

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО РЕСУРСА АНАЛОГОВЫХ БЛОКОВ ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Т. И. Чернышова, В. В. Третьяков

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»,
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; crems@crems.jesby.tstu.ru*

Ключевые слова: аналоговый блок; информационно-измерительная система; коррекция; математическая модель; метрологическая надежность; метрологическая характеристика; метрологический ресурс; образцовый сигнал.

Аннотация: Предложен метод повышения метрологического ресурса как основного показателя метрологической надежности аналоговых блоков информационно-измерительных систем путем коррекции их выходных сигналов. Метод основан на принципе подачи образцовых сигналов и позволяет осуществлять коррекцию математической модели изменения во времени метрологической характеристики с учетом влияния внешних факторов.

Информационно-измерительные системы (ИИС) находят широкое применение на этапе проектирования и производства любой продукции всех отраслей промышленности, а также используются при научно-исследовательской деятельности. Сложность и ответственность выполняемых ими функций обуславливают необходимость обеспечения высокого уровня точности значения выходного сигнала. Любые ИИС имеют тенденцию к снижению во времени точности измеряемых физических величин [1 – 4]. Как результат, потребитель, осуществляющий контроль измеряемых величин, получает недостоверную информацию, что в итоге может иметь крайне негативные последствия, в зависимости от области применения ИИС. Происходит это потому, что элементная база (ЭБ) ИИС имеет тенденцию к старению и, следовательно, – к изменению значений своих параметров. Таким образом, имеет место ухудшение основного показателя качества любого измерительного средства – метрологической надежности (МН), характеризующей способность его сохранять во времени метрологические характеристики (МХ) в пределах установленных норм [1 – 4]. В качестве основной МХ, как правило, рассматривается погрешность измерения δ .

Как показывает практика [4], метрологическая надежность ИИС определяется МН аналоговых блоков (АБ), входящих в измерительный канал ИИС. Процесс старения ИИС ускоряется при воздействии на них внешних факторов, таких как температура, влажность, давление, радиационный фон и т.п. Причем влияние экстремальных температур и повышенной влажности на скорость старения ЭБ АБ ИИС изучалось в известных научных трудах [1, 4], в которых разработаны математические модели (ММ) изменения МХ АБ ИИС при заданных условиях эксплуатации. Однако проблеме изучения влияния таких дестабилизирующих факторов как внешний радиационный фон и давление окружающей среды на параметры ЭБ, уделялось мало внимания. Требуется детальное изучение комплексное воздей-

ствие всех вышеуказанных факторов на скорость старения ЭБ АБ ИИС, на состояние МХ и метрологическую надежность ИИС в целом.

Таким образом, основной исследовательской целью является разработка метода оценки и, в итоге, повышения показателей МН ИИС с учетом комплексного воздействия указанных внешних факторов. Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач, одной из которых является задача разработки метода коррекции значения выходного сигнала АБ ИК ИИС. Реализация этого метода позволяет повысить МН ИИС. В данной работе предлагается один из методов решения задачи коррекции погрешности выходного сигнала АБ на этапе эксплуатации, реализация которого позволит также корректировать многофакторную ММ изменения МХ АБ ИИС, разрабатываемую на этапе проектирования ИИС. Указанная математическая модель позволяет оценить значения параметров метрологической надежности ИИС в произвольные моменты времени при различных условиях эксплуатации.

Метод предполагает введение в ИИС подсистемы контроля изменений МХ с течением времени и с учетом воздействия вышеуказанных внешних факторов. Реализация такой подсистемы предполагает применение микроконтроллера, осуществляющего запись и обработку полученных экспериментальных данных. Очевидна необходимость наличия подсистемы измерения и записи значений внешних дестабилизирующих факторов. Реализовывать такую подсистему предлагается автономно с использованием соответствующих датчиков и преобразователей измерительных сигналов.

