



УДК 681.2.089

П. Г. Королев, А. В. Крупская

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Прогнозирование межповерочного интервала на основе анализа результатов поверки и работы подсистемы коррекции

Рассмотрена методика обработки результатов поверки совместно с результатами работы подсистемы коррекции. Разработанная методика предназначена для средств измерений с автоматической коррекцией характеристики преобразования и возможностью регистрации результатов работы подсистемы коррекции. Данная методика позволяет осуществить прогнозирование погрешности СИ и предоставляет поверителю возможность обоснованной корректировки межповерочного интервала.

Коррекция, межповерочный интервал, метрологическая характеристика, поверка, прогнозирование, средство измерений

Подтверждение соответствия метрологических характеристик (МХ) средства измерения (СИ) паспортным данным осуществляется его владельцем и нередко оказывается обременительной по времени и средствам работой. Кроме того, в ряде случаев эта работа трудновыполнима по техническим или технологическим причинам. СИ признается пригодным для эксплуатации в течение определенного межповерочного интервала (МПИ), если поверка подтвердила соответствие МХ паспортным данным к данному СИ. В идеальном случае следует стремиться к тому, чтобы метрологическая исправность была гарантирована в течение всего срока службы СИ. Данная статья посвящена методике прогнозирования межповерочного интервала для СИ с подсистемой встроенного метрологического контроля, обладающих следующими возможностями:

– в составе СИ имеется подсистема автоматической коррекции характеристики преобразования на основе метода образцовых сигналов;

– результаты работы подсистемы коррекции в виде выборок значений результатов измеряемой величины в калибровочных точках в дискретные моменты времени на межповерочном интервале регистрируются в энергонезависимой памяти СИ.

Предлагаемая методика позволяет на основе обработки результатов поверки совместно с ре-

зультатами работы подсистемы коррекции спрогнозировать время выхода МХ за пределы класса точности и дать поверителю рекомендации по корректировке межповерочного интервала.

На рис. 1 представлена структурная схема СИ с подсистемой встроенного метрологического контроля, где x – входной сигнал; K_1 и K_2 – коммутаторы; ПИП – первичный измерительный преобразователь; НП_{ИК} – нормирующий преобразователь из состава основного измерительного канала; НП₁, НП₂, ..., НП_{*n*} – нормирующие преобразователи подсистемы вспомогательных измерений; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; УОС – устройство образцовых сигналов; РПСИ – регистратор параметров СИ; ВУ – вычислительное устройство с энергонезависимой памятью для регистрации результатов работы подсистемы коррекции [1].

