

УДК 621.865.8

Принципы межмодульной стыковки групповых мобильных робототехнических систем

С.Н. Саяпин

ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН»

Principles of intermodular docking of the group mobile robotic systems

S.N. Sayapin

Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Одной из важных задач в организации групповых (роевых) мобильных модульных робототехнических систем является разработка простых и надежных многоразовых систем стыковки/расстыковки модулей. В зависимости от назначения устройства стыковки могут быть одно- и многоразовыми и обеспечивать автоматическую стыковку/расстыковку соединения по команде от системы управления. Также узлы стыковки/расстыковки могут быть полуавтоматическими, когда дополнительно использована мобильность самих модулей. В необходимых случаях с целью упрощения робототехнических систем операции стыковки/расстыковки модулей могут проводиться вручную оператором или манипулятором. При этом во всех случаях после стыковки узел соединения должен обладать высокой жесткостью и исключать неконтролируемую подвижность стыкуемых элементов. В связи с этим выбор базовых типов систем стыковки/расстыковки для мобильных роботов модульного типа, объединяемых в активные групповые структуры, является актуальной задачей. Дан обзор известных принципов и устройств, которые можно применять для стыковки мобильных роботов модульного типа, приведена их классификация. Выполнен сравнительный анализ стыковочных устройств. Рекомендованы базовые образцы для решения групповых задач. Приведены новые оригинальные устройства узлов стыковки модулей с образованием групповых структур различного применения. Предложенные устройства стыковки/расстыковки мобильных роботов модульного типа позволяют создавать роевые активные многофункциональные робототехнические структуры, способные решать различные задачи в экстремальных и априорно неопределенных условиях.

EDN: QJWYLY, <https://elibrary/qjwylx>**Ключевые слова:** стыковка/расстыковка мобильных роботов, стыковочные устройства, групповые соединения модульных роботов

One of the important tasks in organizing the group (swarm) mobile modular robotic systems lies in design and development of the simple and reliable reusable systems for docking/undocking the modules. Depending on the docking system operation, such systems could be single-use or reusable and provide the connection automatic docking/undocking upon command from the control system. Besides, the docking/undocking systems could be semi-automatic, when the modules mobility is additionally used. If necessary, the modules' docking/undocking operation modules could be carried out manually by an operator or a manipulator to simplify the robotic systems. In all cases, the connection unit after docking should provide high rigidity and exclude uncontrolled mobility of the elements being docked. In this regard, selection of basic types of the docking/undocking systems for the mobile modular ro-

bots combined into the active group structures is an urgent task. The paper provides an overview of known principles and devices that could be introduced in the modular mobile robots docking; their classification is presented. Docking devices are comparatively analyzed. Basic samples for solving the group problems are recommended. The paper presents new original systems for the module docking units with formation of group structures for various applications. The presented systems for docking/undocking the modular mobile robots are making it possible to create group (swarm) active multifunctional robotic structures capable of solving various problems in the extreme and a priori uncertain conditions.

EDN: QJWYLX, <https://elibrary/qjwylx>

Keywords: mobile robots docking/undocking, docking systems, modular robots group connection

Исследования мобильных модульных роботов (ММР), способных самообъединяться в многомодульные робототехнические системы (МРТС), называемые роевыми (swarm systems), ведутся с 1980-х годов. К настоящему времени во многих странах создано большое многообразие ММР, способных работать не только автономно, но и в составе роевых систем, а также объединяться в реконфигурируемые активные структуры для решения более сложных задач.

К их основным достоинствам следует отнести параллелизм, надежность, масштабируемость, гибкость, способность к самообъединению и реконфигурации с последующим разъединением, а также более низкую стоимость группы ММР по сравнению с таковой универсальных многофункциональных мобильных роботов [1].

Роевые МРТС включают в себя несколько автономных ММР, имеющих беспроводную связь друг с другом. Одним из фундаментальных применений роевых МРТС является создание интеллектуальных реконфигурируемых линейных и пространственных структур путем организации автоматической механической связи между автономными ММР.

Известные ММР для роевых МРТС, как правило, перемещаются по поверхности с помощью колес, гусениц, ног, а также за счет изменяемых геометрических характеристик [1–8]. В последние годы наблюдается активное развитие работ по созданию воздушных [6, 9] и подводных [10] роевых систем, обладающих возможностью группового объединения и разъединения коптеров и автономных необитаемых подводных аппаратов в воздухе и под водой.

Основные типы ММР, созданных в период с 1985 г. по настоящее время [1–9], показаны на рис. 1, где *a* — Sebot (Tokyo University of Science, Япония); *b* — RMMS (Carnegie Mellon University, США); *v* — Gunryu (Tokyo Institute of Technolo-

gy, Япония); *z* — SMC Rover (Tokyo Institute of Technology, Япония); *d* — CHOBIE II (Tokyo Institute of Technology, Япония); *e* — S-Bot или Swarm-Bot (Laboratory of Intelligent Systems, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Швейцария); *ж* — TET walker (Autonomous Nano Technology Swarm, NASA's Goddard Space Flight Center, США); *з* — Odin (Maersk Mc-Kinney Moller Institute, University of Southern Denmark, Дания); *и* — Modular-Expanding Robot (Wyss Institute for Bio inspired Engineering at Harvard University, США), *к* — Thor modular robot (Maersk Mc-Kinney Moller Institute, University of Southern Denmark, Дания); *л* — Kilobot (Wyss Institute for Bio inspired Engineering at Harvard University, США); *м* — (Massachusetts Institute of Technology, США); *н* — ModQuad (GRASP Laboratory, University of Pennsylvania, США).

Для существующего многообразия ММР, включая перспективные образцы, разработаны основные принципы построения стыковочных устройств, обеспечивающие возможность группового объединения и разъединения ММР. Как правило, стыковочные устройства ММР базируются на принципах построения захватных механизмов и устройств для промышленных роботов [11–14].

Основные типы стыковочных устройств, созданных за последние десятилетия, которые можно применять для ММР на макро-, мезо- и микроуровнях [14], показаны на рис. 2. Здесь *a*, *б*, *в*, *г*, *и* — фрикционный, челюстной, магнитный, всасывающий (вакуумный), акустический схват соответственно (для ММР макро-, мезо- и микроуровней); *д* — игольчатый схват для ММР микроуровня; *е* и *з* — электростатический и ледяной схваты (для ММР мезо- и микроуровней); *ж* и *л* — схваты Ван-дер-Ваальса и Бернулли (для ММР мезо- и микроуровней); *к* и *м* — схват силами лазерного излучения и адгезионный схват (для ММР микроуровня).