Данный подход обеспечит следующие преимущества:

- контроль МХ ИИС в течение полного срока службы с учетом влияния дестабилизирующих факторов;
- возможность построения и корректировки ММ изменения МХ во времени с учетом влияния внешних факторов;
- контроль скорости изменения МХ и возможность прогнозирования времени наступления метрологического отказа;
- рациональное планирование сроков проведения проверок и профилактических работ.

Суть метода заключается в вычислении погрешности измерения с последующим вычислением соответствующего корректирующего значения выходного сигнала. Основная относительная погрешность вычисляется путем подачи на вход исследуемого АБ образцового сигнала $x_{oi}(t)$, значение которого заведомо известно [5]. Контроллер сравнивает измеренное значение сигнала $y_{oi}(t)$ и истинное значение данного сигнала $x_{oi}(t)$ с последующим вычислением основной относительной погрешности. Структурная схема такой системы приведена на рис. 1, который иллюстрирует принцип работы подсистемы образцовых сигналов.

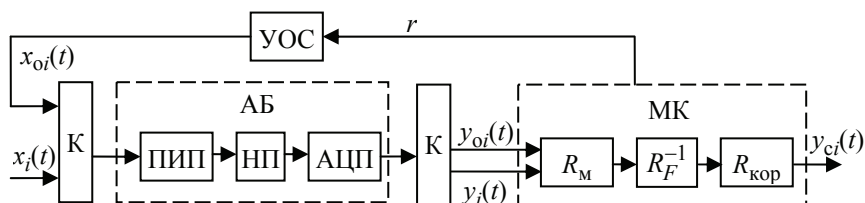


Рис. 1. Структурная схема подсистемы подачи образцовых сигналов:

К – коммутатор; ПИП – первичный измерительный преобразователь; НП – нормирующий преобразователь; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; МК – микроконтроллер; УОС – устройство образцовых сигналов; R_M – оператор масштабирования; R_F^{-1} – оператор, реализующий обратное функциональное (градуировочное) преобразование; $R_{кор}$ – оператор коррекции

Принцип работы подсистемы подачи образцовых сигналов с последующей процедурой коррекции заключается в следующем. На коммутирующее устройство К одновременно подается образцовый сигнал $x_{oi}(t_i)$ и измеряемый сигнал $x_i(t_i)$, соответствующие моменту времени эксплуатации t_i . Далее оба этих сигнала преобразуются в исследуемом АБ. Необходимо отметить, что коммутатор К может быть как в составе АБ, так и в отдельном исполнении. В данном режиме на выходе АБ фиксируются измеренные значения образцового сигнала $y_{oi}(t_i)$ и исследуемого сигнала $y_i(t_i)$.

Далее вычисляется значение основной относительной погрешности измерения образцового сигнала $\delta_{oi}(t_i)$ по формуле

$$\delta_{oi}(t_i) = \frac{y_{oi}(t_i) - x_{oi}(t_i)}{x_{oi}(t_i)}, \quad i = 1, \dots, k, \quad (1)$$

где k – число временных сечений, в которых производится измерение.

Вычисленное значение $\delta_{oi}(t_i)$ используется оператором $R_{кор}$ для осуществления коррекции полученного на выходе АБ сигнала $y_i(t_i)$ по нижеприведенному алгоритму. В результате пользователь получает на выходе ИИС скорректированный сигнал $y_{ci}(t_i)$.

