

Научная статья

УДК 629.7.05

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=182665>

ОБОСНОВАНИЕ СХЕМЫ РЕГУЛИРУЕМОГО ИСТОЧНИКА ТОКА ОБРАТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ АДАПТИВНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Михаил Алексеевич Ватугин¹✉, Антон Викторович Зубков²,

Александр Валерьевич Бутырин³

^{1,2,3}Военно-космическая А им. А.Ф. Можайского,

Санкт-Петербург, Россия

¹vka@mil.ru✉

Аннотация. Проведен анализ возможности применения адаптивных акселерометров.

Представлена схема построения маятникового акселерометра, изменение коэффициента преобразования которого происходит за счет введения в схему регулируемого источника тока обратного преобразователя. Исследовано влияние разброса параметров радиоэлементов, входящих в состав источника тока, на стабильность генерируемого тока. Предложены схемотехнические решения по созданию управляемого источника тока – переключаемого диапазонного и плавно регулируемого.

Ключевые слова: адаптивный акселерометр, бесплатформенная инерциальная навигационная система, автоколебательный режим, обратный преобразователь, источник стабильного тока

Для цитирования: Ватутин М.А., Зубков А.В., Бутырин А.В. Обоснование схемы регулируемого источника тока обратного преобразователя адаптивного акселерометра // Труды МАИ. 2024. № 138. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=182665>

Original article

RATIONALE FOR ADAPTIVE ACCELEROMETER INVERTER ADJUSTABLE CURRENT SOURCE SCHEME

Mikhail A. Vatutin¹, **Anton V. Zubkov²**, **Alexander V. Butyrin³**

^{1,2,3}Military space Academy named after A.F.Mozhaisky,

Saint Petersburg, Russia

¹vka@mil.ru

Abstract. The article describes a method allowing changing the conversion factor of a pendulum accelerometer, operating in the self-oscillating mode, due to application of the developed circuit of the controlled current source of the reverse converter for the accelerometer parameters adjusting to the perturbing factors.

Solving the problem of the perturbing factors and disturbances generated by them is possible by adjusting characteristics of the inertial sensors to minimize errors, i.e. adapting the sensors characteristics, which will allow forming optimal characteristics at the given flight mode by the parametric identification of the perturbing factors, ensuring accuracy of the navigation problem solution.

The proposed rationale of the controlled current source circuit is based on the provisions of State Standard R 8.673-2009 “Smart sensors and smart measuring systems. Basic terms and definitions”. The initial data are parameters of the compensation circuits in the pendulum accelerometer, information on the stability of the employed radio elements, as well as the error models of the converter.

The authors propose applying an electrically controlled electronic current source in a reverse converter of a pendulum accelerometer operating in self-oscillating mode, which allows implementing both discrete switching of the current value and its smooth change.

Application of the adjustable current source allows adjusting the self-oscillating accelerometer to the specified measurement ranges required in various modes, and ensure the ability to adjust smoothly the current value, necessary to implement the accelerometer adaptability function.

The rationale considered in the article includes the development of an electrical circuit of a controlled electronic current source and its stability assessment.

The proposed rationale for the controlled current source scheme may be employed by the specialists while design and manufacture of adaptive accelerometers.

Keywords: adaptive accelerometer, strapdown inertial navigation system, self-oscillating mode, reverse converter, stable current

For citation: Vatutin M.A., Zubkov A.V., Butyrin A.V. Rationale for Adaptive Accelerometer Inverter Adjustable Current Source Scheme. *Trudy MAI*, 2024, no. 138. URL:

<https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=182665>

Введение

Современные тенденции построения навигационных комплексов ракет-носителей (РН) ведут к применению бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) в их составе [1,2]. Однако применение БИНС в составе навигационных комплексов РН осложняется тем фактом, что ее чувствительные элементы, в состав которых входят акселерометры [3] и датчики угловых скоростей (ДУС), находится в сложных динамических условиях – высоких вибрациях, амплитуды и частоты которых меняются на различных этапах полета РН, высоких перегрузках и изгибных колебаний конструкций. Данные условия, равно как и порождаемые ими возмущения, не являются стационарными. По этой причине описать их заранее математическими выражениями и учесть в модели ошибок приборов заранее невозможно.

