

Каграманянц Виктор Александрович

E-mail: vict@mopevm.tsure.ru.

Тел.: 88634371746.

Kravchenko Pavel Pavlovich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: kravch@tsure.ru.

44, Nekrasovski, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634314945.

Kagramanyants Victor Alexandrovich

E-mail: vict@mopevm.tsure.ru.

Phone: +78634371746.

УДК 001.63:681.586

А.Н. Катков

МЕТОДИКА МОДЕЛЬНО-УПРАВЛЯЕМОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДАТЧИКОВ

Изложена методика модельно-управляемого проектирования цифровых датчиков. Модельно-управляемое проектирование представляет собой естественный подход к проектированию, обусловленный эволюционным развитием элементной базы, а также методик и инструментальных средств проектирования. Показано, что модельно-управляемое проектирование сокращает длительность разработки, повышает технические и эксплуатационные качества датчиков, позволяет оценивать возможности реализации и выбирать реализуемые варианты. Приведен пример применения методики для проектирования цифрового датчика разности давлений. Актуальность и научно-техническая новизна работы заключается в описанной методике.

Цифровой датчик; модельно-управляемое проектирование.

A.N. Katkov

DIGITAL SENSORS MODEL-BASED DESIGN TECHNIQUE

Digital sensors model-based design technique is stated. Model-based design represents the natural approach to the designing, caused by evolutionary development of element base, and also techniques and tool design tools. It is shown that model-based design reduces duration of working out, increases technical and operational qualities of gauges, allows to define possibilities of realization and to choose realised variants. Example of technique deployment for digital differential pressure sensor design is given. Actuality and scientific-technical novelty are consists in described technique.

Digital sensor; model-based design.

Датчики физических величин представляют собой важный класс средств измерений и применяются в различных условиях эксплуатации. Исключить влияние внешних факторов на измерительные сигналы (ИС) датчиков удаётся редко, поэтому общепринятой практикой стала компенсация следствий влияния внешних воздействующих факторов (ВВФ) на ИС, иными словами, коррекция погрешностей. Широко применяются цифровые методы коррекции погрешностей, основанные на методе вспомогательных измерений [1], не зависящие от времени и позволяющие добиться высоких метрологических характеристик [2]. Применение цифровой обработки ИС в датчиках стало возможным с развитием микроомощной ма-

логарифмической элементной базы и средств разработки встроенного программного обеспечения (ВПО) и привело к появлению цифровых датчиков.

Цифровые датчики (ЦД) – это датчики, выполняющие цифровую обработку измерительных сигналов с целью повышения точности измерений, передающие сигналы по цифровому каналу. ЦД представляют собой перспективный класс измерительно-вычислительных устройств, развивающийся на стыке измерительной и вычислительной техники, где идет процесс интеграции средств получения измерительной информации и средств ее обработки [3, 4]. Цифровые датчики являются сложными электронными устройствами, содержащими цифровые и аналоговые аппаратные узлы и программные компоненты. При разработке ЦД требуется не только сбалансированно распределять функции между аппаратными и программными средствами [5, 6], но и учитывать разнообразие, нередко противоречивые нефункциональные требования [7]. В настоящее время назрела необходимость разработки методики проектирования ЦД физических величин, основанной на моделях ИС.

Решение такой сложной задачи возможно с применением подходов, развитых в сфере создания систем управления. Эти подходы, например, такие как Model-Based Design, Model-Driven Development [8], основаны на моделях создаваемых систем и приборов и заключаются в предварительной модельной проработке общесистемных, поведенческих аспектов на начальных этапах проектирования.

В отечественной литературе нет общепринятого перевода терминов «Model-Based Design», «Model-Driven Development». Встречается перевод «модельно-ориентированное проектирование» [9]. Оба термина обозначают процессы проектирования, разработки систем, приборов, устройств, опирающиеся на тщательное моделирование структур и взаимодействия узлов и элементов между собой и с внешними сущностями по критериям целевой функции создаваемых систем и устройств. Модели являются ключевыми, концептуальными категориями мышления, инструментами, определяющими состав и объем всех дальнейших этапов разработки. Фактически модели управляют всем процессом разработки приборов и особенно – систем. Причастие «ориентированное» в переводе не представляется оправданным; оно ставит смысловой акцент на разобщенность процесса проектирования и моделей (уместно провести аналогию с термином «объектно-ориентированное программирование», в трактовке которого такая разобщенность присутствует). Поэтому наиболее технически верным представляется перевод «модельно-управляемое проектирование», каковой и будет использоваться в данной статье.

Методика модельно-управляемого проектирования цифровых датчиков. В основе модельно-управляемого проектирования лежит принцип предварительной модельной проработки различных вопросов построения структуры и взаимодействия элементов структуры датчика на начальных стадиях разработки. Процесс модельно-управляемого проектирования ЦД можно представить алгоритмом, показанным на рис. 1.

