

Рис. 6. Зависимость сопротивления изоляции R от U_{CM} при $T_n = 850$ °C для термопары диаметром 3 мм

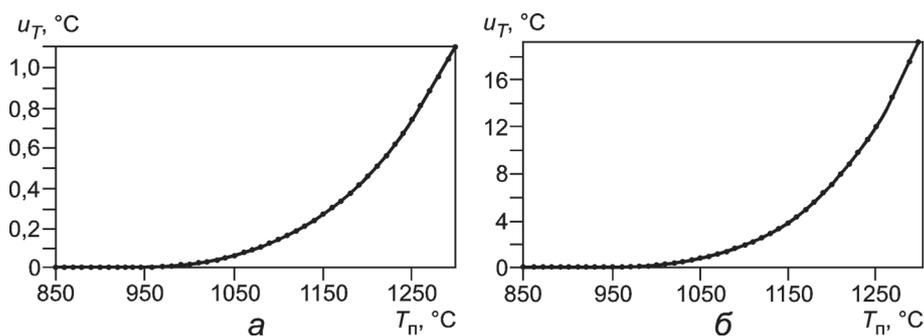


Рис. 7. Предполагаемые неопределенности результатов измерения температуры u_T из-за утечки через изоляцию термопар диаметрами 3 мм (а) и 1,5 мм (б). Участки кривых от 1100 до 1300 °C экстраполированы

Литература

1. **Bentley R. E.** Handbook of Temperature Measurement. V. 3: The Theory and Practice of Thermoelectric Thermometry. N.Y.: Springer, 1988.
2. **Rusby R. e. a.** An evaluation of sheathed Nicrosil/Nisil thermocouples up to 1300 °C // Materials at High Temperatures. 1992. V. 10. P. 193—200.
3. **Burley N.** Advanced integrally-sheathed type N thermocouple of ultra-high thermoelectric stability // Proc. Austral. Instrum. & Meas. Conf. Adelaide: Institution Engineers Austral., Nov. 1989. P. 90—95.
4. **Tavener J.** Private communication, 2010.
5. **Berry R. J.** Analysis and control of electrical insulation leakage in platinum resistance thermometers up to 1064 °C // Metrologia. 1995. V. 32. P. 11—25.

6. **Berry R. J.** Ac and Dc insulation leakage in platinum resistance thermometers up to 750 °C // Metrologia. 1985. V. 21. P. 207—223.
7. **Morice R., Ridoux P., Filtz J. R.** Improved measurements in contact thermometry at high temperature through practical fixed points // Measure. 2008. V. 3. P. 44—49.
8. **BS EN (IEC) 60584 -1:1996:** Thermocouples — Reference tables. See also: ASTM E 230 and NIST Monograph 175, 1993.
9. **Bentley R. E., Morgan T. L.** Ni-based thermocouples in the mineral-insulated metal-sheathed format: thermoelectric instabilities to 1100 °C // J. Phys. E: Sci. Instrum. 1986. V. 19. P. 262—268.
10. **ASTM 608.** Standard Specification for Mineral-Insulated Metal-Sheathed Base Metal Thermocouples, 2000.

Дата принятия 09.02.2012 г.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

681.58

Контактные модуляторы тока с выходом на удвоенной частоте**Ю. В. АФАНАСЬЕВ, А. Ю. АФАНАСЬЕВ**

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, С.-Петербург, Россия, e-mail: mag-sensors@mail.ru

Показано, что преимущество контактных модуляторов с выходом на удвоенной частоте — значительно более низкие смещение и дрейф нуля (временной и температурный) — открывает реальную возможность освоения не только нановольтового, но и пиковольтового диапазонов усиливаемых напряжений. Рассмотрены две схемы построения таких модуляторов. Описан высокочувствительный усилитель типа модулятор-демодулятор с модуляцией на удвоенной частоте, указаны области его применения.

Ключевые слова: контактный модулятор, усиление слабых постоянных или медленно меняющихся сигналов.

