УДК 681.865.8(075.8)

В. М. Карпов

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА В ЗАДАЧАХ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННОМ ИНТЕГРИРОВАННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Математической основой метрологического моделирования информационно-измерительного канала служит описание функций преобразования параметров и их производных. Планирование эксперимента, обеспечивающего достижение требуемой точности восстановления не только функции преобразования параметров, но и ее производных, рассмотрено с позиций получения и обработки эмпирических и виртуальных данных.

E-mail: karpucha2004@yandex.ru

***Ключевые слова**: информационно-измерительный канал, статическая функция преобразования параметра, параметрический преобразователь, точность, истинная погрешность, модель, метрологическое моделирование.*

В современных компьютеризированных производствах совершенствование систем контроля, измерений и диагностики неразрывно связано с разработкой информационно-измерительных каналов, преобразующих неэлектрические параметры в электрические. Эти разработки требуют создания современных средств метрологического моделирования, позволяющих анализировать и научно обосновать технические решения.

Обеспечение точности при создании информационно-измерительных каналов (ИИК) для СУ ГПС — это основная проблема, поскольку датчики ИИК эксплуатируются в цеховых условиях при сильных воздействиях на первичные преобразователи таких факторов, как температура, электромагнитные поля, вибрационные и ударные нагрузки.

При построении метрологической модели ИИК в качестве базовой характеристики используется функция преобразования или статическая функция преобразования (СФП), которая представляется в итоге в виде градуировочной характеристики, построенной на основе данных физического эксперимента [1]. В настоящей работе будет рассмотрена задача, в которой доминирует случайная составляющая погрешности и систематической составляющей можно пренебречь.

Классический путь восстановления эмпирической зависимости основан на использовании метода наименьших квадратов (МНК) при обработке опытных данных. Сразу следует указать, что МНК не позволяет принципиально получить ответ на вопрос о точности восстановления и правильности выбора аппроксимирующей функции, поскольку истинная (действительная) функция остается неизвестной и определяются только невязки, а не погрешности восстановления СФП [2].

Любой физический эксперимент в отличие от виртуального эксперимента всегда требует значительных временны́х и материальных ресурсов, поэтому возникает задача экономии финансовых и временны́х затрат, которые пропорциональны числу выполненных опытов. Значит, число опытов необходимо сокращать до минимума, гарантирующего обеспечение требуемой точности результата.

Вместе с тем известно, что случайная погрешность может быть уменьшена не только благодаря повышению точности средств измерения, но и путем проведения многократных измерений и последующей статистической обработки эмпирических данных.

Таким образом, открывается возможность при заданной погрешности одиночных измерений повысить точность результата за счет проведения многократных опытов в каждой отдельно взятой узловой точке всего диапазона измерения.

Возникает фундаментальная проблема — обеспечение минимизации погрешности восстановленных метрологических характеристик при заданном числе опытов. Она требует решения многих задач, среди которых актуальны следующие:

- определить насколько метрологические характеристики ИИК будут зависеть от правильного выбора аппроксимирующей функции;
- обосновать выбор аппроксимирующей функции оценкой точности восстановления;
- предусмотреть оценку точности восстановления не только функции, но и ее производных;
- выбрать критерий, по которому целесообразно оценивать погрешность восстановления СФП параметра и ее производных;
- ответить на вопрос: как при заданном объеме экспериментальных работ и заданной точности средств измерения правильно выбрать соотношение числа узловых точек и числа опытов в одном узле, чтобы минимизировать погрешность восстановления метрологических характеристик?

Перечисленные задачи не могут быть решены на уровне физического эксперимента, поскольку истинное значение искомой функции всегда неизвестно. Ответ может быть получен только с помощью виртуального эксперимента [2, 3].

Истинные погрешности определены быть не могут, поскольку приближение к истинному значению за счет повышения точности средств измерения всегда ограничено техническими или экономическими трудностями или и теми и другими одновременно.

Задачу будем решать с помощью компьютерного метрологического моделирования, используя обратное преобразование на основе МНК, которое открывает возможности оценки истинных (действительных) погрешностей, — говоря корректно, возможности оценки погрешностей, сколь угодно близких к истинным значениям [1, 4].

Метрологическое виртуальное моделирование позволяет работать с практически неограниченными ресурсами по объемам опытных работ, точности эксперимента и затратам времени.

Восстановление функций, определение и анализ метрологических характеристик в компьютерном метрологическом моделировании базируется на решении дифференциальных некорректных задач математики.

В метрологии для описания эмпирических данных широко используют полиномиальные зависимости. В виртуальном метрологическом моделировании будем прибегать к регуляризирующей функции — это функция, соответствующая физической природе описываемых зависимостей, в основе которых всегда лежит априори полученная информация.

Если принять общее число опытов $N = 120$ за величину постоянную, то

$$N = N_E N_Y = \text{ const},$$

где N_Y и N_E — число узлов и число измерений в одном узле.

