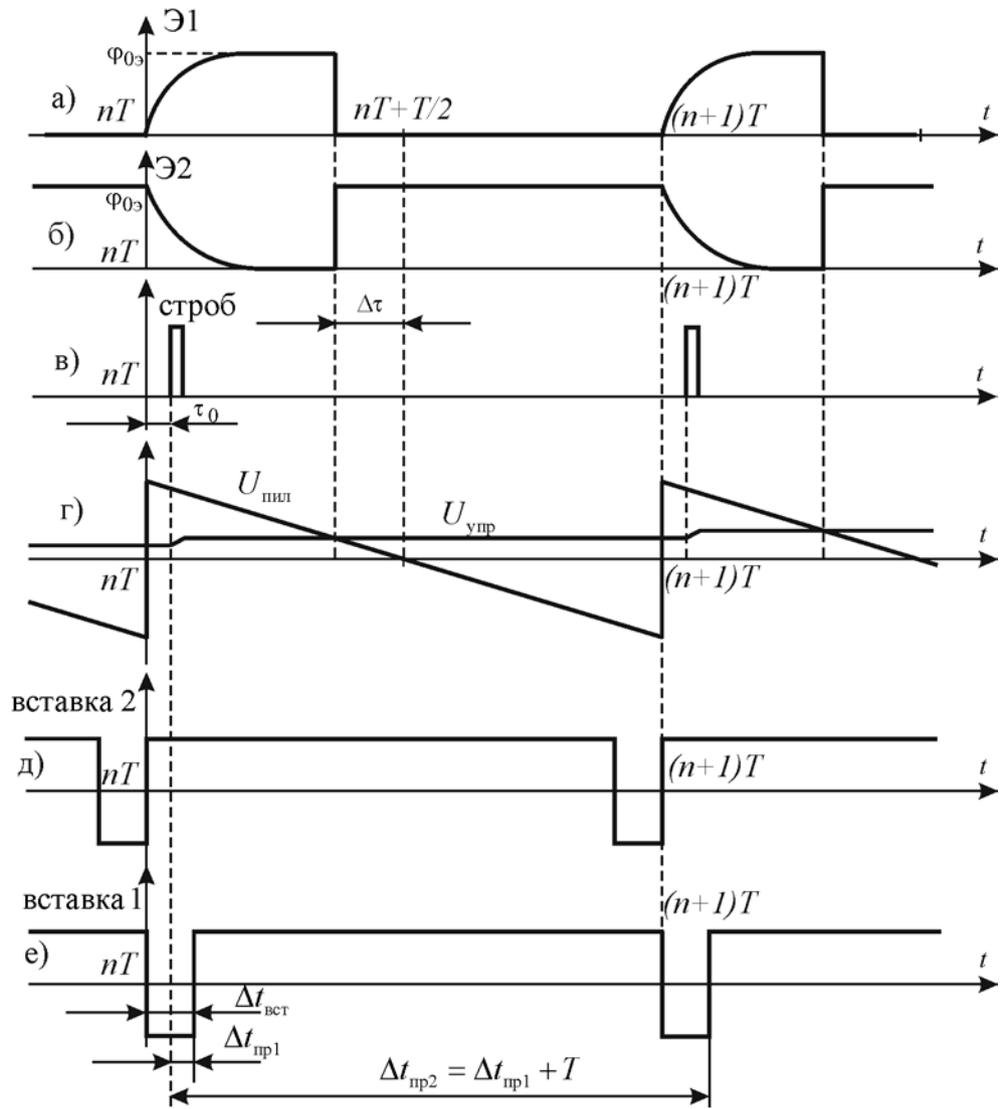


Рис. 18. Временные диаграммы работы импульсного подвеса

Коротко остановимся на описании принципа действия рассматриваемого подвеса. Предположим, что произошло смещение ротора по направлению к электроду Э1. Высоковольтные каскады подвеса (транзисторы VT1 – VT4 и управляющие трансформаторы Тр.1, Тр.2) построены таким образом, что в начале каждого периода происходит заряд ротор-электродной емкости Э1 и разряд емкости Э2, рис. 18 а, б. Информация о смещении ротора заложена в сумме напряжений с электродов, измеряемой в фиксированный относительно начала каждого периода момент  $\tau_0$ . В это время схема

