

УДК 681.518

В.А. Коковин

Интеллектуализация мехатронных модулей

Рассматриваются вопросы взаимодействия мехатронных устройств в режиме реального времени посредством событий и сообщений. Проанализирован подход при разработке распределенной системы управления мехатронными устройствами на основе стандарта IEC 61499. Дан анализ использования в промышленной автоматизации IoT, IoRT, рассмотрены преимущества и особенности использования данных сетевых компонентов. Дано понятие функционального сетевого компонента и предъявляемые к нему требования.

Ключевые слова: мехатронные устройства, распределенные системы управления, программируемые логические интегральные схемы, распределенный алгоритм

Об авторах

Коковин Валерий Аркадьевич – к.т.н., доцент кафедры АТПиП филиала «Протвино» государственного университета «Дубна». *E-mail*: alekskv@mail.ru. 142281, г. Протвино, Северный проезд, д. 9.

Разработка систем управления технологическими процессами связана с построением модели через формализацию входных параметров и параметров текущего состояния этого процесса. Управление в реальном времени взаимосвязанными, территориально и алгоритмически распределенными технологическими системами с параллельными процессами представляет достаточно сложную задачу. Дополнительные трудности возникают, когда в качестве исполнительных органов технологического процесса используются взаимосвязанные мехатронные устройства, образующие *мехатронные системы*.

Мехатронные компоненты (*mechatronic components* – *MCs*) можно определить как устройства, в которых сочетаются узлы точной механики с электронными вычислительными и управляющими компонентами, интерфейсными и силовыми модулями. Такое сочетание приводит к реализации новых свойств этого устройства в плане создания дополнительных функциональных возможностей. При этом все узлы мехатронных устройств подчинены решению

общей для всех узлов задачи. За последние десятилетия понятие *MC* значительно расширилось, а мехатроника стала междисциплинарной отраслью, в которую могут входить такие дисциплины, как телекоммуникация, робототехника, силовая электроника и т.д.

Наиболее широко *MC* 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.

Очень часто электронно-управляющие составляющие *MC* называют *embedded control system*, что предполагает некоторую завершенность и самодостаточность таких систем, и наличие в них программного обеспечения. Современные *MCs*, используемые в распределенных системах, имеют высокопроизводительные вычислители, работающие в среде операционных систем с поддержкой основных коммуникационных протоколов.

В настоящее время мехатронные устройства и мехатронные системы все чаще используются как объекты автоматизации распределенных технологических систем

(*distributed process system — DPS*). В работе [1] рассмотрены основные требования к *MCs* как к объектам *DPS*. *MCs* должны иметь:

- интерфейс сигналов (событий) и данных для взаимодействия с другими *MCs*;
- интерфейс ввода-вывода параметров управляемого процесса;
- набор данных для хранения информации о состоянии объекта управления;
- алгоритм управления этим объектом.

Особенности разработки программного обеспечения для распределенных систем управления

Система управления, разработанная на основании стандарта *IEC (International Electrotechnical Commission) 61499*, представляет набор устройств, взаимодействующих между собой посредством коммуникационной сети [2]. Архитектура, определенная стандартом *IEC 61499*, строится на основе определений *IEC 61131-3* [3]. В основе архитектуры используется *FB (Function Block)* 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 реализует функции, описываемые с помощью приложений (*applications*). Эти приложения могут распределяться среди нескольких устройств (*devices*), в качестве которых могут использоваться *PLC, programmable automation controller (PAC)* [4] и цифровые вычислители на платформе ПЛИС. 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.

FB IEC 61499 представляет собой независимую программную единицу, которая может быть реализована, протестирована и использована отдельно от других *FB* [5]. Стандарт *IEC 61499* определяет три типа блоков: *Basic Function Block, Service Interface Function Block* (через эти *FBs* происходит взаимодействие мехатронных устройств) и *Composite Function Block* (содержит цепь *FBs*). В работе [6] подчеркивается, что архитектурно-ориентированный подход при проектировании сложных программных систем в настоящее время является доминирующим. На рис. 1 представлен пример обобщенной платформи-независимой модели *IEC 61499* приложения, состоящего из трех функциональных блоков, объединённых сетью, по которой циркулируют потоки событий и данных. *FB* могут находиться в определенных состояниях, заданных алгоритмом функционирования *FB*. Переход из одного состояния в другое может инициироваться событием, поступающим от соседнего *FB*.

