

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ: АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ

TRANSDUCERS METROLOGICAL CHARACTERISTICS: ANALYSIS AND OPTIMIZATION

Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный технический университет
Saint-Petersburg, State Technical University St.-Petersburg

Дается обзор нормируемых метрологических характеристик датчиков, способов их определения и оптимизации. Наибольшее внимание уделяется определению функции преобразования и погрешностей датчика.

A review of the transducers standardized metrological characteristics, methods of their determination and optimization is given. The greatest attention is granted to the determination of the transducer transfer function and uncertainties.

Измерительная наука и практика накопили большой опыт анализа и совершенствования средств измерения (СИ), включая датчики. Настоящий доклад представляет собою попытку обобщения этого опыта применительно к датчикам, играющим наиболее важную роль среди элементов измерительного канала.

Качество датчика определяется его метрологическими характеристиками (МХ), в составе которых нормируются [1]:

- характеристики преобразования измеряемой величины: диапазон преобразования (ДП), коэффициент или функция преобразования (ФП) (в зависимости от степени линейности последней);
- характеристики взаимодействия с объектом и внешними СИ: входной (при электрической величине на входе) и выходной импедансы;
- характеристики собственной погрешности: погрешность в лабораторных условиях, влияние внешних условий, динамические характеристики;
- прочие МХ, которые могут в соответствии с ГОСТ 8.009-84 устанавливаться при технической необходимости.

Это деление не является абсолютным: например, расширение диапазона измерения вниз эквивалентно снижению аддитивной погрешности датчика.

Нижняя граница диапазона преобразования определяется порогом чувствительности, в свою очередь определяемым уходом нулевого уровня, имеющим вид (в зависимости от частотного спектра) шума или дрейфа нуля. Шум описывается формулой Найквиста, а также ее аналогами из «неэлектрических» разделов физики. Для снижения влияния шума используются выбор конструктивных материалов, понижение рабочей температуры, фильтрация.

Верхняя граница ДП определяется степенью линейности характеристики, ограничением выходной величины напряжением питания, достижением предела работоспособности датчика. Расширение ДП за счет верхней границы осуществляется легче, чем за счет нижней, если это достигается не путем уменьшения чувствительности датчика. В последнем случае обычно одновременно повышается нижняя граница, и расширения диапазона не происходит.

Необходимый коэффициент преобразования (чувствительность) достигается как конструктивным, так и схемотехническим путем. В первом случае производится надлежащий выбор материалов, конфигурации и размеров деталей, во втором выбирается схема, напряжение питания, дополнительное усиление. Последнее, если не учитывать шумы, может быть в принципе сделано сколь угодно большим.

К ФП предъявляется одно неперемное требование – монотонности в диапазоне преобразования, т.к. соответствие между входной и выходной величинами должно быть взаимно однозначным. Отсюда следует, что вид ФП может быть различным. Традиционное требование линейности градуировочной характеристики при современных возможностях обработки выходного сигнала датчика, в частности, с появлением табличного метода решения обратной измерительной задачи (определения входной величины по выходной) не является более актуальным. Для аппроксимации функций преобразования используются полиномиальные, степенные, показательные, дробно-линейные модели [2].

Последние могут использоваться во многих случаях, особенно при небольшой нелинейности. Так, платиновые терморезисторы в диапазоне температур $-200 \div +850$ °C аппроксимируются дробно-линейной функцией с погрешностью, не превышающей 0,1 %, а

полупроводниковые в диапазоне $20 \div 180$ °С, разбиваемом на два участка – 2,5 %. Аппроксимация градуировочных характеристик термпар, разбиваемых не более чем на два участка, возможна с погрешностью от 0,3 (золото-хромель) до 3 % (вольфрам-рений (3 %) – вольфрам-рений (25 %)). Существенно нелинейная характеристика термоанемометра в диапазоне скоростей газа 40 – 640 м/с может быть аппроксимирована с погрешностью не более 2,2 %, а при разбиении этого диапазона на две части – 0,4 %. Погрешность аппроксимации характеристик кондуктометрических датчиков для измерения концентрации не превышает 1 % во всем диапазоне и 0,5 % при разбиении его на две части. Зависимость периода выходных импульсов от освещенности новейшего датчика светового потока на БИСПИН-приборе аппроксимируется с погрешностью 1,2 %. Приведенные цифры, хотя и не сильно впечатляют, тем не менее служат свидетельством того, что при не слишком высоких требованиях к точности, которые часто характерны для промышленных измерений, дробно-линейная функция может с успехом использоваться.

