УДК 621.3.083.92

Моделирование измерительных информационных систем

Николай РУБИЧЕВ

Nickolay A. RUBICHEV

***Рубичев Николай Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника, метрология и электроэнергетика» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).*

Обосновывается целесообразность моделирования при анализе погрешностей измерений с помощью информационных систем. Рассматривается построение исходных моделей, измерительного канала, реального и идеального алгоритмов обработки, а также подходы в ситуации неопределенности, обусловленной неадекватностью математических представлений исследуемого объекта.

Ключевые слова: измерительные информационные системы, анализ погрешностей, математическое моделирование.

В нормативных документах [1, 2] и ряде работ [3, 4 и др.] рекомендуется поэлементная поверка (калибровка) измерительных информационных систем (ИИС). Это обусловлено большой номенклатурой задач, решаемых ИИС, а также их гибкостью, возможностью наращивать число измерительных задач на базе одних и тех же аппаратных средств. Поэлементная поверка сводится к поверке всех измерительных каналов (ИК). Параллельно предполагается аттестация программно-математического обеспечения (ПМО). Однако при решении каждой отдельной задачи необходимо оценить погрешность (неопределенность) измерений по известным нормированным метрологическим характеристикам ИК с учетом свойств ПМО. В [4] отмечалось, что основной метод здесь – математическое моделирование. В данном случае этот вопрос будет рассмотрен более детально.

ПОДХОДЫ К ИЗМЕРЕНИЮ

Измерения с помощью ИИС можно трактовать как косвенные или совместные, поскольку один или несколько результатов получаются после обработки больших массивов первичной измерительной информации. Поэтому теоретически для анализа погрешностей измерений с помощью ИИС применимы общеизвестные методы.

Пусть величины $y_1, \dots, y_m$ находятся по результатам измерения величин $x_1, \dots, x_n$, измеряемых с погрешностями Δx_i. В ИИС исходными величинами x_i являются отсчеты, снимаемые с ИК, а результаты измерения y_j, представляют собою функционалы, параметры математических моделей или показатели отклонения формы, описывающие детерминированные объекты, операторы преобразования сигналов, случайные объекты и др. [5].

Таким образом,

$$y_k = f_k(x_1,.., x_n);\ k = 1, \dots, m \le n. \qquad (1)$$

В предположении малости погрешностей Δx_i аппаратные погрешности косвенных и совместных измерений Δy_k можно выразить в виде линейной комбинации погрешностей Δx_i

$$\Delta y_k = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial f_k}{\partial x_i} \Delta x_i\,. \qquad (2)$$

Это соотношение учитывает только погрешности измерений величин x_i, в которые могут входить и свои методические погрешности. Правда, таковые, обусловленные видом функции f_k, в (2) не учитываются.

Соотношение (2) можно использовать для полных, систематических и случайных погрешностей. Для систематических погрешностей, подставляя известные пределы допускаемых значений, есть возможность оценить сверху погрешности совместных измерений.

Для дисперсии случайной погрешности, аналогично (5), записываем:

$$\sigma_{yk}^2 = \sum_{i=1}^{n} \sum_{\nu=1}^{n} \frac{\partial f_k}{\partial x_i} \frac{\partial f_k}{\partial x_\nu} \sigma_{xi} \sigma_{x\nu} R_{i\nu}\,, \qquad (3)$$

где σ_{xi} – средние квадратичные отклонения случайных погрешностей измерения величин x_i, $R_{y\nu}$ – коэффициенты взаимной корреляции погрешностей.

При косвенных и совместных измерениях с помощью неавтоматизированных средств измерения исходных величин можно считать независимыми. Тогда при $i \ne \nu$ $R_{y\nu}=0$ и

$$\sigma_{yk}^2 = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f_k}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{xi}^2\,. \qquad (4)$$

Для случайных независимых погрешностей мы пришли к строго обоснованному квадратичному суммированию.

