

**В. А. Коковин**, канд. техн. наук, доц., e-mail: kokovin@uni-protvino.ru,

**А. А. Евсиков**, канд. техн. наук, доц., e-mail: eaa@uni-protvino.ru,

**А. П. Леонов**, канд. техн. наук, доц., e-mail: anatoli.leonov@googlemail.com,

Государственный университет "Дубна", филиал "Протвино", г. Протвино, Московская область

### Особенности организации и взаимодействия функциональных сетевых компонентов в распределенных управляющих системах

*Рассматриваются особенности организации и взаимодействия устройств, названных функциональными сетевыми компонентами (ФСК). Анализируются тенденции в развитии промышленных сетевых экосистем, направленные на повышение интеллектуальных возможностей производственного оборудования. Обсуждаются возможности использования стандартизованных программных платформ для разработки управляющих приложений сетевых контроллеров распределенных технологических систем. Обоснована необходимость использования гибридных управляющих вычислителей на базе ARM контроллеров и программируемых логических интегральных схем. Предложена многоуровневая структура коммуникационной сети для взаимодействия ФСК в реальном времени, разработана и испытана модель в пакете AnyLogic 8.6.*

**Ключевые слова:** распределенные управляющие системы, функциональные сетевые компоненты, мехатронные модули, МЭК-61499, ПЛИС, AnyLogic 8.6

#### Введение

Разработка распределенных систем, управляющих технологическими процессами промышленных или научных комплексов, связана с построением модели на основе формализации входных параметров и параметров текущего состояния этих процессов. Под распределенной управляющей системой (РУС) будем понимать не только географическое распределение отдельных подсистем, но и распределение алгоритма управления, направленного на решение общей технологической задачи.

При разработке многих РУС необходимо учитывать управление быстрыми технологическими процессами, которые требуют реакции исполнительных устройств в реальном времени. Эти требования задают жесткие ограничения на время отработки входных воздействий в программно-аппаратных приложениях элементов РУС.

Другая особенность распределенных систем заключается в том, что в РУС отдельные подсистемы могут быть взаимозависимыми по ал-

горитмам. В работе [1] представлена методика определения зависимости управляющих алгоритмов через построение графов зависимостей. Алгоритмы управления подсистем могут быть зависимы по данным или по управлению. Пример взаимосвязанных технологических процессов приведен в работе [2] для задачи выравнивания поверхности (в заданной плоскости) географически распределенных технологических платформ, находящихся в неустойчивой водной среде. При разработке РУС при решении этой задачи было необходимо определить зависимость алгоритмов подсистем, что напрямую влияло на особенности организации телекоммуникационной системы как части РУС.

Еще одним примером взаимосвязанных алгоритмов управления взаимосвязанных технологических процессов могут служить алгоритмы системы управления технологических подсистем циклического ускорителя заряженных частиц. Каждый ускоритель оснащен определенными средствами таймирования, которые необходимы для обеспечения режима реально-

го времени систем управления и синхронизации технологических процессов на ускорителе. Технологические процессы отдельных подсистем являются взаимосвязанными с точки зрения решения главной задачи — получения устойчивого пучка заряженных частиц с заданными параметрами [3].

Успешно внедряемая в производство концепция *Internet of Things (IoT)* [4], названная *Industrial IoT (IIoT)*, широко применяется ведущими фирмами, такими как *Intel*, *Bosch Si*, *ABB* и другими, обеспечивая успешную интеграцию компонентов *IIoT* в промышленную автоматизацию [5]. Интеллектуальные производственные решения этих компаний используют подключенные датчики и устройства для повышения производительности машины и человека и передачи данных в облако для более глубокого анализа в режиме реального времени. Развитие *IoT* и *IIoT* дало толчок появлению нового направления, которое с помощью сетевых технологий кооперирует работу роботов или роботизированных устройств. Это направление, названное *Internet of Robotic Things (IoRT)*, нацелено на реализацию робототехнических технологий путем расширения функциональности устройств *IoT* и *IIoT*. В работе [6] представлена концепция *IoRT*, подчеркивается огромная гибкость в процессе разработки и внедрения новых приложений для сетевой робототехники при достижении цели предоставления распределенных вычислительных ресурсов в качестве основной утилиты. Промышленные сетевые экосистемы, такие как *IoRT*, представляют собой распределенные технологические системы со сложными и многоуровневыми коммуникационными сетями, участники которых могут объединяться в кластеры (подсистемы).

При анализе состава подсистем и устройств РУС (например, [2, 3, 6]) среди участников могут быть не только мехатронные компоненты с сетевыми возможностями, но и, например, самодостаточные электротехнические устройства со встроенным интеллектом, т. е. устройства, в составе которых нет узлов точной механики (что является признаком мехатронных устройств). Под самодостаточностью будем понимать способность устройств решать самостоятельно часть распределенной технологической задачи, возложенной на них. При этом необходим обмен информацией с другими участниками через формирование событий или сообщений для решения всей задачи. Условно такие устройства можно назвать функциональными сетевыми компонентами (ФСК). К данному классу устройств будем относить устройства, которые имеют возможность по-

лучать и обрабатывать информацию (имеют вычислитель с сетевыми портами), имеющие физическую природу (а не только программный ресурс) и способные воздействовать на окружающую физическую среду [7]. Последнее условие по отношению к ФСК может быть определяющим, поскольку выделяет свойства данных устройств по отношению к внешней среде их использования. Кроме того, ФСК разной "природы" (мехатронные, электротехнические и т. д.) могут по-разному воздействовать на физическую среду, что отражается в особенностях их организации как подсистем РУС.

Целью данной работы является формулирование требований по организации аппаратно-программного обеспечения ФСК как участников РУС, предложение и обоснование решений по конфигурации коммуникационной сети для взаимодействия отдельных ФСК, моделирование коммуникационной сети с заданными критериями эффективности для определения предельных возможностей ее как масштабируемой системы.

## 1. Анализ работ по данной тематике

Анализ работ по аппаратно-программному обеспечению участников РУС показал большое разнообразие аппаратных и программных платформ в рамках одной системы. Это разнообразие обусловлено задачами (функциями) участников РУС и, как было сказано выше, разной природой ФСК, что создает дополнительные трудности при разработке РУС. В работах по данной тематике авторы предлагают унификацию требований, выделяя сетевые компоненты как основу для взаимодействия в рамках РУС.

Например, в работе [8] рассмотрены основные требования к мехатронным компонентам (МК) как к объектам распределенных технологических систем (РТС). В настоящее время мехатронные устройства и мехатронные системы все чаще используются как объекты автоматизации РТС. Наиболее широко мехатронные системы используются в тех отраслях, где требуется точное позиционирование исполнительных механизмов, быстрая реакция вычислителей на внешние и внутренние события, повышенная надежность и ограниченные массогабаритные параметры этих устройств. По мнению авторов работы [8], мехатронные компоненты должны иметь:

- коммуникационные интерфейсы сигналов (событий) и данных для взаимодействия с другими МК;

- интерфейсы ввода-вывода параметров управляемого процесса;
- набор данных и память для хранения информации о состоянии объекта;
- вычислительные ресурсы для реализации алгоритма управления этим объектом.

В недавнем прошлом такие характеристики могли себе "позволить" средние по производительности электронно-вычислительные машины, а не вычислители отдельных мехатронных компонентов. Но сегодня для создания производительных решений и этого уже недостаточно. Необходимы аппаратные возможности для формирования видеопотоков с помощью видеокамер и анализа этих видеопотоков на платформе нейросетевых ускорителей.

В работе [9] дано понятие интеллектуального мехатронного компонента (*Intelligent Mechatronic Component, IMC*) и сформулированы условия использования таких компонентов в РТС, разработанной на основании стандарта IEC 61499 [10]. Любой *IMC* может

- являться мехатронным устройством, т. е. представлять физическое функциональное устройство с датчиками, исполнительными механизмами и электронными схемами;
- содержать встроенное устройство управления, представляющее собой вычислительное устройство, имеющее в своем составе интерфейсы к датчикам, исполнительным приводам и коммуникационным сетям, для взаимодействия с другими *IMC*;
- иметь программное обеспечение с поддержкой данных и логики управления для реализации функций автоматизации стандарта IEC 61499.