Поскольку известно, что значение основной относительной погрешности δ одинаково при измерении разных значений контролируемого параметра в определенном диапазоне (данное свойство характерно для любых ИИС), то, вычислив значения $\delta_{oi}(t_i)$ по образцовым сигналам $x_{oi}(t_i)$ в соответствии с (1), справедливо использовать эти значения основной относительной погрешности и для рабочего сигнала $x_i(t_i)$. То есть принимается, что $\delta_i(t_i) = \delta_{oi}(t_i)$. Тогда несложно вычислить действительное значение измеряемой величины $y_{di}(t_i)$. Из формулы

$$\delta_i(t_i) = \frac{y_i(t_i) - y_{di}(t_i)}{y_{di}(t_i)} \quad (2)$$

получаем

$$y_{di}(t_i) = \frac{y_i(t_i)}{\delta_i(t_i) + 1}.$$

Далее рассчитывается значение основной абсолютной погрешности $\Delta_i(t_i)$ по формуле

$$\Delta_i(t_i) = y_{di}(t_i) - y_i(t_i).$$

Рассчитанное значение $\Delta_i(t_i)$, соответствующее данному временному сечению t_i записывается в ПЗУ ИИС с целью дальнейшего анализа изменения МХ. Следует отметить, что при идеальной коррекции значение скорректированного выходного сигнала $y_{ci}(t_i)$ стремится к его действительному значению $y_{di}(t_i)$.

Следующим этапом является выработка соответствующей поправочной величины $z_i(y_i)$. При идеальной коррекции величина поправки должна быть равна абсолютной погрешности СИ в заданной точке диапазона измерения с обратным знаком. То есть, в данном случае

$$z_i(y_i) = -\Delta_i(t_i).$$

Далее проводится процедура коррекции с вычитанием поправочной величины $z_i(y_i)$ из значения измеренной величины $y_i(t_i)$, в результате чего на выходе получается скорректированное значение этой величины

$$y_{ci}(t_i) = y_i(t_i) - z_i(y_i).$$

Результирующее значение $y_{ci}(t_i)$ подается на устройства вывода информации – порты, индикаторы, мониторы и др.

Структурная схема подсистемы коррекции значения измеренного сигнала представлена на рис. 2.

Отметим, что утверждение об одинаковом значении основной относительной погрешности δ при измерении одного и того же параметра, но при разных его значениях справедливо только для ограниченного диапазона измерений. Поэтому при проектировании ИИС следует учитывать область ее применения и диапазон значений измеряемых величин. При широком диапазоне необходимо задать несколько значений образцовых сигналов. Их число определяется на этапе проектирования ИИС. При проведении процедуры коррекции выбирается образцовый сигнал, наиболее близкий по значению к измеренному сигналу.

Важным преимуществом использования описанной методики является возможность коррекции многофакторной ММ изменения во времени МХ АБ ИИС с учетом условий эксплуатации. Такая модель представляет собой совокупность аналитических зависимостей, полученных для функций изменения во времени математического ожидания $m_\delta(t)$, и функций, характеризующих изменение во времени границ отклонений $\psi_{\pm\sigma}(t)$ возможных значений МХ от ее математического ожидания $m_\delta(t)$, [4]

$$\begin{cases} m_\delta(\bar{\varphi}, t); \\ \psi_{\pm\sigma}(\bar{\varphi}, t) = m_\delta(\bar{\varphi}, t) \pm c \sigma_\delta(\bar{\varphi}, t), \end{cases} \quad (3)$$

где c – коэффициент, выбираемый в зависимости от уровня доверительной вероятности, $c = 3$ при $P = 0,9973$; $\bar{\varphi} = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m\}$ – вектор влияющих факторов; m – число влияющих факторов; $\sigma_\delta(\bar{\varphi}, t)$ – среднеквадратическое отклонение.

Модель (3) строится на этапе проектирования АБ ИИС на основе статистического моделирования с использованием параметров его элементной базы $\xi(t, T, F, E, P)$ [4]. В результате многофакторная ММ (3) примет вид

$$\begin{cases} m_\delta(t, T, F, E, P); \\ \psi_{\pm\sigma}(t, T, F, E, P) = m_\delta(t, T, F, E, P) \pm c \sigma_\delta(t, T, F, E, P), \end{cases} \quad (4)$$

где t – время, ч $\cdot 10^3$; T, F, P – температура, °С, влажность, %, и давление, атм, окружающей среды соответственно; E – радиационный фон, мкР/ч.

