УДК 621.7.08

В. А. Васильев, Н. В. Громков, А. Ж. Жоао

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МИКРОМОДУЛЬНЫЙ ЧАСТОТНЫЙ ИНТЕГРИРУЮЩИЙ РАЗВЕРТЫВАЮЩИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ РЕЗИСТИВНЫХ ДАТЧИКОВ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

V. A. Vasil'ev, N. V. Gromkov, A. Zh. Zhoao

THE UNIVERSAL MICROMODULAR FREQUENCY INTEGRATING SCANNING CONVERTER FOR RESISTIVE SENSORS OF PHYSICAL QUANTITIES

Аннотация. *Актуальность и цели*. Рассмотрен универсальный частотный интегрирующий развертывающий преобразователь (ЧИРП) параметров резистивных датчиков физических величин, выполненный в модульном исполнении из бескорпусных операционных усилителей с внутренними элементами и связями. Целью работы является исследование различных вариантов схем подключения универсального модуля ЧИРП к резистивным датчикам физических величин в составе информационно-измерительных систем. *Материалы и методы*. Использован метод компьютерного схемотехнического моделирования, позволяющий получить основные выходные характеристики модуля ЧИРП параметров резистивных датчиков. *Результаты*. Предложены варианты схем подключения резистивных датчиков физических величин к универсальному модулю ЧИРП, получены функции преобразования и временные диаграммы для рассматриваемых схем, графики зависимостей частоты выходного сигнала от изменяемого параметра. *Выводы*. Предлагаются рекомендации по практическому применению универсального микромодульного ЧИРП с резистивными датчиками различных физических величин (температуры, давления, силы, ускорения, влажности и др.).

Abstract. *Background*. Consider the universal integrating scanning frequency converter (chirp) parameters of resistive sensors of physical quantities, designed in a modular design of the frameless operational amplifiers with internal components and connections. The aim is to study the various options for wiring diagrams universal module chirp to resistive sensors of physical quantities as part of information-measuring systems (IMS). *Materials and methods*. The method used in computer circuit simulation, provides a basic output characteristics of the chirp parameter module resistive sensors. *Results*. The proposed options for wiring diagrams resistive sensors of physical quantities to the universal module chirp, received conversion function and timing diagrams for the schemes, graphs of the frequency of the output signal from the variable parameter. *Conclusions*. The proposed recommendations on the practical application of universal mikromodulnogo chirp with resistive sensors of various physical quantities (temperature, pressure, force, acceleration, humidity, etc.).

Ключевые слова: датчики физических величин, температура, давление, влажность, ускорение, частотный преобразователь, микромодуль, функция преобразования, график.

Key words: sensors of physical quantities, temperature, pressure, humidity, acceleration, frequency converter, micromodule, converting function, chart.

Бурное развитие информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) находит все большее применение в различных отраслях народного хозяйства, в сложных отраслях промышленности и в бытовых приборах и системах. В космических системах сбор, обработка и передача информации, управление сложными процессами работы отдельных систем корабля осуществляется с помощью бортовых компьютеров путем обработки сигналов с множества (тысячи) датчиков различных физических величин (температура, давление, влажность, сила, ускорение и т.д.), переданных как по проводным, так и беспроводным линиям связи. ИИУС управляют сложными технологическими процессами в труднодоступных и вредных для здоровья человека местах химической, атомной промышленности. Для сбора информации о состоянии окружающей среды (загазованность, запыленность, содержание вредных примесей и др.), прогнозе погоды, имеющей важное значение для сельского хозяйства, служб авиации и транспорта, создаются автоматизированные метеостанции. Разработаны и внедряются в нашу жизнь сложные бытовые системы, так называемые «Умный дом», следящие за параметрами и управляющие состоянием воздуха в жилых помещениях.