Решить проблему влияния возмущающих факторов и порождаемых ими возмущений возможно путем подстройки характеристик инерциальных датчиков с целью минимизации погрешностей, то есть адаптацией характеристик датчиков [4], которые посредством параметрической идентификации [5] возмущающих факторов позволят формировать оптимальные характеристики в данном режиме полета РН, обеспечивая точность решения навигационной задачи БИНС [6, 7, 8].

В работе предлагается изменять коэффициент преобразования маятникового акселерометра [9], функционирующего в автоколебательном режиме, за счет применения разработанной схемы регулируемого источника тока обратного

преобразователя с целью подстройки параметров акселерометра под возмущающие факторы, возникающие в процессе полета.

Постановка задачи

Важной характеристикой акселерометра является стабильность его коэффициента преобразования. В работах [10-12] показано, что при охвате акселерометра отрицательной обратной связью при помощи обратного преобразователя, реализующего компенсационный метод измерения, происходит снижение погрешности и повышение стабильности только тех усилительно-преобразовательных элементов, которые находятся в прямой цепи преобразования. Это утверждение следует из следующего выражения [11]:

$$\delta_{\Phi(p)} = \frac{1}{(1 + W_1^*(p)W_{OC}(p))} \delta_{W_1^*(p)} - \delta_{W_{OC}(p)}, \quad (1)$$

где $\delta_{\Phi(p)}$, $\delta_{W_1^*(p)}$ и $\delta_{W_{OC}(p)}$ – относительные изменения передаточных функций всего акселерометра, прямой цепи преобразования и цепи обратной связи соответственно; $W_1^*(p)$ и $W_{OC}(p)$ – передаточные функции прямой цепи преобразования и цепи обратной связи соответственно.

По этой причине, с целью повышения стабильности характеристик акселерометра и снижения ошибки его преобразования, подстройку параметров акселерометра под возмущающие воздействия необходимо осуществлять именно в цепи обратного преобразователя [13,14].

В общем виде замкнутая система показана на рис. 1 [12]:

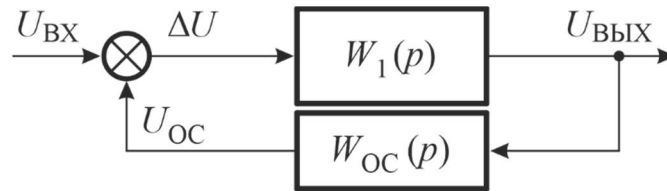


Рис. 1. Общий вид замкнутой системы

где $U_{ВХ}$, $U_{ВЫХ}$, $U_{ОС}$ и ΔU – напряжение входное, выходное, обратной связи и напряжение ошибки, соответственно. Передаточная функция замкнутой системы определяется выражением:

$$\Phi(p) = \frac{W_1(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_{ОС}(p)} \quad (2)$$

где $W_1(p)$ – передаточная функция прямой цепи преобразования, $W_{ОС}(p)$ – передаточная функция цепи обратной связи.

Одним из наиболее важных статических параметров акселерометра является его коэффициент преобразования $k_{ПР}$:

$$k_{ПР} = \frac{k_1}{1 + k_1 \cdot k_{ОС}}, \quad (3)$$

значение которого для приобретения акселерометром свойств адаптивности необходимо регулировать.

В общем виде аппаратный способ автоматической регулировки коэффициента преобразования акселерометра осуществляется путем введения в его структурную схему регулирующего устройства Р (рис. 2) и осуществление в нем регулирования уровня сигнала с коэффициентом k_p , под воздействием управляющего сигнала $U_{пр}$.