Большинство работ, связанных с разработкой проектов автоматизации на основании *IEC 61499*, носят исследовательский характер. Несмотря на явные преимущества стандарта (рассмотренные ранее) при проектировании распределенных систем управления, широкого внедрения в промышленность пока не произошло. В работе [6] отмечены проблемы стандарта, мешающие полноценно его использовать: семантические проблемы, отсутствие четких проработанных методологий проектирования, ограничения на использование различных моделей выполнения и другие. Также отмечается отсутствие интегрированных методологий проектирования, облегчающие проектирование на основе компонентов на протяжении всего цикла проектирования систем автоматизации.

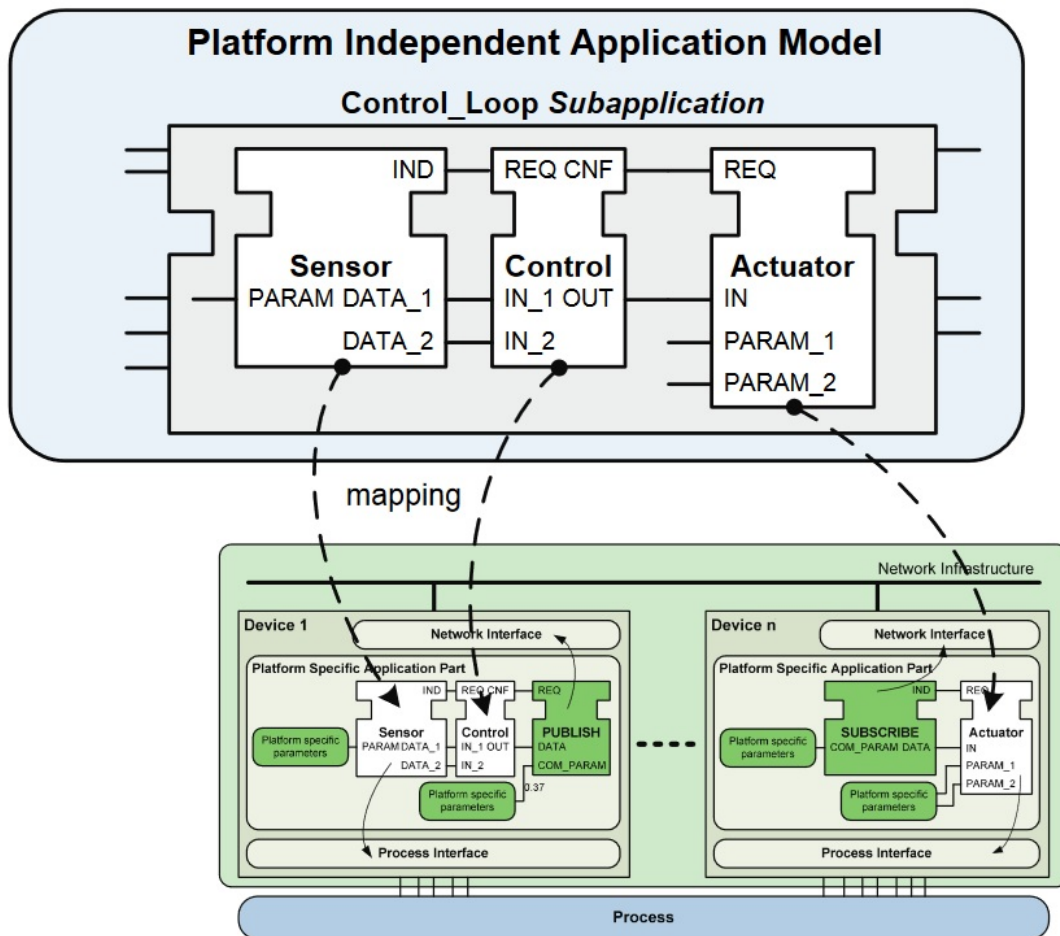


Рис. 1. Обзор независимой от платформы модели приложения IEC 61499 и ее связь с устройствами управления в распределенной системе управления [6]

Кооперация мехатронных компонентов распределенной технологической системы с использованием сетевых технологий

Концепция *Internet of Things (IoT)* [7], названная *Industrial IoT*, добавила интеллектуальные возможности производственному оборудованию, процессам и управлению и успешно внедряется в производство. Участие ведущих *Hardware/Software* фирм, таких как *Intel, Bosch Si, ABB* и других, обеспечивает успешную интеграцию компонентов *IIoT* в промышленную автоматизацию [8]. Интеллектуальные производственные решения этих компаний используют подключенные датчики и устройства для повышения производительности машины и человека в режиме реального времени и передачи данных в облако