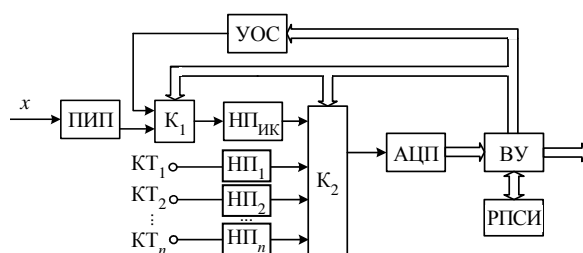


Рис. 1

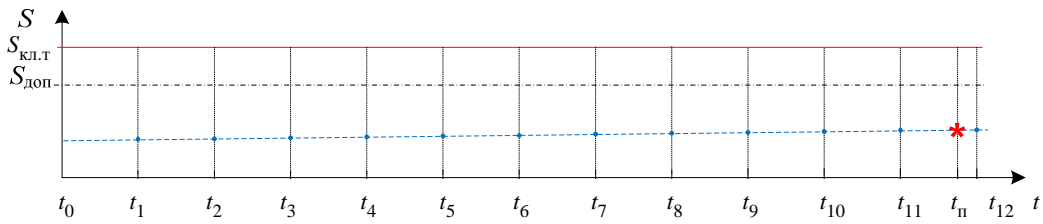


Рис. 2

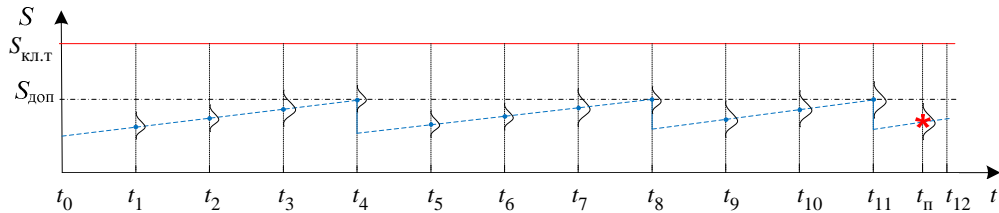


Рис. 3

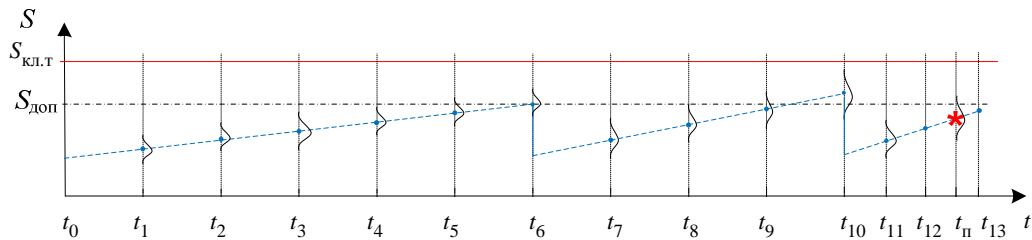


Рис. 4

При обработке результатов, накопленных в процессе эксплуатации, совместно с результатами поверки, возможны следующие ситуации:

1. Значения МХ S в калибровочных точках не превышают допустимые $S_{\text{доп}}$, дрейф практически отсутствует (скорость дрейфа $v \rightarrow 0$), коррекция характеристики преобразования не требуется, межкалибровочный интервал (МКИ) остается постоянным на всем межповерочном интервале ($\Delta t_{\text{МКИ}} = \text{const}$). Пример такой ситуации демонстрирует рис. 2. Под скоростью дрейфа v понимается скорость изменения МХ S за межкалибровочный интервал $\Delta t_{\text{МКИ}}$:

$$v = \frac{S}{\Delta t_{\text{МКИ}}}.$$

Под допустимой скоростью дрейфа $v_{\text{доп}}$ будем понимать такую скорость изменения МХ S , при которой метрологическая характеристика не выходит за допустимые пределы $S_{\text{доп}}$ за межкалибровочный интервал $\Delta t_{\text{МКИ}}$:

$$v_{\text{доп}} = \frac{S_{\text{доп}}}{\Delta t_{\text{МКИ}}}.$$

2. В процессе эксплуатации производится коррекция характеристики преобразования, ско-

рость дрейфа ниже допустимой ($v < v_{\text{доп}}$), значения МХ находятся в допустимых пределах ($S < S_{\text{доп}}$), интервалы между калибровками постоянны на всем межповерочном интервале ($\Delta t_{\text{МКИ}} = \text{const}$). Под допустимой скоростью дрейфа понимается такая скорость изменения МХ, при которой МХ не превышает допустимое значение $S_{\text{доп}} = k S_{\text{кл.т}}$, где $k \in [0.2...0.8]$ от величины класса точности СИ $S_{\text{кл.т}}$. Такая ситуация показана на рис. 3.

3. В процессе эксплуатации производится коррекция характеристики преобразования, скорость дрейфа возрастает и превышает допустимое значение ($v > v_{\text{доп}}$), значения МХ находятся в пределах класса точности ($S < S_{\text{кл.т}}$), интервалы между калибровками сокращаются ($\Delta t_{\text{МКИ}} \downarrow$). Пример такой ситуации проиллюстрирован на рис. 4.

4. МХ изменяется со скоростью, превышающей допустимую ($v > v_{\text{доп}}$), интервалы между калибровками сокращаются ($\Delta t_{\text{МКИ}} \downarrow$). Пример такой ситуации представлен на рис. 5.

На рис. 2–5 символами t_1, \dots, t_{12} обозначены моменты времени проведения калибровочных измерений; $t_{\text{п}}$ – момент проведения поверки; * –