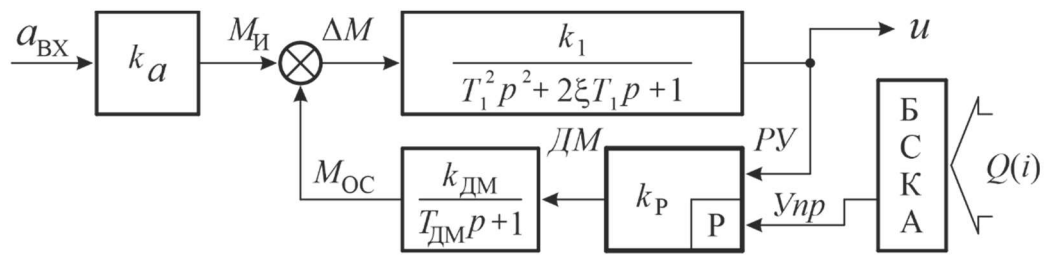


Рис. 2. Структурная схема акселерометра с регулирующим элементом Р

На рис. 2 обозначено: $a_{\text{ВХ}}$ – измеряемое ускорение; k_a – коэффициент передачи ЧЭ по ускорению; $M_{\text{И}}$ – момент, обусловленный воздействием измеряемого ускорения; M_{OC} – момент обратной связи; ΔM – разность моментов; $k_1 = k_{\text{ПЧ}} \cdot k_{\text{ДУ}} \cdot k_{\text{У}}$ – произведение коэффициентов передачи, соответственно, подвижной (механической) части акселерометра (ПЧ), датчика угла (ДУ), усилителя (У); $k_{\text{OC}} = k_{\text{ДМ}} \cdot k_{\text{Р}}$ – произведение коэффициентов передачи, соответственно, датчика момента (ДМ) и регулирующего устройства (РУ); $T_1 = T_{\text{ПЧ}} \cdot T_{\text{ДУ}} \cdot T_{\text{У}}$ – произведение постоянных времени, соответственно, ПЧ, ДУ и У; $T_{\text{ДМ}}$ – постоянная времени ДМ; ξ – коэффициент затухания ПЧ акселерометра; u – напряжение на выходе акселерометра; Р – регулятор уровня сигнала; БСКА – блок самоконтроля и адаптации.

Выражение (3), для установившегося режима и с учетом $k_{\text{Р}}$, примет вид:

$$k_{\text{ПР}} = \frac{k_{\text{П}}}{1 + k_1 \cdot (k_{\text{ДМ}} \cdot k_{\text{Р}})} \quad (4)$$

В результате, при изменении коэффициента $k_{\text{Р}}$ осуществляется изменение общего коэффициента передачи $k_{\text{ПР}}$. Информация о необходимости изменения коэффициента передачи $k_{\text{ПР}}$ поступает из блока самоконтроля и адаптации по

изменению параметров $Q(i)$ (см. рис. 2).

Простейший источник тока, предназначенный для питания индуктивной нагрузки датчика момента (ДМ), не обеспечивает высокой точности и стабильности. Высокую точность и стабильность обеспечивают электронные источники тока, построенные на активных радиоэлементах. Кроме того, все более востребованными оказываются электронные усилительно-преобразовательные устройства, которым свойственно изменять параметры в процессе их работы. Это свойство – изменение (регулирование) параметров в зависимости от обстановки – позволяет строить адаптивную датчиковую аппаратуру.

Для построения адаптивного акселерометра его параметры и/или алгоритмы работы необходимо в процессе эксплуатации изменять в зависимости от сигналов, содержащихся в нем преобразователей [15], в частности, путем реализации коммутируемого высокостабильного регулируемого источника тока обратного преобразователя акселерометра [16].

В этой связи необходимо обосновать схемы регулируемого источника тока обратного преобразователя адаптивного акселерометра.

Схема коммутируемого высокостабильного источника тока

Одним из способов повышения чувствительности серийных маятниковых акселерометров является организация автоколебательного режима его работы путем введения в его схему нелинейного звена (НЗ) [17, 18]. Для создания автоколебательного режима работы акселерометра полярность источника опорного тока (ИОТ) I_0 ДМ необходимо изменять на противоположную с частотой

автоколебаний, который обеспечивается переключателем тока (ПТ) (рис. 3).

