

*Т. Ю. Бростилова, В. Я. Горячев, Д. И. Нефедьев,
А. А. Тихомирова, О. К. Абдирашев*

МЕТОДИКА АНАЛИЗА СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДАТЧИКА ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*T. Yu. Brostilova, V. Ya. Goryachev, D. I. Nefed'ev,
A. A. Tikhomirova, O. K. Abdirashev*

METHOD OF ANALYSIS OF SYSTEMATIC ERROR OF INFORMATION-MEASURING SYSTEM OF DISPLACEMENTS BASED ON LINEAR DISPLACEMENT SENSOR FOR ELECTRIC POWER SYSTEMS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. В настоящее время при разработке информационно-измерительных систем механических величин недостаточное внимание уделяется анализу систематической погрешности и определению требований к метрологическим характеристикам отдельных блоков информационно-измерительной системы (ИИС) и конструктивным параметрам первичных преобразователей. Решению этой проблемы и посвящена данная статья. Объектом исследования является информационно-измерительная система линейных перемещений на базе датчика линейных перемещений (ДЛП) с бегущим магнитным полем, предназначенным для использования в электроэнергетических системах. Целью работы является разработка методики анализа систематической погрешности измерительной системы для определения требований к метрологическим характеристикам ее элементов и конструктивным параметрам ДЛП. **Материалы и методы.** Для решения проблемы формирования требований к заданным параметрам составных частей ИИС с датчиками линейных перемещений авторами предлагается модель системы, построенная на основе методологии построения имитационных систем. Предлагаемая имитационная модель отличается возможностью представления процесса функционирования информационно-измерительной системы в целом. Имитационная модель ИИС реализована в форме программы в среде MatLAB, которая позволяет проводить однофакторные и многофакторные эксперименты. В результате идет накопление экспериментальных данных, происходит обработка и анализ данных, выдается необходимая информация. Для анализа систематической погрешности ИИС используется разложение абсолютных погрешностей от действия отдельных факторов на ортогональные составляющие. Речь идет о коэффициентах Фурье. Использование ортогонального многомерного пространства позволяет определить результирующую систематическую погрешность ИИС по заданным точностным и конструктивным характеристикам элементов системы или сформировать требования к характеристикам элементов ИИС, при которых система будет иметь заданную систематическую погрешность. **Результаты.** Предложена методи-

ка анализа систематической погрешности информационно-измерительной системы линейных перемещений, реализованной на базе ДЛП. Для получения абсолютных погрешностей от действия влияющих факторов разработана имитационная модель информационно-измерительной системы в форме программы в среде MatLAB. Предложенная методика дала положительные результаты при исследовании информационно-измерительной системы линейных перемещений на базе ДЛП для электроэнергетических систем с помощью моделирования на компьютере. **Выводы.** При проектировании информационно-измерительной системы линейных перемещений на базе ДЛП для электроэнергетических систем возможно использование методики анализа систематической погрешности для формирования требований к параметрам и конструктивным характеристикам элементов системы, при которых система будет иметь заданную систематическую погрешность. Для реализации этой методики рекомендуется использовать имитационную модель.

A b s t r a c t. Background. Currently, in the development of information and measurement systems (IIS) of mechanical quantities, insufficient attention is paid to the analysis of systematic error and the definition of requirements for the metrological characteristics of individual blocks of IIS and design parameters of primary converters. The article considers the solution of this problem. The object of the study is an information-measuring system of linear displacements based on a linear displacement sensor (SDL) with a traveling magnetic field intended for use in electric power systems. The aim of the work is to develop a methodology for analyzing the systematic error of the measuring system to determine the requirements for the metrological characteristics of its elements and design parameters of the SDL. **Materials and methods.** A simulation model of the system is developed to solve the problem of forming requirements for the characteristics of elements and systems of linear displacements. The simulation model allows us to imagine the process of functioning of the information and measurement system as a whole. The simulation model is implemented in the form of a program in MatLAB, which allows one-factor and multi-factor experiments. As a result, experimental data are accumulated, data are processed and analyzed, and the necessary information is provided. To analyze the systematic error of the IIS, the decomposition of absolute errors from the action of individual factors into orthogonal components is used. We are talking about Fourier coefficients. The use of orthogonal multidimensional space makes it possible to determine the resulting systematic error of the system by the specified accuracy and design characteristics of the system elements or to form requirements for the characteristics of the elements of the system, in which the system will have a given systematic error. **Results.** The method of analysis of systematic error of information-measuring system of linear displacements realized on the basis of SDL is offered. To obtain absolute errors from influencing factors, a simulation model of the information and measurement system in the form of a program in the Mat-LAB environment was developed. The proposed method gave positive results in the study of information-measuring system of linear displacements on the basis of SDL for electric power systems with the help of computer modeling. **Conclusions.** When designing the information-measuring system of linear changes on the basis of SDL for electric power systems, it is possible to use the method of systematic error analysis to form requirements for the parameters and design characteristics of the system elements, in which the system will have a given systematic error. To implement this technique, it is recommended to use a simulation model.

К л ю ч е в ы е с л о в а: информационно-измерительная система линейных перемещений, имитационная модель, дисперсия, ортогональное пространство, систематическая погрешность, датчик линейных перемещений, коэффициенты Фурье.