Отмечено, что система (см. рис. 2) фиксирует изменения МХ во времени, а также фиксирует параметры ОС, при которых данные изменения происходят. В результате реализации описанного выше алгоритма, система способна рассчитывать значение поправочной величины $\Delta\delta_i(t_i)$ для основной относительной

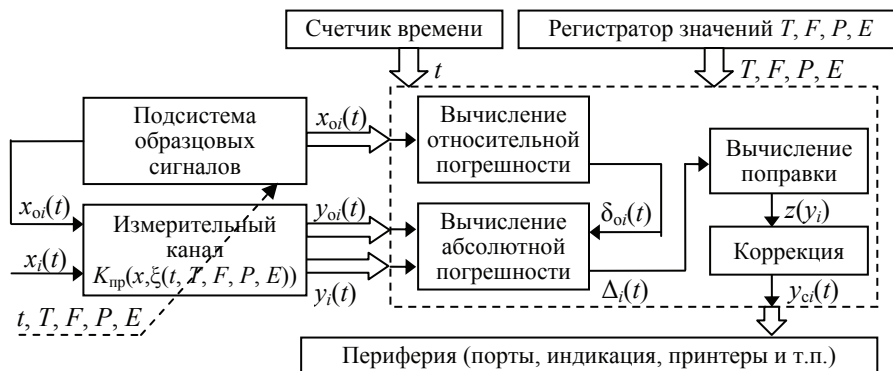


Рис. 2. Структура подсистемы коррекции выходного сигнала

погрешности $\delta_i(t_i)$ в заданном временном сечении t_i и при заданных внешних условиях T, F, P, E . Целесообразно принять, что $\Delta\delta_i(t_i) = \Delta m_\delta(t_i, T, F, P, E)$. И, таким образом, ИИС вносит поправку в значение МХ АБ на $\Delta m_\delta(t_i, T, F, P, E)$. Это позволяет корректировать многофакторную ММ (4).

Графическая иллюстрация процесса коррекции МХ АБ ИИС представлена на рис. 3. Рисунок 3, а иллюстрирует графические зависимости изменения во времени погрешности $\delta(t)$ под воздействием дестабилизирующих факторов, а также определяемое при этом значение метрологического ресурса t_p . На рисунке 3, б приведены результаты проведения процедуры коррекции. По достижению времени t_1 проводится коррекция МХ, в результате которой система вычисляет значение $\Delta\delta_1(t_1)$ и вычитает его из $\delta_1(t_1)$. Данная процедура проводится для каждого временного сечения t_i через интервал времени, соответствующий значению межповерочного интервала с вычислением соответствующей поправочной величины $\Delta\delta_i(t_i)$. Значение межповерочного интервала рассчитывается на этапе проектирования ИИС в зависимости от области ее применения.

Очевидно, что введение поправки в значение МХ $\Delta\delta_i(t_i)$ в моменты времени эксплуатации t_i , позволяет увеличить значение метрологического ресурса как основного показателя МН АБ ИИС.

Для реализации предлагаемого метода коррекции выходного сигнала АБ ИИС, необходимо фиксировать значения МХ, рассчитанные по многофакторной ММ (4) на этапе проектирования, а также значения метрологической характеристики, полученные в результате реализации метода с использованием образцовых сигналов на этапе эксплуатации. Также необходима запись значений параметров окружающей среды, соответствующих значениям МХ. Следовательно, в ИИС формируется база данных, содержащая все эти значения.

