

Робототехнические системы МКС. Летная эксплуатация робототехнических систем Российского сегмента

© Л.А. Савин

ПАО «РКК «Энергия», г. Королёв, Московская обл., 141070, Россия

Рассмотрены действующие робототехнические системы американского сегмента и планируемые робототехнические системы российского сегмента Международной космической станции. Проведено сравнение робототехнических систем двух сегментов в части состава и решаемых задач. Рассмотрены отдельные аспекты летной эксплуатации робототехнических систем российского сегмента. Выделены подзадачи, в решении которых накоплен большой практический опыт, и новые подзадачи, имеющие аналогию среди существующих и решаемых регулярно в процессе летной эксплуатации бортовых систем. Выделены не имеющие аналогии новые подзадачи, решение которых должно быть определено на этапе подготовки к летным испытаниям робототехнических систем. Приведено авторское видение требуемых направлений дальнейшего развития российских робототехнических систем для Международной космической станции.

Ключевые слова: Международная космическая станция, робототехнические системы, манипулятор ERA, летная эксплуатация

Робототехнические системы (РтС) Международной космической станции (МКС) относят к значимым служебным системам. Строительство МКС началось с выполненной манипулятором стыковки первых двух модулей — NOD1 и ФГБ. К настоящему времени с помощью манипуляторов собран весь американский сегмент и частично российский (манипуляторами обеспечена стыковка модуля МИМ1) [1]. Кроме монтажно-такелажных работ средства РтС выполняют широкий круг разноплановых задач. На текущий момент собственные РтС российского сегмента МКС отсутствуют. С существенными оговорками можно отнести к РтС грузовую стрелу (ГСт), которая представляет собой трехступенной грузовой кран с ручным приводом. Развертывание собственных РтС запланировано после интеграции в состав МКС многоцелевого лабораторного модуля (МЛМ). Для этого необходимо рассмотреть комплекс новых вопросов и задач, в том числе в части летной эксплуатации.

Цель настоящей работы — проведение краткого сравнительного обзора существующих РтС американского сегмента и планируемых РтС российского сегмента, а также указание некоторых аспектов летной эксплуатации российских РтС в составе МКС, в том числе авторское видение перспектив их развития.

В настоящее время в состав МКС входят две РТС: MSS (Mobile Servicing System, подвижная система обслуживания) и JEMRMS (Japanese Experiment Module Remote Manipulator System, система дистанционного манипулятора японского экспериментального модуля) [2–8]. Первая является разработкой Канадского космического агентства по заказу NASA, вторая — собственная разработка Японского космического агентства.

В состав MSS входят:

RWS — Robotic Workstation, рабочая станция управления робототехникой;

MT — Mobile Transporter, мобильный транспортер;

MBS — Mobile Base System, блок основания подвижной системы обслуживания, установленный на мобильном транспортере, и два манипулятора — SSRMS (Space Station Remote Manipulator System, система дистанционного манипулятора космической станции) и SPDM (Special Purpose Dexterous Manipulator, высокоподвижный манипулятор специального назначения).

JEMRMS включает в себя JEMRMS Console (пульт оператора JEMRMS) и два манипулятора — MA (Main Arm, основной манипулятор) и SMA (Small Fine Arm, малый прецизионный манипулятор).

При описании японских РТС следует упомянуть JEM Airlock (шлюзовую камеру модуля JEM), так как обслуживание этой камеры является одной из задач РТС [3]. Рабочие станции управления робототехникой размещены в модулях LAB и Cupola, пульт оператора JEMRMS — в модуле JEM. В составе рабочих станций и пульта имеется следующее оборудование: джойстики управления линейными и угловыми перемещениями манипуляторов, три телевизионных (ТВ) монитора и управляющий компьютер (лэптоп). Визуальный контроль пространственных перемещений манипуляторов осуществляется по ТВ-мониторам, на которые выводится информация, получаемая с внешних камер МКС и собственных камер манипуляторов, а также с помощью среды трехмерной визуализации, установленной на управляющем компьютере [4, 7, 8].

