

## Методологические подходы к решению проблем управления крупномасштабными группировками космических аппаратов

© М.М. Матюшин, Н.Л. Соколов, В.М. Овечко

ФГУП ЦНИИмаш, г. Королёв, 141070, Россия

*Анализ перспективных проектов исследования космоса показывает, что к основным тенденциям развития мировой космической деятельности следует отнести значительное расширение группировок космических аппаратов различных типов и назначений, усложнение выполняемых ими целевых задач, активизацию изучения дальнего космоса. Это предопределяет необходимость решения качественно новых задач, в первую очередь, связанных с созданием эффективной космической инфраструктуры. В настоящей работе предложены методологические подходы к исследованию отдельных аспектов проблемы управления крупномасштабными группировками космических аппаратов. В частности, приведены подходы к оптимизации схем распределения наземных средств управления космическими аппаратами, оптимизации структурного построения комплексов управления, созданию рациональных моделей оперативного контроля полетной информации.*

**Ключевые слова:** космический аппарат, орбитальная группировка, управление, методологический подход, космическая инфраструктура, наземные средства, структурная оптимизация.

**Введение.** В условиях планируемого крупномасштабного развертывания орбитальных группировок пилотируемых и автоматических космических аппаратов (КА), усложнения спектра выполняемых ими задач, активизации исследования Луны, Марса, других планет и тел Солнечной системы на первый план выдвигается задача оптимизации состава перспективной космической инфраструктуры как единой сложной системы управления. Решение этой задачи предполагает проведение исследований по ряду различных направлений, в частности, таких, как разработка оптимальных схем распределения средств управления орбитальными группировками КА; создание методов и моделей анализа формальной структуры оперативного контроля полетов КА, оптимизация структурного построения средств управления КА, в том числе основного элемента космической инфраструктуры — Центра управления полетами (ЦУП) и др.

Эти задачи приобретают повышенную актуальность при ограниченном ресурсе средств наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ), а также в связи с различными условиями полета и орбитальным построением группировок КА. Принципиальным отличием управления орбитальными группировками от управления

единичными КА является то, что решение целевых задач существенно зависит не только от непосредственного принятия управленческих решений, но и от выбора структуры и состава системы управления КА (наземные средства управления, аппаратно-программные средства и интерфейсы информационного взаимодействия, бортовая аппаратура и т. п.). При этом функционирование каждого из указанных элементов описывается разнотипными специфическими моделями, что существенно затрудняет формализацию процесса управления традиционными классическими методами оптимизации. Как показал анализ существующей литературы, отсутствует общий методологический подход к исследованию проблем оптимизации космической инфраструктуры управления КА.

**Повышение требований к организации процесса управления крупномасштабными орбитальными группировками космических аппаратов.** По мере расширения состава и целевых функций КА повышаются требования к организации процесса эксплуатации группировок КА из ЦУПа как центрального звена наземного комплекса управления. В первую очередь это связано с ожидаемым увеличением объема выполнения управленческих операций, таких как:

- оперативное парирование нештатных ситуаций непосредственно в сеансах связи с КА;
- подготовка и реализация экстренных маневров КА, в том числе для уклонения от потенциально опасных объектов космического мусора;
- осуществление внеплановых коррекций программ полета КА по заявкам потребителей целевой информации.

Кроме того, перед ЦУПом возникает необходимость выполнения качественно новых задач, связанных с управлением космическими группировками как единой системой взаимосвязанных элементов, а не как совокупностью отдельно взятых объектов. К этим задачам, в первую очередь, следует отнести:

- рациональное задействование средств управления для обеспечения эффективного процесса управления группировками КА, в том числе внесение корректив в распределение указанных средств в связи с возможным возникновением нештатных ситуаций;
- оперативное перераспределение функций между отдельными КА для повышения качества и скорости получения целевой информации;
- проведение коррекций поддержания орбитальных параметров относительного расположения однородных КА, составляющих баллистически правильно построенную спутниковую систему КА.