Исходной информацией для модельно-управляемого проектирования служит априорная информация о чувствительных элементах (ЧЭ), характере погрешностей и вносящих в них наибольший вклад ВВФ. По этим данным строится модель ИС ЧЭ в нормальных условиях и в условиях воздействия ВВФ и разрабатывается алгоритм коррекции погрешностей (АКП). По модели вычислительного процесса, выполняемого алгоритмом, формулируются требования к необходимым и достаточным вычислительным ресурсам цифровой части датчика – быстродействию и объему памяти.

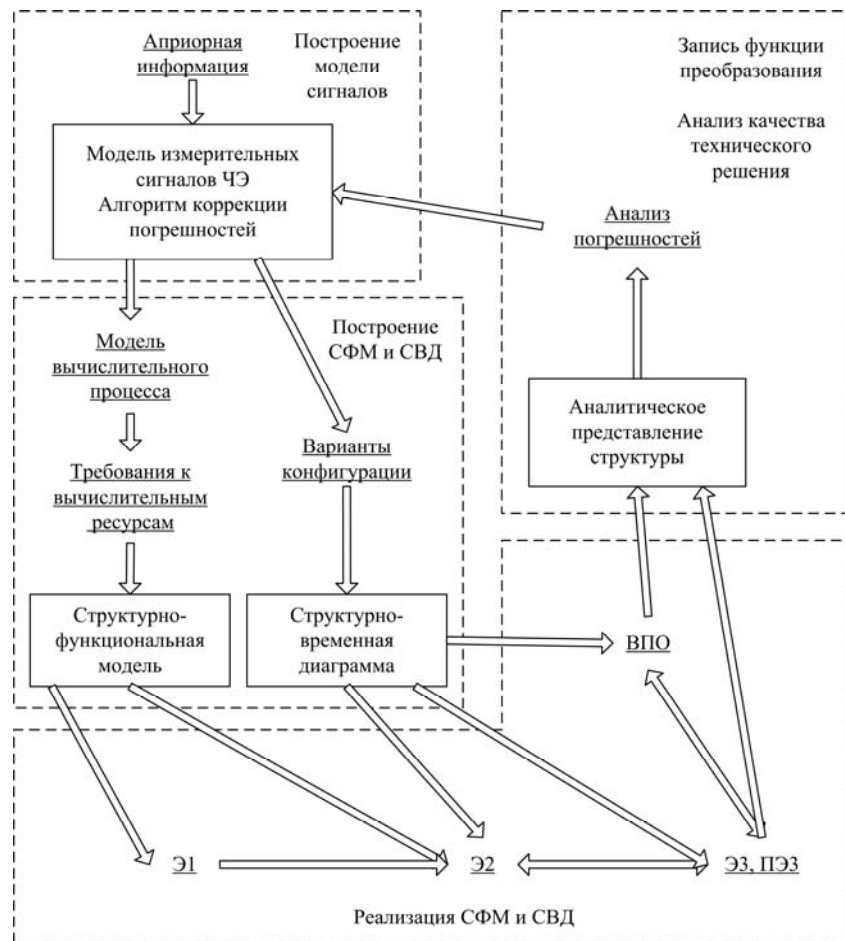


Рис. 1. Алгоритм модельно-управляемого проектирования ЦД

Тип ЧЭ определяет структуру и варианты конфигурации измерительного канала (ИК); модель ИС ЧЭ и модель вычислительного процесса задают структуру устройства цифровой обработки ИС и хранения параметров модели ИС; выбранный цифровой интерфейс передачи данных задает структуру устройства связи. В совокупности так формируются структурно-функциональная модель (СФМ) ЦД [10] и структурно-временная диаграмма (СВД) алгоритма работы ЦД [11]. Структурно-функциональная модель цифрового датчика отражает совокупность взаимосвязей между узлами ЦД, определяющих специфические свойства ЦД, и распределение узлов по функциям и пространству. Структурно-временная диаграмма показывает распределение вариантов конфигурации структуры измерительного канала и ЦД в целом во времени.

Из СФМ и СВД закономерно вытекают структурная (Э1) и функциональная (Э2) схемы ЦД; по функциональной схеме разрабатывается принципиальная (Э3) схема с перечнем элементов. Высокая степень интеграции современной элементной базы, особенно микросхем архитектуры «система-на-кристалле», нередко приводит к тому, что функциональная схема оказывается сложнее принципиальной. СВД, функциональная и принципиальная схемы, алгоритм коррекции погрешностей и протокол информационного взаимодействия ЦД с системой сбора измери-

тельной информации представляют собой исходные данные для проектирования ВПО ЦД. ВПО реализует операционную среду, в которой функционирует алгоритм коррекции погрешностей.

