

6. Leskov A. G., Seliverstova E. V. *Raschet sil kontaktного vzaimodeystviya mezhdu deformiruyemyim ob'yektom i zven'yami zakhvatnogo ustroystva manipulyatora* (Computation of contact interaction forces between deformed object and units of manipulator gripping device), *Trudy Mezhdunarodnoy Nauchno-Tekhnicheskoy Konferentsii "Ekstremalnaya Robototekhnika"*, 2016, pp. 129—133 (in Russian).

7. Ledenev V. V., Odnolko V. G., Nguyen Z. H. *Teoreticheskiye osnovy mekhaniki deformirovaniya i razrusheniya* (Theoretical Foundations of Deformation and Fracture Mechanics), Tambov, Publishing house of FGBOU VPO "TG TU", 2013, 312 p. (in Russian).

8. Prattichizzo D., Bicchi A. Consistent task specification for manipulation systems with general kinematics, *ASME Journal of Dynamics Systems Measurements and Control*, 1997, vol. 113, pp. 760—767.

9. Leskov A. G., Bazhinova K. V., Moroshkin S. D., Feoktistova E. V. *Postroyeniye modeley kinematiki ispolnitel'nykh mekhanizmov manipulyatsionnykh robotov s ispol'zovaniyem blochnykh matrits* (Model building of kinematics for servo units of manipulating robots using partition matrices), *Inzhenernyy Zhurnal: Nauka i Innovatsii. Elektronnoye Nauchno-Tekhnicheskoye Izdaniye*, 2013, no. 9 (21), available at: <http://engjournal.ru/articles/954/954.pdf> (date of access: 22.05.2017). (in Russian).

УДК 001.4:004.2:007.52

DOI: 10.17587/mau.18.744-748

В. Н. Казанцев, канд. техн. наук, зам. нач. сектора, kazantsev@rtc.ru,
В. А. Павлов, канд. техн. наук, стар. науч. сотр., зам. нач. сектора, vapavlov@rtc.ru,
ГНЦ РФ "Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт
робототехники и технической кибернетики", г. Санкт-Петербург

Терминология и подходы к определению модульной структуры роботов¹

Рассмотрен общий подход к интерпретации существующей терминологии и применению классификации модульности компонентов сервисных роботов. Концепции разработки модульной архитектуры роботов рассмотрены с позиций компонентного и функционального подходов. Представлен краткий обзор разрабатываемых в настоящее время методов морфотроники и тактно-канального метода для структурного проектирования роботов.

Ключевые слова: робот, модульность, модуль, модульная архитектура робота

В международном стандарте [1], выпущенном тремя международными организациями ИСО, МЭК и IEEE, дано следующее определение модульности: "*Модульность (modularity):* качество, при котором система или компьютерная программа состоит из дискретных компонентов таких, что у которых изменения в одном компоненте оказывают минимальное влияние на другие компоненты". Такие компоненты и являются модулями в соответствии с определением из проекта международного стандарта ИСО [2]: "*Модуль (module):* компонент с особыми свойствами, обеспечивающими удобство проектирования, интероперабельность, легкость реконфигурирования, простоту интеграции и т. д.". Например, при проектировании модуль может рассматриваться в виде "черного ящика", для интеграции модуль должен иметь доступные интерфейсы, а интероперабельность обеспечивается унификацией и стандартизацией интерфейсов. При этом любые изменения, производимые внутри "черного ящика", никак не влияют или оказывают минимальное влияние на работу других модулей системы.

Существуют несколько классификаций модулей. По функциональному признаку модули подразделяются на основные, вспомогательные, специальные и адаптивные [3]. Кроме того, модули могут быть необходимыми и возможными.

Основные модули являются необходимыми для системы и должны обязательно присутствовать в системе, например, манипулятор робота. Они реализуют основные функции системы непосредственно или в комбинации с другими модулями.

