

СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА С ЕМКОСТНЫМ ДАТЧИКОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

М. А. Ватутин¹, И. А. Шевкунов²

^{1,2} Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

¹ vatutinm@mail.ru, ² vka@mil.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Современные акселерометры, основанные на микроэлектромеханических системах (МЕМС), имеют весьма невысокую стоимость, отличаются своей миниатюрностью и малым энергопотреблением. Высокую погрешность измерения можно определить как один из недостатков таких датчиков. Одной из причин этого является значительная чувствительность радиокомпонентов к изменению температуры окружающей среды. Целью работы является повышение метрологических характеристик акселерометра за счет повышения стабильности работы преобразовательной части, выполненной на D-триггере. *Материалы и методы.* Исследование показало, что акселерометр с емкостным датчиком перемещения, построенный на цифровой микросхеме D-триггера, не обладает высокими точностными параметрами, а также возникает сложность их определения. Предложенный буферный компаратор позволяет устранить эти недостатки. Произведена оценка точностных параметров элементов буферного компаратора. Разработана математическая модель акселерометра, позволяющая оценить стабильность параметров формирователя временного интервала. Произведена оценка стабильности преобразования во временной интервал для различных типовых элементов буферного компаратора. Осуществлена оценка влияния вспомогательных параметров радиоэлементов на стабильность работы буферного компаратора. Предложены схемотехнические решения для повышения стабильности работы акселерометра с емкостным датчиком перемещения. *Результаты.* Представленные схемотехнические предложения позволяют повысить стабильность преобразования акселерометром с емкостным датчиком перемещения. Также представленные результаты могут быть использованы для широкого круга измерительных приборов, в которых для измерения физической величины используются датчики перемещения емкостного типа. *Выводы.* Применение исследованных схемотехнических предложений позволяет повысить стабильность пороговых уровней преобразовательного D-триггера и тем самым осуществить более точное преобразование входного сигнала. Результаты могут использоваться при построении широкого круга измерительных приборов физических величин для применения в промышленных устройствах и в других областях науки и техники.

Ключевые слова: акселерометр, датчик первичной информации емкостного типа, генератор на цифровой микросхеме, стабильность преобразования, дрейф параметров радиоэлементов, источник опорного напряжения

Для цитирования: Ватутин М. А., Шевкунов И. А. Схемотехнические предложения по повышению метрологических характеристик микромеханического акселерометра с емкостным датчиком перемещения // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 80–90. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-10

CIRCUIT DESIGN PROPOSALS FOR IMPROVING THE METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF A MICROMECHANICAL ACCELEROMETER WITH A CAPACITIVE DISPLACEMENT SENSOR

M.A. Vatutin¹, I.A. Shevkunov²

^{1,2} Mozhaitsky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia

¹ vatutinm@mail.ru, ² vka@mil.ru

Abstract. *Background.* Modern accelerometers based on microelectromechanical systems (MEMS) have a very low cost, are distinguished by their miniaturization and low energy consumption. A high measurement error can be identified as one of the disadvantages of such sensors. One of the reasons for this is the significant sensitivity of radio components to changes in ambient temperature. The aim of the work is to improve the metrological characteristics of the accelerometer

by increasing the stability of the converter part, made on a *D*-trigger. *Materials and methods.* The study showed that the accelerometer with a capacitive displacement sensor, built on a digital *D*-trigger microcircuit, do not have high accuracy parameters, and it is also difficult to determine them. The proposed buffer comparator makes it possible to eliminate these disadvantages. The accuracy parameters of the buffer comparator elements are estimated. A mathematical model of the accelerometer has been developed to assess the stability of the parameters of the time interval shaper. The stability of the conversion in the time interval for various typical elements of the buffer comparator is estimated. The influence of auxiliary parameters of radio elements on the stability of the buffer comparator has been evaluated. Circuit design solutions are proposed to improve the stability of an accelerometer with a capacitive displacement sensor. *Results.* The presented circuit design proposals make it possible to increase the stability of the conversion by an accelerometer with a capacitive displacement sensor. The presented results can also be used for a wide range of measuring instruments in which capacitive type motion sensors are used to measure a physical quantity. *Conclusions.* The application of the studied circuit design proposals makes it possible to increase the stability of the threshold levels of the converter *D*-trigger and, thereby, to achieve a more accurate conversion of the input signal. The results can be used in the construction of a wide range of measuring instruments of physical quantities for use in industrial devices and in other fields of science and technology.

Keywords: accelerometer, capacitive primary information sensor, digital circuit generator, conversion stability, radio element parameter drift, reference voltage source

For citation: Vatutin M.A., Shevkunov I.A. Circuit design proposals for improving the metrological characteristics of a micromechanical accelerometer with a capacitive displacement sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):80–90. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-10

Введение

Развитие авиационного и космического приборостроения неразрывно связано с созданием летательных аппаратов (ЛА) новых типов, обладающих большой скоростью и дальностью полета и требующих все более высокого уровня автоматизации процессов управления полетом [1]. Среди множества информационных систем, обеспечивающих формирование данных о текущих параметрах движения ЛА, особое место занимают инерциальные навигационные системы (ИНС) [2–4]. Являясь автономными, т.е. полностью помехозащищенными, они обеспечивают необходимой информацией все системы управления движением как ЛА [5, 6], так и наземных подвижных объектов [7].

Одной из основных характеристик информационных систем является нестабильность масштабного коэффициента преобразования измеряемой величины и дрейф смещения нуля. Значительную долю в формировании этих параметров вносит электронная часть усилительно-преобразовательного измерительного устройства.

