

Научная статья

УДК

DOI: [10.34759/trd-2023-128-18](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-18)

МЕТОДИКА СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕГРИРУЮЩЕГО МАЯТНИКОВОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Михаил Алексеевич Ватутин¹✉, Алексей Игоревич Ключников²,

Даниил Григорьевич Петров³, Юрий Михайлович Сударь⁴

^{1,2,3,4}Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Санкт-Петербург, Россия

¹yka@mil.ru✉

Аннотация. Рассмотрена необходимость применения интегрирующего акселерометра для получения навигационных параметров и математические основы их построения. Рассмотрена схемотехника построения существующих интегрирующих акселерометров и существующие принципы преобразования сигнала ускорения в дискретный сигнал и цифровой код. Проведены исследования по возможности схемотехнической реализации аппаратно-алгоритмического способа получения кажущейся скорости и разработке схемотехники интегрирующего МЭМС-акселерометра. Предложено схемотехническое решение преобразования сигнала измеряемого ускорения во временной интервал и получения информации о кажущейся скорости в виде временного интервала. Даны рекомендации по дальнейшему совершенствованию схемотехники интегрирующего акселерометра, предназначенных для снижения энергопотребления.

Ключевые слова: акселерометр, интегрирующий акселерометр, кажущаяся скорость, генератор линейно изменяющегося напряжения, токовое зеркало, преобразователь напряжение-ток

Для цитирования: 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](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-18)

Original article

CIRCUIT DESIGN METHODOLOGY FOR AN INTEGRATING PENDULUM ACCELEROMETER

Mikhail A. Vatutin¹, **Alexey I. Klyuchnikov²**, **Daniil G. Petrov³**, **Yuri M. Sudar⁴**

^{1,2,3,4}Military space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Saint Petersburg, Russia

¹vka@mil.ru

Abstract. The task of navigation consists in determining the true parameters of the of the aircraft center of mass motion and allows determining such navigation parameters as the linear coordinates of the place, as well as the magnitude and direction of the flight velocity vector in the selected coordinate system. The acceleration value being obtained from the accelerometer must be integrated twice to determine the linear coordinate. The pendulum positional accelerometer is convenient to be employed for the integrating mode of its operation. It is convenient to employ in the available accelerometer the measured acceleration integrating mode rather than the measuring mode itself for obtaining the first integral of the apparent acceleration being measured. For this purpose, an integrating

capacitor with signal conversion circuits and periodic reset of the accumulated voltage is usually included in the feedback circuit.

The article considers schematic solutions in the electrical circuit of the signal conversion device of a positional pendulum accelerometer for obtaining an integrating mode of its operation. The converting device circuit is based on the self-oscillating ramp generator with controlled input, which consist of two basic parts, namely integrator and Shmitt trigger. The output signal of the ramp generator is a time interval. Accelerometer connection to the ramp generator allows forming on its output a signal in the form of relative time interval change proportional to the apparent acceleration integral, i.e. the apparent velocity.

Characteristics analysis of the accelerometers applied in the state-of-the-art technology reveals that at maximum input exposure, the current value of the torque sensor takes values in the tens of milliamps, depending on the specific type of accelerometer and the measurement range. For the electronic circuit of the integrating accelerometer with ramp generator, this means that the operational amplifiers of the ramp generator, actually consume currents of tens of milliamps throughout the time to ensure the circuit operation. The article considered schematic solutions for ramp generator connecting the accelerometer, which significantly reduce the current consumed by the ramp generator while operation, namely buffer amplifier; electronic current divider, and connection via a current sensor.

A technique for schematic design of the integrating pendulum accelerometer has been developed.

Keywords: accelerometer, integrating accelerometer, apparent velocity, ramp function generator, current mirror, voltage-current converter

For citation: Vatutin M.A., Klyuchnikov A.I., Petrov D.G., Sudar Yu.M. Circuit design methodology for an integrating pendulum accelerometer. *Trudy MAI*, 2023, no. 128. DOI: [10.34759/trd-2023-128-18](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-18)

Введение

Для осуществления управляемого полета в околоземном космическом пространстве на борту летательного аппарата необходимо иметь, в частности, навигационные системы, позволяющие решить задачу навигации. Задача навигации заключается в определении истинных параметров движения центра масс (ЦМ) летательного аппарата (ЛА) и позволяет определять такие навигационные параметры, как линейные координаты места, величину и направление вектора скорости полета в избранной системе координат [1]. Эта навигационная информация позволяет осуществить движение летательного аппарата по заданной траектории.

Среди навигационных систем, служащих для получения навигационной информации о движении объектов важное место занимают инерциальные системы [2,3,4]. Датчиками первичной информации (ДПИ), применяемых в инерциальных системах ЛА, являются акселерометры [5,6].

В процессе полета ЛА акселерометр измеряет кажущееся ускорение, которое для получения искомого для решения навигационной задачи линейных координат, необходимо дважды интегрировать [2]. Интегрирование кажущегося ускорения

можно осуществить тремя способами: аппаратным, алгоритмическим и аппаратно-алгоритмическим.

Первый из способов применялся на первых этапах развития космонавтики, в те времена, когда системы управления (СУ) ЛА были аналоговыми.

Второй способ стали применять с развитием цифровых технологий и внедрением бортовых цифровых управляющих машин (БЦВМ) в СУ ЛА. Интегрирование, а особенно – повторное интегрирование, накладывает жесткие требования к точностным параметрам, как применяемых акселерометров, так и самих интеграторов, так как любая ошибка, инструментальная или методическая, вызванная погрешностью ДПИ или его дрейфом, ведет к нарастанию ошибки на выходе.

Третий способ – аппаратно-алгоритмическое интегрирование – позволяет одно интегрирование осуществить аппаратным способом и, тем самым, снизить инструментальную ошибку аналогового интегратора, а второе интегрирование осуществить алгоритмическим способом, что позволяет несколько снизить загруженность БЦВМ. В сумме – повышается точность измерения и снижаются массогабаритные параметры устройств, необходимых для двойного интегрирования.

