

О.Н.Пьявченко

**КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О ПРЕЦИЗИОННЫХ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ МОДУЛЯХ ВВОДА,
ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ**

Характерной чертой современных распределенных микроконтроллерных систем сбора и обработки информации, мониторинга, диагностики и управления является высокий уровень их интеллекта, который определяется не только сложностью решаемых задач, но и высокой производительностью и надежностью. В архитектурах распределенных микроконтроллерных систем интеллектуальные возможности поддерживаются всеми уровнями иерархии, в том числе нижними уровнями, расположенными рядом с объектами наблюдения или управления.

Для обеспечения высоких характеристик этих уровней создаются интеллектуальные микропроцессорные модули (ИММ), представляющие собой функционально и конструктивно завершенные локальные микропроцессорные системы, обеспечивающие аналоговую и микропроцессорную обработку сигналов при решении задач сбора и обработки информации, оценки состояния переменных и управления. При этом ИММ принимают информацию от объекта, представляют ее в форме удобной для хранения и обработки, обрабатывают по заданным алгоритмам и посылают результаты в коммуникационные каналы. В процессе микропроцессорной обработки могут использоваться логические оценки складывающихся ситуаций и формироваться управляющие воздействия, которые выдаются на исполнительные устройства объекта.

В качестве характерных примеров ИММ можно привести модули ADAM фирмы ADVANTECH [1], которая является пионером в части создания таких изделий, а также систему интеллектуальных модулей "ТЕКОНИК" фирмы ЗАО ПК "Промконтроллер" [2] и др.

Очевидно, что возможно построение и практическое применение ИММ, имеющих самое разнообразное назначение, технические характеристики и конструктивно-технологическое исполнение.

При этом среди ИММ могут быть выделены прецизионные (ПИММ), обеспечивающие измерение непрерывных физических переменных с приведенной относительной погрешностью порядка 0,1% и соответствующую точность оценок состояний переменных и формирования управляющих воздействий. В частности, такие модули могут быть созданы в результате развития функциональных и структурных возможностей интеллектуальных датчиков, которые производят такие известные западные фирмы, как Fisher-Rosemount, Druck, Siemens, Honeywell, Yokogawa и др., а также российские фирмы ПГ "Метран" [3], ПГ МИДА [4] и др.

Высокие технические характеристики ПИММ являются результатом совершенствования схемотехнических и системотехнических решений, математических методов, алгоритмов и программ, которые являются объектами проектирования на этапе разработки ПИММ. В связи с этим при создании ПИММ следует ориентироваться на системный подход к проектированию локальных микрокомпьютерных систем [5].

Концептуальное представление о прецизионном интеллектуальном микропроцессорном модуле иллюстрируется при помощи пирамиды (рис. 1).



Рис. 1. Иерархия математического, алгоритмического, программного и аппаратного обеспечения ИММ

На вершине пирамиды находятся математические методы обработки и преобразований измеряемых переменных, которые могут быть, например, методами аппроксимации, используемыми для построения градуировочных характеристик, методами вычислений спектральных характеристик измеряемых сигналов, методами оценок состояний переменных, их прогнозирования, формирования управляющих воздействий и т.п.

Выбор численных методов оказывает непосредственное влияние на технические характеристики ПИММ. При этом технические возможности современной микроэлементной базы, в частности систем на кристалле [6], открывают ранее немыслимые перспективы применения в ПИММ богатого багажа численных методов, их модификаций и результатов новых разработок.

Выбранные методы и формулы реализуются в виде алгоритмов (более низкий уровень пирамиды на рис. 1.1). Подавляющее большинство этих алгоритмов отражает особенности микропроцессорной обработки информации в проектируемом ПИММ:

- 1) заложенные в архитектуру схмотехнические решения, непосредственно оказывающие влияние на реализацию вычислительных процессов;
- 2) ограничения на набор арифметико-логических операций, например отсутствие операции деления;
- 3) сокращенные форматы обрабатываемых данных (16-битовые и др. разрядные сетки);
- 4) представление и обработка чисел с фиксированной точкой в целочисленной арифметике;
- 5) введенные масштабные коэффициенты для обеспечения высокоточных вычислений с различающимися на несколько порядков данными;
- 6) использование для обработки в микропроцессоре данных, сформированных АЦП, чаще всего в виде 10-, 12-, 14-разрядных чисел.