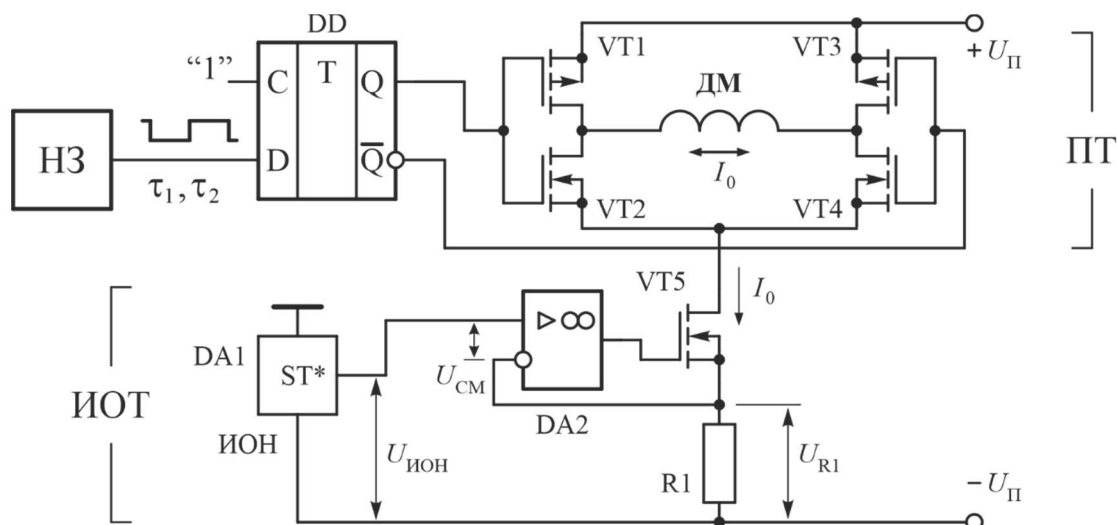


Рис. 3. Схема источника опорного тока и переключателя тока

Такое схемотехническое решение построения переключателя тока позволяет применить одиночный источник тока, построенный на источнике опорного напряжения (ИОН) $DA1$, операционном усилителе (ОУ) $DA2$, МДП-транзисторе $VT5$ и резисторе $R1$, что снижает суммарную погрешность выставки значения тока, и эффективно осуществлять смену полярности тока I_0 .

Описание математической модели отклонения опорного тока

Значение тока источника опорного тока (ИОТ) I_0 является функцией следующих величин: напряжения источника опорного напряжения $U_{ИОН}$, напряжения смещения $U_{СМ}$, значения сопротивления резистора $R1$ (см. рис. 3) и определяется следующим выражением:

$$I_0 = \frac{U_{ИОН} + U_{СМ}}{R1}. \quad (5)$$

Влияние нестабильности параметров каждого из элементов системы на

суммарную нестабильность определяется следующим выражением:

$$\Delta(y) = \frac{\partial F}{\partial x_1} \Delta(x_1) + \frac{\partial F}{\partial x_2} \Delta(x_2) + \dots + \frac{\partial F}{\partial x_n} \Delta(x_n) \quad (6)$$

Тогда для источника тока, изображенного на рис. 1, значение отклонения величины опорного тока $\Delta(I_0)$ при дрейфах сопротивления резистора $\Delta(R1)$, напряжения ИОН $\Delta(U_{\text{ИОН}})$ и напряжения смещения ОУ $\Delta(U_{\text{СМ}})$ определяется следующим выражением:

$$\Delta(I_0) = \frac{\partial F}{\partial R1} \Delta(R1) + \frac{\partial F}{\partial U_{\text{ИОН}}} \Delta(U_{\text{ИОН}}) + \frac{\partial F}{\partial U_{\text{СМ}}} \Delta(U_{\text{СМ}}). \quad (7)$$

Окончательно получаем математическую модель отклонения опорного тока:

$$\begin{aligned} \Delta(I_0) &= \frac{1}{R1^2} (U_{\text{ИОН}} + U_{\text{СМ}}) \Delta(R1) + \frac{1}{R1} \Delta(U_{\text{ИОН}}) + \frac{1}{R1} \Delta(U_{\text{СМ}}) = \\ &= \frac{1}{R1} \left[(U_{\text{ИОН}} + U_{\text{СМ}}) \cdot \frac{\Delta(R1)}{R1} + \Delta(U_{\text{ИОН}}) + \Delta(U_{\text{СМ}}) \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Анализ выражения (8) показывает, что для снижения значения $\Delta(I_0)$ необходимо выбирать радиоэлементы с минимальными дрейфами параметров и, по возможности, схема должна быть с высоким значением сопротивления резистора $R1$.

