

УДК 681.518.002.56

© Д. Г. Левченко, А. В. Носов, А. А. Парамонов, В. Н. Симонов

УСТРОЙСТВО ХРОНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ АВТОНОМНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Описываемое устройство относится к области приборостроения, а именно к обеспечению временной привязки регистрируемой информации в автономных информационно-измерительных системах (АИИС), например в донных геофизических станциях. Цель работы — повышение точности временной привязки в АИИС с ограниченным потреблением энергии питания.

ВВЕДЕНИЕ

Автономные информационно-измерительные системы (АИИС) предназначены для работы в труднодоступных местах и находят в настоящее время разнообразное применение — в научных исследованиях, при экологическом контроле территорий, как часть производственных систем и т. д. Основными особенностями АИИС являются: высокая техническая надежность, малое потребление питания, большой объем информационной памяти, возможность привязки (хронирования) регистрируемой информации к *Единому времени* с заданной точностью. В качестве примеров можно привести автоматические метеорологические системы, различные космические аппараты (научные и связные), устройства для исследования океанов и морей (донные обсерватории и сейсмографы, дрейфующие и ныряющие необитаемые аппараты, автоматические анализаторы химического состава воды и почвы и др.). Для большинства из этих устройств характерно периодическое или постоянное отсутствие информационной связи с обслуживаемыми центрами. Поэтому вопросы хронирования регистрируемой информации для них имеют чрезвычайно важное значение, что прямо связано с применением стабильных электронных часов. Такие часы основаны обычно на использовании молекулярных или термостатированных кварцевых генераторов. Однако эти устройства потребляют значительное количество энергии питания, часто превышающее потребление всей остальной аппаратуры. Поэтому разработка стабильных и экономичных электронных часов является актуальной.

Известны автономные донные геофизические станции [1, 2], в которых временная привязка регистрируемой информации осуществляется с помощью хронизирующего устройства с термостатированным кварцевым генератором. Они обладают указанным недостатком: потребление питания термостата оказывается больше, чем потребление

всех остальных устройств станции, собранных на современных электронных элементах.

СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ КВАРЦЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Основная погрешность часов донной сейсмостанции определяется температурной зависимостью частоты кварцевого генератора. Для исключения этой зависимости применяются в основном два приема: термостатирование кварцевого генератора или измерение температуры и введение термокомпенсации. Серийные кварцевые генераторы с термостатом обеспечивают требуемую точность часов, однако потребляют значительную энергию (около 0.25–0.3 Вт). Термокомпенсированные кварцевые генераторы потребляют по питанию несколько милливатт, однако имеют относительную погрешность около 10^{-6} , что не удовлетворяет требованиям к автономным донным станциям. В таблице приведены основные характеристики некоторых промышленно выпускаемых кварцевых генераторов.

Основной причиной относительно низкой стабильности промышленных термокомпенсированных кварцевых генераторов является то, что датчиками температуры в основном являются термосопротивления, а компенсация температурной зависимости частоты осуществляется аналоговым путем (изменением напряжения питания генератора или емкости р-п перехода шунтирующих транзисторов). В этом случае погрешность генератора зависит от качества подбора термокомпенсирующих цепей. Такой подбор весьма трудоемок и результат нестабилен во времени. Новые возможности обеспечивает цифровая компенсация температурной погрешности. В этом случае температурные поправки можно вводить с очень высокой точностью, определяемой только погрешностью измерения температуры и погрешностью таблицы поправок. Измерение температуры

