

УДК 681.5.09

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ С ДИСТАНЦИОННОЙ ОРГАНИЗАЦИЕЙ ТРАНЗАКЦИЙ: ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ

А.В. ГУЛАЙ, В.М. ЗАЙЦЕВ

*Белорусский национальный технический университет  
Независимости, 65, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 30 октября 2015*

Рассмотрены базовые требования, предъявляемые к сенсорным и управляющим трактам мехатронных систем с дистанционной организацией процессов контроля и управления объектами. Показано, что применение в мехатронных системах принципов цифровизации и распределенной обработки данных позволяет перейти к унифицированной структуре и к типовому набору функций аппаратных и программных средств. Проанализирована проблема достоверной передачи транзакций по телеметрическим и телематическим каналам интеллектуальной мехатронной системы. Выполнена оценка нижней и верхней границ важнейшего системного показателя – вероятности достоверной передачи одного блока транзакции. Приведен вариант возможного представления параметров объектов в базе данных интеллектуальной мехатронной системы.

*Ключевые слова:* мехатронная система, интеллектуальная система, передача транзакций.

### Введение

Рациональным подходом в проектировании интеллектуальных мехатронных систем является представление их в виде многоканальных технических комплексов, рассчитанных на параллельное или квазипараллельное силовой моментное управление выходными механическими звеньями (модулями движения) по множеству координат требуемого фазового пространства [1, 2]. В рамках данного подхода выполнен анализ базовых требований, предъявляемых к сенсорным и управляющим трактам мехатронных систем с дистанционным взаимодействием компонентов. Рассмотрена структурно-функциональная схема мехатронной системы, содержащей интеллектуальное сенсорное устройство, центр управления и интеллектуальный исполнительный механизм.

Представлен функционально полный набор задач, решаемых аппаратными и программными средствами интеллектуальной мехатронной системы. Предложена технология выработки требований к достоверности передачи транзакций в интеллектуальных мехатронных системах и принципы применения реляционной модели представления информации в центре управления. Показано, что определяющее значение имеют характеристики надежности компонентов мехатронной системы, а также общее количество параметров, которые подлежат сбору, обработке, накоплению или обновлению при функционировании интеллектуальной мехатронной системы.

### Структура и функции интеллектуальных мехатронных систем с дистанционным взаимодействием компонентов

На предварительных этапах проектирования мехатронных систем формируется базовый набор определенных конструктивных и функциональных требований. В соответствии с техническими нормативно-правовыми актами в области технического нормирования и стандартизации эти требования специфицируют следующие аспекты построения систем:

- состав и типы объектов контроля и управления;
- количество координат управления в фазовом пространстве и требуемые законы (виды траекторий) перемещения модулей движения;
- скоростные и точностные характеристики процессов изменения местоположения рабочих органов;
- допустимые параметры инерционности управления;
- удаленность объектов от центра управления, типы, предполагаемое количество и характеристики каналов обмена телеметрическими и телематическими транзакциями;
- радиointерфейс передачи транзакций между контролируруемыми объектами и центром управления для обеспечения их дистанционного взаимодействия и необходимые вероятностно-временные показатели;
- параметры ожидаемых механических, климатических, электромагнитных и иных дестабилизирующих воздействий среды функционирования на составные части систем и способы обеспечения функционального контроля компонентов;
- необходимость защиты системы от несанкционированного доступа к ее ресурсам, от подделок и навязывания информации.

На практике широкий спектр разнородных требований достаточно трудно удовлетворить при «конкатенационном» подходе к проектированию систем, когда в соответствии с заданными требованиями выполняется последовательный подбор «подходящих» составных частей и их взаимоувязка по месту применения. В настоящее время этот подход преобладает при создании сложных мехатронных систем. Однако кажущаяся экономичность и естественность процесса синтеза конкретной системы в большинстве случаев приводит к консерватизму отношений в ее структуре, что сопровождается значительными техническими осложнениями при возможной модификации как самой системы, так и ее отдельных компонентов. Кроме того, в данном случае дополнительные проблемы при создании мехатронной системы вызывает перестройка режимов ее функционирования.