Вспомогательные модули реализуют вспомогательные функции системы, поддерживающие выполнение основных функций, которые реализуются основными модулями, например модули, обеспечивающие энергообеспечение или смазку. Вспомогательные модули включаются в систему вместе с обслуживаемыми ими основными модулями. Вспомогательные модули, как правило, являются необходимыми.

Специальные модули создаются для реализации функций, специфичных для конкретных задач, которые не относятся к функциям, присущим системе для всех случаев ее применения, например, захватное устройство манипулятора, предназначенное для работы с конкретным типом объектов. В данной классификации специальные модули являются возможными модулями, так как они являются возможными дополнительными аксессуарами для основных модулей.

Адаптивные модули реализуют функции адаптации к другим системам или ограничивающим условиям. Характеристики адаптивных модулей не полностью фиксируются заранее и, следовательно, позволяют их настраивать в зависимости от конкретных условий применения. Примером могут быть модули, обеспечивающие изменение клиренса

¹ Результаты исследований были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 8.9364.2017/8.9.

мобильного робота в зависимости от условий местности. Адаптивные модули могут быть как необходимыми, так и возможными.

Отдельно в данной классификации выделяются компоненты, специфичные для конкретного заказчика, которые не реализуются модулями, входящими в базовое исполнение модульной системы. Такие специфические функции могут быть реализованы не в модульном исполнении.

По структурному признаку модули классифицируются как *базовые* (входные, обрабатывающие, выходные и инфраструктурные), *составные* (состоят из нескольких базовых модулей) и *главные* (состоят из нескольких базовых и/или составных модулей, являются аналогом основных модулей по функциональной классификации) [2]. Модули могут быть аппаратными и/или программными.

Входной модуль (input module): тип модуля, предназначенный для сбора информации и данных, сигналов или команд, которые необходимы для эффективного функционирования модуля, робота или системы роботов. Примером являются сенсоры систем осязания или модули ввода команд пользователя. Базовые входные программные модули соответствуют базовым входным аппаратным модулям. Примерами базовых программных модулей являются модули, воспринимающие сигналы от датчиков и телевизионных камер, воспринимающие сигналы от тактильных датчиков, воспринимающие звуковые сигналы, модули ввода данных от пользователя и т. д.

Выходной модуль (output module): тип модуля, предназначенный для выработки и/или доставки информации и данных, сигналов, энергии, мощности или работы, которые необходимы для эффективного функционирования робота или системы роботов. Примером являются исполнительные приводы для перемещения робота или части робота. Более сложные модули исполнительных приводов, включающие сенсоры, драйверы, микропроцессорные узлы и силовую электронику, относятся к составным выходным модулям.

Обрабатывающий модуль (processing module): тип модуля, предназначенный для преобразования данных, сигналов и информации в соответствии с назначением модуля, например, часть аппаратных средств, необходимых для поддержки выполнения алгоритмов и предоставления инфраструктуры системам управления исполнительными устройствами. Обрабатывающим программным модулям не требуется доступ к аппаратным модулям через слой абстракции, так как они реализуют только вычислительные алгоритмы, например, планирование траектории, решение задачи обратной кинематики, фильтрацию, математические расчеты, навигацию, распознавание и т. д. Обрабатывающие программные модули могут быть как базовыми, так и составными в зависимости от их сложности. Обрабатывающие программные модули получают входные данные от входных программных модулей и

посылают выходные данные выходным программным модулям.

Инфраструктурный модуль (infrastructure module): тип модуля, реализующий основные возможности и сервисы, необходимые для конфигурирования и реконфигурирования модулей робота при создании конкретных реализаций робота. Примерами аппаратных инфраструктурных модулей являются блок питания, шина питания, шина данных или механический корпус. К программным инфраструктурным модулям относится промежуточное программное обеспечение (middleware). Интеллектуальный источник питания робота является составным инфраструктурным модулем.