В связи с необходимостью выполнения этих и ряда других важных функций, а также учитывая создание в структуре ЦУПа органов оперативного управления группировками РФ — Центра ситуацион-

ного анализа, координации и планирования средств НАКУ (ЦСАКП), Центра управления ретрансляцией и связью (ЦУРС) и органа распределения целевой информации — Центра полезных нагрузок (ЦПН), выдвигаются повышенные требования к совершенствованию методологии управления орбитальными группировками КА.

**Основные направления эволюции перспективной космической инфраструктуры.** Опираясь на приобретенный опыт управления пилотируемыми и автоматическими КА и основываясь на разработанных моделях и технологиях формирования автоматизированных систем управления, перечислим основные направления эволюции перспективной космической инфраструктуры.

1. Решение задач управления полетами КА можно рассматривать как функцию взаимодействующих сложных открытых систем, направленную на упорядочение, сохранение и повышение их целостности, т. е. на достижение устойчивых состояний в условиях влияния возмущающих факторов и с учетом поставленных целей.

2. Перспективные системы управления полетами будут состоять из различного числа управляющих звеньев, причем количество и взаимосвязь этих звеньев будет динамически изменяться в процессе реализации программы полета в зависимости от текущих целей и задач перспективной космической инфраструктуры.

3. Структура, в рамках которой происходит взаимодействие таких управляющих звеньев, вполне может быть подвержена изменениям от жесткой иерархической организации к усилению горизонтальных связей и обратно.

4. При взаимодействии управляющих звеньев одновременно будут протекать и процессы дифференциации и интеграции. Дифференциация заключается в появлении новых участников процесса управления полетом, новых управляющих звеньев, при этом возможна ситуация деления одного участника на несколько управляющих звеньев. Интеграция — это объединение всех участников управления полетами в единой системе.

5. Сложность структуры управления полетами космических комплексов будет возрастать как результат постоянного протекания процессов интеграции и дифференциации новых участников процесса управления полетом, новых управляющих звеньев.

6. Информационный обмен между управляющими звеньями будет возрастать, в связи с этим будут предъявляться определенные требования как к средствам обмена информацией, например наземной сетевой инфраструктуре и интерфейсам, так и к методам и процедурам организации взаимодействия.

7. «Центр тяжести» продолжит смещаться от иерархической структуры, обеспечивающей прямое подчинение одних структурных

элементов другим, к организации единого информационного пространства, при котором достигается максимально возможный уровень эффективности функционирования как отдельных управляющих звеньев, так и системы управления полетом в целом.

Эффективная организация распределенного управления предполагает решение комплекса задач согласованного функционирования элементов космической инфраструктуры. Одними из основных задач, входящих в этот комплекс, являются образование единого коммуникативного пространства, поддерживающего взаимодействие большого количества разнородных элементов системы управления полетом, обеспечение эффективной координации разных групп управления полетом внутри этого пространства.

Эффект достижения согласованной работы элементов распределенного управления полетом может быть усилен при всестороннем использовании практического опыта. Опыт, полученный отечественной космонавтикой в ходе создания и реализации распределенного управления полетом Международной космической станции, представлен, например, в [1, 2].

**Методологический подход к оптимизации схем распределения средств управления орбитальными группировками.** Для обеспечения эффективной и надежной эксплуатации орбитальных группировок КА представляется крайне важным совершенствование методологии оптимального распределения средств управления КА и оптимизации структурного состава ЦУП и наземного комплекса управления.

Рассмотрим методологический подход к решению первой оптимизационной задачи. Дадим ее формальную постановку. Для обеспечения управления группировкой, состоящей из  $N$  космических аппаратов с известными орбитальными параметрами, требуется распределить  $M$  наземных измерительных пунктов таким образом, чтобы реализовать запрашиваемое количество сеансов связи с каждым из КА. Для конкретизации решаемой задачи в качестве временного интервала распределения средств управления выбраны одни сутки полета.