Современные акселерометры, основанные на микроэлектромеханических системах (МЭМС), позволяют обнаружить и измерить кажущееся ускорение, имеют весьма невысокую стоимость, отличаются своей миниатюрностью и малым энергопотреблением [8]. К одному из недостатков таких датчиков можно отнести высокую погрешность, что связано с повышенной чувствительностью к изменению температуры окружающей среды [9, 10]. В настоящее время указанную проблему решают посредством схемотехнических, конструкторских и технологических решений и новшеств [11–15]. В данной статье представлены схемотехнические предложения по повышению метрологических характеристик МЭМС-акселерометра за счет повышения стабильности работы преобразовательной части акселерометра.

Цель и задачи работы

Широкий круг измерительных приборов различных физических величин используют датчики перемещения (ДП) чувствительного элемента (ЧЭ), выполненные по емкостной схеме [16]. Такой датчик используется, в частности, в акселерометре АТ-1104 [17]. Схема подключения ДП к непосредственно преобразовательной части усилительно-преобразовательного тракта акселерометра и диаграммы его работы показаны на рис. 1.

Емкостный датчик положения на схеме обозначен как конденсаторы $C1$ и $C2$. При движении подвижной массы $m_{чэ}$ чувствительного элемента емкости этих конденсаторов изменяются противофазно. Выходное напряжение $U_{вых}$, согласно статье [16], пропорционально относительному приращению величины измерительной емкости и, следовательно, значению измеряемого ускорения $a_{вх}$:

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_U U_{\text{ОП}} \frac{C1 - C2}{C1 + C2}, \quad (1)$$

где K_U – коэффициент пропорциональности.

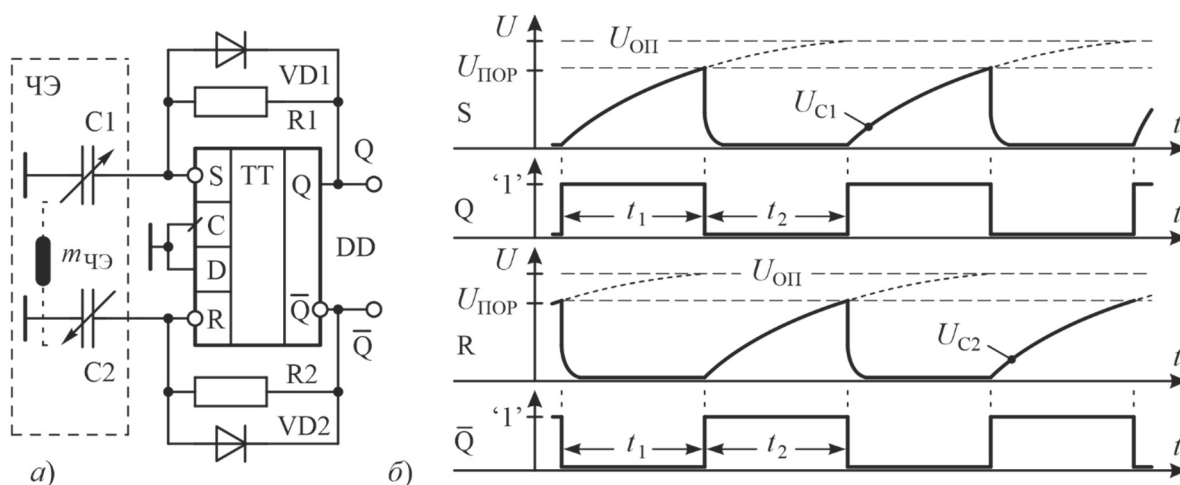


Рис. 1. Схема преобразовательной части акселерометра (а) и диаграмма ее работы (б)

Преобразовательная часть акселерометра выполнена как управляемый симметричный мультивибратор на D -триггере $DD1$ и является формирователем временных интервалов (ФВИ) t_1 и t_2 . Диаграмма напряжений в генераторной части схемы измерительно-преобразовательного канала показана на рис. 1, б. Конденсаторы $C1$ и $C2$ заряжаются по экспоненциальному закону

$$U_{C1} = U_{\text{ОП}} \left(1 - e^{-\frac{t_1}{R1C1}} \right); \quad U_{C2} = U_{\text{ОП}} \left(1 - e^{-\frac{t_2}{R2C2}} \right). \quad (2)$$

Потенциал на конденсаторах $C1$ или $C2$, достигая порогового напряжения ($U_{\text{ПОР}S}$ на $C1$ или $U_{\text{ПОР}R}$ на $C2$), приводит к поочередному переключению D -триггера $DD1$ и обеспечивает формирование временных интервалов t_1 и t_2 , которые в своей длительности содержат информацию об измеряемом ускорении. В соответствии с формулой (1), временные интервалы t_1 и t_2 определяются как

$$t_1 = -R1C1 \cdot \ln \frac{U_{\text{ОП}} - U_{\text{ПОР}S}}{U_{\text{ОП}}}; \quad t_2 = -R2C2 \cdot \ln \frac{U_{\text{ОП}} - U_{\text{ПОР}R}}{U_{\text{ОП}}}. \quad (3)$$

Преобразователь значения емкости пластин датчика перемещения во временной интервал принципиально работоспособен. Но цифровая микросхема D -триггера изначально, по сути своего функционирования, предназначена для работы с цифровыми сигналами, у которых существует два устойчивых состояния – логический «0» и логическая «1», и не предназначена для работы в прецизионных преобразователях уровня напряжения во временной интервал (в преобразователях «напряжение–частота»). Это связано с тем, что пороговые напряжения $U_{\text{ПОР}}$ срабатывания D -триггера по входам R и S никакими техническими условиями (ТУ) не регламентированы и значение $U_{\text{ПОР}}$ и значения его дрейфа заранее неизвестны. Соответственно, и точность, и стабильность производимого преобразования измеряемого ускорения во временной интервал заранее определить невозможно.