Общие абстрактные определения и наименования модулей конкретизируются при описании модульной архитектуры конкретного класса роботов. Классификация модулей по функциональному признаку разработана для машиностроительной продукции и малоприменима для описания структуры систем. Структурная классификация модулей в большей степени ориентирована на описания модулей различных систем и подсистем робота, но использовать ее для описания модульной структуры механических устройств достаточно сложно. При определении модульной структуры роботов целесообразно использовать обе классификации.

Общей технологии проектирования модульной архитектуры роботов в настоящее время не существует. Сформированы скорее различные для аппаратных средств и программного обеспечения роботов подходы, принципы и некоторые вспомогательные методы структурного анализа.

Для разработки модульной архитектуры аппаратных средств используются компонентный и/или функциональный подходы. При *компонентном подходе* структура изделия описывается с помощью так называемой "Матрицы структурного проектирования" (англ. Design Structure Matrix, DSM), представляющей собой обычную матрицу смежности, расширенную столбцом и строкой входных и выходных воздействий [4]. Заголовки столбцов и строк матрицы соответствуют входам и выходам компонентов, расположенных на главной диагонали матрицы. Связи компонентов в ячейках матрицы инструментальными программными средствами DSM классифицируются по типам связей: механическая, гидравлическая и т. д. Матрица, составленная, например, из главных компонентов робота, может быть декомпозирована простой вставкой вместо компонента на главной диагонали соответствующей этому компоненту DSM матрицы. Декомпозиция выполняется до уровня типовых технических решений и заимствованных компонентов.

В целях структурного анализа матрица DSM приводится к треугольному виду для расслоения структуры связей между компонентами. Операция преобразования, в силу разреженности структурных матриц, выполняется методом уплотнения. Все связи исходной матрицы сохраняются, но столбцы

или строки треугольной матрицы будут соответствовать определенному слою в структуре компонентов робота. Обратные связи при уплотнении остаются симметричными относительно главной диагонали матрицы. Для определения модулей в структуре робота используется операция кластеризации компонентов. Например, сформировав метрику оценки связности группы компонентов с другими элементами структуры робота и используя генетические алгоритмы, можно определить группы компонентов с минимальной внешней связностью, которые и будут являться возможными вариантами модулей в структуре изделия. Применение матрицы DSM для определения модульной архитектуры особенно эффективно при большом числе компонентов в составе робота. Метод DSM поддерживается инструментальными средствами Loomo, Cambridge Advanced Modeller, Lattix Enterprise Suite и другими программными инструментами.

Функциональное модульное проектирование архитектуры применяется для анализа состава функций, реализующих требования технического задания и декомпозиции функций на подфункции (операции) в целях определения состава модулей, реализующих функционал проектируемого робота. Для функционального модульного проектирования разработан метод развертывания функции модульности (англ. Modular Function Deployment, MFD) [5], основу которого составляет построение специальной морфологической таблицы, называемой "Матрица идентификации модулей" (англ. Module Identification Matrix, MIM). Заголовки столбцов таблицы содержат наименования *независимых друг от друга функций* проектируемого изделия и типов модулей (базовый, составной, главный), реализующих эти функции. Заголовки строк таблицы содержат следующий перечень факторов, влияющих на возможность реализации функции в изделии в виде отдельного модуля:

1. Компонент или система не будут перепроектироваться в течение жизненного цикла робота (заимствованное техническое решение или необходимость в серьезных инвестициях в технологии производства). В некоторых случаях компоненты или системы ожидаемо будут модифицироваться, и для сохранения модульной архитектуры изделия их также следует объединить в отдельный модуль.

2. Существует несколько вариантов реализации функции с различными спецификациями, учитывающих различные требования заказчика и вероятные их изменения. Возможно создание одного унифицированного модуля или ряда модулей с унифицированными интерфейсами.

3. Функция реализуется компонентом, используемым во всех изделиях модельного ряда.

4. Существующий технологический процесс позволяет реализовать функцию в виде отдельного модуля.