В состав MSS и JEMRMS входят по два манипулятора разной длины, грузоподъемности и точности позиционирования — длинные и грузовые SSRMS и MA, малые прецизионные SPDM и SMA. Это существенно расширяет круг возможностей американских и японских РТС, которые используются для решения перечисленных ниже задач [3, 5, 8, 9].

1. Монтажно-такелажные работы:

- сборка и перестыковка модулей МКС;
- перенос грузов (из/в шлюзовую камеру, с/на грузовые паллеты и научную платформу JEM, из/в негерметичные отсеки транспортных кораблей).

2. Перемещение и фиксация астронавтов при внекорабельной деятельности (ВКД), техническое обеспечение рабочего места: доставка инструментов и оборудования, подсветка, мониторинг рабочей зоны.

3. Инспекция внешней поверхности МКС с использованием ТВ-камер манипуляторов.

4. Стыковка/расстыковка транспортных кораблей.

5. Запуск микро/наноспутников с использованием шлюзовой камеры и специальных катапульти.

6. Ремонт, регламентное обслуживание и дооснащение внешних бортовых систем МКС.

Российская РТС Электромеханические средства технического обслуживания (ЭМС ТО) входит в состав комплекса робототехнических средств МЛМ. Основным элементом ЭМС ТО является манипулятор ERA (European Robotic Arm, европейский роботизированный манипулятор), разработанный и поставленный в Россию Европейским космическим агентством [4, 10, 11]. Кроме манипулятора в состав ЭМС ТО входят региональный пост, расположенный внутри МЛМ, три базовые точки, четыре пассивных устройства фиксации и два типа адаптеров: АдПРМ (адаптер переносного рабочего места) и АдПГ (адаптер полезного груза) [10].

Региональный пост ЭМС ТО в целом по своему назначению и комплектации аналогичен RWS из MSS и JEMRMS Console из JEMPMS. В его составе есть управляющий компьютер (лэптоп) и три ТВ-монитора, причем так же, как и на JEMRMS Console, в качестве одного из ТВ-мониторов задействован один из служебных лэптопов МКС. На управляющем компьютере аналогично американскому и японскому вариантам используется трехмерная визуализация пространственного положения манипулятора.

Визуальное отличие регионального поста ЭМС ТО от RWS и JEMRMS Console состоит в отсутствии джойстиков координатных перемещений, что связано с предназначением ручного режима управления ЭМС ТО, в отличие от MSS и JEMRMS, только для парирования нештатных ситуаций и выполнения уникальных операций, когда использование автоматической прицельной системы манипулятора ERA невозможно.

Другим существенным отличием средств управления ЭМС ТО от средств управления MSS и JEMRMS является внешний пульт управления, позволяющий космонавту, который находится снаружи МКС, управлять манипулятором ERA. Такая возможность отсутствует у американских и японских РТС. Базовые точки обеспечивают механические и электрические (включая информационные) связи ERA с МКС. Манипулятор ERA может «перешагивать» с одной базовой точки на другую. Аналогичной способностью обладает только мани-

пулятор SSRMS. Основой базовой точки как в российском, так и в американском варианте является такелажный элемент, совместимый с концевым захватом манипулятора.

Для перемещения космонавтов и грузов используются АдПРМ и АдПГ соответственно. Дооснащенный внешним пультом управления АдПРМ используется как наружный пост управления ЭМС ТО. Возможность перемещения обоих типов адаптеров с помощью манипулятора ERA обеспечивается наличием в их конструкции такелажных элементов, совместимых с концевым захватом ERA. Пассивные устройства фиксации размещены на внешней поверхности МКС и предназначены для фиксации на них указанных выше адаптеров. В состав адаптеров входит активное устройство фиксации — ответный интерфейс для пассивного устройства. При этом через устройства фиксации осуществляются электрические (включая информационные) связи оборудования, закрепленного на адаптерах, с бортовыми системами МКС.