управления подвеса (на рис. 17 не показана) вырабатывает строб опроса датчика перемещений, рис. 18 в. Напряжение датчика в моменты времени  $(nT + \tau_0)$  запоминается в УВХ (ключ DD3.1, емкость C, повторитель A1.2), усиливается (корректирующее звено, обеспечивающее устойчивость подвеса на данной схеме не показано) и сравнивается с пилообразным напряжением, рис. 18 г. Выходной сигнал компаратора A1.4 складывается на логических элементах DD2.1, DD2.2 с импульсами вставок, рис. 18 д, е, и поступает далее на ключевые схемы DD1.1- DD1.4 управления высоковольтными каскадами. В результате длительность высоковольтного импульса на электроде Э1 уменьшается, а на электроде Э2 – увеличивается, что и создает соответствующую восстанавливающую силу подвеса, возвращающую ротор в центральное положение.

В рассмотренной схеме подвеса наличие вставок является принципиальным моментом. Их присутствие не позволяет импульсам ШИМ на электродах подвеса вырождаться в постоянные уровни. Это может случиться при выходе ротора из линейной зоны регулирования, когда напряжение управления  $U_{упр}$  на входе компаратора превысит амплитуду пилообразного сигнала.

Какие ограничения налагаются на длительность импульсов вставок? Рассматривая временные диаграммы, рис. 18, можно отметить, что длительность вставки  $\Delta t_{вст}$  не может быть меньше  $\tau_0$ . Максимальная крутизна датчика достигается, когда величина  $\tau_0$  равна постоянной времени заряда ротор-электродных емкостей при центральном положении ротора  $\tau_0 = R1 \cdot C_{вх \text{ Э1}} = R2 \cdot C_{вх \text{ Э2}}$ , где  $C_{вх \text{ Э1}}$  и  $C_{вх \text{ Э2}}$  входные емкости со стороны электродов Э1 и Э2 соответственно, а  $R1$  и  $R2$  - резисторы, через которые осуществляется заряд. При типовом для электростатических подвесов значении емкостей 20 – 40 пФ и величине зарядного резистора 300 кОм  $\tau_0 = 6 - 12$  мкс. Уменьшение  $R1$  и  $R2$  ниже 100 кОм не рекомендуется из-за возрастания энергопотребления подвеса. С другой стороны, величина  $\tau_0$  должна быть в несколько раз больше длительности строга (0,5 – 1 мкс). Таким образом, минимальное значение  $\tau_0$  можно оценить в 4 – 5 мкс, а минимальное значение длительности вставки, в которую кроме  $\tau_0$  и длительности строга необходимо включить задержку отпираания – запираания высоковольтных транзисторов, можно оценить в 10 мкс.

Длительность вставки должна быть ограничена сверху, так как ее наличие снижает максимальное приращение импульсов ШИМ на электродах подвеса до величины  $\Delta\tau_{\max} = 0,5T - \Delta t_{\text{вст}}$ . Если принять, что вставка не может быть больше приращения  $\Delta\tau_{\max}$ , то предельный период ШИМ можно оценить в 40 мкс, а частоту ШИМ – в 25 кГц. В цифровом подвесе импульсы вставок реализуются программно, но на их длительность накладываются те же самые ограничения.

Рассмотрим теперь цикл работы цифрового подвеса. Очевидно, что работа АЦП не может начаться ранее окончания импульса строба. Обозначим  $\Delta t_{\text{ацп}}$  - время работы аналого-цифрового преобразователя и  $\Delta t_{\text{дк}}$  - время, необходимое на дискретную коррекцию. Тогда минимальный цикл преобразования  $\Delta t_{\text{пр}}$  можно оценить как  $\Delta t_{\text{пр}} = \Delta t_{\text{ацп}} + \Delta t_{\text{дк}}$ .

