

Технологический метод проектирования измерительных приборов и систем для работы в неизвестных заранее условиях эксплуатации

В.Н. Нестеров^{1,2}, А.Р. Ли¹

¹ АО «Самарский электромеханический завод»
443099, Российская Федерация, г. Самара
ул. Ст. Разина, 16

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
443086, Российская Федерация, г. Самара
Московское шоссе, 34

В статье представлен технологический метод проектирования радиотехнических и измерительных устройств, инвариантных относительно возмущающих воздействий. Метод разработан на основе принципа двухканальности, который предложил академик Б.Н. Петров. Рассмотрена методика, позволяющая довести метод до практической реализации. Преимуществом данного метода является возможность компенсации возмущающих воздействий, физический принцип и характер влияния которых заранее неизвестны. Эффективность метода и методика его применения проиллюстрированы на примере двухканального измерительного моста. При этом показана важность корректного метрологического анализа, который подтверждает эффективность метода.

Ключевые слова: теория инвариантности, принцип двухканальности, технологический метод, возмущающие воздействия, измерительные устройства, измерительные мосты.

Введение

Вопросы повышения точности измерительных систем всегда были и будут наиболее актуальными в теории измерений. Правомерность этого утверждения не нуждается в доказательствах, поскольку освоение человеком новых сред обитания и жизнедеятельности, в том числе глубокого космоса, предполагает получение измерительной информации о неизвестных ранее процессах и явлениях. Однако возмущающее воздействие этих зачастую неизвестных процессов и явлений на средства измерения может привести и, несомненно, приведет к огромным погрешностям, затрудняющим принятие правильных решений, если речь идет об участии человека, или к дезориентации автономного аппарата, если речь идет об автоматической системе. При этом эффективность известных методов повышения точности измерений, например методов образцовых мер, вспомогательных измерений, тестовых, обратных преобразований и других [1–3], катастрофически снижается в условиях недостатка информации о возмущающих воздействиях. Это объясняется тем, что большинство из них подразумевают наличие в том или

ином виде информационной избыточности, основанной на присутствии в измерениях известных заранее образцовых мер (сигналов) или знания функций влияния возмущающих факторов.

Методы теории инвариантности [4–9] в науке об измерениях стоят несколько особняком. С одной стороны, это сложилось исторически, поскольку и сами подходы, и терминология пришли в науку об измерениях из теории автоматического управления и регулирования. С другой стороны, информационная избыточность системы направляется в этом случае не на коррекцию погрешностей, а на компенсацию возмущающих воздействий, являющихся источниками погрешностей. Особо следует отметить в этой области роль академика Б.Н. Петрова, сформулировавшего принцип двухканальности в измерительной технике [10], заключающийся в необходимости по крайней мере двух каналов передачи влияния воздействия на ту переменную, инвариантность которой достигается. Однако реализация этого принципа является необходимым, но недостаточным условием построения инвариантной системы. Поэтому проблема обоснования и разработки методов построения инвариантных измерительных систем

на основе принципа двухканальности актуальна до сих пор.

В ряде работ на обозначенную тему представлен так называемый структурный метод, позволивший распространить принцип двухканальности на весь класс параметрических измерительных преобразователей [11–13]. Однако и этот метод не является универсальным, поскольку не всегда представляется возможным реализовать «симметрию» передачи влияющих факторов на оба измерительных канала, так как источниками погрешностей измерительных устройств являются нестабильность и технологический разброс параметров всех входящих в них элементов. Поэтому в работе поставлена цель – сформировать методические основы технических и технологических решений построения инвариантных измерительных преобразователей и систем, обеспечивающих компенсацию неизвестных априори возмущающих факторов. И в этом случае принцип двухканальности Б.Н. Петрова имеет ключевое значение.

1. Основы теории метода

Как было отмечено, в основе метода лежит принцип двухканальности, подразумевающий наличие по крайней мере двух каналов передачи влияния возмущающего воздействия в систему. Сформулируем формальные признаки, развивающие принцип двухканальности до полноценного метода, включающего необходимые и достаточные условия его физической реализуемости.

1. Наличие в структуре системы q элементов ($q \geq 2$), подверженных влиянию со стороны влияющих факторов ζ_j .

2. Реализуемость специальных технологических мероприятий, приводящих к «дифференциально-симметричному» воздействию влияющих факторов на параметры входящих в систему элементов:

$$\left\{ \frac{\Delta k_{ir}(\zeta_j)}{k_{ir0}} - \frac{\Delta k_{il}(\zeta_j)}{k_{il0}} \right\} \rightarrow 0, \quad r \neq l; \quad r, l \in q, \quad (1)$$

где $\Delta k_{ir}(\zeta_j)$, $\Delta k_{il}(\zeta_j)$ – отклонения k -го параметра соответственно r -го и l -го элементов i -го канала преобразования от номинальных значений k_{ir0} , k_{il0} под действием влияющих факторов ζ_j .