Во всех перечисленных выше ИИУС сбор информации о параметрах физических величин осуществляется с помощью первичных преобразователей (датчиков) и вторичных преобразователей, которые преобразуют информацию с датчиков в электрический сигнал (аналоговый по напряжению или току, частотный и цифровой), удобный для передачи и дальнейшей ее обработки с помощью вычислительных средств, персональных компьютеров и сложных процессоров. В связи с этим повышаются требования как к датчикам, так и ко вторичным преобразователям по точности, потребляемой мощности и массогабаритным размерам. В качестве первичных преобразователей применяются датчики различного типа (резистивные, емкостные, индуктивные и др.), однако для измерения температуры, давления, влажности, силы, ускорения и других параметров наиболее широкое применение находят датчики резистивного типа (терморезисторы, тензорезисторы, фоторезисторы), изменяющие свое сопротивление под воздействием внешних факторов. Широкое применение для обработки сигналов с первичных датчиков в последнее время нашли микропроцессоры, содержащие аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи (АЦП) и (ЦАП), имеющие на выходе кодовый сигнал. Однако микропроцессорные системы являются сравнительно сложными в техническом плане устройствами и требуют высокой квалификации сотрудников, способных их программировать и настраивать под каждый тип датчика. В связи с этим актуальным является применение частотных интегрирующих развертывающих преобразователей (ЧИРП) для работы с датчиками резистивного типа в силу того, что они просты в схемотехническом решении, не требуют дополнительных настроек и программирования, имеют малое энергопотребление, частотный выходной сигнал, который обладает большей помехозащищенностью по сравнению с аналоговыми при передаче на большие расстояния [1, 2]. Кроме того, при работе с резистивными датчиками ЧИРП не требуют стабилизированных источников питания измерительной цепи и при несложных схемотехнических решениях позволяют снизить температурную погрешность тензометрических преобразователей.

Структурная схема ЧИРП с датчиком представлена на рис. 1.

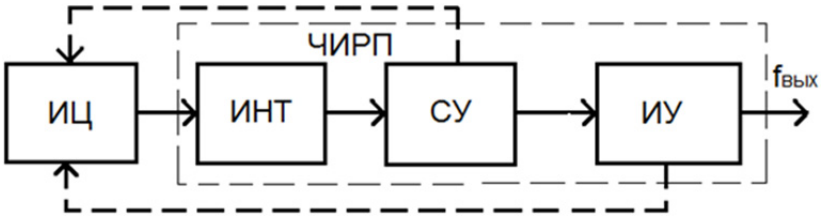


Рис. 1. Структурная схема ЧИРП

Схема содержит измерительную цепь (ИЦ) с резистивным датчиком, включенным по одной из схем включения (мостовая или в виде делителя напряжения), и непосредственно ЧИРП, содержащий интегратор (ИНТ), сравнивающее устройство (СУ) (компаратор) и инвертирующий усилитель (ИУ) (с переменным коэффициентом передачи), который может быть использован как инвертор (с коэффициентом передачи, равным единице), либо как второй компаратор. Отрицательные обратные связи, показанные пунктиром, могут использоваться для питания датчиков в зависимости от их типов и схем включения в ИЦ.

Учитывая опыт работы с ЧИРП и развитие отечественной элементной базы [3, 4], авторами предлагается универсальный микромодульный ЧИРП, собранный на бескорпусных микромощных операционных усилителях (ОУ). Схема модуля с номерами и обозначениями выводов представлена на рис. 2.