Особенностью решения данной задачи является отсутствие общих закономерностей взаимодействия наземных пунктов с КА в интервалы, имеющие одинаковую продолжительность, но разнесенные во времени. Это объясняется тем, что в общем случае КА имеют различные периоды обращения, наклонения и восходящие узлы орбиты. Поэтому распределение средств управления для одного заданного временного интервала, например для одних суток полета, будет существенно отличаться от аналогичного распределения для других суток.

Для решения указанной задачи прежде всего составляются циклограммы зон радиовидимости каждого из  $M$  наземных измери-

тельных пунктов со всеми  $N$  космическими аппаратами, входящими в орбитальную группировку. Далее проводится поэтапный вычислительный процесс.

На первом этапе по разработанным циклограммам для каждого  $i$ -го пункта определяются те временные диапазоны, на которых могут проводиться сеансы связи только с одним из  $N$  космических аппаратов. После этого принимается предварительное решение о выделении данного  $i$ -го пункта для управления этим КА в соответствующем временном диапазоне.

На втором этапе после корректировки циклограмм по результатам первого этапа определяются временные диапазоны, в которых могут быть осуществлены сеансы связи с минимальным количеством КА. Одному из этих КА выделяются соответствующие наземные измерительные пункты. Приоритет отдается аппаратам с большим числом заявленных сеансов связи с наземными пунктами.

На каждом последующем этапе вычислительного процесса проводятся коррекции циклограмм с учетом предварительно выделенных пунктов управления и дополнительных ограничений по времени проведения сеансов связи. Процесс завершается после проведения итераций по выделению необходимых наземных пунктов для управления всеми КА в соответствии с их запросами.

Предварительные исследования показали принципиальную сходимость вычислительного процесса для решения сформулированной задачи для орбитальной группировки, содержащей до 60 КА, при наличии не менее 10 наземных измерительных пунктов. Сходимость вычислительного процесса обусловлена значительным превышением потенциально возможного числа сеансов связи одного наземного пункта с одним КА в сутки по сравнению с запрашиваемым количеством сеансов связи (потенциально возможное число сеансов связи одного КА с одним пунктом может достигать восьми, а запрашиваемое число, как правило, ограничивается двумя-тремя).

**Методологический подход к оптимизации структуры управления орбитальными группировками.** Предложен общий подход к решению задачи структурной оптимизации средств управления группировками КА. Следует отметить, что известны различные подходы к исследованию аналогичных проблем для сложных систем управления, основанные на методах теории массового обслуживания и теории множеств. Вместе с тем представляется целесообразным применение методологического подхода, который базируется на теории оптимизации иерархических систем управления [3–6].

В основу такого методологического подхода положены принципы формирования иерархических уровней с последующей оптимизацией процессов взаимодействия элементов сложных систем [7, 8].

Анализ функционирования элементов системы в процессе управления группировками КА позволяет выявить основные иерархические уровни:

1) *уровень координации в процессе принятия управленческих решений* (верхний уровень) — реализует координацию всех действий по управлению для наиболее эффективного выполнения целевых функций КА;

2) *уровень самоорганизации* — реализует выбор критериев и алгоритмов, используемых на нижних уровнях иерархии, для обеспечения решения главных задач управления;

3) *уровень адаптации* — осуществляет конкретизацию множеств неопределенностей для подсистем верхних уровней путем анализа текущей ситуации и выработки требований к алгоритмам решения задач подсистемами нижнего уровня;

4) *уровень выбора* — осуществляет решения частных задач в соответствии с исходными данными и алгоритмическими предписаниями от подсистем высшего уровня.