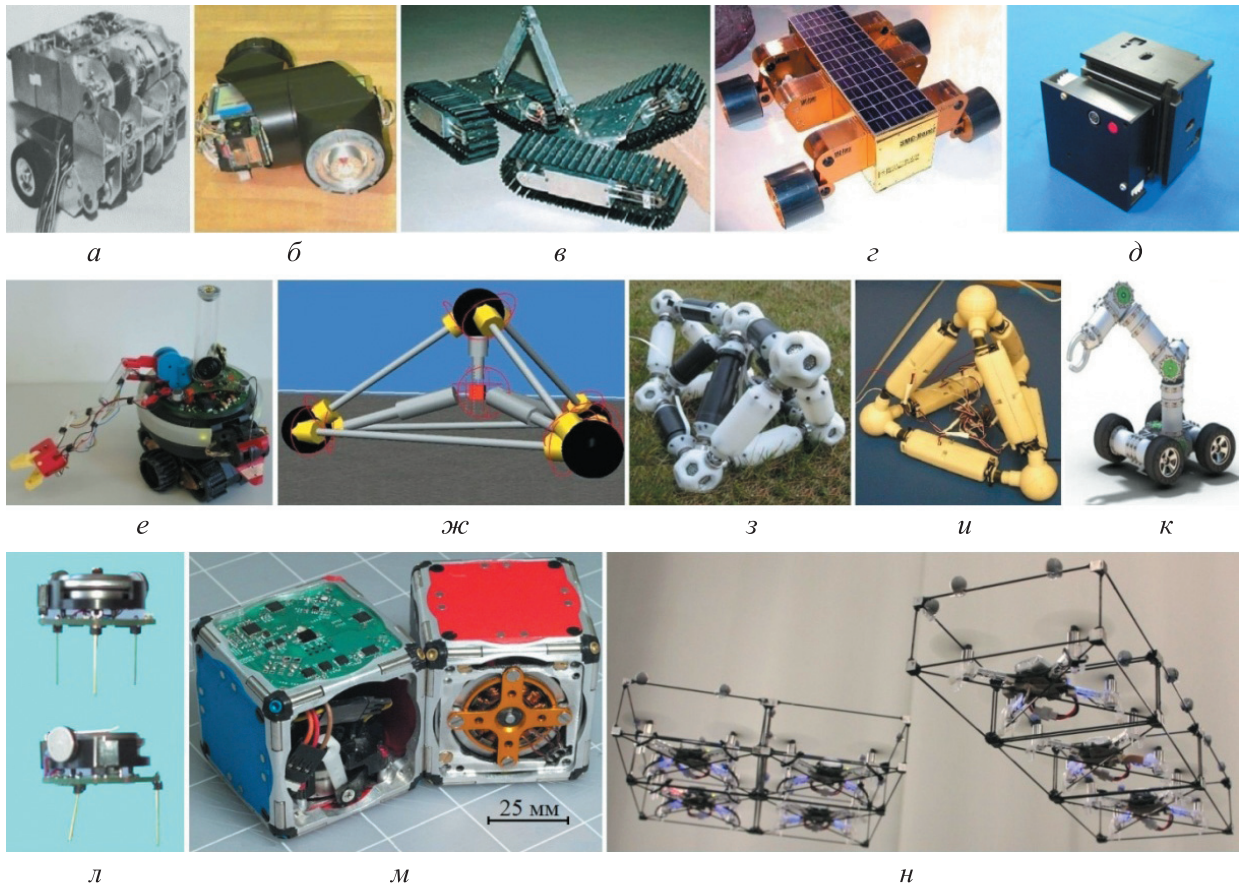


Рис. 1. Внешний вид ММР, созданных в период с 1985 г. по настоящее время

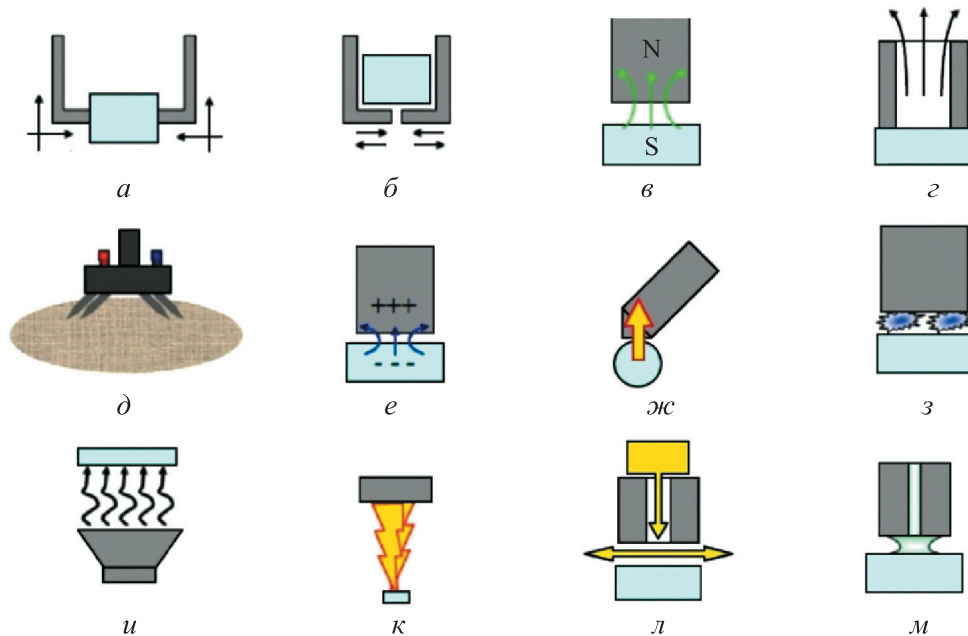


Рис. 2. Внешний вид стыковочных устройств для ММР макро-, мезо- и микроуровней

Из этого многообразия стыковочных устройств в работе [15] выделены четыре основных принципа стыковки, применяемых в групповых ММР: поперечная защелка (рис. 3, а),

продольно-поворотная защелка (рис. 3, б), сопрягаемый схват (рис. 3, в) и магнитное соединение (рис. 3, г). К ним следует добавить соединения с помощью адгезии [14], соединения

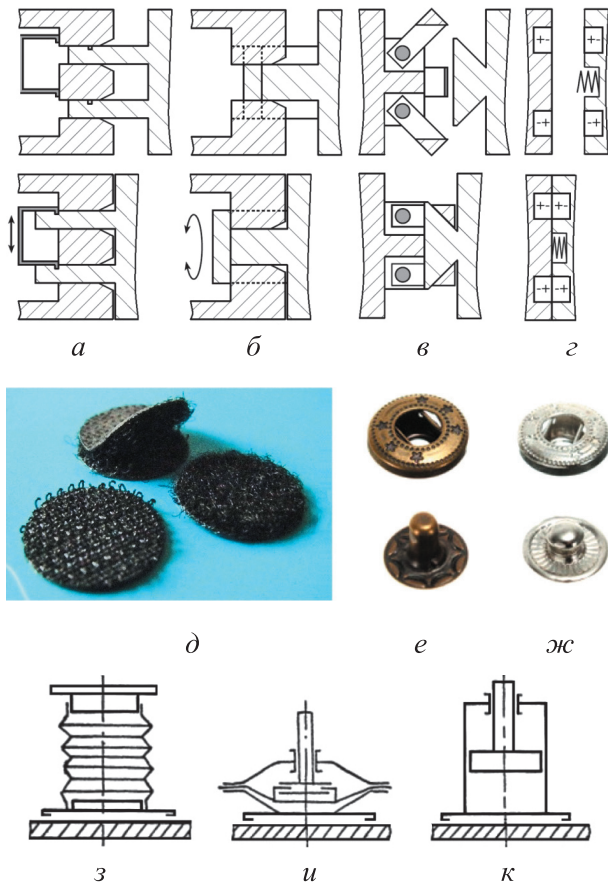


Рис. 3. Примеры стыковочных устройств, построенных на основных принципах взаимной стыковки и соединений ММР

типа Velcro fastener (застежка-липучка, «репейник») (рис. 3, д) и snap fastener (защелкивающаяся застежка) (рис. 3, е, ж), безнасосное сифонное (рис. 3, з), диафрагменное (рис. 3, и), поршневое (рис. 3, к) и насосные вакуумные соединения [12].

Существует перспективный класс тетра- и октаэдральных автономных интеллектуальных ММР с параллельной структурой, которые подобны изображенным на рис. 1, ж–и. Они позволяют образовывать МРТС в виде активных пространственных интеллектуальных реконфигурируемых параллельных структур, способных решать различные задачи [16].

В связи с этим наблюдается повышенный интерес к исследованию и разработке таких МРТС. Одной из самых сложных задач является автоматическое механическое соединение между ММР. При этом выбор типа соединения и конструкции устройства стыковки зависит от функционального назначения МРТС.

Цель исследования — сравнительный анализ устройств стыковки/расстыковки ММР и вы-

бор базовых типов, позволяющих создавать МРТС в виде активных групповых реконфигурируемых пространственных структур.

В результате проведенного в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН) анализа известных технических решений установлено, что все МРТС можно подразделить на два типа: неразборные самособирающиеся, включающие в себя конструкции, которые разбирает оператор или робот-манипулятор, и самособирающиеся (саморазбирающиеся).

В МРТС первого типа использована автоматическая стыковка неразъемных узлов. Они могут самостоятельно перемещаться и выполнять сложные манипуляционные операции.

В МРТС второго типа механическая стыковка ММР способна автоматически объединять или разъединять два автономных ММР и более. Второй тип стыковки также может быть выделен в группу интеллектуальных автономных МРТС для индивидуального решения задач.

Далее приведены основные базовые типы стыковочных соединений и устройств для ММР.

Неразборные и полуавтоматические узлы стыковки ММР для самособирающихся МРТС. Узлы стыковки, объединяющие группу ММР в неразборную МРТС, могут быть основаны на использовании химической адгезии в виде клеевых и других самозатвердевающих материалов [14, 17], а также паяных и сварных соединений. Эти соединения, за исключением некоторых клеев, не требуют никаких усилий для стыковки.