Для решения поставленной задачи проведен анализ параметров современных радиоэлементов, в ходе которого выбраны радиоэлементы с параметрами, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Радиоэлементы с минимальными дрейфами параметров

Элемент	Тип	Параметр	Стабильность, ppm
Резистор металлофольговый	ММУ	ΔR , Ом	$\pm 1,0$
Стабилитрон (ИОН)	2С120Б	$\Delta U_{\text{ст}}$, В	$\pm 5,0$

Операционный усилитель	544УД12	$\Delta U_{CM}, В$	0,6
------------------------	---------	--------------------	-----

Оценивание стабильности параметров разработанного источника тока

Анализ параметров радиоэлементов и выражения (8) показывает, что абсолютным значением напряжения смещения ОУ можно пренебречь, т.к. $U_{CM} \ll U_{ИОН}$. Таким образом, выражение (8) принимает вид:

$$\Delta(I_0) = \frac{1}{R1} \left[U_{ИОН} \cdot \frac{\Delta(R1)}{R1} + \Delta(U_{ИОН}) + \Delta(U_{CM}) \right]. \quad (9)$$

Подставляя значения параметров радиоэлементов из табл. 1 в выражение (9), получим величину отклонения опорного тока:

$$\Delta(I_0) = \frac{1}{1,225 \cdot 10^3} \left[(1,225 + 5,0 + 0,6) \cdot 10^{-6} \right] = 5,57 \cdot 10^{-9} \text{ [A/}^\circ\text{C]}. \quad (10)$$

Из анализа выражения (9) и параметров табл. 1 очевидно, что наибольшее влияние на $\Delta(I_0)$ оказывает стабильность ИОН – $\Delta(U_{ИОН})$. Для снижения $\Delta(I_0)$ необходимо применять стабилитроны или ИОН в виде интегральных схем с термостатированием [19, 20], т.к. они имеют наименьшие значения нестабильности.

Отклонение величины опорного тока $\Delta(I_0)$ в соответствии с выражением (9) имеет зависимость от абсолютной величины стабилизируемого тока I_0 . Для различных акселерометров ток обратной связи лежим в пределах единиц-десятков миллиампер, что определяет абсолютное значение сопротивления резистора $R1$. Для получения минимального значения отклонения величины тока $\Delta(I_0)$ значение сопротивления резистора $R1$ необходимо выбирать наибольшее из возможного. Это входит в

противоречие с выставкой необходимого значения тока I_0 , так как ИОН имеет фиксированное значение (в рассматриваемом случае $U_{\text{ИОН}} = 1,225 \text{ В}$).

Схмотехническое решение по реализации адаптивного акселерометра

В адаптивном акселерометре изменение параметров может осуществляться как изменение значения стабилизируемого тока I_0 . Изменение параметров источника тока условно можно реализовать с помощью следующих инструментов:

- диапазонный переключатель значения тока I_0 (ДПТ);
- плавный регулятор значения тока I_0 (ПРТ).

Диапазонный переключатель предназначается для дискретного переключения значения тока I_0 в заданных пределах. Предлагаемая схема применения диапазонного переключателя тока в составе ИОТ адаптивного акселерометра показана на рис. 4.

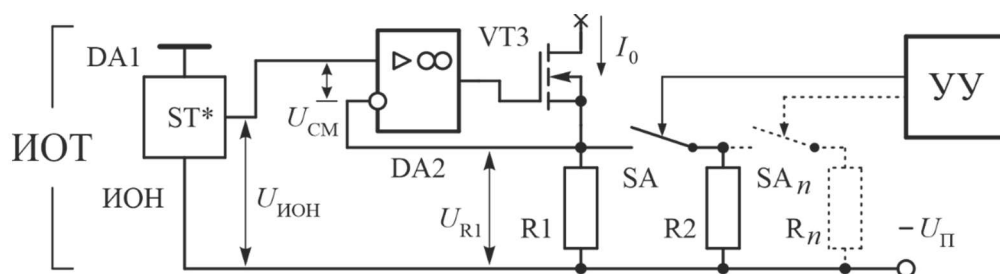


Рис. 4. Схема применения диапазонного переключателя тока в составе ИОТ адаптивного акселерометра

Переключение диапазона происходит замыканием электронного ключа SA и снижением значения сопротивления в цепи истока транзистора $VT3$ до значения:

$$R^* = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2}. \quad (8)$$

Подбором значений сопротивлений $R1$ и $R2$ осуществляется выбор и установка

значения i_1 и i_2 тока I_0 . Для увеличения числа диапазонов переключения необходимо использовать n ключей SA_n и n резисторов R_n .