Здесь возможны два существенных для работы подвеса варианта. В первом из них цикл преобразования удается завершить до окончания импульса вставки  $\Delta t_{\text{пр}} < \Delta t_{\text{пр1}}$ , где  $\Delta t_{\text{пр1}} \approx \Delta t_{\text{вст}} - \tau_0$  (см. рис. 18 е). В этом случае приращение импульса ШИМ  $\Delta\tau$  на участке  $nT - (n+1)T$  вычисляется и устанавливается на основе сигнала датчика перемещений этого же участка. При втором варианте, в силу недостаточной скорости обработки, цикл преобразования  $\Delta t_{\text{пр}} > \Delta t_{\text{пр1}}$ . Для этого случая цикл преобразования может быть уже расширен до величины  $\Delta t_{\text{пр2}} = \Delta t_{\text{пр1}} + T$ , но приращение  $\Delta\tau$  на участке  $nT - (n+1)T$  формируется на основе информации предыдущего периода  $(n-1)T - nT$ . Во втором случае происходит задержка информации в контуре стабилизации на один период квантования.

Очевидно, что работа подвеса по тому или иному варианту (с задержкой на период или без нее) зависит от величины  $\Delta t_{\text{пр1}}$  и возможностей микропроцессора. В настоящее время существуют высокоскоростные 11 – 14 разрядные микропроцессоры и многоканальные АЦП (как встроенные в процессор, так и в виде отдельных микросхем) с временами преобразования порядка 1 – 4 мкс. Однако возможность реализации того или иного варианта необходимо оценивать в каждом конкретном случае проектирования, исходя из стоимости микропроцессора, его энергопотребления и т.д.

Примем в качестве главных критериев качества электростатической опоры такие показатели как, **перегрузочная способность, жесткость, точность и стабильность центрирования, энергоемкость, возможность интегрального исполнения электронного блока подвеса и простота технической реализации.** В этом случае можно обнаружить прямую связь этих критериев со схемами построения и параметрами подвеса.

**Перегрузочная способность** подвеса любого типа связана с напряженностью электрического поля в зазоре электрод-ротор и поэтому сравнение подвесов необходимо проводить, основываясь на предельно допустимой величине напряженности. Расчеты, базирующиеся на линейной модели подвеса, показывают, что наибольшей перегрузочной способностью обладают подвесы на постоянном токе и импульсные подвесы на источниках напряжения, а наименьшей – подвесы на переменном токе и импульсные подвесы с источниками тока. В ряде работ, также основанных на линейной теории подвеса, показано, что максимальная перегрузочная способность достигается при нулевом потенциале ротора подвеса. Это делает актуальной проблему минимизации потенциала ротора для подвеса любого типа. В работе [1] выделены две составляющие потенциала ротора. Первая составляющая, назовем ее детерминированной, связана с явлением электростатической индукции в условиях, когда на электродах подвеса заданы потенциалы. Вторая составляющая определяется случайным зарядом, который приобретает ротор на этапе начального всплытия и в процессе эксплуатации подвеса из-за темновых токов и микрозарядов в зазоре.

Минимизация первой составляющей достигается определенной фазировкой источников питания. В рассмотренных выше ЭСП переменного тока, включая и резонансные подвесы, используется свойство симметричности многофазных цепей. В подвесах постоянного тока фазировка достигается использованием разнополярных источников напряжения при четном числе электродов, причем, для трехосных подвесов это достигается разрезными электродами по каждой полуоси чувствительности, а в четырехосных – четностью самих осей чувствительности. В импульсных подвесах используются приемы фазировки, применяемые как в подвесах на постоянном токе, так и подвесах на переменном токе. В центральном положении ротора, когда нагрузки на

источники, образованные емкостями электрод-ротор равны, детерминированная составляющая потенциала ротора равна нулю, при смещении это равенство нарушается.