К e y w o r d s: information-measuring system of linear displacements, simulation model, dispersion, orthogonal space, systematic error, linear displacement sensor, Fourier coefficients.

Введение

При разработке информационно-измерительной системы (ИИС) линейных перемещений на базе датчика линейных перемещений (ДЛП) [1, 2] с бегущим магнитным полем возникает необходимость формирования требований к параметрам узлов системы, при которых она обеспечит измерение с заданной погрешностью. Очевидно то, что формированием требований к параметрам узлов ИИС можно воздействовать только на систематическую погрешность системы.

На рис. 1 представлена блок-схема ИИС перемещений на основе ДЛП с бегущим магнитным полем.

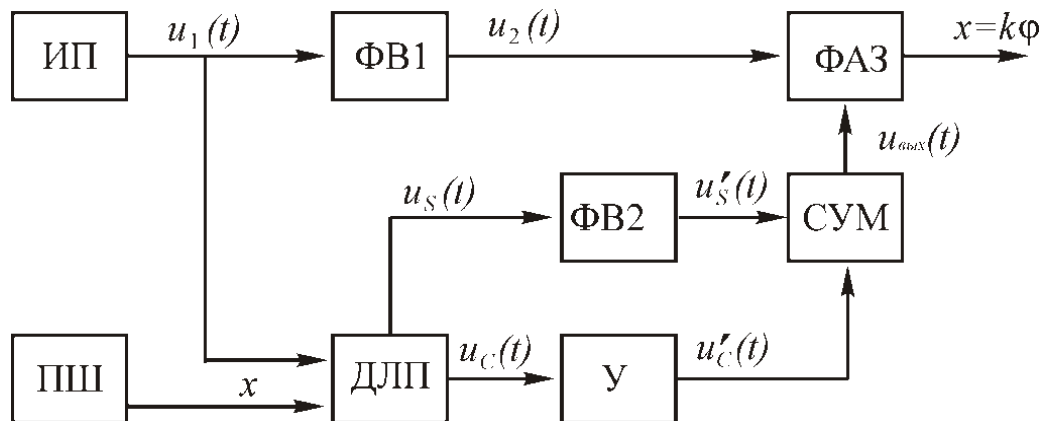


Рис. 1. Блок-схема ИИС перемещений на основе ДЛП с бегущим магнитным полем

На блок-схеме: ИП – источник переменного тока частотой f и выходным напряжением $u_1(t)$; ПШ – положение магнитного шунта относительно информационной линейки фазовращателя, которое определяет измеряемое перемещение; ФВ1 – фазовращатель напряжения генератора для установки нуля; ДЛП – датчик линейных перемещений; ФВ2 – фазовращатель, смещающий фазу напряжения синусной обмотки на 90° и обеспечивающий предварительное усиление этого выходного напряжения; У – дискретный или интегральный усилитель амплитудного значения напряжения косинусной обмотки; СУМ – сумматор выходных напряжений синусной и косинусной обмоток; ФАЗ – фазометр, предназначенный для измерения фазового сдвига выходного напряжения сумматора относительно опорного напряжения u_2 , полученные значения соответствуют измеряемому перемещению.

Погрешность преобразования сигнала каждого элемента ИИС вносит свою составляющую в результирующую погрешность системы.

К факторам, влияющим на систематическую погрешность ИИС, можно отнести: погрешность фазовращателя установки «нуля» – ФВ1, погрешность поворота фазы синусоидального напряжения на 90° – ФВ2, погрешность усилителя косинусного выходного напряжения ДЛП – У, погрешность сумматора – СУМ. На погрешность оказывает влияние точность изготовления элементов информационной линейки ДЛП: точность изготовления пазов магнитопровода линейки, дискретность количества витков обмоток, количество пазов линейки и другие параметры.

Таким образом, важной задачей проектирования ИИС заключается, с одной стороны, в обосновании требований к узлам системы, обеспечивающим функционирование фазовых датчиков, с другой стороны, в определении погрешности изготовления базовых элементов датчика с целью разработки измерительной системы с определенной систематической погрешностью.

Пути решения проблемы и имитационная модель ИИС

В теории создания имитационных моделей ИИС широкое распространение и признание специалистов получил ряд методов, которые позволяют обосновать как адекватность разработанной модели в общем, так и ее метрологические характеристики в частности.

В первую очередь необходимо отметить широко апробированный метод, основой которого является применение эмпирически полученных в результате оценки функционирования готовых изделий с учетом результатов их метрологических испытаний. Между тем известно, что данный подход приводит к существенному увеличению материальных затрат на ранних стадиях разработки изделия, что, в свою очередь, снижает экономическую эффективность всего процесса проектирования.