Ценным является то, что дробно-линейная функция обладает групповым свойством [3]. Это приводит к тому, что весь измерительный канал, состоящий обычно, кроме датчика, из линейных или почти линейных звеньев, также имеет дробно-линейную ФП, т.е. усложнения ее не происходит.

В прикладной математике разработаны многочисленные и разнообразные методы определения функциональных зависимостей по результатам эксперимента [4]. Среди них, в первую очередь, следует выделить статистические методы, к которым относится широко используемый метод наименьших квадратов. Кроме них применяются разнообразные числовые и графические методы.

Взаимодействие датчика с объектом представляет интерес в той степени, в которой оно изменяет значение измеряемой величины. В большинстве случаев характеристикой такого взаимодействия является входной импеданс датчика. При этом он может быть определен лишь в тех случаях, когда измеряемая величина представляет силу, перемещение, скорость или ускорение в обобщенном смысле, а это возможно лишь тогда, когда для данного физического процесса могут быть указаны эквиваленты этих величин. Эта проблема решена для представительного ряда областей, в результате чего появились электромеханические, электроакустические, электрогидравлические, электропневматические и электротепловые аналогии.

Тем не менее, именно потому, что на входе датчика, как правило, неэлектрическая величина, входной импеданс практически никогда не указывается. Такое положение, кроме тех случаев, когда входной импеданс не определен, объясняется традицией (инерцией мышления). Ее следует нарушить везде, где применимы вышеуказанные аналогии. Это серьезно помогло бы потребителям в решении вопросов применимости тех или иных датчиков.

Изменение значения измеряемой величины при подключении датчика, как правило, является следствием изменения энергетического состояния объекта, которое происходит из-за отбора энергии датчиком. Такой отбор следует минимизировать, что означает требование повышения входного импеданса, если измеряется обобщенная сила, и его снижения, если измеряются обобщенные перемещение, скорость и ускорение. И то, и другое происходит при миниатюризации конструкций датчиков.

Влияние датчика на объект не опасно, если оно контролируемо и не вызывает нарушения функционирования объекта. Более того, оно может сознательно вызываться для повышения чувствительности, что имеет место, например, при измерении характеристик полей, когда датчик является локальным концентратором поля.

Выходной импеданс датчика обычно является электрическим, и его указание не представляет трудностей.

В традиционном представлении датчикам, в общем, присущи следующие разновидности погрешностей:

- влияние неинформативных параметров объекта,
- влияние факторов окружающей среды,
- динамическая погрешность,
- следствие технологического разброса значений конструктивных параметров,
- нелинейность,
- гистерезис,
- временной уход характеристик датчика,
- погрешность квантования выходного сигнала,
- неточность калибровки.

Этот перечень целесообразно уменьшить, исходя из существа его составляющих. Действительно, поскольку объект для датчика является частью окружающей среды (а иногда, например, при измерении характеристик полей, попросту отождествляется с нею) неинформативные параметры объекта также следует отнести к факторам окружающей среды. К ним, строго говоря, относится и динамическая погрешность, т.к. она по определению вызывается скоростью изменения измеряемой величины и влияющих факторов окружающей среды, а скорость – сама влияющий фактор. Сюда же

при внимательном рассмотрении следует отнести и нелинейность, т.к. при представлении выходной величины датчика в виде степенного полинома оказывается, что на его входе, кроме измеряемой величины, появляются ее степени (иные физические величины), которые вполне могут восприниматься как неинформативные параметры объекта. Наконец, к факторам окружающей среды следует причислить и время, обладающее всеми свойствами физической величины, и тогда временной уход датчика тоже теряет свою обособленность.