Указанные особенности являются весомым аргументом в пользу отнесения этих алгоритмов к микропроцессорным.

В состав алгоритмического обеспечения, кроме вычислительных микропроцессорных алгоритмов, входят логические алгоритмы и алгоритмы, описывающие организацию процессов функционирования ПИММ в различных режимах работы,

в том числе в темпе реального времени, а также алгоритмы идентификации режимов работы ПИММ.

К третьему сверху уровню (рис.1) относится программное обеспечение, которое, как и алгоритмическое обеспечение, представляет конечный продукт проектирования ПИММ. При этом программы микропроцессорных алгоритмов рассматриваются как одна из форм их записи на языке программирования, наиболее полно отражающем особенности этих алгоритмов, а также микропроцессоров, и обеспечивающем адекватную трансляцию в коды команд микропроцессоров.

Основанием пирамиды является аппаратное обеспечение, включающее макетные, опытные и серийные образцы ПИММ, конструкторскую и другую документацию, которые наряду с алгоритмическим и программным обеспечением являются важнейшими компонентами конечного продукта любого проекта.

В основу построения ИММ закладываются следующие принципы:

- сочетание особенностей аналоговой, цифровой и микропроцессорной обработки информации;
- микроконтроллерная организация функционирования;
- структуризация вычислительного процесса, базирующаяся на выделении проблемных, управляющих и коммуникационных процедур;
- аппаратная поддержка основных процедур;
- конвейеризация и распараллеливание обработки информации в реальном масштабе времени;
- интегрируемость в цифровые промышленные сети;
- в случае необходимости, работа на аналоговые каналы связи.

На рис.1 в основании пирамиды изображена упрощенная структура ПИММ, включающая:

- БЧЭ – блок чувствительных элементов;
- ПАБ – прецизионный аналоговый блок;
- БМК – блок микроконтроллера;
- БСО – блок сетевого обмена;
- БАВ – блок аналогового вывода.

При построении блоков ПАБ, БСО, БАВ могут использоваться различные сочетания схмотехнических и микроконтроллерных решений, а БМК – одноконтроллерная и мультимикропроцессорная организация обработки.

Приведенная относительная погрешность числового результата измерения и обработки физической величины в прецизионном интеллектуальном микропроцессорном модуле составляет

$$\delta_{\text{ПИММ}} = ((\delta_{\text{БЧЭ}} K_{\text{ПАБ}} + \delta_{\text{ПАБ}}) K_{\text{АЦП}} + \delta_{\text{АЦП}}) K_{\text{ЦМП}} + \delta_{\text{ЦМП}}, \quad (1)$$

где $\delta_{\text{БЧЭ}}$, $\delta_{\text{ПАБ}}$, $\delta_{\text{АЦП}}$, $\delta_{\text{ЦМП}}$ – приведенные относительные погрешности блока ПАБ, аналого-цифрового преобразователя АЦП, расположенного в блоке микроконтроллера БМК, и центрального микропроцессора ЦМК; $K_{\text{ПАБ}}$, $K_{\text{АЦП}}$, $K_{\text{ЦМП}}$ – коэффициенты трансформирования погрешностей со входа на выход ПАБ, АЦП и ЦМП.

Выражение

$$\delta_{\text{АД}} = \delta_{\text{ЧЭ}} K_{\text{ПАБ}} + \delta_{\text{ПАБ}}$$

приближенно описывает погрешность аналогового датчика, а выражение

$$\delta_{\text{ЦМК}} = (\delta_{\text{АД}} K_{\text{АЦП}} + \delta_{\text{АЦП}}) K_{\text{ЦМП}} + \delta_{\text{ЦМП}}$$

– погрешность на выходе блока микроконтроллера.

Повышение точности обработки в интеллектуальных микропроцессорных модулях обеспечивается в результате реализации совокупности прецизионных

методов аналоговой и микропроцессорной обработки сигналов, а также вычисления управляющих воздействий.