3. Выполнение критерия:

$$\Delta F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q \frac{\partial F}{\partial Y_i} \frac{\partial Y_i}{\partial k_{ij}(\zeta_j)} \Delta k_{ij}(\zeta_j) \rightarrow 0, \quad (2)$$

где F – результирующая функция преобразования системы; Y_i – функция преобразования i -го канала преобразования; n – количество каналов.

В предельном случае, если выражения вида (1) превратятся в тождество, критерий (2) достигает нулевого экстремума, и можно говорить об абсолютной инвариантности системы относительно возмущающих воздействий, реализуемой за счет соответствующих мероприятий. Однако такой случай является идеальным. Поэтому принципиально важной задачей в каждом конкретном случае является методическая задача поиска пар элементов и соответствующих им технологических мероприятий, приводящих к максимально близкому выполнению критерия (2). Речь идет о выявлении технологического ноу-хау, связанного со знанием: какие пары (группы) элементы использовать в каждом случае, как их расположить в пространстве, как подключать источники питания и т. д. Соответственно, решаемая задача может быть разделена на две. Первая из них заключается в воплощении признаков, отражающих принципиальную сущность технологического метода, вторая – в реализации методики, позволяющей эти признаки эффективно применить на практике.

Методика выявления технологического «ноу-хау» базируется на использовании критерия (2). Поскольку левая часть последнего представляет собой выражение погрешностей, возникающих вследствие действия влияющих факторов на входящие в систему элементы, то, приравняв ее нулю и осуществив необходимые преобразования, представляется возможным в аналитическом виде

$$\frac{\Delta k_{ir}(\zeta_j)}{k_{ir0}} = \frac{\Delta k_{il}(\zeta_j)}{k_{il0}}, \quad r \neq l; \quad r, l \in q \quad (3)$$

найти условия минимизации названной погрешности. Последние и определяют технологическое ноу-хау, физическая сущность и реализуемость которого в каждом конкретном случае зависят от физики влияющих факторов и конструктивно-технологического исполнения устройства и его элементов. В частности, в соответствии с п. 1 принципиальным вопросом является выявление в устройстве одной или более групп технологически сходных элементов, где количество элементов в группе отвечает требованию $q \geq 2$.

Рассмотрим работу метода и методику его реализации на представителе класса двухканальных измерительных преобразователей.

2. Реализация методики выявления ноу-хау технологического метода

Шестиплечий измерительный мост, показанный на рис. 1, является представителем большого класса параметрических измерительных преобразователей в составе неравновесных измерительных мостов и делителей напряжения [14]. Выбор его для иллюстрации работы метода не случаен. В [15] на его примере сделана попытка использования тестового метода повышения точности измерений [2], о котором упоминалось во введении и эффективность которого доказана множеством примеров.

Данная схема имеет две измерительные диагонали и состоит из следующих элементов: 1–4 – первичные измерительные преобразователи, например тензорезисторы, включенные в плечи моста, соответственно, дифференциально; 5, 6 – дополнительные резисторы; 7 – источник напряжения; 8, 9 – измерительные усилители; 10 – сумматор; 11 – дифференциальный усилитель; 12 – устройство деления.

Представленное далее исследование преследует двоякую цель: показать эффективность предлагаемой методики и возможностей технологического метода и неэффективность слепого использования тестового метода в работе [15] без необходимого и адекватного метрологического анализа.

Рассмотрим работу устройства.

Сигнал U_1 снимают с вершин соединения элементов 3, 5 и 2, 6, а сигнал U_2 – с вершин соединения элементов 4, 6 и 1, 5:

$$U_1 = \left\{ E \left\{ [(R_1 - \Delta R) + R_5] [(R_4 - \Delta R) + R_6] - (R_2 + \Delta R) (R_3 + \Delta R) \right\} \right\} / \quad (4)$$

$$/ \left\{ [(R_1 - \Delta R) + (R_3 + \Delta R) + R_5] \times [(R_2 + \Delta R) + (R_4 - \Delta R) + R_6] \right\};$$

$$U_2 = \left\{ E \left\{ (R_1 - \Delta R) (R_4 - \Delta R) - [(R_3 + \Delta R) + R_5] [(R_2 + \Delta R) + R_6] \right\} \right\} / \quad (5)$$

$$/ \left\{ [(R_1 - \Delta R) + (R_3 + \Delta R) + R_5] \times [(R_2 + \Delta R) + (R_4 - \Delta R) + R_6] \right\},$$

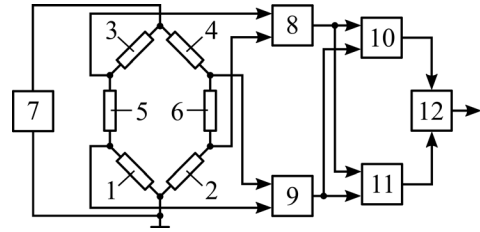


Рис. 1. Шестиплечий измерительный мост

где E – ЭДС источника питания; R_1, R_2, R_3, R_4 – начальные значения сопротивлений первичных преобразователей 1–4; ΔR – приращение значений сопротивлений первичных преобразователей 1–4; R_5 и R_6 – значения сопротивлений резисторов 5 и 6.