Для получения первого интеграла измеряемого кажущегося ускорения удобно в имеющемся акселерометре использовать не сам режим измерения, а режим интегрирования измеряемого ускорения. Таким образом работает гироскопический интегратор линейного ускорения (ГИЛУ) и маятниковый акселерометр в интегрирующем режиме работы [2,4].

Существует большое число типов акселерометров, различных по принципу работы, массе, габаритам, энергопотреблению и др. [4,7]. Это разнообразие связано с множеством решаемых задач, отличающихся по качеству предоставляемой первичной навигационной информации [8,9]. Как правило, ДПИ обладающие наилучшей точностью и стабильностью работы также имеют и достаточно большую массу и значительные габариты, энергопотребление и стоимость их производства. Меры, предпринимаемые для снижения этих параметров, как правило приводят к ухудшению точностных параметров акселерометров. К первой из указанных групп можно отнести гироскопические приборы с газовым подвесом. Ко второй – микроэлектромеханические системы (МЭМС) и МЭМС-акселерометры.

Маятниковые акселерометры компенсационного типа по своим эксплуатационным параметрам занимают некоторое промежуточное положение между гироскопическими приборами и МЭМС [10-13]. Эти акселерометры имеют малые массогабаритные параметры, достаточно высокую точность и стабильность, но в то же время не так дороги в производстве и эксплуатации. По этой причине маятниковые акселерометры компенсационного типа получили широкое применение в технике.

Маятниковый позиционный акселерометр удобно использовать для интегрирующего режима его работы. Тем самым, совмещается режим получения входной информации и его интегрирования, что позволяет снизить общую инструментальную ошибку интегрирования.

Постановка задачи по разработке схемотехнических решений построения интегрирующего маятникового акселерометра

На выходе позиционного маятникового акселерометра присутствует значение кажущегося ускорения $W_K(t)$ [2]. Тогда кажущаяся скорость $V_K(t)$ на интервале времени от 0 до t с учётом начальной скорости V_0 равна

$$V_K(t) = V_0 + \int_0^t W_K(t) dt. \quad (1)$$

Второе интегрирование на этом интервале времени с учётом начального пути S_0 даёт нам кажущийся путь $S_K(t)$

$$S_K(t) = S_0 + \int_0^t V_K(t) dt. \quad (2)$$

Выходной сигнал $W_K(t)$, $V_K(t)$ и $S_K(t)$ в реальных устройствах может быть представлен в виде напряжения, тока, числа импульсов, временного интервала и др. Физическая величина представляемого выходного сигнала зависит от конструкции и типа действия применяемого акселерометра.

Типовая упрощённая электрическая схема включения маятникового акселерометра с фотодатчиком угла и магнитоэлектрическим датчиком момента показана на **рис. 1** [2,12].

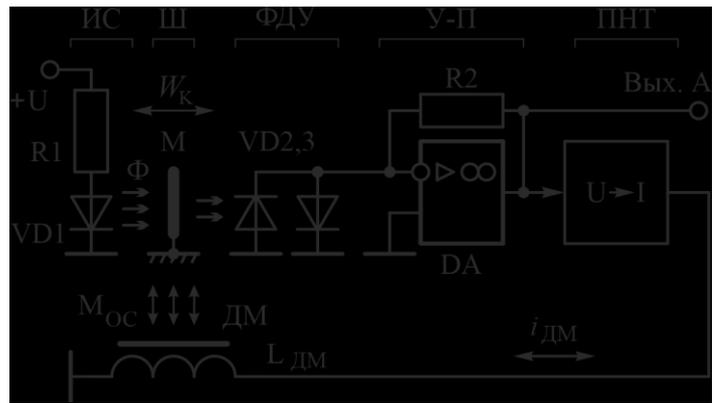


Рис. 1. Электрическая схема подключения маятникового акселерометра

На рисунке приняты следующие обозначения: ИС – источник света; Ш – шторка, механически связанная с подвижной массой акселерометра; ФДУ – фотодатчик; У-П – усилитель-преобразователь фототока фотодатчика в напряжение; ПНТ – преобразователь напряжение-ток; ДМ – датчик момента; Φ – световой поток источника света; М – маятник.

Выходным сигналом акселерометра, пропорциональным значению измеряемого ускорения, является аналоговый ток $i_{\text{ДМ}}$, который протекает по датчику момента ДМ – катушке индуктивности $L_{\text{ДМ}}$ [2]

$$W_{\text{к}} = \frac{k_{\text{ДМ}}}{ml} i_{\text{ДМ}}, \quad (3)$$

где: $k_{\text{ДМ}}$ – коэффициент преобразования ДМ; m – масса чувствительного элемента; l – плечо чувствительного элемента. Как выходной сигнал можно использовать напряжение на выходе ОУ DA (Вых. А). Как видно из рис. 1, левый по схеме вывод датчика момента подключен к нулевому потенциалу схемы.

В [2] рассмотрен интегрирующий режим работы маятникового акселерометра компенсационного типа. Функциональная схема устройства, реализующего этот режим показана на **рис. 2**.