К таким соединениям можно отнести и неавтоматические узлы, в которых стыковку/расстыковку выполняют вручную или с помощью манипулятора. Пример подобного узла стыковки, выполненный в виде цангового фиксатора, приведен на рис. 4, а и б [18].

Фиксатор содержит, закрепленный на стыкуемом участке 6 одного из ММР корпус 5, где размещены с возможностью осевого перемещения подпружиненный стержень 4 с коническим концом и цангой 3, установленной на стержне. При этом на конце цанги выполнены радиальные зубья, которые в исходном положении под действием упругих сил входят в кольцевую канавку на коническом конце стержня и дискретно удерживают цангу от осевого перемещения.

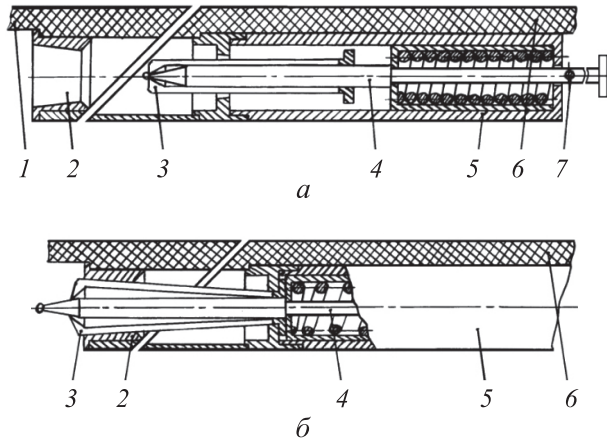


Рис. 4. Конструктивные схемы неавтоматического узла стыковки в исходном (а) и рабочем (б) положениях

На ответном стыкуемом участке 1 смежного ММР закреплена втулка 2 с обратным коническим отверстием. В исходном положении подпружиненный стержень с цангой удерживаются от осевого перемещения чекой 7 (см. рис. 4, а). После удаления чеки из хвостовика стержня, например, вручную или с помощью манипулятора, под действием упругих сил сжатой пружины происходит его осевое перемещение вместе с цангой в коническое отверстие втулки.

Дальнейшее перемещение стержня приводит к распираанию цанги вследствие взаимодействия ее радиальных зубьев. В результате происходит плотное беззазорное механическое соединение в осевом и радиальном направлениях между цангой со стержнем и втулкой. После соединения смежные ММР образуют неразборную активную универсальную двухмодульную структуру.

Срабатывание узла стыковки не требует от смежных ММР каких-либо осевых или радиальных усилий после их взаимного сближения. Для повышения жесткости соединения необходимо применять два стыковочных узла. В качестве ММР целесообразно использовать октаэдральную активную параллельную структуру с неактивной стыкуемой гранью и девятью линейными приводами. Для расстыковки смежных ММР вручную или с помощью манипулятора надо оттянуть стержень за его концевую часть в обратном направлении и вставить чеку после его возврата в исходное положение.

Другой пример стыковки такого типа приведен на рис. 5, где показана конструктивная схема быстроразборного соединения с клапанами, применяемого для исключения попадания воздуха в разъединяемые пневмопровода,

совмещенные с узлами стыковки. Для герметичной стыковки штуцеров 3 и 8, принадлежащих смежным стыкуемым ММР, необходимо кольцо 5 оттянуть вправо, и после получения шариками 6 возможности выхода из радиальных отверстий штуцера 3 провести его осевое соединение со штуцером 8.

После возвращения кольца в первоначальное положение, за счет взаимодействия его внутренней конической поверхности с шариками последние войдут в кольцевую канавку штуцера 8, и произойдет герметичная неразъемная фиксация штуцеров 3 и 8 друг с другом. При этом штуцеры, герметично соединенные с соответствующими концами пневмопроводов, уплотняются между собой с помощью уплотнителя 1 в виде резинового кольца круглого сечения и удерживаются в соединенном состоянии шестью шариками.

Для разъединения штуцера необходимо оттянуть кольцо вправо, после чего шарики получают возможность выйти из кольцевой канавки штуцера 8. В момент разъединения штуцеров клапаны 4, имеющие резиновые уплотнители 2, за счет действия пружин 7 надежно перекрывают отверстия в штуцерах, и концы пневмопроводов оказываются уплотненными. Размеры соединения выбраны так, что уплотнитель сходит с цилиндрической части штуцера лишь после того, как клапаны перекроют отверстия пневмопровода.

Преимущество стыковки такого типа — быстроразборно-разборное герметичное соединение, позволяющее в случае необходимости избежать попадания воздуха в разъединяемые пневмопроводы, совмещенные с узлами стыковки смежных ММР. Недостаток — выполнение стыковки/расстыковки вручную или манипулятором, вследствие чего требуется приложить осевое усилие.

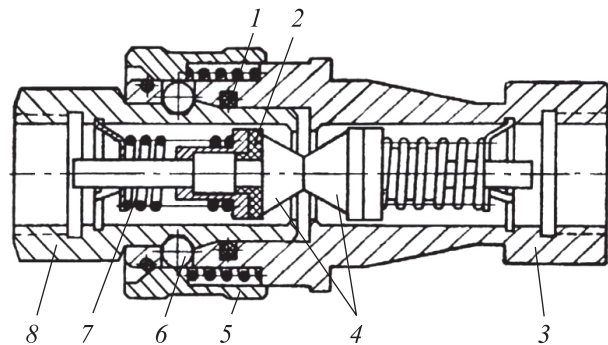


Рис. 5. Конструктивная схема быстроразъемного соединения с клапанами

В полуавтоматических узлах стыковки соединение ММР между собой происходит автоматически при их контактном сближении. Однако расстыковку подобных узлов выполняют вручную или с помощью манипулятора. Пример полуавтоматического стыковочного устройства для безазорного механического соединения ММР, выполненного в виде самоцентрирующегося конического соединения [18], приведен на рис. 6.

Стыковочное соединение позволяет полностью устранить зазор между стержнями в осевом и радиальном направлениях и обеспечить надежную автоматическую фиксацию с высокой несущей способностью в осевом направлении. Соединяемые элементы выполнены в виде полуконических хвостовиков 5 и 6 с сопрягаемыми трапецеидальными зубьями. На цилиндрическом участке полуконического хвостовика 6 установлена подпружиненная пружиной 1 коническая втулка 4.

При радиальном сближении трапецеидальных зубьев полуконических хвостовиков 5 и 6 в момент их сопряжения трапецеидальный зуб полуконического хвостовика 5 прижимает выступающий элемент фиксатора конической втулки (на рис. 6 не показан) и освобождает его. При этом подпружиненный цилиндрический фиксатор выходит из зацепления с внутренней кольцевой канавкой 3 конической втулки и утапливается заподлицо в радиальном отверстии 2 (рис. 6, б) цилиндрического участка полуконического хвостовика 6. Под действием пружины коническая втулка перемещается в осевом направлении, центрирует и безазорно фиксирует полуконические хвостовики 5 и 6 друг с другом.

Для расфиксации стыковочного устройства необходимо отодвинуть коническую втулку от полуконических хвостовиков до момента их освобождения. При этом произойдет осевое

сжатие пружины, и фиксатор автоматически через радиальное отверстие войдет в зацепление с внутренней кольцевой канавкой конической втулки и зафиксирует ее в исходном положении на цилиндрической части полуконического хвостовика 6. Операцию разъединения смежных ММР выполняют вручную или с помощью робота-манипулятора.

Конструктивная схема разработанного в Космическом центре Маршала (Marshall Space Flight Center, NASA, США) быстроразъемного трехстепенного узла стыковки и внешний вид его составных элементов [13, 19] приведены на рис. 7, а и б. Узел состоит из стыкуемых между собой шарового наконечника 2 и гнезда, выполненного в виде основания 10 с наружной и внутренней стенками, образующими камеру 21 с отверстием и сопрягаемой с шаровым наконечником сферической чашкой 11.

Основание снабжено тремя идентичными сквозными отверстиями 19, каждое из которых расположено в меридиональной плоскости под острым углом к продольной от камеры и имеет внутренний 12, средний 20 и внешний 9 выходы. На наружной поверхности основания установлено стопорное кольцо 3 с возможностью осевого поворота и перекрытия среднего выхода.