Особенностью организации взаимодействия отдельных *IMC* является использование событийного интерфейса, через который осуществляются вызовы на исполнение определенного кода. Интерфейс события хорошо подходит для моделирования межпроцессного обмена сообщениями и хорошо формализуем. Вместе с тем данная форма организации может вызвать недетерминированность управляющей системы.

В работе [11] обсуждается концепция *IoRT*, возможности использования стандартных сетевых протоколов и разнообразных технологий, включая облачные технологии и искусственный интеллект. Обсуждается архитектура участников промышленной сетевой экосистемы, которая играет важную роль в разработке многоцелевых роботизированных систем для *IoRT*.

Организация распределенных систем управления коллективами роботов обсуждается в работе [12]. Подчеркивается, что распределенное управление уменьшает коммуникационный

трафик между отдельными роботами и центральным вычислителем (центральным командным пунктом [12]), но делает необходимой большую интеллектуализацию каждого робота. Это требует повышения вычислительной мощности управляющей системы робота для выполнения поставленных задач.

Любой ФСК может быть не только законченной подсистемой, как, например, система синхронизации быстрого вывода (ССБВ) пучка распределенного комплекса ускорителей Института физики высоких энергий, но и отдельными элементами этих подсистем [3]. В этом случае в установке ССБВ сетевое взаимодействие с другими подсистемами ускорительного комплекса осуществляется через общую таймерную систему [13], через которую транслируются кодированные таймерные сообщения и события. При разработке ССБВ как элемента технологической подсистемы не было ограничений по потребляемой энергии и конструктивным решениям, но были жесткие требования по точности "привязки" момента вывода к заданному уровню поля (энергии пучка) на участке ускорения. Для повышения точности синхронизации быстрого вывода, а главное детерминированности управляющих сигналов аппаратные решения ССБВ были в основном реализованы на базе цифровых матриц — программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). В приведенной работе ключевым требованием к ФСК является точность временной привязки и детерминированность управляющих сигналов.

Другие варианты реализации ФСК — это ФСК как отдельные элементы компактных технологических подсистем. В работе [14] проанализирована возможность повышения интеллектуализации отдельных подсистем промышленного робота, в частности руки робота-манипулятора, которая может взаимодействовать как устройство *IoRT* с другими участниками через облачные технологии. Создание таких ФСК ставит перед разработчиками задачи выбора архитектуры и алгоритмов встроенных приложений в условиях ограниченных ресурсов.

Разработчик при ограниченности ресурсов данного типа ФСК сталкивается с проблемами выбора между многими критериями и оптимизации решений. Поскольку сетевые взаимодействия ФСК определяют режим реального времени РУС, то можно выделить следующие критерии для оптимизации обработки данных, сжатия и передачи результата по сети во встраиваемых системах, реализованных на контроллерах и ПЛИС:

- быстроедействие как функция сложности реализации алгоритма обработки данных;

- минимизация потребления энергии при обработке данных как функция быстродействия;
- минимизация потребления энергии как функция использованного объема ПЛИС;
- эффективная загрузка сетевого контроллера (критерий работы без простоев);
- степень сжатия данных как функция времени.

В задачах многокритериального выбора не всегда необходимо найти максимальное или минимальное значение функции. В некоторых случаях необходимо усреднить значение некоторого параметра, т.е. определить компромиссное решение. Интеллектуализация отдельных ФСК и всей системы управления позволяет использовать не формализованную модель управления, а модель, основанную на получении информации о реальном внешнем мире через датчики и систему, которая обладает способностью адаптироваться к внешним изменениям.

## 2. Программно-аппаратная организация ФСК как участника сетевых промышленных экосистем

ФСК как часть промышленной сетевой экосистемы должны отвечать определенным программно-аппаратным и коммуникационным требованиям. Анализ работ по выбранной тематике показывает, что основные тенденции по организации ФСК сводятся к унификации управляющих и коммуникационных подсистем, повышению вычислительной мощности каждого компонента и наличию на борту как проводных, так и беспроводных коммуникационных средств. Важным фактором вычислителей ФСК как участника распределенного процесса является обеспечение детерминированности передаваемых сообщений и событий [7].

### Организация программного обеспечения ФСК

Важной задачей при создании и эксплуатации ФСК как части РТС является разработка программных управляющих приложений. Наиболее оптимальным решением по созданию программного обеспечения (ПО) промышленных систем становится использование общепринятых промышленных стандартов. До недавнего времени большинство разработок ПО базировалось на языках и спецификациях международного стандарта *International Electrotechnical Commission (IEC) IEC 61131-3* [15]. Принятие данного стандарта позволило унифицировать языки разработки управляющих приложений для программируемых логических контроллеров (ПЛК), что дало возмож-

ность портировать разработанные проекты на ПЛК различных производителей. Стандарт *IEC 61131-3* определяет централизованную модель управления и имеет существенные недостатки. Например, при добавлении в управляющую систему нового контроллера или при изменении алгоритма взаимодействия используемых контроллеров необходимо заново изменять программу центрального вычислителя. Кроме того, масштабирование и реконфигурирование такой системы требует сложных процедур и времени, а ФСК РТС не могут взаимодействовать между собой.

В 2005 г. *IEC* был принят новый стандарт *IEC 61499* [10], который определяет способ построения систем управления распределенными технологическими процессами. Архитектура *IEC 61499* строится на основе определений языка *Function Block Diagram (FBD) IEC 61131-3*, что позволяет выстраивать преемственность разрабатываемых программных приложений. В основе архитектуры *FBD* лежит *Function Block (FB)* с расширенными интерфейсными возможностями. Одно из основных расширений *FB* — событийный интерфейс, который позволяет явно определить последовательности выполнения *FB*. Каждый *FB* может содержать несколько инкапсулированных алгоритмов, к которым нет прямого доступа со стороны других *FB*.

Система управления, разработанная на основании стандарта *IEC 61499*, представляет собой набор устройств, взаимодействующих между собой посредством коммуникационной сети. Система управления реализует функции, описываемые с помощью приложений (*applications*). Эти приложения могут распределяться среди нескольких устройств (*devices*), в качестве которых могут использоваться ПЛК, программируемые контроллеры автоматизации и цифровые вычислители на платформе ПЛИС (*FPGA — Field-Programmable Gate Array*) [16]. Каждое устройство состоит из одного или нескольких ресурсов. Ресурс — это функциональная единица, которая имеет независимое управление своими операциями, включая выполнение алгоритмов. Приложение является программной функциональной единицей, предназначенной для решения определенной задачи в системе управления. Приложение представляется в виде сети связанных между собой *FB*, которые могут выполняться на различных ресурсах и устройствах системы управления (рис. 1). Для поддержки системы *IEC 61499* разработаны различные программные платформы. Наиболее известный коммерческий проект *ISaGRAF* [17] в виде средства поддержки проектирования (*workbench*)

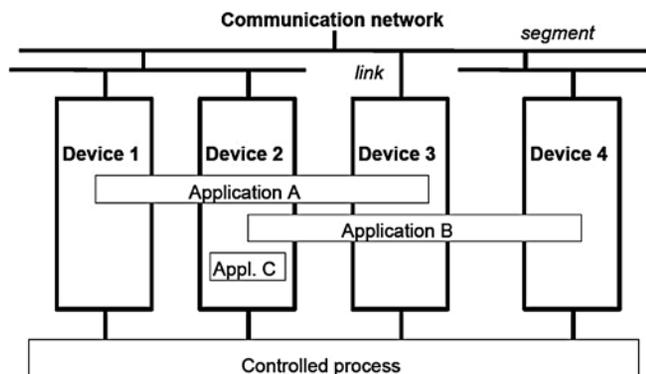


Рис. 1. Модель организации приложений и взаимодействие устройств системы IEC 61499 [10]

работает как со стандартом IEC 61131-3, так и с IEC 61499.