Отметим, что кроме ЭМС ТО в состав комплекса робототехнических средств МЛМ входит шлюзовая камера.

Размещение элементов ЭМС ТО и шлюзовой камеры на поверхности МЛМ представлено на рис. 1, основные органы управления

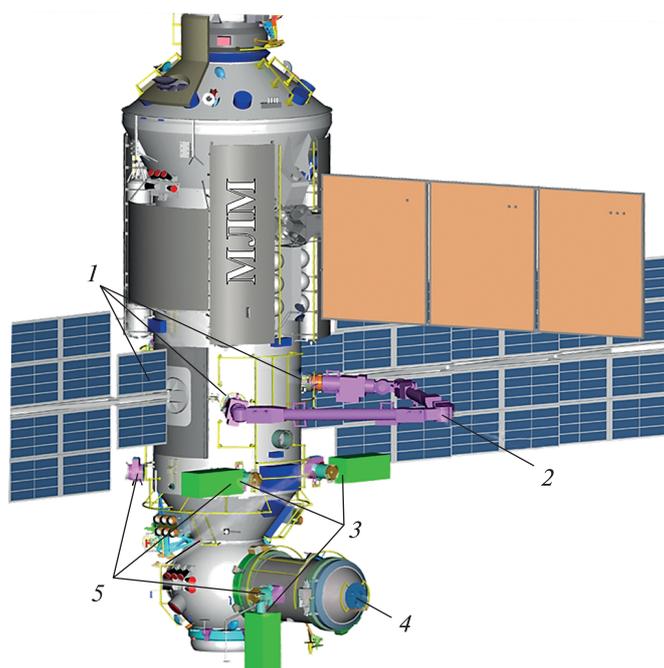


Рис. 1. Электромеханические средства технического обслуживания и шлюзовая камера на многоцелевом лабораторном модуле Международной космической станции:

1 — базовые точки; 2 — манипулятор ERA; 3 — адаптеры полезного груза; 4 — шлюзовая камера; 5 — пассивные устройства фиксации

ЭМС ТО: внешний пульт и управляющий лэптоп (внутренний пульт) — на рис. 2. По периферии экрана внутреннего пульта отображается служебная информация в буквенно-цифровом виде, в центре экрана — псевдотрехмерное изображение манипулятора и внешней поверхности МКС. Форма (поза) манипулятора и его положение на поверхности МКС вычисляется по показаниям угловых датчиков в шарнирах и датчиков на базовых точках и такелажных элементах и преобразуется в трехмерный вид на основе заранее заложенной 3D-модели МКС. На рис. 3 представлены адаптеры и их интерфейсы с манипулятором и пассивным устройством фиксации — такелажные элементы и активное устройство фиксации соответственно.

