

Ле Ба Чунг, аспирант, e-mail: chungbaumanvietnam@gmail.com,
Московский физико-технический институт (государственный университет),
Ю. А. Холопов, вед. инженер,
Институт точной механики и вычислительной техники им. С. А. Лебедева РАН

Информационная среда цифровых систем управления, использующая для управления периферией концепцию "вынесенной руки"

Предложена архитектура цифровой централизованной системы управления, построенной по принципу "вынесенной руки". Эта архитектура предоставляет возможность упростить состав оконечных устройств до автоматного уровня и исключить тем самым необходимость их изменения при модернизации системы. Периферийные устройства теперь превращаются в циклические автоматы, выполняющие простые функции нижнего уровня: измерения и обработки управляющих воздействий.

Ключевые слова: информационная среда цифровых систем управления, распределенная и централизованная системы управления, периферийные устройства, УСО, концепция "вынесенной руки"

Введение

В большинстве цифровых систем управления (ЦСУ) алгоритмы управления объектами исполняются в программно управляемых вычислителях. Вычислители, кроме чисто алгоритмических расчетов, выполняют функцию управления устройствами ввода параметров состояния и вывода параметров управления объектом, т. е. задачу коммуникации вычислителя с устройствами сопряжения с объектом (УСО). Последняя задача может быть решена несколькими способами, один из которых, а именно управление периферийными устройствами вычислителя в режиме "вынесенной руки", рассмотрен далее.

Необходимо отметить, что в ситуации, когда производительность программно-управляемых вычислителей постоянно растет и подается изготовителями микропроцессоров как основной критерий эффективности вычислителя, разработчики алгоритмов управления не уделяли должного внимания вопросам комплексирования вычислителя и периферии (датчиков и исполнительных устройств) способами, отвечающими требованиям задач управления. Комплексирование периферийных устройств, за редким исключением, происходит в режиме программного управления разовыми операциями опроса состояния датчиков или передачи параметров в исполнительные устройства. Для выделения круга проблем, связанных с технологией эффективного объединения составных

частей ЦСУ в единую систему, авторами используется термин "информационная среда" цифровых систем управления. Элементами информационной среды (ИС) являются все составные части ЦСУ, участвующие в цепочках информационных взаимодействий объекта управления (ОУ) с программно-управляемыми вычислителями системы управления, и их подсистемы ввода-вывода, т. е. в ИС входят: интерфейсы и логика управления датчиками, центральный вычислитель, интерфейсы и логика управления исполнительными устройствами, коммутаторы и совокупность физических связей составных частей.

Постоянное усложнение задач и самих объектов управления требует поиска новых способов построения ИС цифровых систем управления, которые позволили бы уточнять и дополнять задачи управления на уже функционирующих объектах. В более широкой постановке речь идет о создании цифровых систем управления для объектов с вариативной моделью функционирования. В аналоговых системах управления такая ситуация однозначно требует изменения аппаратуры. В цифровых системах управления возможности по разработке универсальных решений гораздо шире. Поэтому авторами была поставлена задача разработки ИС цифровых систем управления, которая не зависит от алгоритмов управления.

В статье обосновывается возможность создания информационной среды ЦСУ для объектов с вариативной моделью функциони-

рования. Искомая технология предполагает изначальное отсутствие ориентации на конкретный класс задач управления и привязки архитектурных решений к конкретной модели функционирования объекта управления.

1. Типовой подход к построению цифровых распределенных систем управления

Современные задачи управления техническими объектами в промышленности, робототехнике, авиации и т. д. часто реализуются в системах с распределенной функцией управления. Такие системы традиционно называют распределенными системами управления (PCY). Предыдущие поколения PCY строились на основе аналоговых узлов. В аналоговых системах управления существует проблема с комплексированием большого числа периферийных устройств (ПУ) к вычислителю. Поэтому было принято разбивать общую задачу управления на несколько слабосвязанных подзадач, т. е. распределять функции управления по нескольким аналоговым вычислителям [1].

