

УДК 537. 86:621.317.445

**В.Я. Молочков**

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, Владивосток, ул. Луговая, 52б

## **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОГРЕШНОСТИ ЦИФРОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ САЙРОЛОВНЫХ СУДОВ**

*Приводятся теоретические и экспериментальные результаты исследования погрешности предлагаемого цифрового измерителя для натурных измерений температуры морской воды без остановки судна при поиске скоплений сайры. Приводится анализ приборной погрешности измерителя и анализ влияния внешних условий на измерительный прибор и измерительные цепи, имеющие размеры до 200 м – изменения температуры, электромагнитных полей электрооборудования судов, изменения напряжения питания. Приводятся результаты выбора схемных решений измерителя на погрешность измерителя.*

**Ключевые слова:** суда, поиск рыбы, измерители, исследование.

**V.Y. Molochkov**

## **THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF COMPONENT ERROR DIGITAL TEMPERATURE METER FOR FISHING SHIPS**

*The article presents the results of theoretical and experimental studies of error of the proposed digital meter for field measurements of sea temperatures without stopping the ship in finding clusters of saury. The analysis of instrument error meter and analysis of the impact of external conditions on the measuring device and measuring circuits with up to 200 meters – changes in temperature, electromagnetic fields of electrical ships change the supply voltage. The results of the selection circuitry meter to meter accuracy.*

**Key words:** ships, fish search, measurement, research.

### **1. Назначение измерителя и решаемые им задачи**

При поиске сайровых скоплений информация о температуре морской воды является одним из условий эффективности поиска. Это обусловлено тем, что сайра при температуре морской воды вблизи 11 °С концентрируется в стаю и поднимается к поверхности воды.

Возможность непрерывно, без остановки судна, контролировать температуру воды в процессе поиска сайры существенно повышает эффективность поиска сайры.

Следует отметить, что не существует промышленно выпускаемых образцов такого измерителя, приспособленного для монтажа в корпусе судна, работающего в сложных условиях механических, электрических, температурных и электромагнитных помех, с существенно, до сотен метров, удаленном измерителе от табло индикации температуры. Поэтому при разработке такого измерителя вопрос исследования составляющих погрешности является актуальной теоретической и экспериментальной задачей. Она требует проведения теоретических, лабораторных и натурных исследований составляющих погрешностей измерителя, результат которых и обуславливает выбор всех составляющих измерителя в процессе его разработки [1–3].

### **2. Составляющие приборной погрешности измерителя**

Индивидуальный подход к определению погрешности измерителя обусловлен сложностью условий эксплуатации измерителя в данной конкретной задаче: влияния величины сопротивления жил кабеля и изменение их от изменения температуры на точность измерения, возможность изменения длины кабеля, соединяющего датчик и измерительный блок в боль-

ших пределах (до 200 м) без нарушения градуировки прибора; влияния на показание прибора больших электромагнитных полей от работающего судового силового электрооборудования, характерных для современного судна; необходимость тепловой развязки чувствительного элемента датчика от корпуса датчика и корпуса судна для устранения влияния тепловой инерции корпуса датчика и корпуса судна на быстродействие и показание измерителя; влияния механических нагрузок и вибраций, обусловленных потоком забортной морской воды при движении судна.

Составляющие погрешности измерителя состоят из приборной погрешности, погрешности, обусловленной применяемой схемой измерений и элементной базой, и погрешности от влияния внешних условий на составляющие части измерителя, разнесенные на значительные расстояния – датчик температуры расположен в корпусе судна, а измерительная часть и индикация температуры – на мостике судна.

Основная составляющая приборной погрешности предложенной схемы измерителя определяется применяемым в данном измерителе аналого-цифровым преобразователем (АЦП и выбранная схема входной измерительной цепи с компенсацией изменения сопротивления подводящих от датчика проводов).

Приборная погрешность от АЦП состоит из трех групп. Первая группа определяет статическую точность АЦП, вторая – динамическую, третья – влияние внешних рабочих условий.

Составляющие статической погрешности АЦП состоят из устраняемой и неустраняемой частей погрешности. Рассмотрим их по порядку, при этом примем во внимание только составляющие, вносящие существенный вклад в погрешность для данного типа сигнала и неустраняемые схемотехнически. Отбросим составляющие, учитываемые при разработке АЦП и определяющие, по сути, его паспортные данные.

Погрешность квантования является методической погрешностью, которая вызвана конечным значением шага квантования, обычно равная  $\pm 1/2$  единицы младшего разряда (ЕМР). Это неустраняемая погрешность, определяется разрядностью АЦП. Определяется на стадии разработки измерителя и выбора типа АЦП для применения в измерительной схеме. Для заданной точности измерения температуры, а именно, десятые доли градуса, и диапазона температур до 50 °С требуется как минимум 12-разрядный АЦП, который и применен в измерителе (K572ПВ1).