Сигналы (1) и (2) поступают соответственно на входы измерительных усилителей 8 и 9, а далее, как показано на рис. 1, – на сумматор 10 и дифференциальный усилитель 11.

В результате на выходе устройства деления 12 получаем:

$$\frac{U_2^* + U_1^*}{U_2^* - U_1^*} = \frac{K_2 U_2 + K_1 U_1}{K_2 U_2 - K_1 U_1}, \quad (6)$$

где K_1 и K_2 – коэффициенты усиления по напряжению измерительных усилителей 8 и 9 соответственно, а U_1 и U_2 – определяются выражениями (1) и (2).

При $K_1 = K_2 = K$, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ и $R_5 = R_6 = R_0$ функция преобразования устройства становится линейной и не содержащей в своем составе параметров источника питания:

$$F = \frac{U_2^* + U_1^*}{U_2^* - U_1^*} = \frac{2\Delta R}{R_0}. \quad (7)$$

В этой части сомнений не возникает, возражений против такой структуры измерительного моста, а также реализуемой им функции преобразования (7) нет.

Однако далее в [15] утверждается, что условием повышения стабильности схемы относительно воздействия возмущающих факторов на ее элементы является использование двух точных высокостабильных резисторов, последовательно включенных в плечи моста. В соответствии с принятыми на рис. 1 обозначениями речь идет о резисторах 5 и 6. Включение высокостабильных резисторов в цепи последовательно с первичными преобразователями и последующая алгоритмическая обработка сигналов, получаемых в таких цепях, где образцовые резисторы соединяются с резисторами, выполняющими функцию датчиков, означает реализацию тестового метода повышения точности измери-

тельных устройств. Однако для подтверждения эффективности метода в конкретном техническом решении необходим метрологический анализ, показывающий достижение ожидаемого эффекта.

В работе [15] представлено следующее выражение погрешности рассматриваемой измерительной схемы:

$$\gamma = \frac{\Delta R}{R_0 + \Delta R_0}, \quad (8)$$

где ΔR_0 – отклонение значений сопротивлений высокостабильных резисторов 5 и 6 от номинального значения R_0 .

На основании (8) сделан вывод, что погрешность устройства стремится к нулю, если $\Delta R_0 \rightarrow 0$, то есть точность измерительного устройства определяется стабильностью резисторов 5 и 6.

Для оценки справедливости последнего утверждения в соответствии с (2) найдем выражение погрешности от действия возмущающих факторов на ключевые элементы данной схемы в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta F = & \frac{\partial F}{\partial K_1} \Big|_{K_0} \Delta K_1 + \frac{\partial F}{\partial K_2} \Big|_{K_0} \Delta K_2 + \\ & + \frac{\partial F}{\partial U_1^*} \frac{\partial U_1^*}{\partial (R_1 - \Delta R)} \Big|_{(R_1 - \Delta R)_0} \Delta (R_1 - \Delta R) + \\ & + \frac{\partial F}{\partial U_2^*} \frac{\partial U_2^*}{\partial (R_1 - \Delta R)} \Big|_{(R_1 - \Delta R)_0} \Delta (R_1 - \Delta R) + \\ & + \frac{\partial F}{\partial U_1^*} \frac{\partial U_1^*}{\partial (R_2 + \Delta R)} \Big|_{(R_2 + \Delta R)_0} \Delta (R_2 + \Delta R) + \\ & + \frac{\partial F}{\partial U_2^*} \frac{\partial U_2^*}{\partial (R_2 + \Delta R)} \Big|_{(R_2 + \Delta R)_0} \Delta (R_2 + \Delta R) + \\ & + \frac{\partial F}{\partial U_1^*} \frac{\partial U_1^*}{\partial (R_3 + \Delta R)} \Big|_{(R_3 + \Delta R)_0} \Delta (R_3 + \Delta R) + \\ & + \frac{\partial F}{\partial U_2^*} \frac{\partial U_2^*}{\partial (R_3 + \Delta R)} \Big|_{(R_3 + \Delta R)_0} \Delta (R_3 + \Delta R) + \\ & + \frac{\partial F}{\partial U_1^*} \frac{\partial U_1^*}{\partial (R_4 - \Delta R)} \Big|_{(R_4 - \Delta R)_0} \Delta (R_4 - \Delta R) + \\ & + \frac{\partial F}{\partial U_2^*} \frac{\partial U_2^*}{\partial (R_4 - \Delta R)} \Big|_{(R_4 - \Delta R)_0} \Delta (R_4 - \Delta R) + \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & + \frac{\partial F}{\partial U_1^*} \frac{\partial U_1^*}{\partial R_5} \Big|_{R_{50}} \Delta R_5 + \frac{\partial F}{\partial U_2^*} \frac{\partial U_2^*}{\partial R_5} \Big|_{R_{50}} \Delta R_5 + \\ & + \frac{\partial F}{\partial U_1^*} \frac{\partial U_1^*}{\partial R_6} \Big|_{R_{60}} \Delta R_6 + \frac{\partial F}{\partial U_2^*} \frac{\partial U_2^*}{\partial R_6} \Big|_{R_{60}} \Delta R_6, \end{aligned}$$