для более глубокого анализа. 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 [9] представлена концепция *IoRT*, в которой подчеркивается огромная гибкость при разработке и внедрении новых приложений для сетевой робототехники при достижении цели предоставления распределенных вычислительных ресурсов в качестве основной утилиты. В этих сетевых объединениях (*IIoT* and *IoRT*) термин *internet* можно трактовать как объединение

устройств через компьютерные сети, которые используют протоколы глобальных и локальных сетей при взаимодействии друг с другом. Кроме того, участниками сетевых объединений используется огромное многообразие интерфейсов и протоколов при получении информации от сенсоров и при передаче управляющих сигналов к актуаторам (*actuators*). Главное отличие устройств *IoRT* от *IoT* заключается в том, что первые могут воздействовать на окружающую физическую среду, а иногда даже изменять ее.

Интеллектуализация мехатронных модулей

В работе [10] дано понятие *Intelligent Mechatronic Component (IMC)* и сформулированы условия использования таких компонентов в *DPS*, разработанной на основании *IEC 61499*. Любой *IMC* может содержать следующие элементы:

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

В технологических системах среди распределенных подсистем могут быть не только мехатронные компоненты, но и, например, самодостаточные электротехнические устройства со встроенным интеллектом, т.е. устройства, в составе которых нет механики. Под самодостаточностью будем понимать способность устройств решать самостоятельно часть распределенной технологической задачи, возложенной на них, но которым необходимо об-

мениваться информацией с другими участниками через формирование событий или сообщений. Условно такие устройства можно назвать функциональными сетевыми компонентами (ФСК). К данному классу устройств будем относить устройства, которые имеют возможность получать и обрабатывать информацию (наличие вычислителя с сетевыми портами), диагностировать состояние ФСК (с возможностью прогнозирования отказов), имеющие физическую природу (электроника и/или механика) и способные воздействовать на окружающую физическую среду.

В работе [11] представлена методика создания прототипа *Intelligent Power Electronic Converter (iPEC)* с возможностью удаленного управления и сетевого взаимодействия с другими устройствами *DPS*. В разработанном прототипе *iPEC* силовой модуль реализует функцию мощного генератора напряжения инфранизких частот. Этот генератор может использоваться для питания оборудования (пьезоэлементов) при ультразвуковой очистке деталей или для решения геофизических задач (очистка скважин). Пример использования устройств типа *iPEC* можно найти в работе [12]. В этой работе представлено решение технологической задачи по формированию равномерного воздействия ультразвуковых колебаний в жидкой среде на обрабатываемое изделие. Для решения задачи предлагается использовать целую матрицу распределенных ультразвуковых преобразователей, размещенных определенным образом. Управляющие сигналы, поступающие на преобразователи, формируются таким образом, что возникают области с низким и высоким давлением ультразвукового поля, что вызывает возникновение направленных потоков и способствует очистке изделий. К формирователям управляющих сигналов предъявляются жесткие требования по времени реакции.

Приведенный пример показывает необходимость создания как в составе *MCs*, так и в составе других участников *DPS* универсального встроенного модуля управления, который мог бы обеспечивать решение следующих основных задач:

- коммуникационная задача глобальной сети;
- коммуникационная задача локальной сети;
- задача управления для реализации встроенного алгоритма;
- задача обработки информации с сенсоров.

В распределенной технологической системе участники, названные нами ФСК, могут использоваться как самостоятельные технологические подсистемы, а могут объединяться в кластеры из нескольких ФСК по аналогии с *Composite Function Block (IEC 61499)*. Исходя из этого, взаимодействие отдельных ФСК может осуществляться по нескольким коммуникационным сетям — глобальной и локальной. Глобальная сеть доступна всем участникам обмена, а локальная сеть доступна только устройствам кластера. При обмене по локальной сети добавляется дополнительное требование — детерминированность передаваемых событий и сообщений.

Взаимодействие устройств *DPS* необходимо для координации их работы, включая синхронизацию при реализации распределенного алгоритма. В работе [11] обосновывается использование гибридной конфигурации вычислительно-управляющей части устройств типа ФСК. В составе устройств может быть несколько разнородных вычислителей, построенных на основании различных моделей вычисления. Это могут быть вычислители, реализованные на процессорах с *ARM*-архитектурой и на платформе ПЛИС. Совместное использование двух разных вычислителей дает наиболее гибкие функциональные возможности.