Следует отметить, что разделить этапы разработки функциональной и принципиальной схем и структуры ВПО невозможно; это неразрывные взаимосвязанные составляющие одного шага создания ЦД – реализации СФМ и СВД.

Функциональная и принципиальная схемы с перечнем элементов, а также АКП, реализованный в ВПО, служат основой для аналитического представления структуры ЦД, иными словами – функции преобразования ЦД, в виде одной формулы.

Эта формула нужна для анализа влияния отдельных составляющих на общую погрешность ЦД. В частности, в погрешности каждого ЦД присутствует составляющая, обусловленная погрешностью дискретизации. Дискретизация – оператор сжатия с потерей информации, отображающий континуальное множество значений аналоговых сигналов в конечное дискретное множество кодов аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Разрядность АЦП определяет его разрешающую способность по входу и масштаб потерь информации при дискретизации. Кроме этого, представление функции преобразования в виде формулы позволяет разделять влияющие и не влияющие факторы, а также устанавливать и анализировать причинно-следственные связи между условиями эксплуатации и изменениями сигналов ЦД.

Модель измерительных сигналов ЧЭ, алгоритм коррекции погрешностей, СФМ и СВД, структурная и функциональная схемы ЦД, формула, выражающая функцию преобразования ЦД, и структура ВПО представляют собой взаимодополняющие уровни абстракции, которые служат для формирования целостного представления о ЦД на этапе проектирования.

Суть излагаемой методики заключается во встраивании модели внутрь датчика и в наличии обратной связи в алгоритме проектирования. Результаты моделирования и анализа погрешностей могут послужить основанием для изменения модели измерительных сигналов с последующими доработками СФМ, СВД и принципиальной схемы. Таким образом, модель управляет процессом проектирования цифровых датчиков.

В качестве примера на рис. 2 показана СФМ цифрового датчика разности давлений ДРЭ-003 с тензометрическим полупроводниковым ЧЭ.

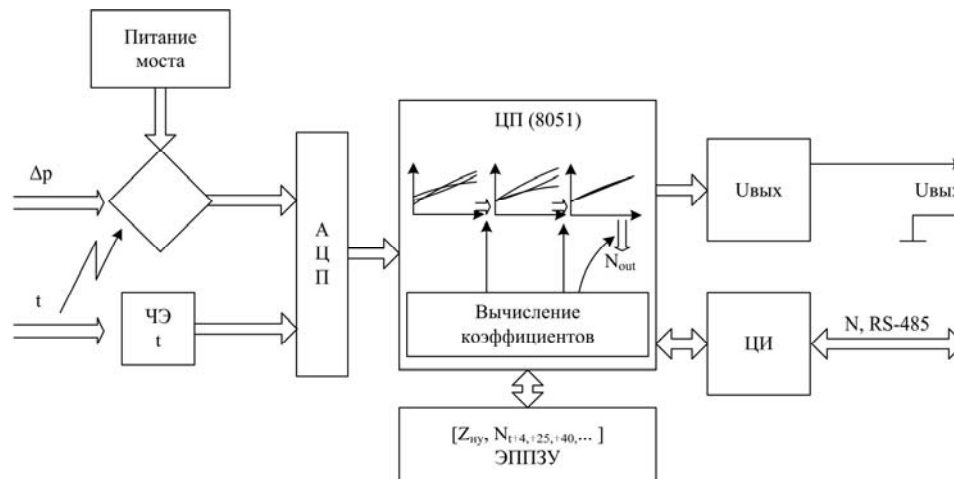


Рис. 2. СФМ ЦД разности давлений ДРЭ-003

Зависимость кода АЦП температуры от температуры имеет вид $N_t = \frac{2^b k R_t(t)}{R + R_t(t)}$, где b – разрядность АЦП, k – коэффициент усиления стабилизатора напряжения питания тензомоста, R – сопротивление верхнего плеча резистивного делителя напряжений, представляющего собой ЧЭ температуры, $R_t(t)$ – сопротивление терморезистора, зависящее от температуры. Зависимость кода АЦП давления от давления и температуры имеет вид $N_{p,t} = 2^b G k \frac{\Delta R_B}{R_B}(p,t) + 2^b \frac{E_{off}}{U_{ref}}$, где G – коэффициент усиления операционного усилителя (ОУ), $\frac{\Delta R_B}{R_B}(p,t)$ – зависимость относительного изменения сопротивления тензомоста от давления и температуры, E_{off} – напряжение смещения ОУ, U_{ref} – опорное напряжение. Исходя из этих зависимостей и АКП, получается следующая зависимость выходного кода от давления и температуры:

$$N_{out} = Spline \left[\left(N_{p,t} - a(N_t) - Z_{HY} \right) m(N_t) + Z_{HY} \right].$$

Зависимость выходного напряжения датчика от выходного кода имеет вид $U_{out} = \frac{N_{out} U_{ref} k'}{2^b}$, где k' – коэффициент усиления стабилизатора выходного напряжения.