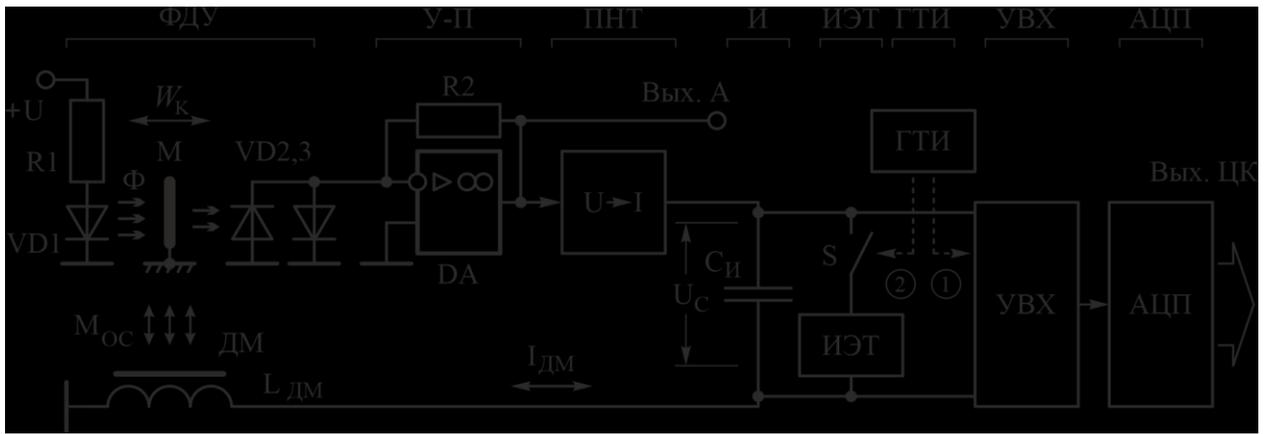


Рис. 2. Электрическая схема интегрирующего маятникового акселерометра

В цепь протекания тока датчика момента $i_{ДМ}$ последовательно с датчиком момента включается конденсатор $C_{И}$. При этом и ток заряда конденсатора i_C будет равен току датчика момента $i_{ДМ}$. Напряжение u_C на конденсаторе $C_{И}$ будет иметь вид

$$u_C(t) = \frac{1}{C_{И}} \int_{t_{T1}}^{t_{T2}} i_C(t) dt, \quad (4)$$

где t_{T1} и t_{T2} – начало и конец интегрирования тока $i_{ДМ}$ на конденсаторе $C_{И}$, определяемые тактовой частотой генератора тактовых импульсов ГТИ, и является интегралом от тока $i_{ДМ}$. Ключ S и источник эталонного тока ИЭТ ведены для регулярного периодического разряда конденсатора $C_{И}$, так как, в противном случае, может возникнуть ситуация, когда напряжение на конденсаторе $C_{И}$ будет стремиться к напряжению, превышающему напряжение питания, что недопустимо. Перед моментом замыкания ключа S и разрядом конденсатора $C_{И}$ (управляющий сигнал 2) значение напряжения на конденсаторе $C_{И}$ записывается в устройство выборки хранения УВХ (управляющий сигнал 1) и в дальнейшем преобразуется аналого-цифровым преобразователем АЦП в цифровой код ЦК.

Недостатками рассмотренного выше схмотехнического построения интегрирующего акселерометра можно считать [2,14,15]:

– необходимость применения относительно мощного двухполярного электронного ключа S , что усложняет саму схему ключа и схему управления ключом и приводит к повышению потребления ими тока;

– необходимость применение двух относительно длительных тактов «1» и «2», необходимых для записи текущего значения на конденсаторе $C_{\text{и}}$ в устройство выборки-хранения («1») и разряде конденсатора («2»), в течение которых информация о измеряемом ускорении пропадает.

Ставим задачу: разработать схмотехнические решения в электрической схеме позиционного маятникового акселерометра с целью получения интегрирующего режима его работы с минимальными потерями времени на режим преобразования и повышенной экономичностью.

Анализ работы генератора линейно изменяющегося напряжения

Сугубо линейный усилительный радиоэлемент – операционный усилитель (ОУ) – также можно применять и в импульсных электронных устройствах. При этом в полной мере используются такие положительные свойства ОУ, как высокий собственный коэффициент усиления и малые дрейфы, которые позволяют получить высокую стабильность работы устройства.

На **рис. 3** показана принципиальная схема генератора линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН) на двух ОУ DA1 и DA2 с входом управления [14,15].

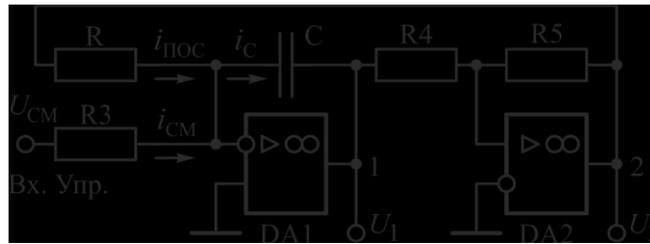


Рис. 3. ГЛИН на ОУ DA1 и DA2 с входом управления «Вх. Упр.»

На рис. 3 обозначено: $i_{\text{ПОС}}$ – ток положительной обратной связи генератора; $i_{\text{СМ}}$ – ток смещения, обеспечивающий управление скважностью генератора.

Автоколебательный ГЛИН состоит из двух основных частей – интегратора на ОУ DA1 и неинвертирующего триггера Шмитта на ОУ DA2. Диаграмма работы ГЛИН на двух ОУ показана на **рис. 4**.

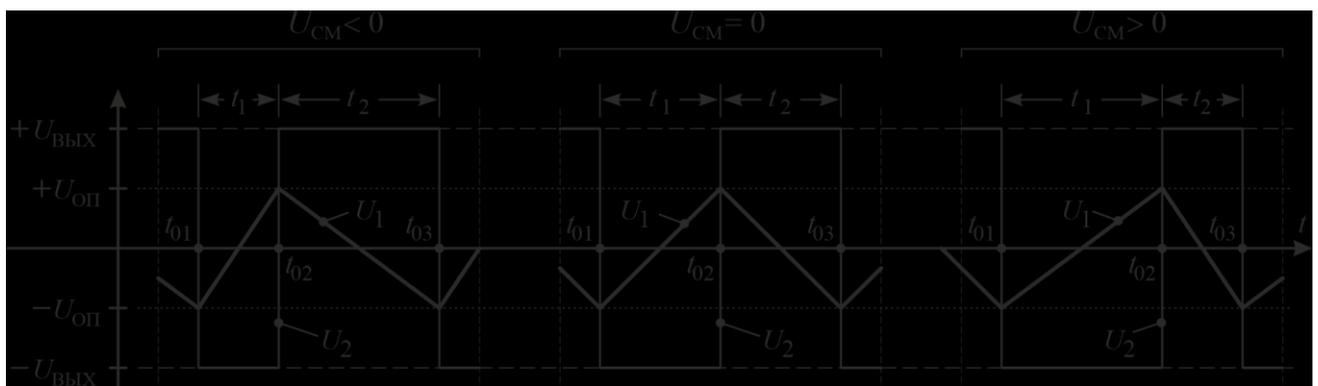


Рис. 4. Диаграмма работы ГЛИН при отсутствии и наличии напряжения смещения $U_{\text{СМ}}$

