

Д. К. Левоневский, канд. тех. наук, ст. науч. сотр., руководитель лаборатории, levonevskij.d@iiias.spb.su,
Р. Н. Яковлев, магистр, мл. науч. сотр., iakovlev.r@mail.ru,
А. И. Савельев, канд. тех. наук, ст. науч. сотр., руководитель лаборатории, saveliev@iiias.spb.su,
Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук

Модель децентрализованной киберфизической системы, устойчиво функционирующей в изменяющемся окружении*

Рассматриваются вопросы децентрализации и динамического перераспределения ролей в киберфизических системах (КФС), предназначенных для работы в изменяющемся окружении и, в особенности, в открытых пространствах, где существуют повышенные риски поломки модулей и потери связи. В частности, исследуются методы децентрализации алгоритмов управления поведением КФС и обеспечения избыточности их компонентов и связей. Выявлен ряд требований к подобным системам и отмечено, какие ограничения в существующих подходах препятствуют реализации систем, удовлетворяющих этим требованиям, на физическом, сетевом и прикладном уровнях. Для каждого уровня предложены модели поведения КФС, которые обеспечивают автономное распределение инфраструктурных ролей между компонентами. Выполнено формальное описание этих моделей с помощью диаграмм деятельности. Это позволило выполнить синтез структурно-параметрической модели автономной мобильной КФС, ориентированной на функционирование на открытых территориях в условиях динамического окружения и решение прикладных задач, выполняемых посредством согласованного взаимодействия групп мобильных агентов. Модель отражает процесс функционирования автономных мобильных КФС в динамических средах и учитывает аспекты устойчивости системы и ее реакции на деструктивные воздействия. К преимуществам предложенных моделей относятся децентрализация задач, отсутствие центральных, критических узлов и узких мест, отсутствие требований прямой видимости между устройствами, малого расстояния между ними, стационарности устройств, возможность работы в неисследованном окружении. Разрабатываемые решения ориентированы на применение, прежде всего, в сфере бизнеса и пригодны для использования, к примеру, на промышленных предприятиях, оснащенных мобильными робототехническими устройствами с камерами, при обработке сельскохозяйственных угодий и т. д. Другой сферой применения является выполнение территориальных исследований, спасательных операций. Применение программно-аппаратных комплексов, реализующих предложенный подход, позволит более точно выполнять изучение местности, в том числе неисследованных территорий с ограниченной доступностью для человека.

Ключевые слова: киберфизические системы, роботы, архитектура КФС, распределенные системы, децентрализованные системы, устойчивость, надежность

Введение

Функционирование киберфизической системы (КФС) в динамической среде сопряжено с повышенными рисками выхода из строя ее компонентов, потери связи между ними и сложностей в навигации. Централизованные подходы к построению КФС при относительной простоте и удобстве в управлении имеют ряд недостатков — в частности, ограниченную масштабируемость, наличие узких мест, угрозы нарушения связности, а также проблемы с доступностью на больших пространствах [1]. Таким образом, имеется необходимость создания устойчивых, связных, децентрализованных КФС с возможностью динамического подключения и отключения их компонентов. В данной работе рассматриваются вопросы повышения надежности КФС, функционирующих в открытом пространстве и динамическом окружении. В частности, исследуются методы

децентрализации алгоритмов управления поведением КФС и обеспечения избыточности их компонентов и связей.

Состояние исследований

Рассмотрим современное состояние исследований в области самоорганизации КФС при отказе отдельных узлов или компонентов. В контексте рассматриваемой проблемы наиболее актуально изучение инцидентов, связанных с влиянием окружающей среды, ведущих к потере связности системы. Исследуем известные подходы к построению КФС, устойчивой к таким инцидентам, и проведем анализ соответствия известных решений требованиям к КФС, функционирующим в открытых пространствах.

Рассмотрим подходы к построению КФС, снижающие вероятность возникновения этих инцидентов. Для классификации подходов удобно рассматривать их в соответствии с уровнями модели ISO/OSI [2], которая содержит семь уровней, на практике они часто группи-

*Исследование выполнено при поддержке РНФ № 20-79-10325.

руются. Целесообразно выполнить эту группировку по характеру задач, которые решаются для повышения надежности таких систем. Те решения, которые ограничиваются способами передачи данных по каналам связи или организацией этих каналов, относятся к физическому и каналному уровням. К сетевому, транспортному, сеансовому уровням относятся решения, основанные на маршрутизации и создании оверлейных сетей и виртуальных каналов связи. Решения, учитывающие прикладные задачи КФС, отнесены к прикладному уровню и уровню представления. Рассмотрим эти уровни подробнее.

На физическом и канальном уровнях известен ряд решений на основе протокола LoRaWAN и его аналогов, позволяющих повысить дальность и эффективность коммуникации между узлами КФС. Так, в работе [3] представлена оценка эффективности беспроводных сетей LoRa, проанализировано влияние параметров ToA (Time on Air), битрейт и фактор распространения (SF) на уровень производительности. В статье [4] рассмотрена беспроводная сенсорная сеть (WSN), смоделированная в симуляторе Castalia с использованием технологии Long Range (LoRa), показаны зависимости коэффициента потери от параметров системы и среды. В работе [5] изучается возможность использования LPWAN в сельских районах. Благодаря симуляциям оценивается производительность LoRaWAN, которая является одной из основных доступных технологий LPWA с точки зрения показателей производительности сети, таких как диапазон, охват, время ожидания и коэффициент доставки пакетов.

При том, что ряд приведенных решений позволяет расширить зону связности и повысить надежность обмена данными, очевидно, что они не предоставляют исчерпывающих возможностей обеспечения связности КФС на больших пространствах. Кроме того, эти решения не рассматривают случаи, когда среда, содержащая препятствия для сигнала, не исследована и изменчива.

На сетевом, транспортном, сеансовом уровнях известны решения, позволяющие улучшить связность КФС, распределив функции передачи данных между узлами и обеспечив маршрутизацию. Такие решения позволяют выполнять самоорганизацию КФС на сетевом, транспортном, сеансовом уровнях и обычно основаны на подходе WSN, использовании

mesh-сетей и установлении многопереходных соединений. Так, в работе [6] рассматривается система передачи данных для перемещающихся военных мобильных групп. Описанная mesh-сеть позволяет действовать узлам независимо друг от друга для приема и передачи данных. В статье [7] предложен подход к организации связи, в которой каждый агент в системе может покинуть сеть или принять новые соединения, и для этого разработаны четыре специальных протокола. В работе [8] проведен обширный обзор протоколов маршрутизации Flying Ad-hoc (FANET), где подробно описаны стратегии и методы маршрутизации. Примером использования FANET может служить работа [9], где предложен подход к самоорганизации групп беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), основанный на поведении роя светлячков. Тем не менее, способ предполагает использование для части задач центрального узла — станции управления.