Проект системы *nxtSTUDIO* [18] ориентирован исключительно на IEC 61499 и позволяет совместить распределенную систему управления с HMI/SCADA. Кроме того, *nxtSTUDIO* дает возможность автоматизировать процесс построения каналов связи между контроллерами мехатронных устройств распределенной системы.

Программные платформы на базе стандарта IEC 61499, используемые для разработки проектов распределенных приложений, отвечают большинству требований, сформулированных выше для ФСК. Для управления технологическими процессами, где требуется быстрая реакция и строгая детерминированность управляющих сигналов, требуются дополнительные решения. Одним из таких решений может быть использование гибридных вычислителей на разных аппаратных платформах.

### Аппаратные решения по организации ФСК

Аппаратные вычислительные решения ФСК зависят в первую очередь от функциональной задачи, решаемой данными устройствами. Но независимо от функциональной задачи в аппаратной архитектуре каждого ФСК есть вычислительное ядро с достаточно общими для всех ФСК вычислительными и коммуникационными требованиями. Анализ статей по данной тематике показал, что большой популярностью пользуются 32- или 64-разрядные контроллеры на основе ARM-ядер [19]. Например, на интернет-ресурсе [20] приведен список ПЛК отечественной разработки (начало 2020 года), которые поддерживаются *ISaGRAF* платформой (5 и 6 версия *ISaGRAF*). Из 30 ПЛК, представленных в списке, более половины реализованы на ARM-контроллерах. Популярность ARM-контроллеров объясняется разнообразием

архитектуры, малым потреблением энергии (что во многих решениях достаточно критично), большим быстродействием и поддержкой программных платформ.

Рассмотрим в качестве примера организацию архитектуры ФСК, приведенную в работе [21]. В данной статье рассмотрено создание прототипа интеллектуального силового преобразователя (ИСП) с возможностью удаленного управления и сетевого взаимодействия с другими устройствами распределенной технологической системы. В различных отраслях производства ответственное место занимают силовые преобразователи, которые используются в составе управляющих приводов систем позиционирования, в формирователях мощных гармонических сигналов для ультразвуковых систем очистки поверхности изделий различного назначения [22, 23] и во многих других приложениях. Рассмотрим основные требования к аппаратным возможностям ИСП при использовании его в приложениях, отвечающих требованиям функционального сетевого устройства. Силовой преобразователь должен иметь следующие возможности:

- 1) с помощью встроенных датчиков воспринимать изменения внешней среды и компенсировать управляющими воздействиями эти изменения для поддержания заданных параметров;
- 2) самостоятельно принимать решения с учетом условий безопасности и заложенных в интеллект вычислителей ИСП правил;
- 3) взаимодействовать с другими устройствами системы РУС;
- 4) иметь возможность удаленной системной (например, отвечающей требованиям IEC 61499) конфигурации (желательно "на лету") или выполнять реконфигурацию на локальном уровне.

Силовая часть ФСК с функцией силового преобразователя (ИСП) построена на базе запатентованной технологии с двумя взаимосвязанными резонансными контурами [24], которая позволяет формировать инфранизкий гармонический сигнал большой мощности. В работах [25, 26] выполнено компьютерное моделирование процессов в силовых цепях ИСП и разработана методика настройки. В результате моделирования ИСП было получено семейство параметрических кривых выходного напряжения на нагрузке генератора с выходным колебательным контуром. Эти кривые позволили оценить быстродействие переключения параметров работы ИСП при удаленном управлении. В динамической системе моделирования *VisSim* [27] проведены исследования электропривода, работающего в связке с ИСП в различных режимах.

При разработке прототипа ИСП была поставлена задача создания конфигурируемой

платформы с универсальным вычислительным ядром, где в качестве силового преобразователя мог бы выступать, например, мощный генератор амплитудно-модулированных гармонических сигналов с регулируемыми выходными параметрами или стабилизированный блок питания. Кроме того, возможен вариант исполнения ИСП с несколькими силовыми преобразователями различного функционального назначения и одним блоком управления. Управление процессами несколькими силовыми преобразователями в реальном времени требует быстрой реакции вычислителя. В этом случае целесообразно контуры управления ИСП реализовать на ПЛИС.

Выбор управляющего контроллера осуществлялся исходя из требований пониженного энергопотребления (хотя в случае с ИСП это не является определяющим требованием), расширенных функциональных возможностей, наличия сетевых портов и достаточного быстродействия. Как было сказано выше, таким требованиям отвечают контроллеры с *ARM*-ядрами. Важным аргументом при выборе контроллера для ИСП являлась поддержка его средствами *open source (hardware и software)*. *ARM*-контроллер выбирался в составе платы прототипирования отвечающей следующим требованиям:

- 1) наличие на борту *LAN* с быстродействием  $\geq 100$  Мбит/с;
- 2) наличие беспроводной сети *WiFi* с двумя диапазонами: 2,4/5 ГГц, 802.11n;
- 3) наличие дополнительной шины ввода/вывода данных для подключения периферийных устройств (например, дисплея с сенсорным экраном);
- 4) возможность работать с различными операционными системами.

Указанным требованиям отвечают многие платы прототипирования [28]. В качестве контроллера для прототипа ИСП был выбран *Raspberry Pi 3* и *Raspberry Pi 4* [29] (для усовершенствованной версии ИСП). Дополнительным аргументом для выбора этих устройств послужила возможность работать не только под различными версиями операционной системы *Linux*, но и *Windows 10 IoT Core* [30].

Взаимодействие устройств распределенной промышленной сети необходимо для координации их работы, включая синхронизацию при реализации распределенного алгоритма. Применение *LAN* с протоколами стека *TCP/IP* и со случайным доступом к сети для целей взаимодействия не всегда оправдано, поскольку *LAN*, как правило, используется для системных целей: загрузка конфигураций, реализация облачных технологий и т. д. В условиях сильных электромагнитных помех от технологического

оборудования и внешних возмущений использование беспроводных технологий для решения этих задач затруднительно. Поэтому необходима дополнительная быстрая локальная связь на уровне платы управления, которая не занимала бы ресурсы микроконтроллера. Для разделения системной коммуникации ФСК (конфигурация, задание параметров в реальном времени) и формирования обмена данными для решения задачи управления в работе [21] предложена структура гибридного вычислителя: для решения первой задачи использован контроллер с *ARM*-ядрами, а для второй — ПЛИС. Структура ПЛИС позволяет сформировать большое число параллельно работающих коммуникационных линков как для формирования детерминированной локальной сети, так и для связи с датчиками по стандарту *IEC 61131-9:2013 (IO-Link)* [31].

Хорошей альтернативой сетевого интерфейса *Ethernet* на небольших расстояниях может быть интерфейс стандарта *IEEE-1355* [32]. Стандарт *IEEE 1355* является стандартом передачи данных для гетерогенного межсоединения. Эта сеть надежно отправляет пакеты данных переменной длины с большим быстродействием без предварительного согласования скорости. На рис. 2 представлена структура гибридного вычислителя ИСП с двумя портами коммуникационных дуплексных *DS*-линков.

Микроконтроллер реализован на основе 64-битного четырехъядерного процессора *ARM Cortex-A53* с частотой 1,4 ГГц. Микроконтроллер оснащен 1 Гбайт оперативной памяти, что позволяет успешно использовать в качестве операционной системы различные клоны *Linux*. Программа взаимодействия микроконтроллера и *Field-Programmable Gate Array (FPGA)* через шину ввода/вывода написана на языке *Python 3.0*.