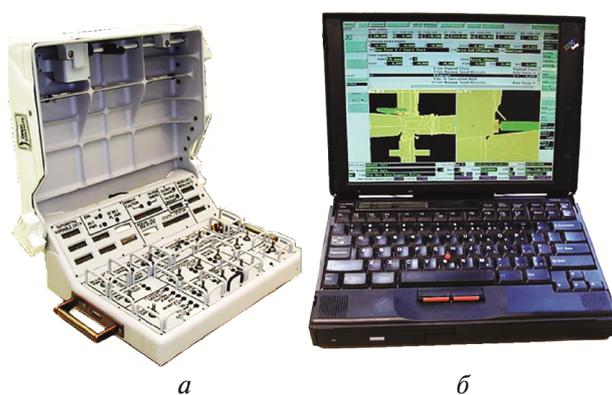


Рис. 2. Внешний (а) и внутренний (б) пульта управления

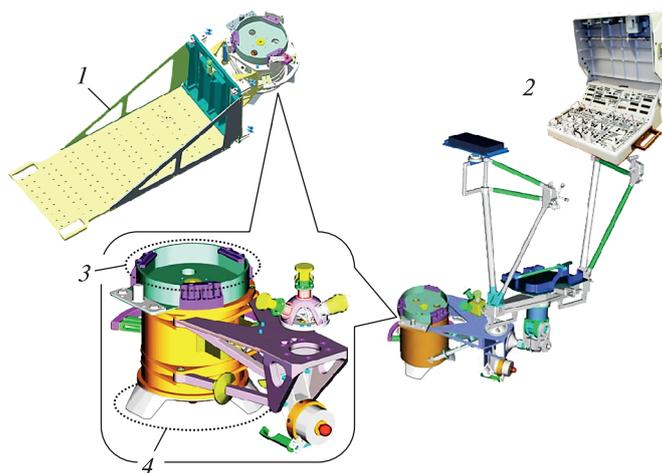


Рис. 3. Адаптер полезного груза (1) и адаптер переносного рабочего места с внешним пультом управления (2), такелажным элементом (3) и активным устройством фиксации (4)

Вышеперечисленный набор РтС российского сегмента планируется использовать для выполнения следующих функций [10].

1. Монтажно-такелажные работы:

- сборка российского сегмента МКС с помощью выполнения манипулятором ERA двух операций по окончательной сборке МЛМ, а именно: по переносу и установке на МЛМ шлюзовой камеры и дополнительного радиатора-теплообменника;

- перенос грузов на АдПГ (из/в российскую шлюзовую камеру и с/на пассивное устройство фиксации).

2. Перемещение и фиксация космонавтов при ВКД (с использованием АдПРМ), обеспечение рабочего места: доставка инструментов и оборудования (с использованием АдПГ), ТВ-мониторинг рабочей зоны.

3. Инспекция внешней поверхности МКС с использованием ТВ-камер манипулятора.

Перечень решаемых российскими РтС задач намеренно дан в той же последовательности, что и перечень задач американских и японских РтС. Поэтому хорошо видно, что область применения *планируемых* российских РтС уже, чем у *находящихся в эксплуатации* американских и японских. Планы задействования российских РтС также пока довольно скромные. В настоящее время такую ситуацию можно считать вполне приемлемой, поскольку РтС представляют собой сложную и малоосвоенную в отечественной космонавтике систему. Отечественный опыт летной эксплуатации космических манипуляторов в составе пилотируемых комплексов ограничивается эксплуатацией АСПр (автоматической системы перестыковки) в составе орбитального комплекса «Мир» [8]. Манипуляторы «Пеликан» и «Аист», находившиеся в разной степени готовности, так и не были доведены до этапа летных испытаний [8, 12]. Основными элементами АСПр орбитального комплекса «Мир» были два двухстепенных манипулятора, единственная задача которых заключалась в перестыковке модулей с осевого стыковочного узла на боковые.

Летная эксплуатация семистепенного «шагающего» манипулятора, способного перемещать в пространстве грузы по различным траекториям, а также эксплуатация всех сопряженных с манипулятором бортовых систем на первый взгляд представляется довольно сложной задачей. Однако если разложить ее на ряд подзадач, распределив их по уровням освоенности в части летной эксплуатации, она будет выглядеть не столь трудной. В настоящее время регулярно решаются следующие подзадачи летной эксплуатации РтС:

1) режим управления бортовыми системами МКС — «ВКД» (вводится при работах американских и японских РтС вне зависимости от того, работает ли экипаж вне станции или нет);

2) управление ТВ-средствами плюс задействование ТВ-систем — партнеров по МКС.