An advantage of contact modulators with an output on the doubled frequency consists in significantly lower values of offset and zero drift (time- and temperature dependent). The real possibility of mastering not only nanovolt range, but also picovolt range of amplified voltages opens. Two possible schemes for development of such modulators have considered. Highly sensitive MDM-amplifier with modulation on the doubled frequency is described, and fields of its application is specified.

Key words: contact modulator, amplification of weak DC or slowly changing signals.

В прикладной науке и технике нередко возникает необходимость усиления слабых постоянных и инфранизкочастотных электрических токов и напряжений. Для этой цели,

как правило, используют усилители типа МДМ (модулятор-демодулятор). В них спектр входного сигнала переносится в область более высоких частот, где затем применяют опера-

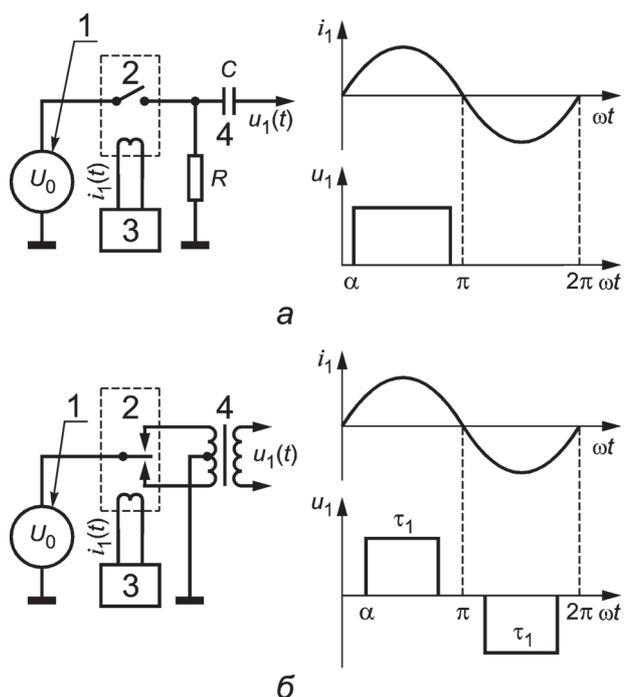


Рис. 1. Однополупериодный (а) и двухполупериодный (б) модуляторы с выходом на основной частоте:

1 — источник входного сигнала U_0 ; 2 — вибропреобразователь; 3 — генератор возбуждения; 4 — согласующее устройство

ционные усилители, шум которых на частотах модуляции оказывается значительно ниже, чем в инфранизкочастотной области.

В высокочувствительных МДМ-усилителях преимущественное распространение получили контактные модуляторы. Их основа — быстродействующие электромагнитные реле, называемые вибропреобразователями¹. Контактную группу вибропреобразователя включают в разрыв цепи сигнала; при подаче переменного тока в его обмотку возбуждения цепь сигнала периодически замыкается и размыкается, благодаря чему и осуществляется процесс модуляции [1, 2].

Будем различать две основные группы контактных модуляторов.

К первой группе отнесем модуляторы, работающие при соотношении частот выходного (модулированного) сигнала и переменного тока возбуждения вибропреобразователя, равном 1:1. Назовем их модуляторами с выходом на основной частоте. К этой группе принадлежат почти все известные контактные модуляторы [2].

Вторая группа модуляторов работает при соотношении частот выходного сигнала и тока возбуждения, равном 2:1. Будем называть их модуляторами с выходом на удвоенной частоте. Созданию этих модуляторов и посвящена настоящая статья.

Целесообразность предлагаемого разделения модуляторов имеет весомый практический смысл. Дело в том, что

¹ В данной статье понятие «контактный модулятор» рассматривается в более широком смысле и включает в себя один или несколько вибропреобразователей (причем к вибропреобразователям отнесены также и герконы), согласующие элементы, а иногда и генераторы возбуждения.