Переход от аналоговой к цифровой обработке информации сохранил эту концепцию построения PCY, но придал ей новые качества: типизацию архитектурных и схемотехнических решений, возможность использования единообразного стиля управления целым рядом разнотипных периферийных устройств, легкую масштабируемость систем управления и возможность помехоустойчивых обменов информацией между пространственно удаленными узлами системы. Настройка и наладка цифровых систем управления в существенной части сводится к отладке программного обеспечения, для чего используются давно отработанные технологии. Вместе с тем, рациональность сохранения иерархической структуры системы управления, реализованной на элементной базе с принципиально иными свойствами, никем не подвергается сомнению.

Рассмотрим обобщенную структуру цифровой распределенной системы управления — системы, построенной по принципу разбиения общей задачи управления на

несколько отдельных, слабосвязанных между собой подзадач (рис. 1).

Возможность разбиения общей задачи управления на слабосвязанные подзадачи объясняется наличием в сложных объектах управления множества степеней свободы. Управление по каждой степени свободы относительно независимо от управления по другим степеням свободы. Поэтому подзадачи управления являются слабосвязанными.

В качестве примера рационального применения распределенной ЦСУ можно привести реализацию задачи управления многозвенным манипулятором. Манипулятор может управляться совокупностью распределенных вычислителей, каждый из которых выполняет почти автономную задачу управления положением звена относительно соседнего — опорного. Согласованная работа таких контуров регулирования нижнего уровня (КРНУ) задается уставками из центрального вычислителя, выполняющего задачу расчета и распределения уставок по подчиненным вычислителям нижнего уровня. Вычислители объединяются в единую ИС цифровой системы управления сетевыми или сетеподобными интерфейсами, причем большой скорости передачи данных не требуется, так как в вычислители нижнего уровня передают лишь команды — уставки, например скорость углового движения в сочленении.

В процессе эксплуатации ЦСУ часто возникает необходимость коррекции алгоритмов управления. Кроме того, при отладке систем алгоритмы управления объектом отлажива-

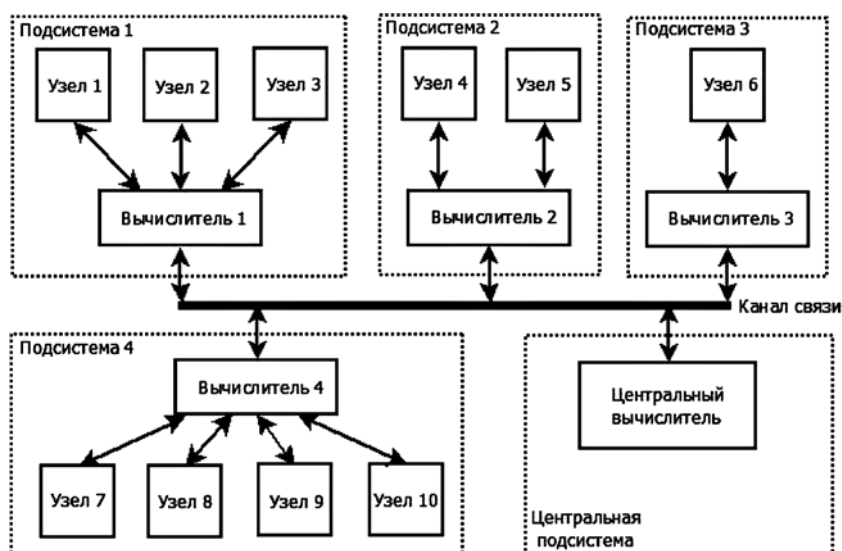


Рис. 1. Структура цифровой распределенной системы управления

ются поэтапно. Сначала происходит отладка функций узлов нижнего уровня до их установки на объекте управления и с использованием для перепрограммирования технологических интерфейсов. Общие алгоритмы управления объектом отлаживаются после монтажа вынесенных узлов КРНУ на их штатные, часто труднодоступные, места. Изменение алгоритмов работы узлов на этом этапе становится невозможным из-за недоступности технологических интерфейсов.