Альтернативным подходом является проектирование мехатронных систем как единого целого на принципах цифровизации и распределенной обработки данных. Эти принципы известны достаточно давно, но их техническая реализация стала возможной в связи с освоением в массовом производстве относительно недорогих высокопроизводительных микропроцессоров и с развитием практических приложений теории цифровой обработки сигналов [2, 3]. В настоящее время сложились объективные технические, алгоритмические и экономические условия для перехода к унифицированной структуре и к типовому набору функций аппаратных и программных средств мехатронных систем. Возможный вариант структурно-функционального построения интеллектуальной мехатронной системы указанного типа представлен на рис. 1.

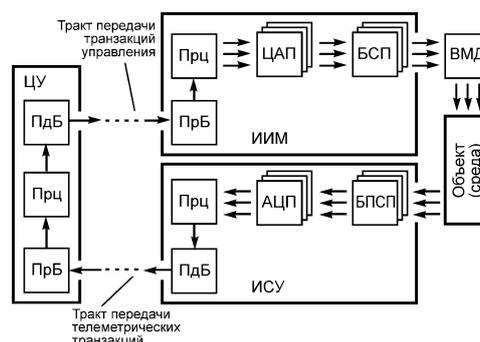


Рис. 1. Структурно-функциональная схема интеллектуальной мехатронной системы с дистанционным взаимодействием компонентов

В рассматриваемой структуре процессы контроля и управления направлены на обеспечение требуемых законов перемещения выходного модуля движения (ВМД). Центр управления (ЦУ) включает процессор (Прц), который предназначен для консолидированной обработки и накопления системной информации, решения заданного набора функциональных задач и выработки управляющих воздействий, выполнения процедур контроля компонентов, а также, при необходимости, для ведения и архивирования протоколов функционирования.

Кроме того, в состав центра управления вводится передающий блок (ПдБ) вывода транзакций управления и приемный блок (ПрБ) ввода телеметрических транзакций. Дополнительно в состав центра управления может быть включена консоль оператора и блок визуализации данных.

Дистанционное многопараметрическое управление модулем движения реализуется с помощью транзакций управления и интеллектуального исполнительного механизма (ИИМ). Исполнительный механизм обеспечивает преобразование транзакций с цифровыми векторами управления в аналоговые, дискретные и импульсные сигналы требуемого координатного перемещения или в изменения состояния модуля движения в фазовом пространстве. В состав исполнительного механизма входит приемный блок, процессор, цифро-аналоговые, цифро-дискретные, цифро-импульсные преобразователи (соответственно ЦАП, ЦДП, ЦИП) и блок силовых преобразователей (БСП). Процессор в данном случае обеспечивает цифровую реализацию сверток цифровых сигналов вектора управления и импульсных характеристик, соответствующих необходимым передаточным функциям, которые определяют динамику управления модулем движения. Таким образом, в системе обеспечивается целенаправленное движение указанного модуля с контролем его положения и состояния с помощью тракта обратной связи.

Дистанционный многопараметрический контроль текущего положения и состояния выходного модуля движения по тракту обратной связи выполняется с помощью телеметрических транзакций и интеллектуального сенсорного устройства (ИСУ). Данное устройство реализует процессы предварительной цифровой обработки сигналов, которые характеризуют текущее положение и состояние модуля движения, а также их преобразование в вектор контроля, который сопровождается меткой времени. В состав сенсорного устройства вводится блок первичных сенсорных преобразователей (чувствительных элементов) (БПСП), а также аналого-цифровые, дискретно-цифровые и импульсно-цифровые преобразователи (соответственно АЦП, ДЦП, ИЦП), процессор и передающий блок.

С целью организации дистанционного информационного взаимодействия применяются проводные каналы, волоконно-оптические и радиоканалы, при этом наилучшие вероятностно-временные характеристики дает применение двух отдельных симплексных каналов. Для управления инерционными объектами допускается использование одного симплексного проводного или радиоканала в полудуплексном режиме (на основе применения временного разделения канала и метода доступа с контролем несущей частоты).