Таким образом, обобщая вышеизложенный подход, можно привести структурную схему ИИС с подсистемами коррекции и образцовых сигналов, представленную на рис. 4, где показан принцип функционирования предлагаемой информационно-измерительной системы. На вход измерительного канала (ИК) ИИС INPUT подается измеряемая контролируемая величина $x_i(t)$. Одновременно в ИК поступает образцовая величина x_{oi} от подсистемы образцовых сигналов (ПОС). После преобразования сигналов в ИК они оцифровываются посредством АЦП

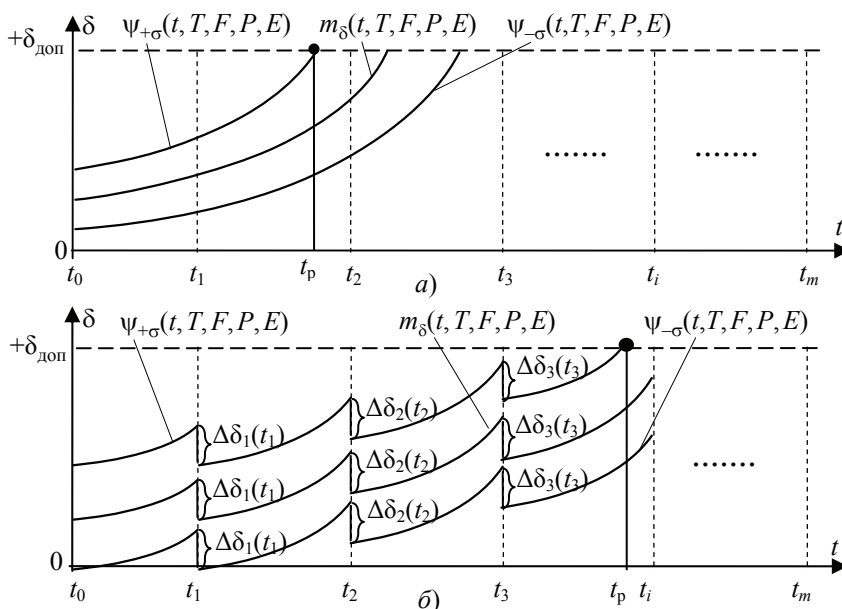


Рис. 3. Графическая иллюстрация коррекции модели изменения МХ АБ ИИС

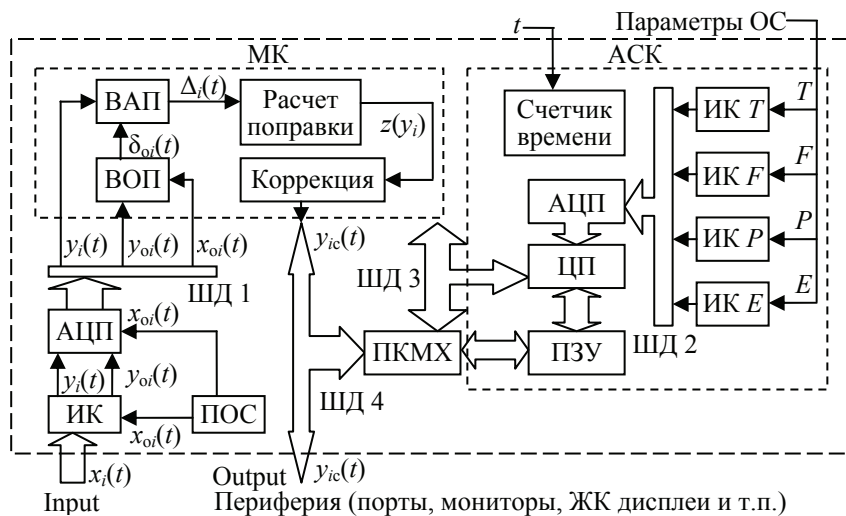


Рис. 4. Структура ИИС с многопроцессорной подсистемой образцовых сигналов и встроенной коррекции

и далее по шине данных (ШД) 1 поступают в микроконтроллер (МК) для дальнейшей обработки.

В контроллере реализуется алгоритмическим методом подсистема вычисления относительной погрешности (ВОП) δ_{oi} и подсистема вычисления абсолютной погрешности (ВАП) Δ_i . Далее контроллер определяет поправку $z(y_i)$, и скорректированный сигнал y_{ci} по ШД 4 подается на выход ИИС Output посредством соответствующего интерфейса.