Сформулируем методологический подход к определению оптимальной структуры и состава иерархических систем. Введем обозначения:

$C_1$  — подсистема верхнего уровня;

$C_{2i}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),  $C_{3j}$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ),  $C_{4k}$  ( $k = 1, 2, \dots, l$ ) — совокупности подсистем второго, третьего и четвертого иерархических уровней соответственно;

$P$  — управляющий процесс;

$m$  — множество управляющих воздействий;

$\omega$  — множество внешних возмущений;

$r$  — множество информационных воздействий, выдаваемых подсистемами второго, третьего и четвертого уровней;

$s$  — множество координирующих воздействий;

$y$  — множество выходных воздействий;

$k$  — множество информационных воздействий, выдаваемых подсистемой верхнего уровня;

$u$  — множество связей между элементами системы.

Представим модель функционирования системы управления в терминах теории множеств.

Управляемый процесс задается отображением

$$P: m \times \omega \rightarrow y.$$

Модель координатора представляется в виде

$$C_1: k \rightarrow s.$$

Модель функционирования  $i$ -й подсистемы ( $i = 2, 3, 4$ ) реализуется в виде отображения

$$C_i: s \times r_i \rightarrow m_i.$$

Соответственно информационные обратные связи всех уровней иерархии реализуются отображениями

$$f_i: s \times r \times m \rightarrow k; \quad f_i: m_i \times \omega \times y \rightarrow r.$$

Глобальная задача оптимизации отражает основную цель управления и формируется в следующей постановке: требуется определить такое множество управляющих воздействий  $m$ , при которых глобальная целевая функция  $g(m) = G[m, P(m)]$  достигает своего максимума. Применительно к рассматриваемой задаче оптимизации структуры управления орбитальными группировками в качестве целевых функций могут быть использованы минимум времени выполнения операций, минимум задействованного персонала управления, минимум эксплуатационных затрат и др.

При рассмотрении локальных оптимизационных задач предполагается, что управляющий процесс представлен в виде композиции подпроцессов  $P_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ), взаимодействующих между собой. Причем взаимодействие каждого подпроцесса  $P_i$  с другими реализуется через множество связей  $u_i$ . Пусть  $D_i$  — локальная оптимизационная задача, решаемая  $i$ -м управляющим органом нижнего уровня, а локальная оптимизационная функция качества решения данной задачи имеет вид

$$g_i(m_i, u_i) = G[m_i, P_i(m_i, u_i)],$$

где  $(m_i, u_i)$  — множество значений целевой функции.

Таким образом, предлагаемый подход позволяет формировать множество управляющих воздействий, подаваемых на всех иерархических уровнях системы при заданном ее структурном построении, и проводить сравнительный анализ альтернативных вариантов структурного состава иерархических систем в целях определения оптимального варианта.

**Методологический подход к созданию моделей оперативного контроля полетной информации.** Для качественного контроля всего массива параметров, характеризующих состояние объектов космической техники (ОКТ), организуется формальная иерархическая система контроля информации, поступающей с борта. На верхних уровнях такой системы контроля обрабатывается и анализируется информация о КА как комплексной сложной технической системе, а на более низких уровнях детально обрабатывается и анализируется информация о состоянии систем, подсистем, узлов, агрегатов и приборов КА.

При создании подобной иерархической системы контроля возникает задача распределения информационной нагрузки на уровни и структурные элементы этой системы. Для эффективного управления полетом такая информационная нагрузка не должна превышать определенного значения и, в идеале, должна равномерно распределяться по всей системе контроля. Одним из основных компонентов решения этой задачи является моделирование иерархической системы контроля [9, 10].

Дадим основные определения, используемые при разработке модели анализа формальной структуры оперативного контроля полетов КА.

Под *объектом контроля* будем понимать ОКТ как сложную техническую систему, в которой можно выделить подсистемы, блоки, агрегаты и т. п.

Под *иерархической структурой контроля* будем понимать такую упорядоченную систему контроля информации, поступающей с борта ОКТ, которая организована в соответствии со следующими принципами.