По этой причине с целью повышения метрологических характеристик акселерометра необходимо решить задачу: разработать схемотехнику преобразовательной части акселерометра на D -триггере, при использовании которой возможно определить стабильность производимого преобразования.

Схемотехника буферного компаратора

Для повышения стабильности работы схемы преобразования предлагается между конденсаторами $C1$, $C2$ и входами R , S D -триггера включить буферные компараторы (БфК) $DA1$ и $DA2$, как показано на рис. 2.

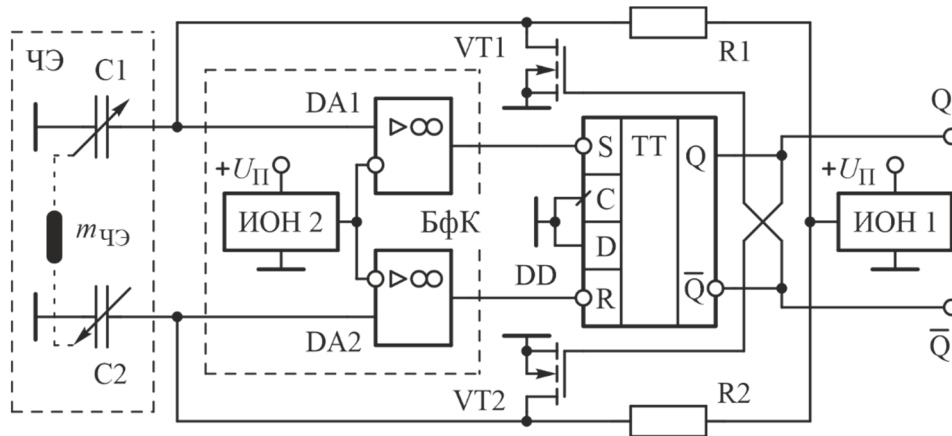


Рис. 2. Преобразовательная часть акселерометра с буферными компаратами

В качестве устройства сравнения применены быстродействующие операционные усилители (ОУ), работающие в режиме компаратора [18]. Инвертирующие входы ОУ подключены к времязадающим конденсаторам $C1$ и $C2$, а неинвертирующие – к источнику опорного напряжения (ИОН) [19], который определяет порог срабатывания $U_{\text{Пор}}$.

Модель преобразовательной части буферного компаратора

Функциональная схема одного канала БФК показана на рис. 3.

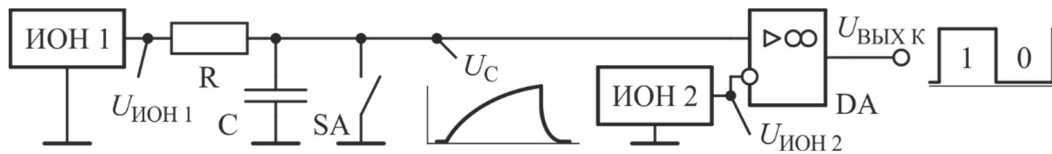


Рис. 3. Функциональная схема канала буферного компаратора

Конденсатор C стремится зарядиться до напряжения $U_{\text{ИОН 1}}$. Пока значение напряжения U_C на конденсаторе C меньше значения напряжения $U_{\text{ИОН 2}}$, на выходе ОУ формируется низкий уровень выходного напряжения компаратора $U_{\text{ВЫХ К}}$ – напряжение логического “0”. При достижении значением входного напряжения U_C значения напряжения $U_{\text{ИОН 2}}$ и превысит его, на выходе ОУ формируется высокий уровень напряжения $U_{\text{ВЫХ К}}$ – напряжение логической “1”, после чего замыкается ключ SA и происходит разряд конденсатора C . Напряжение порога срабатывания $U_{\text{ПС}}$, при котором происходит переключение компаратора DA , определяется как сумма опорного напряжения $U_{\text{ОП}}$ и напряжения смещения ОУ – $U_{\text{СМ ОУ}}$:

$$U_{\text{ПС}} = U_{\text{ОП}} + U_{\text{СМ ОУ}}. \quad (4)$$

Источнику опорного напряжения и напряжению смещения ОУ присущи дрейфы этих значений напряжений. Истинное значение напряжения порога срабатывания определяется следующим выражением:

$$U_{\text{ПС}}^{\text{И}} = (U_{\text{ОП}} + \Delta U_{\text{ОП}}) + (U_{\text{СМ ОУ}} + \Delta U_{\text{СМ ОУ}}), \quad (5)$$

где $\Delta U_{\text{ОП}}$ – дрейф напряжения ИОН; $\Delta U_{\text{СМ ОУ}}$ – дрейф напряжения смещения ОУ.

Оценка точностных параметров радиоэлементов буферного компаратора

Выбор радиоэлементов буферного компаратора в своей основе произведен из современной продукции отечественных производителей. Ключевыми элементами буферного компаратора являются два элемента – источник опорного напряжения и операционный усилитель, работающий в режиме компаратора.

Оценка точностных параметров источника опорного напряжения. Источник опорного напряжения можно выполнить:

- на прецизионном стабилизаторе;
- на специализированной интегральной микросхеме (ИМС) ИОН.

Основными интересующими параметрами в данном случае являются значения напряжения стабилизации $U_{СТ}$ и его нестабильности $\alpha_{U_{СТ}}$.