Важную роль во всей системе играет автономная система контроля (АСК) внешних факторов. Данная подсистема измеряет значения T , F , P , E . Причем для каждого внешнего фактора предусмотрен соответствующий измерительный канал – ИК T , ИК F , ИК P и ИК E . Также имеет место счетчик времени t , позволяющий задать точки контроля. Измеренные значения коммутируются ШД 2 и поступают в АЦП для преобразования в двоичный код. Далее процессор ЦП 3 обрабатывает полученную информацию и производит запись значений в постоянное запоминающее устройство (ПЗУ). Через ШД 3 АСК непрерывно обменивается

данными с МК ИИС и подсистемой контроля метрологической характеристики (ПКМХ), которая, в свою очередь, также обменивается информацией с контроллером через ШД 4. Это необходимо для коррекции значений МХ, исходя из значений внешних влияющих факторов, и в дальнейшем – коррекции самой многофакторной ММ изменения МХ АБ ИИС.

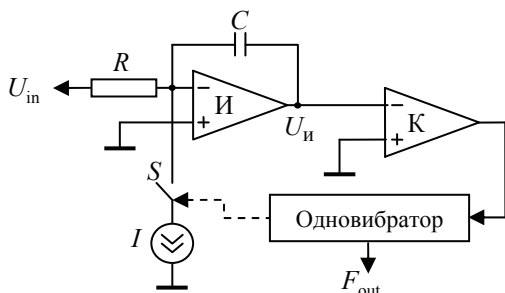


Рис. 5. Электрическая принципиальная схема ПНЧ:

- U_{in} – входная величина (напряжение), В;
- И и К – соответственно интегратор и компаратор, выполненные на операционных усилителях;
- R – входное сопротивление интегратора, Ом;
- U_i – выходное напряжение интегратора, В;
- C – емкость отрицательной обратной связи, мкФ;
- F_{out} – выходная величина (частота), Гц;
- I – источник тока, А; S – ключ

Предложенный метод повышения МН АБ ИИС путем коррекции их выходного сигнала рассмотрен на примере исследования преобразователя напряжение – частота (ПНЧ), входящего в состав ИК ИИС. Электрическая принципиальная схема данного преобразователя, представлена на рис. 5.

Приведем многофакторную ММ изменения МХ данного блока [4]

$$\left\{ \begin{aligned}
 \Psi_{-\sigma}(t, T, F, P, E) &= 2,1256 \cdot 10^{10} - 1,9295 \cdot 10^6 t - 3,3972 \cdot 10^9 T - 1,6991 \cdot 10^9 F + \\
 &+ 1,0623 \cdot 10^{10} P + 7,5896 \cdot 10^8 E - 6,1898 \cdot 10^3 tT - 3,0949 \cdot 10^3 tF - \\
 &- 9,6433 \cdot 10^5 tP - 2,5152 \cdot 10^4 tE + 23,7617 \cdot TFPE - 1,2618 \cdot 10^{-8} t^2 + \\
 &+ 4,7813 \cdot 10^7 T^2 + 1,1946 \cdot 10^7 F^2 + 5,3156 \cdot 10^9 P^2 + 1,5483 \cdot 10^5 E^2; \\
 m_{\delta}(t, T, F, P, E) &= 2,1261 \cdot 10^{10} - 1,929 \cdot 10^6 t - 3,3967 \cdot 10^9 T - 1,6986 \cdot 10^9 F + \\
 &+ 1,0628 \cdot 10^{10} P + 7,5901 \cdot 10^8 E - 6,1893 \cdot 10^3 tT - 3,0944 \cdot 10^3 tF - \\
 &- 9,6428 \cdot 10^5 tP - 2,5147 \cdot 10^4 tE + 23,7622 \cdot TFPE - 1,2613 \cdot 10^{-8} t^2 + \\
 &+ 4,7818 \cdot 10^7 T^2 + 1,1951 \cdot 10^7 F^2 + 5,3161 \cdot 10^9 P^2 + 1,5488 \cdot 10^5 E^2; \\
 \Psi_{+\sigma}(t, T, F, P, E) &= 2,1266 \cdot 10^{10} - 1,9285 \cdot 10^6 t - 3,3962 \cdot 10^9 T - 1,6981 \cdot 10^9 F + \\
 &+ 1,0633 \cdot 10^{10} P + 7,5906 \cdot 10^8 E - 6,1888 \cdot 10^3 tT - 3,0939 \cdot 10^3 tF - \\
 &- 9,6423 \cdot 10^5 tP - 2,5142 \cdot 10^4 tE + 23,7627 \cdot TFPE - 1,2608 \cdot 10^{-8} t^2 + \\
 &+ 4,7823 \cdot 10^7 T^2 + 1,1956 \cdot 10^7 F^2 + 5,3166 \cdot 10^9 P^2 + 1,5493 \cdot 10^5 E^2.
 \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Математическая модель (5) позволяет получить массив значений метрологического ресурса как основного показателя МН при различных сочетаниях выделенных внешних влияющих факторов. Для отслеживания процесса изменения МХ ИИС может быть построено множество графических интерпретаций для каждого из возможных комбинаций значений внешних факторов.