Основные характеристики ряда промышленных кварцевых генераторов

| № п/п | Название, тип | Разработчик | Частота (МГц), относительная погрешность | Питание: напряжение (В), мощность (Вт) |
|-------|-------------------------------|----------------------------------|--|---|
| 1 | Сонет, термостатированный | Омский НИИ приборостроения | 10, 10^{-8} | 12, 0.3 |
| 2 | Астра, термостатированный | То же | 10, 5×10^{-8} | 12, 0.25 |
| 3 | Фиалка, термокомпенсирован. | То же | 10, 10^{-6} | 12, 0.02 |
| 4 | ГК-36-ТК, термокомпенсирован. | Фирма "Морион", Ст.-Петербург | 10, 2×10^{-6} | 12, 0.036 |
| 5 | ГК-88-ТК, термокомпенсирован. | То же | 10, 2×10^{-6} | 12, 0.036 |
| 6 | ГК-52-П, термокомпенсирован. | То же | 10, 10^{-5} | 5, 0.005 |
| 7 | VFT8SM, термостатированный | Фирма ECM Electronics, США | 10, $5 \cdot 10^{-9}$ (0°C) | 12 (5), 0.15 (0°C) |

можно производить с высокой точностью с помощью кварцевого термометра. Таблица температурных поправок может определяться с высокой точностью для каждого кварцевого резонатора и храниться в памяти компьютера.

Известно хранирующее устройство на основе кварцевого генератора с термокомпенсацией [3], в котором температура определяется цифровым методом, код преобразуется в постоянное напряжение, изменяющее частоту генератора в нужную сторону. Интересной особенностью устройства является использование одного двухмодового кварцевого генератора. Одна мода является относительно термостабильной, а другая — термозависимой. Это позволяет исключить разность температур между кварцами в двухкварцевом хранирующем устройстве с термокомпенсацией. Однако в рассматриваемом устройстве [3] качество стабилизации зависит от глубины цифро-аналоговой обратной связи и качества подбора ее элементов. При изменениях напряжения питания и скачках температуры возможна нестабильная работа системы и колебательные переходные процессы, что приведет к краткосрочной нестабильности частоты. Такая работа хранирующего устройства является недопустимой.

Известно также хранирующее устройство, применяемое в области радиосвязи при условии, что эталонная частота, поступающая от GPS, временами отсутствует [4]. Устройство содержит

кварцевый генератор, совмещенный с датчиком температуры, эталон частоты (GPS), контроллер и синтезатор частоты. Контроллер включает микропроцессор, умножитель частоты, компаратор, пропорциональный интегратор и блок формирования поправки частоты. Устройство работает следующим образом. Заранее определяется зависимость частоты кварцевого генератора от температуры (в виде полинома третьей степени) и от времени (в виде линейной функции). Коэффициенты этих функций записываются в память микропроцессора. Сигналы от GPS и от кварцевого генератора через умножитель частоты подаются на компаратор, с выхода которого сигнал сравнения через пропорциональный интегратор подается на блок формирования поправки частоты. Сигналы от датчика температуры и от кварцевого генератора подаются на микропроцессор, с выхода которого управляющий сигнал поступает также на блок формирования поправки частоты. С выхода блока формирования поправки частоты сигналы поступают на синтезатор, в котором формируется выходной сигнал устройства. В те моменты времени, когда имеется связь со спутником и сигнал от GPS поступает в контроллер, в нем в режиме реального времени происходит сравнение опорной частоты с сигналом GPS и вырабатывается частотная поправка, компенсирующая расхождение сигналов. Одновременно производится уточнение коэффициентов температурной и временной зависимостей.

В моменты времени, когда сигналы от GPS отсутствуют, по сигналам от датчика температуры и известным этим коэффициентам вычисляется поправка частоты кварцевого генератора, которая формируется блоком формирования поправки частоты.

Недостаток этого устройства состоит в том, что используемое в нем техническое решение предполагает выработку стабильного частотного сигнала в режиме реального времени непрерывно. В результате этого устройство содержит большое количество энергопотребляющих элементов (быстродействующий микропроцессор, умножитель, блок формирования поправки частоты, синтезатор частоты), что приводит к существенным энергетическим затратам. Такое устройство далеко не всегда применимо в автономных системах, в которых экономия энергии является очень актуальной. Кроме того, описываемое устройство предполагает коррекцию поправок временного дрейфа на небольших отрезках времени и неэффективно, если сеанс разрыва связи с GPS составляет несколько часов.