**Жесткость** электростатического подвеса напрямую связана с точностными параметрами приборов в условиях воздействия перегрузок и поэтому при проектировании систем стабилизации положения ротора ее стремятся сделать как можно большей. Увеличение жесткости (при ограничениях на предельную напряженность электрического поля) достигается за счет увеличения общего коэффициента усиления в контуре стабилизации при статическом регулировании или включением в контур интеграторов для реализации астатического подвеса. Необходимая жесткость должна сочетаться с устойчивостью подвеса как в малом (при работе в линейной зоне вблизи центрального положения), так и в большом (при первоначальном всплытии с упоров или при воздействии кратковременных возмущений, превышающих перегрузочную способность). Необходимо также обеспечить «грубость» подвеса, его сопротивляемость ударным и вибрационным нагрузкам. Все это реализуется путем включения в контур стабилизации подвеса корректирующих звеньев определенного типа.

**Точность** центрирования ротора зависит как от жесткости электростатического подвеса, так и от нулевого сигнала датчика перемещений. Существующие системы стабилизации положения ротора построены таким образом, чтобы сводить к нулю (с точностью до статической ошибки) сигнал датчика перемещений. Наличие нулевого сигнала датчика приводит к тому, что стабилизация ротора происходит не вокруг геометрического центра подвеса, а вокруг электрического нуля датчика.

Для совпадения электрического нуля датчика с геометрическим центром подвеса необходимо дополнительное симметрирование плеч датчика.

**Стабильность** центрирования ротора определяется стабильностью геометрических параметров опоры, стабильностью параметров электронного блока системы стабилизации (опорных напряжений, коэффициентов усиления звеньев, стабильностью паразитных емкостей и т.п.) и стабильностью случайного заряда ротора.

Требования по **энергоёмкости, возможности интегрального исполнения электронного блока подвеса и простоте технической реализации** ограничивают возможность применения подвесов на переменном токе, особенно в конструкциях с

роторами малых диаметров. Оптимальным в этом плане является применение импульсных подвесов на источниках напряжения с ШИМ.

## **Выводы**

Рассмотренные выше схемы подвесов различных типов позволили выявить их **основные достоинства и недостатки.**

### **Подвесы на постоянном токе.**

**Достоинства:** высокая перегрузочная способность.

### **Недостатки:**

- трудность создания разнополярных высоковольтных усилителей постоянного тока;
- принципиальная невозможность создания подвеса с совмещенным датчиком перемещений;
- сложность минимизации потенциала ротора в трехосных подвесах с неразрезными электродами;
- накопление случайного заряда на роторе, приводящее к расцентровке и появлению неконтролируемых уводящих моментов;
- в подвесах, организованных по принципу «модуляции-демодуляции» присутствуют значительные фазовые сдвиги, вносимые в контур стабилизации, что затрудняет обеспечение устойчивости и снижает динамический диапазон подвеса.

### **Импульсные подвесы.**

#### **Достоинства:**

- малые габариты, вес, высокая надежность;
- для подвеса на источниках напряжения с ШИМ возможность создания высокостабильных нерегулируемых высоковольтных источников напряжения и работа выходных высоковольтных каскадов и схемы измерения перемещений в ключевом режиме обеспечивает высокую стабильность центрирования ротора.
- подвес с ШИМ не нуждается в специальных цепях для разделения сигналов положения и управления, имеет в два раза большую перегрузочную способность, чем подвес на источниках тока и значительно проще подвеса на источниках заряда;

### **Недостатки:**

– в подвесах на источниках напряжения при работе с частотами ШИМ выше 5 кГц наблюдается снижение эффективности за счет влияния конечной длительности фронтов импульсов;

– в подвесах на источниках тока (ШИМ+АИМ) требуются специальные меры по выделению сигнала перемещения;

– схемотехническая сложность и трудность технической реализации подвесов на регулируемых источниках тока и заряда.

Общий вывод, который можно сделать по итогам рассмотрения подвесов различных типов заключается в том, что, несмотря на присущие отдельным видам подвесов достоинства и недостатки, не существует универсальной схемы построения подвеса, удовлетворяющей всему комплексу требований. В этом случае при разработке конкретного типа прибора с ЭСП следует руководствоваться введенным выше базовым набором критериев качества, на основе которого проектировщик выбирает подвес того или иного типа.