Второй способ отчасти решает проблему повышенных материальных затрат, основан на получении и всестороннем анализе функции преобразования информационно-измерительной системы. Способ позволяет достоверно определить степень влияния внешних воздействующих факторов на метрологические параметры ИИС, в частности на ее точность. Однако, как и в первом случае, приведенный метод имеет ряд существенных недостатков, серьезно ограничивающих его применение:

а) крайне тяжело, а в отдельных случаях невозможно получить адекватное аналитическое выражение для эффективного определения зависимости результирующей погрешности системы от влияния как внутренних, так и внешних факторов, главными из которых и одновременно наиболее сложными являются конструктивные параметры как отдельных элементов, так и узлов датчика. Это связано с применением функции преобразования;

б) как правило, не представляется возможным формализовать в полном объеме конструктивные параметры как первичного преобразователя, но и прежде всего датчика. Это обстоятельство в процессе получения функции преобразования ИИС приводит к неадекватному учету влияния факторов на погрешность ИИС в целом;

в) функция преобразования дает возможность произвести анализ выходных данных датчика только в том случае, если характеристики системы измерения заданы ранее. Прямо противоположная же задача, когда необходимо найти величину отклонений характеристик, обеспечивающих необходимую погрешность, требует гораздо больших трудозатрат, времени или же попросту невыполнима.

Сущность третьего метода определяется в применении предлагаемой авторами имитационной модели ИИС, разработанной с учетом хорошо исследованных физических процессов, происходящих в ДЛП и других узлах системы. Не вызывает сомнения, что третий метод является более подходящим и имеет несомненное преимущество, не только относящееся к его доступности, но и заключающееся в возможности выработать рекомендации для проектирования ИИС на основе датчиков линейных перемещений с существенной экономией времени.

В результате исследования авторы, используя методологию построения имитационных систем, предлагают модель ИИС, построенную на основе датчиков линейных перемещений на базе ДЛП с бегущим магнитным полем. На рис. 2 показана блок-схема алгоритма имитационной модели.

Влияние различных факторов на погрешность ИИС линейных перемещений

К параметрам измерительной системы, которые влияют на результирующую погрешность устройства, можно отнести следующие факторы:

- неравенство коэффициентов усиления выходных напряжений синусной и косинусной обмоток;
- погрешность поворота фазы фазовращателя ФВ2 на 90°;
- неравенство активных и реактивных сопротивлений цепей синусной и косинусной обмотки;
- погрешность фазовращателя ФВ1;
- нестабильность частоты генератора.

К конструктивным влияющим факторам относятся:

- дискретность количества зубцов датчика;
- точность изготовления шунта датчика;
- погрешность нанесения пазов информационной линейки;
- дискретность количества витков;
- изменение воздушного зазора шунта вдоль линейки;
- изменение равномерности зазора при перемещении шунта;
- изменение параметров магнитной цепи в зоне расположения магнитного шунта при его перемещении.