Типовая величина нестабильности $\alpha_{U_{СТ}}$ для обоих типов ИОН составляет значение $5,0 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$. Но типовое напряжение стабилизации для стабилизаторов составляет значение 7,5 В (2С108В, 2С166В) или 9,0 В (2С190Т), что является неудовлетворительно высоким значением, а у ИМС ИОН напряжение стабилизации – 1,225 В (2С120Б).

Оценка точностных параметров операционного усилителя. Устройство сравнения (компаратор) является сложным элементом для выбора его в составе БФК, так как по своим параметрам он должен совместить в себе противоречивые условия – одновременно быть быстродействующим, с малым дрейфом напряжения смещения и обладать малыми входными токами. Интегральные микросхемы компараторов, как правило, эти параметры в одном изделии не совмещают. Поэтому в качестве БФК и предлагается использовать ОУ.

Параметры некоторых прецизионных ОУ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры прецизионных операционных усилителей

ОУ	U_{CM} , мкВ	$\Delta U_{CM} / \Delta T$, мкВ/ $^\circ\text{C}$	$K_U, \times 10^3$	I_{BX} , нА	f , МГц	$V_{U\text{ВЫХ}}$, В/мкс	$I_{ПOTP}$, мА
140УД17	75	3,0	200	2,5	4,0	0,1	4,5
140УД26	30	0,6	1000	40,0	20,0	11,0	5,0
544УД12	10	0,6	2000	1,0	0,4	0,1	1,0
544УА055	$1 \cdot 10^3$	10,0	2,0	0,01	41	130	6,5
140УД24	5	0,05	$1 \cdot 10^3$	0,01	0,8	2,0	4,0
5544УД4У3	175	6,76	$1 \cdot 10^3$	600	2,0	0,8	3,0
1467УД3У	5000	15,0	15	0,064	0,6	0,7	1,9
1446УД14А	3000	10,0	63	5,0	3,6	2,7	3,1
1476УД3АТ	3000	–	100	0,1	15,0	20,0	10,0
1473УД1Т1	25	0,6	1000	20	5,0	1,7	5,0

Оценка точностных параметров резисторов. Для формирования временных интервалов t_1 и t_2 используются резисторы. Наиболее точными в широком диапазоне температур являются металлофольговые (МФ) резисторы (табл. 2).

Таблица 2

Параметры металлофольговых резисторов

Резистор	Материал	ТКС, $\delta_R \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	L / D , мм	Прозв.
ММР	МФ	$\pm 5,0 (-65...+175^\circ\text{C})$	$3,5 \times 3,2 \times 2,0$ (0,1 Вт)	Отеч.
ММУ*	МФ	$\pm 1,0 (-65...+175^\circ\text{C})$	$3,2 \times 2,5 \times 1,5$ (0,05 Вт)	Отеч.
P2-109	МФ	$\pm 2,0 (-60...+125^\circ\text{C})$	$6,0 \times 5,0 \times 2,5$ (0,1 Вт)	Отеч.

* – резисторные сборки делителя напряжения.

Металлофольговые резисторы по сравнению с непроволочными резисторами обладают более широким температурным диапазоном работы.

Математическая модель оценки стабильности параметров формирователя временных интервалов

Напряжение на конденсаторе C изменяется по экспоненциальному закону

$$U_C = U_{\text{ИОН}} e^{-\frac{t}{RC}}.$$

В соответствии с формулой (3)

$$-\frac{t}{RC} = \ln \frac{U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}}{U_{\text{ИОН}1}}.$$

Отсюда после преобразования:

$$t = RC \left[\ln U_{\text{ИОН}1} - \ln (U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}) \right]. \quad (6)$$

В общем виде изменение выходной величины Δy определяется отклонением параметров от номинального значения каждого элемента устройства следующим выражением [20]:

$$\Delta y = \frac{\partial y}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} \Delta x_n. \quad (7)$$

Для рассматриваемого времязадающего устройства

$$\Delta_t = \left| \frac{\partial t}{\partial R} \right| \Delta_R + \left| \frac{\partial t}{\partial C} \right| \Delta_C + \left| \frac{\partial t}{\partial U_{\text{ИОН}1}} \right| \Delta_{U_{\text{ИОН}1}} + \left| \frac{\partial t}{\partial U_{\text{ИОН}2}} \right| \Delta_{U_{\text{ИОН}2}} + \left| \frac{\partial t}{\partial U_{\text{СМОУ}}} \right| \Delta_{U_{\text{СМОУ}}}, \quad (8)$$

и это влияние тем меньше, чем меньше слагаемых в выражении и чем меньшее влияние вносит каждое из них. Частные производные выражения (8) будут иметь вид

$$\frac{\partial t}{\partial R} = C \left[\ln U_{\text{ИОН}1} - \ln (U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}) \right]; \quad \frac{\partial t}{\partial U_{\text{ИОН}2}} = -\frac{RC}{U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}};$$

$$\frac{\partial t}{\partial C} = R \left[\ln U_{\text{ИОН}1} - \ln (U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}) \right]; \quad \frac{\partial t}{\partial U_{\text{СМОУ}}} = -\frac{RC}{U_{\text{СМОУ}} + U_{\text{ИОН}2}};$$

$$\frac{\partial t}{\partial U_{\text{ИОН}1}} = \frac{RC}{U_{\text{ИОН}1}}.$$

Подставим значение частных производных в выражение (8):

$$\begin{aligned} \Delta_t = & \left| C \left[\ln \frac{U_{\text{ИОН}1}}{U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}} \right] \right| \Delta_R + \left| R \left[\ln \frac{U_{\text{ИОН}1}}{U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}} \right] \right| \Delta_C + \\ & + \left| \frac{RC}{U_{\text{ИОН}1}} \right| \Delta_{U_{\text{ИОН}1}} + \left| \frac{RC}{U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}} \right| \Delta_{U_{\text{ИОН}2}} + \left| \frac{RC}{U_{\text{СМОУ}} + U_{\text{ИОН}2}} \right| \Delta_{U_{\text{СМОУ}}} \end{aligned} \quad (9)$$