Стопорное кольцо фиксируется от осевого перемещения вдоль основания пружинным стопорным кольцом 1, установленным в кольцевой канавке 18, сделанной на наружной поверхности основания. Внутри внешнего выхода сквозного отверстия выполнена резьба для установки заглушки 8 с внутренним глухим отверстием. Заглушка ввернута до упора в торцевой переход от внешнего к среднему выходу меньшего диаметра.

Внутри глухого отверстия заглушки установлена винтовая пружина сжатия 7, поджимающая фиксирующий шарик 6, размер кото-

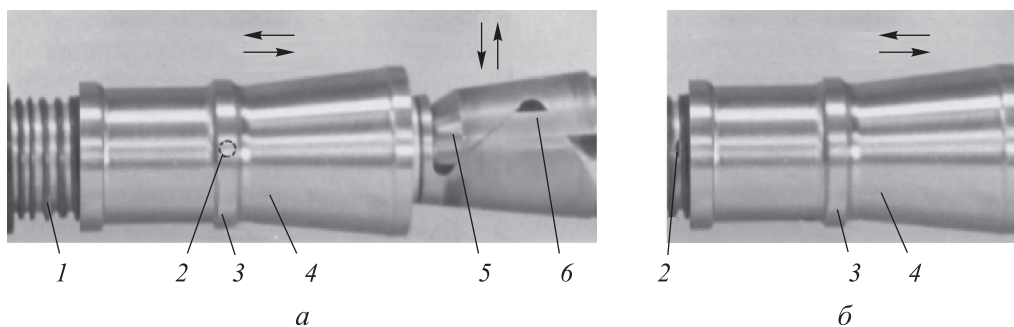


Рис. 6. Внешний вид безазорного стыковочного устройства в исходном (а) и рабочем (б) положениях

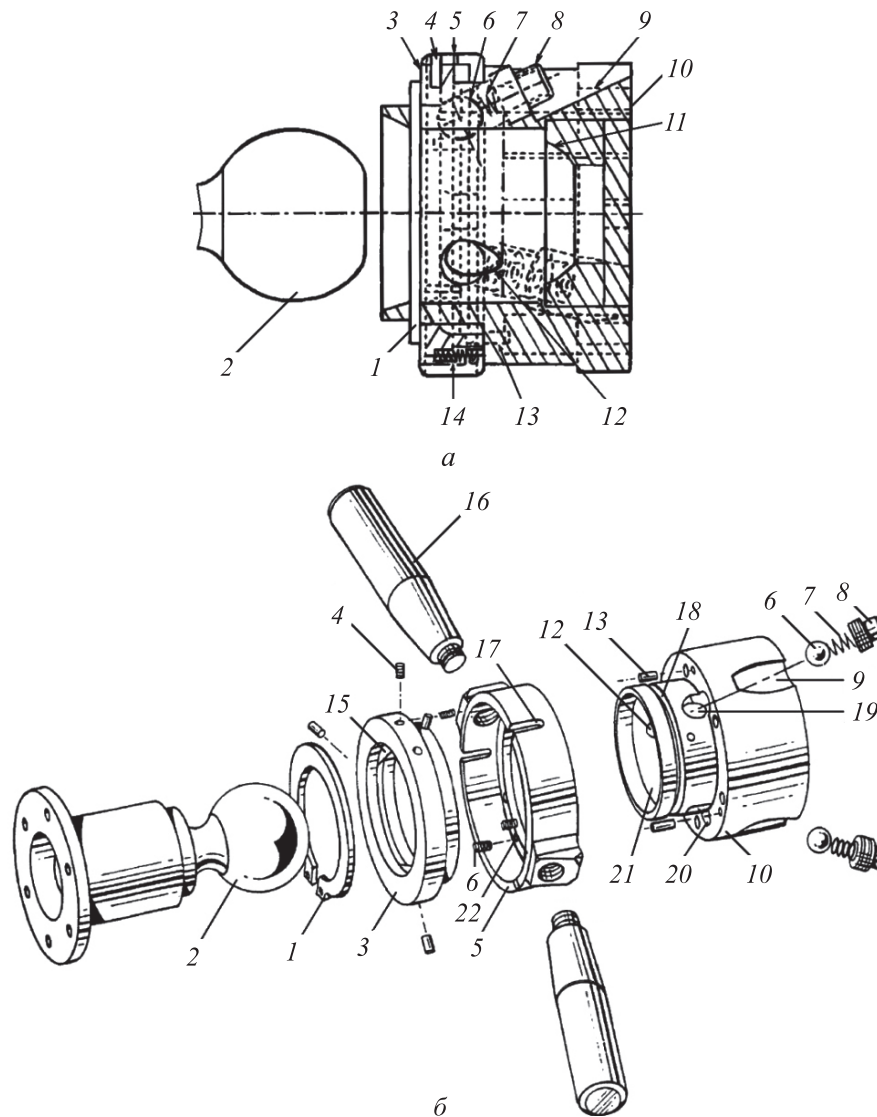


Рис. 7. Конструктивная схема быстроразъемного трехступенного узла стыковки (а) и внешний вид его составных элементов (б)

рого позволяет проходить через средний выход и частично выступать из внутреннего выхода в камеру 21. Стопорное кольцо 3 установлено с возможностью поворота относительно основания из заблокированного положения фиксирующих шариков в разблокированное.

Стопорное кольцо снабжено радиальным пазом 15 для каждого фиксирующего шарика, смещенного под углом к основанию. Размер радиального паза позволяет проходить фиксирующему шарик в радиальном направлении в момент, когда стопорное кольцо поворачивается и происходит совмещение радиального паза с внешним выходом. При этом фиксирующий шарик получает возможность полностью выйти из камеры и освободить шаровой наконечник, позволяя ему покинуть камеру.

Вращение стопорного кольца осуществляется через скрепленное с ним с помощью радиальных штифтов 4 охватывающее кольцо 5, которое для удобства поворота снабжено рукоятками 16. При этом радиальные штифты выполнены с возможностью вхождения в соответствующие осевые пазы 17 охватывающего кольца. В свою очередь с помощью пружин сжатия 14 охватывающее кольцо прижимается в осевом направлении через стопорное кольцо к основанию. При этом центрирующие штифты 13 основания подвижно входят в зацепление с ответными отверстиями 22, выполненными на охватывающем кольце.

При оттягивании рукояток в осевом направлении от основания центрирующие штифты выходят из ответных отверстий охва-

тывающего кольца, позволяя ему поворачиваться относительно основания. Вместе с охватывающим кольцом поворачивается и связанное с ним стопорное кольцо, обеспечивая перевод фиксирующих шариков из заблокированного положения в разблокированное и обратно.

Преимущество быстроразъемного трехступенного узла стыковки — автоматическое соединение смежных ММР при их осевом сближении до контакта. К недостаткам следует отнести необходимость приложения осевого усилия для автоматического срабатывания узла стыковки. Расстыковку выполняют вручную или с помощью манипулятора.

Автоматические узлы стыковки ММР для самособирающихся МРТС. В общем случае автоматические узлы стыковки можно подразделить на два типа: приводные и бесприводные. К приводным относятся узлы автоматической стыковки/расстыковки, включающие в себя независимые приводные устройства. Этот тип стыковочных устройств является наиболее распространенным и разнообразным. В качестве исполнительных механизмов выступают электромеханические, электромагнитные, вакуумные, пневматические и другие устройства.

В бесприводных узлах автоматическая стыковка осуществляется за счет использования двигателей ММР. Первый тип, в отличие от второго, не требует продольных усилий для стыковки и расстыковки сопрягаемых ММР, второй — дополнительных независимых приводных устройств. Приводные узлы стыковки могут быть выполнены как с индивидуальными стыкуемыми элементами, так и с универсальными. Далее приведены примеры автоматических узлов стыковки такого типа.

Электромеханический приводной узел стыковки смежных ММР с индивидуальными стыкуемыми элементами [20] показан на рис. 8, где один ММР содержит охватываемый стыкуемый элемент 1 (а), а другой — охватывающий 4 (б), которые после стыковки объединяются в одно целое соединение (в).