во всех модуляторах с выходом на основной частоте уровень смещения и дрейфа нуля определяется, главным образом, уровнем помех, неминуемо проникающих (несмотря на ряд принимаемых мер) из цепи возбуждения в цепь сигнала. Этот уровень ограничивает возможности таких модуляторов при усилении очень малых токов и напряжений. Что касается модуляторов с выходом на удвоенной частоте, полезный сигнал в них можно легко отфильтровать от проникающей из цепи возбуждения помехи основной частоты, что приводит к существенному уменьшению смещения и дрейфа нуля.

Изложенное косвенно подтверждается более чем полувековым опытом эксплуатации магнитных модуляторов и феррозондов с выходом на удвоенной частоте. Именно эти устройства и построенные на их основе приборы заняли доминирующее положение в прикладной науке и технике [3—5]. Прежде чем перейти к описанию конкретных схем построения контактных модуляторов с выходом на удвоенной частоте, остановимся кратко на принципах работы контактных модуляторов с выходом на основной частоте.

Модуляторы с выходом на основной частоте. Как правило, в таких модуляторах используются вибропреобразователи, выполненные на основе поляризованных электромагнитных реле, содержащих один подвижный и два симметрично расположенных неподвижных контакта, постоянный магнит и магнитопровод с охватывающей его обмоткой возбуждения. Когда по обмотке течет переменный ток, подвижный контакт поочередно соединяется с одним из двух неподвижных контактов, коммутируя выходной сигнал.

На рис. 1 приведены типовые схемы модуляторов и поясняющие их работу графики, на которых для наглядности входной сигнал показан постоянным.

Ток возбуждения имеет синусоидальную форму $i_1(t) = I_m \sin \omega t$. Прямоугольные импульсы модулированного напряжения $u_1(t)$ формируются на резисторе R или первичной обмотке трансформатора. Разложение указанных импульсов в ряд Фурье дает следующие амплитуды первых гармоник модулированного напряжения соответственно для рис. 1, а и б:

$$U_{m1} = 0,5\pi U_0 \cos \alpha; \quad U_{m1} = 0,25\pi U_0 \cos \alpha, \quad (1)$$

где α — фазовый угол, обусловленный конечным временем переключения подвижного контакта с одного неподвижного на другой.

Предпочтительнее схема модулятора, показанная на рис. 1, б. В [2] описан соответствующий этой схеме контактный модулятор и построенный на его основе МДМ-усилитель, обладавший в 1970—80 гг. наилучшими характеристиками. В модуляторе использован отечественный вибропреобразователь МКН1-01, смещение и температурный дрейф нуля которого не превышали соответственно 0,2 мкВ и 4 нВ/К. В схеме МДМ-усилителя с данным вибропреобразователем при полосе пропускания 7 Гц удалось реализовать нижний предел усиления напряжения, равный 1 нВ.

Можно надеяться, что построение контактных модуляторов с выходом на удвоенной частоте (при прочих равных условиях) позволит значительно улучшить достигнутые показатели.

Модуляторы с выходом на удвоенной частоте. Исходя из принципа работы очевидно, что в таких модуляторах замыкание и размыкание цепи сигнала должно происходить дважды за период тока возбуждения. При этом длительность

замыкания цепи должна быть примерно равной $\pi/2$, что будет соответствовать максимуму амплитуды второй гармоники выходного сигнала. Рассмотрим две возможные схемы построения таких модуляторов.

В первой из них (рис. 2, а) используется вибропреобразователь, выполненный на основе неполяризованного реле. Его контакты замыкаются при любом знаке переменного тока, протекающего по обмотке возбуждения. Будем использовать ток возбуждения в форме знакопеременных прямоугольных импульсов, удовлетворяющих условиям

$$i_1(t) = \begin{cases} 0 & \text{для } 0 \leq \omega t < \theta \text{ и } \pi - \theta \leq \omega t \leq \pi; \\ I_m & \text{для } \theta < \omega t < \pi - \theta. \end{cases}$$

Спектр такого тока содержит основную частоту, нечетные гармоники и не содержит четных гармоник:

$$i_1(t) = \frac{4}{\pi} I_m \left(\cos \theta \sin \omega t + \frac{1}{3} \cos 3\theta \frac{\sin 3\omega t}{3} + \frac{1}{5} \cos 5\theta \frac{\sin 5\omega t}{5} + \dots \right) \quad (2)$$