Перенос основных процессов обработки сигналов и другой информации на программные средства и их распределение по процессорам мехатронной системы позволяет построить унифицированную высокостабильную общую структуру, которая приобретает свойства адаптации к изменениям выходного модуля движения и режимов функционирования, а также к возможным модификациям типов и функций системных компонентов. Стандартизация цифровых межкомпонентных интерфейсов, которая в настоящее время достаточно строго соблюдается разработчиками и изготовителями радиоэлектронного оборудования, создает дополнительные условия для гибких функциональных преобразований системы при сохранении ее общей структуры. Такая стандартизация достигается путем выбора требуемого состава вышеуказанных преобразователей, блока чувствительных элементов и соответствующих модификаций «мягких компонентов» – программ цифровой обработки сигналов и данных в процессорах.

На аппаратные и программные средства трактов мехатронной системы, построенной на основе унифицированной структуры и распределенной обработки информации, может быть возложено решение функционально полного набора завершенных в логическом отношении задач [2–6]. Представляется рациональным следующий план их предварительного распределения по ресурсам системы.

Функции интеллектуального сенсорного устройства:

- оцифровка сенсорных сигналов, формируемых чувствительными элементами (с учетом априорных сведений о параметрах частотных спектров сигналов);
- обеспечение линеаризации характеристик, юстировки, калибровки и метрологической экспертизы цифровых измерительных преобразователей;

- первичная цифровая обработка сигналов, в том числе цифровая фильтрация и требуемые логические преобразования;
- упаковка измерительной информации с ее «привязкой» к номерам измерительных каналов тракта;
- формирование вектора параметров контроля и его представление в формате телеметрической транзакции;
- формирование кода имитозащиты транзакции с использованием конфиденциального параметра для защиты системы от подделок и навязывания информации [4];
- помехоустойчивое кодирование транзакции в зависимости от априорных сведений о статистических свойствах радиоканалов [5];
- перемежение кодов транзакции для защиты от возможных пакетов битовых ошибок [5];
- передача телеметрических транзакций от интеллектуального сенсорного устройства в центр управления.

Задачи центра управления:

- прием телеметрических транзакций от интеллектуального сенсорного устройства и обратное перемежение кодов транзакций;
- снятие помехоустойчивого кода и формальный контроль правильности телеметрической транзакции;
- формирование кода имитозащиты транзакции с использованием конфиденциального параметра и проверка подлинности;
- распаковка сенсорной информации с выделением номеров каналов, результатов контроля параметров и меток времени в атомарном виде;
- смысловая обработка информации, ее накопление, при необходимости – визуализация данных, выработка управляющих воздействий на выходной модуль движения;
- упаковка управляющей информации с ее «привязкой» к номерам каналов тракта управления;
- формирование вектора управления и его представление в формате телеметрической транзакции;
- формирование кода имитозащиты транзакции с использованием конфиденциального параметра для защиты модуля движения от подделок и навязывания информации;
- помехоустойчивое кодирование телеметрической транзакции и перемежение кодов транзакции;
- передача телеметрических транзакций в интеллектуальный исполнительный механизм.

Функции интеллектуального исполнительного механизма:

- прием телеметрических транзакций от центра управления в исполнительный механизм и обратное перемежение кодов транзакций;
- снятие помехоустойчивого кода и формальный контроль правильности телеметрической транзакции;
- формирование кода имитозащиты транзакции с использованием конфиденциального параметра и проверка подлинности;
- распаковка управляющей информации с выделением номеров каналов, управляющих параметров и меток времени в атомарном виде;
- переработка управляющей информации и распределение ее по каналам, заданным в транзакции;
- физическое воспроизведение сигналов управления и воздействие на выходной модуль движения с помощью соответствующих силовых преобразователей.