С точки зрения экономии энергии питания гораздо более выгодным является метод регистрации всей необходимой информации о частоте и влияющих факторах в течение автономного сеанса работы системы с последующим после окончания автономного сеанса переносом информации и обработкой в мощный компьютер.

По такому принципу работает система описанная, например, в [5]. Это устройство, содержит опорный генератор тактовых импульсов (ОГТИ), дополнительный генератор тактовых импульсов (ДГТИ), реверсивный счетчик, кодировщик, делитель частоты, триггер, схему дифференцирования и регистратор. Устройство работает следующим образом. До проведения геофизических исследований определяют температурные зависимости частот ОГТИ и ДГТИ, находят зависимость частоты ОГТИ от разности этих частот $f(\Delta F)$ и записывают в память регистратора. При проведении геофизических исследований определяют разность частот ОГТИ и ДГТИ как функцию автономного времени донной станции $\Delta F(T_A)$ и записывают в регистратор. После проведения исследований по известной зависимости $f(\Delta F)$ и измеренной разности частот ОГТИ и ДГТИ определяют частоту ОГТИ как функцию времени донной станции $f(T_A)$ и затем вычисляют и вводят временную поправку τ по формуле:

$$\tau(T) = \int_0^T [f(T_A) / f_0 - 1] dT_A, \quad (1)$$

где f_0 — номинальная частота ОГТИ, T — текущее время.

Один из недостатков этого устройства состоит

в том, что компенсируется только температурная погрешность временной привязки регистрируемой информации. Вместе с тем имеются и другие причины ухода частоты ОГТИ (старение кварца, изменение напряжения питания и др.). В результате ошибка определения временной привязки может стать весьма большой, особенно если время автономной работы превышает несколько суток. Другой недостаток состоит в том, что сигнал, пропорциональный температуре, в прототипе реализуется не оптимальными с точки зрения экономии энергии методами.

Задача, которая стояла перед авторами данной работы, заключалась в повышении точности временной привязки информации автономной информационно-измерительной системы и снижении ее энергопотребления.

МЕТОД И УСТРОЙСТВО ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ХРОНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Разработанная АИИС [6] имеет два конструктивных варианта исполнения и устроена следующим образом (рис. 1). Она содержит: опорный генератор тактовых импульсов (ОГТИ) 1, дополнительный генератор тактовых импульсов (ДГТИ) 2, делитель частоты 3, управляемый счетчик импульсов 4, кодировщик 5, цифровой регистратор 6, компьютер 7, эталон частоты (времени) (GPS) 8, микропроцессор 9, выходы ОГТИ 10 (тактовые импульсы частотой F) и ДГТИ 11 (тактовые импульсы частотой f), счетный 12 и управляющий 13 входы счетчика импульсов 4, информационные входы 14 и 15 и вход 16 тактовых импульсов цифрового регистратора 6, управляющий вход 17 и информационный выход 18 цифрового регистратора, информационный вход 20 регистратора, порты компьютера 7 — порт 19 для подключения эталонного сигнала от GPS, порт 21 для подключения шины управления регистратора к входу 17 и порт 22 для подключения к информационному выходу 18 регистратора. На рисунке обозначены условные границы автономного контейнера 23 для устройства по первому варианту (штрихпунктирная линия), условные границы автономного контейнера для устройства по второму варианту 24 (штриховая линия).

На базе микропроцессора 9 реализованы делитель частоты 3, управляемый счетчик импульсов 4 и кодировщик 5. Выход 10 ОГТИ параллельно подключен к счетному входу 12 счетчика 4, кодировщику меток времени 5 и тактовому входу 16 регистратора 6. Выход 11 ДГТИ подключен через делитель частоты 3 к управляющему входу счетчика импульсов 4, выход которого подключен к входу 14 регистратора. Выход кодировщика 5 подключен к информационному входу 15 регистратора.