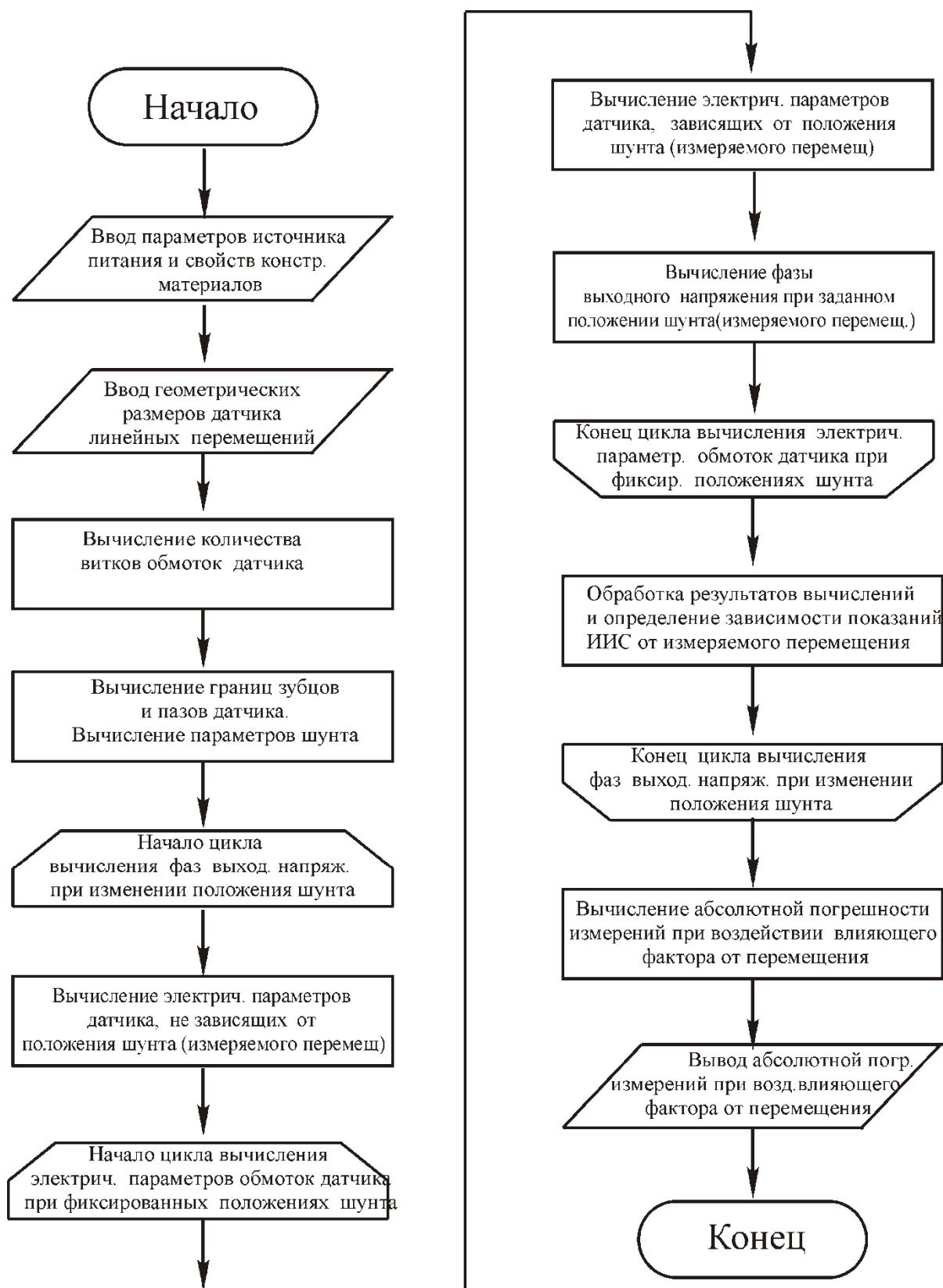


Рис. 2. Блок-схема алгоритма имитационной модели

В качестве примера ниже рассматривается информационно-измерительная система линейных перемещений 160 мм.

Определение влияния разности усиления выходных напряжений синусной и косинусной обмотки ДЛП на погрешность ИИС.

При разности максимальных амплитуд в 1% максимальное отклонение угла приближенно составляет 0,005 радиан, что подтверждается графиком (рис. 3), полученным путем использования имитационной модели. Закон изменения определяется практически синусоидальной функцией перемещения, период которой равен половине длины измерительной линейки.

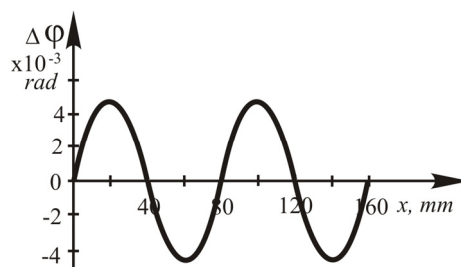


Рис. 3. Зависимость отклонения фазы входного напряжения при различной степени усиления выходного сигнала

Влияние дискретности количества витков информационной линейки

К появлению погрешности датчика приводит и неидеальное количество витков синусной и косинусной обмоток на каждом конкретном участке, так как количество витков не может быть дробным. Степень влияния отклонения количества витков от расчетного значения различна только для четверти участков (рис. 4). Как видно из рисунка, изменение фазы намагничивающей силы в части ее отклонения от принятого за идеальное значение на каждом контрольном промежутке принимает различные значения и изменяется по периодическому закону.

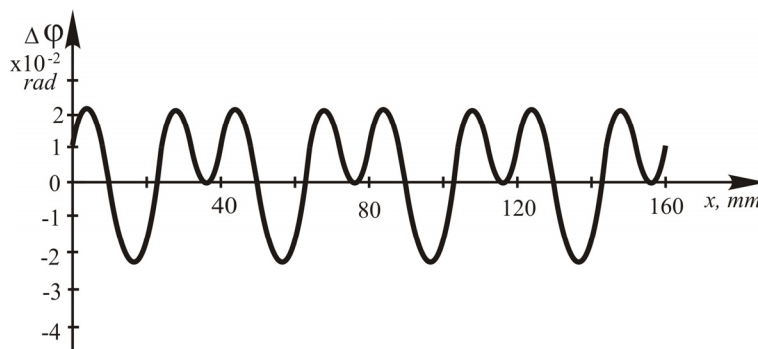


Рис. 4. Зависимость отклонения фазы входного напряжения при различном количестве витков информационной линейки

Влияние количества зубцовых делений на погрешность датчика

Природа появления погрешности, обусловленная ограниченным числом зубцов измерительной линейки, заключается в том, что количество зубцов конечно.

Дискретность распределения намагничивающих сил информационной линейки приводит к погрешности измерений, обусловленных этим фактором. На рис. 5 показана зависимость отклонения фазы входного напряжения фазометра от линейного закона, обусловленная дискретностью количества зубцов линейки.

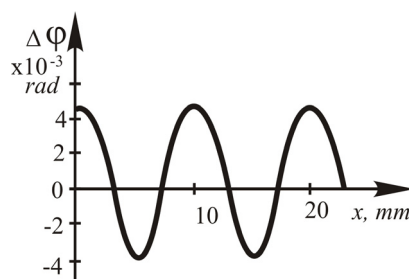


Рис. 5. Зависимость отклонения фазы входного напряжения при различном количестве зубцов линейки

Можно привести результаты исследования влияния и других факторов на погрешность ИИС. Для анализа погрешности ИИС предлагается использовать методику, суть которой изложена ниже.

Многомерное пространство и взаимодействие факторов

Как справедливо отмечено в работе [4], что система функций

$$\frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}}, \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \cos x, \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \sin(x), \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \cos(2 \cdot x), \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \sin(2 \cdot x), \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \cos(3 \cdot x), \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \sin(3 \cdot x), \dots,$$

представляет собой в явном виде полную ортонормированную систему.

