



УДК 681.518.2:681.325.5

© В. В. Алексеев, Е. О. Грубо, П. Г. Королев, 2010

## СТРУКТУРЫ И АЛГОРИТМЫ КОРРЕКЦИИ ОСНОВНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРЯЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ

*Алексеев В. В.* – д-р техн. наук, проф., завкафедрой «Информационно-измерительные системы и технологии», тел. (812) 234-93-93, e-mail: VVAlekseyev@mail.ru; *Грубо Е. О.* – инженер по метрологии отдела сопровождения научных исследований, тел. (812) 234-37-95, e-mail: helen.grubo@gmail.com; *Королев П. Г.* – канд. техн. наук, доц. кафедры «Информационно-измерительные системы и технологии», тел. (812) 234-93-93, e-mail: pgkorolev@gmail.com (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

Рассматриваются вопросы организации измерительных каналов со встроенными средствами коррекции основной погрешности и алгоритмы коррекции, использующие измеряемую величину и вспомогательные измерения.

The issues of structural organization of measuring channels with built in total error means and algorithms of compensation using measured value and auxiliary measurements in automatic measurement-and-compensation devices are addressed.

*Ключевые слова:* измерительный канал, компактная измерительная система, метрологическая надежность, подконтрольная эксплуатация, регистратор параметров средства измерения.

Одним из основных показателей качества средств измерений (СИ) является метрологическая надежность (МН) – свойство СИ сохранять во времени метрологические характеристики (МХ) в пределах установленных норм. МН определяется характером и темпом изменения нормируемых МХ. Сведения о МН СИ необходимы для правильной организации его метрологического обслуживания, а также назначения сроков очередной поверки.

Для определения величины межповерочного интервала (МПИ) необходимо иметь сведения о характере изменения основной погрешности в течение всего срока службы СИ. С этой целью в [1], помимо традиционных форм и процедур метрологического обслуживания, введено такое требование, как использование современных методов индивидуального прогнозирования изменений метрологических и точностных характеристик. Для прогнозирования

ния метрологического ресурса необходимо построить математическую модель временных изменений МХ СИ.

Для построения математической модели изменения МХ во времени необходимо использовать статистические данные, полученные в ходе испытаний на надежность, либо данные, полученные в результате проверок. Результаты испытаний на надежность, проводимые в лабораторных условиях, не могут дать объективной информации о деградации МХ СИ в реальных условиях эксплуатации под воздействием внешних факторов. Также надо отметить, что заметные изменения МХ наступают по истечении длительных временных интервалов, сравнимых с десятками месяцев эксплуатации и более, в то время как испытания на надежность длятся не более двух-трех месяцев.

Характер временных измерений МХ СИ может быть весьма разнообразным даже у однотипных СИ. Поэтому для повышения достоверности этих исследований должны быть учтены индивидуальные особенности и условия эксплуатации СИ. В силу указанных причин представляется целесообразным организовать работы по изучению надежности приборов непосредственно у потребителей. С целью снижения затрат, связанных с суммарной стоимостью владения (поверочные и ремонтные работы), а также временных затрат на проведение поверочных работ, повышения эффективности использования СИ, необходимо оснастить прибор системой встроенного метрологического контроля временных изменений МХ [2]. Данные, накопленные в течение МПИ, позволят дополнить процедуру поверки операцией прогнозирующего контроля.

Под операцией прогнозирующего контроля понимается методика определения метрологического ресурса СИ на основе данных, полученных от подсистемы встроенного метрологического контроля.

Встроенный метрологический контроль внутренних параметров СИ организуется за счет внедрения в схему СИ аппаратной и программно-алгоритмической избыточности.

Аппаратная избыточность включает в себя имеющуюся подсистему автоматической коррекции погрешностей на базе метода образцовых сигналов и подсистемы вспомогательных измерений. Программно-алгоритмическая избыточность реализует регистрацию результатов автоматической коррекции и вспомогательных измерений.

В состав функций подсистемы встроенного метрологического контроля временных изменений МХ входит:

- Мониторинг компонент прибора, влияющих на точность;
- формирование образцовых сигналов по выбранному алгоритму;
- вычисление поправок;
- регистрация отклонений, характеризующих деградацию компонент измерительного канала;
- введение поправок;
- выдача зарегистрированных параметров по запросу.