При правильном выборе количества разрядов аналого-цифровое преобразование практически не увеличивает погрешность сигнала ПАБ, поступающего на АЦП, так как

$$\delta_{АД} K_{АЦП} \gg \delta \epsilon_{АЦП}.$$

Поэтому погрешность на выходе ПИММ складывается из трансформируемой погрешности аналогового датчика (выход ПАБ) и погрешности микропроцессорной обработки $\delta_{ЦМП}$, т.е.

$$\delta_{ИММ} \approx \delta_{АД} K_{АЦП} K_{ЦМП} + \delta_{ЦМП}. \quad (2)$$

В результате некорректного проектирования погрешность ЦМП может привести к существенному увеличению погрешности ПИММ. Для определения условий, соблюдение которых позволит не допустить такие последствия, представим погрешность ЦМП в виде суммы погрешностей

$$\delta_{ЦМП} = \delta_{\mu} + \delta_{\beta} + \delta_{T},$$

в которой δ_{μ} – приведенная относительная методическая погрешность использованных для преобразования формул; δ_{β} – приведенная относительная инструментальная погрешность, которая присутствует в результатах вычислений в связи с обработкой в ЦМП данных, представленных с ограниченной разрядностью; δ_{T} – приведенная относительная температурная погрешность метода преобразования, вызванная изменениями сигнала БЧЭ при отклонении температуры от нормального значения.

Так как трансформированная погрешность

$$\delta_v = \delta_{АД} K_{АЦП}$$

всегда присутствует в результатах измерений ИММ, то при проектировании ИФМ между приведенными относительными погрешностями следует соблюдать соотношение

$$\bar{\delta}_v \gg \bar{\delta}_{\mu} \geq \bar{\delta}_{\beta}.$$

Значение предельно допустимой методической погрешности $\bar{\delta}_{\mu}$ устанавливается при выборе метода и выводе (выборе) формул преобразования. Например, при синтезе (разработке) градуировочной зависимости методическая погрешность является результатом выбора аппроксимирующей функции. Значительная инструментальная погрешность $\bar{\delta}_{\beta}$ характерна для микропроцессорных алгоритмов и зависит от разрядности используемых в вычислениях данных и организации обработки этих данных. Уменьшение этой погрешности достигается при синтезе микропроцессорных алгоритмов и их адекватной реализации в микроконтроллерах.

Что же касается температурной погрешности, то условие

$$\bar{\delta}_v \gg \bar{\delta}_{T} \quad (3)$$

может быть выполнено при разработке методов и формул преобразования, в которых учитываются вносимые температурой изменения. В частности, в интеллектуальных датчиках давления соотношение (3) обеспечивается в результате разработки градуировочных характеристик, для построения которых используются экспериментальные результаты измерений параметров чувствительных элементов [7].

Следует подчеркнуть, что при проектировании ПИММ выбор элементной базы не должен приводить к росту погрешности преобразования. Однако при создании ПИММ на основе отечественной микроэлементной базы приходится идти на ухудшение массогабаритных и энергетических характеристик. Ситуация карди-

нально меняется в случае реализации ПИММ на основе технологий систем на кристалле фирм TI, AD и др. [6].

Как правило, чем совершеннее архитектура ПИММ [5], тем выше аппаратные, экономические и другие затраты. Поэтому при разработке ПИММ необходимо, прежде всего, оценивать возможность применения вариантов однопроцессорных схем и переходить к более сложным решениям при отрицательных результатах.

Наиболее простым и экономичным является ПИММ (рис. 2), построенный по типовой структурной схеме на основе 16-битового микроконтроллера, например семейства MSP430 [8], решающего функциональные и системные задачи, а также поддерживающего работу сетевого канала. В состав ПИММ, кроме блока центрального микроконтроллера, входят:

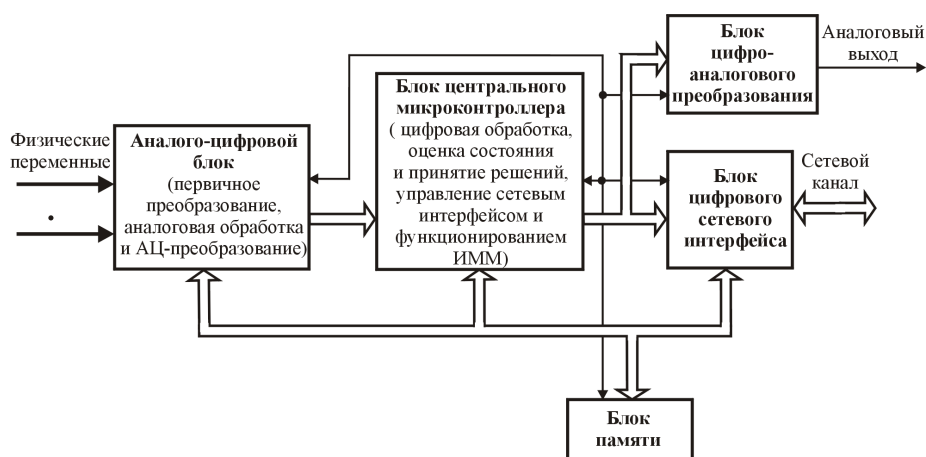


Рис. 2. Блочная структура ПИММ

– аналого-цифровой блок, включающий чувствительные элементы преобразования физических величин в электрические сигналы, и схемы программируемых усиления и фильтрации, обеспечивающие прецизионную (приведенная относительная погрешность не более 0,1%) обработку аналоговых сигналов и последующее их преобразование в цифровые 12-, либо 14-, либо 16-битовые коды;

– блок 12-, либо 14-, либо 16-битового цифроаналогового преобразования, обеспечивающий выдачу результатов обработки в аналоговой форме в виде напряжения либо тока;

– блок цифрового сетевого интерфейса, через который из сетевого канала в ПИММ принимаются команды и данные и выдаются в сетевой канал полученные в ПИММ результаты измерений и их обработки;

– блок памяти, обеспечивающий расширение встроенной памяти центрального микроконтроллера.

Заметим, что блок цифрового сетевого интерфейса является обязательным компонентом ПИММ, интегрируемых в цифровые промышленные сети [9]. В то же время блок цифроаналогового преобразования вводится в состав ПИММ только при подключении к его выходу аналоговых приборов и исполнительных органов. Что же касается блока памяти, то необходимость в нем может быть продиктована какими-либо схемотехническими решениями, например введением буферной памяти для приема и передачи сетевых сообщений либо специальной энергонезависимой

висимой памяти для хранения информации о состояниях локальных переменных и т.п.

Более сложной, но и более производительной, чем однопроцессорная структура (рис.2) является архитектура двухъядерного ПИММ, в котором кроме основного микроконтроллера применяется дополнительный, входящий в БЦСИ и поддерживающий сетевой обмен по реализуемому протоколу.

Требования к производительности основного микроконтроллера ПИММ зависят от вычислительной сложности решаемых задач и организации функционирования ПИММ в темпе реального времени.

В ПИММ в реальном масштабе времени решаются следующие задачи [7]:

1. Аналого-цифровое преобразование (АЦ-преобразование) сигналов физических величин.
2. Проверка на достоверность значений сигналов физических величин и фильтрация импульсной помехи.
3. Вычисление сумм значений сигналов физических величин.
4. Вычисление усредненных значений физических величин.
5. Проверка на достоверность усредненных значений сигналов физических величин.
6. Обнаружение отказа аппаратуры.
7. Замена приближенными значениями недостоверных усредненных значений физических величин.
8. Измерение значений физических величин, оценка состояний переменных и/или вычисление управляющих воздействий.
9. Формирование результатов для выдачи на цифровой/аналоговый выход (с учетом признака недостоверности при обнаружении импульсных помех и признака отказа.).

Требования к производительности используемых в ПИММ микроконтроллеров определяются не только максимальной частотой изменения входного сигнала f_{max} и вычислительной сложностью решаемых задач, но также организацией функционирования ПИММ в темпе реального времени.

Известно [10], что для систем управления 1-го порядка частоту дискретизации входного сигнала следует брать **в 4 раза больше наивысшей частоты сигнала**. Если же *порядок системы управления больше первого*, то *частота дискретизации должна быть выбрана в 10 раз больше наивысшей частоты сигнала*.

Для того чтобы создаваемые ПИММ могли эффективно использоваться в системах управления не только первого, но и более высоких порядков, частоту дискретизации целесообразно выбирать не менее, чем в 10 раз большее наивысшей частоты сигнала и, соответственно, установлен шаг дискретизации

$$T \leq \frac{1}{10f_{max}}. \quad (4)$$

Например, при наивысшей частоте сигнала $f_{max} = 20$ Гц шаг дискретизации $T \leq 5$ мс, а при наивысшей частоте сигнала $f_{max} = 100$ Гц шаг дискретизации $T \leq 1$ мс.

Для современной микроконтроллерной базы вполне реальна организация решения перечисленных выше задач в пределах таких шагов дискретизации. Однако для получения необходимой точности задачи первичной обработки (1)–(4) должны решаться в десятки раз чаще.