Погрешность смещения нуля – часть общей погрешности АЦП, характеризующая параллельный сдвиг всей характеристики квантования реального АЦП по отношению к идеальной форме. Она особенно актуальна для медленно изменяющихся сигналов, таких как в данном случае температура. Данная погрешность сведена в разработанном устройстве практически к нулю применением АЦП с двойным интегрированием.

Погрешность коэффициента передачи – величина, характеризующая отклонение крутизны усредненной амплитудной характеристики квантования АЦП от крутизны идеальной прямой. Данная погрешность также определяется типом применяемого АЦП и является неустраняемой, однако ее оценка показывает пренебрежимо малое ее влияние на погрешность измерителя при применении указанного выше АЦП.

Возникновение динамических погрешностей связано с дискретизацией сигналов, изменяющихся во времени. Исследованы следующие параметры АЦП, определяющие его динамическую погрешность.

Влияние частоты дискретизации АЦП на погрешность измерения определяется скоростью изменения измеряемого параметра и для данных измерений является не критичным параметром ввиду весьма малой скорости изменения температуры.

Время преобразования, время выборки (стробирования) также привязаны к скорости изменения измеряемого параметра и также не критичны в данном случае.

Следует отметить, что выбор современной элементной базы позволяет существенно, до пренебрежимо малых значений, снизить чисто приборную погрешность, что нельзя сказать о влиянии внешних условий, здесь в условиях судна нужно предпринять ряд мероприятий.

### 3. Оценка составляющих погрешности от внешних влияний

Внешние условия характеризуют АЦП с точки зрения его способности работать при изменении температуры окружающей среды, влажности, давления, при различных механических воздействиях и т. д.

Эта группа параметров характеризует АЦП как «черный ящик» со стороны входа-выхода, а также по отношению к различным внешним факторам.

К параметрам входных сигналов относятся их абсолютные и относительные значения, полярность, форма, спектры и др., к параметрам источника входных сигналов – выходное сопротивление и его изменения, амплитудная характеристика, ее стабильность и др. Параметры источников опорных и питающих напряжения включают в себя их номиналы, допуски стабильности напряжений, нагрузочные способности источников.

В соответствии с требованиями к точностным параметрам измерителя в качестве АЦП с двойным интегрированием на один цикл преобразования, что снижает до пренебрежимо малых значений ряд описанных выше погрешностей АЦП.

Временная диаграмма работы аналоговой части АЦП показаны на рис. 1.

Здесь АК – периоды автокомпенсации смещения нуля; ИНТ – период интегрирования; РИ – период разряда.

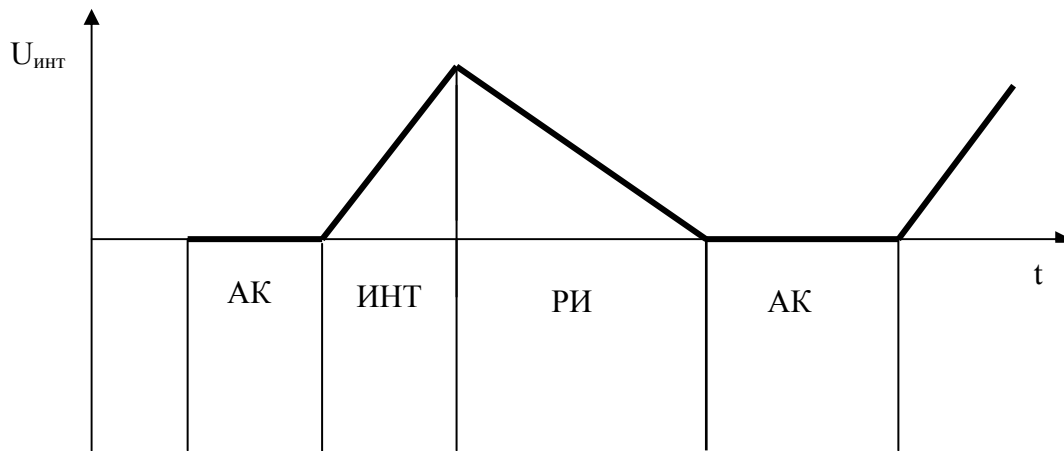


Рис. 1. Временная диаграмма работы аналоговой части АЦП  
Fig. 1. The timing diagram of the analog part of the ADC

Диапазон входного сигнала определяется внешним опорным напряжением из соотношения  $U_{\text{IRN}} = \pm 1,999 U_{\text{REF}}$ . Текущие показания цифрового табло соответствуют  $1000 U_{\text{IRN}}/U_{\text{REF}}$ .

Для входного сигнала и источника опорного напряжения выбрана схема с дифференциальными входами. Это позволяет измерять напряжения, «плавающие» относительно источника питания, и устранять синфазные помехи в цепях входного сигнала и опорного источника. Данное решение также резко снижает требования к стабильности питающего напряжения.