Подходы к децентрализации на сеансовом уровне состоят, как правило, в создании логической (оверлейной) сети поверх существующей физической. Оверлейные сети абстрагируются от нижележащих протоколов, и сеть может использовать различную среду передачи данных в разных сегментах гетерогенной сети. Узлы в каждый момент времени поддерживают избыточное число соединений (сеансов), резервируя каналы передачи данных. Оверлейные сети могут быть управляемыми, где каждому узлу сети известны все узлы сети и их возможности, и неуправляемыми, где ни одному из узлов не известна полная топология сети [10]. Пример рассматривается в работе [11], основная идея которой — построить топологию логического дерева поверх физической сети, сформированной роботами. Ограничение состоит в том, что метод рассчитан только на стационарные устройства.

Приведенные подходы существенно повышают связность КФС. Они позволяют динамически перестраивать маршруты передачи данных при подключении и отключении узлов КФС, но не предлагают решений для ситуации, когда маршрут невозможно построить (к примеру, на местности, где невозможно развернуть узлы-передатчики с достаточной плотностью). К тому же, сетевой и транспортный уровни не затрагивают проблему перераспределения прикладных задач и ролей узлов. Для этого необходимы решения, учитывающие прикладной уровень функционирования КФС.

На прикладном уровне учитываются роли и прикладные задачи КФС, а существующие подходы позволяют перераспределять эти роли и задачи и управлять ими. Примером являются мобильные КФС, подробный обзор которых приведен в работе [12], где рассмотрены основные исследовательские задачи мобильных КФС, касающиеся безопасности, энергопотребления, динамического окружения и обеспечения стабильности системы. Краткое изложение существующих децентрализованных архитектур систем управления в промышленности приводится в работе [13]. Авторы указывают на различия между традиционной централизованной и иерархической архитектурами по сравнению с архитектурой децентрализованных КФС. В статье [14] обсуждается подход к адаптируемым производственным КФС, основанный на контейнерных технологиях. В работе [15] предложен децентрализованный алгоритм координации компонентов производственных КФС, который в среднем на 50 % превосходит альтернативные централизованные алгоритмы по показателям пропускной способности, скорости работы и задержки, но применим лишь ограниченно, так как требует известного и статического окружения, а децентрализация распространяется лишь на отдельные задачи КФС. Таким образом, при использовании представленных подходов, как правило, остается потребность в критических стационарных узлах управления и сбора данных, что не всегда может быть обеспечено на открытых территориях с изменчивой средой.

Таким образом, при наличии множества отдельных разработок отсутствует исчерпывающий подход, в рамках которого возможно построение устойчивых КФС, функционирующих на открытых территориях в динамической среде. На основе проведенного анализа можно сформировать предложения по организации КФС с высоким уровнем связности. Так, следует:

- использовать несколько видов типовых многоцелевых взаимозаменяемых узлов;
- выделять роли, доступные каждому виду узлов, и реализовывать алгоритмы их динамического назначения;
- избегать наличия незаменимых (критических) узлов КФС;
- обеспечить избыточность узлов КФС каждого вида;
- использовать оборудование, обладающее достаточным для исследуемой местности уровнем

защиты от воздействия окружающей среды (влаги, пыли, температур);

- поддерживать актуальные данные о территории, что включает в себя как предварительный сбор данных, так и переобучение КФС в процессе работы.

Модели поведения КФС

Рассмотрим модели поведения КФС на разных уровнях, которые обеспечивают автономное распределение инфраструктурных ролей между компонентами системы. На физическом и канальном уровнях отказом является потеря соединения узла с каналом связи по внешним (потеря сигнала от роутера) или внутренним причинам. Внутренние причины могут быть связаны со сбоем сетевого оборудования или с состоянием узла, установившимся вследствие его поведения (например, если узел покинул зону досягаемости роутера). Сценарии работы на этом уровне зависят от технологий связи. При высокой плотности расположения ретрансляторов применимы Wi-Fi-сети, для больших расстояний широко используется LoRaWan. В любом случае действия узла должны быть направлены на восстановление связи, и соответствующая диаграмма деятельности изображена на рис. 1.

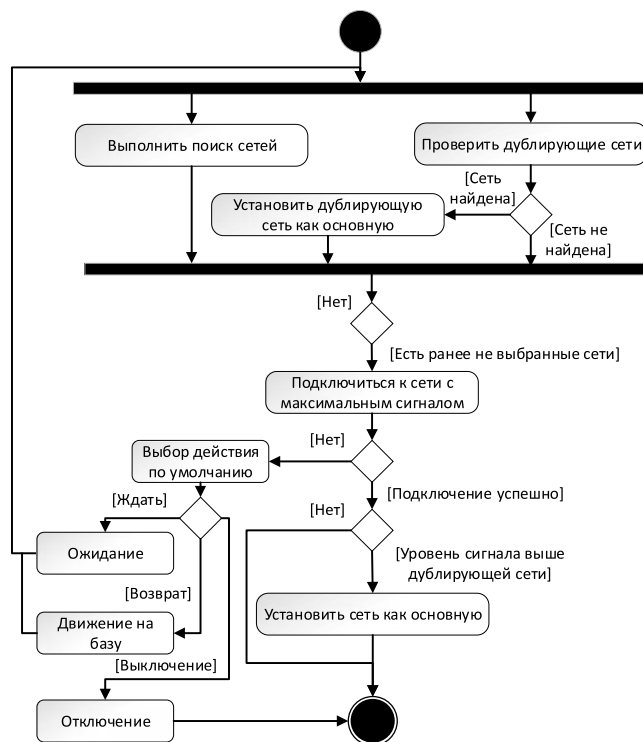


Рис. 1. Диаграмма деятельности для восстановления связи на физическом уровне

Fig. 1. Activity diagram for restoring connectivity at the physical level

К сетевому, транспортному и сеансовому уровням относятся решения, основанные на маршрутизации данных и оверлейных сетях. Такие решения позволяют выполнять самоорганизацию сети и обычно основаны на использовании мобильных ad hoc-сетей (mobile ad hoc networks, MANET) и, в частности, беспроводных mesh-сетей (Wireless Mesh Network, WMN). Протоколы MANET приспособлены к изменениям топологии [16], и по этой причине их целесообразно рассматривать в КФС.