Технологический разброс значений конструктивных параметров датчика вызывает погрешность только при отсутствии индивидуальной калибровки.

Погрешность квантования присуща датчикам с цифровым выходом и дискретным изменением выходной величины.

При учете вышеприведенных замечаний перечень разновидностей погрешностей датчиков, имеющих принципиально различное происхождение, оказывается следующим:

- влияние факторов окружающей среды,
- следствие технологического разброса значений конструктивных параметров,
- гистерезис,
- погрешность квантования выходного сигнала,
- неточность калибровки.

Погрешности датчиков могут определяться как экспериментальным, так и расчетным путем. Первый путь более подходит для определения отдельных составляющих, в особенности, тогда, когда не ясна физика влияний. Если погрешности вызываются одновременно несколькими причинами, проявляющимися в виде факторов, изменяющихся случайным образом, экспериментальная оценка, как правило, оказывается невозможной.

Расчетные методы метрологического анализа датчиков, напротив, оправдывают себя, в основном, при необходимости суммирования случайных составляющих погрешности. Традиционным методом такого анализа является метод с использованием среднеквадратических значений, однако, в последнее время появились более эффективные методы: Монте-Карло и векторно-аналитический [5, 6], ценным свойством которых является отсутствие необходимости указания или определения результирующего закона распределения. Первый из них основан на моделировании случайных погрешностей статистическими выборками, распределенными по заданным законам. Метод прост и удобен, однако, требует наличия эффективного генератора случайных чисел. Второй использует векторное представление доверительных значений погрешностей и обладает различной сложностью в зависимости от вида моделирующего векторного пространства – оно может быть римановым или евклидовым. Риманово пространство представляет модель, полностью адекватную физике явлений, в то время как евклидово является приближением, чаще всего допустимым из-за невысоких требований к точности определения погрешностей. В настоящее время ведется создание специализированной вычислительной программы.

В последнее время предлагаются методы, которые не требуют указания даже распределений отдельных составляющих, что безусловно вызвано практикой, в которой данные о таких распределениях обычно отсутствуют. Стремление найти такие методы похвально, однако, следует иметь в виду, что платой за ограниченность информации является существенное завышение результата. Такое завышение имеет место и в том случае, если пользоваться любым из двух вышеуказанных новейших методов, принимая все исходные законы равномерными. Представляет безусловный интерес выяснить, в каком случае завышение оказывается большим.

Повышение точности датчиков осуществляется как конструктивно-технологическим, так и схемотехническим путем. Первый путь включает применение надлежащих материалов, дифференциальных конструкций, компенсационных элементов, стабилизацию источников погрешностей с калибровкой датчиков в условиях стабилизированных значений влияющих факторов, защиту от последних. Второй путь в основном связан с обработкой измерительного сигнала с целью устранения влияния помех и частотной коррекции. Главным его содержанием является фильтрация.

Особо необходимо отметить, что представление характеристик погрешностей датчиков в технической документации далеко не всегда соответствует требованиям ГОСТ 8.009-84, а потому страдает отсутствием единообразия и определенности. Это вызывает дополнительные трудности у потребителей.

Литература

1. ГОСТ 8.009-84. "Государственная система обеспечения единства измерений. Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерений".
2. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений.—2-е изд., перераб. и доп. —Л., 1991.—303 с.
3. Использование проективных преобразований в измерительных преобразователях / В.Д.Мазин // Всесоюз. конф. „Методы и средства измерения механических параметров в системах контроля и управления“ (Пенза, 1989г.) : Тез. докл. — Пенза, 1989.
4. Семенов Л.А., Сирая Т.Н. Методы построения градуировочных характеристик средств измерений.—М., 1986.—126 с.
5. Мазин В.Д. Методы расчетной оценки погрешностей датчиков // Датчики и системы.— 2001.— № 2.
6. Мазин В.Д. Датчики автоматических систем: Метрологический анализ.—СПб, 2000.—80 с.