5. Функция реализуется унифицированным или заимствованным компонентом, прошедшим испытания перед поставкой.

6. Компоненты объединяются в один модуль для облегчения технического обслуживания, ремонта и замены.

7. Заказчику предоставляется возможность самостоятельно вносить изменения в изделие путем замены модуля.

8. Компоненты объединяются в один модуль для облегчения или обеспечения безопасности утилизации.

Перечень факторов модульности зависит от назначения проектируемого изделия и может уточняться. В матрице идентификации модулей каждой функции изделия выставляется экспертная оценка степени использования факторов модульности. Функции с наибольшими суммарными оценками отбираются для их реализации в виде отдельных модулей. Отобранные модули являются опорными точками для дальнейшего проектирования модульной архитектуры изделия. Для функций, отобранных для реализации в виде отдельных модулей, разрабатываются матрицы MIM с подфункциями второго уровня иерархии и т. д. В результате формируется иерархическое дерево модулей. Листьями дерева являются типовые (заимствованные) технические решения или новые компоненты, дальнейшая декомпозиция которых на подфункции нецелесообразна. Разработка модульной архитектуры является итерационной процедурой, чередующей подходы к проектированию "сверху-вниз" и "снизу-вверх". Функциональный подход разработки модульной архитектуры сервисных мобильных роботов базируется на поведенческих моделях целевого назначения робота. Например, для медицинских роботов на передний план при проектировании модульной архитектуры выступают оценки риска и минимизация возможного ущерба здоровью.

Во многих случаях из-за сложности и новизны проектируемого изделия обобщенную архитектуру системы составить экспертным путем с достаточной степенью достоверности не представляется возможным. Подход к формальному синтезу обобщенной архитектуры систем рассмотрен в работе [6], где предложена многомерная модель для моделирования сложных систем, получившая наименование "морфотроника", которая является некоторым обобщением понятия "мехатроника". Слагаемое "морфо" в словосочетании означает форму, структуру, сеть, организацию и вместе со словом "мехатроника" определяет некоторую структуру, состоящую из мехатронных устройств. В теории морфотроники предлагается новый класс преобразований для определения оптимальных взаимодействий, которые связывают *идеальную* коммуникационную модель системы с внешними контекстными условиями. С использованием аппарата неевклидовой геометрии разработан инструментарий контекстного моделирования и определения операций про-

ектирования идеальной структуры системы, являющейся прообразом обобщенной архитектуры. Концепция морфотроники базируется на теории бондграфов [7]. В теории бондграфов физические процессы в системе любой природы описываются процессами перераспределения энергии в анализируемой системе. Вводится обобщенная система характеристик. Например, обобщенному потоку в морфотронике соответствуют линейная и угловая скорости в механических системах, сила тока в электрических системах, объем расхода в гидравлических и пневматических системах; обобщенному усилию соответствуют сила и крутящий момент в механике, напряжение в электротехнике и давление в гидравлике. Аналогично вводятся и другие обобщенные характеристики. Таким образом, используя принципы теории бондграфов, можно с единых позиций описать процессы в смешанных системах, состоящих из механических, электронных, гидравлических и других устройств, причем этот подход распространяется и на описание динамических систем с использованием хорошо известного в теории управления метода пространства состояний. Бондграфы строятся не на общих рассуждениях, а на строгом формальном выводе с изменениями компонентов тензора преобразования в соответствии с переменными моделируемой системы. Энергетические модели могут быть полезны для описания обобщенных структур роботов космического назначения и роботов, предназначенных для функционирования в нескольких средах.

Одним из подходов, дополняющих обычные методы проектирования архитектур роботов, является функциональный подход, разрабатываемый Институтом проектирования изделий (IPEK) Технологического университета Карлсруэ. В публикации [8] представлены следующие основные понятия разработанного в IPEK контактно-канального подхода (Contact & Channel Approach) для комплексного моделирования функций, релевантных физическим свойствам механических систем.