Маршрутизация в MANET бывает проактивной, когда узлы периодически распространяют свои таблицы маршрутизации по сети, и реактивной, когда маршрут находится по запросу с помощью специальных multicast-пакетов. Недостаток первого способа — необходимость поддержки большого объема данных и медленная реакция на изменения. Второй способ характеризуется задержками при поиске пути и опасностью переполнения сети служебными пакетами. Гибридным вариантом, позволяющим снизить влияние этих недостатков, является протокол ZRP [17], использующий проактивный подход при передаче данных внутри зоны и реактивный — между зонами. Так обеспечивается кластеризация сети и снижается объем передаваемых данных. Для работы подобных протоколов граф сети должен быть связным. В случае разрыва необходимо изменить топологию сети. Это можно сделать с помощью перемещения узлов КФС или перераспределения их ролей, что выходит за рамки протокола маршрутизации и может сказаться на качестве выполнения прикладных задач. Тем не менее, известен ряд таких решений [18, 19].

С учетом требований гибкости, масштабируемости, децентрализованности, устойчивости к отказам на прикладном уровне следует в первую очередь рассматривать фреймворки работы с большими объемами данных. Такое программное обеспечение (ПО) должно иметь инструменты, которые обеспечат быструю передачу, надежное хранение, репликацию и обмен данными. Большинство таких решений базируются на открытых фреймворках и технологиях вроде Hadoop, Spark и концепции MapReduce. Их преимущество заключается в возможности распределенного выполнения операций обработки и свертки большого объема данных, а при отказе узла его работа автоматически передается другому узлу при условии доступности входных данных. При этом в системе есть еди-

ничные точки отказа — узел имен, а высокие задержки распределенных вычислений, приемлемые в пакетном режиме обработки, не позволяют использовать классический MapReduce в режиме реального времени. Для решения этой проблемы были созданы другие Big Data фреймворки, в частности, Apache Spark, также входящий в экосистему Hadoop.

Рассмотрим поведение системы в случае отказа узла данных. Узел имен периодически получает контрольный сигнал (heartbeat) и отчет о блоках (block report) от каждого узла данных. Если узел имен не получает контрольных сигналов дольше определенного порогового значения от определенного узла данных, то он считается "мертвым" или неисправным. В этом случае система запускает процесс репликации блоков, которые были расположены на неисправном узле согласно его последнему отчету, на новый узел. Данные для репликации переда-

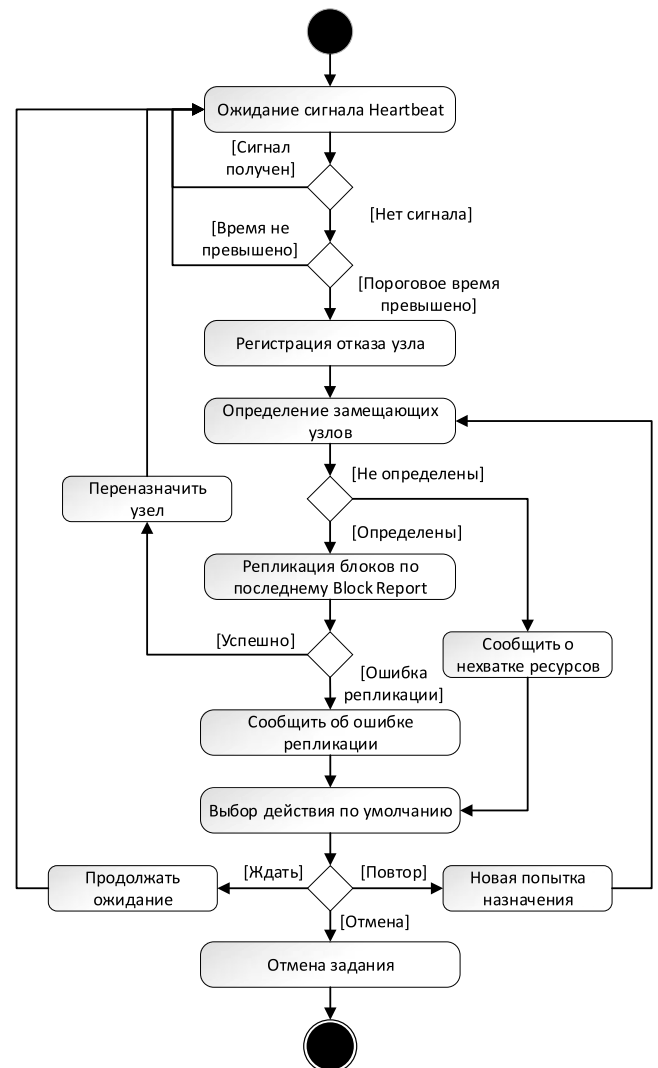


Рис. 2. Диаграмма деятельности для случая отказа узла данных
Fig. 2. Activity diagram for the case of a data node failure

ются напрямую от одного узла данных к другому, минуя узел имен. Диаграмма деятельности для этой ситуации представлена на рис. 2.

Формализация состава, свойств и поведения КФС позволяет выполнить синтез структурно-параметрической модели автономной мобильной КФС для функционирования на открытых территориях в условиях динамического окружения. В качестве входных данных модель получает конечное множество гетерогенных робототехнических средств (РС), их типов и параметров. На выходе требуется получить набор недостающих компонентов КФС для коррекции состава системы в целях ее устойчивого функционирования.

Структурно-параметрическая модель автономной мобильной КФС

В общем случае автономная мобильная КФС *CPS* может быть представлена как конечный набор гетерогенных РС:

$$CPS = \{RS_i | i = \overline{1, N}\},$$

где RS_i — некоторое РС, а N — общее число РС.

В основе структуры такой КФС лежит конечное число V типов РС, и каждое РС RS_i входит в состав одного из наборов гомогенных РС $RSet_v$ ($RS_i \in RSet_v$). Соответственно, КФС может также быть определена следующим образом:

$$CPS = \{RSet_v | RSet_v = \{RS_{vi} | i = \overline{1, I_v}\}, v = \overline{1, V}\},$$

где I_v — общее число задействованных в формировании КФС РС данного типа.