Период колебаний T разделен на два временных интервала t_1 и t_2 ($T = t_1 + t_2$). Ток заряда конденсатора C равен сумме токов $i_C = i_{\text{ПОС}} + i_{\text{СМ}}$. Ток смещения является случайной величиной, так как это – входной измеряемый сигнал. Ток положительной обратной связи имеет значение $i_{\text{ПОС}} = U_2/R$. Но на интервале времени t_1 ток $i_{\text{ПОС}}$ имеет отрицательную полярность $-i_{\text{ПОС}}$ и интегратор интегрирует из отрицательной полярности напряжения в положительную, а на интервале времени t_2 ток $i_{\text{ПОС}}$ имеет положительную полярность $+i_{\text{ПОС}}$ и интегратор

интегрирует из положительной полярности напряжения в отрицательную. Перезаряд конденсатора происходит на одну и ту же постоянную величину напряжения $2U_{\text{ОП}}$ – в пределах значений от $-U_{\text{ОП}}$ до $+U_{\text{ОП}}$, и наоборот, значение которого определяется как $U_{\text{ОП}} = U_2 \cdot (R_4/R_5)$.

В общем виде выражение для выходного напряжения ГЛИН $U_1 = u_C$

$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int_{t_{01}}^{t_{03}} i_C(t) dt = \frac{1}{C} \left(\int_{t_{01}}^{t_{02}} i_C(t) dt + \int_{t_{02}}^{t_{03}} i_C(t) dt \right) =$$

$$= \frac{1}{C} \left(\int_{t_{01}}^{t_{02}} (i_{\text{ПОС}} + i_{\text{СМ}}(t)) dt + \int_{t_{02}}^{t_{03}} (-i_{\text{ПОС}} + i_{\text{СМ}}(t)) dt \right). \quad (5)$$

Примем, что период колебаний ГЛИН равный $T = t_1 + t_2$ значительно меньше времени изменения тока смещения $i_{\text{СМ}}$: $i_{\text{СМ}} = \text{const}$. Тогда сумма этих токов также будет иметь постоянную величину $i_{\text{ПОС}} + i_{\text{СМ}} = \text{const}$.

Для случая, когда $i_C = \text{const}$, напряжение на конденсаторе С

$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int_{t_{01}}^{t_{03}} i_C(t) dt \Big|_{i_C = \text{const}} = \frac{i_C(t_{03} - t_{01})}{C} \quad (6)$$

Из этого выражения получаем

$$u_C = \frac{i_{\text{СМ}} \cdot T}{C}, \quad \Rightarrow \quad T = \frac{u_C \cdot C}{i_{\text{СМ}}}; \quad t_1 = \frac{u_C \cdot C}{i_{\text{СМ}} - i_{\text{ОС}}}; \quad t_2 = \frac{u_C \cdot C}{i_{\text{СМ}} + i_{\text{ОС}}}; \quad (7)$$

После преобразования выражений (7) относительно тока $i_{\text{СМ}}$ получаем

$$i_{\text{СМ}} = i_{\text{ПОС}} \cdot \frac{(t_2 - t_1)}{T}. \quad (8)$$

Применение генератора линейно изменяющегося напряжения для интегрирования входного сигнала позволяет выполнить процесс интегрирования

входного сигнала непрерывным и исключить из схемы интегрирующего акселерометра мощный двухполярный ключ и устройство выборки хранения, как отдельные электронные элементы. Выходная информация на выходе ГЛИН переведена во временную область и представлена в виде временных интервалов t_1 и t_2 .

Схемотехника интегрирующего акселерометра

Как было отмечено выше, правый по схеме вывод датчика момента подключен к точке нулевого потенциала. Эта особенность позволяет подключить правый вывод катушки датчика момента ко входу ГЛИН (точка «J»), который является точкой виртуального нуля [14,15]. Это означает, что потенциал в точке «J» всегда поддерживается равным нулю, так как неинвертирующий вход ОУ DA2 подключен к общему проводу и потенциал на нем равен нулю (рис. 5).

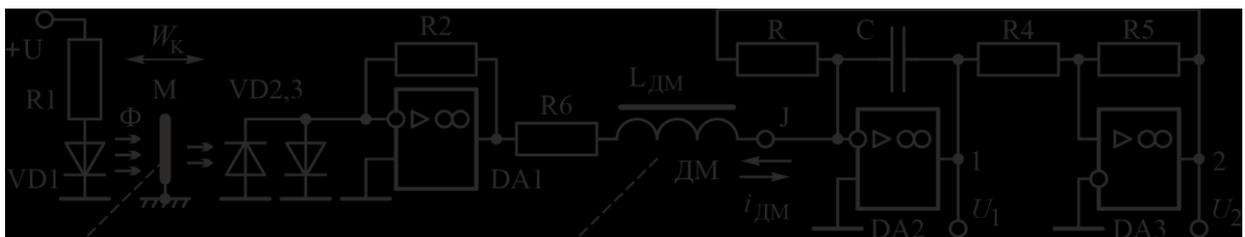


Рис. 5. Схема подключения ДМ акселерометра ко входу смещения ГЛИН (точка «J»)

В результате такого подключения ГЛИН управляется непосредственно током i_{DM} датчика момента акселерометра вместо тока смещения i_{CM} . Подставим в (3) выражение (8) для i -го периода колебаний T_0^i (полагаем $i_{CM} = i_{DM}$)

$$W_K^i(t) = \frac{k_{DM}}{ml} \cdot i_{ПИС} \cdot \frac{(t_1^i - t_2^i)}{T_0^i} \quad (9)$$

Диаграмма работы акселерометра с ГЛИН при наличии входного ускорения показана на **рис. 6**.