Важными преимуществами использования *ARM*-контроллеров в ФСК являются высокая производительность и низкое потребление энергии. Это дает возможность построить универсальный *embedded computer* как для стационарных технологических систем, так и для мобильных.

ARM-контроллеры, используемые в ФСК, решают следующие задачи: коммуникационный обмен по глобальной сети (*LAN*), загрузка конфигураций вычислителей, выполнение встроенного алгоритма, реализация облачных технологий, видеообработка объектов для машинного зрения и т.д. Сетевые контроллеры глобальной сети должны поддерживать протоколы *TCP/IP*, которые, как правило, присутствуют в современных *embedded computers*.

Для решения задачи взаимодействия между ФСК и устройствами кластера идеология случайного доступа к сети не подходит, т.к. невозможно обеспечить детерминированность доставки сообщений. Поэтому необходима быстрая локальная сеть, которая не занимала бы ресурсы микроконтроллера и аппаратно (например, на основе модели конечных автоматов) осуществляла сетевой обмен. Кроме того, для достоверности передаваемых данных и для повышения общей надежности систем необходимо использовать на сигнальном уровне при передаче событий и сообщений специальную кодировку. Контроллеры такой сети удобно реализовать на платформе ПЛИС.

Пример упрощенной структуры вычислителя ФСК, имеющего в своем составе поддержку обмена по локальной и глобальной сетям, приведен на рис. 2. В составе вычислителя находятся:

- *ARM*-контроллер для проводного и беспроводного сетевого обмена с другими участниками глобальной сети, а также для конфигурирования вычислителя;
- контроллер локальной сети на платформе ПЛИС для детерминированного обмена с другими ФСК кластера через *DS-link*, для управления силовыми модулями и диагностирования их состояния в реальном времени;
- преобразователи уровней сигналов ПЛИС в уровни *LVDS (DS-links)*.