Оптимальную для второй гармоники модулированного сигнала длительность импульсов тока возбуждения можно найти из соотношения $\tau_{2\text{опт}} = \pi/2 = \pi - 2\theta$, откуда $\theta_{\text{опт}} = \pi/4$. Подставляя это значение в (2), имеем

$$i_{1\text{опт}}(t) \approx 0,9 I_m \left(\sin \omega t - \frac{\sin 3\omega t}{9} - \frac{\sin 5\omega t}{25} + \dots \right).$$

Наибольший «вес» в таком токе возбуждения имеет основная частота, тогда как высшие нечетные гармоники затухают обратно пропорционально квадрату номера гармоники.

После вибропреобразователя на первичной обмотке трансформатора имеем модулированное напряжение $u_2(t)$, из которого выделяем выходной сигнал удвоенной частоты $u_{\text{вых}2}(t)$. Спектр последовательности импульсов $u_2(t)$ содержит постоянную составляющую, вторую гармонику и высшие четные гармоники. Для выделения сигнала второй гармоники $u_{\text{вых}2}(t)$ вторичную обмотку согласующего трансформатора настраивают в резонанс на частоту 2ω .

Амплитуда второй гармоники модулированного сигнала в режиме холостого хода определяется аналогично (1):

$$U_{m2} = 2U_0/\pi$$

(временем задержки срабатывания вибропреобразователя пренебрегаем).

Следует иметь в виду, что при реализации данной схемы необходимо учитывать инерционность подвижного контакта вибропреобразователя. При приближении к резонансу его собственных колебаний могут возникнуть нарушения в длительности замыкания цепи сигнала. Поэтому основную частоту генератора нужно выбирать значительно ниже резонансной частоты колебаний подвижного контакта вибропреобразователя. То же относится и к случаю, когда вибропреобразователем служит геркон. Указанное обстоятельство является недостатком рассмотренной схемы модулятора, хотя такие модуляторы можно с успехом использовать для

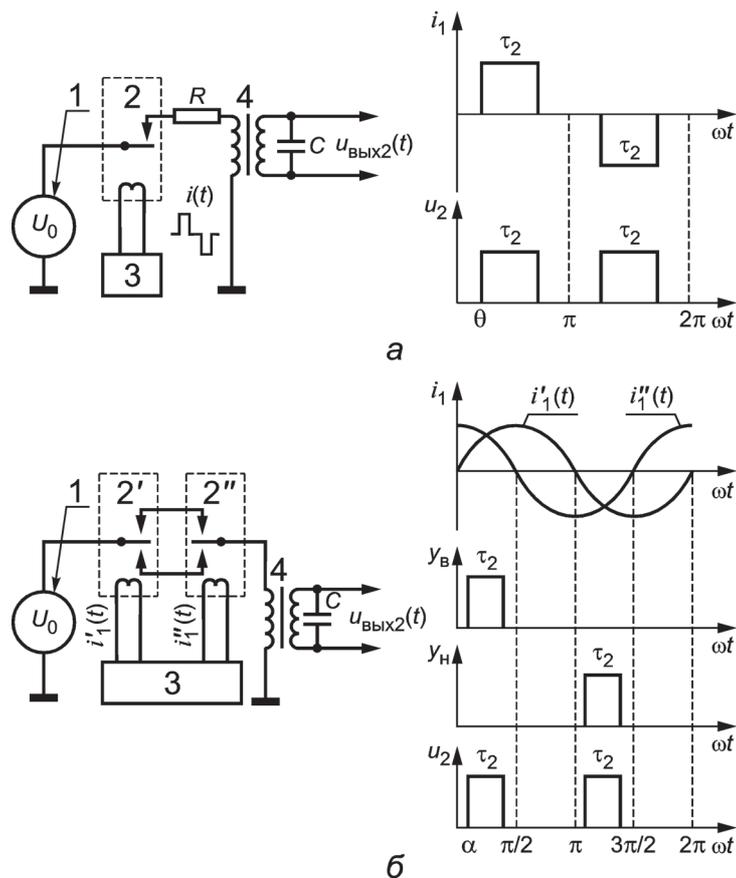


Рис. 2. Модуляторы с выходом на основной частоте с одним (а) и двумя (б) вибропреобразователями:

1 — источник входного напряжения U_0 ; 2, 2', 2'' — вибропреобразователи; 3 — генератор возбуждения; 4 — согласующий трансформатор

модуляции постоянных и очень медленно меняющихся токов и напряжений, причем выбор частоты возбуждения порядка 7 — 10 Гц повышает их надежность и долговечность.

Другая схема построения модулятора с выходом на удвоенной частоте показана на рис. 2, б. От предыдущей эта схема отличается тем, что в ней имеются два вибропреобразователя. Они выполнены на основе поляризованных реле, т. е. являются аналогичными используемым в модуляторах с выходом на основной частоте. Оба преобразователя возбуждаются переменным током частоты ω (мономатическим) с относительным сдвигом начальных фаз, равным 90° , для чего в генераторе возбуждения предусмотрены соответствующие выходы. Контактные группы вибропреобразователей включены в сигнальную цепь последовательно и образуют две параллельные линии коммутации, соединенные с первичной обмоткой согласующего трансформатора, вторичная обмотка которого служит выходом модулятора.

На графиках, поясняющих принцип работы модулятора, показаны кривые токов возбуждения $i_1'(t) = I_m \sin \omega t$ и $i_1''(t) = I_m \cos \omega t$, поступающих в обмотки возбуждения вибропреобразователей; функции проводимости верхней $y_B(t)$ и нижней $y_H(t)$ линий коммутации. Высокую проводимость эти линии имеют лишь в промежутки времени, когда подвижные и неподвижные контакты обоих вибропреобразователей замкнуты одновременно. Для верхней линии этот момент наступит

пает при положительных полуволнах токов возбуждения, для нижней линии — при отрицательных. Наконец, на нижнем графике показаны импульсы модулированного сигнала $u_2(t)$ удвоенной частоты, длительность которых совпадает с длительностью импульсов проводимости линий коммутации $\tau_2 \approx \pi/2$. Спектр последовательности импульсов $u_2(t)$ содержит постоянную составляющую, удвоенную частоту (вторую гармонику) и высшие четные гармоники. Поскольку при указанном значении τ_2 наибольший «вес» имеет вторая гармоника, то ее целесообразно использовать в качестве выходного сигнала $u_{\text{вых}2}(t) = U_{m2} \sin(2\omega t + \varphi_2)$, где φ_2 — начальная фаза. Для выделения этого сигнала вторичную обмотку согласующего трансформатора настраивают в резонанс на частоту 2ω .

В режиме холостого хода амплитуда выходного напряжения второй гармоники будет определяться выражением

$$U_{m2} \approx 2kU_0/\pi,$$

где k — коэффициент трансформации согласующего трансформатора.

Схемы, приведенные на рис. 2, могут быть положены в основу построения модуляторов, в которых вместо электромагнитных реле используются электронные ключи (на униполярных транзисторах, МОП-транзисторах и т. п.). Независимо от выбора той или иной схемы таких модуляторов выход на удвоенной частоте в любом случае даст положительный эффект.

Высокочувствительный МДМ-усилитель. Его структурная схема с модуляцией на удвоенной частоте представлена на рис. 3. Усилитель содержит: 1 — входной фильтр, предназначенный для защиты от внешних естественных и промышленных помех, в том числе сетевых; 2 — модулятор с выходом на удвоенной частоте, собранный по схеме рис. 2, б; 3, 4 — делители частоты на два, питающие соответствующие обмотки возбуждения вибропреобразователей и подключенные в противофазе к генератору возбуждения 5, настроенному, как и двухтактный избирательный усилитель 6, на удвоенную частоту; 7 — демодулятор (синхронный детектор), подключенный по цепи сигнала к выходу избирательного усилителя 6 и по цепи коммутации к соответствующему выходу генератора 5.