где ΔK_1 , ΔK_2 , $\Delta (R_1 - \Delta R)$, $\Delta (R_2 + \Delta R)$, $\Delta (R_3 + \Delta R)$, $\Delta (R_4 - \Delta R)$, ΔR_5 , ΔR_6 – отклонения параметров соответствующих элементов схемы от номинальных значений под действием возмущающих факторов; K_0 , $(R_1 - \Delta R)_0$, $(R_2 + \Delta R)_0$, $(R_3 + \Delta R)_0$, $(R_4 - \Delta R)_0$, R_{50} , R_{60} – номинальные значения соответствующих параметров.

Подставляя в (9) выражения (4)–(7), получаем:

$$\begin{aligned} \Delta F = & 2 / \\ & / \left\{ R_{50} \left[(R_2 + \Delta R)_0 + (R_4 - \Delta R)_0 + R_{60} \right] + \right. \\ & \left. + R_{60} \left[(R_1 - \Delta R)_0 + (R_3 + \Delta R)_0 + R_{50} \right] \right\}^2 \times \\ & \times \left\{ \frac{\left[(R_1 - \Delta R)_0 + (R_3 + \Delta R)_0 + R_{50} \right]}{\left[(R_2 + \Delta R)_0 + (R_4 - \Delta R)_0 + R_{60} \right]} \times \right. \\ & \times \left\{ \left[R_{60} + (R_4 - \Delta R)_0 \right] (R_2 + \Delta R)_0 \times \right. \\ & \times \left\{ (R_1 - \Delta R)_0 (R_4 - \Delta R)_0 - \right. \\ & \left. \left. - \left[R_{50} + (R_3 + \Delta R)_0 \right] \left[R_{60} + (R_2 + \Delta R)_0 \right] \right\} \times \right. \\ & \times \left[\frac{\Delta (R_2 + \Delta R)}{(R_2 + \Delta R)_0} - \frac{\Delta R_6 + \Delta (R_4 - \Delta R)}{R_{60} + (R_4 - \Delta R)_0} \right] + \\ & \left. + \left[R_{60} + (R_2 + \Delta R)_0 \right] (R_4 - \Delta R)_0 \times \right. \\ & \times \left\{ \left[R_{50} + (R_1 - \Delta R)_0 \right] \left[R_{60} + (R_4 - \Delta R)_0 - \right. \right. \\ & \left. \left. - (R_2 + \Delta R)_0 (R_3 + \Delta R)_0 \right] \right\} \times \\ & \times \left[\frac{\Delta (R_4 - \Delta R)}{(R_4 - \Delta R)_0} - \frac{\Delta R_6 + \Delta (R_2 + \Delta R)}{R_{60} + (R_2 + \Delta R)_0} \right] \left. \right\} + \\ & + \frac{\left[(R_2 + \Delta R)_0 + (R_4 - \Delta R)_0 + R_{60} \right]}{\left[(R_1 - \Delta R)_0 + (R_3 + \Delta R)_0 + R_{50} \right]} \times \\ & \times \left\{ \left[R_{50} + (R_1 - \Delta R)_0 \right] (R_3 + \Delta R)_0 \times \right. \\ & \times \left\{ (R_1 - \Delta R)_0 (R_4 - \Delta R)_0 - \right. \\ & \left. \left. - \left[R_{50} + (R_3 + \Delta R)_0 \right] \left[R_{60} + (R_2 + \Delta R)_0 \right] \right\} \times \right. \\ & \times \left[\frac{\Delta (R_3 + \Delta R)}{(R_3 + \Delta R)_0} - \frac{\Delta R_5 + \Delta (R_1 - \Delta R)}{R_{50} + (R_1 - \Delta R)_0} \right] + \\ & \left. + \left[R_{50} + (R_3 + \Delta R)_0 \right] (R_1 - \Delta R)_0 \times \right. \\ & \times \left\{ \left[R_{50} + (R_1 - \Delta R)_0 \right] \times \right. \\ & \left. \times \left[R_{60} + (R_4 - \Delta R)_0 - (R_2 + \Delta R)_0 (R_3 + \Delta R)_0 \right] \right\} \times \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \times \left[\frac{\Delta(R_1 - \Delta R)}{(R_1 - \Delta R)_0} - \frac{\Delta R_5 + \Delta(R_3 + \Delta R)}{R_{50} + (R_3 + \Delta R)_0} \right] + \\ & + \left\{ \left[R_{50} + (R_1 - \Delta R)_0 \right] \left[R_{60} + (R_4 - \Delta R)_0 \right] - \right. \\ & - (R_2 + \Delta R)_0 (R_3 + \Delta R)_0 \left. \right\} \times \\ & \times \left\{ (R_1 - \Delta R)_0 (R_4 - \Delta R)_0 - \left[R_{50} + (R_3 + \Delta R)_0 \right] \times \right. \\ & \left. \times \left[R_{60} + (R_2 + \Delta R)_0 \right] \right\} \left[\frac{\Delta K_2}{K_0} - \frac{\Delta K_1}{K_0} \right]. \end{aligned}$$