На рис. 1 представлена структура СИ с подсистемой встроенного метрологического контроля. К1 и К2 – коммутаторы, ПИП – первичный измерительный преобразователь, НП<sub>икк</sub> – нормирующий преобразователь, входящий в состав основного измерительного канала, НП<sub>і</sub> – *i*-й-нормирующий преобразователь подсистемы вспомогательных измерений, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ВУ – вычислительное устройство, УОС – устройство образцовых сигналов, ИП – источник питания, ИКТ – измерительный канал температуры, РПСИ – регистратор параметров средства измерения,  $U_1 \dots U_n$  – напряжение в *i*-ой реперной точке.

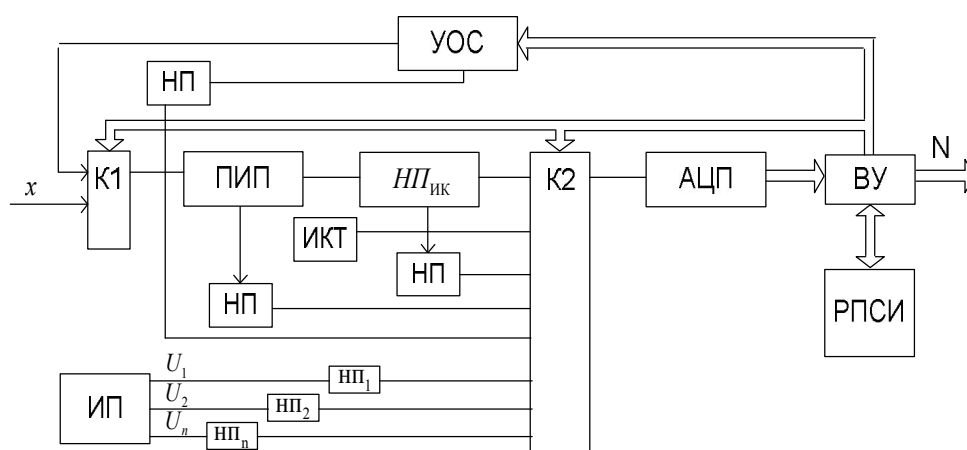


Рис. 1. Структура СИ с подсистемой встроенного метрологического контроля

Результаты основных и вспомогательных измерений хранятся в энерго-независимой памяти. При поверке накопленные в течение межповерочного интервала данные от подсистемы встроенного метрологического контроля будут доступны поверителю. Это позволит провести в процессе поверки анализ текущего состояния экземпляра СИ и назначить дату очередной поверки, основываясь на фактическом состоянии СИ.

Под результатами основных измерений понимаются результаты измерения физической величины, для которой создано данное средство. Под результатами вспомогательных измерений понимаются результаты измерения величин, влияющих на точность результата основных измерений:

- Уровни напряжения источников питания аналогового тракта СИ;
- уровни напряжения в контрольных точках схемы аналогового тракта СИ;
- температура в районе размещения аналоговой части измерительного канала.

#### **Подсистема коррекции погрешностей на базе метода образцовых сигналов**

Одной из основных операций автоматической коррекции является измерение погрешности и выработка соответствующего корректирующего значе-

ния. Метод образцовых сигналов позволяет оценить изменение во времени основной инструментальной погрешности СИ.

Под основной инструментальной погрешностью измерительного канала понимается приведенная к выходу погрешность  $\Delta_o$ , обусловленная отклонением реальной статической характеристики преобразования (РСХП)  $y$  в нормальных условиях от номинальной характеристики преобразования (НСХП)  $y_N$ :

$$\Delta_o(x) = y - y_N = \sum_{i=1}^n a_i x^{i-1} - \sum_{i=1}^m a_{iN} x^{i-1} = \sum_{i=1}^n b_i x^{i-1}, \quad (1)$$

где  $b_i = a_i - a_{iN}$ ,  $a_i$  – коэффициенты полинома, описывающего РСХП,  $a_{iN}$  – коэффициенты полинома, описывающего НСХП

В качестве модели основной погрешности СИ без коррекции обычно рассматривается модель вида [3]:

$$\Delta_o(t) = \Delta_{os}(t) + \dot{\Delta}_o(t) + \dot{\Delta}_{os}(t), \quad (2)$$