В совместных измерениях, даже при независимости погрешностей измерений величин x_i, погрешности измерения различных величин y_k в соответствии с (2) будут различными линейными комбинациями одних и тех же величин и, следовательно, окажутся зависимыми. Учет этой зависимости имеет большое значение при дальнейшем использовании результатов измерений. Для ее оценки применимы корреляционные моменты случайных погрешностей измерения различных величин y_k, которые вычисляются по формуле, аналогичной (3):

$$K_{k\mu} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{\nu=1}^{n} \frac{\partial f_k}{\partial x_i} \frac{\partial f_\mu}{\partial x_\nu} \sigma_{xi} \sigma_{x\nu} R_{i\nu}\,. \qquad (5)$$

При независимости погрешностей измерения исходных величин эта формула упрощается

$$K_{k\mu} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial f_k}{\partial x_i} \frac{\partial f_\mu}{\partial x_i} \sigma_{xi}^2\,. \qquad (6)$$

В ИИС исходные данные представляют собой отсчеты исследуемых физических величин, берущихся с достаточно малым интервалом времени. Поэтому отсчеты, снимаемые с одного ИК, будут зависимыми. Могут оказаться зависимыми и отсчеты, снимаемые с разных ИК. С учетом этого упрощенные формулы (4) и (6) для ИИС неприменимы.

Приведенные соотношения весьма просты и наглядны. Их использование для малых m и n не вызывает каких-либо сложностей. Однако применительно к ИИС наталкивается на две трудности.

1. Число аргументов функции (1) (объем обрабатываемых отсчетов) составляет десятки, сотни, а иногда и более. Необходимость вычисления производных существенно осложняет поставленную задачу, хотя с использованием современной вычислительной техники она и может быть решена. Это обстоятельство приводит и к некоторым благоприятным последствиям. Благодаря наличию в формуле (2) большого числа слагаемых, даже при зависимых погрешностях исходных измерений погрешности измерения величин y_j можно считать распределенными нормально, что существенно упрощает их описание.

2. Функции f_k могут быть не заданы в явном виде, а задаваться алгоритмом, определяющим последовательность вычислительных процедур. Такая ситуация типична для аппроксимационных подходов к оценке параметров математической модели и при измерении показателей отклонения формы. И тогда вычисление производных в (2) оказывается практически невозможным. Это обстоятельство является наиболее существенным.

При таком раскладе, используя аналитические методы, можно получить только очень завышенные оценки погрешностей. То есть актуализируется потребность в моделировании.

Модельная конструкция должна содержать следующие компоненты:

1) модель исследуемого объекта (ИО), учитывающая его свойства и суть измерительной задачи;

2) математические модели всех ИК, отражающие их метрологические характеристики и моделирующие систематические и случайные факторы;

3) реальный алгоритм сбора и обработки исходных данных, реализованный в ИИС.

4) идеальный алгоритм обработки первичной измерительной информации.

МОДЕЛЬ ИО

Основное назначение этого компонента – моделирование массива исходных данных, неискаженных погрешностями ИК. Он должен включать в себя все математические модели ИО, известные на момент разработки ИИС. При этом закладывается возможность пополнения набора подобных моделей.

Моделирование предполагает, что ИО полностью соответствует используемой для его описания математической модели, то есть моделируемый массив является идеальным как в смысле отсутствия погрешностей измерений, так и в смысле полной адекватности самой математической модели. Такие модели могут быть различными для различных классов ИИС и измерительных задач. Они включают:

– математические модели, содержащие ограничения на динамические характеристики исследуемых сигналов (спектры или абсолютные значения производных), используемые в системах регистрации и измерения функционалов;

– функциональные модели, определяющие вид уравнения связи между исследуемыми физическими величинами и задающие вид измеряемых параметров;

– линейные операторы преобразования сигналов с функциональными моделями характеристик этих операторов;

– нелинейные безынерционные операторы преобразования сигнала с функциональными моделями функций преобразования;

– случайные величины с заданными числовыми характеристиками или функциональными моделями законов распределения;

– случайные процессы с функциональными моделями спектрально-корреляционных характеристик.