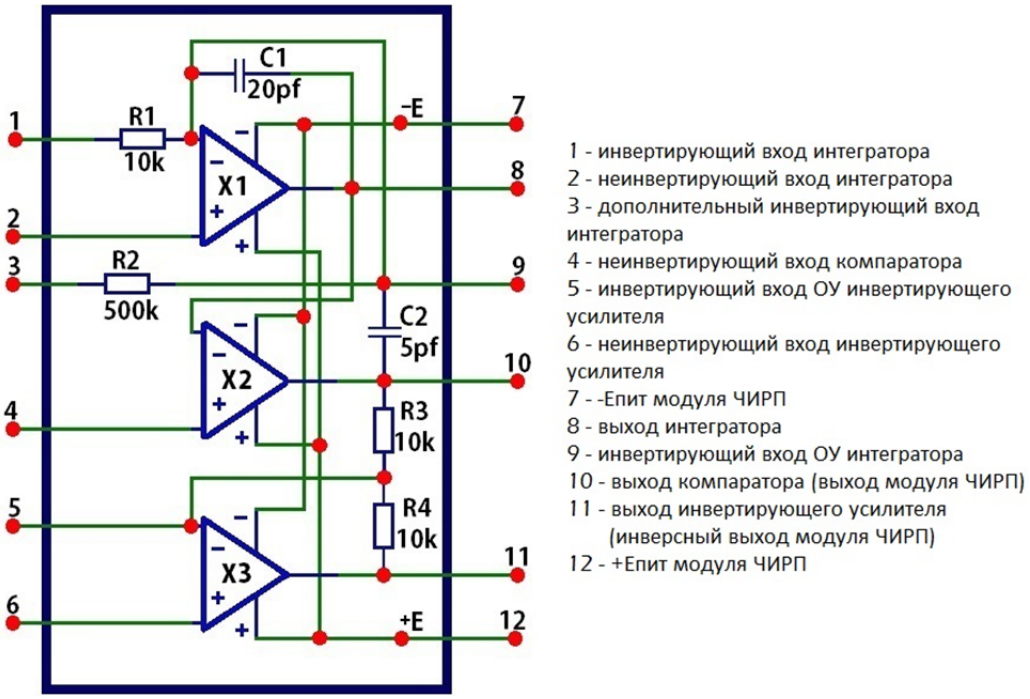


Рис. 2. Схема универсального модуля ЧИРП

Схема содержит: интегратор, собранный на ОУ *X*1 с конденсатором *C*1 = 20 пФ в отрицательной обратной связи, резисторами *R*1 = 10 кОм и *R*2 = 500 кОм с дозирующей емкостью *C*2 = 5 пФ, включенной между инвертирующим входом ОУ интегратора и выходом компаратора, собранного на ОУ *X*2; инвертирующий усилитель на ОУ *X*3 с коэффициентом передачи, задаваемым отношением сопротивлений резисторов *R*4/*R*3, равных в данном случае по 10 кОм. Питание модуля осуществляется от двухполярного источника постоянного напряжения +*E* и –*E* в диапазоне от 5 до 15 В. Имеется возможность подключения навесных элементов к выводам модуля с целью изменения номиналов *C*1, *C*2, *R*1, *R*2 и *R*4 в зависимости от схем подключения ИЦ с датчиком и задания необходимых параметров диапазона изменения частоты выходного сигнала и чувствительности ЧИРП [5, 6].

На рис. 3,*а* представлена схема подключения универсального модуля ЧИРП к резистивному датчику температуры (на схеме *R*7) через дополнительный резистор *R*6 = 200 кОм, который может быть и больше. Следует отметить, что чем выше номинал данного резистора *R*6 (на несколько порядков выше сопротивления датчика *R*7), тем меньше погрешность от нелинейности. Дополнительно к модулю подключены навесные элементы: конденсатор *C*3 = 30 пФ (параллельно конденсатору *C*1 = 20 пФ) и резистор *R*5 = 10 кОм (параллельно *R*4 = 10 кОм). На рис. 3,*б* показаны временные диаграммы, поясняющие работу данной схемы, и частота выходного сигнала. Верхняя строка временных диаграмм отражает форму сигнала на выходе интегратора, а вторая и третья – формы сигналов на выходе ОУ *X*2 и *X*3 соответственно.