или

$$\begin{aligned} \Delta_t = RC \left[\left| \ln \frac{U_{\text{ИОН}1}}{U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}} \right| \cdot \frac{\Delta_R}{R} + \left| \ln \frac{U_{\text{ИОН}1}}{U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}} \right| \cdot \frac{\Delta_C}{C} + \right. \\ \left. + \left| \frac{\Delta_{U_{\text{ИОН}1}}}{U_{\text{ИОН}1}} \right| + \left| \frac{\Delta_{U_{\text{ИОН}2}}}{U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}} \right| + \left| \frac{\Delta_{U_{\text{СМОУ}}}}{U_{\text{СМОУ}} + U_{\text{ИОН}2}} \right| \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Определим относительное изменение временного интервала δ_t с учетом (6):

$$\delta_t = \frac{\Delta_t}{t} = \frac{\Delta_R}{R} + \frac{\Delta_C}{C} + \frac{\left| \frac{\Delta_{U_{\text{ИОН}1}}}{U_{\text{ИОН}1}} \right| + \left| \frac{\Delta_{U_{\text{ИОН}2}}}{U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}} \right| + \left| \frac{\Delta_{U_{\text{СМОУ}}}}{U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}} \right|}{\ln \frac{U_{\text{ИОН}1}}{U_{\text{ИОН}2} + U_{\text{СМОУ}}}}. \quad (11)$$

Времязадающий конденсатор C , показанный на рис. 3, является непосредственно датчиком положения чувствительного элемента акселерометра и является источником информации

о перемещении подвижной массы. Входное ускорение постоянного значения ($a_{вх} = \text{const}$) вызовет отклонение чувствительной массы на постоянную величину ($\Delta h_0 = \text{const}$). В этом случае дестабилизирующим фактором, изменяющим значение емкости $C1$ или $C2$, является диэлектрическая постоянная материала, находящегося между обкладками конденсатора $C1$ ($C2$) и изменение геометрических размеров датчика.

В МЭМС-акселерометрах, которые, по сути, являются интегральными микросхемами, межобкладочным материалом емкостного датчика является вакуум, в котором диэлектрическая постоянная равна единице ($\epsilon = 1$) и, если и есть его изменения, то будем считать их незначительными. Геометрические изменения маятника могут вносить более весомый вклад в изменение емкости датчика перемещения $C1$ и $C2$, но конструкция датчика такова, что изменение этих емкостей будут происходить синхронно и в значительной мере взаимно компенсироваться. В данной статье нестабильность работы емкостного преобразователя перемещения не рассматривается. По этим причинам частную производную, показывающую влияние параметров емкости C на время t , примем равной нулю ($\partial t / \partial C = 0$).

В выражении (9) для типовых значений напряжений, например, $U_{ион1} = 5,0$ В и $U_{ион2} = 3,3$ В, знаменатель имеет постоянное значение:

$$\ln \frac{U_{ион1}}{(U_{ион2} + U_{см оу})} \approx \ln \frac{5}{3,3} = 0,416,$$

а обратная величина — $1/0,416 = 2,4$. Также заметим, что напряжение $U_{ион2} \gg U_{см оу}$ и по этой причине напряжением $U_{см оу}$ можно пренебречь. Соответственно, выражение (11) примет вид

$$\delta_t = \frac{\Delta_t}{t} = \frac{\Delta_R}{R} + 2,4 \cdot \left(\left| \frac{\Delta U_{ион1}}{U_{ион1}} \right| + \left| \frac{\Delta U_{ион2}}{U_{ион2}} \right| + \left| \frac{\Delta U_{см оу}}{U_{ион2}} \right| \right). \quad (12)$$

Оценка стабильности работы формирователя временных интервалов

Оценим численное значение относительного изменения временного интервала δ_t для различных радиоэлементов, параметры которых показаны в табл. 1–4 и значений опорных напряжений $U_{ион1} = 5,0$ В; $U_{ион2} = 3,3$ В.

1. Примем значения: $\Delta U_{ион1} = \Delta U_{ион2} = 5,0 \cdot 10^{-6}$ В (ИОН, построенный на базе ИМС 2С120Б); $\delta_R = 5,0 \cdot 10^{-6}$ (резистор ММР); $\Delta U_{см оу} = 0,6 \cdot 10^{-6}$ В (ОУ 140УД26). Выражение (12) примет численное значение

$$\delta_t = \Delta_t / t = 5 \cdot 10^{-6} + 2,4 \cdot (1,0 + 1,5 + 0,6) \cdot 10^{-6} = \boxed{12,44 \cdot 10^{-6}}. \quad (13)$$

2. Примем значения для улучшенного варианта: $\Delta U_{ион1} = \Delta U_{ион2} = 0,1 \cdot 10^{-6}$ В [19]; $\delta_R = 0,05 \cdot 10^{-6}$ [24]; $\Delta U_{см оу} = 0,05 \cdot 10^{-6}$ В (ОУ 140УД24). Выражение (12) примет численное значение

$$\delta_t = \Delta_t / t = 0,05 \cdot 10^{-6} + 2,4 \cdot (0,1 + 0,15 + 0,05) \cdot 10^{-6} = \boxed{0,725 \cdot 10^{-6}}. \quad (14)$$

3. Для исходной схемы акселерометра (см. рис.1) источником опорного напряжения $U_{ион2}$ является пороговое напряжение МДП-транзистора, которое не обладает высокой стабильностью и его значение находится на уровне $\Delta U_{п мдп} = (-3,5 \dots -2) \cdot 10^{-3}$ В/°С [11]. Выражение (12) для этого случая упростится и фактическое значение будет

$$\delta_t = \Delta_t / t = 2,4 \cdot \left| \frac{\Delta U_{п мдп}}{U_{ион2}} \right| = \boxed{(2,55 \dots 1,45) \cdot 10^{-3}}, \quad (15)$$

что в среднем на два-три порядка хуже вариантов 1 и 2, рассмотренных выше.