Прототип охватываемого стыкуемого элемента электромеханического приводного узла (рис. 8, г) содержит конус с кольцевой канавкой 3 и поперечным пазом 2. Фиксация конуса с ответным охватывающим стыкуемым элементом, связанным через основание 5 с ММР, происходит после объединения стыкуемых элемен-

тов 1 и 4 за счет взаимодействия с ними поперечного фиксатора 7 с линейными приводами 8 вертикального позиционирования. Остановка фиксации осуществляется по команде от концевого выключателя 6. При этом конус может поворачиваться относительно ответной части вокруг продольной оси.

Для исключения вращения конуса относительно ответной части, на конусе охватываемого стыкуемого элемента выполняют поперечный паз. При необходимости точного осевого совмещения охватываемого стыкуемого элемента относительно охватывающего в ММР с колесными или гусеничными движителями дополнительно вводят трехступенное устройство осевого позиционирования с тремя приводами 9 охватываемого стыковочного элемента 1 (рис. 8, д) [21]. Благодаря автономности приведенная на рис. 8 конструкция узла стыковки отличается повышенной сложностью исполнения и управления.

Пример ММР типа S-Bot с универсальными стыкуемыми элементами, выполненными в виде радиального схвата и схвата с манипулятором и их коллективное взаимодействие приведен на рис. 9, а и б [15].

При необходимости упругого соединения свободных граней ММР в сплошную активную реконфигурируемую поверхность узел стыковки граней можно выполнить в виде упругого ленточного замка 3, натянутого на приводной и натяжной барабаны 1 с радиальными зубьями, взаимодействующими с отверстиями этого замка (рис. 10) [18]. Ленточный замок позволяет автоматически зафиксировать и расфиксировать стыкуемые свободные грани 2 соединяемых ММР.

На рис. 10 показаны стыкуемые свободные грани перед стыковкой (а) и после нее (б, в). Кромки стыкуемых свободных граней выполнены с продольными пазами 4, которые взаимодействуют с упругими ребрами 5 упругого ленточного замка 3. Упругий ленточный замок (г) представляет собой замкнутую ленту, которая на половине длины выполнена с уменьшенной шириной и одним рядом упругих реборд. Широкая часть замкнутой ленты изготовлена с двумя рядами упругих реборд.

Упругий ленточный замок работает следующим образом. После сближения стыкуемых свободных граней и сопряжения продольных пазов по команде системы управления включается приводной барабан. В результате происходит

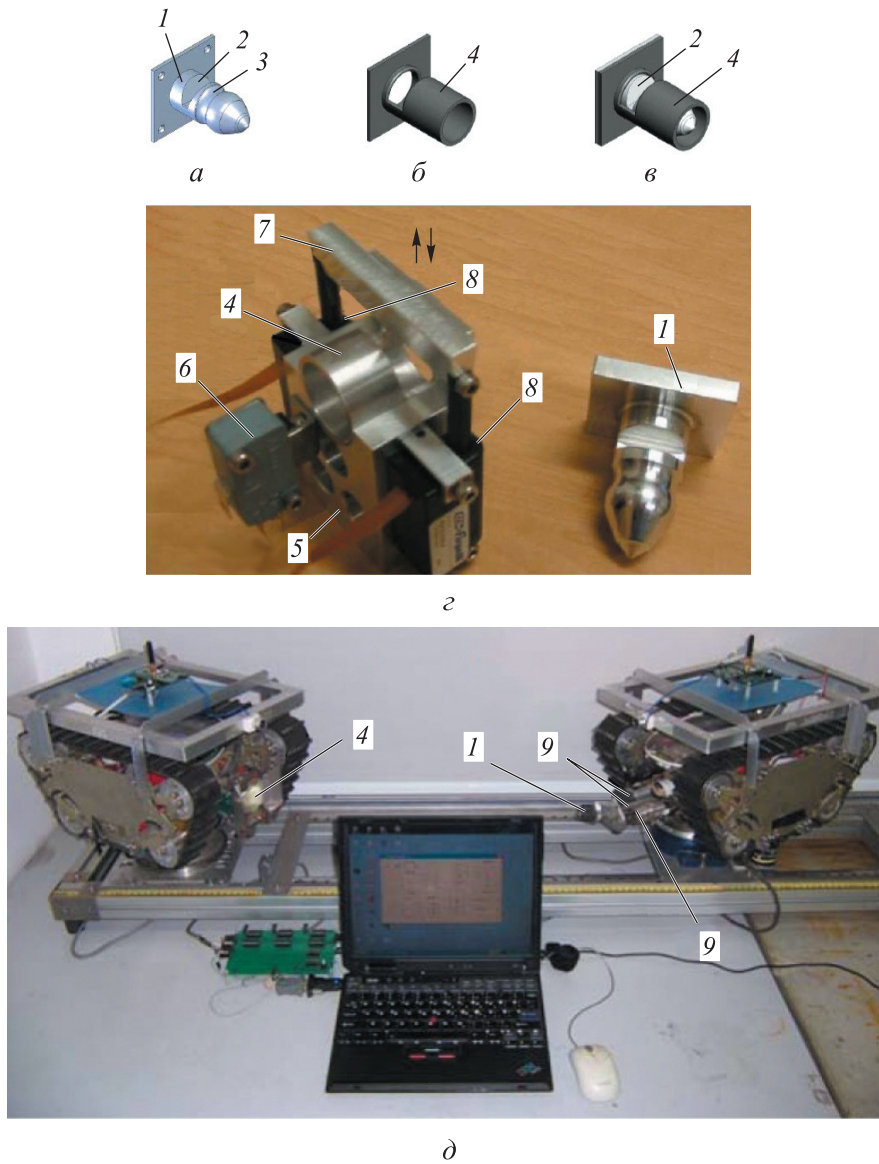


Рис. 8. Внешний вид электромеханического приводного узла стыковки и его элементов (а–в) на примере гусеничных ММР (г)

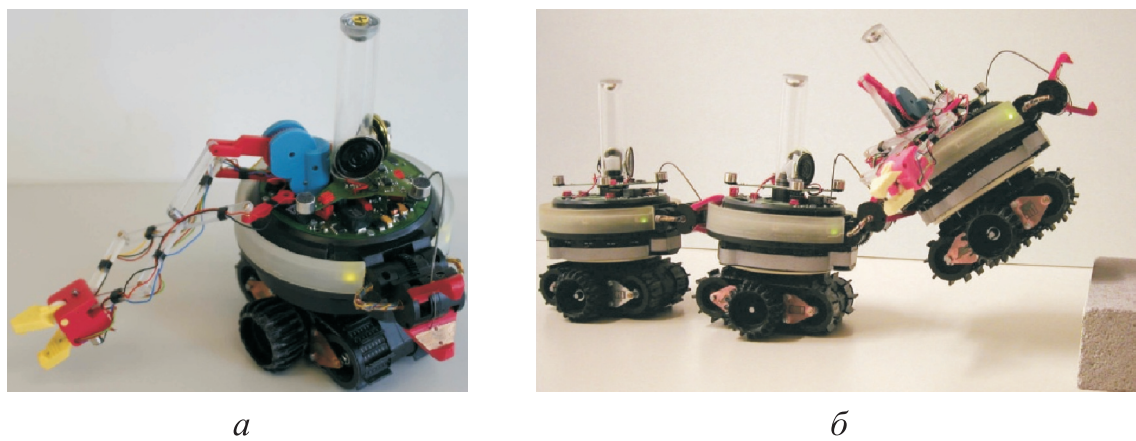


Рис. 9. Внешний вид ММР типа S-Bot с колесно-гусеничными движителями и универсальными стыкуемыми элементами в виде радиального схвата и схвата с манипулятором (а) и их взаимодействия (б)