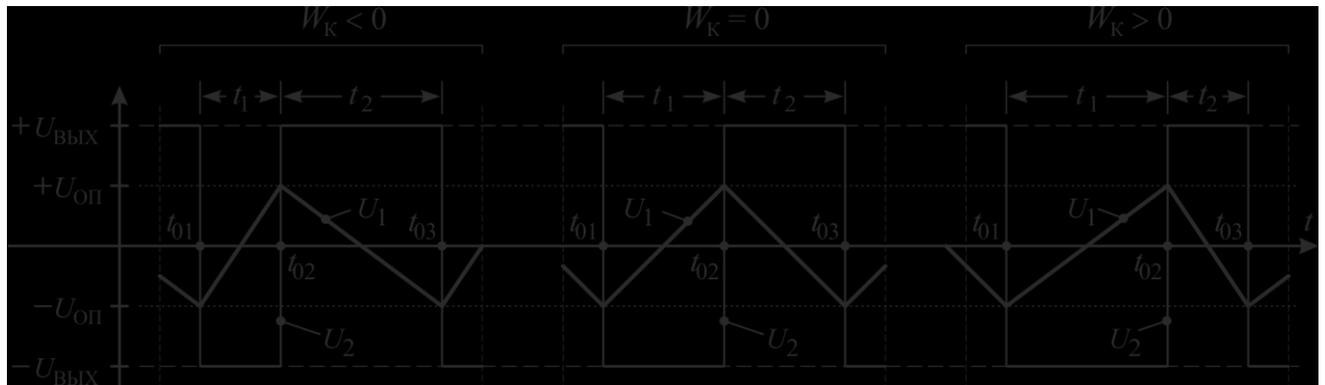


Рис. 6. Диаграмма работы акселерометра с ГЛИН при наличии кажущегося ускорения W_K

В соответствии с выражением (3) и (1) получим для кажущуюся скорости $V_K(t)$ представление

$$V_K(t) = V_0 + \int_0^t W_K(t) dt = V_0 + \int_0^t \frac{k_{\text{ДМ}}}{ml} i_{\text{ДМ}}(t) dt = V_0 + \frac{k_{\text{ДМ}}}{ml} \int_0^t i_{\text{ДМ}}(t) dt. \quad (10)$$

Подставляем выражение (9) в (10), принимаем начальные условия $V_0 = 0$ получим для кажущейся скорости $V_K^i(t)$ на i -м периода колебаний T_0^i

$$V_K^i(t) = \frac{k_{\text{ДМ}}}{ml} \cdot i_{\text{ПОС}} \cdot \frac{(t_1^i - t_2^i)}{T^i} \cdot T^i = \frac{k_{\text{ДМ}}}{ml} \cdot i_{\text{ПОС}} \cdot (t_1^i - t_2^i). \quad (11)$$

Кажущаяся скорость в k -й момент времени будет

$$V_K^k(t) = \sum_{i=1}^k V_K^i(i) = \frac{k_{\text{ДМ}} \cdot i_{\text{ПОС}}}{ml} \sum_{i=1}^k (t_1^i - t_2^i). \quad (12)$$

Оценка величины потребляемого тока акселерометром с ГЛИН

Для работы генератора ЛИН без срыва генерации необходимо, чтобы значение тока смещения было меньше значения тока обратной связи, т.е. необходимо выполнить условие: $i_{см} < i_{пос}$. Типовые значения диапазона измерений и крутизны статической характеристики акселерометров показаны в Таблице 1 [3,4].

Характеристики акселерометров

Таблица 1

Параметры, размерность	Модель (марка) акселерометра			
Акселерометры, выполненные по традиционной технологии				
	ДА-9	ДА-10	ДА-11	АК-5
Диапазон измерений, g	±12	±15	±1÷10	до ±100
Крутизна статической характеристики, мА/g	1,72	1,72	1,28	0,485
Максимальное значение тока ДМ, мА	±20,64	±25,8	±12,8	до ±48,5
Интегральные акселерометры				
	А-15	А-16	А-17	АТ-1104
Диапазон измерений, g	±20	±35	±10	±1÷10
Крутизна статической характеристики, мА/g	1,0–1,4	0,9–1,3	1,0–1,6	1,0
Максимальное значение тока ДМ, мА	±28,0	±45,5	±16,0	±10,0

Анализ характеристик акселерометров, показанных в Таблице 1 показывает, что при максимальном входном воздействии значение тока датчика момента $i_{дм}$ принимает значения в десятки миллиампер (примем – до 50 мА), в зависимости от конкретного типа акселерометра и диапазона измерения. С целью предотвращения срыва генерации ГЛИН, зададим отношение токов $(i_{см}/i_{пос}) \leq 0,8$. Это означает, что значение тока $i_{пос}$ необходимо выбирать $i_{пос} \geq (i_{см}/0,8) = 62,5$ мА. Для электронной схемы акселерометра с ГЛИН это означает, что операционные усилители ГЛИН для обеспечения работы схемы фактически на всем протяжении времени расходуют токи значением в десятки миллиампер [17,18]. Кроме неэкономичного по энергопотреблению построения схемы, такое решение вынуждает применять в

схеме ГЛИН операционные усилители с повышенным выходным током, что резко ограничивает выбор ОУ, и использовать ОУ в режимах близких к максимальным, что снижает надежность работы и повышает тепловую напряженность устройства. Кроме того, при подаче тока смещения непосредственно на вход интегратора ГЛИН, могут возникнуть условия нарушения устойчивости работы генератора (в данной статье эти условия не рассматриваются), что потребует дополнительных затрат на подбор ОУ и коррекции его частотной характеристики [19]. Это также снижает выбор ОУ.