Счетчик 4 находит число импульсов частоты F_i за период τ , где τ равно m/f_i . Эта процедура эквивалентна определению отношения частот F_i и f_i . Действительно, с помощью счетчика 4 определяется число периодов T_i частоты F_i за время τ , т. е. отношение $\tau/T_i = mF_i/f_i$. Эти результаты вводятся в цифровой регистратор 6 и хранятся вместе с регистрируемыми данными. Одновременно с помощью кодировщика 5 определяется и записывается в регистратор код условного времени регистрации данных t_{yi} , соответствующий текущей частоте ОГТИ. Параллельно через информационный вход 19 на регистратор 6 поступает текущая информация от измерительных приборов и датчиков (на рис. 1 они не показаны).

По первому варианту устройства, в i -е моменты времени из памяти регистратора считываются условное время регистрации данных t_{yi} и значение $n_i = mF_i/f_i$. По этим данным и заранее снятой и записанной в регистратор (или компьютер) табличной зависимости $F = F(F/f)$ вычисляются последовательно вначале значения $F_i = F(n_i)$ опорной частоты, а затем уточненные по температуре значения каждого i -го интервала времени t'_i по формуле

$$t'_i = \sum_1^i n_j / F(n_j), \quad i = 1, \dots, k, \quad (2)$$

где k — номер конечного интервала. При этом промежуточные табличным значения $F(n_j)$ уточняются путем интерполяции.

После окончания сеанса автономной работы эталон частоты подключается к компьютеру; от эталона частоты вводится точное время t_k , соответствующее окончанию регистрации; определяется разница между точным (эталонным) t_k и вычисленным t'_k конечными временами регистрации и путем интерполяции вводятся временные поправки во все i -е моменты времени.

По второму варианту устройства, после окончания сеанса и введения точного времени t_k из памяти регистратора в компьютер считываются массивы t_{yi} и $n_i = mF_i/f_i$. По этим данным и заранее снятой и записанной в регистратор (или компьютер) табличной зависимости $F = F(F/f)$ вычисляются уточненные по температуре значения каждого i -го интервала времени t'_i по формуле (2). После окончания сеанса автономной работы компьютер с подключенным к нему эталоном частоты подключается к регистратору; от эталона частоты вводится точное время t_k , соответствующее окончанию регистрации, и по тому же алгоритму, что в случае первого способа хронирования определяются временные поправки в i -е моменты времени.

В случае использования линейной интерполя-

ции формула вычисления временных поправок для обоих вариантов хронирования имеет вид

$$\Delta t_i = (t'_k - t_k) \cdot i / k. \quad (3)$$

При работе устройства по первому варианту компьютер помещен в автономный контейнер. В некоторых случаях он для уменьшения потребления энергии может быть переведен в ждущий режим с пониженным потреблением. При этом он переключается на режим вычислений каждый раз, когда изменение температуры (т. е. отношение F_i/f_i) превысит некоторое минимальное наперед заданное пороговое значение. В этом случае он определяет температурную поправку к опорной частоте и i -му значению времени. Момент изменения температуры определяется либо в микропроцессоре 9, либо в компьютере в ждущем режиме. Компенсация дрейфа опорной частоты по первому способу осуществляется частично в режиме реального времени (температурные поправки), частично после окончания сеанса (поправки на временной и режимный дрейф). Такой режим оправдан в тех случаях, когда изменение температуры в течение автономного режима незначительно. Это имеет место, например, в случае донной геофизической станции, автономный контейнер которой лежит на дне океана при температуре около 0°C , а изменения температуры обычно находятся в пределах $\pm 0.01^\circ\text{C}$ и менее.

При работе по второму варианту компьютер находится вне контейнера. В этом случае потребление энергии минимально, а результаты хронирования получаются путем вычислений на основе сохраненных в регистраторе данных после окончания сеанса (поправки на температурный дрейф, и на временной, и режимный дрейфы).