1. Возможно проведение вертикальной декомпозиции подсистем контроля, т. е. последовательное выделение подсистем, расположенных вертикально одна относительно другой. Эта декомпозиция обусловлена необходимостью контроля комплексного состояния ОКТ на верхнем уровне иерархии и детального контроля систем, подсистем и агрегатов на более низких уровнях иерархии.

2. Приоритет в принятии решений о состоянии ОКТ имеют подсистемы верхнего уровня, т. е. ответственность за принятие решения по распознаванию состояния КА как сложной технической системы лежит на подсистеме верхнего уровня.

3. Подсистемы верхнего уровня зависят в своих оценках от функционирования подсистем низшего уровня, т. е. принятие решений о состоянии КА как сложной технической системы в подсистеме верхнего уровня напрямую зависит от результатов распознавания состояния систем, подсистем, агрегатов КА на более низких уровнях.

Под *реакцией КА* как объекта контроля (в общем случае как объекта управления для авторизированной системы управления полетом в целом) будем понимать отклик на управляющие воздействия на такте управления  $i+1$ , которые формировались в том числе и в результате контроля состояния КА на такте управления  $i$ . При правильном распознавании состояния КА на такте управления  $i$  и соответственно корректном формировании управляющих воздействий наблюдается адекватная реакция КА на такте управления  $i+1$ .

Под *реакцией системы контроля* понимается стремление отдельных звеньев иерархической структуры контроля или системы контроля в целом повысить или понизить уровень контроля состояния КА или его

отдельных систем при изменениях КА, например при установке новой версии бортового программно-математического обеспечения или отказов тех или иных бортовых систем.

Иерархическая структура контроля в данном случае состоит из  $n$  уровней, каждому из которых присваивается номер  $i$ , при этом  $1 \leq i \leq n$ . Верхний, самый общий уровень контроля имеет номер 1; низший, самый детальный — номер  $n$ . На каждом уровне для получения результата контроля происходит обработка некоторого количества информации. Как правило, на каждом уровне иерархии может существовать  $m_i$  структурных элементов, каждому из которых присваивается номер  $j$ , при этом  $1 \leq j \leq m_i$ .

Анализируя систему контроля без учета реализуемой программы или плана полета КА, затруднительно выделить точное значение информационной нагрузки на каждый структурный элемент в общем виде. Однако в этом случае можно оценить максимальные и минимальные значения информационной нагрузки.

Будем считать, что можно априори получить максимальное и минимальное количество информации, перерабатываемое на каждом уровне иерархии контроля. Эти максимальные и минимальные значения определяются исходя из возможностей средств системы бортовых измерений, каналов передачи данных, средств наземного контура управления, соответствующего программно-математического обеспечения.

В определенном смысле объект «ОКТ — система контроля» представляет собой замкнутый самоорганизующийся контур, имеющий прямые и обратные связи. Уровень информационной нагрузки на любой структурный элемент в рассматриваемый период времени является результатом системного взаимодействия всех компонентов объекта: начального состояния системы, топологии системы контроля, реакции бортовых систем ОКТ и др.

**Заключение.** Предложенные методологические подходы и модели позволяют принципиально решить задачи, играющие важную роль в формировании перспективной космической инфраструктуры. Вместе с тем для окончательного выбора и обоснования оптимальных решений представляется необходимым проведение имитационного моделирования возможных ситуаций при управлении орбитальных группировок КА для широкого набора начальных условий и исходных данных. Эти подходы могут найти применение в различных областях научно-исследовательской и практической деятельности.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. *Управление космическими полетами*. Ч. 1, 2. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 912 с.