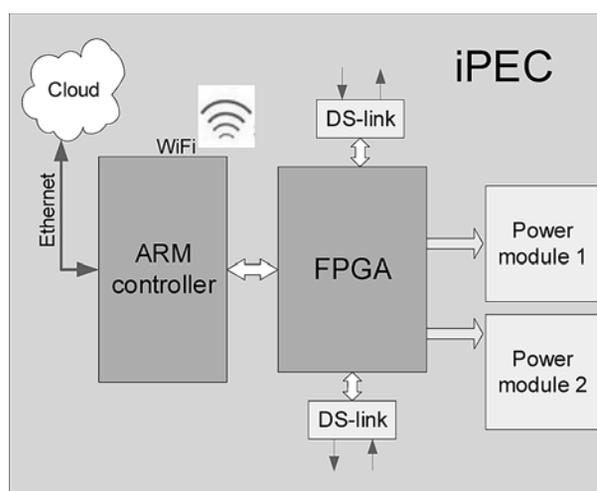


Рис. 2. Структура гибридного вычислителя ИСП с быстрой локальной магистралью [21]

Плата управления реализована на *FPGA Cyclone III EP3C16E144C8N* фирмы *ALTERA (INTEL)*. В улучшенной версии ИСП используется плата *EK-10CL025U256* на базе *FPGA* семейства *Cyclone 10* фирмы *INTEL* с *Gigabit Ethernet*-портом.

Разработка проекта для *FPGA* и моделирование протокола взаимодействия двух ИСП выполнено в пакете *Quartus Prime Lite Edition* [33]. Формировалось 64-разрядное сообщение и через *DS*-линк отправлялось другому ИСП. Транспортная задержка передачи на расстояние 30 м по витой паре категории 5e (с номинальной скоростью распространения сигнала 66 % от скорости света в вакууме) принималась минимальной и составляла порядка 10 мкс. Время работы автомата (с тактовой частотой 100 МГц) по кодированию и отправке 64-разрядного сообщения в первом ИСП составило 820 нс, а время приема и декодирования во втором ИСП — 910 нс. Общее время передачи сообщения составило порядка 12 мкс.

### 3. Выбор конфигурации сети и организация обмена функциональных сетевых компонентов

Выбор типа и числа коммуникационных сетей в РУС определяется многими факторами: решаемой технологической задачей, выбранной конфигурацией сети, степенью географической распределенности взаимодействующих подсистем и так далее. Выше было сказано, что обеспечить детерминированность передачи событий и сообщений (которые составляют основу распределенного управления) по сетям со случайным доступом невозможно с приемлемым джиттером. Например, в цитируемых выше работах [3, 13] описана общая таймерная система, предназначенная для передачи таймерных сообщений и событий по распределенным подсистемам ускорительного комплекса У-70 с ограничением джиттера, не превышающим 5 мкс. Данные требования исключают использование сети *LAN*.

В работе [34] обосновывается круговая конфигурация сети, состоящая из последовательно соединенных сетевых контроллеров (СК), реализованных на ПЛИС. Последовательная сеть формируется с помощью одного дуплексного *DS*-линка (сигналы данных и синхронизации). Сообщения передаются последовательно от одного СК к другому с помощью *DS*-интерфейса и могут иметь широ-

ковещательный статус, либо содержать адрес конкретного СК. Для контроля прохождения сообщений последний СК соединен с первым. Преимущества кольцевой последовательной сети заключаются в следующем:

- *DS*-линк каждого СК является сетевым повторителем-усилителем, что позволяет поддерживать высокую скорость с большим числом сетевых контроллеров ФСК;
- возможен контроль переданного сообщения по достоверности и времени передачи при возврате после прохождения всей сети;
- время передачи событий строго детерминировано.

На рис. 3 представлена структура распределенной технологической системы с двумя коммуникационными сетями — *LAN (TCP/IP)* и дополнительной локальной (*DS*-линки). Каждое ФСК-устройство может представлять собой определенную функциональную технологическую единицу. Это может быть мехатронный модуль, отдельные узлы роботизированной системы или силовой преобразователь. Устройства ФСК2, ФСК2.1, ФСК2.2, ФСК2.3 и ФСК4, ФСК4.1, ФСК4.2 объединены в кластеры с однонаправленной передачей данных внутри кластера. Устройства ФСК1, ФСК1.1, ФСК1.2 имеют дуплексную организацию передачи событий и сообщений с помощью *DS*-линков. Хотя бы одно ФСК-устройство из каждого кластера имеет доступ к сети *LAN* для выполнения задач, требующих доступа к общим базам данных: для реконфигурации, передачи измеренных параметров технологического процесса или видеоданных и другого информационного обмена. На рис. 3 это "головные" устройства ФСК1, ФСК2, ФСК3 и

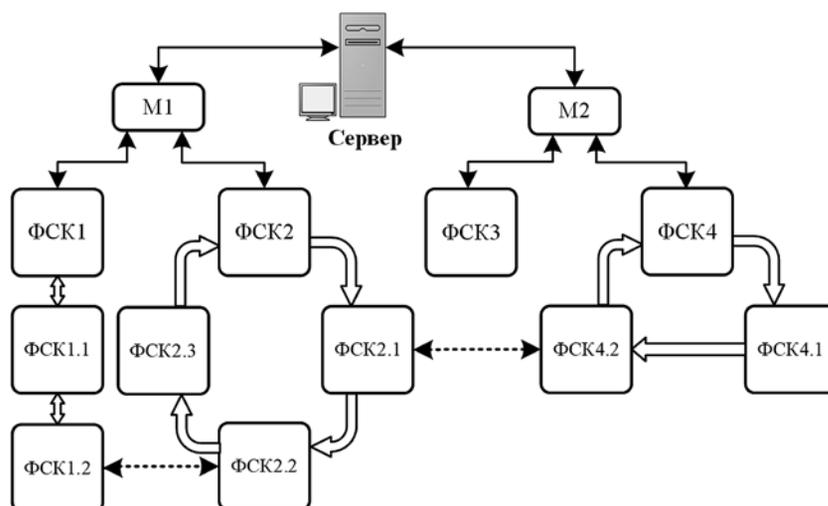


Рис. 3. Структурная схема организации коммуникационной сети для взаимодействия ФСК

ФСК4, подключенные к маршрутизаторам М1 и М2. Информационный обмен любого ФСК с сервером идет через эти "головные" ФСК. На рис. 3 штриховыми линиями показаны дополнительные коммуникационные связи между ФСК разных кластеров. Эти связи могут образовывать третий уровень сетевого взаимодействия. На рис. 3 не показан четвертый сетевой уровень, который обеспечивает ФСК информацией от датчиков (*IO-Link*) технологического процесса.

Для проверки эффективности предложенных решений была построена модель коммуникационной сети, включающей три ФСК: ФСК4, ФСК4.1 и ФСК4.2

#### 4. Разработка и испытания модели конфигурационной сети в пакете *Anylogic 8.6*

Коммуникационную сеть как разновидность сетевой системы можно отнести, с точки зрения построения модели, к системе массового обслуживания. Это позволяет в качестве модели выбрать имитационный способ, который имеет ряд преимуществ над аналитическим способом моделирования [35]. В нашем случае важно то, что имитационная модель будет полностью отображать структуру коммуникационной сети и давать возможность исследовать поведение во времени. Для построения модели использован программный пакет *AnyLogic 8.6* [36].

Для большей достоверности создаваемой модели за основу возьмем исходные данные и требования, предъявляемые к общей таймерной системе (ОТС) ускорительного комплекса, описанной в работе [13]. Авторы принимали активное участие в создании ОТС, и многие решения предложенной конфигурационной сети были отработаны при разработке ОТС [37].