Плавный регулятор позволяет с малым шагом дискретности изменять значения тока I_0 . Предлагаемая схема применения плавного регулятора тока в составе ИОТ адаптивного акселерометра показана на рис. 5.

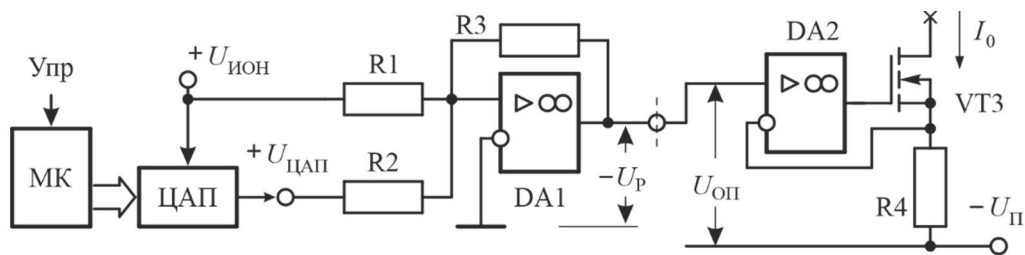


Рис. 5. Схема применения плавного регулятора тока в составе ИОТ адаптивного акселерометра

Регулирующий сигнал формируется цифроаналоговым преобразователем ЦАП. Непосредственно источник стабильного тока I_0 выполнен на ОУ $DA2$, МДП-транзисторе $VT3$ и резисторе $R4$.

Значение тока I_0 определяется значением опорного напряжения $U_{ОП}$:

$$I_0 = \frac{U_{ОП}}{R4} = \frac{|-U_{П}| - |-U_{Р}|}{R4}. \quad (9)$$

Регулирующее напряжение $U_{Р}$ формируется в сумматоре, выполненном на ОУ $DA2$ как сумма опорного напряжения $U_{ИОН}$ (с коэффициентом $R3/R1$) и выходного напряжения ЦАП $U_{ЦАП}$ (с коэффициентом $R3/R2$):

$$-U_{Р} = U_{ИОН} (R3/R1) + U_{ЦАП} (R3/R2). \quad (10)$$

Напряжение $U_{\text{ЦАП}}$ формируется сигналами из микроконтроллера МК под воздействием управляющего сигнала Упр:

$$U_{\text{ЦАП}} = D_{\text{ЦАП}} \cdot U_{\text{ИОН}}, \quad (11)$$

где $D_{\text{ЦАП}}$ – коэффициент преобразования ЦАП. Диапазон регулирования и шаг дискретности определяется соответствующим выбором разрядности ЦАП, значением напряжения $U_{\text{ИОН}}$ и значением сопротивления резисторов $R1-R3$.

Необходимо отметить, что погрешность установки тока I_0 , при этом увеличивается, а стабильность его значения снижается.

По этой причине наиболее эффективно совместное применение диапазонного переключателя тока и плавного регулятора тока. В этом случае, по абсолютному значению измеряемого ускорения при помощи ДПТ будет выбираться диапазон измерения, а по сигналам, содержащимся в акселерометре преобразователей, при помощи ПРТ будет устанавливаться точное значение коэффициента преобразования.

Заключение

Применение адаптивных датчиков, которые посредством параметрической идентификации возмущающих факторов позволяют подбирать оптимальные характеристики датчика в конкретном режиме полета РН позволяет парировать влияние возмущающих факторов полета РН. Примером такого решения является применение адаптивного маятникового акселерометра с регулируемым источником тока обратного преобразователя.

Маятниковые акселерометры компенсационного типа имеют относительно

малые массогабаритные параметры, достаточно высокую точность и стабильность, но в то же время не так дороги в производстве и эксплуатации по сравнению с гироскопическими приборами, что делает их экономически эффективными при использовании в БИНС РН.