- [2] Любинский В.Е., Соловьев В.А. Управление полетом МКС: развитие методов и средств управления орбитальными комплексами. *Полет*, 2005, № 6, с. 3–6.
- [3] Ванин А.В., Воронов Е.М., Карпунин А.А. Оптимизация управления в двухуровневой иерархической системе стабилизации — наведения летательного аппарата. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2012, № 6, с. 19–42.
- [4] Багдасарян А.Г. Общая структура информационной экспертной системы моделирования и анализа сложных иерархических систем в контуре управления. *Управление большими системами. Сб. тр.* Москва, Изд-во Института проблем управления РАН, 2008, № 21, с. 58–70.
- [5] Ivanov V.M., Nosova C.R. Optimization methodology of hierarchical control of orbital constellations. *Proceedings of the 15th International Conference on Automatic Control, Modelling & Simulation (ACMOS '13)*. Recent Advances in Electrical Engineering Series. Brasov, Romania, 1–3 June 2013, pp. 32–36.
- [6] Sokolov N.L. *Optimization methodology of hierarchical control of orbit groups*. Lambert academic publishing, 2014, 70 p.
- [7] Gavrilu A., Croitoru A. Fuzzy multisubmeasures and applications. *Proceedings of the 9<sup>th</sup> WSEAS International conference on FUZZY SYSTEMS (FS '08)*. Published by WSEAS Press [www.wseas.org](http://www.wseas.org). Sofia, Bulgaria, 2–4 May 2008, pp. 113–119.
- [8] Подиновская О.В., Подиновский В.В. Анализ иерархических многокритериальных задач принятия решений методами теории важности критериев. *Проблемы управления*, 2014, № 6, с. 2–8.
- [9] Матюшин М.М. Использование логико-вероятностной модели для оценки значимости структурных элементов оперативного контура управления РС МКС. *Космонавтика и ракетостроение*, 2007, вып. 1(46), с. 144–153.
- [10] Bulekbaeva K., Brener A., Turalina M. Relaxation models of competing manufactures dynamics. *13<sup>th</sup> International Conference on Systems Theory and Scientific Computation (ISTASC 13)*. Valencia, Spain, 6–8 August, 2013, pp. 147–151.

Статья поступила в редакцию 08.02.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Матюшин М.М., Соколов Н.Л., Овечко В.М. Методологические подходы к решению проблем управления крупномасштабными группировками космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 2. URL: <http://engjournal.ru/catalog/arse/adb/1463.html>

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XL Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 26–29 января 2016 г.*

**Матюшин Максим Михайлович** родился в 1974 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1997 г. Д-р техн. наук, заместитель генерального директора — начальник Центра управления полетами в Центральном научно-исследовательском институте машиностроения. Автор более 40 научных публикаций. Область научных интересов: системный анализ, проектирование систем управления космическими аппаратами. e-mail: [mccm@mcc.rsa.ru](mailto:mccm@mcc.rsa.ru)

**Соколов Николай Леонидович** родился в 1951 г., окончил МЛТИ в 1974 г. Канд. техн. наук, начальник отдела «Проектно-поисковые и научно-прикладные исследования проблем управления перспективными космическими комплексами» Центрального научно-исследовательского института машиностроения. Автор более 70 научных публикаций. Область научных интересов: баллистика, механика полета, оптимальное управление космическими аппаратами. e-mail: sokolov@mcc.rsa.ru

**Овечко Владимир Михайлович** родился в 1950 г., окончил ЛИАП в 1974 г. Заместитель начальника отдела «Проектно-поисковые и научно-прикладные исследования проблем управления перспективными космическими комплексами» Центрального научно-исследовательского института машиностроения. Автор более 15 научных публикаций. Область научных интересов: системный анализ, динамика полета и управление космическими аппаратами. e-mail: ovm-mps@yandex.ru

## Methodological approaches to solving problems of large-scale spacecraft constellation control

© М.М. Matyushin, N.L. Sokolov, V.M. Ovechko

FSUE Central Research Institute of Machine Building, Korolev town, 141070, Russia

*Analysis of advanced projects of space exploration shows that the main developmental trend in the global space activity should include a significant expansion of spacecraft groups of different types and purposes, the complication of missions, focus on the deep space research. It predetermines the necessity of solving qualitatively new tasks primarily related to the establishment of efficient space infrastructure. The article discusses new methodological approaches to the research of particular aspects of the large-scale spacecraft constellation control problems. In particular, there is a description of approaches to optimization of allocation of ground facilities for spacecraft control, to optimization of control complex structures, to the development of rational model for the flight information operative control.*

**Keywords:** spacecraft, spacecraft constellation, control, methodological approach, space infrastructure, ground facilities, structural optimization.