Для устранения указанных выше недостатков, в акселерометре могут быть применены следующие устройства:

- буферный усилитель-преобразователь (БфУП);
- управляемый источник тока (УИТ);
- датчик тока в цепи обратной связи (ДТ).

Схемотехника акселерометра с буферным усилителем-преобразователем

Буферный усилитель-преобразователь БфУП на ОУ DA4 включается между ДМ акселерометра и ГЛИН (рис. 7).

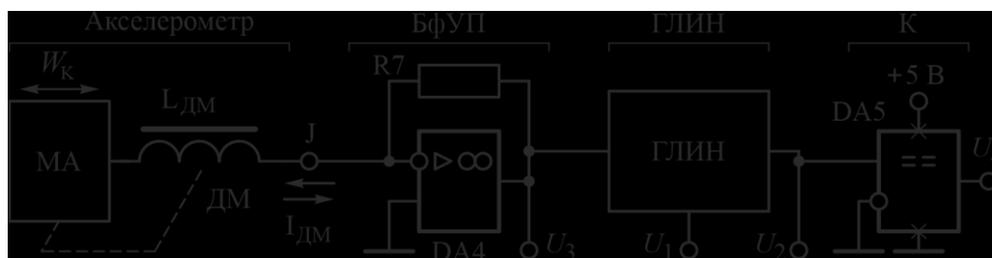


Рис. 7. Схема акселерометра с буферным усилителем-преобразователем

В этом случае, значительные по величине токи компенсации тока i_{DM} будет обеспечивать ОУ DA4. Напряжение U_3 на выходе ОУ – это выходной сигнал

акселерометра, представленный в виде напряжения: $U_3 = i_{\text{ДМ}} \cdot R_7$. В этой схеме ГЛИН необходимо применять с резистором смещения R_3 , как показано на рис.3. Применение буферного усилителя-преобразователя позволяет обеспечить работу ГЛИН в режиме малых токов, и даже – в режиме микротоков. Это позволит применить в схеме ГЛИН маломощные прецизионные резисторы, снизить их тепловую напряженность и, тем самым, повысить стабильность работы генератора. На выходе ГЛИН установлен компаратор DA5, который обеспечивает преобразование двухполярных сигналов ГЛИН в логические уровни «0» и «1» цифровых микросхем.

По сравнению с исходной схемой компенсационного акселерометра с преобразователем напряжение-ток «U→I» (рис. 1), применение буферного усилителя, при условии, что ГЛИН работает в режиме малых токов, как минимум удваивает потребляемую устройством мощность. Действительно, протекание по датчику момента тока $i_{\text{ДМ}}$ любой полярности приводит к потреблению этого тока от источника питания соответствующей полярности, а от источника питания противоположной полярности происходит потребление тока компенсации, имеющую такую же величину.

Схемотехника акселерометра с управляемым источником тока

Дальнейшая доработка схемотехники ПНТ с целью снижения потребляемого тока позволяет исключить буферный усилитель. Схема ПНТ на управляемом источнике тока (ИТ) и токовым делителем (ТД) показана на рис. 8 [15,20].

Преобразователь напряжение-ток представляет собой двухполярный источник тока (ИТ), выполненном на комплементарных транзисторных сборках VT1 и VT2. Источник тока состоит из двух управляемых токовых зеркал: на положительную полярность тока транзисторы VT1.1, VT1.2 и VT1.3 и отрицательную полярность тока – транзисторы VT2.1, VT2.2 и VT2.3. Токовые зеркала имеют по два токовых выхода: транзисторы VT1.3 и VT2.3 обеспечивают питание датчика момента силовым током $i_{\text{ДМ}}$. Транзисторы VT1.2 и VT2.2 являются элементом токового делителя и обеспечивают подачу тока $i_{\text{ТД}}$ в точку “J” ГЛИНа.

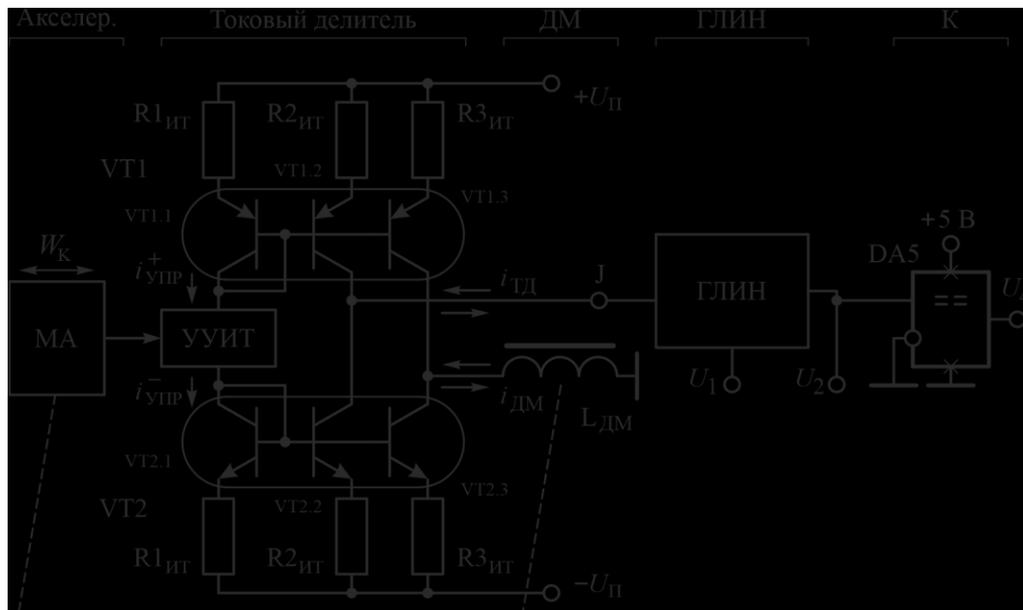


Рис. 8. Схема акселерометра с токовым делителем

Известно [15], что выходные токи $i_{\text{ДМ}}$ и $i_{\text{ТД}}$ токового зеркала соотносятся с входным управляющим током $i_{\text{УПР}}$ следующим соотношением

$$\frac{i_{\text{УПР}}}{i_{\text{ТД}}} = \frac{R2_{\text{ИТ}}}{R1_{\text{ИТ}}}; \quad \frac{i_{\text{УПР}}}{i_{\text{ДМ}}} = \frac{R3_{\text{ИТ}}}{R1_{\text{ИТ}}}. \Rightarrow i_{\text{ТД}} = i_{\text{УПР}} \frac{R1_{\text{ИТ}}}{R2_{\text{ИТ}}}; \quad i_{\text{ДМ}} = i_{\text{УПР}} \frac{R1_{\text{ИТ}}}{R3_{\text{ИТ}}}. \quad (14)$$