Указанные зависимости содержат величины, задающие параметры работы отдельных узлов измерительного канала. Разрядность АЦП b ограничивает точность датчика значением $100 * 2^{-b}, [\%]$. Так, для разрядностей 12, 14, 16 теоретически достижимая точность, обусловленная потерями информации при дискретизации, ограничена значениями 0,025 %, 0,006 %, 0,0015 % соответственно. Однако же практически достичь таких значений очень сложно из-за тепловых шумов элементов схемы и релаксации механических напряжений в конструкции датчика.

Коэффициенты усиления G, k, k' задаются одним-двумя резисторами. Сопротивления этих резисторов подвержены изменениям с изменением температуры и вносят в погрешность датчика дополнительные составляющие, которые практически невозможно скомпенсировать.

Были изготовлены опытные образцы спроектированного таким образом датчика. Основная погрешность составила величину около 0,1 %, температурная погрешность – около 0,2 %. В результате применения описанной методики при проектировании существенно сократилась длительность разработки датчика.

Методика модельно-управляемого проектирования является целесообразной и перспективной в разработке цифровых датчиков физических величин. Модель измерительных сигналов, структурно-функциональная модель и структурно-временная диаграмма представляют собой фундамент, систематизирующий и связывающий воедино все аппаратные узлы и программные компоненты цифровых датчиков. Модель встраивается в датчик и управляет всем процессом проектирования.

Модельно-управляемое проектирование представляет собой естественный подход к проектированию, обусловленный эволюционным развитием элементной

базы, методик и инструментальных средств проектирования. Модельно-управляемое проектирование сокращает длительность разработки и повышает технические и эксплуатационные качества датчиков, а также позволяет оценивать возможности реализации и выбирать реализуемые варианты.

Цифровые датчики физических величин – основа цифровых систем телеметрии. При комплексном проектировании таких систем и входящих в их состав датчиков для проработки вопросов взаимодействия датчиков с системой и распределения функций по устройствам и времени целесообразно применение методики модельно-управляемого проектирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Земельман М.А.* Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 200 с.
2. *Новиков В.Н., Чувькин Б.В.* Системы цифровой обработки измерительной информации и моделирование в датчикопреобразующей аппаратуре // Датчики и системы. – 2005. – № 9. – С. 24-28.
3. *Финкелстайн Л.* Наука об измерениях: анализ состояния и направления развития // Датчики и системы. – 2010. – № 2. – С. 53-58.
4. *Катков А.Н., Шахов Э.К.* Интеллектуализация измерительных систем. Состояние вопроса // Информационно-измерительная техника: Труды ун-та. Межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. профессора Е.А. Ломтева. – Вып. 33. – Пенза: ИИЦ ПензГУ, 2008. – С. 37-41.
5. *Гришин Ю.П., Казаринов Ю.М., Катиков В.М.* Микропроцессоры в радиотехнических системах. – М.: Радио и связь, 1982. – 280 с.
6. *De Micheli G., Gupta R.K.* Hardware/Software co-design // Proceedings of IEEE. – Vol. 85, № 3. – P. 349-365.
7. *Семенов Ю.П.* Датчиковая аппаратура в ракетно-космической технике // Приборы и системы управления. – 1990. – № 4. – С. 4.
8. *Резванов Д.Х.* Комплексный подход к разработке систем управления средствами вычислительной среды MATLAB/Simulink // Труды III науч. конф. «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB». – СПб., 2007. – С. 1168-1171.
9. *Деменков Н.П.* Модельно-ориентированное проектирование систем управления // [Режим доступа] is.ifmo.ru/misc2/_matlab_simulink.pdf, дата обращения: 07.03.2011.
10. *Блинов А.В., Новиков В.Н., Чувькин Б.В.* Функционально-распределенная интегрированная система контроля параметров и управления шасси самолета // Датчики и системы. – 2005. – № 9. – С. 36-40.
11. *Новиков В.Н.* Модуль управления тензометрического преобразователя // Датчики и системы. – 2005. – № 9. – С. 40-43.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Е. Панич.

Катков Алексей Николаевич

НИИ физических измерений.

E-mail: niifi@sura.ru.

440026, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10.

Тел.: +79603234925.

Katkov Alexej Nikolaevich

Research Institute of Physical Measurements.

E-mail: niifi@sura.ru.

8/10, Volodarskogo Street, Penza, 440026, Russia.

Phone: +79603234925.