Зафиксируем основные характеристики ИС цифровых распределенных систем управления:

- ✓ модель объекта и алгоритмы управления заранее определены и согласованы со структурой ИС цифровых распределенных систем управления;
- ✓ функция управления распределена и реализована как в центральном вычислителе, так и в контурах регулирования нижнего уровня;
- ✓ скорость сетевой коммуникационной среды, передающей короткие высокоуровневые команды управления и параметры состояния, относительно низкая.

Далее попробуем показать, что для современных задач и объектов управления подход к построению цифровых систем управления, основанный на разбиении общей задачи на несколько локальных, слабосвязанных подзадач, может быть недостаточно универсальным и, как минимум, недостаточно гибким.

2. Возможность изменения алгоритмов управления в цифровых распределенных системах управления

В период использования аналоговых систем управления сложность объектов управления ограничивалась возможностью иерархического подхода к построению систем управления, который являлся единственным способом построения систем управления для сложных объектов. Технологии цифровой обработки и передачи информации принципиально не требуют разбиения общей задачи управления на подзадачи, так как ограничения по подключению практически любого числа устройств сопряжения с ОУ отсутствуют, нет ограничений и в скорости отработки алгоритмов управления. Вместе с тем, разбиение общей задачи управления на локальные слабосвязанные подзадачи снижает темп управления из центрального

вычислителя. Это свойство позволяло на этапе перехода с аналоговой на цифровую элементную базу использовать стандартные низкоскоростные интерфейсы для комплексирования периферийных устройств к вычислителю в цифровых распределенных системах управления. В распределенных ЦСУ часть алгоритмов управления реализована в контурах регулирования нижнего уровня. Изменение алгоритмов управления может затрагивать КРНУ, что является отдельной технической и, часто, сложной организационной задачей, так как узлы КРНУ, фактически, подключены к центральному вычислителю как удаленные внешние устройства и производятся, как правило, сторонними организациями. Для разработчиков современных ЦСУ крайне желательно выбрать структуру информационной среды ЦСУ, которая позволяла бы легко менять алгоритмы управления любого уровня.

Обоснованно низкая рабочая скорость сетевой коммуникационной среды в РСУ не позволяет реализовать управление объектом, например, в случае, когда движения частей (звеньев) многозвенного манипулятора стало необходимо выполнять в режиме жесткой связности задач регулирования, с взаимным учетом состояния смежных звеньев. Такая необходимость возникает, например, при отладке функционирования ОУ в критичных режимах и при работе нескольких исполнительных устройств на общую нагрузку. Недостаточная скорость обмена данными между КРНУ может стать причиной "грубости" траекторных движений конечных звеньев многозвенного манипулятора. Решение этой задачи возможно при переносе всех задач регулирования в центральный вычислитель, с организацией взаимодействия между ними самым быстрым способом — через общую память.

В настоящее время существуют перспективные объекты управления, для которых на этапе проектирования системы управления модель функционирования неизвестна, поэтому разбиение общей задачи управления на отдельные подзадачи невозможно. Алгоритмы управления такими объектами разрабатываются итеративно, при поэтапном введении ОУ в эксплуатацию, и поэтому постоянно меняются. Примерами являются системы автономного адаптивного управления, методология решения которых разработана д. ф-м. н., профессором А. А. Ждановым [2—4]. Такой класс задач тоже относится

к задачам управления объектом с вариативной моделью функционирования.