Поэтому в ПИММ АЦ-преобразования реализуются с шагом $T_{АЦ} \ll T$. Величина шага АЦ-преобразования выбирается так, чтобы погрешности усредненных значений сигналов укладывались в заданные пределы. Например, при наивысшей частоте сигнала $f_{max} = 20$ Гц приведенная относительная погрешность

формирования усредненного значения сигнала не превышает 0,01%, когда $T_{АЦ} \leq 50$ мкс и число АЦ-преобразований, используемых при усреднении, $n=8$.

Требования к производительности микроконтроллеров определяются набором задач, который реализуется на интервале $T_{АЦ}$. При этом возможны следующие схемы организации вычислительных процессов.

Схема 1. Формирование результатов измерения и обработки (решение совокупности всех задач 1–9) на каждом интервале АЦ-преобразований, $T_{АЦ} \ll T$ (рис. 3).

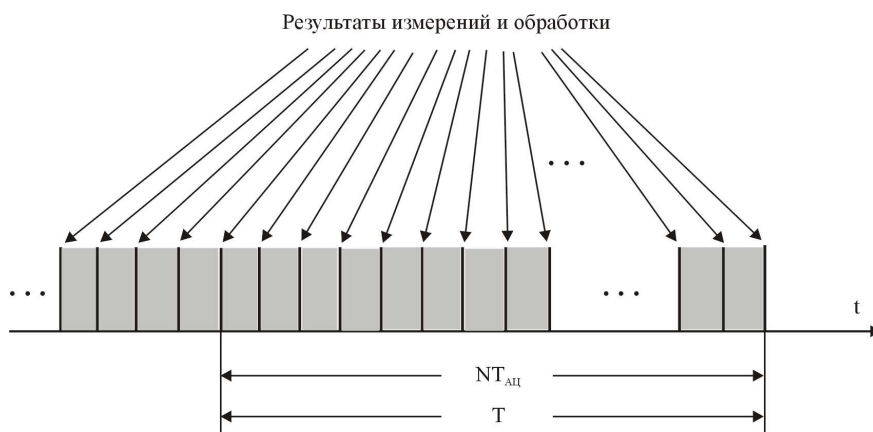


Рис. 3. Временная диаграмма организации функционирования ПИММ по схеме 1

Темп работы ПИММ определяется АЦ-преобразованием, которое производится через каждый шаг (интервал) $T_{АЦ}$ и по времени занимает часть этого интервала. АЦ-преобразование завершается занесением кода в память и выставлением флага готовности результата. В многоканальном ПИММ флаг выставляется после формирования значений всех сигналов. Результаты АЦ-преобразований проверяются на достоверность, корректируются, суммируются с соответствующими $(n-1)$ данными, сформированными на предыдущих шагах $T_{АЦ}$, и усредняются (задачи 2–4). Следует заметить, что для сокращения времени вычисления усредненных значений сигналов производится экономичным методом скользящего среднего [5], позволяющим на каждом шаге $T_{АЦ}$ обойтись всего двумя операциями (суммированием и сдвигом).

Обработка усредненных значений осуществляется, когда в результате решения задачи 5 подтверждена работоспособность аппаратуры.

Обработке предшествует проверка усредненных значений на достоверность и замена недостоверных значений приближенными (задачи 6,7). После этого в случае необходимости вычисляются значения физических величин, оцениваются состояния переменных и/или вычисляются управляющие воздействия (задачи 8,9).

Результаты обработки формируются для выдачи на аналоговый выход и/или в цифровой сетевой канал. Когда в сети реализуется передача данных по протоколу, то на интервале $T_{АЦ}$ должна также решаться задача поддержки ПИММ процедур сетевого обмена.

Таким образом, при организации вычислительных процессов в соответствии с рассмотренной версией значений применяется метод скользящего среднего, в соответствии с которым на каждом шаге $T_{АЦ}$ решаются задачи 1–3 и рассчитывается усредненное значение оцифрованных значений сигнала физической величины

(задача 4). Затем решаются задачи 5–9. При этом измеренные значения физических величин вычисляются и обрабатываются со сдвигом по времени

$$\Delta t_1 = T_{АЦ} (n/2 + 1), \quad (5)$$

где n – количество оцифрованных значений, используемых при усреднении.