Рабочие поверхности (Working Surfaces, WS) формируются парами (Working Surface Pairs, WSP) всех попарных интерфейсов между компонентом и его окружением. Это может быть твердая поверхность тела или границы с поверхностями жидкостей, газов или полей, которые находятся в постоянном или случайном контакте с рабочей поверхностью. Они принимают участие в обмене энергией, материалами и информацией в рамках технической системы.

Канальные и опорные конструкции (Channel and Support Structures, CSS) представляют собой физические компоненты, объемы жидкостей, газов или пространственных поддерживающих полей, которые соединяют только две рабочие поверхности пар.

Ограничивающие поверхности (Limiting Structures, LS) являются поверхностями, которые не участвуют в выполнении функций рассматриваемой

системы, но являются потенциальными рабочими поверхностями.

Для моделирования мехатронных систем с динамическими структурами контактно-канальный подход дополняется конструкциями унифицированного языка моделирования UML2 инструментальной среды инженерного проектирования систем SysML, разработанной в 2007 году группой OMG. В IPEK для SysML разработано расширение CCA, позволяющее моделировать функциональную архитектуру системы с использованием контактно-канального подхода. Функциональные компоненты контактно-канального подхода последовательно моделируются на диаграммах деятельности, диаграммах компонентов и связываются с физическими системами. В работе [9] подробно обсуждается синтез сустава руки гуманоидного робота Armar III с использованием контактно-канального подхода. На первом этапе проектирования была создана укрупненная функциональная структура для передачи движения и энергии от локтевого сустава к кисти робота с обратной связью о выполняемых движениях. На втором этапе было найдено принципиальное решение задачи передачи движения в любом направлении и спроектирован двухканальный прототип сустава. На третьем этапе была описана функциональная архитектура изделия. Канальные конструкции CSS_i, характеризующие функциональное назначение компонентов, сопрягались через попарные интерфейсы WSP_j и формировали матрицу DSM. Весовой фактор I_{CSS} каждого компонента в ячейке матрицы рассчитывался в зависимости от веса коэффициента W_{WSP} функционального взаимодействия компонента с другим компонентом и весовых факторов S_{CSS} компонентов, участвующих во взаимодействии. Модульность конструкции оценивалась по индексу удовлетворения конструкции требованиям модульности, т. е. минимальной связности с компонентами, не входящими в состав модулей. Кластеризация элементов в исходной DSM матрице была выполнена с использованием генетического алгоритма. Были выявлены четыре кластера, которые в дальнейшем стали конструктивными модульными компонентами сустава руки робота. Применение контактно-канального подхода позволяет представить мехатронные устройства роботов в виде системы компонентов, имеющих входы и выходы, и использовать системное представление для разработки модульных конструкций.

Представленные в публикациях различные опреределения терминов, связанных с модульным подходом к разработке промышленной продукции, объясняются различными точками зрения к моделированию модульных структур. Например, с функциональной точки зрения реализация функций в виде отдельных модулей эквивалентна обеспечению минимальной связности модулей с другими компонентами с точки зрения структурного подхода. Структурный подход предполагает менее жест-

кие требования к модульной архитектуре промышленной продукции и поэтому представляется более приемлемым для использования при проектировании модульных роботов.

Список литературы

1. **ISO/IEC/IEEE 24765:2010** Systems and software engineering — Vocabulary.
2. **ISO/NP 22166-1:2016** Robotics — Modularity for service robots. Part 1: General requirements.
3. **Pahl G., Beitz W., Feldhusen J., Grote K.-H.** Engineering Design: A Systematic Approach. Springer, 2007.
4. **Browning T. R.** Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and new

Directions // IEEE Transactions on Engineering Management. 2001. Vol. 48, N. 3.