В процессе опытной эксплуатации одного из сегментов ОТС на ускорительном комплексе были получены экспериментальные данные распределения входных таймерных сообщений, поступающих на узлы ОТС. Анализ интервалов времени между сообщениями показал, что поток сообщений обладает тремя признаками простейшего или стационарного потока с пуассоновским распределением (т. е. поток стационарен, ординарен и без последствия) [35]. Таким образом, для построения модели в качестве входного потока возьмем поток с экспоненциальным распределением. Для упрощения вычисления суммарной интенсивности потоков сделаем допущение, что все входные потоки представляют собой стационарные потоки с пуассоновским распределением. Это

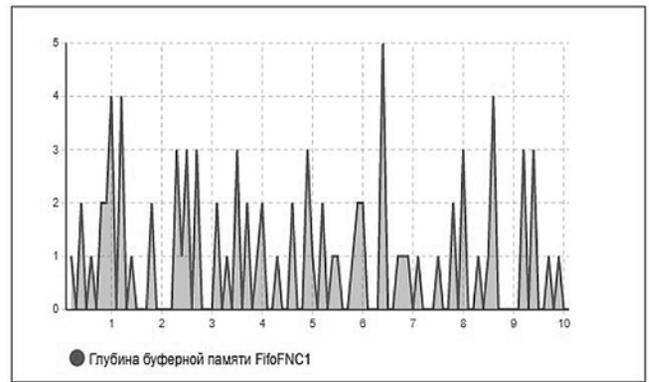
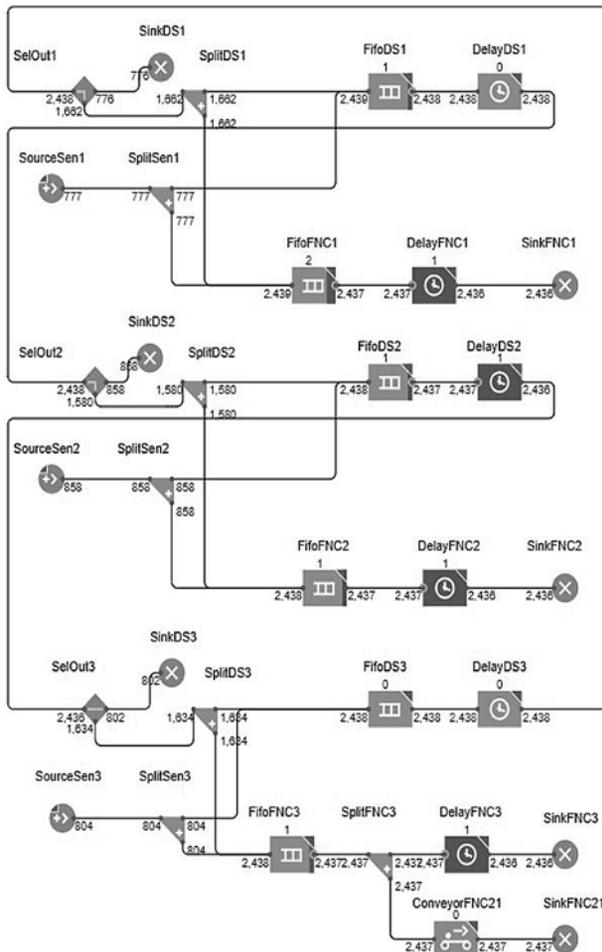
позволяет найти суперпозицию всех входных потоков методом простого сложения.

Определим структуру модели. Структура модели должна максимально соответствовать реальной структуре коммутационной сети. В предложенной конфигурации сети на рис. 3 ФСК объединены в три кластера. Наибольший интерес для построения модели представляют кластеры с круговой организацией сети, поскольку кластер с дуплексным обменом имеет удвоенное сетевое аппаратное обеспечение и, соответственно, большую производительность сетевого трафика.

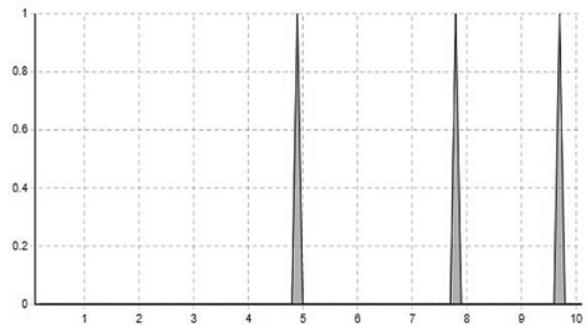
Возьмем за основу структуры модели кластер, состоящий из трех ФСК: ФСК4, ФСК4.1 и ФСК4.2. ФСК в этом кластере взаимодействуют через однонаправленную *DS*-сеть, передавая сообщения друг другу по кольцу. Источниками сообщений в каждом ФСК являются потоки от датчиков и от соседнего ФСК. Сообщения, передаваемые по круговой *DS*-сети, имеют наивысший приоритет прохождения, а сообщения, поступающие в ФСК от "своих" датчиков, обрабатываются в первую очередь.

Будем считать, что во всех ФСК моделируемого кластера набор функциональных блоков одинаков. В модели ФСК4.2 добавлен блок конвейера, через который передаются сообщения в ФСК2.1 с определенным тактом, что может быть использовано для синхронизации работы различных кластеров ФСК. Сообщения по *LAN* принимаются все время, а передаются в отсутствие выполняемого алгоритма (для реконфигурации, передачи измеренных параметров технологического процесса или видеоданных). Линия связи с другим кластером может иметь дуплексную связь, но основное ее назначение — синхронизация, поэтому будем считать, что моделируемый кластер является мастером для остальных. В модели не учитываются сообщения, поступающие из *LAN* и других кластеров. Ниже представлены блоки программы *AnyLogic 8.6*, использованные для построения модели (рис. 4).

- *SourceSenN* — источник сообщений от датчиков (где  $N = 1$  — для ФСК4,  $N = 2$  — для ФСК4.1 и  $N = 3$  — для ФСК4.2) с экспоненциальным распределением интервалов поступающих событий;
- *SinkDSN* — уничтожает "свои" сообщения, вернувшиеся по *DS*-сети;
- *SinkFNCN* — уничтожает все сообщения после обработки, поступившие в данный ФСК;
- *SinkFNC2I* — имитирует прием сообщений ФСК2.1 от текущего кластера;
- *SplitDSN* — создает копии сообщений, поступающие в ФСК из *DS*-сети (вся опера-



● Глубина буферной памяти FifoFNC1



● Глубина буферной памяти FifoDS1

Рис. 4. Структурная схема модели кластера с круговой организацией сети (слева), график  $K(t)$  (в блоках  $FifoDS1$  и  $FifoFNC1$ ) при предельной пропускной способности

ция копирования выполняется в течение нулевого времени);

- $SplitSenN$  — создает копии сообщений, поступающие в ФСК от датчиков;
- $SplitFNC3$  — создает копии сообщений, поступающие в ФСК4.2, для передачи в ФСК2.1;
- $SelOutDSN$  — принимает сообщения из DS-сети, а затем сортирует в зависимости от заданного условия ("свои" — уничтожить, "чужие" — пропустить);
- $FifoDSN$  — моделирует накопитель типа FIFO для сообщений, поступающих из DS-сети и от датчиков данного ФСК (с приоритетом от DS-сети);
- $FifoFNCN$  — моделирует накопитель типа FIFO для сообщений, поступающих от датчиков данного ФСК и из DS-сети (с приоритетом от датчиков);
- $DelayDSN$  — транспортная задержка (фиксированное время) для передачи по DS-сети, одинаковая для всех ФСК кластера;

- $DelayFNCN$  — задержка для обработки сообщений данного ФСК (из DS-сети и от датчиков ФСК);
  - $ConveyorFNC21$  — блок, передающий сообщения в ФСК2.1 с определенным тактом.
- Параметры моделирования при выполнении экспериментов:
- случайное начальное число сообщений на информационных входах каждого ФСК при каждом прогоне (уникальные эксперименты);
  - время моделирования в каждом эксперименте 10 модельных единиц;
  - интенсивность поступления (по умолчанию) сообщений от  $SourceSenN$  при экспоненциальном распределении интервалов соответствует интенсивности сообщений ОТС и равна 1,6 С/е.м.в. (сообщений за единицу модельного времени). Суммарное число сообщений — 48 (за 10 е.м.в.);
  - число прогонов в каждом эксперименте — 10;
  - число ФСК по умолчанию — 3 (правый кластер ФСК на рис. 3).