Полученное из (9) представление погрешности рассматриваемой схемы в виде суммы нескольких компонентов (10) позволяет легко выявить условия, выполнение которых приведет к удовлетворению критерия (2):

$$\frac{\Delta(R_2 + \Delta R)}{(R_2 + \Delta R)_0} = \frac{\Delta R_6 + \Delta(R_4 - \Delta R)}{R_{60} + (R_4 - \Delta R)_0}; \quad (11)$$

$$\frac{\Delta(R_4 - \Delta R)}{(R_4 - \Delta R)_0} = \frac{\Delta R_6 + \Delta(R_2 + \Delta R)}{R_{60} + (R_2 + \Delta R)_0}; \quad (12)$$

$$\frac{\Delta(R_3 + \Delta R)}{(R_3 + \Delta R)_0} = \frac{\Delta R_5 + \Delta(R_1 - \Delta R)}{R_{50} + (R_1 - \Delta R)_0}; \quad (13)$$

$$\frac{\Delta(R_1 - \Delta R)}{(R_1 - \Delta R)_0} = \frac{\Delta R_5 + \Delta(R_3 + \Delta R)}{R_{50} + (R_3 + \Delta R)_0}; \quad (14)$$

$$\frac{\Delta K_2}{K_0} - \frac{\Delta K_1}{K_0}. \quad (15)$$

Иными словами, выполнение условий (11)–(15) в соответствии с (10) минимизирует возможные погрешности схемы от действия возмущающих факторов на ее элементы.

Предположим, что в схеме, данной на рис. 1, установлены высокостабильные резисторы 5 и 6 с номинальными значениями сопротивлений R_{50} , R_{60} . В этом случае отклонения ΔR_5 , ΔR_6 значений R_5 , R_6 сопротивлений 5 и 6 от номинальных значений R_{50} , R_{60} в идеальном случае будут стремиться к нулю: $\Delta R_5 \rightarrow 0$, $\Delta R_6 \rightarrow 0$.

Однако при $\Delta R_5 \rightarrow 0$ соотношение (13) вступит в противоречие с соотношением (14), а при $\Delta R_6 \rightarrow 0$ соотношение (11) будет противоречить соотношению (12). Сравнив обозначения, видим, что условия $\Delta R_5 \rightarrow 0$ и $\Delta R_6 \rightarrow 0$ соответствуют условию $\Delta R_0 \rightarrow 0$ для схемы, данной в [15].

Таким образом, использование высокостабильных резисторов 5 и 6 в конкретной технической реализации не только не снизит результирующую погрешность рассматриваемого устройства, но и будет служить еще одним источником дополнительной погрешности. Поэтому тестовый метод повышения точности измерений, который

множественно доказал свою эффективность [2], в данном случае неприемлем. Для подтверждения эффективности применения метода необходим адекватный метрологический анализ, подтверждающий достижение ожидаемого эффекта.

3. Применение технологического метода

Проанализируем возможности технологического метода. В соответствии с перечисленными методическими признаками из выражения (10) и условий (11)–(15) можно выявить парные группы элементов, подпадающие под перечисленные в разделе 1 методические признаки: 2 и 6,4; 4 и 6,2; 3 и 5, 1; 1 и 5,3; 8 и 9.