На вход ПЛИС ФСК встроенного вычислителя поступают события, которые необ-

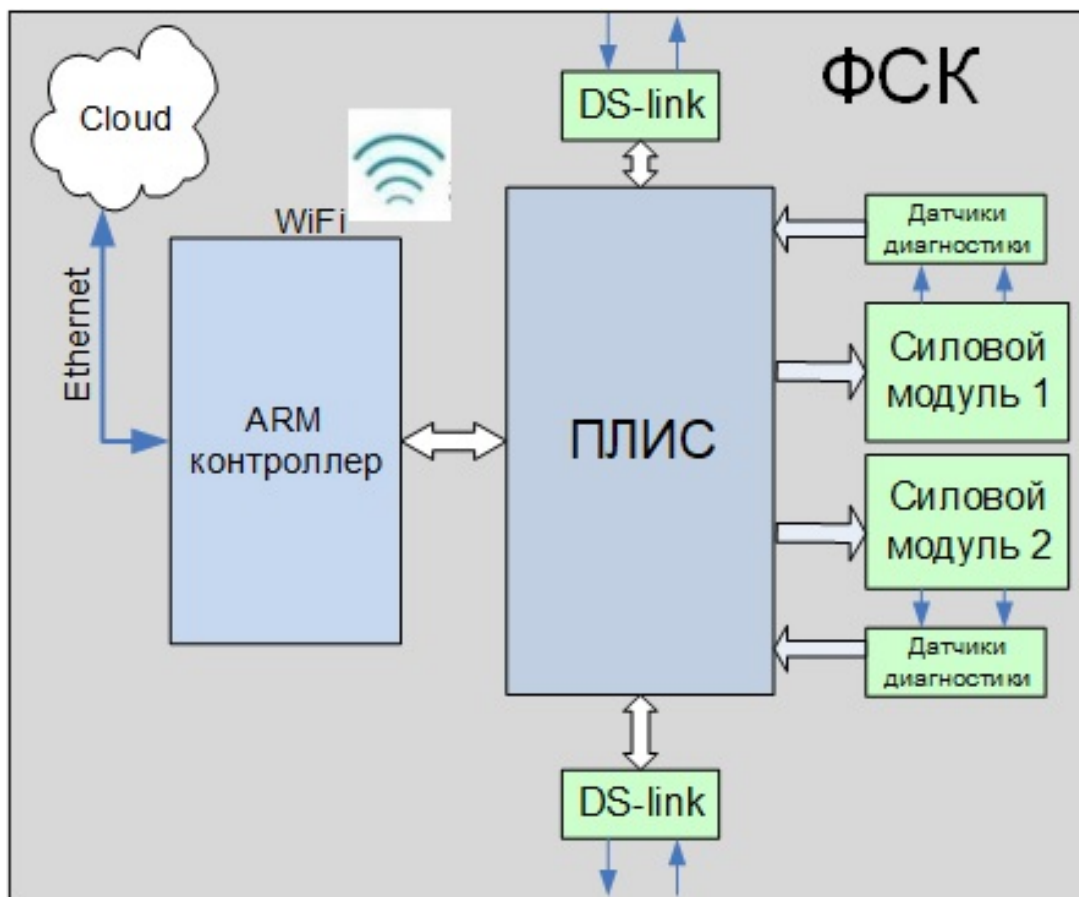


Рис. 2. Упрощенная структура вычислителя ФСК

ходимо передать другим ФСК кластера. На рис. 2 не показана сетевая поддержка нижнего уровня — уровня сенсоров. Таким образом, можно сделать вывод, что для полноценной работы в составе распределенной технологической системы каждый *FNC* должен иметь как минимум три уровня сетевой поддержки.

Заключение

Интеллектуализация мехатронных устройств позволяет расширить функциональность технологических систем. Интеллект мехатронных компонентов обеспечивается возросшей вычислительной производительностью управляющих контроллеров, дополнительной способностью по видеообработке в реальном времени и высокой сенсорной чувствительностью. Многие алгоритмические задачи, которые раньше решались с привлечением централизованного вычислителя, те-

перь могут быть решены на уровне самого мехатронного компонента. Возросший интеллект *MCs* выдвинул повышенные требования по организации проектирования распределенных систем управления, усложнил решение задачи взаимодействия распределенных технологических подсистем. Достаточно долгое внедрение стандарта *IEC 61499* показало всю сложность решаемой задачи.

Развитие мехатронных компонентов как сетевых устройств идет в направлении унификации встроенных вычислителей по предлагаемым вычислительным и коммуникационным сервисам. Внедряются стандарты проектирования распределенных систем управления, которые определяют идеологию взаимодействия распределенного алгоритма технологической задачи.

Библиографический список

1. Pang C., Vyatkin V. IEC 61499 Function Block Implementation of Intelligent Mechatronic Component // 8th IEEE Conference on Industrial Informatics. INDIN, 2010. P. 1124–1129.
2. International Standard IEC 61499. Function blocks for industrial-process measurement and control systems. Part 1: Architecture // International Electrotechnical Commission. Geneva. 2005. 245 p.
3. International Standard IEC 61131-3 (edition 2.0): Programmable Controllers // International Electrotechnical Commission. Geneva. 2003. 230 p.
4. Programmable Automation Controller. – URL: <http://www.cannonautomata-products.com/programmable-automation-controller.html>. Accessed Nov. 28, 2019.
5. Dubinin V., Vyatkin V. On Definition of a Formal Model for IEC 61499 Function Blocks. // EURASIP Journal on Embedded Systems. 2008. 10 p.
6. Zoitl A., Vyatkin V. IEC 61499 Architecture for Distributed Automation: the ‘Glass Half Full’ View // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2009. 3(4). P. 7–23. Doi: 10.1109/MIE.2009.934789.
7. Giusto, Iera A., Morabito G., Atzori L. The Internet of Things: 20th Tyrrhenian Workshop on Digital Communications. New York, NY, USA: Springer, 2010.
8. IIoT Companies (Online). – URL: <https://www.postscapes.com/iiot-companies>. – Accessed Nov. 10, 2019.
9. Ray P. Internet of robotic things: Concept technologies and challenges. // IEEE Access, 2017. V. 4, Jan. – Pp. 9489-9500.
10. Pang C., Vyatkin V. IEC 61499 Function Block Implementation of Intelligent Mechatronic Component // 8th IEEE Conference on Industrial Informatics. INDIN, 2010. P. 1124–1129.
11. Kokovin V., Diagilev V., Uvaysov S., Uvaysova S. Intelligent power electronic converter for wired and wireless distributed applications // In Proc. of the IEEE International Conference SED-2019. 2019. P. 1–5. Doi: 10.1109/SED.2019.8798455.
12. Достанко А.П., Аваков С.М., Агеев О.А. Технологические комплексы интегрированных процессов производства изделий электроники // Национальная академия наук Беларуси, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Минск: Беларуская навука, 2016. 253 с.