В некоторых случаях перед введением стартового значения времени юстируют зависимость $F(F/f)$. Для этого, используя сигналы эталона частоты, определяют начальную частоту F_0 опорного генератора и начальное значение отношения F_0/f_0 , по которым уточняют зависимость $F(f)$ и $F(F/f)$. Эту операцию проводят, когда операция калибровки давно не проводилась, а температурный режим условий, в которых производится юстировка, достаточно стационарен.

Положительный эффект от использования предлагаемого технического решения достигается тем, что при вычислении температурных поправок используется экономичный режим определения текущего значения температуры по отношению частот F/f . Нетрудно видеть, что отношение F/f с высокой точностью (до температурных изменений частоты F , составляющих несколько миллионных долей) пропорционально периоду частоты f . Поэтому зависимость $F(F/f)$ эквивалентна зависимости $F(T_f)$, где T_f — период частоты f .

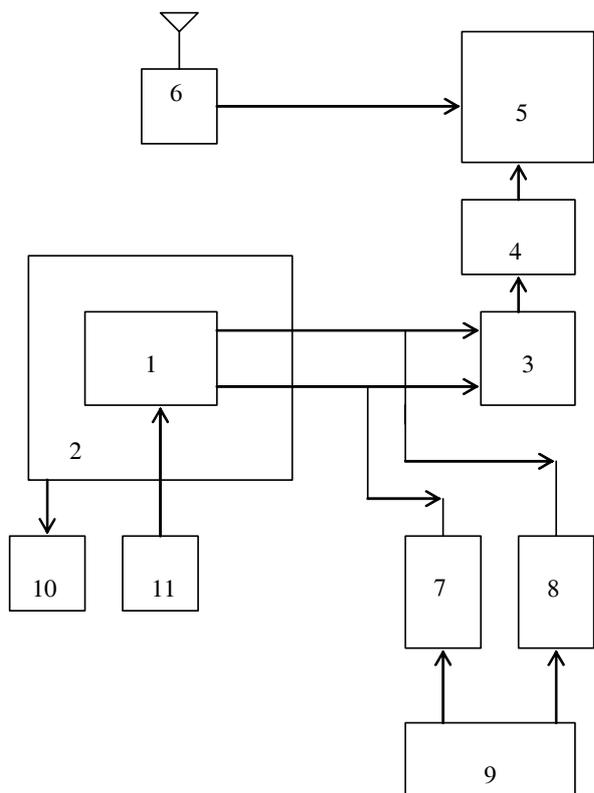


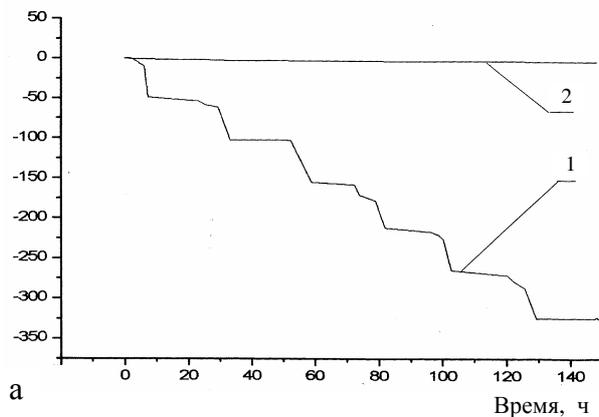
Рис. 2. Блок-схема установки для испытания компенсированного кварцевого генератора. 1 — кварцевый генератор; 2 — регулируемый термостат; 3 — электронный ключ; 4 — счетчик импульсов; 5 — компьютер; 6 — GPS; 7, 8 — частотомеры; 9 — эталон частоты; 10 — измеритель температуры; 11 — регулируемый источник питания

Введение эталона частоты в систему и использование его в неавтономной части системы дает возможность вводить временные поправки в хромирование без дополнительного потребления энергии источника автономной части системы. Эти поправки вносятся после проведения сеанса, что технически в большинстве случаев является вполне приемлемым.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ПРЕДЛОЖЕННЫХ МЕТОДОВ