Заметим, что используемый в данной схеме прием формирования токов возбуждения с относительным сдвигом фаз, равным 90° (применение генератора удвоенной частоты с последующим делением на два), не является единственным возможным. Известны и другие способы формирования

квадратурных токов (см., например [6]), которые также можно применить в МДМ-усилителях с модуляцией на удвоенной частоте.

Для защиты от внутренних помех целесообразно экранировать отдельные блоки устройства (выделены на рис. 3 пунктиром), а также возможные цепи обратной связи (на рис. 3 не показаны), поместив их в электромагнитный экран, содержащий электро- и магнитопроводящие оболочки.

Питание МДМ-усилителя может осуществляться как от автономного источника постоянного тока (что предпочтительнее), так и от сети частотой 50 Гц. В последнем случае роль генератора может выполнять удвоитель частоты, непосредственно подключаемый к сети.

Дадим ориентировочную оценку предельных возможностей описанного МДМ-усилителя. Как уже отмечалось, в модуляторах с выходом на удвоенной частоте полезный сигнал легко отфильтровать от помехи основной частоты. Фильтрация обеспечивается не только путем настройки вторичной обмотки согласующего трансформатора в резонанс на частоту 2ω , но главным образом благодаря использованию в МДМ-усилителе двухтактного избирательного усилителя и синхронного детектора, также настроенных на частоту 2ω . В результате подавление помехи с частотой ω окажется столь сильным, что она уже не будет влиять на смещение и дрейф нуля модулятора и МДМ-усилителя в целом.

Однако из-за несовершенства реальных генераторов возбуждения в токе возбуждения обычно присутствует составляющая удвоенной частоты. Оценим ее уровень в 1—2 % тока основной частоты (в действительности в двухтактных генераторах этот уровень значительно ниже). Эту составляющую нельзя отфильтровать, она неминуемо будет проникать в выходной сигнал и вызывать смещение и дрейф нуля модулятора, подобно тому как в модуляторах с выходом на основной частоте проникает составляющая помехи основной частоты. Однако при прочих равных условиях (одинаковой балансировке и внутренней экранировке вибропреобразователей) смещение и дрейф нуля предлагаемого устройства будут в 50—100 раз меньшими, чем в МДМ-усилителях с выходом на основной частоте. Иными словами, получаем выигрыш не в разы, а на 1—2 порядка!

Поэтому внедрение нового типа МДМ-усилителей — с модуляцией на удвоенной частоте — позволяет заявить о реальной возможности освоения не только нановольтового, но и пиковольтового диапазонов усиливаемых напряжений.

Остановимся на достаточно простом, но весьма эффективном применении МДМ-усилителей, когда источником сигнала служит индукционная измерительная катушка. Как известно, ее выходная ЭДС пропорциональна скорости изменения пронизывающего магнитного потока. В результате чувствительность ее к внешнему магнитному полю резко падает в инфранизкочастотной области. Поэтому подключение к выходу индукционной катушки высокочувствительного МДМ-усилителя с выходом на удвоенной частоте крайне желательно. Если к выходу такой измерительной системы подключить еще и интегрирующее устройство, то получим схему высокочувствительного магнитометра (вариометра), работающего в инфранизкочастотном диапазоне.

Такие приборы найдут следующие применения:

в геофизике — для обнаружения и регистрации слабых пульсаций естественного геомагнитного поля, в том числе являющихся предвестниками землетрясений и других опасных событий;

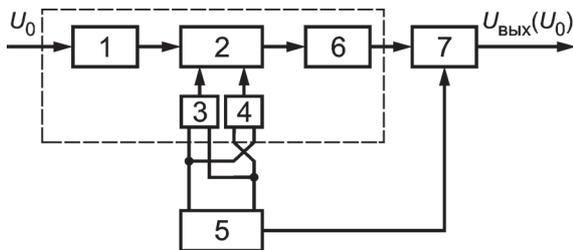


Рис. 3. Структурная схема высокочувствительного МДМ-усилителя: 1 — входной фильтр; 2 — модулятор с выходом на удвоенной частоте; 3, 4 — делители частоты на два; 5 — генератор возбуждения; 6 — двухтактный избирательный усилитель; 7 — демодулятор