На рисунке 6, а представлена графическая иллюстрация ММ изменения во времени исследуемой метрологической характеристики для следующих условий эксплуатации: $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$; $F = 60 \%$; $P = 2 \text{ атм}$ и $E = 70 \text{ мкР/ч}$. Метрологический ресурс при этом составляет: $t_p = 32000 \text{ ч}$. Алгоритм процедуры коррекции проиллюстрирован на рис. 6, б. В результате значение метрологического ресурса увеличилось до 39000 ч. Таким образом, имеет место увеличение метрологической надежности на 22 %.

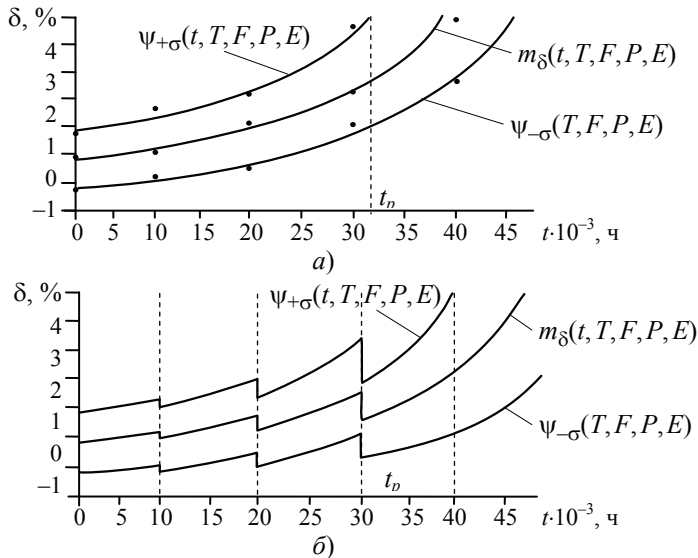


Рис. 6. Графические зависимости изменения во времени МХ ИИС

Следовательно, реализация предлагаемого алгоритма позволяет повысить метрологический ресурс АБ как основного показателя МН а также дает возможность пользователю выбрать оптимальные условия эксплуатации для ИИС, обеспечивающие требуемый уровень метрологической надежности информационно-измерительной системы.