С целью снижения энергопотребления устройством, значение тока управления $i_{\text{УПР}}$ можно выбрать на уровне долей миллиампер. Значение тока $i_{\text{ТД}}$ может иметь такое же небольшое значение, как и ток управления $i_{\text{УПР}}$: $i_{\text{ТД}} = i_{\text{УПР}}$. В этом случае

эти резисторы необходимо выбирать одного значения: $R_{2ИТ} = R_{1ИТ}$. Значение тока $i_{ДМ}$ значительно превышает значение тока управления $i_{УПР}$. Для этого токового выхода резисторы $R_{3ИТ}$ необходимо выбирать меньшего значения: $R_{3ИТ} = R_{1ИТ}/n$, где $n = i_{ДМ}/i_{УПР}$. Величину тока управления $i_{УПР}$ задает двухполярное устройство управления источником тока УУИТ.

Схемотехника акселерометра с датчиком тока

В некоторых акселерометрах (например, АТ-1104 [7]) выходной сигнал снимается с датчика тока (ДТ) – резистора $R_{ДМ}$ (Рис. 9).

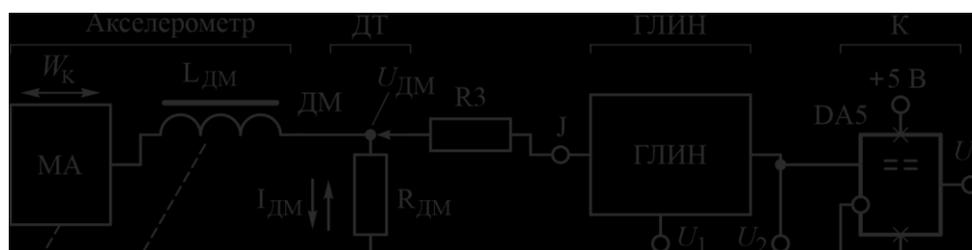


Рис. 9. Схема акселерометра с датчиком тока

Выходной сигнал акселерометра вырабатывается в виде напряжения на резисторе $R_{ДМ}$: $U_{ДМ} = R_{ДМ} \cdot i_{ДМ}$. При подключении резистора R_3 сопротивление ДТ меняется на значение двух параллельно включенных резисторов

$$R_{ДМ}^* = (R_{ДМ} \cdot R_3) / (R_{ДМ} + R_3).$$

Подключение резистора R_3 параллельно резистору $R_{ДМ}$ не меняет линейности характеристики, так как в точке “J” потенциал всегда равен нулю. При такой схеме снятия информационного сигнала с акселерометра сопротивление резистора R_3 и, соответственно, токовый режим работы ГЛИН, определяемый электрическими параметрами применяемых ОУ, можно выбирать в широких пределах.

Методика схемотехнического построения интегрирующего маятникового акселерометра

Методика схемотехнического построения интегрирующего маятникового акселерометра включает в себя следующие действия.

1. Использование в качестве объекта модернизации маятникового акселерометра компенсационного типа.
2. Разработка схемотехники устройства преобразования выходного сигнала акселерометра во временной интервал.
3. Разработка алгоритма определения кажущейся скорости.
4. Рекомендации по выбору схемотехники устройства преобразования выходного сигнала с пониженным энергопотреблением.

Указанная методика может быть использована для широкого круга измерительных приборов, в которых выходным сигналом должно быть интегральное значение измеряемой физической величины.

Заключение

Использование интегрирующего акселерометра позволяет одно из интегрирований, необходимых для получения навигационных параметров, осуществить непосредственно в измерительном приборе – акселерометре. Это позволяет в целом упростить схему, снизить ее массогабаритные параметры и повысить точность производимых преобразований и измерений.

Применение ГЛИН для преобразования тока датчика момента во временные интервалы t_1 и t_2 позволяет выполнить процесс интегрирования измеряемого ускорения непрерывным и исключить из схемы интегрирующего акселерометра

мощный двухполярный ключ и устройство выборки хранения, как отдельные электронные элементы. Выходная информация на выходе ГЛИН переведена во временную область и представлена в виде временных интервалов t_1 и t_2 .

Предложенная методика построения интегрирующего маятникового акселерометра позволяет в имеющемся акселерометре использовать не сам режим измерения ускорения, а режим интегрирования измеряемого ускорения. Получение выходного сигнала в виде временных интервалов позволяет исключить дополнительные этапы преобразования сигнала, что снижает общую ошибку преобразования. Схемотехнические решения – применение буферного компаратора, токового делителя на токовых зеркалах и датчика тока позволяют расширить схемотехнику преобразовательного устройства и снизить его энергопотребление.

Методика построения интегрирующего маятникового акселерометра, рассмотренная в статье, может быть использована для широкого круга измерительных приборов, в которых выходным сигналом должно быть интегральное значение измеряемой физической величины, что упрощает схемотехнику устройства.

Список источников

1. Соловьев В.И. Шабалов П.Г. Инерциальные навигационные системы. - Самара: Изд-во СГАУ, 2011. - 72 с.
2. Каргу Л.И. Измерительные устройства летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1988. – 256 с.