Зависимости погрешности разработанного измерителя от величины опорного и питающих напряжений приведены на рис. 2.

Период циклов преобразования связан с тактовой частотой  $f_{\tau}$  соотношением  $T_c = 16 \cdot 10^3 / f_{\tau}$ . Для достижения максимального подавления сетевой помехи тактовая частота выбрана кратной частоте сети.

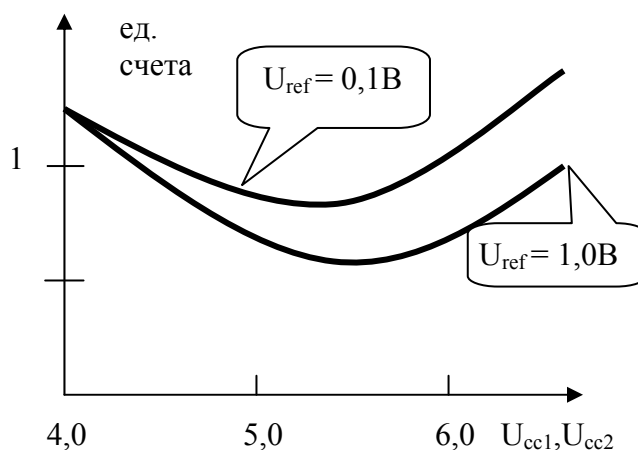


Рис. 2. Составляющая погрешности от опорного и питающих напряжений  
 Fig. 2. Error component of the reference and supply voltages

Приращение напряжения на выходе ОУ за время интегрирования равно

$$\Delta U_{\text{инт}} = U_{\text{IRN}} N_{\text{и}} / R_{\text{инт}} C_{\text{инт}} f_{\text{т}}.$$

Из данных выкладок можно видеть, что амплитуда выходного напряжения буферного усилителя и ОУ интегратора не должна превышать 2В – границы линейного участка выходной характеристики ОУ.

Отсюда вытекает условие, определяющее оптимальное значение элементов интегратора:

$$R_{\text{инт}} C_{\text{инт}} = (2 \dots 3) U_{\text{IRN}} \cdot 10^3 / f_{\text{т}}.$$

При равенстве напряжения на выходе интегратора в конце фазы ИНТ входному напряжению длительность фазы ИНТ равна  $R_{\text{инт}} C_{\text{инт}}$ . Задание длительности фазы ИНТ и подсчет длительности фазы РИ производится цифровым счетчиком, подсчитывающим периоды тактовой частоты с предварительным делением ее на 4. Соответственно длительность фазы ИНТ составляет  $10^3$  тактов счета, т.е.  $N_{\text{и}} = 1000$ , а длительность фазы РИ может изменяться от 0 до 1999 тактов счета.

В рассматриваемой схеме благодаря ООС в течение фазы автокомпенсации происходит заряд конденсатора интегратора  $C_{\text{инт}}$  до напряжения, равного  $U_{\text{см.к}}$ . Этот компенсирующий заряд сохраняется неизменным в течение фаз ИНТ и РИ. В результате погрешность за счет  $U_{\text{см.к}}$  полностью устраняется [4, 5].

Аналогично устраняется влияние напряжения смещения нуля усилителей. В этом случае компенсирующий заряд накапливается на конденсаторах  $C_{\text{а.к}}$ ,  $C_{\text{инт}}$ . Погрешность за счет напряжения смещения нуля и его температурного дрейфа, приведенная ко входу, не превышает 10 мкВ.

Общая экспериментальная температурная составляющая погрешности в единицах 12-разрядного измерительного преобразователя приведена на рис. 3. Она соответствует погрешности не более 0,2 %, что равно для данного измерителя 0,05 °С.

Предположим, что имеет место некоторое напряжение смещения нуля  $U_{\text{см.к}}$ . В результате фаза РИ прервется не в момент времени, когда выходное напряжение интегратора  $U_{\text{вых.и}} = 0$ , а когда  $U_{\text{вых.и}} = U_{\text{см.к}}$ . При отсутствии схемы АК это привело бы к ошибке в определении входного напряжения на  $U_{\text{см.к}}$  или на  $2000 U_{\text{см.к}} / U_{\text{инт}}$  единиц счета.