5. **Erixon G.** The Chart of Modular Function Deployment. Stockholm: Centre for Industrial Engineering at Dalarna University, 1998.
6. **Resconi G., Chaczko Z.** Morphotronic System (theory) // Computer Aided Systems Theory/EUROCAST. 2009.
7. **Воронин А. В.** Моделирование мехатронных систем. Томск: Изд. Томского ПУ, 2008.
8. **Albers A., Zingel C.** Extending SysML for Engineering Designers by Integration of the Contact & Channel — Approach (C & C²-A) for Function-Based Modeling of Technical Systems // Procedia Computer Science. 2013. Vol. 16.
9. **Albers A., Korkiat S., Sauter C., Burger W.** A Method to define a Product Architecture Early in Product Development Using the Contact and Channel Model // Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design, Design Methods and Tools (pt. 1). 2009. Vol. 5. Palo Alto, CA, USA.

Terminology and Approaches to a Definition of Modular Robot Structure

V. N. Kazantsev, kazantsev@rtc.ru✉, **V. A. Pavlov**, vapavlov@rtc.ru,
Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics,
Saint-Petersburg, 194064, Russian Federation

Corresponding author: **Kazantsev V. N.**, Ph. D., Senior Research Scientist,
Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics,
Saint-Petersburg, 194064, Russian Federation
e-mail: kazantsev@rtc.ru

Accepted on August 07, 2017

A general approach to an interpretation of the existing terminology and to an application of the service robot component modularity classifications is considered. Classifications of modules according to functional and structural criteria are presented. Classification of modules according to functional criterion was developed for machine-building products and it is of little use for robot structure description. Structural classification is oriented on a modular presentation of various robot subsystems but it is rather hard to use it to describe modular mechanical structures. Concepts of the modular robot architecture development are considered from positions of the component and functional approaches. The component approach is based on the Design Structure Matrix that gives a possibility to optimize the modular robot structure according to an objective function. The functional approach is used to analyze a composition of the robot functions and to decompose functions onto sub-functions to determine a modular composition of the robot. A brief overview of the morphotronic methods being developed currently and the contact & channel method used for the robots structural design is presented. Morphotonics is a new approach to the formal synthesis of the generalized system architecture. The contact & channel method enables to represent mechatronic robotic devices as a composition of components with inputs and outputs and to develop modular structures.

Keywords: robot, modularity, module, modular robot architecture

Acknowledgements: The results of the research were obtained in the framework of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 8.9364.2017/8.9.

For citation:

Kazantsev V. N., Pavlov V. A. Terminology and Approaches to a Definition of Modular Robot Structure, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 11, pp. 744—748.

DOI: 10.17587/mau.18.744-748

References

1. **ISO/IEC/IEEE 24765:2010** Systems and software engineering — Vocabulary.
2. **ISO/NP 22166-1:2016** Robotics — Modularity for service robots. Part 1: General requirements.
3. **Pahl G., Beitz W., Feldhusen J., Grote K.-H.** Engineering Design: A Systematic Approach, Springer, 2007.

4. **Browning T. R.** Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and new Directions, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2001, vol. 48, no. 3.

5. **Erixon G.** The Chart of Modular Function Deployment, Centre for Industrial Engineering at Dalarna University, Stockholm, 1998.
6. **Resconi G., Chaczko Z.** Morphotronic System (theory), *Computer Aided Systems Theory/EUROCAST*, 2009.
7. **Voronin A. V.** *Modelirovanie mekhatronnykh sistem* (Modelling of Mechatronic Systems), Tomsk, Publishing house of Tomskii PU, 2008 (in Russian).
8. **Albers A., Zingel C.** Extending SysML for Engineering Designers by Integration of the Contact & Channel — Approach (C & C²-A) for Function-Based Modeling of Technical Systems, *Procedia Computer Science*, 2013, vol. 16.
9. **Albers A., Korkiat S., Sauter C., Burger W.** A Method to define a Product Architecture Early in Product Development Using the Contact and Channel Model, *Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design, Design Methods and Tools (pt. 1)*, 2009, vol. 5, Palo Alto, CA, USA.