Выявленные парные группы элементов позволяют реализовать принцип двухканальности специальными технологическими мероприятиями. В данном случае технологические мероприятия, направленные на компенсацию внешних возмущений на устройство, следующие:

- элементы, составляющие группу, должны быть технологически идентичны, например, выполнены из одного и того же материала, изготовлены на основе идентичных комплектующих, взяты из одной партии и т. д.;

- элементы, составляющие группу, должны находиться в идентичных условиях относительно любых возмущающих воздействий;

- активные элементы, в данном случае измерительные усилители 8 и 9, должны быть одной марки, желательно из одной партии и, при возможности, иметь общий источник питания.

В соответствии с требованиями технологического метода резисторы 5 и 6 должны быть такими же нестабильными, как резисторы 1, 3 и 2, 4, которые в рассмотренной схеме являются первичными измерительными преобразователями.

Выполнение перечисленных требований позволит максимально приблизиться к условиям (11)–(15), что, в свою очередь, приведет к минимизации дополнительных погрешностей, модель которых представлена выражением (10).

Заключение

Представленный технологический метод проектирования инвариантных к возмущающим воздействиям измерительных и иных радиотехнических устройств позволяет из нестабильных комплектующих элементов собирать схемы, об-

ладающие минимальной чувствительностью к возмущениям в жестких условиях эксплуатации.

Применение тех или иных методов повышения точности должно сопровождаться корректным метрологическим анализом, подтверждающим правильность и эффективность применяемых мер. В противном случае, как и показано на примере тестового метода, результат может не оправдать ожиданий и привести к противоположному результату.

Конкретная технология доведения устройств до возможно более строгого выполнения критерия (3) обеспечивается и на уровне конструкторской проработки состава проектируемого устройства, и на уровне технологии его изготовления, что по существу составляет ноу-хау в каждом конкретном случае. В частности, если речь идет о группе элементов, включенных в плечи мостов, то, помимо использования элементов одной марки и из одной партии, следует на уровне технологии решить вопрос их размещения в пространстве таким образом, чтобы обеспечить «симметрию» воздействия на них изменений температуры, давления, радиации и других влияющих факторов.

Рассмотренный метод имеет очень серьезное преимущество перед другими. Он не только повышает точность измерительных устройств в ненормальных условиях эксплуатации, но дает надежду на приемлемые результаты измерений в условиях, когда характер и физический принцип влияющих факторов априори неизвестны. В данном случае речь идет о применениях в глубоком космосе без участия человека, в глубинах океанов, в установках ядерной энергетики, где в случае аварийных ситуаций возможны резкие изменения условий эксплуатации и других подобных неизвестных заранее условиях эксплуатации.

Список литературы

- Земельман М.А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств. М.: Издательство стандартов, 1972. 199 с.
- Бромберг Э.М., Куликовский К.Л. Тестовые методы повышения точности измерений. М.: Энергия, 1978. 176 с.
- Алиев Т.М., Тер-Хачатуров А.А., Шекиханов А.М. Итерационные методы повышения точности измерений. М.: Энергоатомиздат, 1986. 168 с.
- Кульбакин В.С. О применимости принципа абсолютной инвариантности в физических реальных системах // ДАН СССР. 1948. Т. 60. № 2. С. 231–234.
- Петров Б.Н. Принцип инвариантности и условия его применения при расчете линейных и нелинейных систем // Теория непрерывных систем: труды 1 междунар. конгр. ИФАК. Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 259–275.
- Петров Б.Н., Кухтенко А.И. Структуры абсолютно инвариантных систем и условия их физической реализуемости // Теория инвариантности в системах автоматического управления: тр. Всесоюз. совещания. М.: Наука, 1964. С. 24–28.
- Хрусталева М.М. Необходимые и достаточные условия слабой инвариантности // Автоматика и телемеханика. 1968. № 4. С. 17–22.
- Менский Б.М. Принцип инвариантности в автоматическом регулировании и управлении. М.: Машиностроение, 1972. 247 с.
- Ивахненко А.Г. Связь теории инвариантности с теорией стабильности измерительных систем // Автоматика. 1960. № 5. С. 35–40.
- Принцип инвариантности в измерительной технике / Б.Н. Петров [и др.]. М.: Наука, 1976. 244 с.
- Нестеров В.Н. Двухканальные параметрические измерительные преобразователи с линейными функциями преобразования // Измерительная техника. 1999. № 5. С. 39–45.
- Нестеров В.Н., Ли А.Р. Теория и практика построения инвариантных измерительных преобразователей и систем на основе принципа двухканальности // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 4 (7). С. 1414–1422.
- Нестеров В.Н., Ли А.Р. Принцип двухканальности в реализации инвариантных измерительных преобразователей и систем // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: материалы Междунар. научно-техн. конф. «Шляндинские чтения – 2016». Пенза: ПГУ, 2016. С. 34–38.
- Нестеров В.Н. Новый класс инвариантных измерительных преобразователей: методы построения и реализация для приборов и систем специального назначения // Информационные, измерительные и управляющие системы: научно-техн. сб. Самарского отделения Поволжского центра Метрологической академии России / под ред. проф. В.Н. Нестерова. Самара: Изд. Самарского научного центра РАН, 2007. Вып. 3. С. 18–37.
- А.с. 1165263 СССР, МПК G 01 R 17/10, G 01 B 7/18. Измерительный преобразователь / В.В. Пашенко. № 3707017/24-21; Заявл. 26.12.83; Опубл. 30.11.85. Бюл. № 44.