Функция преобразования для данной схемы включения:

$$f = \frac{R4R7}{4R3(R6+R7)R1C1}. \qquad (1)$$

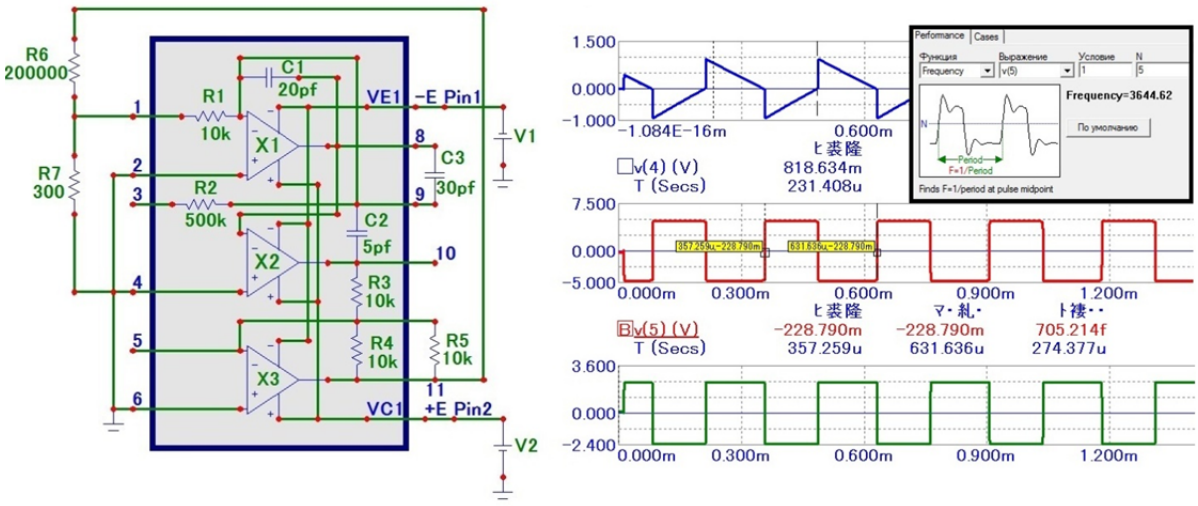
В данной схеме включения *R*7 – сопротивление датчика температуры. Параллельно к резистору модуля *R*4 подключен навесной резистор *R*5 (в схеме того же номинала, что и *R*4 = 10 кОм), в связи с чем напряжение на выходе инвертирующего усилителя X3, подаваемое на измерительную цепь (*R*6, *R*7), равно половине напряжения с выхода компаратора X2, и в формуле (1)

нужно считать сопротивление $R4$ как параллельное соединение $R4||R5$. К конденсатору $C1$ модуля также подключен параллельно конденсатор $C3$ = 30 пФ и аналогично нужно считать $C1$ в формуле (1) как $C1||C3$ = 50 пФ. При условии, что $R6>>R7$ (на несколько порядков), формулу (1) можно записать следующим образом:

$$f = K \cdot R_7, \tag{2}$$

где f – частота выходного сигнала ЧИРП; K – коэффициент преобразователя, имеющий размерность [1/Ом·с] и определяемый соотношением

$$K \approx \frac{R4}{4R3R6R1C1}. \tag{3}$$



а) *б*)

Рис. 3. Схема подключения модуля ЧИРП к резистивному датчику температуры

Таким образом, подбирая номиналы резисторов и конденсаторов в функции преобразования (1), можно получить необходимые параметры выходного сигнала ЧИРП для разных типов датчиков в заданном диапазоне измеряемых температур.

На рис. 4 показан график изменения частоты выходного сигнала (Гц) в зависимости от изменения сопротивления датчика температуры $R7$ в диапазоне от 200 Ом до 1 кОм (для датчиков фирмы *Honeywell* этот диапазон может варьироваться в других пределах в зависимости от типа датчика и диапазона измеряемой температуры) при номиналах элементов схемы модуля ЧИРП, представленного на рис. 3.