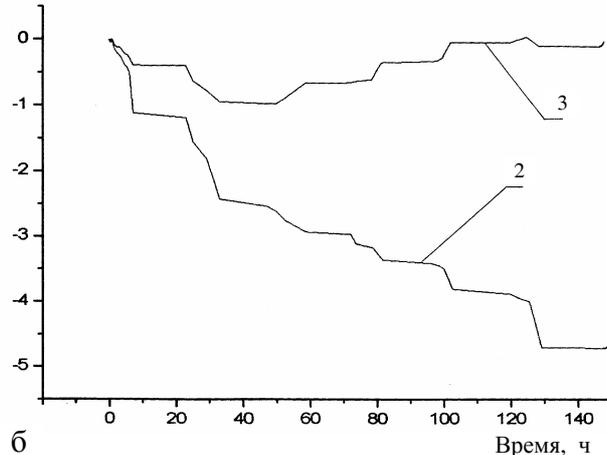
Для проверки эффективности разработанного устройства был проведен эксперимент, в котором имитировалась автономная работа образца предлагаемой системы с помощью установки рис. 2. Контейнер системы, изготовленной по данному техническому решению, помещался в термокамеру, в которой поддерживался температурный режим,

Погрешность, мс



а

Погрешность, мс



б

Рис. 3. Ошибки хромирования информации и их компенсация: без компенсации (а, кривая 1), с компенсацией температурной погрешности (а, кривая 2 и б, кривая 2 — в разных масштабах), с компенсацией температурной погрешности и временного дрейфа (б, кривая 3)

близкий тому, который имеет место в случае работы донной геофизической станции. С момента начала автономного режима температура в течение 3 часов снижалась с 21.5 °С до 0 °С (погружение станции), затем выдерживалась при температуре, близкой к 0 °С, в течение 5 суток (работа на дне) и повышалась в течение 3 часов до 23 °С (подъем станции).

Результаты эксперимента приведены на графиках рис. 3. На рис. 3, а показаны: кривая 1 — зависимость ошибки времени хромирования от текущего времени без использования дополнительного (термозависимого) генератора тактовых импульсов и без использования временной компенсации погрешности и кривая 2 — зависимость ошибки времени хромирования от текущего времени с ис-

пользованием дополнительного генератора тактовых импульсов, но без использования временной компенсации погрешности. На рис. 3, б кривая 3 — зависимость ошибки времени хронирования от текущего времени с использованием дополнительного генератора тактовых импульсов и временной компенсации погрешности по предлагаемому техническому решению. Негладкий характер изменения ошибки хронирования объясняется несколькими факторами, среди которых влияние суточных циклов изменения температуры воздуха в помещении и дневные замеры экспериментальных точек (периодические, ступенчатые изменения), погрешность калибровочной зависимости $F(F/f)$ и др.

Из графиков следует, что максимальная ошибка времени хронирования в случае, если не используется ни температурная, ни временная компенсации, составила в эксперименте 340 мс. Использование температурной компенсации по дополнительному (термозависимому) генератору 2 снизило ошибку времени хронирования с 340 до 4.7 мс, а использование временного пропорционального сдвига по описанному выше алгоритму снизило погрешность до 1 мс. Относительная погрешность составила при этом около $2 \cdot 10^{-9}$.

Потребляемая мощность системы хронирования, реализованной по предлагаемому техническому решению, составила около 0.02 Вт, в то время как упомянутые прототипы потребляют около 0.3 Вт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанное устройство защищено патентом [6] и освоено серийным производством в ОКБ океанологической техники РАН (ОКБ ОТ РАН). На момент написания данной статьи изготовлено и работает около сотни донных геофизических станций, оснащенных описанной системой.