В результате моделирования ИО будут сформированы массивы отсчетов исследуемых физических величин, точно соответствующие используемому математическому описанию объектов. Шаг дискретизации по времени, пространству и другим аргументам, как и всегда при метрологических исследованиях, должен быть в несколько раз меньше, чем в реальной ИИС.

В процессе моделирования, естественно, должна предусматриваться возможность задания различных параметров функциональной модели ИО. Для неко-

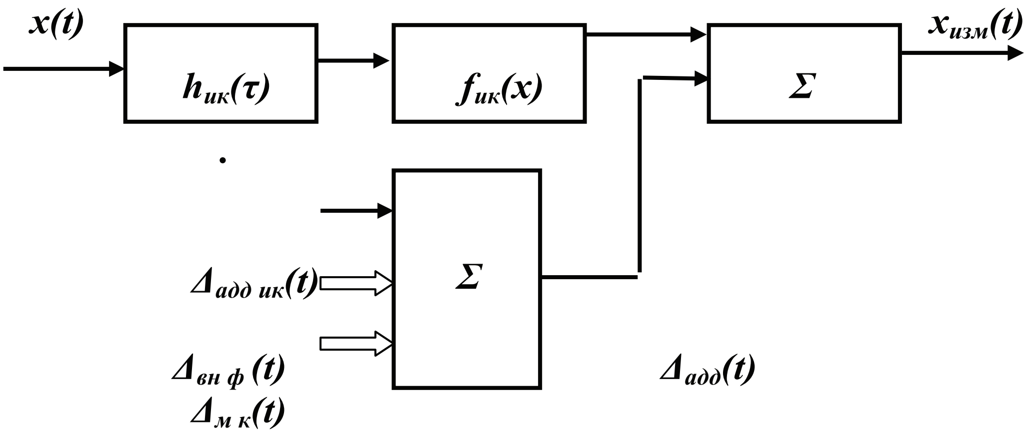

Рис. 1.

торых задач, которых мы коснемся ниже, в рамках этой модели могут вводиться локальные возмущения, присущие ИО и отражающие его отличие от используемой для его описания модели.

МОДЕЛЬ ИК

Эта модель, учитывающая аппаратную структуру ИИС, более консервативна. Она может изменяться только в том случае, если в процессе эксплуатации в состав систем будут включаться новые аппаратные средства. В этом случае у пользователя должна иметься возможность пополнения ПМО моделирования за счет включения моделей новых ИК.

Неискаженный массив данных, построенный на основе модели ИО, подвергается преобразованиям, аналогичным при реальной работе ИК, и формируется массив данных, поступающих на обработку.

Типовые метрологические характеристики ИК оговорены в [1, 2]. Объединяя разные по происхождению, но одинаковые по проявлению источники погрешности, их можно объединить в три группы.

1) Линейное преобразование измерительного сигнала, приводящее к линейным искажениям, которые являются разновидностью мультипликативной погрешности.

2) Нелинейное безынерционное преобразование измерительного сигнала, приводящее к нелинейным искажениям, которые также являются разновидностью мультипликативной погрешности. Сюда же может быть включена и погрешность задания масштабирующего коэффициента.

3) Аддитивные погрешности, описываемые энергетическим спектром или корреляционной функцией.

С учетом этого на рис. 1 приведена обобщенная эквивалентная структурная модель ИК.

Первый линейный блок с импульсной реакцией $h_{ик}(\tau)$ вносит линейные искажения в измеряемый сигнал *x(t)*. Не нарушая общности, можно считать, что частотная характеристика $K_{ик}(\omega)$, соответствующая этой импульсной реакции, для нулевой частоты равна единице.

Второй блок осуществляет нелинейное безынерционное преобразование в соответствии с функцией преобразования $f_{ик}(x)$, формируя нелинейные искажения. Нелинейные и линейные искажения вносят основной вклад в мультипликативную погрешность, зависящую от свойств измеряемого сигнала.