где  $\Delta_{os}(t)$  – систематическая составляющая погрешности СИ (частотный спектр  $\Delta_{os}(t)$  лежит в инфранизкочастотной области);  $\dot{\Delta}_o(t)$  – центрированная случайная величина, параметры которой остаются неизменными;  $\dot{\Delta}_{os}(t)$  – случайная составляющая погрешности, характеризующая временные изменения основной погрешности СИ. Составляющая  $\dot{\Delta}_o(t)$  может иметь весьма широкий частотный спектр. Для упрощения анализа этой составляющей удобно выделить в ней две составляющие – низкочастотную  $\dot{\Delta}_{os}(t)$ , обусловленную временным дрейфом комплектующих СИ, и высокочастотную  $\dot{\Delta}_{os}(t)$ , обусловленную «шумом». Таким образом, модель (2) примет вид:

$$\Delta_o(t) = \Delta_{os}(t) + \dot{\Delta}_{os}(t) + \dot{\Delta}_{os}(t) + \dot{\Delta}_{os}(t). \quad (3)$$

Разделение основной погрешности на составляющие по частотному спектру является необходимым при рассмотрении методов автоматической коррекции. Это связано с тем, что данные методы хорошо устраняют коррелированные составляющие погрешности, увеличивая при этом дисперсию некоррелированных составляющих в два раза [4], [5]. Объединим составляющие, перечисленные в (3), в две группы:

а) погрешности, представляющие собой слабо коррелированные или вообще некоррелированные случайные функции времени:  $\dot{\Delta}_{os}(t)$  и  $\dot{\Delta}_{os}(t)$  (коэффициент корреляции  $r_{\Delta} \approx 0$ );

б) погрешности, представляющие собой сильно коррелированные случайные функции времени  $\Delta_{os}(t)$  и  $\dot{\Delta}_{os}(t)$  (коэффициент корреляции  $r_{\Delta} \approx 1$ ).

В результате получим:

$$\Delta_o(t) = \bar{\Delta}(t) + \dot{\Delta}(t), \quad (4)$$

где  $\bar{\Delta}(t)$  – нестационарная случайная функция времени (коррелированная составляющая погрешности);  $\dot{\Delta}(t)$  – стационарная случайная центрированная эргодическая функция времени, имеющая нормальный закон распределения (некоррелированная составляющая погрешности).

Основной операцией автоматической коррекции является измерение по-



грешности и выработка соответствующего корректирующего значения. При этом реальная характеристика преобразования остается неизменной. Скорректированный результат измерения  $x_j^*$  входной величины  $x_j$  будет складываться из промежуточного результата измерений  $x_j^{*1}$  и значения поправки  $z(x_j)$ , выбранной в зависимости от значения  $x_j$ :

$$x_j^* = x_j^{*1} + z(x_j). \quad (5)$$

Для осуществления идеальной коррекции величина поправки должна быть равна основной погрешности СИ в заданной точке диапазона измерения с обратным знаком:

$$z(x_j) = -\Delta_0(x_j). \quad (6)$$

Алгоритмы коррекции на базе образцовых сигналов делятся на две большие группы: методы коррекции на основе образцовых воздействий, формируемых с использованием измеряемой величины, и методы коррекции без использования измеряемой величины. В первом случае корректируемый результат используется в качестве основы для формирования образцовых воздействий, при этом каждое основное измерение сопровождается процедурой коррекции. При реализации второй группы методов образцовые воздействия устанавливаются заранее в соответствии с диапазоном измерения входной измеряемой величины. В данной статье рассматриваются методы коррекции с использованием измеряемой величины.

В зависимости от структурных, алгоритмических, схемотехнических и конструктивных решений построения основного измерительного канала СИ, а также условий применения и воздействующих дестабилизирующих факторов, возможно несколько решений формирования и введения корректирующего воздействия.

Алгоритм коррекции КП2(И): корректирующий сигнал формируется на входе первичного измерительного преобразователя (рис. 2).