### **Достоверность передачи телеметрических и телеметрических транзакций в интеллектуальных мехатронных системах**

В зависимости от ответственности мехатронной системы устанавливается допустимый уровень снижения полноты сбора, обработки, накопления или обновления информации, при котором в органе управления могут быть корректно выработаны требуемые управляющие воздействия и соответствующие им команды и сигналы. Предположим, что в системе в циклах

управления необходима организация сбора, обработки, накопления или обновления  $N$  текущих параметров объектов и явлений  $\{O_i\}; i = 1, 2, \dots, n$ . Значение  $N$  определяется составом объектов

и явлений, кардинальными  $m_i$  и доменарными  $r_i$  числами: 
$$N = \sum_{i=1}^n m_i r_i.$$

Допустимый относительный уровень снижения полноты  $\varepsilon$  и доверительная вероятность  $P_{\text{ДОВ}}$  определяют тот факт, что в каждом цикле управления реализуются сбор, обработка, накопление или обновление сведений не менее, чем для  $N - \mu$  параметров, где  $\mu = \text{Ant}(\varepsilon N)$ ;  $\text{Ant}$  – целочисленная функция Антье. Если  $P_0$  – вероятность обеспечения средствами системы сбора, обработки, накопления или обновления информации об одном параметре, то для достижения требуемой полноты  $N - \mu$  и доверительной вероятности  $P_{\text{ДОВ}}$  должно выполняться неравенство: 
$$P_0^N + C_N (1 - P_0) P_0^{N-1} + C_N^2 (1 - P_0)^2 P_0^{N-2} + \dots + C_N^\mu (1 - P_0)^\mu P_0^{N-\mu} \geq P_{\text{ДОВ}}.$$

Нижняя граница вероятности  $P_0$  является положительным вещественным корнем данного алгебраического уравнения, которое принимает вид равенства. В расчетах необходимо применять нечетное значение  $N$ , в качестве которого следует непосредственно выбирать либо исходное значение  $N$ , если оно нечетное, либо  $N + 1$  при четном исходном значении  $N$ . С учетом отрицательного свободного члена уравнения гарантируется наличие хотя бы одного положительного вещественного корня. При высоких значениях  $N$  прямое решение данного уравнения крайне затруднено. Для нахождения нижней границы вероятности  $P_0$  следует проводить изоляцию корня на интервале  $(0,8; 1,0]$ , после чего с помощью итерационного метода Ньютона и половинного деления интервала рассчитывать с требуемой точностью искомое значение  $P_0$ .

Расчетное значение вероятности  $P_0$  позволяет оценить нижнюю и верхнюю границы важнейшего системного показателя – вероятности достоверной передачи одного блока транзакции  $P_{\text{ДБЛ}}$  (блока служебного заголовка транзакции и блока параметров). Он количественно оценивает тот факт, что в каждом блоке транзакции либо не содержатся искаженные биты, обусловленные воздействиями негативных факторов на процессы передачи информации по каналу, либо количество искаженных бит не превышает допустимое значение. Данный показатель применяется для обоснованного выбора схемы и методов помехоустойчивого кодирования информации в транзакциях.

Вероятность достоверной передачи транзакции по каналу  $P_{\text{ДТ}}$  расщепляется на две мультипликативные составляющие – на вероятность достоверной передачи блока служебного заголовка транзакции  $P_{\text{ДЗАГЛ}}$  и на вероятность достоверной передачи параметрических блоков в среднем для  $\rho$  параметров при значении этой составляющей в расчете на один параметр транзакции  $P_{\text{ДПАР}}$ : 
$$P_{\text{ДТ}} = P_{\text{ДЗАГЛ}} P_{\text{ДПАР}}^\rho.$$

При заданных коэффициентах готовности сенсорного оборудования  $K_{\text{ГС}}$ , канального оборудования  $K_{\text{ГК}}$  и вычислительного оборудования  $K_{\text{ГВ}}$  в мехатронной системе требуется соблюдение главного условия обеспечения расчетной вероятности  $P_0$  при планируемых средних значениях  $\rho$ :  $K_{\text{ГС}} K_{\text{ГК}} K_{\text{ГВ}} P_{\text{ДТ}} \geq P_0$ , или  $K_{\text{ГС}} K_{\text{ГК}} K_{\text{ГВ}} P_{\text{ДЗАГЛ}} P_{\text{ДПАР}}^\rho \geq P_0$ .