Преобразованный сигнал суммируется с аддитивной погрешностью $\Delta_{адд}(t)$, которая содержит систематические и случайные компоненты. Корреляционная функция или энергетический спектр этой функции предполагаются известными. Функция $\Delta_{адд}(t)$ формируется в результате суммирования погрешности собственно ИК $\Delta_{адд\ ик}(t)$ (без учета погрешностей из-за линейных и нелинейных искажений в первых двух блоках), погрешности $\Delta_{вн.ф}(t)$, обусловленной действием внешних факторов, и погрешности $\Delta_{м.к}(t)$, вызванной взаимным влиянием каналов.

Последние два слагаемых показаны на рис. 1 в векторной форме, поскольку каждое из них в свою очередь разбивается на различные составляющие, при расчете которых учитываются соответствующие функции влияния, не отраженные графически.

Вычитая из выходного сигнала входной сигнал, мы получаем полную погрешность ИК $\Delta(t)$, состоящую из двух основных компонентов: функции $\Delta_{адд}(t)$ и продуктов линейных и нелинейных искажений измеряемого сигнала $\Delta_{иск}(t)$.

Эта структурная модель может быть положена в основу математической модели при расчете аппаратной погрешности. Причем подчеркнем, что преобразование модели реального сигнала будет производиться в соответствии с расчетной, воспроизводящей метрологические характеристики ИК, полученные в результате физического исследования. Исследоваться может ИК в целом или его элементы, поскольку ИК представляет собою каскадное соединение нескольких элементов, число которых мы обозначим через *M*. Во втором случае при определении метрологических характеристик могут совместно использоваться экспериментальные и расчетные методы.

Каждый элемент имеет свои характеристики: комплексную частотную характеристику $\dot{K}_c(\omega)$, функцию преобразования f_c и аддитивную составляющую $\Delta_{аддс}(t)$ с энергетическим спектром $S_c(\omega)$, то есть его функциональная структура совпадает со структурой ИК, приведенной на рис. 1.

Предполагая погрешности, вносимые элементами ИК, малыми по сравнению с измеряемым сигналом, допустимо считать, что нелинейность элемента практически не изменяет погрешности предыдущих элементов и вносит погрешности в преобразуемый сигнал. Тогда характеристику преобразования каждого элемента можно представить в виде

$$y = f_c(x) = k_c x + \delta f_c(x) \tag{7}$$

и при преобразовании погрешностей учитывать только первое слагаемое. (При записи (7) мы опустили аддитивную константу, которая для анализа не имеет принципиального значения.)

Функция преобразования канала ИК может быть записана путем последовательного применения функций преобразования каждого элемента:

$$y = f_{ик}(x) = f_M\left\{f_{M-1}\left[\dots f_1(x)\right]\right\} \approx$$

$$\approx x\prod_{c=1}^{M} k_c + \sum_{c=1}^{M}\delta f_c\left(x\prod_{\nu=1}^{c-1} k_\nu\right)\prod_{\nu=c+1}^{M} k_\nu . \tag{8}$$

Комплексная частотная характеристика ИК вычисляется по формуле

$$\dot{K}_{ик}(\omega) = \prod_{c=1}^{M} \dot{K}_c(\omega). \tag{9}$$

Энергетический спектр аддитивной компоненты неопределенности ИК с учетом подавления отдельных компонентов последующими элементами запишется в виде

$$S_{ик}(\omega) = \sum_{c=1}^{M} S_c(\omega)\prod_{\nu=c+1}^{M} K_\nu^2(\omega). \tag{10}$$

При экспериментальном исследовании ИК и его элементов необходимо определить эквивалентные операторы линейного и нелинейного преобразований и вероятностные характеристики аддитивных составляющих.

РЕАЛЬНЫЙ И ИДЕАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ

Третий компонент не требует специального моделирования, поскольку он заимствуется из основного ПМО измерительной информационной системы, используемого при ее нормальной эксплуатации.