Время доставки любого сообщения можно выразить как

$$T_{NET} = (P-1) \cdot DelayDSN + DelayFNCN, \quad (1)$$

где  $P$  — число ФСК, а  $DelayFNCN = KT_{PROC}$  ( $T_{PROC}$  — процессное, фиксированное время обработки сообщений, определяемое только аппаратными возможностями вычислителя ФСК). Исходя из требований к ОТС со стороны технологического оборудования ускорительного комплекса и физической пропускной способности магистралей общее время доставки  $T_{NET}$  не должно превышать времени, соответствующего обработке 8 сообщений, а  $T_{PROC}/DelayDSN = 3$ . Последнее соотношение определяется скоростью коммуникационной сети и производительностью обработки сообщений. Это соотношение может меняться при изменении сетевых возможностей, разных аппаратных платформах вычислителей, моделях и алгоритмах обработки сообщений. С учетом перечисленных требований глубина емкости буферной памяти  $K$  (*FifoFNCN*) не должна превышать 8 ( $K \leq 8$ ). При увеличении  $K$  уменьшается вероятность потерь, но увеличивается время от возникновения сообщения до обработки в  $N$ -м ФСК, что снижает достоверность сообщений.

Сделаем подстановку в соотношение (1) с учетом требований и соотношений, представленных выше:

$$T_{NET} = (P - 1)(T_{PROC}/3) + KT_{PROC} \leq 8T_{PROC}. \quad (2)$$

**Выполнение соотношения (2) при прогонах модели определяет эффективность работы коммуникационной сети с заданными критериями.** Упростив выражение (2), получим

$$P + 3K \leq 25 \quad (P, K > 0). \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что при  $P = 3$  глубина памяти *FifoFNCN* не должна превышать 7 ( $K \leq 7$ ), а при  $P = 10$ , глубина памяти *FifoFNCN* не должна превышать 5 ( $K \leq 5$ )

Результаты экспериментов на модели представлены в таблице, где указаны максимальные значения глубины заполнения буферной памяти при экспериментах со следующими условиями ( $a/b/c$ ):  $a$  — интенсивность по умолчанию,  $P = 3$ ;  $b$  — суммарное число сообщений, обработанное в каждом ФСК за 10 е.м.в.  $\leq 2400$ ,  $P = 3$ ;  $c$  — интенсивность по умолчанию,  $P = 10$ .

На основании анализа результатов моделирования можно сделать следующие выводы: прогоны модели конфигурационной сети соответствуют показателям эффективной работы как при существенном превышении значений интенсивности сообщений, заданной по умолчанию, так и при изменении конфигурации сети, т. е. увеличении числа ФСК до 10 ( $P = 10$ ). Преимущества предложенной конфигурации сети (например, по сравнению с ОТС [13]) заключаются еще и в том, что предложенные линейные связи между отдельными кластерами ФСК позволяют синхронизировать работу подсистем и с меньшими задержками доставлять сообщения. Разработанную модель можно использовать и при моделировании полnodуплексного линейного кластера, преобразовав его в кольцевой.

## Заключение

Решение задачи взаимодействия ФСК в рамках распределенной системы управления требует анализа характера технологических процессов, анализа зависимости алгоритмов ФСК по данным или управлению и т. д. Этот анализ позволяет выявить особенности организации ФСК с точки зрения управляющих и коммуникационных требований для решения поставленной задачи. В статье проанализированы тенденции

### Результаты прогона модели

| Буферная память | $K_m$ — глубина буферной памяти, $m$ — номер прогона модели ( $m = 1, 2, \dots, 10$ ) |       |       |       |       |       |       |       |       |          |
|-----------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
|                 | $K_1$   | $K_2$ | $K_3$ | $K_4$ | $K_5$ | $K_6$ | $K_7$ | $K_8$ | $K_9$ | $K_{10}$ |
| <i>FifoDS1</i>  | 1/1/1   | 1/1/2 | 1/1/1 | 1/1/1 | 1/1/1 | 1/1/1 | 1/1/1 | 1/1/1 | 1/1/1 | 1/1/1    |
| <i>FifoFNC1</i> | 1/4/3   | 1/4/3 | 1/5/4 | 1/4/3 | 1/4/2 | 1/4/3 | 1/4/3 | 1/5/4 | 1/4/3 | 1/4/3    |
| <i>FifoDS2</i>  | 1/1/1   | 1/1/1 | 1/1/1 | 1/2/1 | 1/1/1 | 1/1/1 | 1/1/1 | 1/1/1 | 1/1/1 | 1/1/1    |
| <i>FifoFNC2</i> | 1/4/4   | 1/5/4 | 1/4/3 | 1/5/4 | 1/5/4 | 1/4/3 | 1/5/4 | 1/4/4 | 1/4/3 | 1/5/3    |
| <i>FifoDS3</i>  | 1/1/1   | 1/1/1 | 1/1/1 | 1/1/1 | 1/1/1 | 1/1/2 | 1/1/1 | 1/1/1 | 1/1/1 | 1/1/1    |
| <i>FifoFNC3</i> | 1/4/3   | 1/5/3 | 1/5/4 | 1/4/5 | 1/4/3 | 1/4/4 | 1/5/4 | 1/4/3 | 1/4/3 | 1/4/4    |

развития промышленных сетевых экосистем, программно-аппаратный инструментарий реализации участников сетевых объединений. В частности, рассмотренные возможности программной платформы на базе стандарта IEC 61499 для разработки управляющих программ ФСК отвечают требованиям, предъявляемым к сетевым компонентам. Возможную недетерминированность взаимодействия (как отмечено в работе [9]) предложено компенсировать путем использования ПЛИС в составе контроллеров ФСК при создании дополнительных быстрых коммуникационных линков для реализации детерминированных сетевых приложений. Предложенная дополнительная вычислительная платформа на базе ПЛИС вместе с ARM-контроллером образует гибридный вычислитель в составе ФСК, который позволяет управлять быстрыми технологическими процессами.

Предложена и обоснована многоуровневая конфигурация промышленной сети с объединением отдельных ФСК в кластеры. Данная конфигурация позволяет гибко совмещать загрузочные и коммуникационные задачи ФСК, при необходимости выполняя обмен информацией между кластерами. Разработанная модель в программном пакете *AnyLogic* 8.6 показала эффективность предложенной конфигурации. Результаты экспериментов позволили сделать вывод, что увеличение интенсивности сообщений в большей степени влияет на эффективность работы, чем увеличение числа ФСК.

Развитие данной тематики предполагается по следующим направлениям: улучшение характеристик ФСК по вычислительным и коммуникационным возможностям. Разработка алгоритма оптимизации пути передачи сообщений между кластерами, с анализом времени ожидания занятых *DS*-линков.

#### Список литературы

1. Дубинин В. Н., Вяткин В. В., Дроздов Д. Н. Опережающие вычисления в системах функциональных блоков IEC 61499 // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. "Современные информационные технологии". Пенза, 2013. Вып. 17. С. 9–24.
2. Коквин В. А. Анализ зависимостей алгоритмов управления взаимосвязанными технологическими процессами // Системный анализ в науке и образовании. 2015. № 4. С. 23–27.
3. Воеводин В. П. Автоматизация У-70 и ОС Linux. Препринт ИФВЭ 2008-2. Протвино, 2008. 23 с.
4. Javed B., Iqbal M. W., Abbas H. Internet of Things (IoT) Design Considerations for Developers and Manufacturers // ICC Workshops. 2017. P. 834–842.
5. IoT Companies [Электронный ресурс]. URL: <https://www.postscapes.com/iiot-companies/> (дата обращения: 16.03.2020).
6. Ray P. P. Internet of robotic things: Concept technologies and challenges // IEEE Access. Jan. 2017. Vol. 4. P. 9489–9500.

7. Kokovin V. A., Evsikov A. A., Uvaysov S. U., Uvaysova S. S. Event-based Cooperation of Functional Networking Components in Distributed Technological Systems // Proceedings of MWENT-2020. Moscow, Russia. March 11–13, 2020, in print.

8. Panjaitan S., Frey G. Functional control objects in distributed automation systems // IFAC Proceedings Volumes. 2007. Vol. 40, Iss. 3. P. 259–264.