При этом в мехатронной системе необходимо использование технического оборудования с высокими показателями надежности, при которых заведомо выполняется следующее условие:  $K_{\text{ГС}} K_{\text{ГК}} K_{\text{ГВ}} \geq P_0$ , а вероятность  $P_{\text{ДТ}} \geq P_0 / K_{\text{ГС}} K_{\text{ГК}} K_{\text{ГВ}}$  может быть определена без потери ее смысла и значимости (то есть  $P_{\text{ДТ}} < 1$ ). Выбор требуемых скоростей избыточного кода, при которых:  $P_{\text{ДЗАГЛ}} \approx P_{\text{ДПАР}} \approx P_{\text{ДБЛ}} \geq [P_0 / (K_{\text{ГС}} K_{\text{ГК}} K_{\text{ГВ}})]^{1/(\rho+1)}$ , обеспечивается блочной моделью помехоустойчивого кодирования (здесь  $P_{\text{ДБЛ}}$  – требуемая вероятность достоверной передачи блоков транзакции). Последнее соотношение позволяет оценить нижнюю и верхнюю границы требуемой вероятности достоверной передачи блоков транзакции  $P_{\text{ДБЛ}}$ : 
$$\text{Inf} P_{\text{ДБЛ}} = [P_0 / (K_{\text{ГС}} K_{\text{ГК}} K_{\text{ГВ}})]^{1/(\rho+2\sigma_\rho+1)}, \text{Sup} P_{\text{ДБЛ}} = [P_0 / (K_{\text{ГС}} K_{\text{ГК}} K_{\text{ГВ}})]^{1/(\rho-2\sigma_\rho+1)},$$
 где  $\sigma_\rho$  – среднее квадратическое отклонение количества параметрических блоков в одной транзакции.

В таблице представлены пары границ  $\text{Inf}P_{\text{дбл}}$ ,  $\text{Sup}P_{\text{дбл}}$  достоверной передачи блоков транзакций для обеспечения необходимых вероятностей  $P_0$  при  $\rho = 5$ ;  $\sigma_p = 1,5$ ;  $K_{\text{ГС}} = K_{\text{ГК}} = K_{\text{ГВ}} = 0,98$ . Как следует из результатов численного анализа, определяющее значение имеют параметры надежности компонентов мехатронной системы, общее количество параметров объектов и явлений, которые подлежат сбору, обработке, накоплению или обновлению, а также допустимые уровни снижения полноты в абсолютном выражении.

**Достоверность передачи транзакций по каналам мехатронной системы**

Допустимый уровень сниж. полноты $\varepsilon N$ , абс. ед.	Количество параметров объектов и явлений					
	50			100		
	Уровень снижения полноты $\varepsilon$ относительно $N$ , %	Значения вероятностей $\text{Inf}P_{\text{дбл}}$ ; $\text{Sup}P_{\text{дбл}}$		Уровень снижения полноты $\varepsilon$ относительно $N$ , %	Значения вероятностей $\text{Inf}P_{\text{дбл}}$ ; $\text{Sup}P_{\text{дбл}}$	
		Доверительная вероятность $P_{\text{дов}}$			Доверительная вероятность $P_{\text{дов}}$	
	0,93	0,95		0,93	0,95	
20	40	0,901; 0,966	0,906; 0,968	20	0,967; 0,989	0,969; 0,989
15	30	0,939; 0,979	0,943; 0,981	15	0,983; 0,994	0,984; 0,995
10	20	0,972; 0,991	0,975; 0,992	10	0,997; 0,999	0,999; 0,9997
7	14	0,990; 0,996	0,992; 0,997	7	0,9997; 0,9999	н/о; н/о
5	10	0,9997; 0,9999	н/о; н/о	5	н/о; н/о	н/о; н/о
2	4	н/о; н/о	н/о; н/о	2	н/о; н/о	н/о; н/о

н/о – значения не определены

Даже при крайне высоких значениях коэффициентов готовности  $K_{\text{ГС}} = K_{\text{ГК}} = K_{\text{ГВ}} = 0,98$  верхние границы  $\text{Sup}P_{\text{дбл}}$  вероятностей достоверной передачи блоков транзакций рационально определены и технически обеспечены быть не могут, если допустимый уровень  $\mu \leq 5-7$ . При этом нижние границы  $\text{Inf}P_{\text{дбл}}$  вероятностей достоверной передачи блоков транзакций должны составлять 0,999. Это крайне жесткие условия, особенно при достаточно высоких темпах поступления результатов сенсорных измерений. Обеспечение таких значений для коэффициентов  $K_{\text{ГС}}$ ,  $K_{\text{ГК}}$ ,  $K_{\text{ГВ}}$  и для вероятности  $P_{\text{дбл}}$  является сложной технической проблемой, без решения которой невозможно обеспечить эффективное управление мехатронной системой.