Это обстоятельство позволяет утверждать, что при приближении функции тригонометрическим многочленом $s_n(x) = \frac{\alpha_0}{2} + \sum_{k=1}^n (\alpha_k \cdot \cos(k \cdot x) + \beta_k \cdot \sin(k \cdot x))$ среднеквадратичная погрешность $\delta^2 = \int_{-\pi}^{\pi} (f(x) - s_n(x))^2 \cdot dx$ минимальна тогда и только тогда, когда в качестве α_k и β_k выбраны так называемые коэффициенты Фурье, определение которых согласно работе [6] имеет следующий вид:

$$\alpha_k = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} (f(x) \cdot \cos(kx)) \cdot dx,$$

$$\beta_k = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} (f(x) \cdot \sin(kx)) \cdot dx,$$

где $k = 1, 2, 3, 4, \dots$

Авторы предлагают использовать как базу приведенную выше ортонормированную систему для многомерного ортогонального пространства, где легче всего анализировать взаимодействие результатов однофакторных и многофакторных экспериментов. Основная идея заключается в том, что отклонения от линейной «идеализированной» характеристики ИИС предлагается разложить по всем осям многомерного ортогонального пространства [6].

Механизм взаимного влияния факторов легко устанавливается разложением однофакторных зависимостей по осям многомерного пространства [6].

Тогда координатами вектора отклонения от действия фактора b являются коэффициенты Фурье: $\Delta\phi_b(A_0^b, B_{1m}^b, C_{1m}^b, B_{2m}^b, C_{2m}^b, B_{3m}^b, C_{3m}^b, B_{4m}^b, C_{4m}^b, \dots)$.

Дисперсия ошибки угла от действия фактора b определяется следующим уравнением:

$$D_a = (A_0^b)^2 + (B_1^b)^2 + (C_1^b)^2 + (B_2^b)^2 + (C_2^b)^2 + (B_3^b)^2 + \dots$$

где $B_1^b = B_{1m}^b / \sqrt{2}$, $C_1^b = C_{1m}^b / \sqrt{2}$, $B_2^b = B_{2m}^b / \sqrt{2}$, $C_2^b = C_{2m}^b / \sqrt{2}$ и т. д.

Рассмотрим подробнее случай влияния факторов на погрешность ИИС.

Погрешность ИИС определяется воздействием n влияющих факторов [7].

Дисперсия результирующего отклонения от действия первого фактора определяется формулой

$$D_1 = A_1^2 = A_{01}^2 + B_{11}^2 + C_{11}^2 + B_{21}^2 + C_{21}^2 + B_{31}^2 + C_{31}^2 + \dots + B_{r1}^2 + C_{r1}^2.$$

Веса координат векторов влияющих факторов определяются уравнениями [7]

$$v_{01} = q_{01}^2 = \frac{A_{01}^2}{A_1^2}; \quad v_{B11} = q_{B11}^2 = \frac{B_{11}^2}{A_1^2}; \quad v_{C11} = q_{C11}^2 = \frac{C_{11}^2}{A_1^2};$$

$$v_{B21} = q_{B21}^2 = \frac{B_{21}^2}{A_1^2}; \quad v_{C21} = q_{C21}^2 = \frac{C_{21}^2}{A_1^2}.$$

Таким образом, уравнение дисперсии от действия первого фактора примет следующий вид [7]:

$$D_1 = A_1^2 (v_{01} + v_{B11} + v_{C11} + v_{B21} + v_{C21} + \dots + v_{Br1} + v_{Cr1}).$$

Очевидно соотношение

$$v_{01} + v_{B11} + v_{C11} + v_{B21} + v_{C21} + \dots + v_{Br1} + v_{Cr1} = 1.$$

Аналогичные соотношения справедливы для всех других факторов. Модель погрешности можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} D = & A_1^2 + K_{12} A_1 A_2 + K_{13} A_1 A_3 + K_{14} A_1 A_4 + \dots + K_{1n} A_1 A_n + \\ & + A_2^2 + K_{12} A_1 A_2 + K_{23} A_2 A_3 + K_{24} A_2 A_4 + \dots + K_{2n} A_2 A_n + \dots + \\ & + A_n^2 + K_{1n} A_1 A_n + K_{2n} A_2 A_n + \dots + K_{(n-1)n} A_{(n-1)} A_n, \end{aligned}$$

где D – результирующая дисперсия при одновременном действии всех n факторов; $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ – стандартные отклонения однофакторных экспериментов; $K_{12}, K_{13}, \dots, K_{23}, K_{24}, \dots, K_{34}, K_{35}, \dots, K_{(n-1)n}$ – коэффициенты взаимного влияния факторов.