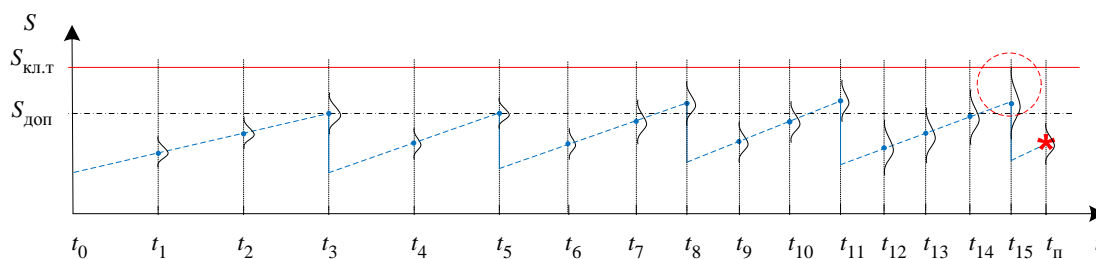


Рис. 5

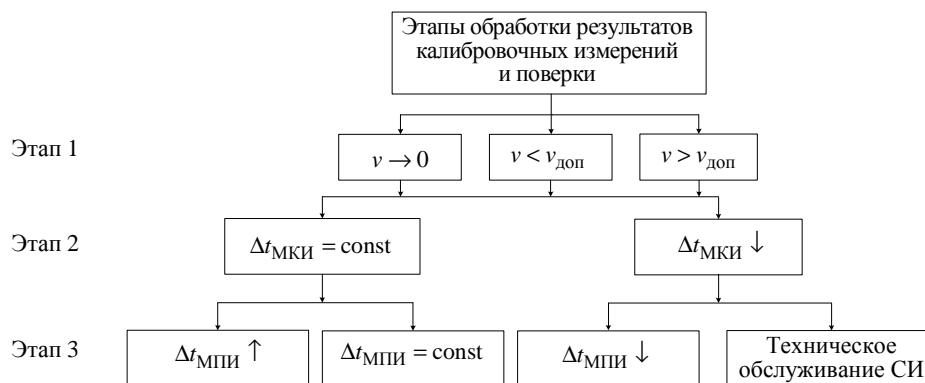


Рис. 6

значение MX в момент проведения поверки. Так, например, для случаев 1 и 2 (рис. 2 и 3 соответственно), при межповерочном интервале в 1 год ($\Delta t_{\text{МПИ}} = 12$), калибровочные значения фиксируются ежемесячно, поверка проводится в момент $t_{\text{п}}$ до наступления момента t_{12} , соответствующего межповерочному интервалу.

Прогнозирование МПИ на основе обработки результатов работы подсистемы коррекции совместно с результатами поверки следует проводить в следующих случаях:

1) коррекция в процессе эксплуатации не осуществлялась – MX находилась в допустимых пределах (случай 1 на рис. 2);

2) коррекция характеристики преобразования осуществлялась редко, последняя коррекция в процессе эксплуатации была проведена непосредственно перед поверкой (случай 2 на рис. 3). При этом результат поверки используется только для проверки значимости расхождения результатов измерений в момент последней калибровки с результатами измерений, полученных в момент проведения поверки. Если указанные выборки значений расходятся незначимо, то результаты, накопленные в процессе эксплуатации, можно использовать для прогнозирования МПИ.

При прогнозировании времени выхода MX за пределы класса точности могут быть сделаны следующие выводы о величине межповерочного интервала:

- межповерочный интервал можно увеличить (случай 1 на рис. 2);
- корректировка МПИ не требуется (случай 2 на рис. 3);
- межповерочный интервал необходимо сократить (случай 3 на рис. 4).

При скорости изменения MX , превышающей допустимое значение, и сокращении МКИ до минимально допустимого значения во избежание выхода скорректированной MX за пределы класса точности следует провести диагностику и техническое обслуживание СИ, в результате которых может быть выявлено несоответствие условий применения СИ требованиям, предъявляемым к условиям эксплуатации (случай 4 на рис. 5).

Описанные ситуации можно представить в виде «дерева» ситуаций (рис. 6).

Обработку результатов калибровочных измерений и результатов поверки можно разделить на следующие этапы:

Этап 1. Анализ скорости дрейфа характеристики преобразования. Дрейф практически может отсутствовать ($v \rightarrow 0$), скорость дрейфа может быть ниже допустимой ($v < v_{\text{доп}}$) или превышать допустимое значение ($v > v_{\text{доп}}$).

Этап 2. Анализ межкалибровочного интервала. Межкалибровочный интервал может оставаться постоянным ($\Delta t_{\text{МКИ}} = \text{const}$) или сокращаться в процессе эксплуатации ($\Delta t_{\text{МКИ}} \downarrow$).