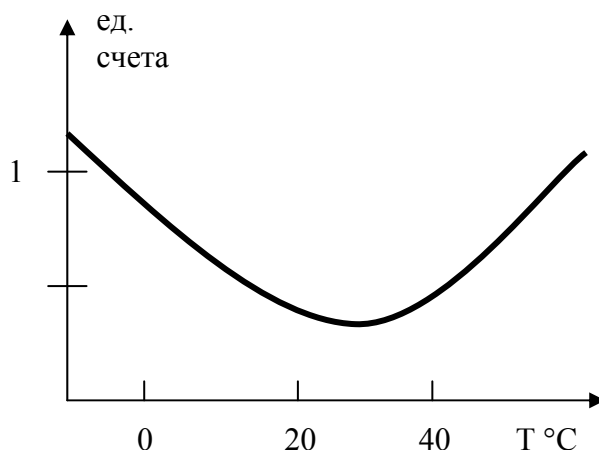


Рис. 3. Температурная составляющая погрешности  
Fig. 3. The temperature component of error

Более сложно происходит автокомпенсация заряда на конденсаторе  $C_{\text{инт}}$ , если к моменту начала фазы АК на нем имеется неустановившийся заряд. Нескомпенсированное напряжение на  $C_{\text{инт}}$  не превышает, как правило, одной единицы счета.

Остаточное напряжение в случае перегрузки преобразователя по входу определится из соотношения

$$U_{\text{ост}} = 0,63 U_{\text{нк}} / (1 + C_{\text{а.к}} / C_{\text{инт}})^2.$$

Для уменьшения погрешности, вызываемой нескомпенсированным напряжением, желательно выбирать  $C_{\text{а.к}} > C_{\text{инт}}$ . В частности, при  $C_{\text{а.к}} / C_{\text{инт}} = 2$  остаток напряжения будет менее  $0,1 U_{\text{нк}}$ .

Данные схемотехнические решения, наличие дифференциального входа и высокая степень ослабления синфазных сигналов позволяют осуществлять измерения на значительном удалении от преобразователя в условиях действия электромагнитных помех, а также при работе преобразователя от нестабилизированных источников питания.

Применение трехпроводной схемы подключения удаленного датчика – термометра сопротивления позволяет исключить влияние изменения сопротивления соединительной цепи (до 200 м) при изменении окружающей температуры на показания измерителя.

#### 4. Результаты работы

Анализ и экспериментальные исследования позволили создать для работы на судне измеритель, имеющий следующие характеристики:

- диапазон измеряемой температуры от  $-4\text{ °С}$  до  $+50\text{ °С}$ ;
- дискретность измерения температуры  $0,1\text{ °С}$ ;
- основная погрешность измерения  $0,1\text{ °С}$ ;
- наибольшая длина соединительного кабеля от датчика до измерительного прибора до 200 м, при сопротивлении жил кабеля не более 5 Ом;
- питание измерителя: 220 В, 50 Гц без специальных требований к стабильности напряжения и частоты.

Учитывая требования Российского Морского Регистра судоходства и особые условия промыслового рейса, при разработке и конструировании датчика и измерительного блока измерителя принимались во внимание следующие требования:

- длительная работа датчика в химически агрессивной среде – морской воде;
- минимальный электрохимический потенциал корпуса датчика по отношению к корпусу судна;
- тепловая развязка чувствительного элемента от основной массы корпуса датчика и корпуса судна для уменьшения тепловой постоянной – уменьшения инерции датчика;
- герметичность как погружной части, выступающей снаружи корпуса судна, так и внутренней, выходящей внутрь судна;
- разборность датчика изнутри корпуса судна без нарушения герметизации корпуса судна;
- хороший контакт чувствительного элемента датчика с морской водой при одновременной достаточной его защите от механических воздействий;
- защита от электромагнитных наводок цепей датчика при значительной удаленности датчика от измерительного блока;
- стандартная градуировка и взаимозаменяемость датчиков (гр.23).

В Дальрыбвтузе в разное время изготовлены две партии приборов – 46 и 18 шт. для сайроловных судов АО ХК «ДМП». Испытания в промысловых рейсах показали их работоспособность, эффективность и правильность выбранных решений.

### Список литературы

1. Молочков, В.Я. Микропроцессорные системы управления техническими средствами рыбопромысловых судов / В.Я. Молочков. – М.: Моркнига, 2013. – 362 с.
2. Кирюха, В.В. Измерительные преобразователи в системах автоматики / В.В. Кирюха. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2007. – 218 с.
3. Кирюха, В.В. Индуктивные датчики и их применение для решения задач оперативного контроля толщины слоя коррозии / В.В. Кирюха // Науч. тр. Дальрыбвтуза. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2014. – Т. 31. – 133 с.
4. Молочков, В.Я. Структурные модели динамических процессов в исследовании технических средств судов / В.Я. Молочков, И.Д. Молочкова // Науч. тр. Дальрыбвтуза. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2014. – Т. 32. – 128 с.
5. Громов, В.С. Полупроводниковые интегральные датчики температуры. ГРНТИ:43 / В.С. Громов и др. – М., 2010. – 14 с.

**Сведения об авторе:** Молочков Валентин Яковлевич, кандидат технических наук, доцент, e-mail: val\_mol@mail.ru.