в геологоразведочной практике — для глубинного зондирования земной коры [7];

в промышленности для измерения магнитного момента или остаточной намагниченности различных объектов, перемещаемых внутри или вблизи неподвижных индукционных измерительных катушек. Следует подчеркнуть, что существующие измерительные системы, в которых интегрирующие устройства (веберметры) непосредственно подключены к индукционным катушкам, давно исчерпали свои возможности в случае контроля слабомагнитных объектов. Такие же измерительные системы могут быть полезны для обнаружения скрытых движущихся объектов;

в биологии и медицине для изучения пространственного распределения магнитных полей, создаваемых живыми организмами и органами человека. Например, на их основе могут быть построены бесконтактные магнитные кардиографы.

Заключение. Преимущество предложенных модуляторов и МДМ-усилителей, собранных по схемам на рис. 2, 3, состоит не только в их малом смещении и дрейфе нуля (временном и температурном), но и в том, что в них можно использовать хорошо отработанные и выпускаемые промышленностью изделия. К ним относятся прежде всего вибропреобразователи, в частности, уже упоминавшийся прецизионный преобразователь МКН1-01 [2]. Электронные элементы МДМ-усилителей (генераторы, избирательные усилители и синхронные детекторы) могут быть заимствованы из смежной области техники [4, 5]. Иными словами, для выпуска но-

вых приборов не требуются какие-либо технологические новшества или вспомогательные производства. Подготовка к внедрению в серийное производство указанных модуляторов и МДМ-усилителей не связана со значительными затратами и может быть проведена в короткие сроки.

Л и т е р а т у р а

1. **Шляндин В. М.** Основы автоматики. М., Л.: Госэнергоиздат, 1958.
2. **Калинчук Б. А., Пичугин О. А.** Модуляторы малых сигналов. Л.: Энергия, 1980.
3. **Розенблат М. А.** Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. М.: Наука, 1966.
4. **Афанасьев Ю. В.** Феррозондовые приборы. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
5. **Musmann G., Afanassiev Y.** Fluxgate Magnetometers for Space Research. Norderstedt: Books on Demand GmbH, 2010.
6. **Ройтман М. С.** Устройство для получения двух равных квадратурных векторов напряжений // Измерительная техника. 1962. № 3. С. 40.
7. **Дуб П. Б., Ничога В. А., Захаркин А. К.** Локальные активные низкопороговые индукционные датчики (ЛАНИД) в электроразведочных работах методами ЗСБ и ЗСМП // Геофизическая аппаратура. 1999. Вып. 102. С. 28—34.

Дата принятия 18.10.2011 г.

621.317.332

Погрешности оценок амплитуды гармонических сигналов в микроконтроллерных геофизических измерителях

А. С. ГЛИНЧЕНКО, О. А. ТРОНИН

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
e-mail: AGlinchenko@sfu-kras.ru, toa12@yandex.ru

Рассмотрены погрешности оценок амплитуды сигналов в микроконтроллерных измерителях кажущегося сопротивления среды и обоснованы условия использования для измерения более точных и информативных спектральных методов и средств их реализации.

Ключевые слова: сигнал, амплитуда, микроконтроллер, кажущееся сопротивление среды.

The errors of signals amplitude estimations in microcontroller instruments for medium apparent resistance measuring are considered and the conditions of application for measurement of more accurate and informative spectral methods and the means of their realization are substantiated.

Key words: signal, amplitude, microcontroller, apparent resistance of medium.

При цифровых амплитудных измерениях с помощью программных средств с ограниченными вычислительными ресурсами и памятью, таких как микроконтроллеры, используются наиболее простые временные оценки амплитуды и при-

ближенные вычисления косвенно измеряемых по ним физических параметров в соответствии с функциональным назначением измерителя. В связи с этим возникает необходимость определения погрешности таких измерений, в том