Следует заметить, что при использовании в ПИММ данной схемы организации вычислений на измерение и обработку сигнала требуется время

$$t_{PI} \leq T_{АЦ} \quad (6)$$

и они выполняются в

$$N = \frac{T}{T_{АЦ}} \quad (7)$$

раз чаще, чем это необходимо в соответствии с условием (1). Это приводит к увеличению уязвимости ПИММ по отношению к импульсным помехам, к применению в них микроконтроллеров с завышенной производительностью, а также к перегрузке сетевого канала малополезной информацией.

В этом плане более совершенной является организация вычислительных процессов, в которой, как и в предыдущем случае, АЦ-преобразования производятся N раз за интервал T (4), результаты измерений и обработки формируются через интервал T (1).

Схема 2. Формирование результатов измерений и обработки в течение интервала T и реализация АЦ-преобразования с интервалом $T_{АЦ} \ll T$ (рис. 4).

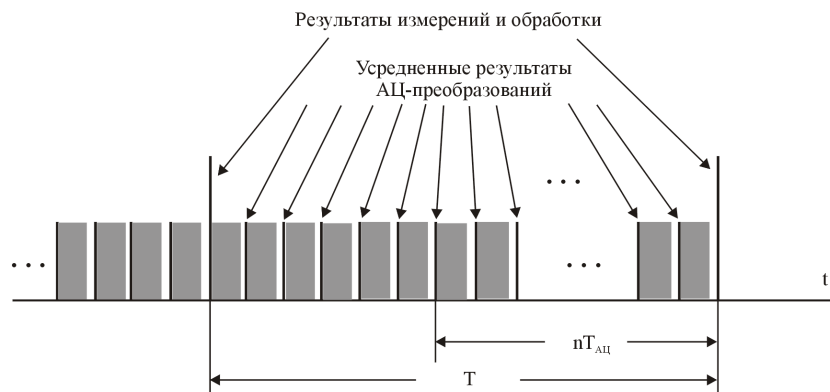


Рис. 4. Временная диаграмма организации функционирования ПИММ по схеме 2

Как и в предыдущем случае, АЦ-преобразования реализуются непрерывно через интервал $T_{АЦ}$ (задача 1). Для сглаживания используется метод скользящего среднего, позволяющий формировать усредненные результаты n АЦ-преобразований в конце каждого интервала $T_{АЦ}$ (задачи 3,4). При этом используются проверенные на достоверность и, в случае необходимости, откорректированные оцифрованные значения сигналов (задача 2).

В отличие от схемы 1 для решения задач 5–9 отводится не оставшееся свободное время одного интервала $T_{АЦ}$, а суммарное свободное время всех N интервалов. В результате этого в конце интервала

$$T = NT_{АЦ} \quad (8)$$

рассчитываются и формируются для вывода результаты измерений и обработки.

Когда полученные данные передаются в сеть по протоколу, для реализации процедур поддержки в ПИММ сетевого обмена на интервалах $T_{АЦ}$ отводится необходимое время.

При организации вычислений по схеме 2 результаты измерений и обработки формируются со сдвигом по времени

$$\Delta T_2 = (N + n/2)T_{АЦ}. \quad (9)$$

В свою очередь, к производительности микроконтроллера предъявляются менее жесткие требования, так как на решение задач (1–9) отводится время

$$t_{p2} = [(1 - \alpha)N + n\alpha] T_{АЦ}, \quad (10)$$

где α – коэффициент ($\alpha < 1$), определяющий часть интервала $T_{АЦ}$, отведенную для решения задач 1–4.

Это достоинство сохраняется и при организации n -размерных пакетов результатов АЦ-преобразований, а основной обработки – между пакетами.

Схема 3. Формирование результатов измерений и обработки на интервале на основе пакета n значений сигнала, полученных в начале этого интервала (рис. 5).