Этап 3. Анализ исправности подсистемы коррекции и прогнозирование МПИ. Для определения исправности подсистемы коррекции необходимо провести оценку значимости расхождения результатов, полученных в моменты калибровочных измерений во время эксплуатации (моменты t_1, \dots, t_{11} на рис. 2–5), и результатов поверки, полученных в момент времени t_{11} . Значимость расхождения указанных результатов можно провести по математическим ожиданиям и дисперсиям. Поскольку количество измерений в сравниваемых выборках невелико, возникает проблема малой выборки. Закон распределения может отличаться от нормального, в таком случае для проверки значимости расхождений следует воспользоваться непараметрическими критериями, например, для сравнения математических ожиданий – критерием Манна и Уитни, для сравнения дисперсий – критерием Зигеля–Тьюки. Если сравниваемые выборки в калибровочных точках расходятся незначимо, то подсистема коррекции исправна, в противном случае имеет место неисправность подсистемы коррекции; результаты, накопленные в процессе эксплуатации, нельзя использовать для прогнозирования МПИ; требуется провести технологическое обслуживание СИ.

Сформируем требования к наборам данных, необходимых для прогнозирования МПИ. Для осуществления прогнозирования необходимо знать параметры модели, описывающей процесс изменения МХ во времени $S(t_i)$ в процессе эксплуатации, располагать информацией о максимально допустимом значении МХ $S_{\text{доп}}$ и классе точности СИ $S_{\text{кл.т}}$. При разработке методики поверки необходимо учесть, что в число проверяемых точек должно войти множество точек $T_k \in \{T_{k_1}, T_{k_2}, \dots, T_{k_n}\}$, в которых происходит калибровка в процессе эксплуатации СИ. Для определения параметров модели, описывающей процесс изменения МХ, необходимо построить зависимость изменения МХ от времени. Исходными данными для построения зависимости изменения МХ от времени является выборка результатов определения ее частных значений в калибровочных точках в дискретные моменты времени на межповерочном интервале $\{S(t_i)\}_{i=0}^n$. В модели временного ряда принято выделять две составляющие: детерминированную и случайную. Так, для МХ можно записать:

$$S(t) = \tilde{S}(t) + \hat{S}(t),$$

где $\tilde{S}(t)$ – детерминированная составляющая МХ; $\hat{S}(t)$ – случайная составляющая МХ.

Детерминированную составляющую можно представить в виде полинома порядка n :

$$\tilde{S}(t) = a_0 + a_1 t + \dots + a_n t^n = \sum_{n=0}^N a_n t^n,$$

где коэффициенты a_n могут быть найдены с помощью линейного регрессионного анализа.

В качестве МХ может выступать основная погрешность СИ, представляющая собой сумму систематической и случайной составляющих погрешности. Для выделения детерминированной составляющей необходимо воспользоваться статистическим методом, например методом наименьших квадратов. Функция зависимости МХ может быть определена по виду графика изменения экспериментальных данных, накопленных в подсистеме коррекции. Значения $\tilde{S}(t)$ получают, подставляя в уравнение модели кривой соответствующие последовательные значения времени. Случайная составляющая $\hat{S}(t)$ определяется как разность между экспериментальными значениями МХ $S(t)$ и значениями детерминированной составляющей МХ $\tilde{S}(t)$, т. е. как отклонение фактических значений ряда от расчетных. Далее определяются прогнозные значения детерминированной $\tilde{S}(t_i + \tau)$ и случайной составляющих $\hat{S}(t_i + \tau)$ на область прогноза τ , после чего их результаты объединяются. Результирующий прогноз равен сумме полученных прогнозов:

$$S(t_i + \tau) = \tilde{S}(t_i + \tau) + \hat{S}(t_i + \tau).$$

Таким образом, можно будет определить, через какое время τ прогнозное значение функции $S(t_i + \tau)$ достигнет допустимого значения $S_{\text{доп}}$ и, следовательно, определить прогнозное значение МПИ.

В качестве детерминированной и случайной составляющих МХ могут выступать значения математического ожидания M_i и среднеквадратического отклонения σ_i погрешности соответственно.

Приведем результаты экспериментов прогнозирования МПИ для макета измерительного канала с автоматической коррекцией характеристики преобразования, построенного по типовой че-