Симметричное построение времязадающих цепей генератора на ИМС DD1 (см. рис.1) позволяет предположить, что дестабилизирующие факторы будут в одинаковой степени влиять на пороговое напряжение МДП-транзисторов D -триггера, как по входу S , так и по входу R .

Поэтому в первом приближении значение $\Delta U_{П\text{ мдп}}$ можно взять, как у ОУ с полевыми транзисторами на входе (140УД8В, 1409УД1Б), – 150 мкВ/°С. В этом случае

$$\delta_i = \Delta_i / t = 5 \cdot 10^{-6} + 2,4 \cdot (1,0 + 1,5 + 45,5) \cdot 10^{-6} = \boxed{120,2 \cdot 10^{-6}}. \quad (16)$$

В цифровых ИМС меры по согласованию параметров транзисторов, как это делается для входного дифференциального каскада ОУ при производстве аналоговых ИМС, не осуществляются. Поэтому реальное значение дрейфа будет выше, чем определено в выражении (16).

Оценка влияния входного тока операционного усилителя на стабильность временных интервалов

В момент сравнения на ОУ опорного напряжения $U_{ИОН2}$ и напряжения U_C на конденсаторе C , к резистору $R1$ ($R2$) приложено напряжение $U_R^* = U_{ИОН1} - U_{ИОН2}$. Для выбранных в качестве примера значений $U_{ИОН1} = 5,0$ В; $U_{ИОН2} = 3,3$ В, напряжение $U_R^* = 1,7$ В. Значение протекающего в этот момент тока по резистору R (см. рис. 3) определяется значением его сопротивления $I_R^* = U_R^* / R$. При выборе реального значения сопротивления резистора R от 1,2 кОм до 1,2 МОм, значение тока I_R^* варьируется от 1,42 мА до 1,42 мкА.

Для обеспечения стабильной работы устройства (генерирования импульсов) входной ток ОУ должен быть значительно меньше значения тока I_R^* : $I_{ВХ\text{ ОУ}} \ll I_R^*$. А для обеспечения высокой стабильности преобразования дрейф входного тока $\delta_{I_{ВХ\text{ ОУ}}}$ должен быть меньше тока I_R^* в соответствии с выражениями (10)...(13) не менее чем в 10^6 раз. К сожалению, справочные данные по дрейфу входного тока ОУ приводятся редко и они зачастую противоречивы.

Оценка влияния параметров радиоэлементов на частоту генерируемых временных интервалов

Частота колебаний f_K формирователя временных интервалов в соответствии с выражением (6) определяется следующим выражением:

$$f_K = \frac{1}{T_K} = \frac{1}{2t} = \frac{1}{2RC \ln 1,7} = \frac{1,2}{RC}. \quad (17)$$

Для предварительно выбранных значений сопротивления резистора R от 1,2 кОм до 1,2 МОм и значений емкости $C = 10$ пФ, частота f_K будет изменяться от 100 МГц до 100 кГц. Диапазон частот может быть ограничен значениями следующих параметров радиоэлементов:

- максимальной частоты работы цифровой микросхемы D -триггера;
- входного тока ОУ;
- быстродействия ОУ.

Цифровые КМОП-микросхемы малой степени интеграции серии 1554 работоспособны до 140 МГц (так называемая внутренняя частота переключения триггеров). На печатной плате при применении цифровых ИМС малой степени интеграции значение тактовой частоты редко удается установить более 40–70 МГц. При компактном расположении компонентов акселерометра в виде гибридной микросхемы значение генерируемой частоты возможно получить более высоким.

Основная трудность при определении частоты генерации возникает при выборе ОУ. Быстродействие ОУ, определяемое скоростью нарастания выходного сигнала $I_{U_{ВЫХ}}$, и значение его входного тока $I_{ВХ}$ находятся, как правило, в противоречии – быстродействующие ОУ могут обеспечить высокие частоты генерации, но имеют относительно высокие входные токи, а ОУ с малыми входными токами, как правило, не имеют высокого быстродействия. В зависимости от выбранного ОУ, под его входной ток и быстродействие подбираются значения сопротивления времязадающего резистора R и тем самым определяется частота генерации. При этом ОУ надо выбирать с минимальным дрейфом напряжения смещения $\Delta U_{см} / \Delta T$.

Схемотехника цепей разряда времязадающих конденсаторов

Схемотехника цепей разряда времязадающих конденсаторов $C1$ и $C2$, показанных на рис. 1 и 2, содержит диоды $VD1$ и $VD2$. Это не позволяет осуществить полный разряд этих конденсаторов до напряжения $U_C = 0$, так как есть некоторое остаточное напряжение на диоде

$VD1$ ($VD2$), вычитающееся из опорного напряжения $U_{\text{ион}2}$ и снижающего его стабильность. Для устранения этой нежелательной особенности схему разряда конденсаторов необходимо выполнить на электронных МДП-ключах $VT1$ и $VT2$, как это показано на рис. 2. Необходимо отметить, что для исключения влияния закрытого электронного ключа на параметры времязадающей цепи остаточный ток (ток утечки) стока МДП-транзистора $I_{\text{ут МДП}}$ должен быть соизмерим или меньше входного тока операционного усилителя $I_{\text{вх оу}}$.