Еще одним из типов объектов с неопределенной моделью управления являются объекты с переменной структурой. У таких объектов либо у их рабочей среды частично меняются характеристики в результате различных процессов: деградации узлов при постоянном составе (например, появляются люфты в механических системах); накопления паразитных зарядов в электронных системах; накопления механической, электронной, физической ошибок во взаимодействии объекта и среды с системой управления; вследствие изменения состава ОУ, которое изначально не было предусмотрено, например, выхода из строя части датчиков или исполнительных устройств из-за повреждения объекта. Часть таких изменений ОУ можно компенсировать за счет коррекции алгоритмов управления, но информационная среда ЦСУ должна позволять изменять алгоритмы управления.

В сложных робототехнических комплексах при изменении условий и целей функционирования вариативность состава объекта управления и свойств его частей также требует создания ИС, позволяющей изменять алгоритмы управления без перестройки самой ИС.

Поиск нового подхода к организации унифицированной ИС цифровых систем управления велся в трех направлениях:

- ✓ фиксация определенностей в функционировании составных частей ИС цифровых систем управления;
- ✓ организация ИС, адаптивной к различным структурным решениям алгоритмов управления и не требующей жесткой настройки под конкретное алгоритмическое управление;
- ✓ поиск технологий, обеспечивающих необходимую связность элементов искомой информационной среды.

По мнению авторов, правильным подходом к построению ИС с корректируемыми алгоритмами управления является перенос всех алгоритмов управления из контуров регулирования нижнего уровня в центральный вычислитель. Возможность построения централизованной ИС для цифровых систем управления объектами и технология ее реализации пояснены далее.

3. Типовые функции информационной среды цифровых систем управления

В цифровых системах управления события взаимодействия вычислителя с периферийным окружением не случайны. Они носят упорядоченный, циклический характер. Функциональная последовательность информационных событий в ЦСУ показана на рис. 2.

Согласно рис. 2 начало цикла регулирования — измерительная фаза или фаза ввода параметров, в которой происходит фиксация состояния ОУ в датчиках, преобразование аналоговых параметров в цифровые коды — набор параметров состояния. За ней следует фаза передачи набора состояния в память центрального вычислителя. Затем наступает расчетная фаза, т. е. вычисление управляющих воздействий на ОУ. После формирования в памяти вычислителя набора параметров управления его компоненты должны быть доставлены через коммуникационную среду к исполнительным устройствам. Цикл управления заканчивает фаза отработки новых управляющих воздействий. Вышеперечисленные функции или фазы повторяются в каждом цикле управления с постоянным периодом — периодом регулирования.

Очередной цикл управления логично начинать после формирования реакции объекта управления на управляющие воздействия предыдущего цикла, поэтому имеет место

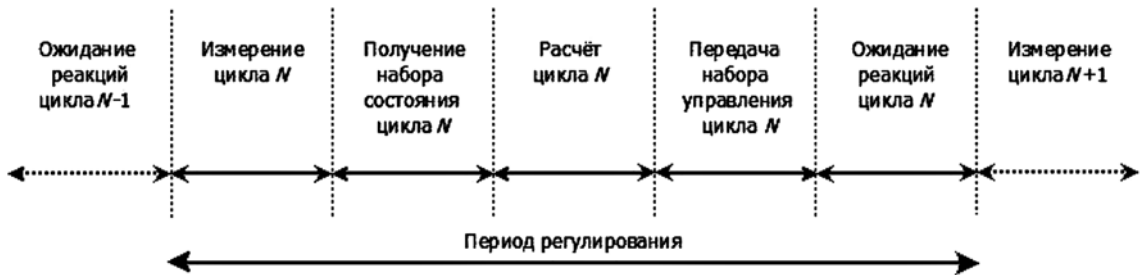


Рис. 2. Функциональная последовательность событий в цифровой системе управления

длительная пауза между окончанием выдачи уставок на исполнительные устройства и началом измерительной функции следующего цикла регулирования. Данная пауза обусловлена инерционными свойствами ОУ.