Каждое РС RS_{vi} некоторого типа v , в свою очередь, может быть представлено следующим кортежем параметров:

$$RS_{vi} = \langle Ph_{vi}, Sens_{vi}, Act_{vi} \rangle,$$

где Ph_{vi} — набор физических компонентов (аппаратное обеспечение); $Sens_{vi}$ — набор датчиков, а Act_{vi} — набор исполнительных механизмов. Датчики и исполнительные механизмы являются входными и выходными преобразователями соответственно [20]. Датчики собирают информацию о состоянии среды, а исполнительные механизмы изменяют его.

При разработке автономной мобильной КФС особого внимания требует вопрос обеспечения

ее отказоустойчивости к деструктивным воздействиям среды. Для этого каждое РС оснащается дублирующими компонентами, и для каждого РС характерно наличие идентичных компонентов в наборах Ph_{vi} , $Sens_{vi}$ и Act_{vi} . При этом набор дублирующих компонентов $D(RS_{vi})$ и коэффициенты репликации $R(D(RS_{vi}))$ по умолчанию идентичны для каждого типа РС v :

$$D(RS_{va}) = D(RS_{vb}) = \{DPh_v, DSens_v, DAct_v\}, a \neq b; \\ R(D(RS_{va})) = R(D(RS_{vb})), a \neq b,$$

где DPh_v , $DSens_v$ и $DAct_v$ — наборы дублируемых физических компонентов, датчиков и исполнительных механизмов соответственно.

В соответствии с принятой концепцией дублирующие компоненты деактивированы, пока не будут задействованы в связи с выходом из строя активных компонентов. Таким образом, каждое РС RS_{vi} , входящее в состав КФС, связано с наборами дублируемых компонентов DPh_{vi} , $DSens_{vi}$, $DAct_{vi}$ и, соответственно, могут быть определены следующие отображения:

$$fPh : RS_{vi} \rightarrow DPh_{vi}, fSens : RS_{vi} \rightarrow DSens_{vi}, \\ fAct : RS_{vi} \rightarrow DAct_{vi}.$$

Принимая во внимание эти выражения, автономная мобильная КФС *CPS* в терминах компонентов может быть определена следующим образом:

$$CPS = \langle Ph, Sens, Act, DPh, DSens, DAct, Lg, Hum \rangle,$$

где Ph — набор активных физических компонентов; $Sens$ — набор активных датчиков; Act — набор активных исполнительных механизмов; DPh — набор резервных физических компонентов; $DSens$ — набор резервных датчиков; $DAct$ — набор резервных исполнительных механизмов; Lg — набор логических компонентов; Hum — набор лиц, вовлеченных в процессы функционирования КФС. Набор Ph — это набор всех активных физических компонентов, размещенных на РС и используемых в процессе функционирования *CPS*:

$$Ph = \left\{ \bigcup_v \left\{ \bigcup_i Ph_{vi} \setminus DPh_{vi} | i = \overline{1, I_v} \right\} | v = \overline{1, V} \right\}.$$

Наборы $Sens$, Act и наборы резервных физических компонентов, датчиков и исполнительных механизмов определяются схожим образом.

Логические компоненты Lg включают в себя все уровни ПО, а также информацию на уровне данных, информации и знаний [21]. Протекающие в этих компонентах процессы являются преимущественно информационными.

Взаимодействие людей с КФС характеризуется определенной вариативностью. Так, человек может быть как пользователем системы Hum_U , так элементом Hum_{Env} внешней по отношению к КФС среды:

$$Hum = \{Hum_U, Hum_{Env}\}.$$

Определим набор функциональных компонентов КФС F как набор совокупностей логических и физических компонентов системы, которые при взаимодействии формируют базовые единицы функциональности:

$$F = \{\langle Ph_i, Lg_i \rangle | Ph_i \subseteq Ph, Lg_i \subseteq Lg, i = \overline{1, M}\}.$$

По определению каждый компонент F_q обладает аппаратными и вычислительными мощностями, ПО, способен к взаимодействию с другими компонентами, самодиагностике и информированию связанных компонентов об ошибках. Он также связан с определенным набором датчиков и исполнительных механизмов. Такие наборы в совокупности образуют набор преобразователей функциональных компонентов Tr :

$$Tr = \{\langle Sens_j, Act_j \rangle | Sens_j \subseteq Sens, Act_j \subseteq Act, j = \overline{1, L}\},$$

что позволяет функциональным компонентам осуществлять различного рода преобразования на физическом и логическом уровнях в контексте взаимодействия с внешней средой и пользователями КФС, включая как обмен и преобразование энергии (механической, электрической и т. д.) на физическом уровне, так и обмен, преобразование и синтез информации на логическом уровне. Таким образом, для любой КФС может быть определено отображение f :

$$f: F \rightarrow Tr,$$

а автономная мобильная КФС, соответственно, может быть охарактеризована набором упорядоченных пар вида:

$$CPS = \{\langle F_k, Tr_k \rangle | F_k \in F, Tr_k \in Tr, k = \overline{1, K}\}.$$

Следует отметить, что элементы любого преобразователя могут быть интероперабельны, как следствие, наборы элементарных компонентов КФС, входящие в состав некоторого преобразователя, могут входить в состав неограниченного числа иных преобразователей.

Согласованное взаимодействие наборов функциональных компонентов КФС и ассоциированных с ними преобразователей позволяет обеспечить предоставление сервисов КФС S_{CPS} потребителям $Cons$, в качестве которых могут выступать как иные функциональные компоненты, так и люди:

$$Cons = F \cup Hum.$$

Стоит также отметить, что наборы потребителей в общем случае могут отличаться для каждого отдельно взятого сервиса КФС:

$$Cons_S = \{Cons_i | Cons_i \subseteq Cons, i = \overline{1, n}\}.$$

Наличие однозначной ассоциативной связи между наборами потребителей и сервисами КФС позволяет нам ввести следующее отображение g :

$$g: S_{CPS} \rightarrow \{Cons_S | S = \overline{1, ser}\},$$

где ser — общее число сервисов, предоставляемых КФС. Поскольку сервисы реализуются посредством согласованного взаимодействия различных функциональных компонентов, то может быть определено отображение h :

$$h: F \rightarrow S_{CPS}.$$

Таким образом, композиция отображений $h \circ g$ позволяет установить соответствие между потребителями сервисов и функциональными компонентами, необходимыми для реализации соответствующих сервисов.