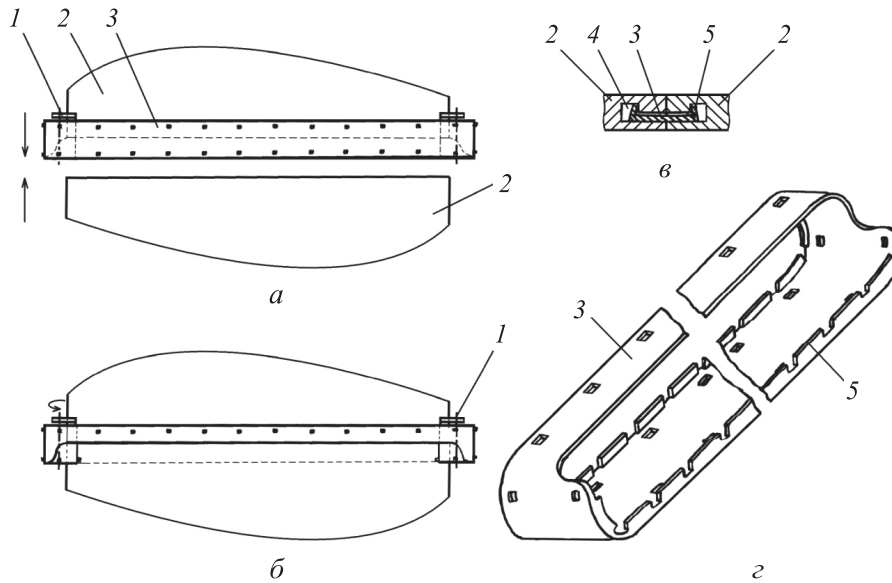


Рис. 10. Конструктивные схемы электромеханического приводного узла стыковки и его элементов (а–г) на примере гусеничных ММР

протаскивание широкого участка упругого ленточного замка с упругими ребрами сквозь продольные пазы и взаимная фиксация стыкуемых свободных граней. Расфиксация свободных граней осуществляется в обратном порядке. Недостаток такого узла заключается в необходимости точного позиционирования стыкуемых свободных граней смежных ММР перед их взаимной фиксацией.

К бесприводным относятся следующие типы узлов стыковки: требующие приложения усилий для фиксации и расфиксации сопрягаемых элементов; не требующие усилий для фиксации и требующие усилий для расфиксации; не требующие усилий для фиксации и расфиксации. Требуемые усилия фиксации и расфиксации в первых двух типах бесприводных узлов стыковки создаются за счет тяговых усилий двигателей ММР. Поэтому их значения должны быть меньше тяговых усилий двигателей ММР.

Большая часть бесприводных узлов стыковки первого типа включает в себя упругие элементы защелок, которые необходимо отжимать при фиксации и расфиксации подобно соединениям типа snap fastener (см. рис. 3, е, ж). Внешний вид тетраэдрального ММР с подобными узлами стыковки показан на рис. 11, а [16].

Вершина каждой грани содержит стыковочный узел в виде штифта 5 и паза 4, а также направляющий элемент 3. Эти вершины выполнены в виде сферических шарниров 6, соединенных с концами линейных приводов 1.

Представленный ММР является автономным и содержит индивидуальную систему управления 2, которая включает в себя микроконтроллер, беспроводную связь и аккумуляторную батарею. Группа ММР может обмениваться данными друг с другом и с оператором через беспроводной канал или систему спутниковой связи.

На рис. 11 показана возможность объединения трех ММР в активную трехмодульную МРТС в виде пространственной линейной фермы (б) и пример реконfigurирования трехмодульной МРТС (в–е). Стыковка и расстыковка смежных ММР осуществляется за счет усилий, развиваемых его двигателями в виде линейных приводов. Очевидно, что благодаря возможности пространственного позиционирования стыкуемых вершин подобные ММР не требуют каких-либо дополнительных устройств.

Также к этому типу соединений относятся безнасосные вакуумные узлы стыковки (см. рис. 3, з–к).

Ко второму типу бесприводных узлов стыковки, не требующих усилий для фиксации и требующих усилий для расфиксации, следует отнести устройства с постоянными магнитами (см. рис. 3, г), а также узлы стыковки, требующие от ММР минимальных усилий на стыковку, например, общеизвестное соединение типа Velcro fastener (см. рис. 3, д).

Другим примером узла стыковки такого типа является конструкция, показанная на рис. 12

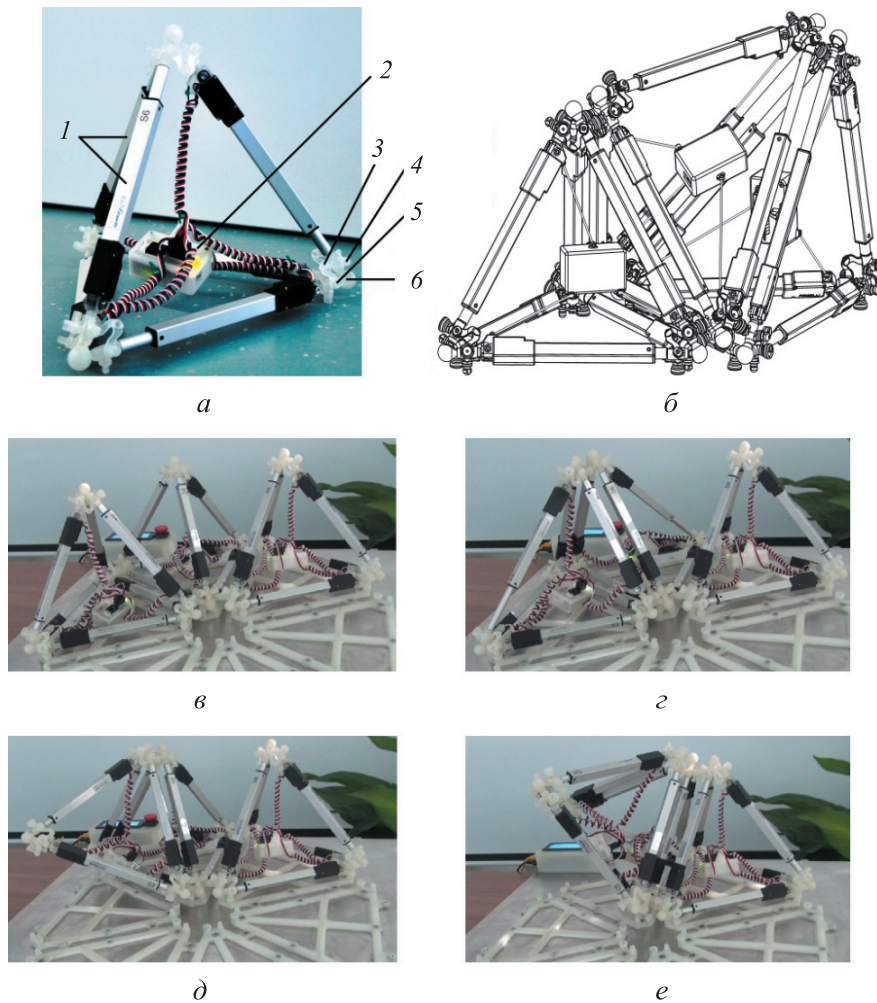


Рис. 11. Внешний вид тетраэдрального ММР (а), трехмодульной МРТС (б) и пример ее реконфигурации (в–е)

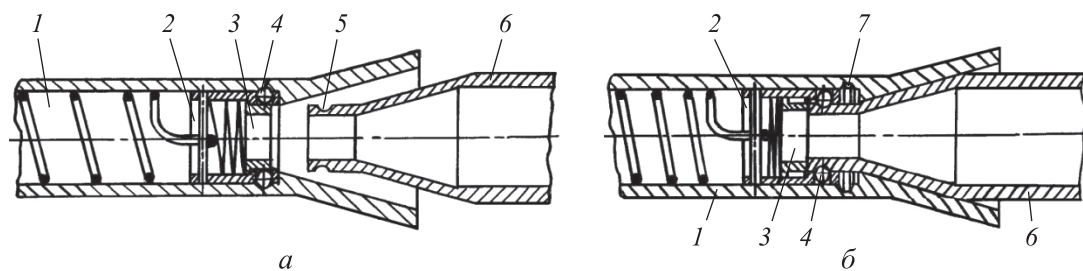


Рис. 12. Схема узла стыковки перед фиксацией (а) и после нее (б)

[18]. Узел стыковки не требует высокоточного взаимного перемещения конического гнезда 1 и штыря 6. В гнезде коаксиально установлены две втулки 2 и 3 с возможностью осевого перемещения. Втулка 2 выполнена с радиальными отверстиями и подпружинена большой пружиной в сторону от штыря, а втулка 3 — малой пружиной к штырю. В радиальных отверстиях втулки 2 установлены шарики 4. На внутренней поверхности конического гнезда выполнена кольцевая канавка 7 с трапециевидным про-

филем, а на штыре профиль кольцевой канавки 5 соответствует шарикку. Наклонные поверхности кольцевой канавки трапециевидного профиля образуют с продольной осью гнезда угол в пределах $0...45^\circ$.