### **Список литературы**

1. Васюков С. А., Дробышев Г. Ф. Теория и применение электростатических подвесов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 336 с.
2. Васюков С. А. Схемотехника электростатических подвесов на переменном токе и особенности их применения в приборах систем управления движением. Инженерный вестник. Электронный научно-технический журнал, 2013, № 9.
3. Knoebel H. W. The electric vacuum gyro // Control Engineering. – 1964. – vol. 11. - № 2, p. 70 – 73.
4. P. Hennion. La mesure des gris faible acceleration // ONERA Note Technique. 1965. № 99. P. 27–32.
5. Анфиногенов А. С., Парфенов О. И. Потенциал ротора электростатического гироскопа при различных структурах его подвеса // Гироскопия и навигация. 2003. № 3. С. 37–40.
6. Васюков С. А. О минимизации случайного заряда на роторе электростатического подвеса // Наука и образование: электронное научное издание. 2007. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/65946.html> (дата обращения: 15.05.2007).

7. Ландау Б. Е., Гуревич С. С., Емельянцеv Г. И. Результаты калибровки электростатических гироскопов в бескарданной инерциальной системе ориентации // Сборник материалов Юбилейной 15-й международной конференции по интегрированным навигационным системам. Санкт-Петербург, 2008. С. 122–129.
8. Nordsiek A. Feasibility of a Free Gyro Navigation System // Contr. Syst. Labor. Internal Rep. 1954. Vol. 5. P. 123-135.
9. Пат. 3438267 США, МКИ G01P 15/08. Micro - accelerometer / P. L. Contensou (Франция). - № 538065; Заявлено 30.03.65; Опубл. 15.04.69; НКИ 73. 517.
10. Способ измерения смещения подвешиваемого тела и активный электростатический подвес для реализации данного способа: а.с. 1045716 СССР/ Я. А. Некрасов. № 3491383/40–23; 1982.
11. Электростатический гироскоп: а.с. 1112872 СССР / Я. А. Некрасов. № 3722969/40–23; 1984.
12. Пат. 4102202 США, МКИ G01P 19/00. Electrostatic accelerometer / L.Ferris (США); Singer Company (США) - № 745259; Заявлено 26.10.76; Опубл. 25.07.78; НКИ 73. 516R.
13. Пат. 3877313 США, МКИ G01P 15/08. Electrostatic accelerometer / L.Ferris (США); Singer Company (США) - № 381771; Заявлено 23.07.73; Опубл. 15.04.75; НКИ 74. 517B.
14. Пат. 3338644 США, МКИ F16C 39/06. Electrostatic support circuit / J. L. Atkinson (США); North American Rockwell Corp. (США) - № 441808; Заявлено 22.03.65; Опубл. 29.08.67; НКИ 308-10.
15. Пат. 3624334 США, МКИ F16C 39/06. Electrostatic support system / J. L. Atkinson (США); North American Rockwell Corp. (США) - № 50604; Заявлено 29.06.70; Опубл. 15.02.72; НКИ 308-10.
16. Пат. 3697143 США, МКИ F16C 39/06. Electrostatic Gyroscope Suspension System / J. F. Klinchuch (США); North American Rockwell Corp. (США) - № 145679; Заявлено 21.05.71; Опубл. 10.10.72; НКИ 308 – 10.
17. Duncan R. R. Micron – a strapdown inertial navigator using miniature electrostatic gyros // National Aerospace meeting Proceeding of the Institute of Navigation. New–York. 1973. P. 13–23.
18. Способ управления подвесом электростатического гироскопа: а.с. 1149726 СССР / С. Н. Грибова, Г. Ф. Дробышев. № 3474539/40–23; 1984.

19. Электростатический подвес: а.с. 1241825 СССР / С. Н. Грибова, Г.Ф. Дробышев (СССР). № 3771062/40–23; 1986.
20. Электростатический подвес: а.с. 1258158 СССР / С. А. Васюков, С. Н. Грибова, Г.Ф. Дробышев. № 3791421/40–23; 1986.
21. Способ центрирования ротора электростатического гироскопа: а.с. 1331219 СССР / С.А. Васюков, Г.Ф. Дробышев, Н.А. Орлов. № 3931438/40–23; 1987.
22. Васюков С. А. Дискретная коррекция в импульсных электростатических подвесах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 7. С. 12–17.