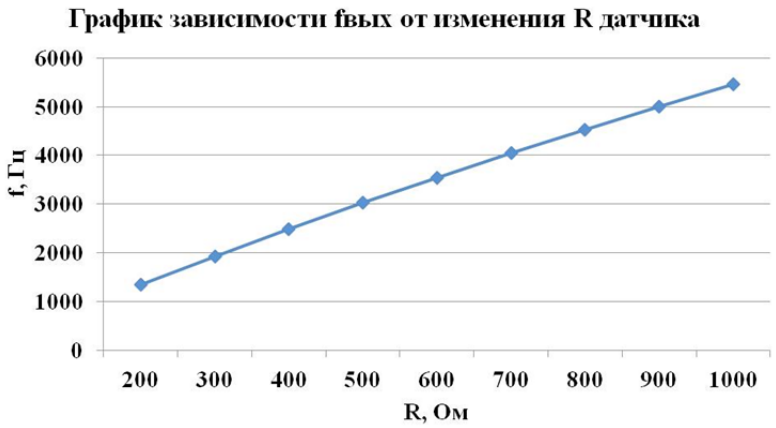
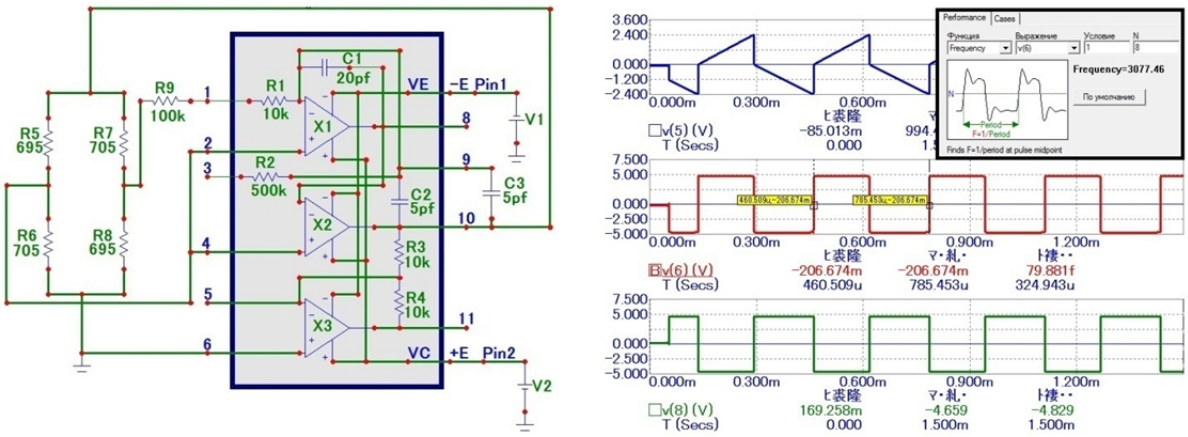


Рис. 4. График изменения частоты выходного сигнала (Гц)
в зависимости от изменения сопротивления датчика температуры (Ом)

Следующая схема подключения модуля ЧИРП, представленная на рис. 5, собранная (как и предыдущая) в программе MicroCap, предназначена для измерения давления с помощью резистивных тензодатчиков, собранных по мостовой схеме включения измерительной цепи.



а) *б*)

Рис. 5. Схема подключения модуля ЧИРП к тензорезистивному датчику давления

На рис. 5,*б* показаны временные диаграммы сигналов на выходах интегратора, компаратора и инвертирующего усилителя, а в верхнем правом углу – частота выходного сигнала.

Питание тензомоста осуществляется двухполярным сигналом прямоугольной формы типа «меандр» с выхода компаратора *X*2. Инвертирующий усилитель *X*3 в данной схеме можно использовать как дополнительный, выходной сигнал которого инвертирован по отношению к сигналу с выхода *X*2. Дополнительный навесной резистор *R*8 подключен последовательно к входному сопротивлению *R*1 интегратора, а конденсатор *C*3 – параллельно к дозирующей емкости конденсатора *C*2.