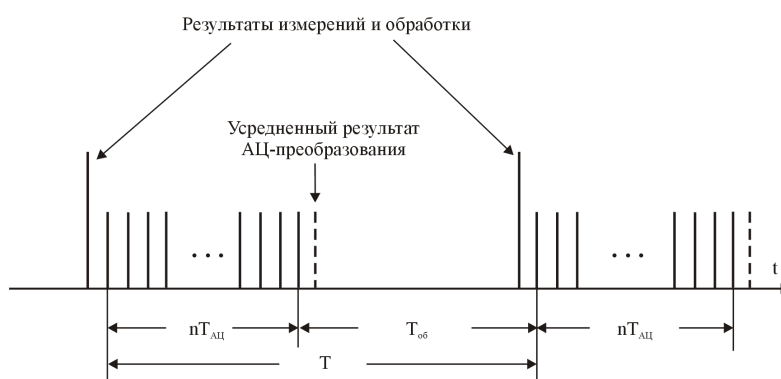


Рис. 5. Временная диаграмма организации функционирования ПИММ по схеме 3

Интервал T состоит из интервала формирования результатов АЦ-преобразований $nT_{АЦ}$ и интервала обработки этих результатов $T_{об}$.

На интервале $T_{АЦ}$ могут производиться аналого-цифровое преобразование сигналов физических величин (задача 1), проверка на достоверность результатов преобразований и, в случае необходимости, фильтрация импульсной помехи (задача 2), суммирование полученных оцифрованных значений с результатами АЦ-преобразований, полученными на предыдущих интервалах $T_{АЦ}$ (задача 3).

После завершения формирования пакета, найденные суммы делятся на n и в итоге рассчитываются усредненные значения сигналов физических величин (задача 4). Затем усредненные значения проверяются на достоверность (задача 5) и оценивается работоспособность аппаратуры (задача 6). Если отказ аппаратуры не обнаружен, то недостоверные усредненные значения сигналов физических величин заменяются приближенными (задача 7). После этого усредненные значения обрабатываются и результаты обработки формируются для выдачи в сеть ПИММ (задачи 8,9).

При сохранении соотношения (4) время, отводимое в ПИММ для решения всех задач 1–9, составляет

$$t_{p31} = [N - (1 - \alpha)n] T_{АЦ}. \quad (11)$$

Результаты обработки формируются с задержкой по времени

$$\Delta T_3 = \left[N - \frac{n}{2} \right] T_{АЦ}. \quad (12)$$

Рассмотренная схема 3 допускает модификацию, в соответствии с которой в начале интервала T только оцифровываются и запоминаются сигналы физических величин, а остальная обработка (решение задач 2–9) производится на интервале

$$T_{об} = T - nT_{АЦ}.$$

При этом для решения всех задач 1–9 отводится время

$$t_{p32} = [N - (1 - \beta)n]T_{АЦ}, \quad (13)$$

где часть интервала $T_{АЦ}$ затрачивается на решение задачи 1.

Задержка по времени формирования результатов (12) не изменяется.

Поскольку $\beta < \alpha$, то такая модификация приводит к незначительному увеличению требований к производительности микроконтроллера.

Если же интервал АЦ-преобразования выбрать равным $\beta - T_{АЦ}$, то для решения задач 2–9 отводится время

$$t_{p33} = [N - \beta n]T_{АЦ}. \quad (14)$$

Величина t_{p33} будет больше t_{p1} , когда

$$\beta > (1 - \alpha). \quad (16)$$

Сопоставим характеристики рассмотренных схем организации функционирования ПИММ.

По сравнению со схемой 1, на решение задач 1–9 в схеме 2 отводится в

$$K_{21} = N - \alpha(N - n) \quad (17)$$

раз, а в схеме 3 в

$$K_{31} = N(1 - \alpha)n \quad (18)$$

раз больше времени. Отсюда следует, что по сравнению с ПИММ, работающим по схеме 1, в ПИММ, функционирующих по схемам 2 и 3, могут использоваться в K_{21} (10) и K_{31} (11) раз менее производительные микроконтроллеры. Например, когда $\alpha=0,3$, $N=100$, $n=8$, микроконтроллеры ПИММ могут работать в $K_{21}=72,4$ и $K_{31}=94,4$ раз медленнее.

В свою очередь, по схеме 3 в ПИММ для решения всех задач 1–9 отводится в 1,3 раза больше времени, чем по схеме 2.

Что же касается сдвига по времени сформированных результатов измерений и обработки по отношению к моменту оцифровки аналоговых сигналов, то наименьшее запаздывание обеспечивает схема 1 (2), наибольшее – схема 2 (6) и близкое к схеме 2, но меньшее, чем в ней – схема 3 (9). Например, в случае при $N=100$, $n=16$ запаздывания составят

$$\Delta T_1 = T_{АЦ}, \quad \Delta T_2 = 108T_{АЦ} \quad \text{и} \quad \Delta T_3 = 92T_{АЦ}.$$

На основании проведенного анализа можно рекомендовать:

1. В случае, когда результаты измерений и оценок состояний физических переменных, формирования управляющих воздействий должны выдаваться прецизионным ПИММ в канал связи с частотой в сотни раз превышающей $10f_{max}$ и с минимальной временной задержкой, работу ПИММ следует организовать по схеме 1.