Заключение

Рассмотренные схемотехнические предложения по повышению метрологических характеристик микромеханического акселерометра с емкостным датчиком перемещения позволяют повысить стабильность работы преобразовательной части акселерометра. Так, относительная нестабильность формирования временного интервала δ_t исходного, предположительного и с принятием многих допущений, схемотехнического решения составляет $\delta_t = 120,2 \cdot 10^{-6}$. Применение рассмотренных схемотехнических предложений позволяет снизить это значение до $\delta_t = 12,44 \cdot 10^{-6}$. А для улучшенного варианта – $\delta_t = 0,725 \cdot 10^{-6}$, что более чем на два порядка улучшает этот параметр.

Рассмотренные схемотехнические предложения также могут быть использованы для широкого круга измерительных приборов, в которых для измерения физической величины используются датчики перемещения емкостного типа.

Список литературы

1. Ковалев И. В., Нургалеева Ю. А., Гриценко С. Н., Усачев А. В. К проблеме выбора структуры автоматизированной системы управления летательными аппаратами // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. 2009. № 3. С. 105–110.
2. Борисова А. Ю., Смаль А. В. Анализ разработок современных бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Инженерный вестник МГТУ имени Н. Э. Баумана. 2017. № 5. С. 50–57.
3. Трефилов П. М. Сравнительный анализ улучшения точностных характеристик инерциальных навигационных систем // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления. ВСПУ-2019. М., 2019.
4. Андреев С. В., Ильиных В. В., Ильиных О. А. [и др.]. Оценка влияния погрешностей инерциальных датчиков на точность бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2018. № 2. С. 29–34.
5. Дубовской В. Б., Кисленко К. В., Пшеняник В. Г. Методика повышения точности навигационного обеспечения космических аппаратов, оснащенных высокочувствительными акселерометрами // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 7. С. 590–595.
6. Волков В. Л. Обоснование требований к параметрам микромеханического акселерометра // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Решетникова. 2011. № 2 (87).
7. Лукьянов В. В., Медведев В. О., Медведева Ю. Д. Определение навигационных параметров наземного подвижного объекта с помощью микромеханических инерциальных датчиков // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 11. С. 40–46. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36842> (дата обращения: 14.09.2023).
8. Прохорцов А. В., Минина О. В. Обзор высокоточных акселерометров российских производителей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 10. С. 301–305.
9. Ключников А. И. Оценка температурной погрешности микромеханического акселерометра // Ракетно-космическая техника. НПО автоматики имени академика Н. А. Семихатова : VII науч.-техн. конф. молодых специалистов (г. Екатеринбург, 8–10 апреля 2015). Екатеринбург, 2015. Ч. 1. С. 219–229.
10. Ватутин М. А., Ключников А. И. Математическая модель погрешности компенсационного акселерометра // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 4. С. 276–284. doi: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-276-284
11. Скоробогатов В. В. Проблемы разработки широкодиапазонного кварцевого маятникового акселерометра с цифровой обратной связью и пути их решения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 10. С. 17–29.
12. Буянкин М. П., Ватутин М. А., Ключников А. И. Адаптация маятникового акселерометра компенсационного типа к возмущающим факторам космического пространства // Вестник Российского нового университета. Сер.: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2020. № 1. С. 55–59.
13. Ватутин М. А., Ключников А. И., Козлов Д. М. Методика снижения погрешности автоколебательного акселерометра // Вестник Российского нового университета. Сер.: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2022. № 4. С. 22–32.
14. Ватутин М. А., Ключников А. И. Методика повышения стабильности работы нелинейного звена с запаздыванием для автоколебательного акселерометра // Труды МАИ. 2022. № 127. doi: 10.34759/trd-2022-127-22

15. Ватутин М. А., Ключников А. И., Петров Д. Г., Сударь Ю. М. Методика схемотехнического построения интегрирующего маятникового акселерометра // Труды МАИ. 2023. № 128. doi: 10.34759/trd-2023-128-18
16. Арбузов В. П. Измерительные цепи прямого преобразования для емкостных акселерометров и гироскопов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 11. С. 997–1004.
17. Распопов В. Я. Микромеханические приборы : учеб. пособие. М. : Машиностроение, 2007. 400 с.
18. Дворников А. В., Чеховский В. А., Прокопенко Н. Н. [и др.]. Быстродействующие широкополосные операционные усилители на базовом матричном кристалле // Известия вузов. Электроника. 2023. Т. 28, № 1. С. 96–111. doi: 10.24151/1561-5405-2023-28-1-96-111
19. Бормонтов Е. Н., Сухотерин Е. В., Колесников Д. В., Невежин Е. В. Способы стабилизации основных характеристик источника опорного напряжения // Фундаментальные исследования. 2014. № 5, ч. 5. С. 934–938.
20. Основы метрологии и электрические измерения / под ред. Е. М. Душина. Л. : Энергоатомиздат, Ленинградское отд., 1987. 480 с.