Функция преобразования данной схемы ЧИРП имеет вид

$$f = \frac{\varepsilon}{4R_{\text{и}}C_{\text{д}}}, \tag{4}$$

где f – частота выходного сигнала ЧИРП (Гц); $\varepsilon = \Delta R/R$ – относительное изменение сопротивления тензомоста; $R_{\text{и}}$ – сопротивление интегратора (Ом); $C_{\text{д}}$ – емкость дозирующего конденсатора (пФ). В данном случае $R_{\text{и}} = R9 + R1 = 100$ кОм + 10 кОм = 110 кОм, $C_{\text{д}} = C2 + C3 =$ = 5 пФ + 5 пФ = 10 пФ, а формулу (4) можно записать как

$$f = \frac{\varepsilon}{4(R9 + R1)(C2 + C3)}. \tag{5}$$

При разбалансе тензомоста ε = (0,0014–0,01) с указанными выше параметрами (для схемы рис. 5), график изменения частоты выходного сигнала ЧИРП имеет вид, представленный на рис. 6.

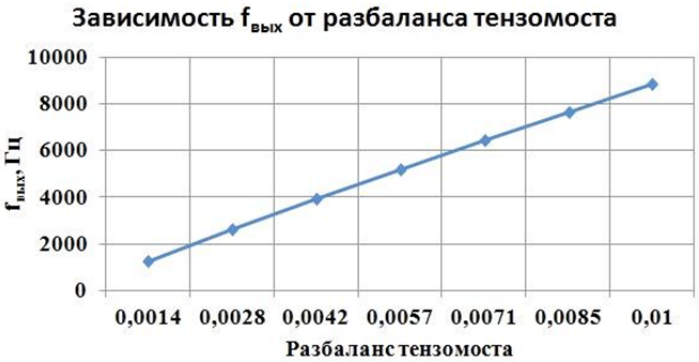
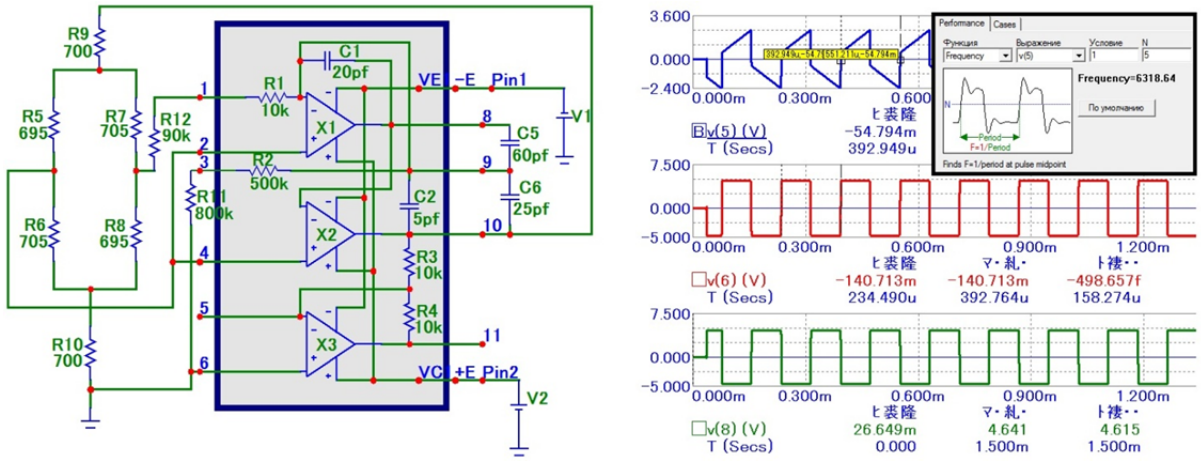