Предложенные схемы построения регулируемого источника тока обратного преобразователя автоколебательного акселерометра позволяют реализовать источник стабильного тока на несколько диапазонов с плавной регулировкой, который позволяет построить адаптивный акселерометр.

Список источников

1. Ватутин М.А., Ключников А.И., Фоминов И.В. Анализ особенностей применения бесплатформенных инерциальных навигационных систем в ракетах космического назначения легкого класса // IV Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники» (Санкт-Петербург, 13-14 декабря 2018): сборник трудов. – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2018. С. 23–28.
2. Ключников В.Ю. Ракеты-носители сверхлегкого класса: ниша на рынке пусковых услуг и перспективные проекты // Воздушно-космическая сфера. 2019. № 3. С. 58-71.
3. Прохорцов А.В., Минина О.В. Обзор высокоточных акселерометров Российских производителей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 10. С. 301–305.
4. Голяков А.Д., Ричняк А.М., Фоминов И.В. Исследование точности навигационных

- параметров космического аппарата с адаптивной системой автономной навигации // Труды МАИ. 2022. № 126. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=169009>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-23](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-23)
5. Дилигенская А.Н. Идентификация объектов управления. - Самара: Самарский государственный технический университет, 2009. - 136 с.
 6. Миронов В.И., Фоминов И.В., Малетин А.Н. Метод автономной косвенной идентификации коэффициента преобразования маятникового компенсационного акселерометра в условиях орбитального полета космического аппарата // Труды СПИИРАН. 2015. № 3 (40). С. 93–109.
 7. Пелевин А.Е. Идентификация параметров модели объекта в условиях внешних возмущений // Гироскопия и навигация. 2014. № 4 (87). С. 111–120.
 8. You J., Wang J., Li C., Wu H., Fu Z. Parameter identification and perturbation algorithm of parallel type six-axis accelerometer // Journal of Vibration and Shock, 2019, vol. 38, no. 1, pp. 134–141. DOI: [10.13465/j.cnki.jvs.2019.01.020](https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2019.01.020)
 9. Ватутин М.А., Ключников А.И., Петров Д.Г., Сударь Ю.М. Методика схемотехнического построения интегрирующего маятникового акселерометра // Труды МАИ. 2023. № 128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=171406>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-18](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-18)
 10. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975. – 768 с.
 11. Ватутин М.А., Ключников А.И. Математическая модель погрешности компенсационного акселерометра // Известия вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66. №

4. С. 276–284.

12. Ватутин М.А., Кузьмичев Ю.А., Буянкин М.П. Влияние параметров микромеханического акселерометра на стабильность его передаточной функции // Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы создания и применения малых космических аппаратов и робототехнических средств в интересах Вооруженных Сил Российской Федерации» (Санкт-Петербург, 12–13 апреля 2016): сборник трудов. – СПб.: ВКА им. А.Ф.Можайского. 2016. Т. 3. С. 153–157.

13. Аман Е.А. Модели и методики управления результативностью создания автоколебательных микромеханических акселерометров: дисс. канд. техн. наук. – СПб. ГУАП, – 2019.

14. Ватутин М.А., Буянкин М.П., Ключников А.И. Адаптация маятникового акселерометра компенсационного типа к возмущающим факторам космического пространства // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2020. № 1. С. 55–59.

15. ГОСТ Р 8.673-2009. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения. - М.: Стандартинформ, 2019.

16. Пушкарев М.А. Интегральные источники опорного напряжения // Компоненты и технологии. 2007. № 6. С. 71–76.

17. Лучко С.В., Ватутин М.А. Компенсационный акселерометр в режиме автоколебаний // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2005. Т. 48. № 6. С. 62–70.

18. Ватутин М.А., Ключников А.И. Методика повышения стабильности работы

нелинейного звена с запаздыванием для автоколебательного акселерометра // Труды МАИ. 2022. № 127. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=170355>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-22](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-22)

19. Ермаков П.Г., Гоголев А.А. Сравнительный анализ схем комплексирования информации бесплатформенных инерциальных навигационных систем беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2021. № 117. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=156253>. DOI: [10.34759/trd-2021-117-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-11)

20. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.