Фиксатор работает следующим образом. После попадания штыря в коническое гнездо происходит отжатие малой пружины и перемещение втулки 3. Освобожденные шарики под действием большой пружины радиально перемещаются из канавки 7 в канавку 5, уста-

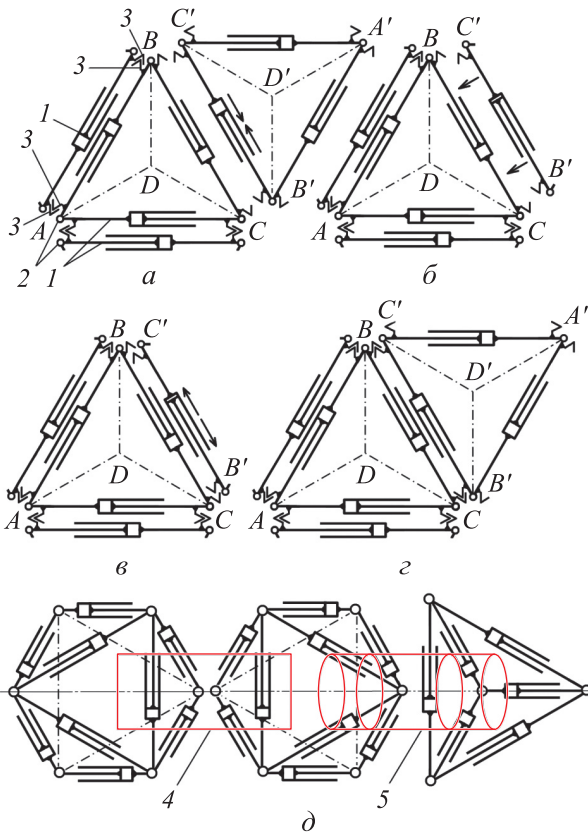


Рис. 13. Схемы узлов бесприводной стыковки тетраэдральных ММР (а–г) и комбинированной стыковки октаэдральных и тетраэдрального ММР через предметы (д)

навливая сцепление штыря с втулкой 2, подпружиненной большой пружиной. Под действием большой пружины коническая часть штыря вместе с втулкой 2 перемещается в ответное коническое гнездо до их полного сопряжения. Расстыковка ММР происходит в обратном порядке после приложения требуемого осевого усилия, превышающего силу упругости большой пружины.

Для повышения эффективности автоматических узлов стыковки в ИМАШ РАН разработана концепция бесприводной стыковки смежных ММР параллельной структуры в виде тетраэдра (см. рис. 1, ж-и) и октаэдра [16] с активными треугольными гранями, не требующих приложения усилий для их фиксации и расфиксации (рис. 13) [22]. Стыковка и расстыковка треугольных граней ММР осуществляется за счет согласованного взаимодействия их линейных приводов.

Стыковку смежных ММР осуществляют следующим образом. После сближения стыкуемого тетраэдрального ММР ($A'B'C'D'$) к стыковочному ММР ($ABCD$) до заданного расстояния

между сторонами BC и $C'B'$ (рис. 13, а) линейные приводы 1 стыкуемого ММР выключаются. Затем включаются линейные приводы стержня $C'B'$ на уменьшение его длины, и после получения расстояния между вершинами 2 его полых конусов 3, меньшего на заданное значение расстояния между основаниями полых конусов стержня BC , линейные приводы стержня $C'B'$ выключаются (рис. 13, б).

Далее длины стержней $C'A'$ и $B'A'$ увеличиваются до тех пор, пока полые конусы стержней $C'B'$ и BC не займут соосное положение, и линейные приводы выключаются (рис. 13, в). Затем включаются линейные приводы стержня $C'B'$, и его длина увеличивается до полного сопряжения стыкуемых полых конусов. После выключения линейных приводов стержня $C'B'$ стыковка смежных ММР выполнена (рис. 13, г).

Аналогично осуществляется стыковка с остальными смежными ММР. Нарращивание смежными ММР осуществляется до получения заданной структуры МРТС. В случае выхода из строя какого-либо ММР его место в структуре МРТС передают одному из приближающихся ММР и к месту группировки вызывают резервный ММР, находящийся в этом районе.

Октаэдральные ММР [16] способны одновременно с движением по поверхности схватывать свободными гранями предметы произвольной формы (рис. 13, д). Это позволяет стыковать и расстыковывать ММР через такие промежуточные предметы, как стержни (трубы) 5 или балки 4. На рис. 13, д показана возможность стыковки через третий предмет не только смежных октаэдральных ММР [16], но и стыковки с ними тетраэдральных ММР. В результате можно создавать комбинированные МРТС, включающие объединение тетра- и октаэдральных ММР в сочетании с плоскими треугольными ММР типа триангеля [16] как непосредственно друг с другом, так и с помощью третьего предмета.

Выводы

1. Разработана классификация и проведен анализ узлов стыковки ММР по принципу их совместного взаимодействия: неразборных узлов стыковки, основанных на химической адгезии, пайке и сварке, включая неавтоматические узлы стыковки, в которых стыковку и расстыковку выполняют вручную или с помощью манипулятора; полуавтоматических узлов

стыковки, в которых соединение происходит автоматически при контактном сближении ММР, а расстыковка осуществляется оператором или манипулятором; автоматических узлов стыковки — приводных с независимыми устройствами фиксации/расфиксации и бесприводных трех типов. Первый тип бесприводных узлов требует приложения усилий для стыковки/расстыковки, второй тип не требует или почти не требует усилий для стыковки, но требует усилий для расстыковки, третий тип не требует усилий для стыковки/расстыковки.

2. Показано что для бесприводного типа узлов стыковки/расстыковки, не требующего приложения усилий, в наибольшей степени подходят ММР в виде пространственных механизмов параллельной структуры, выполненных на основе активных тетраэдров и октаэдров или их комбинаций, способных неограниченно наращиваться из подобных ММР.

3. Предложена разработанная в ИМАШ РАН новая концепция организации бесприводной стыковки/расстыковки смежных тетра- и октаэдральных ММР, не требующей приложения усилий для их фиксации и расфиксации.

Литература

- [1] Yogeswaran M., Ponnambalam S.G. Swarm robotics: an extensive research review. In: *Advanced knowledge application in practice*. IntechOpen, 2010, pp. 259–277, doi: <https://doi.org/10.5772/10361>
- [2] Larsen J.C. *Locomotion through morphosis*. PhD thesis. University of Southern Denmark, 2013. 189 p.
- [3] Kernbach S., ed. *Handbook of collective robotics*. Singapore, Jenny Stanford, 2013. 962 p.
- [4] Саяпин С.Н. Мобильный параллельный робот-манипулятор «Октаэдральный додекапод»: история, настоящее и будущее. *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2018, № 3, с. 36–60.
- [5] Alattas R.J., Patel S., Sobh T.M. Evolutionary modular robotics: Survey and analysis. *J. Intell. Robot. Sys.*, 2019, vol. 95, no. 7, pp. 815–828, doi: <https://doi.org/10.1007/s10846-018-0902-9>
- [6] Seo J., Paik J., Yim M. Modular reconfigurable robotics. *Annu. Rev. Control Robot. Auton. Syst.*, 2019, vol. 2 pp. 63–88, doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-control-053018-023834>
- [7] Majed A. *Stratégies auto-reconfigurables basées sur la détection pour les systèmes robotiques modulaires autonomes*. Doc. diss. ENSTA, 2022. 117 p.
- [8] Liang G., Tu Y. *Decoding modular reconfigurable robots: a survey on mechanisms and design*. arXiv:2310.09743, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.09743>
- [9] Gabrich B.T. *Flying modular robots: from self-assembling structures in midair to embedding grasping capabilities*. PhD thesis. University of Pennsylvania, USA, 2021. 145 p.
- [10] Машошин А.И., Скобелев П.О. Применение мультиагентных технологий для управления группой автономных необитаемых подводных аппаратов. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*, 2016, № 1, с. 45–59.
- [11] Chen F.Y. Gripping mechanisms for industrial robots. *Mech. Mach. Theory*, 1982, vol. 17, no.5, pp. 299–311, doi: [https://doi.org/10.1016/0094-114X\(82\)90011-8](https://doi.org/10.1016/0094-114X(82)90011-8)
- [12] Отений Я.Н., Ольштынский П.В. *Выбор и расчет захватных устройств промышленных роботов*. Волгоград, ВолгГТУ, 2000. 65 с.
- [13] Sandin P.E. *Robot mechanisms and mechanical devices illustrated*. McGraw-Hill, 2003. 299 p.
- [14] Fantoni G., Santochi M., Dini G. et al. Grasping devices and methods in automated production processes. *CIRP Annals*, 2014, vol. 63, no. 2, pp. 679–701, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.006>
- [15] Mondada F., Bonani M., Magnenat S. et al. *Physical connections and cooperation in swarm robotics*. IAS8, 2004, pp. 53–60.
- [16] Sayapin S.N. Analysis of use of platonic solids in swarm robotic systems with parallel structure based on SEMs. In: *Smart electromechanical systems*. Springer, 2019, pp. 45–68, https://doi.org/10.1007/978-3-319-99759-9_5
- [17] Longo D., Muscato G., Marques L. et al. Adhesion techniques for climbing robots: State of the art and experimental considerations. In: *Advances in mobile robotics*. World Scientific, 2008, pp. 6–28, doi: https://doi.org/10.1142/9789812835772_0003