References

- Zemelman M.A. Avtomaticheskaya korrekciya pogreshnostej izmeritel'nyh ustrojstv [Automatic error correction measuring devices]. M.: Izdatel'stvo standartov, 1972, 199 p. [in Russian].
- Bromberg E.M., Kulikovskiy K.L. Testovye metody povysheniya tochnosti izmerenij [Test methods for

- improving measurement accuracy]. M.: Energiya, 1978, 176 p. [in Russian].
3. Aliev T.M., Ter-Khachaturov A.A., Shekikanov A.M. Iteracionnye metody povysheniya tochnosti izmerenij [Iterative methods to improve measurement accuracy]. M.: Energoatomizdat, 1986, 168 p. [in Russian].
 4. Kulbakin V.S. O primenimosti principa absolyutnoj invariantnosti v fizicheskikh real'nykh sistemah [On the applicability of the principle of absolute invariance in physical real systems]. *DAN USSR* [Reports of the Academy of Sciences of the USSR], 1948, vol. 60, no. 2, pp. 231–234 [in Russian].
 5. Petrov B.N. Princip invariantnosti i usloviya ego primeniya pri raschyote linejnyh i nelinejnyh sistem [The principle of invariance and the conditions for its use in the calculation of linear and nonlinear systems]. In: *Teoriya nepreryvnyh sistem: tr. 1 mezhdunar. kongr. IFAK. T. 1.* [Theory of continuous systems: Proceed. of 1 Intern. cong. IFAC. Vol. 1]. M.: Izd-vo AN SSSR, 1961, pp. 259–275 [in Russian].
 6. Petrov B.N., Kukhtenko A.I. Struktury absolyutno invariantnyh sistem i usloviya ih fizicheskoy realizuemosti [Structures of absolutely invariant systems and the conditions of their physical realizability]. In: *Teoriya invariantnosti v sistemah avtomaticheskogo upravleniya: tr. vsesoyuz. soveshchaniya* [Invariance theory in automatic control systems: tr. all-union conf.]. M.: Nauka, 1964, pp. 24–28 [in Russian].
 7. Khrustalev M.M. Neobhodimye i dostatochnye usloviya slaboj invariantnosti [Necessary and sufficient conditions for weak invariance]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and remote control], 1968, no. 4, pp. 17–22 [in Russian].
 8. Mensky B.M. Princip invariantnosti v avtomaticheskome regulirovanii i upravlenii [The principle of invariance in automatic regulation and control]. M.: Mashinostroenie, 1972, 247 p. [in Russian].
 9. Ivakhnenko A.G. Svyaz' teorii invariantnosti s teoriej stabil'nosti izmeritel'nyh sistem [Connection of the theory of invariance with the theory of stability of measuring systems]. *Avtomatika* [Automation], 1960, no. 5, pp. 35–40 [in Russian].
 10. Petrov B.N. [et al.] Princip invariantnosti v izmeritel'noj tekhnike [The principle of invariance in measurement technology]. M.: Nauka, 1976, 244 p. [in Russian].
 11. Nesterov V.N. Dvuhkanal'nye parametricheskie izmeritel'nye preobrazovately s linejnymi funkciyami preobrazovaniya [Two-channel parametric measuring transducers with linear conversion functions]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement techniques], 1999, no. 5, pp. 39–45 [in Russian].
 12. Nesterov V.N., Lee A.R. Teoriya i praktika postroeniya invariantnyh izmeritel'nyh preobrazovatelej i sistem na osnove principa dvuhkanal'nosti [Theory and practice of constructing invariant measuring transducers and systems based on the two-channel principle]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk* [Proceedings of the Samara scientific center of the Russian academy of sciences], 2016, vol. 18, no. 4(7), pp. 1414–1422 [in Russian].
 13. Nesterov V.N., Lee A.R. Princip dvuhkanal'nosti v realizacii invariantnyh izmeritel'nyh preobrazovatelej i sistem [The principle of two-channel in the implementation of invariant measuring transducers and systems]. In: *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noj informacii: materialy mezhdunar. nauchno-tekhn. konf. «Shlyandinskije chteniya – 2016»* [Methods, tools and technologies for obtaining and processing measurement information: materials of the int. sci. and tech. conf. «Chlyandin readings – 2016»]. Penza: PSU, 2016, pp. 34–38 [in Russian].
 14. Nesterov V.N. Novyj klass invariantnyh izmeritel'nyh preobrazovatelej: metody postroeniya i realizaciya dlya priborov i sistem special'nogo naznacheniya [New class of invariant measuring transducers: methods of construction and implementation for devices and systems of special purpose]. In: *Informacionnye, izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy: nauch.-tekhn. sb. Samarskogo otdeleniya Povolzhskogo centra Metrologicheskoy akademii Rossii. Pod red. prof. V.N. Nesterova* [Information, measurement and control systems: sci. and tech. collection of the Samara branch of the Volga center of the Metrological Academy of Russia. Prof. V.N. Nesterov (Ed.)]. Samara: Izd. Samarskogo nauchnogo tsentra RAN, 2007, issue 3, pp. 18–37 [in Russian].
 15. Pat. 1165263 USSR, MPC G 01 R 17/10, G 01 B 7/18. Pashchenko V.V. Izmeritel'nyj preobrazovatel' [Measuring transducer]. Claims 12.26.83; Publ. 30.11.85, bul. no. 44 [in Russian].