References

1. Vatutin M.A., Klyuchnikov A.I., Fominov I.V. *IV Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Sovremennye problemy sozdaniya i ekspluatatsii vooruzheniya, voennoi i spetsial'noi tekhniki»*: sbornik trudov. Saint Petersburg, VKA imeni A.F.Mozhaiskogo, 2018, pp. 23–28.

2. Klyushnikov V.Yu. *Vozdushno-kosmicheskaya sfera*, 2019, no. 3, pp. 58-71.

3. Prokhortsov A.V., Minina O.V. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2019, no. 10, pp. 301–305.

4. Golyakov A.D., Richnyak A.M., Fominov I.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 126. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=169009>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-23](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-23)

5. Diligenskaya A.N. *Identifikatsiya ob"ektov upravleniya* (Identification of control objects), Samara, Samarskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2009, 136 p.

6. Mironov V.I., Fominov I.V., Maletin A.N. *Trudy SPIIRAN*, 2015, no. 3 (40), pp. 93–109.

7. Pelevin A.E. *Girokopiya i navigatsiya*, 2014, no. 4 (87), pp. 111–120.
8. You J., Wang J., Li C., Wu H., Fu Z. Parameter identification and perturbation algorithm of parallel type six-axis accelerometer, *Journal of Vibration and Shock*, 2019, vol. 38, no. 1, pp. 134–141. DOI: [10.13465/j.cnki.jvs.2019.01.020](https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2019.01.020)
9. Vatutin M.A., Klyuchnikov A.I., Petrov D.G., Sudar' Yu.M. *Trudy MAI*, 2023, no. 128. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=171406>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-18](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-18)
10. Besekerskii V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* (Theory of automatic control systems), Moscow, Nauka, 1975, 768 p.
11. Vatutin M.A., Klyuchnikov A.I. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, 2023, vol. 66, no 4, pp. 276–284.
12. Vatutin M.A., Kuz'michev Yu.A., Buyankin M.P. *Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Problemy sozdaniya i primeneniya malykh kosmicheskikh apparatov i robototekhnicheskikh sredstv v interesakh Vooruzhennykh Sil Rossiiskoi Federatsii»*: sbornik trudov. Saint Petersburg, VKA im. A.F.Mozhaiskogo, 2016, vol. 3, pp. 153–157.
13. Aman E.A. *Modeli i metodiki upravleniya rezul'tativnost'yu sozdaniya avtokolebatel'nykh mikromekhanicheskikh akselerometrov* (Models and methods for managing the effectiveness of creating self-oscillating micromechanical accelerometers), Saint Petersburg, GUAP, 2019.
14. Vatutin M.A., Buyankin M.P., Klyuchnikov A.I. *Vestnik Rossiiskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie*, 2020, no. 1, pp. 55–59.
15. *GOST R 8.673-2009. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenii (GSI). Datchiki intellektual'nye i sistemy izmeritel'nye intellektual'nye. Osnovnye terminy i*

opredeleniya (State system for ensuring the uniformity of measurements (GSI). Intelligent sensors and intelligent measuring systems. Basic terms and definitions), Moscow, Standartinform, 2019.

16. Pushkarev M.A. *Komponenty i tekhnologii*, 2007, no. 6, pp. 71–76.

17. Luchko S.V., Vatutin M.A. *Izvestiya VUZov. Priborostroenie*, 2005, vol .48, no. 6, pp. 62–70.

18. Vatutin M.A., Klyuchnikov A.I. *Trudy MAI*, 2022, no. 127. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=170355>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-22](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-22)

19. Ermakov P.G., Gogolev A.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 117. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=156253>. DOI: [10.34759/trd-2021-117-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-11)

20. Raspopov V.Ya. *Mikromekhanicheskie pribory* (Micromechanical devices), Moscow, Mashinostroenie, 2007, 400 p.

Статья поступила в редакцию 01.07.2024

Одобрена после рецензирования 04.07.2024

Принята к публикации 25.10.2024

The article was submitted on 01.07.2024; approved after reviewing on 04.07.2024; accepted for publication on 25.10.2024