В каждом цикле управления центральный вычислитель должен осуществить опрос датчиков и доставить параметры управления в исполнительные устройства. Это означает, что набор задач ввода-вывода параметров статичен, задачи повторяются в каждом цикле регулирования и функционируют независимо от алгоритмов управления. Иными словами, режим автономной работы периферийных устройств принципиально возможен, и остается определить способ их подключения к центральному вычислителю, а также механизм синхронизации обменов параметрами между периферией и памятью вычислителя.

4. Цифровая централизованная система управления, построенная по принципу "вынесенной руки"

Как было сказано выше, функции измерения, расчета и выдачи уставок присутствуют в любой системе управления независимо от структуры вычислительной среды. Набор этих функций ЦСУ статичен и привязан к составу периферии, в то время как вычислительная функция может быть реализована как в централизованном вычислителе, так и в распределенных, локальных вычислительных ресурсах.

В распределенных системах управления функции измерения, локального управления и выдачи уставок сосредоточены в удаленном узле, реализующем функции КРНУ. В централизованной ЦСУ, на уровне удаленного узла, может и должен быть сохранен только обязательный, минимальный набор автоматных функций, реализующих ввод-вывод параметров состояния и управления. Отработка всех, возможно переменных, алгоритмов управления перекладывается на центральный вычислитель. Локальные задачи управления (задачи регулирования) теперь могут иметь сильную связность, так как все они исполняются в одном вычислителе.

Существенным изменением ИС, необходимым для реализации централизованного управления, является необходимость повышения скорости обмена информацией между периферией

и центральным вычислителем. Межмодульный интерфейс как раз и был разработан для выполнения этой задачи. Задачу синхронизации обменов параметрами между периферией и памятью вычислителя также решает межмодульный интерфейс [5]. Механизм синхронизации нацелен на достижение максимальной скорости циклических обменов параметрами.

Статичный набор простых обязательных функций уровня оконечного узла РСУ и их циклический характер позволяют свести функции оконечных узлов до автоматных, циклических процедур с чисто аппаратной реализацией в виде жесткой логики. Узлы РСУ упрощаются до автоматов, осуществляющих измерения и отработку уставок от уровня широтно-импульсной модуляции и ниже, например коммутации обмоток в бесколлекторных двигателях.

Результат исследований по определению принципа построения архитектуры универсальной информационной среды ЦСУ, представленный ниже, назван авторами концепцией, или моделью, "вынесенной руки" (рис. 3).

Идеологически концепция "вынесенной руки" основана на том, что время передачи параметров управления объектом из центрального вычислителя (ЦВ) намного меньше времени реакции ОУ на их изменение. При достаточной скорости обменов возможность управления удаленным объектом или его разнесенными составными частями в реальном времени не зависит от удаленности оконечных устройств относительно центрального вычислителя. Передача сигналов через межмодульный интерфейс занимает достаточно малое время в цикле управления, поэтому можно не обращать внимания на задержку в каналах.

Концепция, или модель, "вынесенной руки" была выбрана как принцип и обозначение способа комплексирования периферии ЦСУ к ЦВ из следующих соображений.

Наиболее простым способом обмена параметрами для задач управления, исполняемых в ЦВ, является способ прямого подключения или отображения параметров в его адресное пространство как в ячейки памяти. Такой способ применим лишь для периферии ЦСУ, расположенной рядом с ЦВ, и не пригоден для периферийных устройств, распределенных по объекту управления, а это наиболее распространенный вариант размещения элементов ЦСУ. Распределенные ПУ подключаются к ЦВ как удаленные

устройства [6], с использованием каналов связи — интерфейсов и программно-управляемых процедур взаимодействия через каналы. Суть принципа "вынесенной руки" состоит в построении технологии взаимодействия ЦВ с удаленными ПУ как с ПУ, непосредственно подключенными в его адресное пространство, причем для организации такого подключения счетный ресурс ЦВ не используется. Скорость каналов связи выбирается такой, чтобы в системе не была заметна эта "удаленность", а взаимодействие центрального вычислителя с оконечными устройствами происходило бы в режиме непосредственного управления, т. е. с прямым отображением параметров управления и состояния в память центрального вычислителя.