Коэффициенты взаимного влияния факторов выражаются через веса коэффициентов Фурье соответствующих факторов. Коэффициент взаимного влияния первого и второго фактора определяется следующим образом:

$$K_{12} = \sqrt{v_{01} \cdot v_{02}} + \sqrt{v_{B11} \cdot v_{B12}} + \sqrt{v_{C11} \cdot v_{C12}} + \sqrt{v_{B21} \cdot v_{B22}} + \sqrt{v_{C21} \cdot v_{C22}} + \dots$$

Для наглядности вычисления коэффициентов взаимного влияния рекомендуется составить таблицу весов коэффициентов Фурье по осям многомерного пространства. Практика исследований указывает на то, что для практических расчетов достаточно рассмотреть составляющие по 15...19 осям.

Определение допустимых отклонений параметров из условия равенства весов

Относительная погрешность в результате влияния первого фактора определяется отношением стандартного отклонения к диапазону изменения фазы при полном перемещении шунта. В дальнейшем буквами $D_1, D_2, D_3, \dots$ будем обозначать дисперсии отклонений факторов однофакторных экспериментов. Буквами $D_1^1, D_2^1, D_3^1, \dots$ обозначим дисперсии, определенные факторами с учетом их взаимного влияния.

Определим допустимые отклонения параметров, влияющих на погрешность датчика из условия равенства весов влияющих факторов [5].

Максимальное изменение фазы на входе фазометра равно 2π . Погрешность датчика, вызванная воздействием первого фактора p_1 , равна

$$p_1 = \frac{\sqrt{D_1}}{2\pi} = \frac{A_1}{2\pi} \cdot 4\pi^2 p_1^2 = D_1.$$

Результирующая относительная погрешность и дисперсия связаны следующим соотношением:

$$p = \frac{\sqrt{D}}{2\pi} = \frac{A}{2\pi} \cdot 4\pi^2 p^2 = D.$$

Суммарная дисперсия отклонений фазы при одновременном воздействии на датчик всех факторов равна сумме дисперсий:

$$D = D_1^1 + D_2^1 + D_3^1 + \dots + D_n^1,$$

где $D_1^1, D_2^1, D_3^1, \dots, D_n^1$ – дисперсии, обусловленные факторами с учетом их взаимного влияния.

Введем понятие веса фактора с учетом взаимного влияния факторов.

Под весом влияния первого фактора будем понимать отношение следующего вида:

$$V_1 = \frac{A_1^2 + K_{12}A_1A_2 + K_{13}A_1A_3 + \dots + K_{1l}A_1A_l}{D} = \frac{D_1^1}{D}.$$

Формулы расчета весов других факторов будут записаны в аналогичном виде.

Вычислим допустимые отклонения влияющих факторов из условия равенства весов, учитывающих их взаимное влияние.

Вес первого фактора в суммарной дисперсии определится отношением

$$\frac{D_1^1}{D} = \frac{4\pi^2 p_1^2}{4\pi^2 p^2} = \frac{p_1^2}{p^2}.$$

С другой стороны, сумма весов всех факторов равна единице

$$\frac{D_1^1}{D} + \frac{D_2^1}{D} + \frac{D_3^1}{D} + \dots + \frac{D_l^1}{D} = 1.$$

Равенство весов предполагает равенство дисперсий

$$D_1^1 = D_2^1 = D_3^1 = \dots = D_l^1.$$

Заменяя отношение дисперсий отношением квадратов погрешностей, получим уравнение

$$p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + p_4^2 + \dots + p_l^2 = p^2.$$

В случае равенства дисперсий получаем

$$p_1^2 = p_2^2 = p_3^2 = \dots = p_l^2 = \frac{p^2}{n}.$$

Составляющие погрешности $p_1, p_2, p_3, \dots, p_l$ являются функциями всех влияющих факторов. Стандартные отклонения, обусловленные влияющими факторами, находятся из системы уравнений

$$A_1^2 + K_{12}A_1A_2 + K_{13}A_1A_3 + \dots + K_{1l}A_1A_l = \frac{4(\pi p^1)^2}{n};$$

$$K_{12}A_1A_2 + A_2^2 + K_{23}A_2A_3 + \dots + K_{2l}A_2A_l = \frac{4(\pi p^1)^2}{n};$$

$$K_{13}A_1A_3 + K_{23}A_2A_3 + A_3^2 + \dots + K_{3l}A_3A_l = \frac{4(\pi p^1)^2}{n};$$

...

$$K_{1l}A_1A_l + K_{2l}A_2A_l + K_{3l}A_3A_l + \dots + A_l^2 = \frac{4(\pi p^1)^2}{n}.$$

Нелинейное уравнение порядка n решается с помощью средств вычислительной техники. При анализе погрешности фазового датчика линейных перемещений количество факторов равно $n = 12$.

Решением системы являются стандартные отклонения однофакторных воздействий. Стандартные отклонения однофакторных воздействий дают возможность определить пределы отклонений влияющих факторов.

Полученные относительные погрешности однофакторных воздействий позволяют получить коэффициенты для вычисления допустимых отклонений по каждому параметру.