Рис. 6. График изменения частоты выходного сигнала (Гц) в зависимости от разбаланса тензомоста датчика давления

Однако следует заметить, что данную схему можно использовать только при одностороннем разбалансе тензомоста, а при стремлении разбаланса к нулевому уровню частота выходного сигнала также стремится к нулю и схема перестает работать. К тому же данная схема не учитывает влияние изменения температуры окружающей среды на погрешность преобразования. Поэтому данную схему включения можно применять для измерения абсолютного давления при нормальных условиях окружающей среды (например, при комнатной температуре).

Для измерения дифференциального давления и в более широком диапазоне температур рекомендуется использовать схему подключения модуля ЧИРП к ИЦ с резистивным датчиком дифференциального давления [7], представленную на рис. 7. На рис. 7,*б* показаны временные диаграммы сигналов на выходе интегратора, компаратора и инвертиртирующего усилителя, а также частота выходного сигнала при параметрах элементов, указанных на схеме.



а) *б*)

Рис. 7. Схема подключения модуля ЧИРП к датчику дифференциальному давления

Измерительная цепь данной схемы содержит тензометрический мост из резисторов *R*5–*R*8 и резисторов *R*9 и *R*10, включенных последовательно с диагональю питания тензомоста к выходу компаратора *X*2 модуля ЧИРП. Дополнительные навесные элементы: конденсаторы *C*5 = 60 пФ и *C*6 = 25 пФ, включенные параллельно конденсаторам *C*1 и *C*2 модуля ЧИРП, и резисторы *R*11 = 800 кОм и *R*12 = 90 кОм, включенные последовательно с резисторами *R*1 и *R*2 интегратора.

На рис. 8 представлен график зависимости частоты выходного сигнала схемы рис. 7 от разбаланса тензомоста в диапазоне ε = (–0,01–0,01) при указанных на схеме параметрах элементов.

Рис. 8. Зависимость частоты выходного сигнала от разбаланса тензомоста тензорезистивного датчика дифференциального давления

Функция преобразования описываемой схемы включения в общем виде имеет вид

$$f = \frac{1}{2(1-\varepsilon_R+2m)C_д}\left(\frac{\varepsilon_R}{R_и}+\frac{(1+\varepsilon_R+2n)}{2R_0}\right), \quad (6)$$

где f – частота выходного сигнала (Гц); $\varepsilon_R = \Delta R/R$ – разбаланс тензомоста; R – сопротивление тензомоста (на схеме R = 700 Ом); $R_и$ – сопротивление интегратора (на схеме $R_и = R12 + R1$ = = 90 кОм + 10 кОм = 100 кОм); R_0 – дополнительное сопротивление интегратора для задания начальной частоты выходного сигнала при нулевом разбалансе тензомоста (в схеме $R0 = R11 + R2$ = 800 кОм = 500 кОм = 1,3 МОм); $m = R9/R$; $n = R10/R$ (в схеме $R9 = R10$ = 700 Ом); $C_д$ – емкость дозирующего конденсатора (в схеме $C_д = C2 + C6$ = 5 пФ + 25 пФ = 30 пФ).

Из выражения (6) видно, что при нулевом разбалансе тензомоста (ε_R = 0) и равенстве сопротивлений дополнительных резисторов $R9$ и $R10$ ($n = m$) начальная частота f_0 выходного сигнала преобразователя может задаваться с помощью величин емкости дозирующего конденсатора $C_д$ и сопротивления R_0 интегратора:

$$f_0 = \frac{1}{4R_0C_д}, \quad (7)$$

девиация частоты выходного сигнала равна

$$\Delta f \approx \frac{\pm\varepsilon_R}{2(1+2m)C_дR_и}. \quad (8)$$

Тогда формулу (6) можно записать в виде

$$f = f_0 + \Delta f. \quad (9)$$

На рис. 8 частота выходного сигнала изменяется в диапазоне от 2,5 до 7,5 кГц при разбалансе тензомоста ε = (–0,01–0,01) и равна 5 кГц при нулевом разбалансе тензомоста, когда $R5 = R6 = R7 = R8 = R$ = 700 Ом.