Элементы концепции "вынесенной руки" были использованы в модели организации обменов интерфейса CAN [7]. В нем аппаратно поддержана процедура вхождения в связь и передача данных, которая осуществляется не в виде потока байтов, а пакетом, т. е. в структурированном виде, приближенном к формату размещения данных в нескольких смежных словах адресного пространства. Как и межмодульный интерфейс, CAN эффективно использует пропускную способность линий связи, так как способ вхождения CAN-абонента в связь является бесконфликтным, и наложения сообщений от нескольких абонентов в линии связи не возникает. Оптимальный для реализации межсоединений в ЦСУ межмодульный интерфейс имеет два существенных отличия от известных стандартных интерфейсов. Он ра-

ботает в автономном активном режиме и принципиально не требует синхронизации процесса передачи данных с источником и приемником информации, что радикально упрощает управление взаимодействием ЦВ и удаленных периферийных устройств.

В цифровых системах управления, построенных по концепции "вынесенной руки", (ЦСУВР) средства ввода-вывода параметров по-прежнему размещаются в удаленных оконечных устройствах, непосредственно взаимодействующих с частями объекта управления и окружающей средой. Из-за реализации режима непосредственного подключения к ЦВ вынесенные оконечные устройства могут выполнять теперь только функции ввода-вывода параметров, а вся переменная алгоритмическая часть, связывающая параметры состояния и управления, переносится в центральный вычислитель (далее — "центр"). В ЦСУВР изменение алгоритма в любой подсистеме управления проводится только в "центре".

Из рис. 3 видно, что все вынесенные оконечные устройства примерно одинаковы по интерфейсу и сходны по исполнению. Их состав минимален и включает в себя: трансивер межмодульного интерфейса, измерительную и исполнительную подсистемы, а также блок быстросрабатывающей автономной защиты от критичных режимов. Статичность набора функций оконечных устройств и простоту их функционального состава можно рассматривать как обоснование возможности реализации их в виде универсальных микросхем для подключе-

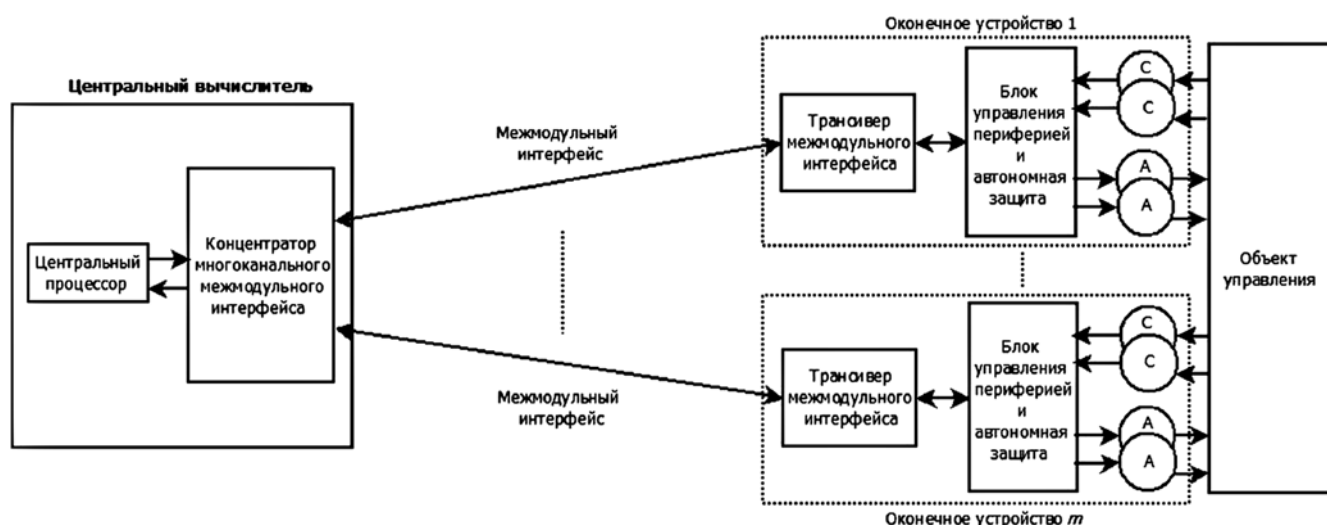


Рис. 3. Структура цифровой централизованной системы управления, построенной по принципу "вынесенной руки"