Предусматривается решение группы подзадач, аналогичных выполняемым ныне регулярным операциям. Перечислим их:

1) загрузка программ управления манипулятором, обмен данными РТС с вычислительной сетью МКС;

2) работы со шлюзовой камерой (по аналогии с работами с переходными и выходными люками, прямым и обратным шлюзованием при ВКД);

3) захват/отпускание такелажного элемента, стыковка/расстыковка адаптеров и УФП (по аналогии с управлением механизмами стыковочных узлов);

4) опосредованное управление РТС, т. е. руководство действиями экипажа, управляющего ЭМС ТО (по аналогии с управлением грузовым кораблем с пульта телеоператорного режима управления на МКС).

Абсолютно новыми, еще не освоенными являются следующие подзадачи:

1) использование телевизионно-лазерной системы прицеливания;

2) одновременная работа во время ВКД космонавтов и дистанционно управляемого изменяющего форму и перемещающегося манипулятора;

3) контроль сложного пространственного перемещения многошарнирного манипулятора в непосредственной близости от внешней поверхности станции.

Корректность принятых решений по новым и имеющим аналогично подзадачам будет проверена на этапе подготовки к летным испытаниям РТС и окончательно подтверждена непосредственно при проведении летных испытаний.

В заключение изложим мнение автора относительно требований в части модернизации существующих и разработки перспективных российских космических РТС. Из перечисленных функций, возложенных на робототехнику, следует, что РТС являются полезной, необходимой и в некоторых случаях незаменимой бортовой системой пилотируемых станций, поэтому для ликвидации явного отставания российских РТС от аналогичных систем партнеров по МКС необходимо параллельное проведение новых летных испытаний, накопление опыта летной эксплуатации манипуляторов и развитие российских РТС. С точки зрения летной эксплуатации видятся следующие требования по развитию РТС российского сегмента МКС.

1. Реализация дистанционного управления манипулятором ERA с Земли с соответствующими доработками бортового и наземного контуров управления. В настоящее время нет такой возможности. Для манипуляторов SSRMS, SPDM и JEMRMS она была реализована в

2006, 2009 и 2013 гг. соответственно. Более того, в настоящее время манипулятор SPDM управляется только с Земли.

2. Расширение возможностей по инспекции внешней поверхности МКС реально при замене камер манипулятора ERA на современные образцы, отвечающие следующим требованиям:

- передача цвета (штатные ТВ-камеры ERA черно-белые);
- высокое разрешение (у ТВ-камер ERA 550×288 пикселей);
- яркая подсветка (у ТВ-камер ERA только лазерная подсветка для прицеливания);
- двухступенной привод (штатные ТВ-камеры ERA закреплены неподвижно);
- трансфокатор (у ТВ-камер ERA его нет);
- работа в инфракрасном диапазоне (у ТВ-камер ERA его нет).

С учетом принадлежности камер к так называемому ORU (orbital replace unit — блок, который можно заменить во время летной эксплуатации) замену ТВ-камер можно выполнить уже на борту МКС. При этом необязательно использовать для этого камеры европейской, или вообще иностранной, разработки.

3. Расширение зоны досягаемости манипулятора ERA за счет увеличения числа базовых точек, в том числе и на модулях, уже входящих в состав российского сегмента МКС. К примеру, SSRMS имеет БТ на всех модулях американского сегмента и на одном модуле российского сегмента.

4. Интерфейс с РТС американского сегмента. С точки зрения совместной эксплуатации МКС с иностранными партнерами требуется наличие универсальных адаптеров для такелажного элемента российского и американского сегментов. Американские и японские РТС уже имеют совместимость своих такелажных элементов (в части механического интерфейса).

5. Введение в состав ЭМС ТО навесного оборудования, обеспечивающего запуск микро/наноспутников. Это требование выглядит вполне логичным при наличии в составе российского сегмента МКС манипулятора и шлюзовой камеры. Задел по такому оборудованию уже есть, например контейнер микроспутника «Чибис-М», запущенного с борта корабля «Прогресс М-13М» после его отстыковки от МКС [13].