Четвертый компонент присутствует в тех случаях, когда реальный алгоритм обработки отличается от идеального. Иначе он совпадает с третьим компонентом. Эта модель также не требует специальной разработки, ибо обоснованно выбрать реальный алгоритм, не располагая идеальным, трудно. Однако при моделировании идеального алгоритма, даже если по вычислительным функциям он совпадает с реальным, следует в несколько раз уменьшить шаг дискретизации, поскольку погрешность из-за нее явля-

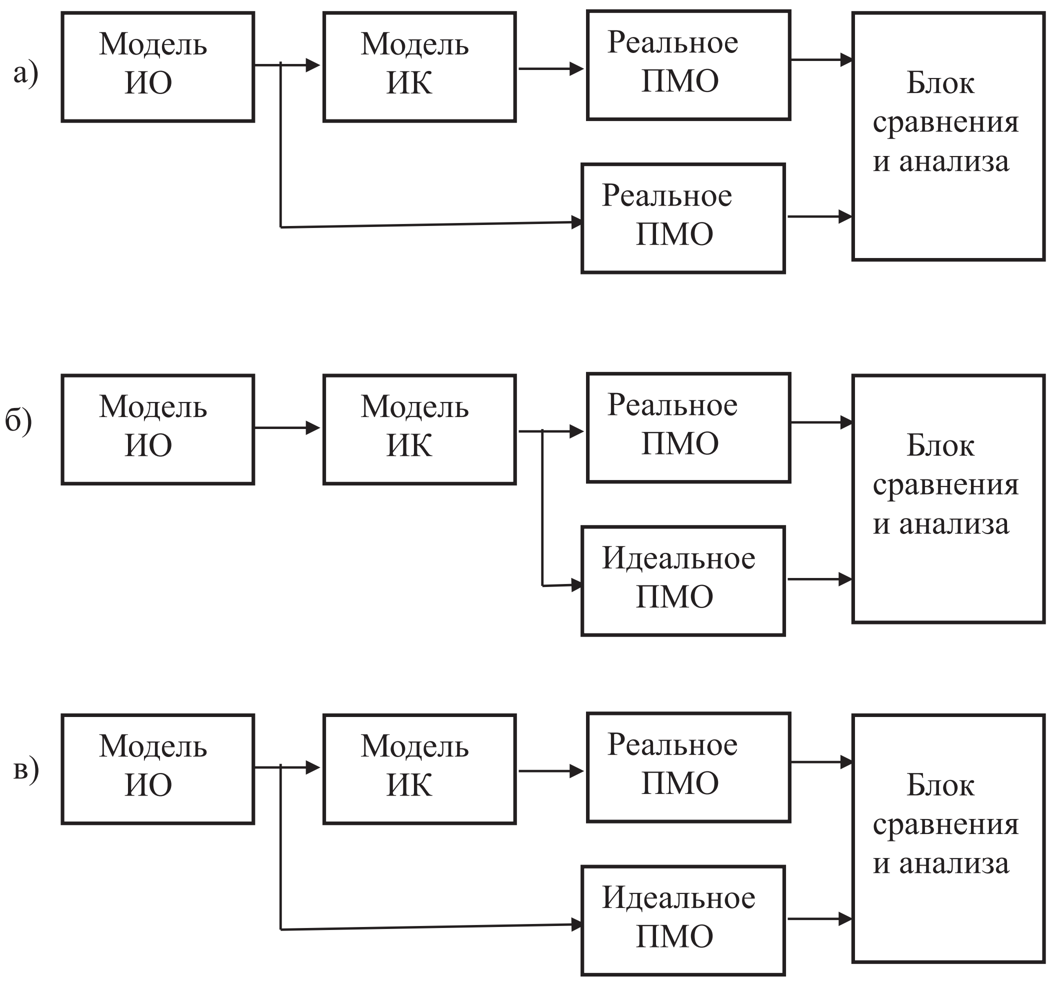

Рис. 2.