ния широкого класса периферии в ЦСУ, организованных по принципу "вынесенной руки".

В обязательный состав оконечных устройств должны быть включены блоки быстродействующей автономной защиты от критичных режимов. Реализация защиты такого типа через "центр" может оказаться невозможной из-за критичности дополнительных задержек в междуровневых связях. Поэтому функции автономной защиты реализуются непосредственно в оконечных устройствах. В качестве примера можно привести два типа защиты в бесколлекторных двигателях: от температуры и от токовой перегрузки. Температура меняется достаточно медленно, поэтому реагировать на изменение температуры можно из "центра". Вместе с тем, из-за случайного воздействия (например, блокировки подвижности исполнительных органов) ток потребления может резко возрасти до критичного значения. Реализация токовой защиты через "центр" оказывается невозможной, так как узел успеет сгореть до поступления сигнала отключения из-за задержек в канале связи. Поэтому защита от токовой перегрузки должна быть реализована локально, а состояние защиты необходимо отобразить в "центр" для принятия решения о режиме послеаварийной работы.

5. Свойства оконечных устройств в цифровых системах управления, построенных по принципу "вынесенной руки"

Как было показано выше, в информационной среде ЦСУВР простоту оконечных устройств можно довести до такой степени, что в них будут реализованы только функции нижнего уровня: измерения и обработки управляющих воздействий.

Оконечные устройства в ЦСУВР имеют следующие характеристики:

- ✓ минимальный и фиксированный набор функций нижнего уровня;
- ✓ возможность взаимодействия с "центром" через однотипный унифицированный модульный интерфейс;
- ✓ отсутствие функции управления на периферийном уровне, из-за чего не требуется перепроектировать периферийные устройства при модернизации системы;
- ✓ функциональная простота оконечных устройств, позволяющая реализовать их в виде

цифровых циклических автоматов с жесткой логикой;

- ✓ малое энергопотребление периферийных устройств, делающее возможным их питание по сигнальным линиям;
- ✓ высокая надежность работы функционально простых оконечных устройств.

Для центрального вычислителя ЦСУВР вынесенные периферийные устройства становятся управляемыми, активными и наблюдаемыми с задержками, соизмеримыми с непосредственным подключением к центральному вычислителю.

Заключение

Архитектура "вынесенной руки" разработана для построения информационной среды ЦСУ для объектов с вариативной моделью функционирования. Предложенная информационная среда ЦСУВР позволяет не только изменять алгоритмы управления, не затрагивая периферийную подсистему, но и упростить до автоматного уровня логику управления периферийными устройствами — узлами подключения к ЦСУ датчиков и исполнительных устройств. ЦВ обменивается данными с оконечными устройствами через неуправляемый, автономный, унифицированный интерфейс, на максимальной скорости, с фиксированным временем доставки данных.

Опишем архитектуру ЦСУВР в терминах ее отличия от стандартной архитектуры цифровой распределенной системы управления. Отличие состоит:

- в изменении модели организации вычислений в распределенной ЦСУ: от набора распределенных слабосвязанных вычислителей, назначенных по степеням свободы объекта, к централизованной модели, с возможной сильной связностью контуров регулирования нижнего уровня;
- в переносе всех составных частей алгоритмов управления из контуров регулирования нижнего уровня в мощный центральный вычислитель;
- в исключении из ЦВ функций управления периферийными устройствами ЦСУ;
- в упрощении оконечных устройств до уровня циклических автоматов с простым набором функций.