6. Разработка копирующих манипуляторов антропоморфного типа. Работы этого направления успешно ведутся в России и за рубежом: созданы роботы Robonaut 2 (NASA) и Justin (DLR); антропоморфные робототехнические системы SAR-400 и SAR-401 (НПО «Андроидная техника»); космическая транспортно-манипуляционная система (ЦНИИ РТК) и ОКР «Косморобот» (ПАО «РКК «Энергия»). Такие роботы должны иметь интерфейсы и такелажные элементы,

совместимые с манипулятором ERA, что позволит перемещать их в требуемое место на поверхности МКС. В этом случае антропоморфные копирующие манипуляторы возьмут на себя функции малых манипуляторов типа SPDM и SMA и позволят частично или полностью заменить космонавтов при ВКД.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kaupp H., Bains E., Flores R., Jorgensen G., Kuo Y.M., White H. *Shuttle Robotic Arm. Engineering Innovations*, pp. 286–296. URL: http://www.nasa.gov/centers/johnson/pdf/584734main_Wings-ch4h-pgs286-301.pdf (дата обращения 11.11.2018).
- [2] *ISS Robotics Systems Overview ROBOTIC OVC 21002*. Houston, Texas, NASA, L.B. Johnson Space Center, 2001, 46 p.
- [3] Callen Ph. *Robotic Transfer and Interfaces for External ISS Payloads*. NASA/JSC, 2014. URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20140008717.pdf> (дата обращения 11.11.2018).
- [4] Currie N.J., Peacock B. *International Space Station robotic systems operations — a human factors perspective*. URL: https://www.nasa.gov/centers/johnson/pdf/486042main_ISSRoboticsHumanFactorsPerspective.pdf (дата обращения 11.11.2018).
- [5] *Canadarm2, the Canadian robotic arm on the Space Station*. URL: <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/iss/canadarm2/default.asp> (дата обращения 11.11.2018).
- [6] *Canadarm2 and the Mobile Servicing System*. URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/structure/elements/mss.html (дата обращения 11.11.2018).
- [7] *Japanese Experiment Module Remote Manipulator System*. URL: <http://iss.jaxa.jp/en/kibo/about/kibo/rms/> (дата обращения 11.11.2018).
- [8] Белоножка П.П. Космическая робототехника. Современное состояние, перспективные задачи, тенденции развития. Аналитический обзор. *Наука и образование*, 2016, № 12, с. 110–153. DOI: 10.7463/1216.0853919
- [9] Moore R. *ISS Inspection Capabilities and Challenges*. NASA Johnson Space Center, 2014, pp. 33–37. URL: https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/R_Moore-ISS_Inspection_Capabilities_and_Challenges.pdf (дата обращения 11.11.2018).
- [10] *European Robotic Arm. Flight Operations Manual and Procedures*. Leiden, 2004, 1553 p.
- [11] Cruijssen H.J., Ellenbroek M., Henderson M., Petersen H., Verzijden P., Visser M. The European Robotic Arm: A High-Performance Mechanism Finally on its way to Space. *42nd Aerospace Mechanism Symposium*. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, 2014, pp. 319–334.
- [12] *The remote manipulator system*. URL: <http://www.buran-energia.com/bourane-buran/bourane-consti-bras.php> (дата обращения 11.11.2018).
- [13] Академический микроспутник «Чибис-М» (космический эксперимент «Микроспутник» на Российском сегменте Международной космической станции). *ФГБУН ИКИ РАН. Препринт*. Москва, 2012, Пр-2166, 25 с.