В то же время каждый преобразователь транзитивно ассоциирован с некоторым сервисом CPS и является одним из средств его предоставления. Учитывая интероперабельность преобразователей, для каждого сервиса S_{CPS} можно определить конечный набор преобразователей, реализующих предоставление данного сервиса для группы потребителей $Cons_S$:

$$e: S_{CPS} \rightarrow \{\{Tr_i | Tr_i \subseteq Tr, i = \overline{1, n}\}_S | S = \overline{1, ser}\}.$$

Рассмотрим далее обобщенную динамическую модель функционирования автономной мобильной КФС. Введем, согласно работе [22], обобщенный вектор состояния КФС и вектор выходных характеристик КФС:

$$x(t) = \|x_F^T, x_{Tr}^T\|^T, y(t) = \|y_F^T, y_{Tr}^T\|^T.$$

Допустим, некоторое изменение физической среды $\xi_{ph}(t)$ приводит к изменению n различных физических параметров P_i и регистрируется датчиками, в совокупности формирующими набор $Sens_i$:

$$P_{ik} = \{p_{ik} \in P_i | \xi_{ph}(t) \rightarrow P_i, k = \overline{1, n}\};$$

$$Sens_{ij} = \{sens_{ij} \in Sens_i | P_i \rightarrow Sens_i, j = \overline{1, m}\}.$$

Поскольку каждый датчик $sens_{ij}$ из набора датчиков $Sens_i$ может входить в одно или несколько подмножеств вида $Sens_i$, таких что $Sens_i \subseteq Tr_i$, $i = \overline{1, L}$, то регистрация изменений датчиком $sens_{ij}$ приводит к изменению состояний всех функциональных компонентов $F_{ij} \subseteq F$, с чьими преобразователями $Tr_{ij} \subseteq Tr$ ассоциирован данный датчик. Учитывая, что с каждым из преобразователей Tr_i , $i = \overline{1, L}$, ассоциирован целый набор датчиков $Sens_i$, то обновленное состояние $x_F(t_1)$ каждого из функциональных компонентов множества F определяется на основе лишь тех изменений физических параметров среды P_{ik} , которые были зарегистрированы датчиками, принадлежащими $Sens_{ii}$. При этом в $Sens_{ii}$ входят только те датчики, которые зарегистрировали изменение внешней среды ($Sens_{ii} \subseteq Sens_i$) и принадлежат набору, входящему в состав соответствующего преобразователя Tr_i ($Sens_{ii} \subseteq Sens_i$):

$$Sens_{ii} = Sens_i \cap Sens_i.$$

Ответ системы на изменения информационного окружения $\xi_{Lg}(t)$ во многом аналогичен ответу на изменения в физической среде. Допустим, изменение $\xi_{Lg}(t)$ приводит к изменению p логических параметров L_i :

$$L_{ij} = \{l_{ij} \in L_i | \xi_{Lg}(t) \rightarrow L_i, j = \overline{1, p}\}$$

и регистрируется логическими компонентами КФС $Lg_i \subseteq Lg$. Поскольку каждый Lg_{ij} из Lg_i может входить в одно или несколько подмножеств вида Lg_i , таких что $Lg_i \subseteq F_i$, $i = \overline{1, M}$, со-

ответственно регистрация изменений компонентом Lg_{ij} приводит к изменению состояний всех функциональных компонентов $F_{ij} \subseteq F$, с которыми ассоциирован данный компонент. Учитывая, что с каждым из функциональных компонентов F_i ассоциирован целый набор логических компонентов Lg_i , то обновленное состояние $x_F(t_1)$ каждого из функциональных компонентов множества F определяется исключительно на основе изменений логических параметров L_{ii} , зарегистрированных компонентами, принадлежащими набору Lg_{ii} , в который входят только те логические компоненты, которые зарегистрировали изменение логических параметров ($Lg_{ii} \subseteq Lg_i$) и принадлежат набору логических компонентов, входящему в состав соответствующего функционального компонента F_i ($Lg_{ii} \subseteq Lg_i$): $Lg_{ii} = Lg_i \cap Lg_i$.

Отметим, что в обоих случаях изменение состояния i -го функционального компонента F_i приводит к опосредованному изменению состояний физических и логических компонентов системы, принадлежащих наборам Ph_i и Lg_i соответственно. Кроме того, переход i -го функционального компонента из состояния $x(t_0)$ в состояние $x(t_1)$ может индуцировать изменение выходных характеристик системы $y(t)$, в частности, посредством активации исполнительных механизмов из набора $Act_i \subseteq Tr_i$. Таким образом, датчики реагируют на изменение физической среды $\xi_{ph}(t)$, вследствие чего формируется новое состояние $x(t_1)$, аналогично система реагирует на изменение информационного окружения $\xi_{Lg}(t)$. Исполнительные механизмы выполняют обратную функцию, преобразуя управляющие сигналы системы в ее новое представление $y(t)$ и воздействуя на физическую среду.

В контексте автономных мобильных КФС важно отметить, что изменение в физической среде не только может быть зарегистрировано набором датчиков вида $Sens_i$, но и может проявить себя как отказ некоторого набора физических компонентов Ph_{if} набора датчиков $Sens_{if}$ и набора исполнительных механизмов Act_{if} вследствие неблагоприятного воздействия внешней среды. Отказ каждого физического компонента Ph_{ifk} (Ph_{ifk} , $k = \overline{1, K}$) из набора Ph_{if} провоцирует отказ ряда функциональных компонентов, в состав которых входят компоненты Ph_{ifk} . Соответственно принадлежность некоторого функционального компонента F_{ifm} к набору отказавших компонентов F_{if} можно определить следующим образом:

$F_{tfm} \in F_{tf}$, если

$$\exists Ph_{tfk} : Ph_{tfk} \subseteq F_{tfm}, Ph_{tfk} \in Ph_{tf}.$$

Набор сервисов КФС S_{tf} отказ которых будет вызван выходом из строя набора F_{tf} может быть определен как $S_{tf} = h(F_{tf})$. Восстановление его работы требует восстановления набора функциональных компонентов F_{tf} . Обладая информацией о наборах вышедших из строя физических компонентов КФС Ph_{tf} и резервных физических компонентов DPh , можно определить набор доступных физических компонентов NPh для формирования функциональных компонентов F_{tfm} , тождественных по сути функциональным компонентам F_{tfm} :

$$NPh = \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Ph_i | Ph_i \in F_{tfm}, i = \overline{1, I_m} \right) \cup DPh \setminus Ph_{tf};$$

$$F_{tm} = \{ \langle Ph_i, Lg_i \rangle | Ph_i \subseteq NPh, Lg_i \subseteq Lg, i = \overline{1, M_{tf}} \}.$$

Изменение физической структуры КФС выражается следующим образом:

$$Ph = \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Ph_i | Ph_i \in F_{tm}, i = \overline{1, I_m} \right) \cup Ph \setminus Ph_{tf};$$

$$DPh = \left(DPh \cup \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Ph_i | Ph_i \in F_{tfm}, i = \overline{1, I_m} \right) \setminus Ph_{tf} \right) \setminus \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Ph_i | Ph_i \in F_{tm}, i = \overline{1, I_m} \right).$$

Последствия отказа наборов $Sens_{tf}$ и Act_{tf} во многом аналогичны последствиям отказа набора физических компонентов системы. Отказ каждого датчика или исполнительного механизма приводит к нарушению работы ряда преобразователей, в состав которых входят эти датчики и/или исполнительные механизмы. Соответственно, принадлежность некоторого преобразователя Tr_{tfm} к набору отказавших преобразователей Tr_{tf} можно определить следующим образом:

$Tr_{tfm} \in Tr_{tf}$, если

$$\exists Sens_{tfk} : Sens_{tfk} \subseteq Tr_{tfm}, Sens_{tfk} \in Sens_{tf} \vee$$

$$\exists Act_{tfk} : Act_{tfk} \subseteq Tr_{tfm}, Act_{tfk} \in Act_{tf}.$$

Набор сервисов КФС S_{tf} нарушение предоставления которых будет вызвано выходом из строя набора Tr_{tf} может быть определен как $S_{tf} = e(Tr_{tf})$. Возобновление его предоставле-

ния требует восстановления набора преобразователей Tr_{tf} . Обладая информацией о наборах вышедших из строя датчиков $Sens_{tf}$, исполнительных механизмов Act_{tf} и соответствующих резервных наборах $DSens$ и $DAct$, можно определить наборы $NSens$, $NAct$ для формирования преобразователей Tr_{tm} , тождественных преобразователям Tr_{tfm} :

$$NSens = \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Sens_i | Sens_i \in Tr_{tfm}, i = \overline{1, I_m} \right) \cup DSens \setminus Sens_{tf};$$

$$NAct = \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Act_i | Act_i \in Tr_{tfm}, i = \overline{1, I_m} \right) \cup DAct \setminus Act_{tf};$$

$$Tr_{tm} = \{ \langle Sens_j, Act_j \rangle | Sens_j \subseteq NSens, Act_j \subseteq NAct, j = \overline{1, M_{tf}} \}.$$

Соответствующее изменение структуры автономной мобильной КФС CPS для сенсоров может быть отражено следующим образом:

$$Sens = \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Sens_i | Sens_i \in Tr_{tm}, i = \overline{1, I_m} \right) \cup Sens \setminus Sens_{tf};$$

$$DSens = \left(DSens \cup \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Sens_i | Sens_i \in Tr_{tfm}, i = \overline{1, I_m} \right) \setminus Sens_{tf} \right) \setminus \left(\bigcup_{m=1}^{M_{tf}} Sens_i | Sens_i \in Tr_{tm}, i = \overline{1, I_m} \right).$$

Изменение наборов исполнительных механизмов Act и $DAct$ выполняется аналогично. Циклическая реализация описанных процессов изменения структуры КФС, состояния ее компонентов и внешней среды отражает процесс функционирования автономных мобильных КФС в динамических средах. Она учитывает устойчивость системы к деструктивным воздействиям со стороны внешней среды и описывает реакцию системы на такие воздействия.

Заключение

В статье выполнен анализ современного состояния исследований поведения КФС при

временной потере связности системы и отказе ее узлов. Выявлены ограничения известных методов, показано, что нет исчерпывающего подхода к построению устойчивых КФС, функционирующих на открытых территориях в динамической среде. Сформулированы требования для таких КФС, предложены модели поведения, обеспечивающие перераспределение ролей в КФС при выходе узлов из строя, что позволяет повысить автономность и надежность КФС. Формализация поведения КФС позволила выполнить синтез структурно-параметрической модели КФС, ориентированной на функционирование на открытых территориях в динамическом окружении и решение прикладных задач посредством согласованного взаимодействия групп мобильных агентов. Модель отражает процесс функционирования автономных мобильных КФС в динамических средах.

К преимуществам предложенных моделей относятся децентрализация задач, отсутствие критических узлов и узких мест, выход из строя которых приведет к отказам в системе, отсутствие требований прямой видимости или малого расстояния между устройствами, стационарности устройств, возможность работы в динамическом и неизвестном окружении.

Решения ориентированы на применение, прежде всего, в бизнесе и пригодны для использования, к примеру, на предприятиях, оснащенных мобильными РС с камерами: при обработке сельскохозяйственных угодий, доставке грузов, обслуживании инфраструктуры. Это особенно актуально в задачах управления производством в приближающуюся эпоху Industry 5.0, где характерно использование принципов самоорганизации и эволюции при взаимодействии систем искусственного интеллекта и людей [23, 24]. Другие сферы применения результатов — территориальные исследования, спасательные операции, в которых применение предложенных решений позволит более точно выполнять изучение местности, в том числе неисследованных территорий с ограниченной доступностью для человека [25].

В дальнейшем предполагается исследовать вопросы проектирования гетерогенных КФС [26] и разработать модель РС, позволяющую выполнять автоматизированную замену модулей РС другими роботизированными агентами. Предполагается разработать подход к адаптивному управлению инфраструктурой КФС для функционирования в изменяющейся среде.