Technological method for the design of measuring instruments and systems for operation in previously unknown operating conditions

V.N. Nesterov^{1,2}, A.R. Li²

¹ JSC «Samara Electromechanical Plant»
16, Stepan Razin Street

Samara, 443099, Russian Federation

² Samara National Research University

34, Moskovskoye Shosse

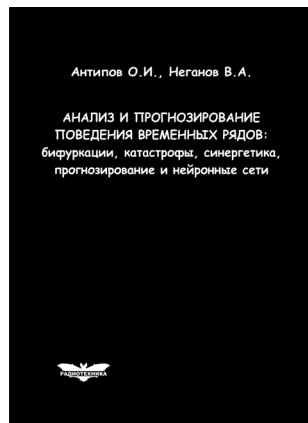
Samara, 443086, Russian Federation

The method of designing radio engineering systems and measuring instruments, which are not affected by disturbing influences, is presented. The method is developed on the base of dual channel principle, formulated by academician Petrov B.N. The technique of practical realization of this method is considered. The advantage of the method is that it allows compensating disturbing influences, nature of which is not known in advance. The efficiency of the method and its implementation technique are illustrated by dual channel measuring bridge circuit. The importance of correct metrological analysis, which confirms efficiency of the method, is shown.

Keywords: invariant theory, dual channel principle, technological method, disturbing influences, measuring instruments, measuring bridges.

Антипов, О.И.

Анализ и прогнозирование поведения временных рядов: бифуркации, катастрофы, синергетика, фракталы и нейронные сети / О.И. Антипов, В.А. Неганов. – М.: Радиотехника, 2011. – 350 с. ISBN 978-5-88070-294-7



УДК 530.1:621.372+621.396

ББК 32.96

Монография посвящена объединению нескольких направлений в науке: бифуркаций в нелинейных динамических (или детерминированных) системах, причем внимание уделяется бифуркациям-кризисам, которые отождествляются с катастрофами в синергетике – науке о самоорганизации в сложных системах, где велика роль коллективных, кооперативных эффектов, возникновения порядка – фрактальных структур в турбулентности (или хаосе). В синергетике общим является принцип подчинения, который позволяет исключать большое число переменных в сложных системах и описывать в них сложные процессы. Использование в роли одной из основных количественных характеристик катастроф фрактального показателя Херста связывает фракталы с бифуркациями. Объединение этих четырех направлений позволяет упростить проектирование прогнозирующих нейронных сетей, которое в настоящее время отчасти является искусством.

Даны авторские модификации некоторых известных фрактальных методов, позволяющие проводить более глубокий анализ хаотических процессов. Эти результаты, на наш взгляд, должны являться необходимой частью полного алгоритма построения прогностических моделей, описанного в книге. В частности, описан авторский алгоритм определения временного лага, необходимого для реконструкции аттрактора динамической системы, и модификация метода ближайших ложных соседей, которую можно использовать в качестве индикатора приближающейся катастрофы.

Приведены конкретные примеры из таких областей науки, как радиотехника, экономика и медицина.

Монография представляет интерес для научных работников, аспирантов и докторантов, работающих в области прикладных задач анализа, моделирования и прогнозирования хаотических процессов в нелинейных системах из различных отраслей науки и техники.