ется одним из компонентов методической погрешности.

Третья и четвертая модели не содержат случайных компонентов. Модель ИК всегда вероятностная, так как аддитивная погрешность всегда содержит случайную составляющую. Модель ИО может быть и детерминированной, и вероятностной в зависимости от физической природы объекта и детализации его описания.

Выделяя из перечисленных моделей повторяющиеся элементы, правомерно сделать вывод, что моделирование при исследовании ИИС сводится к совокупности следующих блоков:

• формирование заданных детерминированных функций;

• формирование случайных величин и случайных процессов с заданными вероятностными характеристиками;

• линейное преобразование сигналов в соответствии с заданной весовой функцией;

• нелинейное безынерционное преобразование сигнала в соответствии с заданной функцией преобразования;

• алгоритмы поиска экстремума, которые могут присутствовать в алгоритмах обработки.

Методы реализации этих блоков разработаны достаточно детально [6, 7].

Моделирование при расчете неопределенности результатов измерения производится на ЭВМ, входящей в состав ИИС.

В этом случае в состав ПМО ИИС целесообразно включить программы моделирования. В ряде других ситуаций, особенно когда реальный алгоритм не совпадает с идеальным, при анализе методических погрешностей следует использовать ЭВМ более высокого уровня, на которой может быть реализован идеальный алгоритм.

ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТНОЙ ПОГРЕШНОСТИ

В этом случае используются три первые модели (рис. 2а).

Модель ИО формирует массив неискаженных данных, поступающий на модель ИК, которая выделяет из него массив реальных данных. Идеальный и реальный массивы исходных данных подвергаются обработке в соответствии с реальным алгоритмом, и полученные результаты сравниваются и анализируются. Подчеркнем, что при исследовании аппаратной погрешности идеальный и искаженный массивы данных обрабатываются в одинаковом реальном алгоритме. Идеальный алгоритм при этом в моделировании не участвует. В принципе оба массива можно было бы обрабатывать в соответствии с идеальным алгоритмом. Однако аппаратные погрешности измерения одних и тех же величин с применением разных алгоритмов могут оказаться существенно разными.

Описанная процедура обеспечивает моделирование разового измерения, в результате чего может быть получено единственное значение погрешности для каждой измеряемой величины. Поэтому для достаточно полного описания неопределенности необходимо провести серию измерений на разных массивах обрабатываемых данных. Исследование предполагает оптимально большой набор параметров модели ИО, чтобы получить картину погрешностей во всем диапазоне измеряемых величин. Для исследования вероятностных характеристик неопределенности должны быть сформированы и подвергнуты статистической обработке массивы значений погрешностей. При этом, если модель ИО детерминирована, можно использовать неизменный массив «идеальных» данных, а статистическое моделирование проводить только для ИК. Если для ИО также используется вероятностная модель, то статистическое моделирование рекомендуется проводить для всех ИК и ИО.

Из сказанного следует, что операция моделирования повторяется многократно. Однако общее время на весь процесс не будет чрезмерно большим, поскольку решение измерительной задачи при моделировании на несколько порядков меньше, чем время измерения на реальном объекте.

МЕТОДИЧЕСКАЯ ПОГРЕШНОСТЬ

Основным источником методической погрешности является отличие реального алгоритма, используемого для обработки первичной информации, от «идеального», наилучшего алгоритма. Наиболее часто это отличие обусловлено упрощением алгоритма. Но иногда имеется и более существенное отличие, если алгоритм строится в предположении, что ИО удовлетворяет некоторой функциональной модели.

Таким образом, один и тот же реальный массив данных (рис. 2б) обрабатывается в соответствии с реальным и идеальным алгоритмами, и полученные результаты анализируются. Разумеется, могут обрабатываться и неискаженные массивы, формируемые моделью ИО. Однако в этом случае оценка методической погрешности не будет отражать влияние алгоритма на вклад погрешностей ИК в результат измерения, что достаточно важно. Например, при оценке на идеальном массиве методической погрешности измерения амплитуды, обусловленной заменой идеального алгоритма измерением максимального значения, не будет обнаружена неустойчивость упрощенного алгоритма к погрешностям ИК. При этом погрешности ИК с разными характеристиками станут по-разному влиять на результаты при различных алгоритмах обработки.