Ниже приведен пример решения системы нелинейных уравнений для вычисления стандартных отклонений на основании равенства дисперсий в среде MathCAD:

$$m1(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,l,k) := a^2 + ab + 0,699ah + 0,057ap + \\ + 0,797aq + 0,053al + 0,019ak - 0,0001;$$

$$m2(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,l,k) := ab + b^2 + 0,023bc + bd + \\ + 0,091be + 0,023bp + 0,057al - 0,0001;$$

$$m3(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,l,k) := 0,023bc + c^2 + 0,022cd + \\ + 0,098ce + 0,051cp + 0,39ck - 0,00014;$$

$$m4(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,l,k) := bd + 0,022cd + d^2 + \\ + 0,091de + 0,021dp + 0,056dl - 0,0001;$$

$$m5(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,l,k) := 0,091be + 0,998ce + \\ + 0,091de + e^2 + 0,052ep + 0,389ek - 0,0001;$$

$$m6(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,l,k) := f^2 + 0,092fg - 0,0001;$$

$$m7(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,l,k) := g^2 + 0,092gf + 0,079gl + \\ + 0,051gk - 0,0001;$$

$$m8(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,l,k) := h^2 + 0,699ha + 0,125hp + \\ + 0,317hq + 0,11hl + 0,015hk - 0,0001;$$

$$m9(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,l,k) := p^2 + 0,057pa + 0,023pb + \\ + 0,051pc + 0,021pd + 0,052pe + 0,125ph + 0,05pq + \\ + 0,655p1 + 0,204pk - 0,0001;$$

$$m10(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,l,k) := 0,797qa + 0,317qh + 0,05qp + q^2 + \\ + 0,053ql + 0,018qk - 0,0001;$$

$$m11(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,l,k) := 0,053 \cdot 1 \cdot a + 0,057 \cdot 1 \cdot b + 0,056 \cdot l \cdot d + \\ + 0,079 \cdot l \cdot g + 0,11 \cdot l \cdot h + 0,655 \cdot l \cdot p + 0,053 \cdot l \cdot q + l^2 + 0,171 \cdot l \cdot k - 0,0001;$$

$$m12(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,l,k) := k^2 + 0,019ak + 0,39kc + 0,389ke + \\ + 0,051kg + 0,015kh + 0,204kp + 0,018kq + 0,171k \cdot l - 0,0001;$$

$$a := 0 \quad b := 0 \quad c := 0 \quad d := 0 \quad e := 0 \quad f := 0 \quad g := 0 \quad h := 0 \quad p := 0 \\ q := 0 \quad 1 := 0 \quad k := 0.$$

Given

$$m1(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k) = 0 \quad m2(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k) = 0$$

$$m3(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k) = 0 \quad m4(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k) = 0$$

$$m5(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k) = 0 \quad m6(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k) = 0$$

$$m7(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k) = 0 \quad m8(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k) = 0$$

$$m9(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k) = 0 \quad m10(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k) = 0$$

$$m11(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k) = 0 \quad m12(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k) = 0$$

$$v := \text{Find}(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k).$$

В приведенных уравнениях переменные $a, b, c, d, \dots, l, k$ являются стандартными отклонениями однофакторных экспериментов.

В рассмотренной программе буквами $a...k$ обозначены стандартные отклонения выходного сигнала от действия следующих факторов:

$a = 4,641 \cdot 10^{-3}$ – отклонение амплитуд напряжений генератора;

$b = 5,404 \cdot 10^{-3}$ – влияние точности установки фазового сдвига напряжений на входе сумматора;

$c = 6,382 \cdot 10^{-3}$ – влияние дискретности количества зубцов;

$d = 7,227 \cdot 10^{-3}$ – влияние отклонения количества витков от расчетного значения;

$e = 6,048 \cdot 10^{-3}$ – допуск на границы пазов в относительных единицах;

$f = 9,587 \cdot 10^{-3}$ – изменение длины зазора при перемещении шунта;

$g = 9,163 \cdot 10^{-3}$ – влияние изменения равномерности зазора;

$h = 7,03 \cdot 10^{-3}$ – влияние неравенства сопротивлений нагрузки;

$p = 6,725 \cdot 10^{-3}$ – влияние нестабильности частоты;

$q = 7,184 \cdot 10^{-3}$ – влияние погрешности изготовления шунта;

$l = 6,649 \cdot 10^{-3}$ – влияние точности балансировки сопротивлений обмоток магнитопровода;

$k = 4,726 \cdot 10^{-3}$ – влияние свойств материала магнитопровода.

По полученным значениям стандартных отклонений с помощью коэффициентов взаимодействия определяются допустимые отклонения того или другого параметра. Коэффициент влияния точности фазового сдвига напряжений на входе сумматора, вычисленный с помощью имитационной модели, равен 2,24. В нашем случае стандартное отклонение этого фактора должно быть равным $b = 5,404 \cdot 10^{-3}$. Разделив это значение на коэффициент влияния 2,24, получаем $2,41 \cdot 10^{-3}$ радиан. Погрешность фазового сдвига в процентах от идеального значения в $\pi/2$ радиан составит 0,15 %.

Заключение

Исходя из выше сказанного, в ходе конструкторско-технологического проектирования ИИС на основе схем фазовращателей с бегущим магнитным полем представляется крайне важным создание и ее имитационной модели. Такая модель необходима для получения идеализированной характеристики системы. Разработанная на основе имитационного моделирования модель ИИС должна определять абсолютную погрешность в зависимости от измеряемого перемещения, одновременно учитывая множество факторов. При этом вес каждого отдельно взятого фактора определяет степень его влияния на результирующую погрешность. Из условия тождественности весового коэффициента с дополнительно введенным поправочным коэффициентом вычисляются допустимые отклонения конструктивных параметров от параметров, полученных численным решением [6]. Однако не вызывает сомнения, что это не оптимальное решение.