3. Распопов В.Я. Микросистемная авионика. – Тула: Гриф и К, 2010. – 248 с.
4. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. – СПб.: Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 280 с.
5. Корнилов А.В., Корчагин К.С., Лосев В.В. Разработка алгоритмов комплексной измерительной навигационной системы авиационного применения на отечественной элементной базе // Труды МАИ. 2021. № 117. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=156235>. DOI: [10.34759/TRD-2021-117-09](https://doi.org/10.34759/TRD-2021-117-09)
6. 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)
7. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
8. Дубовской В.Б., Кисленко К.В., Пшеняник В.Г. Методика повышения точности навигационного обеспечения космических аппаратов, оснащенных высокочувствительными акселерометрами // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 7. С. 590-595. DOI: [10.17586/0021-3454-2018-61-7-590-595](https://doi.org/10.17586/0021-3454-2018-61-7-590-595)
9. Скоробогатов В.В. Проблемы разработки широкодиапазонного кварцевого маятникового акселерометра с цифровой обратной связью и пути их решения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 10. С. 17-29.

10. Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Скоробогатов В.В., Депутатова Е.А., Николаенко А.Ю., Гнусарев Д.С. Шестиосный блок акселерометров для КК «Союз» и «Пронресс». История развития: от аналоговой системы управления измерительным каналом управления к цифровой // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 8. С. 83-107.
11. Прохорцов А.В., Минина О.В. Обзор высокоточных акселерометров Российских производителей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 10. С. 301-305.
12. Буянкин М.П., Ватулин М.А., 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. DOI: [10.25586/RNU.V9187.20.01.P.055](https://doi.org/10.25586/RNU.V9187.20.01.P.055)
13. Волков В.Л. Обоснование требований к параметрам микромеханического акселерометра // Труды НГТУ им. Р.С.Алексеева. 2011. №2 (87). С. 288.
14. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. - М.: Додэка-XXI, 2005. – 528 с.
15. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: в 2 Т./ пер. с нем. – М.: Додэка-XXI, 2008. – 942 с.
16. Корн Т., Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Машиностроение, 1978. – 831 с.
17. Авербух В.Д. и др. Операционные усилители и компараторы. Справочник. Т. 12. – М.: Додэка-XXI, 2001. -559 с.

18. Картер Р., Манчини Р. Операционные усилители для всех / Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 528 с.
19. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975. – 767 с.
20. Линден Т. Харрисон. Источники опорного напряжения и тока / Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 576 с.

References

1. Solov'ev V.I. Shabalov P.G. *Inertsial'nye navigatsionnye sistemy* (Inertial navigation systems), Samara, Izd-vo SGAU, 2011, 72 p.
2. Kargu L.I. *Izmeritel'nye ustroistva letatel'nykh apparatov* (Measuring devices of aircraft), Moscow, Mashinostroenie, 1988, 256 p.
3. Raspopov V.Ya. *Mikrosistemnaya avionika* (Microsystem avionics), Tula, Grif i K, 2010, 248 p.
4. Matveev V.V., Raspopov V.Ya. *Osnovy postroeniya besplatformennykh inertsial'nykh navigatsionnykh system* (Fundamentals of construction of free-form inertial navigation systems), Saint Petersburg, Kontsern «TsNII «Elektropribor», 2009, 280 p.
5. Kornilov A.V., Korchagin K.S., Losev V.V. *Trudy MAI*, 2021, no. 117. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=156235>. DOI: 10.34759/TRD-2021-117-09
6. 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
7. Raspopov V.Ya. *Mikromekhanicheskie pribory* (Micromechanical devices), Moscow, Mashinostroenie, 2007, 400 p.

8. Dubovskoi V.B., Kislenko K.V., Pshenyanik V.G. *Izvestiya VUZov. Priborostroenie*. 2018, vol. 61, no. 7, pp. 590-595. DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-7-590-595
9. Skorobogatov V.V. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2016, no. 10, pp. 17-29.
10. Kalikhman D.M., Kalikhman L.Ya., Skorobogatov V.V., Deputatova E.A., Nikolaenko A.Yu., Gnusarev D.S. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2019, no. 8, pp. 83-107.
11. Prokhortsov A.V., Minina O.V. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2019, no. 10, pp. 301-305.
12. Buyankin M.P., Vatutin M.A., Klyuchnikov A.I. *Vestnik Rossiiskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie*, 2020, no. 1, pp. 55-59. DOI: 10.25586/RNU.V9187.20.01.P.055
13. Volkov V.L. *Trudy NGTU im. R.S.Alekseeva*, 2011, no. 2 (87), pp. 288.
14. Volovich G.I. *Skhemotekhnika analogovykh i analogo-tsifrovyykh elektronnykh ustroystv* (Circuitry of analog and analog-digital electronic devices), Moscow, Dodeka-XXI, 2005, 528 p.
15. Tittse U., Shenk K. *Poluprovodnikovaya skhemotekhnika* (Semiconductor circuitry) vol. 1,2. Moscow, Dodeka-XXI, 2008, 942 p.
16. Korn T., Korn G. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* (Handbook of Mathematics for scientists and engineers), Moscow, Mashinostroenie, 1978, 831 p.
17. Averbuh V.D. et al. *Operatsionnye usiliteli i komparatory. Spravochnik. Tom 12.* (Operational amplifiers and comparators. Vol. 12), Moscow, Dodeka-XXI, 2001, p.

18. Karter R., Manchini R. *Operatsionnye usiliteli dlya vseh* (Operational amplifiers for everyone), Moscow, DMK Press, 2016, 528 p.
19. Besekerskii V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* (Theory of automatic control systems), Moscow, Nauka, 1975, 767 p.
20. Linden T. Kharrison. *Istochniki opornogo napryazheniya i toka* (Sources of reference voltage and current), Moscow, DMK Press, 2015, 576 p.

Статья поступила в редакцию 29.01.2023

Одобрена после рецензирования 06.02.2023

Принята к публикации 27.02.2023

The article was submitted on 29.01.2023; approved after reviewing on 06.02.2023; accepted for publication on 27.02.2023