Если модель ИО детерминированная, то методическая погрешность, не учитывающая влияния на погрешность ИК, будет систематической. Тем не менее для расчета поправки на эту систематическую погрешность необходимо знать результаты расчета с использованием идеального алгоритма, что при эксплуатации ИИС недоступно.

НАХОЖДЕНИЕ ПОЛНОЙ ПОГРЕШНОСТИ

При исследовании полной погрешности ИИС следует сравнить результаты обработки в соответствии с идеальным алгоритмом неискаженных данных и результаты обработки этих данных, прошедших через модель ИК, в соответствии с реальным алгоритмом (рис. 2в).

Рассмотренные выше способы моделирования (как и аналитические методы) позволяют правильно оценить неопределенность результата, обусловленную свойствами ИИС. Однако оценить таким образом неопределенность из-за неадекватности математической модели в рамках определенной измерительной задачи не представляется возможным, так как при моделировании предполагается, что модель полностью соответствует объекту.

Неопределенность результатов измерений, полученных с помощью ИИС в реальных условиях, будет обусловлена совместным действием всех факторов: аппаратных погрешностей, несовершенства алгоритма обработки, неадекватности математической модели. Выделить в явном виде неопределенность, вызванную неадекватностью модели, можно только в ходе специальных исследований, используя более точные аппаратные средства и идеальный алгоритм обработки. Это приводит к ситуации, аналогичной поверке, когда для определения действительного значения измеряемой величины применяются более точные эталоны.

Моделирование расширяет возможности анализа при оценке влияния отклонений ИО от математической модели на неопределенность получаемых результатов. В этом случае вводятся некоторые отклонения от математической модели (высшие гармоники, некруглость, нелинейность и т.д.).

ВЫВОДЫ

1. Аналитические методы слабо пригодны для оценки погрешностей измерений с помощью ИИС.

2. Основным методом исследования погрешностей ИИС является математическое моделирование, базирующееся на экспериментально полученных метрологических характеристиках измерительных каналов.

3. С помощью моделирования можно анализировать полную погрешность измерения и ее составляющие.

4. Неопределенность, обусловленная неадекватностью математического описания исследуемого объекта не может быть оценена путем только моделирования и требует специальных экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 8.437- 81. ГСИ. Системы информационно-измерительные. Метрологическое обеспечение. Основные положения.

2. МИ2438-97. ГСИ. Системы измерительные, Метрологическое обеспечение. Общие положения.

3. Грановский В. А. Системная метрология: метрологические системы и метрология систем.– СПб., 1999.

4. Рубичев Н. А. Метрологическое обеспечение информационных измерительных систем//Мир транспорта: Приложение «Соискатель». – 2005.– № 2.

5. Рубичев Н. А. Измерительные информационные системы. – М.: Дрофа, 2010.

6. Максимей И. В. Имитационное моделирование на ЭВМ. – М.: Радиосвязь. 1988.

7. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование. – М.: Наука; Физматлит, 1997. ●

SIMULATION OF MEASURING INFORMATION SYSTEMS

Rubichev, Nickolay A. *– Ph. D. (Tech), associate professor of the department of electrical engineering, metrology and electric power engineering of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).*

The author substantiates suitability of simulation with the help of information systems for analysis of measurement inaccuracy, considers engineering of initial models, measuring channel, real and ideal algorithm of data processing, as well as approaches of situation of uncertainty caused by lack of fit of mathematical model of the studied object.

Key words: measuring information systems, error and inaccuracy analysis, mathematical simulation.

Координаты автора (contact information): Рубичев Н. А. – av21805@akado.ru.