Список литературы

1. Shi W., Cao J., Zhang Q., Li Y., Xu L. Edge Computing: Vision and Challenges // *IEEE Internet of Things Journal*. 2016. Vol. 3, N. 5. P. 637–646.
2. ISO/IEC 7498-1:1994 Information technology — Open Systems Interconnection — Basic Reference Model: The Basic Model. 1994. 68 p.
3. Lavric A., Popa V. A LoRaWAN: Long range wide area networks study // *International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN)*. 2017. P. 417–420.
4. Cagatan G. K. B., Magsumbol J. A. V., Baldovino R., Sybingco E., Dadios E. P. Connectivity analysis of wireless sensor network in two-dimensional plane using Castalia simulator // *9th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*. 2017. P. 1–8.
5. Barriquello C. H., Bernardon D. P., Canha L. N., de Silva F. E. S., Porto D. S., da Silveira Ramos M. J. Performance assessment of a low power wide area network in rural smart grids // *52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. 2017. P. 1–4.
6. Rabie T., Suleiman S. A novel wireless mesh network for indoor robotic navigation // *5th International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA)*. 2016. P. 1–4.
7. Jiménez A. C., García-Díaz V., Bolaños S. A decentralized framework for multi-agent robotic systems // *Sensors*. 2018. Vol. 18, N. 2. P. 417.
8. Kakamoukas G. A., Sarigiannidis P. G., Economides A. A. FANETs in Agriculture-A routing protocol survey // *Internet of Things*. 2020. P. 100183.
9. Khan A., Aftab F., Zhang Z. Self-organization based clustering scheme for FANETs using Glowworm Swarm Optimization // *Physical Communication*. 2019. Vol. 36. P. 100769.
10. Srinivasan S. Design and use of managed overlay networks: thesis. Georgia Institute of Technology, 2007.
11. Majcherczyk N., Jayabalan A., Beltrame G., Pincirolì C. Decentralized connectivity-preserving deployment of large-scale robot swarms // *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2018. P. 4295–4302.
12. Guo Y., Hu X., Hu B., Cheng J., Zhou M., Kwok R. Y. Mobile cyber physical systems: Current challenges and future networking applications // *IEEE Access*. 2017. Vol. 6. P. 12360–12368.
13. Foehr M., Vollmar J., Calà A., Leitão P., Karnouskos S., Colombo A. W. Engineering of next generation cyber-physical automation system architectures // *Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems*. Springer, Cham, 2017. P. 185–206.
14. Schneider G. F., Wicaksono H., Ovtcharova J. Virtual engineering of cyber-physical automation systems: The case of control logic // *Advanced Engineering Informatics*. 2019. Vol. 39. P. 127–143.
15. Okpoti E. S., Jeong I. J. A reactive decentralized coordination algorithm for event-driven production planning and control: A cyber-physical production system prototype case study // *Journal of Manufacturing Systems*. 2021. Vol. 58. Part A. P. 143–158.
16. Lambrou T. P., Panayiotou C. G. A Survey on Routing Techniques Supporting Mobility in Sensor Networks // *Proceedings of the 5th international conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Networks (MSN'09)*. 2009. P. 78–85.
17. The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks. URL: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-zone-zrp-04> (дата обращения: 18.09.2021).
18. Ratasich D., Höftberger O., Isakovic H., Shafique M., Grosu R. A self-healing framework for building resilient cyber-physical systems // *2017 IEEE 20th International Symposium on Real-Time Distributed Computing (ISORC)*. 2017. P. 133–140.
19. Höftberger O., Obermaisser R. Ontology-based runtime reconfiguration of distributed embedded real-time systems // *16th*

IEEE International Symposium on Object/component/service-oriented Real-time distributed Computing (ISORC 2013). 2013. P. 1–9.

20. Pallás-Areny R., Webster J. Sensors and Signal Conditioning. New York, John Wiley & Sons, 2001.

21. U. S. Access Board Draft Information and Communication Technology (ICT) Standards and Guidelines (U. S. Access Board, Washington, DC). 2010. URL: <https://www.accessboard.gov/attachments/article/560/draft-rule2010.pdf> (дата обращения: 18.09.2021).

22. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.

23. Городецкий В. И., Ларюхин В. Б., Скобелев П. О. Концептуальная модель цифровой платформы для киберфизического управления современным предприятием.

Часть 1. Цифровая платформа и цифровая экосистема // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 6. С. 323–332.

24. Городецкий В. И., Ларюхин В. Б., Скобелев П. О. Концептуальная модель цифровой платформы для киберфизического управления современным предприятием. Часть 2. Цифровые сервисы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 7. С. 387–397.

25. Кычкин А. В., Николаев А. В. Архитектура киберфизической системы управления проветриванием подземного горнодобывающего предприятия на базе платформы интернета вещей // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22, № 3. С. 115–123.

26. Ковалев С. П. Проектирование гетерогенных киберфизических систем с применением теории категорий // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23, № 2. С. 59–67.

A Model of a Decentralized Cyber-Physical System Resiliently Functioning in a Changing Environment

D. K. Levonevskiy, levonevskij.d@iias.spb.su, R. N. Iakovlev, iakovlev.r@mail.ru,

A. I. Saveliev, saveliev@iias.spb.su,

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, 199178, Russian Federation

Corresponding author: Levonevskiy Dmitry K., PhD, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: levonevskij.d@iias.spb.su

Accepted on December 03, 2021

Abstract

The article discusses the issues of decentralization and dynamic redistribution of roles in cyber-physical systems (CPS) designed for working in changing environments and especially open spaces, where there are increased risks of module failures and communication loss. In particular, decentralized methods for controlling the CPS behavior and ensuring the redundancy of their components and connections are investigated. A number of requirements for such systems are identified and it is noted what limitations in existing approaches impede the implementation of systems that satisfy these requirements at the physical, network and application layers. For different layers, behavior models are proposed, which provide autonomous role distribution between components. This made it possible to synthesize a structural-parametric model of an autonomous mobile CPS, focused on functioning in open areas and solving applied problems performed through the coordinated interaction of groups of mobile agents. The model takes into account aspects of system stability and its response to destructive influences. The advantages of the proposed models include task decentralization, absence of central, critical nodes and bottlenecks, no line of sight requirements or small distance between devices, ability to work in unexplored environments. The solutions can be applied primarily in the field of business and are suitable for use in industrial plants equipped with mobile robotic devices with cameras, for example, for agricultural tasks, or territorial exploration. The proposed approach makes possible to study the terrain more accurately, including unexplored areas with limited accessibility to humans. Also, the results obtained can be applied during rescue operations.