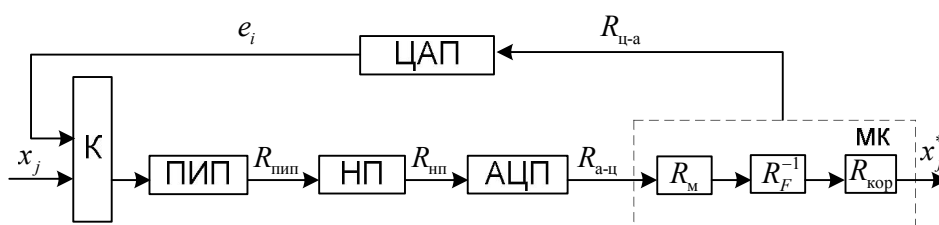


Рис. 2. Алгоритм КП1(И)

Реализация данного способа возможна для средств измерений, измеряющих электрические величины, образцовые меры которых можно реализовать в рабочих условиях эксплуатации СИ. Алгоритм КП1(И) содержит следующие операции:

1. В режиме «Измерение» в соответствии с уравнением измерения фиксируется значение  $x_j^i$ , соответствующее текущему значению измеряемой величины  $x_j(t)$ :

$$x_j^i = R_F^{-1} R_M R_{a-u} R_{\text{нп}} R_{\text{ппп}} x_j(t), \quad (7)$$

где  $R_{\text{ппп}}$  – оператор первичного преобразования измеряемой величины,  $R_{\text{нп}}$  – оператор масштабирования (нормализация),  $R_{a-u}$  – оператор аналого-цифрового преобразования,  $R_M$  – оператор масштабирования,  $R_F^{-1}$  – оператор, реализующий обратное функциональное (градуировочное) преобразование.

2. В режиме «Калибровка» при помощи  $R_{u-z}$  – оператора цифро-аналогового преобразования – измеренное значение  $x_j^i$  преобразуется в образцовое значение  $e_i$ :

$$e_i = R_{u-z}(x_j^i)$$

3. Значения  $e_i$  измеряются в соответствии с уравнением измерения (7):

$$e_i^i(t) = R_F^{-1} R_M R_{a-u} R_{\text{нп}} R_{\text{ппп}} e_i(t). \quad (8)$$

4. Далее в соответствии с уравнением (1) вычисляются  $\Delta_o$ :

$$\Delta_o = e_i - x_j^i$$

5. Коррекция результата измерений с учетом поправки:

$$x_j^* = R_{\text{кор}} x_j^i(t), \quad (9)$$

где  $R_{\text{кор}}$  – оператор введения корректирующего значения.

Состав полной погрешности в соответствии с уравнением измерения (9) и (4) запишется в следующем виде:

$$\Delta x_j^* = \Delta_{\text{н.о.}} x_j^* + \Delta_r x_j^* + \Delta_k x_j^*$$

где  $\Delta_{\text{н.о.}} x_j^*$  – неучтенный остаток основной погрешности;  $\Delta_r x_j^*$  – погрешность подсистемы коррекции;  $\Delta_k x_j^*$  – погрешность квантования. Погрешности вычисления, возникающие из-за ограниченности разрядной сетки вычислительного устройства, принимаются пренебрежимо малыми, и в данной статье не рассматриваются.

Алгоритм КП2(И) является модификацией КП1(И) в условиях ограничения по времени. В состав процедуры коррекции не входят вычислительные операции, что позволяет существенно экономить время (рис. 3).

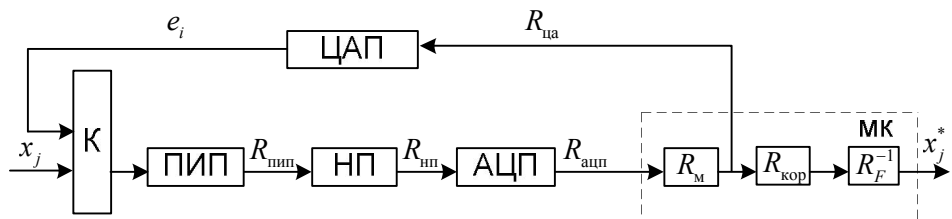


Рис. 3. Алгоритм КП2(И)



1. Уравнение измерений (7) преобразуется к виду:

$$c_j^* = R_M R_{a-u} R_{нп} R_{ппп} x_j(t),$$

где  $c_j^*$  – промежуточное значение входной измеряемой величины, соответствующее текущему значению измеряемой величины  $x_j(t)$ .

Операция 2 аналогична алгоритму КП1(И).

3. 
$$e_j^*(t) = R_M R_{a-u} R_{нп} R_{ппп} e_t(t).$$

Операции 4, 5 и 6 аналогичны алгоритму КП1(И).