Статья поступила в редакцию 11.03.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Савин Л.А. Робототехнические системы МКС. Летная эксплуатация робототехнических систем Российского сегмента. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-6-1887>

Савин Леонид Анатольевич — сотрудник ПАО РКК «Энергия». Автор трех публикаций в области управления космической робототехникой. Область научных интересов: эксплуатация робототехнических систем в составе пилотируемых космических комплексов. e-mail: leonid.savin@sfoс.ru

ISS robotic systems. Flight operation of the Russian segment robotic systems

© L.A. Savin

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia,
Korolyov, Moscow region, 141070, Russia

The paper gives a brief review of existing robotic systems of the American segment and the planned robotic systems of the Russian segment of the International Space Station. We compared the robotic systems of the two segments in terms of the composition and the problems being solved and considered some aspects of flight operation of Russian segment robotic systems. Within the research, we pointed out the subtasks in solving of which significant practical experience has been gained, as well as the new subtasks which are analogous to the existing ones and to those which are regularly solved in flight operation of on-board systems. Moreover, we emphasized new subtasks which have no analogy and require the solutions determined at the stage of preparation for robotic systems flight tests. As a result, we give our vision of important directions for further development of ISS Russian robotic systems.

Keywords: International Space Station, robotic systems, ERA manipulator, flight operation

REFERENCES

- [1] Kaupp H., Bains E., Flores R., Jorgensen G., Kuo Y.M., White H. *Shuttle Robotic Arm. Engineering Innovations*, pp. 286–296. Available at: http://www.nasa.gov/centers/johnson/pdf/584734main_Wings-ch4h-pgs286-301.pdf (accessed November 11, 2018).
- [2] *ISS Robotics Systems Overview ROBOTIC OVC 21002*. Houston, Texas, NASA, L.B. Johnson Space Center, 2001, 46 p.
- [3] Callen Ph. *Robotic Transfer and Interfaces for External ISS Payloads*. NASA/JSC, 2014. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20140008717.pdf> (accessed November 11, 2018).
- [4] Currie N.J., Peacock B. *International Space Station robotic systems operations – a human factors perspective*. Available at: https://www.nasa.gov/centers/johnson/pdf/486042main_ISSRoboticsHumanFactorsPerspective.pdf (accessed November 11, 2018).
- [5] *Canadarm2, the Canadian robotic arm on the Space Station*. Available at: <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/iss/canadarm2/default.asp> (accessed November 11, 2018).
- [6] *Canadarm2 and the Mobile Servicing System*. Available at: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/structure/elements/mss.html (accessed November 11, 2018).
- [7] *Japanese Experiment Module Remote Manipulator System*. Available at: <http://iss.jaxa.jp/en/kibo/about/kibo/rms/> (accessed November 11, 2018).
- [8] Belonozhko P.P. *Nauka i Obrazovanie — Science and Education*, 2016, no. 12, pp. 110–153. DOI: 10.7463/1216.0853919
- [9] Moore R. *ISS Inspection Capabilities and Challenges*. NASA Johnson Space Center, 2014, pp. 33–37. Available at: <https://www.nasa.gov/sites/default/>

- files/files/R_Moore-ISS_Inspection_Capabilities_and_Challenges.pdf (accessed November 11, 2018).
- [10] *European Robotic Arm. Flight Operations Manual and Procedures*. Leiden, 2004, 1553 p.
- [11] Cruijssen H.J., Ellenbroek M., Henderson M., Petersen H., Verzijden P., Visser M. The European Robotic Arm: A High-Performance Mechanism Finally on its way to Space. *42nd Aerospace Mechanism Symposium*. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, 2014, pp. 319–334.
- [12] *The remote manipulator system*. Available at: <http://www.buran-energia.com/bourane-buran/bourane-consti-bras.php> (accessed November 11, 2018).
- [13] Akademicheskij mikrosputnik «Chibis-M» (kosmicheskij eksperiment «Mikrosputnik» na Rossiyskom segmente Mezhdynarodnoy kosmicheskoy stantsii) [Academic microsatellite “Chibis-M” (space experiment “Microsatellite” on the Russian segment of the International Space Station)]. *Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences. Preprint*, Moscow, 2012, Pr-2166, 25 p.

Savin L.A. (b. 1970) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 1993, research fellow, S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia. Author of three research publications in the field of space robotics control. Research interests: robotic system operation in manned space systems. e-mail: leonid.savin@sroc.ru