### REFERENCES

- [1] Soloviev V.A., Lysenko L.N., Lyubinskiy V.E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami. Ch. 1, 2* [Space Flight Control. Parts 1, 2]. Moscow, BMSTU Publ., 2009, 912 p.
- [2] Lubinskiy V.E., Soloviev V.A. *Polet – Flight*, 2005, no. 6, pp. 3–6.
- [3] Vanin A.V., Voronov E.M., Karpunin A.A. *Vestnic MGTU im. N.E. Baumana. Seriya Estestvennyye nauki – Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Natural Sciences*, 2012, no. 6, pp. 19–42.
- [4] Bagdasaryan A.G. Obshchaya struktura informatsionnoy ekspertnoy sistemy modelirovaniya i analiza slozhnykh ierarkhicheskikh sistem v konture upravleniya. Upravlenie bolshimi sistemami. [A General Structure of Information Expert System for Simulation and Analysis of Complex Hierarchical Systems in Control Loop. Control of Large-Scale Systems]. *Trudy Instituta problem upravleniya RAN* [Proc. of the Institute of Control Sciences, RAS], 2008, no. 21, pp. 58–70.
- [5] Ivanov V.M., Nosova C.R. Optimization methodology of hierarchical control of orbital constellations. *Proceedings of the 15th International Conference on Automatic Control, Modeling & Simulation (ACMOS '13). Series: Recent Advances in Electrical Engineering*. Brasov, Romania, June 1–3, 2013, pp. 32–36.
- [6] Sokolov N.L. *Optimization methodology of hierarchical control of orbit groups*. Lambert academic publishing, 2014, 70 p.
- [7] Gavrilut A., Croitoru A. Fuzzy multisubmeasures and applications. Advanced topics on fuzzy systems. *Proceedings of the 9th WSEAS International conference on FUZZY SYSTEMS (FS '08)*. WSEAS Press Publ., Sofia, Bulgaria, 2–4 May 2008, pp. 113–119. Available at: [www.wseas.org](http://www.wseas.org).
- [8] Podinovskaya O.V., Podinovskiy V.V. *Problemy upravleniya – Management Problems*, 2014, no. 6, pp. 2–8.
- [9] Matyushin M.M. *Kosmonavtika i raketostroenie – Cosmonautics and Rocket Engineering*, 2007, no. 1(46), pp. 144–153.
- [10] Bulekbaeva K., Brener A., Turalina M. Relaxation models of competing manufactures dynamics. *13th International Conference on Systems Theory and Scientific Computation “Recent advances in systems theory, signal processing and*

*computation*" (ISCGAV '13, ISTASC '13). Valencia, Spain, August 6–8, 2013, pp. 147–151.

**Matyushin M.M.** (b. 1974) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 1997. Dr. Sci. (Eng.), Deputy General Director – Head of the Mission Control Center, Central Research Institute of Machine Building. Author of over 40 research publications. Research interests: system analysis, design of spacecraft control systems. e-mail: mccm@mcc.rsa.ru

**Sokolov N.L.** (b. 1951) graduated from Moscow State Forest University in 1974. Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department, Central Research Institute of Machine Building. Author of over 70 research publications. Research interests: ballistics, flight mechanics, spacecraft optimal control. e-mail: sokolov@mcc.rsa.ru

**Ovechko V.M.** (b. 1950) graduated from Leningrad Institute of Aviation Instrument in 1974. Deputy Head of the Department, Central Research Institute of Machine Building. Author of over 15 research publications. Research interests: system analysis, spacecraft flight dynamics and control. e-mail: ovm-mps@yandex.ru