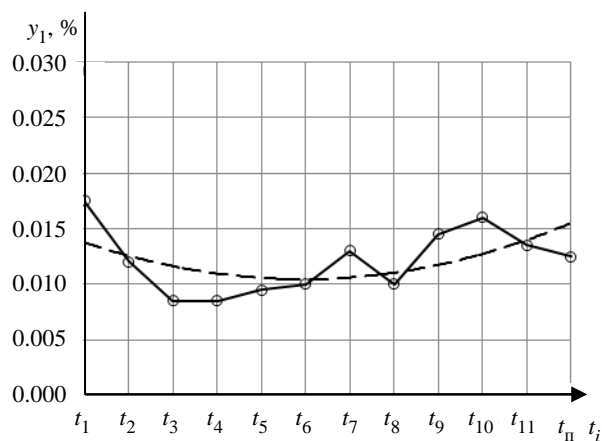


Рис. 7

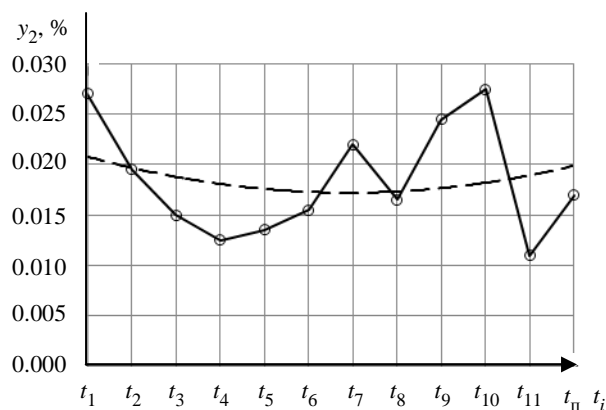


Рис. 8

тырехпроводной схеме. Измерительный канал представлен тремя коммутаторами, с помощью которых подключаются первичный измерительный преобразователь и два образцовых значения физической величины, соответствующих нижнему и верхнему значениям диапазона изменения измеряемой величины x_1 и x_2 соответственно.

На рис. 7 и 8 представлены графики зависимости приведенной погрешности измерительного канала при подаче на его вход образцовых значений физической величины, соответствующих нижнему и верхнему значениям диапазона изменения физической величины x_1 и x_2 соответственно, а также аппроксимация этих зависимостей полиномом второго порядка. Объемы выборок калибровочных измерений и измерений при проведении поверки составляли по 100 отсчетов. Среднее квадратическое отклонение составило $\sigma = 0.01$ ед.

На рис. 7 и 8 в моменты, обозначенные t_1, \dots, t_{11} , получены значения приведенной погрешности калибровочных измерений, происходящих на протяжении 11 месяцев с периодичностью $\Delta t = 1$ мес.; в момент времени, обозначенный как t_{II} , – значения приведенной погрешности, полученные при проведении поверки. Межповерочный интервал составляет $\Delta t_{МПИ} = 12$ мес. Штриховыми линиями на рис. 7 и 8 показаны аппроксимирующие кривые второго порядка, уравнения которых найдены по методу наименьших квадратов. Класс точности задан приведенной погрешностью $\gamma_{кл.т} = 0.25\%$. Допустимое значение приведенной погрешности для измерительного канала принято на уровне 0.8 от класса точности: $\gamma_{доп} = 0.8, \gamma_{кл.т} = 0.20\%$.

Полином второго порядка, описывающий поведение во времени зависимости приведенной погрешности ИК при подаче на его вход образцового сигнала x_1 , имеет вид

$$\gamma_1 = 1 \cdot 10^{-4} t_i^2 - 0.0016 t_i + 0.0153.$$

Для приведенной погрешности ИК при подаче на его вход образцового сигнала x_2 зависимость имеет вид

$$\gamma_2 = 1 \cdot 10^{-4} t_i^2 - 0.0014 t_i + 0.022.$$

Экстраполяция найденными зависимостями показала, что погрешность γ_1 достигнет допустимого предела $\gamma_{доп}$ через время $\Delta t_{i1} = 57$ мес. от начала эксплуатации, а погрешность γ_2 – через время $\Delta t_{i2} = 55$ мес. от начала эксплуатации. В таком случае межповерочный интервал может быть увеличен до величины, рассчитанной в соответствии с выражением

$$\Delta t_{МПИ \text{ кор}} = \min(\Delta t_{i1}; \Delta t_{i2}) - \Delta t_{МПИ}.$$

В данном случае $\Delta t_{МПИ \text{ кор}} = 55 - 12 = 43$ мес., т. е. межповерочный интервал теоретически может быть увеличен до 3.5 лет.

На рис. 9 представлен график зависимости приведенной погрешности измерительного канала, иллюстрирующий третий случай изменения МХ в процессе эксплуатации. Значения приведенной погрешности не выходят за пределы класса точности, скорость дрейфа возрастает, межкалибровочные интервалы сокращаются.