References

1. Kovalev I.V., Nurgaleeva Yu.A., Gritsenko S.N., Usachev A.V. On the problem of choosing the structure of an automated aircraft control system. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva = Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev*. 2009;(3):105–110. (In Russ.)
2. Borisova A.Yu., Smal' A.V. Analysis of the development of modern free-form inertial navigation systems. *Inzhenernyy vestnik MGTU im. N.E. Baumana = Engineering Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University*. 2017;(5):50–57. (In Russ.)
3. Trefilov P.M. Comparative analysis of improving the accuracy characteristics of inertial navigation systems. *XIII Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya. VSPU-2019 = XIII All-Russian Meeting on management problems. VSPU-2019*. Moscow, 2019. (In Russ.)
4. Andreev S.V., Il'inykh V.V., Il'inykh O.A. et al. Assessment of the influence of errors of inertial sensors on the accuracy of a strapback inertial navigation system. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz-Antey» = Bulletin of the Almaz-Antey East Kazakhstan Region Concern*. 2018;(2):29–34. (In Russ.)
5. Dubovskoy V.B., Kislenco K.V., Pshenyaniy V.G. Methodology for improving the accuracy of navigation support for spacecraft equipped with highly sensitive accelerometers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie = Proceedings of higher educational institutions. Instrument engineering*. 2018;61(7):590–595. (In Russ.)
6. Volkov V.L. Substantiation of requirements for the parameters of a micromechanical accelerometer. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Reshetnikova = Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Reshetnikov*. 2011;(2). (In Russ.)
7. Luk'yanov V.V., Medvedev V.O., Medvedeva Yu.D. Determination of navigation parameters of a terrestrial mobile object using micromechanical inertial sensors. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern science-intensive technologies*. 2017;(11):40–46. (In Russ.). Available at: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36842> (accessed 14.09.2023).
8. Prokhortsov A.V., Minina O.V. Review of high-precision accelerometers from Russian manufacturers. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Technical sciences*. 2019;(10):301–305. (In Russ.)
9. Klyuchnikov A.I. Evaluation of the temperature error of a micromechanical accelerometer. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika. NPO avtomatiki im. akademika N.A. Semikhatova: VII nauch.-tekhn. konf. molodykh spetsialistov (g. Ekaterinburg, 8–10 aprelya 2015) = Rocket and space technology. NPO of Automation named after Academician N.A. Semikhatov : VII Scientific and Technical Conference of young specialists (Yekaterinburg, 8–10 April 2015)*. Ekaterinburg, 2015;Pt.1:219–229. (In Russ.)
10. Vatuin M.A., Klyuchnikov A.I. Mathematical model of the error of the compensation accelerometer. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie = Proceedings of higher educational institutions. Instrument engineering*. 2023;66(4):276–284. (In Russ.). doi: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-276-284
11. Skorobogatov V.V. Problems of developing a wide-band quartz pendulum accelerometer with digital feedback and ways to solve them. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Technical sciences*. 2016;(10):17–29. (In Russ.)
12. Buyankin M.P., Vatuin M.A., Klyuchnikov A.I. Adaptation of a compensation-type pendulum accelerometer to the disturbing factors of outer space. *Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. Ser.: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie = Bulletin of the Russian New University. Ser.: Complex systems: models, analysis and management*. 2020;(1):55–59. (In Russ.)
13. Vatuin M.A., Klyuchnikov A.I., Kozlov D.M. Methodology for reducing the error of the self-oscillatory accelerometer. *Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. Ser.: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie = Bulletin of the Russian New University. Ser.: Complex systems: models, analysis and management*. 2022;(4):22–32. (In Russ.)

14. Vatutin M.A., Klyuchnikov A.I. A technique for increasing the stability of a nonlinear link with a delay for an auto-oscillatory accelerometer. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2022;(127). (In Russ.). doi: 10.34759/trd-2022-127-22
15. Vatutin M.A., Klyuchnikov A.I., Petrov D.G., Sudar' Yu.M. Method of circuit design of an integrating pendulum accelerometer. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2023;(128). (In Russ.). doi: 10.34759/trd-2023-128-18
16. Arbuzov V.P. Measuring direct conversion circuits for capacitive accelerometers and gyroscopes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie = Proceedings of higher educational institutions. Instrument engineering*. 2019;62(11):997–1004. (In Russ.)
17. Raspopov V.Ya. *Mikromekhanicheskie pribory: ucheb. posobie = Micromechanical devices : textbook*. Moscow: Mashinostroenie, 2007:400. (In Russ.)
18. Dvornikov A.V., Chekhovskiy V.A., Prokopenko N.N. et al. High-speed broadband operational amplifiers on a basic matrix crystal. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of higher educational institutions. Electronics*. 2023;28(1):96–111. (In Russ.). doi: 10.24151/1561-5405-2023-28-1-96-111
19. Bormontov E.N., Sukhoterlin E.V., Kolesnikov D.V., Nevezhin E.V. Methods of stabilizing the main characteristics of the reference voltage source. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental research*. 2014;(5),pt.5:934–938. (In Russ.)
20. Dushin E.M. (ed.). *Osnovy metrologii i elektricheskie izmereniya = Fundamentals of metrology and electrical measurements*. Leningrad: Energoatomizdat, Leningradskoe otd., 1987:480. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Алексеевич Ватутин

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры автономных систем управления,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vatutinm@inbox.ru

Mikhail A. Vatutin

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of autonomous control systems,
Mozhaisky Military Space Academy
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg, Russia)

Игорь Александрович Шевкунов

кандидат технических наук, преподаватель кафедры
автономных систем управления,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Igor A. Shevkunov

Candidate of technical sciences,
lecturer of the sub-department
of autonomous control systems,
Mozhaisky Military Space Academy
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 01.02.2025

Поступила после рецензирования / Revised 03.03.2025

Принята к публикации / Accepted 24.03.2025