7. 
$$x_j^* = R_F^{-1} R_{кор} c_j^*(t). \quad (10)$$

Состав полной погрешности в соответствии с уравнением измерения (10) и (4) запишется в следующем виде:

$$\Delta x_j^* = \Delta_{н.о} x_j^* + \Delta_r x_j^* + \Delta_k x_j^*$$

Алгоритм КП3(И): корректирующий сигнал формируется на входе первичного измерительного преобразователя (рис. 4). Данный метод реализуется в том случае, если создать образцовую меру входной величины во всем диапазоне изменения измеряемой величины затруднительно или не представляется возможным (например, СИ, измеряющие температуру).

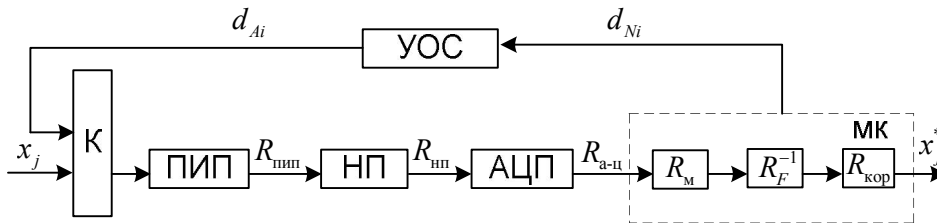


Рис. 4. Алгоритм КП3(И)

1. В режиме «Измерение» в соответствии с уравнением измерения фиксируется значение  $x_j^*$ , соответствующее текущему значению измеряемой величины  $x_j(t)$ :

$$x_j^*(t) = R_F^{-1} R_{кор} R_{a-u} R_{нп} R_{ппп} x_j(t).$$

2. В режиме «Калибровка» по функции обратной номинальной характеристике преобразования находится номинальное значение измеряемой величины  $x_n = f^{-1}(x_j^*)$ .

3. Затем, с помощью оператора сравнения  $R_c$ , выбираются две ближайшие к  $x_n$  реперные точки  $x_{н1}$  и  $x_{н2}$ , удовлетворяющие условию:  $x_{н1} \leq x_n \leq x_{н2}$ .

4. Значения  $x_{н1}$  и  $x_{н2}$  последовательно подаются на вход СИ и измеряются в соответствии с уравнением измерения:

$$x_{н2}^*(t) = R_F^{-1} R_{кор} R_{a-u} R_{нп} R_{ппп} x_{н2}(t)$$

$$x_{н1}^*(t) = R_F^{-1} R_{кор} R_{a-u} R_{нп} R_{ппп} x_{н1}(t)$$

5. Определяются приведенные к выходу погрешности СИ:

$$\Delta(x_{1t}) = x_{1t}^* - x_{1t}, \quad \Delta(x_{0t}) = x_{0t}^* - x_{0t}.$$

6. По формуле линейной интерполяции вычисляется значение поправки:

$$z(x_H) = R_B(\Delta(x_{0t}), \Delta(x_{1t})).$$

$R_B$  – вспомогательный оператор вычисления  $z(x_H)$ :

$$z(x_H) = \Delta(x_{1t}) + \frac{x_H - x_{1t}}{x_{0t} - x_{1t}} [\Delta(x_{0t}) - \Delta(x_{1t})]$$

7. Результат измерений с учетом поправки формируется как:

$$x_j^*(t) = R_{\text{кор}} x_j'(t). \quad (11)$$

Состав полной погрешности в соответствии с уравнением измерения (11) и (4) запишется в следующем виде:

$$\Delta x_j^* = \Delta_{\text{н.о.}} x_j^* + \Delta_{\text{а}} x_j^* + \Delta_{\text{в}} x_j^* + \Delta_{\text{к}} x_j^*,$$

где  $\Delta_{\text{а}} x_j^*$  – погрешность аппроксимации.

### Вспомогательные измерения

Коррелированные составляющие погрешности СИ уменьшаются коррекцией. Для уменьшения коррелированной составляющей погрешности следует повышать быстродействие системы коррекции и уменьшать длительность режима измерения.

В ряде случаев возможность использования методов автоматической коррекции ограничивается ростом некоррелированной составляющей результирующей погрешности [5]. Влияние некоррелированной составляющей погрешности СИ в режиме коррекции усиливается, ее дисперсия увеличивается вдвое. Увеличение дисперсии можно снизить статистической обработкой погрешности в режиме коррекции.