9. Pang C., Vyatkin V. IEC 61499 Function Block Implementation of Intelligent Mechatronic Component // 8th IEEE Conference on Industrial Informatics (INDIN 2010). 2010. P. 1124–1129.

10. International Standard IEC 61499. Function blocks for industrial-process measurement and control systems (edition 2.0). Part 2: Software tool requirements: ed2.0. International Electrotechnical Commission. Geneva, 2012. 97 p.

11. Batth R. S., Nayyar A., Nagpal A. Internet of Robotic Things: Driving Intelligent Robotics of Future — Concept, Architecture, Applications and Technologies // 2018 4th International Conference on Computing Sciences (ICCS). Jalandhar, 2018. P. 151–160. doi: 10.1109/ICCS.2018.00033.

12. Каляев И. А., Капустян С. Г., Усачев Л. Ж. Основы построения распределенных систем управления коллективами роботов // Информационные технологии. 1998. № 5. С. 13–18.

13. Комаров В. В. Базовые принципы построения общей таймерной системы ускорительного комплекса У-70 // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2005. № 5. С. 23–26.

14. Arefin S. E., Ashrafi Heya T., Uddin J. Real-life Implementation of Internet of Robotic Things Using 5 DoF Heterogeneous Robotic Arm // 2018 Joint 7th International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV) and 2018 2nd International Conference on Imaging, Vision & Pattern Recognition (icIVPR). Kitakyushu, Japan. 2018. P. 486–491. doi: 10.1109/ICIEV.2018.8641019.

15. International Standard IEC 61131-3 (edition 2.0): Programmable Controllers / International Electrotechnical Commission. Geneva, 2003. 230 p.

16. Pearce H. A., Roop P. S. Synthesizing IEC 61499 Function Blocks to hardware // Proceedings of International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC-2019). Auckland, New Zealand, 22–25 Jan. 2019. P. 1–6. doi: 10.23919/ELINFOCOM.2019.8706345

17. ISaGRAF Technology. [Электронный ресурс]. URL: <https://isagraf.ru/> (дата обращения: 16.03.2020).

18. nxtSTUDIO. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nxtcontrol.com/en/engineering/> (дата обращения: 16.03.2020).

19. ARM cores. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.arm.com/> (дата обращения: 16.03.2020).

20. Отечественные ISaGRAF-контроллеры (2020) [Электронный ресурс]. URL: [https://isagraf.ru/images/industry\\_avt/soft/isagraf/PLC%20-%20Russian.pdf/](https://isagraf.ru/images/industry_avt/soft/isagraf/PLC%20-%20Russian.pdf/) (дата обращения: 16.03.2020).

21. Kokovin V., Diagilev V., Uvaysov S., Uvaysova S. Intelligent power electronic converter for wired and wireless distributed applications // Proceedings of the IEEE International Conference SED-2019. 23–24 April 2019. Prague: IEEE, 2019. P. 1–5.

22. Strzelecki R., Zinoviev Z., Strzelecki R., Benysek G. Overview of power electronic converters and controls // Power Electronics in Smart Electric Energy Networks. Power Systems. London: Springer, 2008. P. 55–105.

23. Достанко А. П., Аваков С. М., Агеев О. А. и др. Технологические комплексы интегрированных процессов производства изделий электроники. Минск: Белорусская наука. 2016. 251 с.

24. Дягилев В. И., Евсиков А. А., Коквин В. А. Силовой преобразователь. Патент на изобретение RU 2692687, 26.06.2019.

25. Евсиков А. А., Леонов А. П. Об использовании системы моделирования *VisSim* для исследования электропривода, работающего при скалярном управлении в повторно-кратковременном номинальном режиме с частыми пусками и электрическим торможением // Известия Института инженерной физики. 2019. № 1 (51). С. 42–48.

26. Дягилев В. И., Коковин В. А., Увайсов С. У., Увайсова С. С. Компьютерное моделирование работы силового преобразователя с выходным синусоидальным напряжением // Информационные технологии. 2016. Т.22, № 4. С. 261–266.

27. Система динамического моделирования *VisSim* [Электронный ресурс]. URL: <http://pro-spo.ru/winmat/480-vissim/> (дата обращения: 16.03.2020).

28. IoT Hardware Guide [Электронный ресурс]. URL: <https://www.postscapes.com/internet-of-things-hardware/> (дата обращения: 16.03.2020).

29. Raspberry PI 4 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/> (дата обращения: 16.03.2020).

30. Windows IoT platform [Электронный ресурс]. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/software-download/windows10IoTCore/> (дата обращения: 16.03.2020).

31. International Standard IEC 61131-9:2013: Programmable controllers — Part 9: Single-drop digital communication interface for small sensors and actuators (SDCI) [Электронный ресурс]. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/4558/> (дата обращения: 16.03.2020).

32. IEEE Standard for Heterogeneous Interconnect (HIC) (Low-Cost, Low-Latency Scalable Serial Interconnect for Parallel System Construction)", IEEE Standard 1355 — 1995, IEEE, June 1996 SpaceWire Standard. ECSS — Space Engineering. "SpaceWire — Links, Nodes, Routers and Networks". ECSS-E -ST-50-12C, Rev1 Draft D: November 2014.

33. Quartus Prime Lite Edition [Электронный ресурс]. URL: <https://fpgasoftware.intel.com/?edition=lite> (дата обращения: 16.03.2020).

34. Kokovin V. A., Evsikov A. A. Event-Related Interaction of Mechatronic Modules in Distributed Technological Installations // Special Issue on "Mechanical Engineering Research and Education. 2018. Vol. 12, N. 5.

35. Хинчин А. Я. Работы по математической теории массового обслуживания. М.: "Едиториал УРСС", 2019. 240 с.

36. Anylogic 8 University Researcher 8.6 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.anylogic.ru/>

37. Коковин В. А., Комаров В. В. Контроллер таймерной сети общей таймерной системы ускорительного комплекса ИФВЭ // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. НАУЧТЕХЛИТИЗДАТ. 2005. № 6. С. 15–20.

V. A. Kokovin, Assistant Professor, e-mail: kokovin@uni-protvino.ru,

A. A. Evsikov, Assistant Professor, e-mail: eaa@uni-protvino.ru,

A. P. Leonov, Assistant Professor, e-mail: anatoli.leonov@googlemail.com,  
State University "Dubna", Branch "Protvino", Moscow Region, Protvino

## Features of the Organization and Interaction of Functional Network Components in Distributed Control Systems

*Solving the problem of FNC interaction within a distributed control system requires an analysis of the nature of technological processes, analysis of the dependence of FNC algorithms on data or control, etc. This analysis makes it possible to identify the features of the FNC organization from the point of view of control and communication requirements for solving the task. The article analyzes the development trends of industrial network ecosystems, software and hardware tools for the implementation of network associations participants. In particular, the considered capabilities of the software platform based on the IEC 61499 standard for the development of FNC control programs meet the requirements for network components. Possible non-determinism of interaction (as noted in [9]) is proposed to be compensated by using FPGAs as part of FNC controllers when creating additional fast communication links for the implementation of deterministic network applications. The proposed additional FPGA-based computing platform together with the ARM controller forms a hybrid computer as part of the FNC, which allows you to control fast technological processes. A multi-level configuration of an industrial network with the unification of individual FNCs into clusters is proposed and substantiated. This configuration allows you to flexibly combine the boot and communication tasks of FNC, if necessary, performing the exchange of information between clusters. The developed model in the AnyLogic 8.6 software package showed the effectiveness of the proposed configuration. The results of the experiments led to the conclusion that an increase in the intensity of messages has a greater effect on work efficiency than an increase in the number of FNCs. The development of this topic is expected in the following areas: improving the characteristics of FNC in terms of computing and communication capabilities. Development of an algorithm for optimizing the message transmission path between clusters, with an analysis of the waiting time of busy DS-links.*

**Keywords:** distributed control systems, Functional Networking Components, mechatronic modules, IEC-61499, Field-Programmable Gate Array, AnyLogic 8.6

DOI: 10.17587/it.27.212-224

### References

1. Dubinin V. N., Vyatkin V. V., Drozdov D. N. Advance Computing in IEC 61499 Function Block Systems, *Trudy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii "Sovremennye informacionnye tekhnologii"*, Penza, 2013, no. 17, pp. 9–24 (in Russian).