Список литературы

1. **Le Ba Chung, Holopov Y. A.** Information environment for neural-network adaptive control system // Springer. 09/2017. V. 736. С. 59—64.
2. **Жданов А. А.** Автономный искусственный интеллект (монография). М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2008. 358 с.
3. **Жданов А. А.** О методе автономного адаптивного управления // Нейрокомпьютеры и их применение. Материалы Международной научной молодежной школы. Таганрог: Издательство ТТИ ЮФУ. 2007. С. 20—67.
4. **Жданов А. А., Преображенский Н. Б., Холопов Ю. А., Степанян И. В., Нгуен Хыу Чунг.** Аппаратная реализация нейронной сети в адаптивной системе управления // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2016. № 6. С. 55—62.
5. **Ле Ба Чунг, Холопов Ю. А.** Асимметричный межмодульный интерфейс // Информационные технологии. 2/2018. № 2 (24). С. 138—143.
6. **Глушков В. М., Амосов Н. М., Артеменко И. А.** Энциклопедия кибернетики (в 2-х тт.). 1974. 1226 с.
7. **Та Дык Ань.** Controller area network (CAN) // PFIEV. 2006. 36 с.

Le Ba Chung, Ph. D. student, E-mail: chungbaumanvietnam@gmail.com,
Moscow Institute of Physics and Technology (State University),
Y. A. Holopov, Leader Engineer,
Lebedev Institute of Precision Mechanics and Computer Engineering

Information Environment of Digital Control Systems, Using the Concept of "Outstretched Hand" to Control Peripherals

The possibility of transformation from distributed control systems into systems with centralized control function is considered. The architecture of the digital centralized control system built on the principle of "outstretched hand" is proposed. This architecture makes it possible to simplify the structure of the terminals to the automatic level, and thus eliminate the necessity to change these devices when upgrading the system. Peripherals are now turning into cyclic automations performing simple low-level functions: measurement and implementation of control actions. For the central computer, the issued terminals become self managed, active, and observed with delays, which are commensurable with the delays of direct connection to the central computer.

Keywords: information environment of digital control systems, distributed and centralized control systems, peripherals, USO, the concept of "outstretched hand".

DOI: 10.17587/it.24.538-545

References

1. **Le Ba Chung, Holopov Y. A.** Information environment for neural-network adaptive control system, Springer, 09/2017, vol. 736, pp. 59—64.
2. **Zhdanov A. A.** *Avtonomnyy iskusstvennyy intellekt* (Autonomous artificial intelligence), Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy, 2008, 358 p. (in Russian).
3. **Zhdanov A. A.** O metode avtonomnogo adaptivnogo upravleniya (About the method of autonomous adaptive control), *Nejrokompyutery i ih primeneniye. Materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj molodezhnoj shkoly*, Taganrog, Publishing house of TTI JuFU, 2007, pp. 20—67 (in Russian).
4. **Zhdanov A. A., Preobrazhenskij N. B., Holopov Y. A., Stepanjan I. V., Nguyen Huu Trung.** Apparatsnaja realizacija nejronnoj seti v adaptivnoj sisteme upravleniya (Hardware implementation of a neural network in an adaptive control system), *Nejrokompyutery: Razrabotka, Primeneniye*, 2016, no. 6, pp. 55—62 (in Russian).
5. **Le Ba Chung, Holopov Y. A.** Asimmetrichnyj mezhmodul'nyj interfejs (Asymmetrical inter-module interface), *Informacionnye Tehnologii*, 2/2018, no. 2 (24), pp. 138—143 (in Russian).
6. **Glushkov V. M., Amosov N. M., Artemenko I. A.** *Jenciklopedija kibernetiki* (Encyclopedia of Cybernetics), 1974, 1226 p. (in Russian).
7. **Ta Duc Anh.** Controller area network (CAN), *PFIEV*, 2006, 36 p.