Применение статистической обработки погрешности в режиме коррекции ограничено двумя обстоятельствами. С одной стороны, с увеличением времени коррекции, затрачиваемым на выполнение статистических измерений, возрастает динамическая погрешность. С другой стороны, погрешность  $\bar{\Delta}$  является нестационарной случайной функцией времени, поэтому если число  $N$  выбрано таким, что в интервале  $T = N\tau$  нарушено условие  $r_{\bar{\Delta}} \approx 1$ , то функция  $\bar{\Delta}$  в указанном интервале может изменяться по различным законам, например, монотонно возрастать. При этом коррелированная составляющая погрешности, полученная в результате усреднения, может быть больше, чем такая же составляющая при единичном измерении, сделанном в начале интервала  $T$ .

Случайная составляющая результирующей погрешности, точнее, ее СКО, и, иногда, вид закона распределения обнаруживают зависимость от некоторых влияющих величин, прежде всего температуры и напряжения питания. Для повышения достоверности системы коррекции, а также метрологической надежности СИ, необходимо контролировать не только системати-





ческую, но и случайную составляющую погрешности, а также иметь возможность оценить влияющие на нее факторы. С этой целью в состав СИ вводятся дополнительные измерительные каналы в наиболее ответственных «контрольных» узлах схемы.

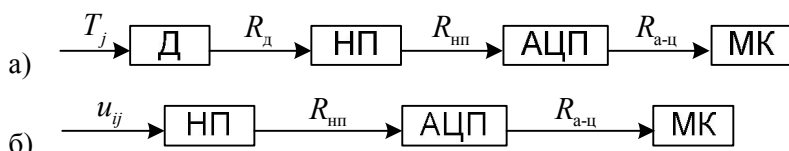


Рис. 5. Структура измерительных каналов вспомогательных измерений

На рис. 5 представлены структурные схемы измерительных каналов, осуществляющих вспомогательные измерения температуры  $T_j$  (рис. 5а) и напряжения в контрольных точках схемы  $u_{ij}$  (рис. 5б). Уравнения измерений соответственно:

$$T_j^*(t) = R_F^{-1} R_{\text{нп}} R_{\text{а-ц}} R_{\text{д}} T_j(t),$$

$$u_{ij}^*(t) = R_F^{-1} R_{\text{нп}} R_{\text{а-ц}} u_{ij}(t),$$

где  $R_{\text{д}}$  – оператор первичного преобразования измеряемой величины (в качестве ПИП выступает термодатчик),  $R_F^{-1}$  – оператор градуировочного преобразования.

Расширение функций СИ, позволяющих оценивать эффективность встроенной системы автоматической коррекции погрешностей за счет вспомогательных измерений, а также учитывать деградацию МХ компонент, входящих в состав измерительного тракта, будет полезно как для владельца СИ, так и для разработчика.

Полученная таким образом информация дает возможность владельцу с помощью специализированного программного обеспечения осуществлять прогнозирование изменений МХ и оценивать скорости уменьшения их запасов относительно установленных допусков, корректировать межповерочные интервалы с учетом индивидуальных особенностей СИ. В результате более эффективно использовать СИ за счет повышения достоверности измерительной информации. При наличии обратной связи с изготовителем разработчик получает возможность использовать информацию, полученную при контроле МХ, для уточнения МХ разрабатываемых СИ, совершенствования схемных и алгоритмических решений, выбора элементной базы, обеспечения качества производства, тем самым повышая метрологический уровень СИ.

#### Библиографические ссылки



1. *ГОСТ Р 22.2.05–94*. Техногенные аварии и катастрофы. Нормируемые метрологические и точностные характеристики средств контроля и испытаний в составе сложных технических систем, формы и процедуры их метрологического обслуживания.
2. *ГОСТ Р 8.565–96* ГСИ. Метрологическое обеспечение эксплуатации атомных станций. Основные положения.
3. *ГОСТ 8.009–84* ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
4. *Бромберг Э. М., Куликовский К. Л.* Тестовые методы повышения точности измерений. – М.: Энергия, 1978.
5. *Земельман М. А.* Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств. – М.: Изд-во стандартов, 1972.
6. *Измерительно-вычислительные системы* / Алексеев В. В., Королев П. Г., Комаров Б. Г. – СПб: Технолит, 2008.