На рис. 1 приведены восстановленная полиномом третьей степени СФП параметра емкостного преобразователя перемещений, истинная функция преобразования и эмпирические данные при $N_E = 1$, $N_Y = 120$. Приведенная среднеквадратическая погрешность единичного измерения составляла 10 %; диапазон измерения — 0,4 мм.

На рис. 2 показаны зависимости от измеряемой величины x модулей приведенных истинных (действительных) погрешностей $DCPG(x)$ при восстановлении регуляризующей функцией и полиномами $DC2(x)$ и $DC3(x)$ — второй-третьей степени соответственно.

Анализируя приведенные на рис. 1 и 2 диаграммы, естественно поставить вопросы: к чему приведет уменьшение числа узлов? существует ли оптимальное соотношение между числом узлов и числом измерений в одном узле? Ответы иллюстрируются графиками на рис. 3, где приведены зависимости истинных погрешностей от переменной N_E для полиномов и регуляризующей функции.

За критерий точности восстановления принято усредненное максимальное значение модуля погрешности в пределах диапазона, определенное вектором из m-восстановлений метрологических характеристик.

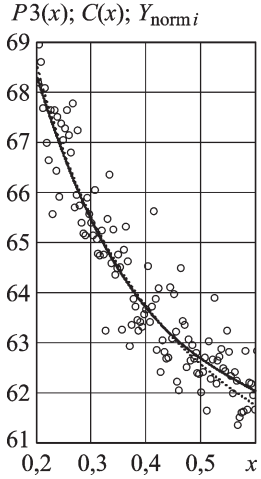

Рис. 1. Зависимости СФП параметра емкостного преобразователя перемещений (сплошная линия) при восстановлении полиномом третьей степени $P3(x)$ для истинной функции $C(x)$ (штриховая) и при представлении по экспериментальным данным Y_{normi} (кружочки)

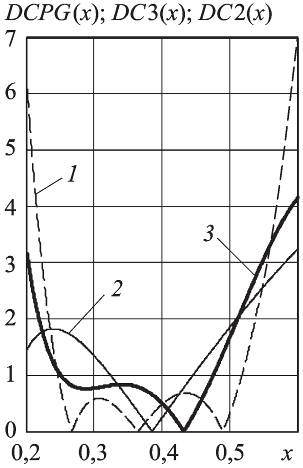

Рис. 2. Зависимости модулей приведенных истинных погрешностей *DCPG*(x) при восстановлении регуляризующей функцией (*1*) и полиномами второй (*2*) и третьей (*3*) степени от измеряемой величины x

На рис. 4 для тех же аппроксимирующих функций приведены зависимости невязок от N_E. Это единственная информация о степени приближения восстановленной функции к экспериментальным данным, которая доступна в физическом эксперименте. Виртуальный эксперимент позволил получить оценку в виде истинных погрешностей. Легко заметить противоречивость представленных на рис. 3 и 4 результатов. Минимум невязок обеспечивается при выборе аппроксимирующей функции в виде полинома третьей степени. Минимальные истинные погрешности достигаются при использовании регуляризующей функции.

По невязкам (физический эксперимент) нельзя принимать решение о выборе аппроксимирующей функции. Если невязки с увеличением N_E уменьшаются на порядок и более, то истинные погрешности слабо связаны с выбором N_E.

На рис. 5 показаны зависимости усредненных максимальных значений погрешностей по диапазону и по числу восстановлений для регуляризующей функции и для ее первой производной (чувствительности). Там же указан коридор рассеяния средних значений погрешностей шириной 6σ.

Усредненные истинные погрешности чувствительности превышают в 3–4 раза погрешности восстановления регуляризующей функции. Для полиномиальных аппроксимирующих функций погрешности чувствительности увеличиваются значительно больше. Погрешности вто-

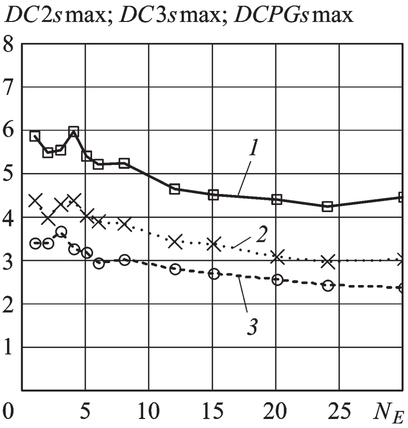

Рис. 3. Зависимости истинных погрешностей от числа измерений в одном узле N_E для полиномов второй *DC*2*s*max (*1*), третьей *DC*3*s*max (*2*) степеней и регуляризующей функции *DCPGs*max (*3*)