*Поступила в редакцию
06.05.2020*

ABSTRACTS

Nepochatykh S.M., Patsyuk M.A. Events simulation from the $p(^{12}\text{C},^{10}\text{B})p, pn$ reaction taking into account two-nucleon short range correlations in the carbon nucleus to study the BM@N setup response to the final state protons

The BM@N experiment (Baryonic Matter at Nuclotron) is one of the part at the NICA Megascience project. The BM@N physical program involves the study of two-nucleon Short Range Correlations (SRC) in the carbon nucleus. The object to study SRC is proton-neutron pair knockout reaction, $p(^{12}\text{C},^{10}\text{B})p, pn$, from the carbon nucleus. Events simulation from this reaction allows to obtain a view on the angular correlations of protons hitting in the detecting system, and on the contribution from different typer that can also involve secondary particles.

Keywords: SRC, similation, angular correlations.

Kudaibergenova E., Seitkali A., Rodin A. M., Krupa L. Optimization of the solid-state separation system of volatile products of complete fusion reactions with heavy ions

The stability of the separation efficiency of the MASHA setup was studied under high current conditions and long-term experiments. The system of solid-state separation of volatile products of fusion reactions was optimized, a new design of a "solid-state hot catcher" based on thin layers of graphene and carbon nanotubes was designed and tested. The experiments showed the possibility of using these materials at a heavy ion beam intensity ~ 0.5 part $\cdot \mu\text{A}$. For constant monitoring of the installation separation efficiency during the experiment, 16-strip silicon detector was placed in the intermediate focal plane. The control system was debugged in an experiment for simultaneously measure two complete fusion reactions: $^{40}\text{Ar} + ^{144}\text{Er}$ in the intermediate focal plane and $^{40}\text{Ar} + ^{166}\text{Er}$ in the main focal plane of the mass spectrometer.

Keywords: mass-spectrometer MASHA,

ISOL method, complete nuclear fusion reaction, "hot catcher".

Khrapunova E.M., Lasareva G.A., Zhmylev P.Yu. Orchids of Dubna

An annotated list of the orchid city of Dubna is given. For each species, brief information is given on its distribution, biology, ecology, the state of populations is described, and recommendations for protection are given.

Keywords: Orchids, protected species, Moscow region, Dubna.

Dao Anh Quan, Uvajsov S.U., Chernoverskaya V.V. Development of a method for thermal diagnostics of radio-electronic devices using an artificial neural network

The current level of development of science and technology allows us to speak about the high quality and stable operation of electronic devices used in the manufacturing industry, which, in turn, ensures compliance with technological requirements and reduce production costs.

Keywords: diagnostics, thermal model, latent defect, thermogram, radio-electronic equipment, thermal model.

Zang Wang Thanh, Uvajsov S.U., Chernoverskaya V.V. Development of a method for optimal placement of elements on the switching field of the printing unit in order to provide the specified thermal modes of radio electronic means

Currently technical design is one of the most important stages of development and production of electronic tools that are widely used in the electronics industry. At the stage of design studies in the framework of solving the problem of improving the quality and reliability of electronic devices manufactured in the form of printed circuit assemblies (PU), receive a constructive implementation and the main performance characteristics of future products.

Keywords: optimization, thermal regime, placement of elements, printing unit, reliability

of electronic means.

Pham Le Quoc Khanh, Uvajsov S.U., Chernoverskaya V.V. Development of a method of shock diagnostics for detection of defects of electronic means

The article considers the method of shock diagnostics of electronic means defects by generating test shock effects. The existing problems of diagnostics of electronic means constructions are analyzed and the relevance of the research is proved. An experimental installation is presented and a study is conducted on a specific object.

Keywords: diagnostics of defects, shock impact, electronic means, mechanical defects, artificial neural network.

Kokovin V.A. Intellectualization of mechatronic modules

The paper discusses the interaction of mechatronic devices in real time through events and messages. The approach to the development of a distributed control system for mechatronic devices based on the *IEC 61499* standard is analyzed. The analysis of the use of *IoT*, *IoRT* in industrial automation is given, the advantages and features of using these network components are considered. The concept of a Functional Network Component and the requirements for it are given.

Keywords: mechatronic devices, distributed control systems, programmable logic integrated circuits, distributed algorithm.