2. Kokovin V. A. Analysis of the dependence of algorithms interrelated management processes, *Sistemnyj analiz v nauke i obrazovanii*, 2015, no. 4, pp. 23–27 (in Russian).

3. Voevodin V. P. The Automation of U-70 and OS Linux, IHEP Preprint 2008-2, Protvino, 2008, p. 23 (in Russian).

4. Javed B., Iqbal M. W., Abbas H. Internet of Things (IoT) Design Considerations for Developers and Manufacturers, *ICC Workshops, 2017*, pp. 834–842.

5. IIoT Companies, available at: <https://www.postscapes.com/iiot-companies/> (accessed March 16, 2020).

6. Ray P. P. Internet of robotic things: Concept technologies and challenges, *IEEE Access*, Jan. 2017, vol. 4, pp. 9489–9500.

7. **Kokovin V. A., Evsikov A. A., Uvaysov S. U., Uvaysova S. S.** Event-based Cooperation of Functional Networking Components in Distributed Technological Systems, *Proceedings of MWENT-2020*, Moscow, Russia, March 11–13, 2020 (in print).
8. **Panjaitan S., Frey G.** Functional control objects in distributed automation systems, *IFAC Proceedings Volumes*, 2007, vol. 40, iss. 3, pp. 259–264.
9. **Pang C., Vyatkin V.** IEC 61499 Function Block Implementation of Intelligent Mechatronic Component, *8th IEEE Conference on Industrial Informatics (INDIN 2010)*, 2010, pp. 1124–1129.
10. **International Standard IEC 61499.** Function blocks for industrial-process measurement and control systems (edition 2.0). Part 2: Software tool requirements: ed2.0 / International Electrotechnical Commission, Geneva, 2012, 97 p.
11. **Batth R. S., Nayyar A., Nagpal A.** Internet of Robotic Things: Driving Intelligent Robotics of Future — Concept, Architecture, Applications and Technologies, *2018. 4th International Conference on Computing Sciences (ICCS)*, Jalandhar, 2018, pp. 151–160, doi: 10.1109/ICCS.2018.00033.
12. **Kaliaev I. A., Kapustjan S. G., Usachev L. Zh.** Creation bases of distributed control systems of robot collective, *Journal Information Technologies*, 1998, no. 5, pp. 13–18 (in Russian).
13. **Komarov V. V.** Basic Principle Timing System Creation for U-70 Accelerators Complex, *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2005, no. 5, pp. 23–26 (in Russian).
14. **Arefin S. E., Ashrafi Heya T., Uddin J.** Real-life Implementation of Internet of Robotic Things Using 5 DoF Heterogeneous Robotic Arm, *2018 Joint 7th International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV) and 2018 2nd International Conference on Imaging, Vision & Pattern Recognition (icIVPR)*, Kitakyushu, Japan, 2018, pp. 486–491, doi: 10.1109/ICIEV.2018.8641019.
15. **International Standard IEC 61131-3 (edition 2.0): Programmable Controllers**, International Electrotechnical Commission, Geneva, 2003, 230 p.
16. **Pearce H. A., Roop P. S.** Synthesizing IEC 61499 Function Blocks to hardware, *Proceedings of International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC-2019)*, Auckland, New Zealand, 22–25 Jan. 2019, pp. 1–6. doi: 10.23919/ELINFOCOM.2019.8706345
17. **ISaGRAF Technology**, available at: <https://isagraf.ru/> (accessed March 16, 2020).
18. **nxtSTUDIO**, available at: <https://www.nxtcontrol.com/en/engineering/> (accessed March 16, 2020).
19. **ARM cores**, available at: <https://www.arm.com/> (accessed March 16, 2020).
20. **Russian ISaGRAF-PLC (2020)**, available at: [https://isagraf.ru/images/industry\\_avt/soft/isagraf/PLC%20-%20Russian.pdf/](https://isagraf.ru/images/industry_avt/soft/isagraf/PLC%20-%20Russian.pdf/) (accessed March 16, 2020).
21. **Kokovin V., Diagilev V., Uvaysov S., Uvaysova S.** Intelligent power electronic converter for wired and wireless distributed applications. 2019, In: *Proceedings of the IEEE International Conference SED-2019*, 23–24 April 2019; Prague: IEEE; 2019. pp. 1–5.
22. **Strzelecki R., Zinoviev Z., Strzelecki R., Benysek G.** Overview of power electronic converters and controls, *Power Electronics in Smart Electric Energy Networks. Power Systems*, London, Springer, 2008, pp. 55–105.
23. **Dostanko A. P., Avakov S. M., Ageev O. A.** et al. Technological systems integrated production processes of electronics products, Minsk, Belorusskaya nauka, 2016, 251 p. (in Russian).
24. **Diagilev V. I., Evsikov A. A., Kokovin V. A.** Power converter. Russian Federation Patent RU 2692687, 26.06.2019 (in Russian).
25. **Evsikov A. A., Leonov A. P.** About using the simulation system VisSim for the investigation of the electric drive, working under scalar control in repeatedly-short-term nominal mode with frequent starts and electric braking, *Izvestiya Instituta inzhenernoj fiziki*, 2019, no. 1 (51), pp. 42–48 (in Russian).
26. **Diagilev V. I., Kokovin V. A., Uvaysov S. U., Uvaysova S. S.** Computer simulation of the power converter with harmonic wave output, *Information Technologies*, 2016, no. 4, vol. 22, pp. 261–266 (in Russian).
27. **The system of dynamic modeling VisSim**, available at: <http://pro-spo.ru/winmat/480-vissim/> (accessed March 16, 2020).
28. **IoT Hardware Guide**, available at: <https://www.postscapes.com/internet-of-things-hardware/> (accessed March 16, 2020).
29. **Raspberry PI 4**, available at: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/> (accessed March 16, 2020).
30. **Windows IoT platform**, available at: <https://www.microsoft.com/en-us/software-download/windows10IoTCore/> (accessed March 16, 2020).
31. **International Standard IEC 61131-9:2013: Programmable controllers — Part 9: Single-drop digital communication interface for small sensors and actuators (SDCI)**, available at: <https://webstore.iec.ch/publication/4558/> (accessed March 16, 2020).
32. **IEEE Standard for Heterogeneous Interconnect (HIC) (Low-Cost, Low-Latency Scalable Serial Interconnect for Parallel System Construction)**, IEEE Standard 1355 — 1995, IEEE, June 1996.
33. **Quartus Prime Lite Edition**, available at: <https://fpgasoftware.intel.com/?edition=lite> (accessed March 16, 2020).
34. **Kokovin V. A., Evsikov A. A.** Event-Related Interaction of Mechatronic Modules in Distributed Technological Installations, *Special Issue on "Mechanical Engineering Research and Education"*, 2018, vol. 12, no. 5.
35. **Khinchin A. Ya.** Work on the mathematical theory of queuing, Moscow, "Editorial URSS", 2019, 240 p. (in Russian).
36. **Anylogic 8 University Researcher 8.6**, available at: <https://www.anylogic.ru/> (accessed March 16, 2020).
37. **Kokovin V. A., Komarov V. V.** Timing Network Controller of IHEP Accelerators Complex General Timing System, *Instruments and Systems: Monitoring, Control and Diagnostics*, 2005, no. 6, pp. 15–20 (in Russian).

### Адрес редакции:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5510

E-mail: [it@novtex.ru](mailto:it@novtex.ru)

Технический редактор *Е. В. Конова*.

Корректор *М. Ю. Безменова*.

Сдано в набор 04.02.2021. Подписано в печать 23.03.2021. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ ИТ421. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-15565 от 02 июня 2003 г.

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: [www.aov.ru](http://www.aov.ru)