Keywords: cyber-physical systems, robots, cyber-physical systems architecture, distributed systems, decentralized systems, resilience, reliability

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 20-79-10325.

For citation:

Levonevskiy D. K., Iakovlev R. N., Saveliev A. I. A Model of a Decentralized Cyber-Physical System Resiliently Functioning in a Changing Environment. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 177–187.

DOI: 10.17587/mau.23.177-187

References

1. Shi W., Cao J., Zhang Q., Li Y., Xu L. Edge Computing: Vision and Challenges, *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, vol. 3, no. 5, pp. 637–646.

2. ISO/IEC 7498-1:1994 Information technology — Open Systems Interconnection — Basic Reference Model: The Basic Model, 1994, 68 p.

3. Lavric A., Popa V. A LoRaWAN: Long range wide area networks study, *International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN)*, 2017, pp. 417–420.

4. Cagatan G. K. B., Magsumbol J. A. V., Baldovino R., Sybingco, E., Dadios E. P. Connectivity analysis of wireless sensor network in two-dimensional plane using Castalia simulator, *9th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Infor-*

mation Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM), 2017, pp. 1–8.

5. Barriquello C. H., Bernardon D. P., Canha L. N., de Silva F. E. S., Porto D. S., da Silveira Ramos M. J. Performance assessment of a low power wide area network in rural smart grids, *52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2017, pp. 1–4.

6. Rabie T., Suleiman S. A novel wireless mesh network for indoor robotic navigation, *5th International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA)*, 2016, pp. 1–4.

7. Jiménez A. C., García-Díaz V., Bolaños S. A decentralized framework for multi-agent robotic systems, *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 417.

8. Kakamoukas G. A., Sarigiannidis P. G., Economides A. A. FANETs in Agriculture-A routing protocol survey, *Internet of Things*, 2020, p. 100183.

9. Khan A., Aftab F., Zhang Z. Self-organization based clustering scheme for FANETs using Glowworm Swarm Optimization, *Physical Communication*, 2019, vol. 36, p. 100769.

10. Srinivasan S. Design and use of managed overlay networks: thesis, Georgia Institute of Technology, 2007.

11. Majcherczyk N., Jayabalan A., Beltrame G., Pinciroli C. Decentralized connectivity-preserving deployment of large-scale robot swarms, *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2018, pp. 4295–4302.

12. Guo Y., Hu X., Hu B., Cheng J., Zhou M., Kwok R. Y. Mobile cyber physical systems: Current challenges and future networking applications, *IEEE Access*, 2017, vol. 6, pp. 12360–12368.

13. Foehr M., Vollmar J., Calà A., Leitão P., Karnouskos S., Colombo A. W. Engineering of next generation cyber-physical automation system architectures, *Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems*. Springer, Cham, 2017. pp. 185–206.

14. Schneider G. F., Wicaksono H., Ovtcharova J. Virtual engineering of cyber-physical automation systems: The case of control logic, *Advanced Engineering Informatics*, 2019, vol. 39, pp. 127–143.

15. Okpoti E. S., Jeong I. J. A reactive decentralized coordination algorithm for event-driven production planning and control: A cyber-physical production system prototype case study, *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, vol. 58, Part A, pp. 143–158.

16. Lambrou T. P., Panayiotou C. G. A Survey on Routing Techniques Supporting Mobility in Sensor Networks, *Proceedings*

of the 5th international conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Networks (MSN'09), 2009, pp. 78–85.

17. The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks, available at: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-zone-zrp-04> (accessed: 18.09.2021).

18. Ratasich D., Höftberger O., Isakovic H., Shafique M., Grosu R. A self-healing framework for building resilient cyber-physical systems, *2017 IEEE 20th International Symposium on Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, 2017, pp. 133–140.

19. Höftberger O., Obermaisser R. Ontology-based runtime reconfiguration of distributed embedded real-time systems, *16th IEEE International Symposium on Object/component/service-oriented Real-time distributed Computing (ISORC 2013)*, 2013, pp. 1–9.

20. Pallás-Areny R., Webster J. Sensors and Signal Conditioning, New York, John Wiley & Sons, 2nd Edition, 2001.

21. U. S. Access Board Draft Information and Communication Technology (ICT) Standards and Guidelines (U. S. Access Board, Washington, DC), 2010, available at: <https://www.access-board.gov/attachments/article/560/draft-rule2010.pdf> (accessed: 18.09.2021)

22. Ohtilev M. Ju., Sokolov B. V., Yusupov R. M. Intelligent technologies for monitoring and controlling the structural dynamics of complex technical objects. Moscow, Nauka, 2006, 410 p. (in Russian)

23. Gorodetsky V. I., Laryukhin V. B., Skobelev P. O. Conceptual Model of a Digital Platform for Cyber-Physical Management of a Modern Enterprises Part 1. Digital Platform and Digital Ecosystem, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 6, pp. 323–332 (in Russian).

24. Gorodetsky V. I., Laryukhin V. B., Skobelev P. O. Conceptual Model of a Digital Platform for Cyber-Physical Management of a Modern Enterprises. Part 2. Digital Services, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleni*, 2019, vol. 20, no. 7, pp. 387–397 (in Russian).

25. Kychkin A. V., Nikolaev A. V. Architecture of a Cyber-Physical System for the Mining Enterprise Ventilation Control Based on the Internet of Things Platform, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 3, pp. 115–123 (in Russian).

26. Kovalyov S. P. Designing Heterogeneous Cyber-Physical Systems Using Category Theory, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 2, pp. 59–67 (in Russian).



31 мая – 21 июня 2022 г. в Санкт-Петербурге
на базе ОАО "Концерн «ЦНИИ «Электронприбор»
состоится

XXVIII Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам

Тематика конференции

- Инерциальные датчики, системы навигации и ориентации
- Интегрированные системы навигации и управления движением
- Глобальные навигационные спутниковые системы
- Средства гравиметрической поддержки навигации

В рамках каждого направления рассматриваются:

- схемы построения и конструктивные особенности;
- методы и алгоритмы;
- особенности разработки и применения для различных подвижных объектов и условий движения (аэрокосмические, морские, наземные, подземные);
- испытания и метрология.

Контактная информация:

Тел.: +7 (812) 499 82 10 +7 (812) 499 81 57
Факс: +7 (812) 232 33 76 E-mail: icins@eprib.ru