Характерной особенностью всех описанных выше схем является их инвариантность к изменению напряжения питания модуля ($\pm E_{пит}$) и отсутствие жестких требований к стабильности емкости конденсатора интегратора ($C1$), так как она не входит в функции преобразования указанных схем.

Следует отметить, что описываемый микромодуль ЧИРП является универсальным, так как он может работать не только с резистивными датчиками, но и с емкостными. Авторами представлены только три схемы подключения модуля, однако существует множество других вариантов [8–10], так как в одной статье невозможно описать все схемы подключения модуля к датчикам различного типа в силу ее ограниченности по объему.

Список литературы

1. Громков, Н. В. Интегрирующие развертывающие преобразователи параметров датчиков систем измерения, контроля и управления : моногр. / Н. В. Громков. – Пенза : Изд-во ПензГУ, 2009. – 244 с.
2. Частотные преобразователи для датчиков давления на основе нано- и микроэлектромеханических систем : моногр. / В. А. Васильев, Н. В. Громков, А. Н. Головяшкин, С. А. Москалев ; под ред. д.т.н., проф. В. А. Васильева. – Пенза : Изд-во ПГУ. – 130 с.
3. Виглеб, Г. Датчики : пер. с нем. / Г. Виглеб. – М. : Мир, 1989. – 196 с.
4. Турата, Е. Ф. Операционные усилители: справочник / Е. Ф. Турата. – М. : Патриот, 1996. – 192 с.
5. А. с. СССР № 828406. Преобразователь разбаланса тензомоста в частоту / Н. В. Громков, В. Д. Михотин, Э. К. Шахов, В. М. Шляндин. – Опубл. 1981, Бюл. № 17.
6. Микромощный датчик температуры с частотным выходным сигналом / Н. В. Громков, А. Ж. Жоао // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий : сб. материалов XI Междунар. науч.-практ. конф. – Сочи, 2014. – С. 410–413.
7. Громков, Н. В. Частотные преобразователи для тензодатчиков / Н. В. Громков // Методы и средства преобразования электрических величин в частотно-временные сигналы. – Пенза : ПДНТП, 1980. – С. 59–60.

8. Патент 2406985 Российская Федерация. Устройство для измерения давления с частотным выходом на основе нано- и микроэлектромеханической системы / Васильев В. А., Громков Н. В. – Опубл. 20.12.2010, Бюл. № 35.
9. Патент 2396705 Российская Федерация. Частотный преобразователь сигнала разбаланса тензомоста / Васильев В. А., Громков Н. В. – Опубл. 10.08.2010, Бюл. № 22.
10. Патент 2395060 Российская Федерация. Частотный преобразователь сигнала разбаланса тензомоста с уменьшенной температурной погрешностью / Белозубов Е. М., Васильев В. А., Васильева С. А., Громков Н. В. – Опубл. 20.07.2010, Бюл. № 20.

Васильев Валерий Анатольевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой приборостроения,
Пензенский государственный университет,
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: paspen@rambler.ru

Vasil'ev Valeriy Anatol'evich
doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of instrumentation,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Громков Николай Валентинович
доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ngrom@bk.ru

Gromkov Nikolay Valentinovich
doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Жоао Андрей Жозеевич
аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vsd71@ya.ru

Zhoao Andrey Zhozeevich
postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.7.08
Васильев, В. А.
Универсальный микромодульный частотный интегрирующий развертывающий преобразователь для резистивных датчиков физических величин / В. А. Васильев, Н. В. Громков, А. Ж. Жоао // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 1 (15). – С. 68–75.