2. Если с выхода ПИММ результаты измерений и оценки состояний физических переменных, формирования управляющих воздействий должны выдаваться в сетевой канал с частотой $10f_{max}$ либо близкой к ней, то для построения прецизионного ПИММ нужно рассматривать схемы 2 и 3. Эти схемы имеют близкие характеристики, однако схема 3 позволяет не только отвести больше времени под решение задач 1–9, но и при программировании не требует разбиения решения задач 5–9 на кванты. В результате этого упрощается разработка и отладка программного обеспечения.

В завершение еще раз отметим, что при современном уровне конструирования и производства создание интеллектуальных микропроцессорных модулей, отличающихся высокими технико-экономическими характеристиками, прежде всего зависит от результатов комплексного решения совокупности проблем выбо-

ра, а при необходимости и разработки, методов измерения, оценок состояний, физических переменных и формирования управляющих воздействий, синтеза микропроцессорных алгоритмов и разработки программного обеспечения, разработки блочной структуры, аппаратуры и организации вычислений, определения схемотехнических решений и выбора элементной базы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Локотков А.* Устройства связи с объектом. Модули фирмы ADVANTECH// СТА. 1997. № 2. –С.32-44.
2. Система интеллектуальных модулей "Теконик"// <http://www.tecon.ru> .
3. Интеллектуальные датчики давления серии Метран-100// [Http://www.mertran.ru](http://www.mertran.ru) .
4. *Бушуев Н., Васьков Ю., Мартынов Д., Стучебников В.* Интегральные датчики давления на основе структур КНС// Электронные компоненты. 2006. № 11.– С.87-88.
5. *Пьявченко О.Н.* Проектирование локальных микрокомпьютерных систем. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. – 238 с.
6. *Пьявченко О.Н., Пьявченко А.О.* Схемотехнические решения и элементная база интеллектуальных микропроцессорных модулей: Учебное пособие/ Под ред. О.Н.Пьявченко. – Таганрог: Изд-во ТРТУ. 2006. – 230 с.
7. *Клевцов С.И.* Матрично-полиномиальная аппроксимация градуировочной характеристики датчика давления// Материалы международной научной конференции " Системный подход в науках о природе, человеке и технике". – Таганрог: 2003. Ч.5. – С.16–25.
8. *Голдштейн М.* 16-битные микроконтроллеры: состояние, перспективы и применение// Электронные компоненты. 2006. № 11. – С.89–95.
9. *Кругляк К.* Промышленные сети: цели и средства // СТА, 2001. № 4. –С.6–17.
10. *Годбоул К.* Переход от аналогового управления электроприводом к цифровому// Электронные компоненты. 2006. № 11. – С.25–33.

С.В.Тарарыкин, В.В. Тютиков, В.А.Иванков, Е.В.Красильникьянц

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗАННЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ С УПРУГИМИ ЗВЕНЬЯМИ И ЗАЗОРАМИ В КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧАХ

Разработана методика синтеза систем взаимосвязанных электроприводов с упругими звеньями и зазорами в кинематических передачах, основанная на принципах модального управления и применении безынерционных регуляторов состояния.

Практические задачи управления многими промышленными механизмами предполагают регулирование скорости и положения исполнительного механизма, соединенного с электроприводом (ЭП) через упругую кинематическую передачу, содержащую зазор. К такого рода объектам управления (ОУ) относят опорно-поворотные устройства различного назначения, металлообрабатывающие станки, механизмы металлургического производства и т.п. Системы регулирования для них рационально строить по принципу электромеханической выборки зазора (электромеханического торсиона) на основе реверсивных многодвигательных ЭП с индивидуальными силовыми преобразователями (СП).

К числу основных требований, предъявляемых к указанным ЭП, относятся высокие показатели надежности работы, а также точности и быстродействия при управлении движением общей массы (ОМ).

Известны [1–5] системы управления двухдвигательным ЭП с зазорами в кинематических передачах по принципам электромеханического торсиона (ЭМТ) и