Список литературы

1. Новицкий, П. В. Динамика погрешностей средств измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф, В. С. Лабунец. – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. – 192 с.
2. Селиванова, З. М. Интеллектуальная информационно-измерительная система мониторинга режимных параметров технологического процесса производства минераловатных плит / З. М. Селиванова, К. С. Стасенко // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 52 – 60.
3. Дмитриев, О. С. Интеллектуальная информационно-измерительная система для определения теплофизических характеристик полимерных композитов / О. С. Дмитриев, А. А. Живенкова, А. О. Дмитриев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 73 – 83.
4. Чернышова, Т. И. Математическое моделирование при анализе метрологической надежности аналоговых блоков информационно-измерительных систем / Т. И. Чернышова, В. В. Третьяков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 1. – С. 42 – 47.
5. Грубо, Е. О. Алгоритмическое обеспечение повышения метрологической надежности средств измерений : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.16 / Грубо Елена Олеговна. – М., 2011. – 163 с.

Method for Improving Metrological Resource for Analog Units of Information Measuring Systems

T. I. Chernyshova, V. V. Tretyakov

*Department “Designing of Electronic and Microprocessor Systems”, TSTU;
crems@crems.jesby.tstu.ru*

Keywords: analog unit; information measuring system; correction; mathematical model; metrological reliability; metrological characteristic; metrological resource; reference signal.

Abstract: The paper deals with metrological reliability of analog units of information measuring systems. A new method to improve metrological resource as the main indicator of metrological reliability is developed. This method can be used during operation. It permits correction of the mathematical model of metrological characteristic variation given the external factors. The method is based on the principle of reference signals generation with further count of a measuring error value.

The work consists of two main parts: theoretical explanation of the developed method and its practical implementation. The first part is problem statement and its relevance. We give mathematical description of the developed algorithm and its work mechanism illustrated by function charts and graphs. At the end of the theoretical part the general structure of the offered information measuring system is demonstrated. The second part of the paper has the sample of practical realization of the developed

method. The real analog unit was researched and the obtained experimental data were given. The output data show an increase in the metrological resource of the analog unit. The approach can be used in design process of measuring systems.

References

1. Novickij P.V., Zograf I.A., Labunec B.C. *Dinamika pogreshnostej sredstv izmerenij* (The dynamics of the errors of measurement), Leningrad: Energoatomizdat, Leningradskoe otdeleniie, 1990, 192 p.
2. Selivanova Z.M., Stasenko K.S. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 52-60.
3. Dmitriev O.S., Zhivenkova A.A., Dmitriev A.O. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 73-83.
4. Chernyshova T.I., Tret'jakov V.V. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 1, pp. 42-47.
5. Grubo E.O. *PhD Dissertation (Engineering)*, Moscow, 2011, 163 p.

Methode der Erhöhung der metrologischen Ressource der Analogblöcke der Informationsmeßsysteme

Zusammenfassung: Es ist die Methode der Erhöhung der metrologischen Ressource als Hauptkennziffer der metrologischen Sicherheit der Analogblöcke der Informationsmeßsysteme mittels der Korrektur ihrer Abgabesignale vorgeschlagen. Die Methode ist auf dem Prinzip der Abgabe der musterhaften Signale gegründet, und lässt auch zu, die Korrektur des mathematischen Modells der Veränderung in der Zeit der metrologischen Charakteristik unter Berücksichtigung des Einflusses der äußerlichen Faktoren zu verwirklichen.

Méthode de l'augmentation de la ressource métrologique des blocs analogiques des systèmes d'information et de contrôle

Résumé: Est proposée la méthode de l'augmentation de la ressource métrologique comme un indice essentiel de la sécurité métrologique des blocs analogiques des systèmes d'information par la voie de la correction des signaux de sortie. La méthode est fondée sur le principe du débit des signaux exemplaires et permet d'effectuer la correction du modèle mathématique de la mesure dans le temps de la caractéristique métrologique compte tenu de l'influence des facteurs extérieurs.

Авторы: *Чернышова Татьяна Ивановна* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», директор института энергетики, приборостроения и радиоэлектроники; *Третьяков Владимир Владиславович* – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Пудовкин Анатолий Петрович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиотехника», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».