- [18] Саяпин С.Н. *Анализ и синтез раскрываемых на орбите прецизионных крупногабаритных механизмов и конструкций космических радиотелескопов лепесткового типа*. Дисс. ... док. тех. наук. Москва, ИМАШ РАН, 2003. 457 с.
- [19] Cloyd R.A., Weddendorf B. *Passive capture joint with three degrees of freedom*. Paten US 6186693. Appl. 07.12.1998, publ. 13.02.2001.
- [20] Delrobaei M., McIsaac K.A. Connection mechanism for autonomous self-assembly in mobile robots. *IEEE Trans. Robot.*, 2009, vol. 25, no. 6, pp. 1413–1419, doi: <https://doi.org/10.1109/TRO.2009.2030227>
- [21] Li D., Fu H., Wang W. Ultrasonic based autonomous docking on plane for mobile robot. *ICAL*, 2008, pp. 1396–1401, doi: <https://doi.org/10.1109/ICAL.2008.4636372>
- [22] Саяпин С.Н. *Реконфигурируемый модульный робот и способ организации движений и межмодульного взаимодействия реконфигурируемого модульного робота*. Патент РФ 2801332. Заявл. 08.07.2022, опубл. 07.08.2023.

References

- [1] Yogeswaran M., Ponnambalam S.G. Swarm robotics: an extensive research review. In: *Advanced knowledge application in practice*. IntechOpen, 2010, pp. 259–277, doi: <https://doi.org/10.5772/10361>
- [2] Larsen J.C. *Locomotion through morphosis*. PhD thesis. University of Southern Denmark, 2013. 189 p.
- [3] Kernbach S., ed. *Handbook of collective robotics*. Singapore, Jenny Stanford, 2013. 962 p.
- [4] Sayapin S.N. Mobile parallel robot-manipulator "Octahedral dodekapod": history, present and future. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Engineering & Automation Problems], 2018, no. 3, pp. 36–60. (In Russ.).
- [5] Alattas R.J., Patel S., Sobh T.M. Evolutionary modular robotics: Survey and analysis. *J. Intell. Robot. Sys.*, 2019, vol. 95, no. 7, pp. 815–828, doi: <https://doi.org/10.1007/s10846-018-0902-9>
- [6] Seo J., Paik J., Yim M. Modular reconfigurable robotics. *Annu. Rev. Control Robot. Auton. Syst.*, 2019, vol. 2 pp. 63–88, doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-control-053018-023834>
- [7] Majed A. *Stratégies auto-reconfigurables basées sur la détection pour les systèmes robotiques modulaires autonomes*. Doc. diss. ENSTA, 2022. 117 p.
- [8] Liang G., Tu Y. Decoding modular reconfigurable robots: a survey on mechanisms and design. *arXiv:2310.09743*, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.09743>
- [9] Gabrich B.T. *Flying modular robots: from self-assembling structures in midair to embedding grasping capabilities*. PhD thesis. University of Pennsylvania, USA, 2021. 145 p.
- [10] Mashoshin A.I., Skobelev P.O. Application of multi-agent technology for managing a group of unmanned underwater vehicles. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences], 2016, no. 1, pp. 45–59. (In Russ.).
- [11] Chen F.Y. Gripping mechanisms for industrial robots. *Mech. Mach. Theory*, 1982, vol. 17, no.5, pp. 299–311, doi: [https://doi.org/10.1016/0094-114X\(82\)90011-8](https://doi.org/10.1016/0094-114X(82)90011-8)
- [12] Oteniy Ya.N., Olshtynskiy P.V. *Vybor i raschet zakhvatnykh ustroystv promyshlennykh robotov* [Selection and calculation of gripping devices for industrial robots]. Volgograd, VolgGTU Publ., 2000. 65 p. (In Russ.).
- [13] Sandin P.E. *Robot mechanisms and mechanical devices illustrated*. McGraw-Hill, 2003. 299 p.
- [14] Fantoni G., Santochi M., Dini G. et al. Grasping devices and methods in automated production processes. *CIRP Annals*, 2014, vol. 63, no. 2, pp. 679–701, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.006>
- [15] Mondada F., Bonani M., Magnenat S. et al. *Physical connections and cooperation in swarm robotics*. IAS8, 2004, pp. 53–60.
- [16] Sayapin S.N. Analysis of use of platonic solids in swarm robotic systems with parallel structure based on SEMs. In: *Smart electromechanical systems*. Springer, 2019, pp. 45–68, https://doi.org/10.1007/978-3-319-99759-9_5
- [17] Longo D., Muscato G., Marques L. et al. Adhesion techniques for climbing robots: State of the art and experimental considerations. In: *Advances in mobile robotics*. World Scientific, 2008, pp. 6–28, doi: https://doi.org/10.1142/9789812835772_0003

- [18] Sayapin S.N. *Analiz i sintez raskryvaemykh na orbite pretsizionnykh krupnogabaritnykh mekhanizmov i konstruktsiy kosmicheskikh radioteleskopov lepestkovogo tipa*. Diss. dok. tekhn. nauk [Analysis and synthesis of on-orbit precision large-size mechanisms and structures of space radio telescopes of petal type. Doc. tech. sci. diss.]. Moscow, IMASh RAN Publ., 2003. 457 p. (In Russ.).
- [19] Cloyd R.A., Weddendorf B. *Passive capture joint with three degrees of freedom*. Patent US 6186693. Appl. 07.12.1998, publ. 13.02.2001.
- [20] Delrobaei M., McIsaac K.A. Connection mechanism for autonomous self-assembly in mobile robots. *IEEE Trans. Robot.*, 2009, vol. 25, no. 6, pp. 1413–1419, doi: <https://doi.org/10.1109/TRO.2009.2030227>
- [21] Li D., Fu H., Wang W. Ultrasonic based autonomous docking on plane for mobile robot. *ICAL*, 2008, pp. 1396–1401, doi: <https://doi.org/10.1109/ICAL.2008.4636372>
- [22] Sayapin S.N. *Rekonfiguriruemyy modularnyy robot i sposob organizatsii dvizheniy i mezhmodul'nogo vzaimodeystviya rekonfiguriruemogo modularnogo robota* [Reconfigurable modular robot and method for organizing movements and intermodular interaction of reconfigurable modular robot]. Patent RF 2801332. Appl. 08.07.2022, publ. 07.08.2023. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 26.04.2024

Информация об авторе

САЯПИН Сергей Николаевич — доктор технических наук, главный научный сотрудник. ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН» (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский пер., д. 4, e-mail: S.Sayapin@rambler.ru).

Information about the author

SAYAPIN Sergey Nikolaevich — Doctor of Science (Eng.), Chief Research Worker. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonyevskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: S.Sayapin@rambler.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Саяпин С.Н. Принципы межмодульной стыковки групповых мобильных робототехнических систем. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 9, с. 37–51.

Please cite this article in English as:

Sayapin S.N. Principles of intermodular docking of the group mobile robotic systems. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 9, pp. 37–51.