В качестве примера применения описанного хронизирующего устройства рассмотрим донную сейсмостанцию АДСС-1 разработки ОКБ ОТ РАН [7]. Станция предназначена для целей сейсморазведки и регистрации сигналов землетрясений в диапазоне частот выше 5 Гц. Перед началом сеанса автономной работы подключают эталон частоты к компьютеру и синхронизируют начало работы опорного генератора станции; в течение сеанса (работа на дне) в каждом i -м такте определяется отношение частот F_i к f_i и записывается значение F_i / f_i в цифровой регистратор, считываются из регистратора значения F_i / f_i и соответствующие коды времени, по которым вычисляются с помощью компьютера поправленные по температуре значения времени i -го такта. По окончании сеанса регистрации, после подъема станции

к компьютеру подключают эталон частоты и определяют временные поправки по разности между поправленным по температуре временем последнего такта устройства и временем эталона частоты с использованием интерполяции, например линейной. Поправленные по температуре значения времени i -го такта определяются в течение сеанса или после сеанса, считывая из регистратора значения F_i / f_i и соответствующие коды времени.

Сейсмостанция АДСС-1 прошла натурные испытания в Черном море и в Индийском океане в 2004 г. и в настоящее время успешно используется в ряде геофизических организаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуцалюк В.М. и др. Автономная донная геофизическая станция // Геофизический журнал. 1979. Т. 1, № 3. С. 23–28.
2. Левченко Д.Г., Мацневский С.А. Широкополосная цифровая донная сейсмостанция // Сейсмические приборы. 2000. Вып. 32. С. 52–68.
3. Багаев В.П., Косых А.В., Ленетаев А.Н., Самойленко В.Ф. Двухмодовый кварцевый генератор с цифровой термокомпенсацией // Электросвязь. 1988. № 3. С. 48–51.
4. Патент США № 6472943, 29 окт. 2002 г.
5. Левченко Д.Г., Мухин В.Л. Экономичные часы для автономных донных сейсмостанций // Сб. матер. Всес. школы "Технич. средства и методы исслед. мирового океана". Геленджик: ИО АН СССР, 1989. С. 58–59.
6. Левченко Д.Г., Носов А.В., Парамонов А.А., Симонов В.Н. Устройство и способ (варианты) хронирования информации автономной информационно-измерительной системы. Патент РФ № 2277298, 22.09.2004.
7. Зубко Ю.Н., Левченко Д.Г., Леденев В.В., Парамонов А.А. Современные донные станции для сейсморазведки и сейсмологического мониторинга // Научное приборостроение. 2003. Т. 13, № 4. С. 70–82.

*Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН,
Москва (Левченко Д.Г., Носов А.В.)*

*ОКБ океанологической техники РАН, Москва
(Парамонов А.А.)*

*Московский инженерно-физический институт
(Симонов В.Н.)*

Материал поступил в редакцию 13.04.2007.

DATA TIMER IN AN AUTONOMOUS INFORMATION-MEASURING SYSTEM

D. G. Levchenko¹, A. V. Nosov¹, A. A. Paramonov², V. N. Simonov³

¹*Shirshov Oceanology Institute RAS, Moscow*

²*Design Bureau of Oceanologic Equipment RAS, Moscow*

³*Moscow Engineering and Physical Institute*

The device described applies to the field of instrument engineering, namely, to the methods for timing data detected in autonomous information-measuring systems (AIMS), e.g., in sea-bottom geophysical stations. The purpose of the work was to increase the accuracy of AIMS data timing at limited power consumption.

Оригинал-макет подготовлен
Беленковым В.Д.

Лицензия ИД № 02980 от 06 октября 2000 г.
Подписано к печати 25.08.2007 г. Формат 60×90 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 12. Уч.-изд. л. 10.3. Тираж 100 экз. Тип. зак. № 270. С 96

Санкт-Петербургская издательская фирма "Наука" РАН
199034, Санкт-Петербург, Менделеевская линия, 1
main@nauka.nw.ru www.naukaspb.spb.ru