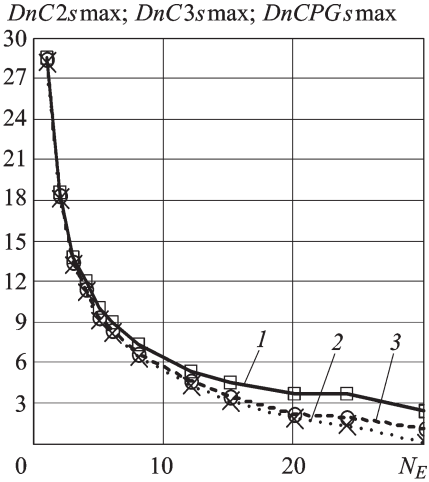

Рис. 4. Зависимости невязок от числа измерений в одном узле N_E для полиномов второй *DnC*2*s*max (*1*), третьей *DnC*3*s*max (*2*) степеней и регуляризующей функции *DnCPGs*max (*3*)

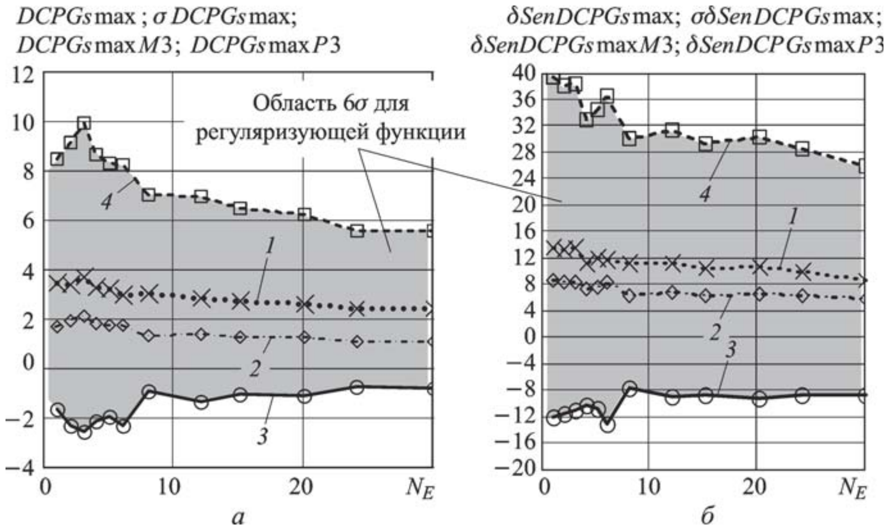

Рис. 5. Зависимости усредненных максимальных значений погрешности *DCPGsmax* (кривая *1*) (*а*) и *δSenDCPGs*max (*1*) (*б*) по диапазону и по числу восстановлений *σDCPGs*max (*2*) (*а*) и *σδSenDCPGs*max (*2*) (*б*) для регуляризующей функции. Область рассеяния ограничивается значениями *DCPGs*max*M*3 (*3*) (*а*), *δSenDCPGs*max*M*3 (*3*) (*б*) и *DCPG*smax*P*3 (*4*) (*а*), *δSenDCPGs*max*P*3 (*4*) (*б*) снизу и сверху соответственно

рой производной для полинома третьей степени возрастают до сотен процентов.

Регуляризующая функция при выборе N_E из условия $N_E \leqslant \leqslant N_{\max}/(n+1)$, где n — число параметров регуляризующей функции, $N_{\max}$ — суммарное число опытов, позволяет получить приемлемую точность даже для второй производной, следовательно, в метрологическом моделировании возможен анализ на уровне нестабильности чувствительности и функций влияния при сильных воздействиях на измерительный преобразователь.

Выводы. 1. Виртуальный эксперимент в отличие от физического позволяет решать задачи анализа точности восстановления функций и их производных.

2. Оценка погрешностей с учетом рассеяния их усредненных максимальных значений подтвердила необходимость использования регуляризующих функций в метрологическом моделировании ИИК.

3. Для всех метрологических характеристик величину N_E следует выбирать из приведенного условия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпов В. М. Метрологическое моделирование информационно-измерительных каналов контроля неэлектрических параметров // Проектирование и технология электронных средств. – 2002. – № 1.
2. Карпов В. М. Задача восстановления функции преобразования при метрологическом моделировании // Сб. трудов 6-й научн.-техн. конф. Состояние и проблемы технических измерений. – Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999 г.
3. Карпов В. М. Влияющие воздействия и погрешности измерений в метрологическом моделировании информационно-измерительных каналов контроля неэлектрических параметров // Программные продукты и системы. – 2006. – № 2.
4. Карпов В. М. Обратная задача метода наименьших квадратов при метрологическом моделировании // Сб. трудов 7-й научн.-техн. конф. Состояние и проблемы технических измерений. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000 г.

Статья поступила в редакцию 24.02.09

Виктор Мефодьевич Карпов — д-р техн. наук, профессор кафедры “Компьютерные системы автоматизации производства” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

V.M. Karpov — D. Sc. (Eng.), professor of “Computer Systems of Production Automation” department of the Bauman Moscow State Technical University.