На основе данных подсистемы коррекции была определена скорость изменения погрешности и спрогнозировано ее изменение на предстоящий

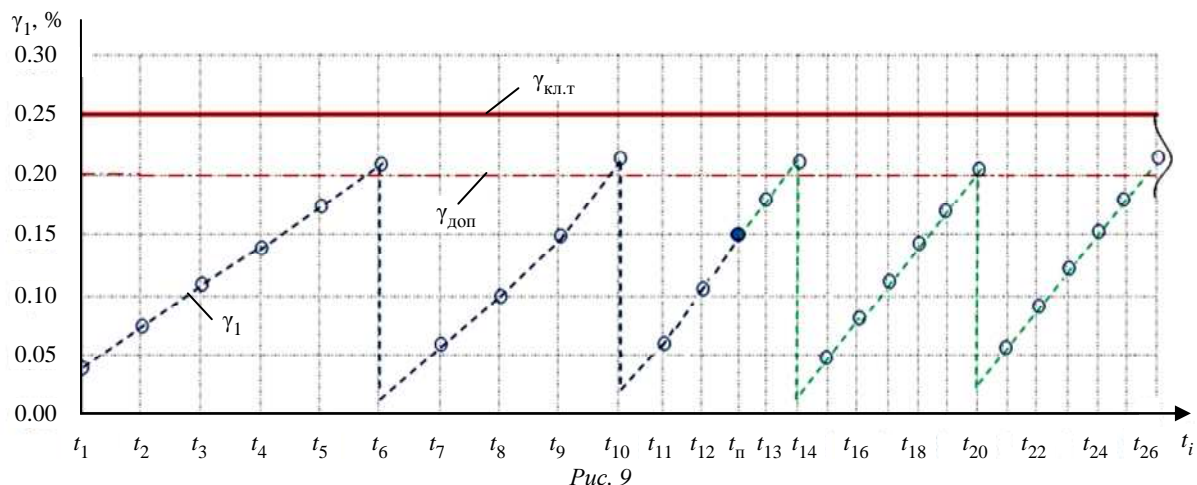


Рис. 9

период эксплуатации (интервал времени $[t_{13}, \dots, t_{26}]$ на рис. 9). Прогнозирование показало, что возможен выход погрешности за пределы класса точности через 6 мес. после проведения поверки, следовательно, межповерочный интервал следует назначить не более 6 мес.

Таким образом, для СИ с подсистемой встроенного метрологического контроля рассмотрены ситуации с различной скоростью деградации МХ в процессе эксплуатации. Сформированы требования к наборам данных, необходимых для прогнозирования МПИ. Разработана методика обработки результатов работы подсистемы коррекции совместно с результатами поверки, позволяющая

прогнозировать время выхода МХ за пределы класса точности и предоставить поверителю возможность обоснованной корректировки межповерочного интервала. Методика проверена для макета измерительного канала с автоматической коррекцией характеристики преобразования. Результаты проверки разработанной методики подтвердили возможность прогнозирования МПИ на основе обработки результатов поверки совместно с результатами, накопленными в подсистеме коррекции в процессе эксплуатации. Применение методики позволит сократить расходы на метрологическое обслуживание СИ и уменьшить вероятность выхода СИ из класса точности в течение межповерочного интервала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Research of the Measuring Channel with Automatic Correction Data Conversion / P. G. Korolev, A. V. Utushkina, A. V. Tsareva, N. A. Kuzmina // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. (ElConRusNW). 2016. IEEE NW Russia. P. 451–454.

2. Обеспечение метрологической исправности средств измерений / Е. О. Грубо, П. Г. Королев,

Н. В. Романцова, А. В. Утушкина // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. № 8. С. 100–106.

3. ГОСТ 8.009–84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. М.: Изд-во стандартов, 1984.

4. Земельман М. А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств. М.: Изд-во стандартов, 1972. 200 с.

P. G. Korolev, A. V. Krupskaya
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

FORECASTING THE CALIBRATION INTERVAL BASED ON THE ANALYSIS OF RESULTS OF VERIFICATION AND OPERATION OF THE SUBSYSTEM CORRECTION

The method of processing the results of the verification together with the results of the subsystem of correction is considered. The developed method is suitable for measuring instruments with automatic correction of the conversion characteristic and the possibility of registering the results of the subsystem of correction. The method allows to carry out forecasting the error of the MI and provides the verification officer of reasonable correction the calibration interval.

Correction, calibration interval, metrological characteristic, calibration, prediction, the measuring instrument