*Реляционная модель представления информации в интеллектуальных мехатронных системах.* Для хранения текущих значений параметров в вычислительных средствах центра управления наиболее простым и достаточно эффективным техническим решением является применение реляционной модели представления логической структуры информационных массивов в базе данных [7]. На рис. 2 приведен вариант возможного построения структуры логических отношений для параметров объектов  $\{O_i\}$ . Для правильной организации поступления значений параметров в базу данных центра управления логические структуры компонентов базы и структуры транзакций должны обладать свойством однозначного взаимного отображения.



Рис. 2. Вариант построения структуры логических отношений для параметров объектов  $\{O_i\}$

Наилучший эффект по скорости поиска и отбора кортежей в базе данных при выполнении операций накопления или обновления значений параметров может быть достигнут при использовании в качестве ключей идентификаторов типов объектов и кортежей обычных числовых кодов, а не символьных комбинаций. Кроме того, целесообразно представление отдельных кортежей в виде физических записей, а также использование специального справочника допустимых типов и форматов параметров. Это, по сути, означает предельное совмещение логической структуры базы данных с ее физической структурой [7].

Следует отметить, что практика построения ряда интеллектуальных мехатронных систем показала несостоятельность подхода к организации хранения в вычислительном оборудовании различного рода нормативных данных, констант преобразования и пересчета на постоянной основе. Более целесообразно присвоение этим видам информации условно-постоянного статуса, построение в базе данных специальных унарных отношений с доменными числами  $d=1$  для хранения указанных сведений и предоставление возможности дистанционного изменения значений с помощью транзакций-предписаний в технологическом режиме. В связи с крайне низкой частотой возможного обновления количество этих параметров при расчетах значения  $N$  можно не учитывать.

Таким образом, для успешного создания мехатронной системы должны соблюдаться определенные принципы дистанционного отображения текущих состояний физических объектов и явлений в базе данных органа управления. Большинство технических решений требует предварительного проведения оценочных расчетов, моделирования и нахождения компромиссов, позволяющих избежать заведомо бесперспективные варианты построения аппаратных и программных средств интеллектуальной мехатронной системы.

## INTELLECTUAL MECHATRONIC SYSTEMS WITH REMOTE ORGANIZATION OF TRANSACTIONS: DESIGN FEATURES

A.V. GULAY, V.M. ZAYTSEV

### Abstract

Basic requirements have been considered to sensor and controlling tracts of mechatronic systems with the remote organization of objects control processes. It has been shown that the use of digitizing principles and distributed data procession in mechatronic systems makes it possible to pass to the unified structure and the typical set of software and hardware functions of the aforesaid tracts. A problem of true transmission of transactions by telemeter and telematics channels of the intellectual mechatronic systems has been analyzed. Lower and upper borders of one transaction block have been evaluated – probability of true transmission of one transaction block.

### Список литературы

1. Федотов А.В. Использование методов теории автоматического управления при разработке мехатронных систем. Омск, 2007.
2. Гулай А.В., Зайцев В.М. // Теоретическая и прикладная механика. 2015. Вып. 30. С. 161–168.
3. Гулай А.В., Зайцев В.М. // Наука и техника. 2015. № 4. С. 12–17.
4. Харин Ю.С., Берник В.И., Матвеев Г.В. и др. Математические и компьютерные основы криптологии. Минск, 2003.
5. Кларк Д., Клейн Д. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи. М., 1987.
6. Гулай А.В., Зайцев В.М. // Электроника-инфо. 2015. № 2. С. 51–55.
7. Мартин Д. Организация баз данных. М., 1980.