Следует отметить, что при определении допустимых отклонений ИИС наиболее оптимальный результат следует ожидать в случае использования предложенной выше методики разложения результатов однофакторных отклонений по осям многомерного пространства.

Библиографический список

1. Конюхов, Н. Е. Электромагнитные датчики механических величин / Н. Е. Конюхов, Ф. М. Медников, М. Л. Нечаевский. – Москва : Машиностроение, 1987. – 256 с.
2. Батоврин, А. А. Электромашинные фазовращатели / А. А. Батоврин. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1986. – 124 с.
3. Пат. 2272244, МПК G01B 7/00. Фазовый датчик линейных перемещений / Горячев В. Я., Волчихин В. И., Чепасов А. П. – Заявл. 30.06.2004 ; опубл. 20.03.06, Бюл. № 8 ; Приоритет 30.06.2004. – 8 с.
4. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – Москва : Наука, 1986. – 544 с.
5. Уайлд, Д. Оптимальное проектирование / Д. Уайлд. – Москва : Мир, 1981. – 153 с.

6. Горячев, В. Я. Погрешность информационно-измерительных систем с электромеханическими датчиками / В. Я. Горячев, С. В. Кисляков, Д. И. Неведьев, Б. П. Сибринин // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы. – 2019. – С. 186–189.
7. Горячев, В. Я. Спектральный метод анализа погрешности информационно-измерительной системы / В. Я. Горячев, Д. И. Неведьев, О. В. Гаврина // Наукоедение. – 2014. – № 5 (24). – 43TVN514.

References

1. Konyukhov N. E., Mednikov F. M., Nechaevskiy M. L. *Elektromagnitnye datchiki mekhanicheskikh velichin* [Electromagnetic sensors of mechanical quantities]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 256 p. [In Russian]
2. Batovrin A. A. *Elektromashinnye fazovrashchateli* [Electric phase shifters]. Leningrad: Energoatomizdat, 1986, 124 p. [In Russian]
3. Pat. 2272244, MPK G01B 7/00. *Fazovyy datchik lineynykh peremeshcheniy* [Pat. 2272244, IPC G01B 7/00. Linear motion phase sensor]. Goryachev V. Ya., Volchikhin V. I., Chepasov A. P., appl. 30.06.2004; publ. 20.03.06, bull. no. 8; prioritet 30.06.2004, 8 p. [In Russian]
4. Bronshteyn I. N., Semendyaev K. A. *Spravochnik po matematike* [Handbook of mathematics]. Moscow: Nauka, 1986, 544 p. [In Russian]
5. Uayld D. *Optimal'noe proektirovanie* [Optimal design]. Moscow: Mir, 1981, 153 p. [In Russian]
6. Goryachev V. Ya., Kislyakov S. V., Nefed'ev D. I., Sibirin B. P. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy* [Information technologies in science and education. Problems and prospects]. 2019, pp. 186–189. [In Russian]
7. Goryachev V. Ya., Nefed'ev D. I., Gavrina O. V. *Naukovedenie* [Science of science]. 2014, no. 5 (24), 43TVN514. [In Russian]

Бростилова Татьяна Юрьевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра электроэнергетики и электротехники,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tat-krupkina@yandex.ru

Brostilova Tat'yana Yur'evna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of power engineering
and electrical engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Горячев Владимир Яковлевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра электроэнергетики и электротехники,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: gorvlad1@yandex.ru

Goryachev Vladimir Yakovlevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of power engineering
and electrical engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Неведьев Дмитрий Иванович

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной техники
и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ndi200106@yandex.ru

Nefed'ev Dmitriy Ivanovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information-measuring
equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Тихомирова Анна Алексеевна

старший преподаватель,
кафедра электроэнергетики и электротехники,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: an.tihomirova2013@yandex.ru

Tikhomirova Anna Alekseevna

senior lecturer,
sub-department of power engineering
and electrical engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Абдирашев Омирзак Коптилеуулы

магистр, старший преподаватель,
кафедра космической техники и технологий,
Евразийский национальный университет
имени Л. Н. Гумилева
(Казахстан, г. Нур-Султан, ул. Казымукана, 11)
E-mail: omeke_92@mail.ru

Abdirashev Omirzak Koptileuuly

master, senior lecturer,
sub-department of space technic and technology,
L. N. Gumilyov Eurasian National University
(11 Kazhymukana street, Nur-Sultan, Kazakhstan)

Образец цитирования:

Методика анализа систематической погрешности информационно-измерительной системы перемещений на основе датчика линейных перемещений для электроэнергетических систем / Т. Ю. Бро-стилова, В. Я. Горячев, Д. И. Нефедьев, А. А. Тихомирова, О. К. Абдирашев // Измерение. Монито-ринг. Управление. Контроль. – 2019. – № 4 (30). – С. 21–33. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-4-3.