

Методика оценивания эффективности функционирования наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами

Колпин М.А., Проценко П.А.*, Слащев А.В.

Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

ВКА имени А.Ф. Можайского, Ждановская набережная, 13, Санкт-Петербург,

197082, Россия

**e-mail: prosvka@gmail.com*

Аннотация

Сформулирована актуальность научной задачи оценивания эффективности функционирования наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ) космическими аппаратами (КА). Предложена методика оценивания эффективности функционирования НАКУ КА, включающая систему показателей эффективности и совокупность процедур и операций её исследования.

Методика оценивания эффективности функционирования НАКУ КА заключается в количественном оценивании возможностей определенной структуры НАКУ КА по управлению заданной орбитальной группировкой (ОГ) КА с учетом технических, технологических, ресурсных и пространственно-временных ограничений, накладываемых на процесс управления КА, посредством решения задачи планирования задействования средств НАКУ КА. Разработанная методика доведена до уровня программно-математического обеспечения, позволяющего

получать рациональные планы задействования средств НАКУ для управления ОГ КА и оценивать эффективность их реализации.

Ключевые слова: наземный автоматизированный комплекс управления, космический аппарат, эффективность, технологический цикл управления.

1. Введение

В условиях многообразия и сложности задач, решаемых в космосе и из космоса с использованием космических аппаратов различного целевого назначения, особенно важным является вопрос обеспечения эффективности их целевого функционирования.

Эффективность функционирования ОГ КА напрямую зависит от качества решения задач управления КА, которое заключается в управлении их бортовыми системами с использованием средств НАКУ. Под НАКУ понимается совокупность взаимосвязанных технических средств, информационного, математического и программного обеспечения, предназначенная для формирования наземных комплексов управления (НКУ) всеми типами отечественных КА. В НКУ решаются задачи обеспечения реализации программ управления КА определенного целевого назначения, а также выдачи управляющих воздействий на основе анализа измерительной информации о состоянии КА.

Планирование задействования ресурса НАКУ для проведения операций управления КА характеризуется циклической технологически сложной многоэтапной процедурой. Основной целью планирования задействования НАКУ является бесконфликтное распределение его ресурса, а результатом – план

проведения операций управления по каждому КА на сутки, в котором указано время их проведения и перечень задействуемых средств управления КА.

Существующая технология планирования привлечения средств НАКУ для управления КА заключается в децентрализованном планировании их задействования в центрах управления полетами (ЦУП) и последующей координации полученных планов на предмет разрешения конфликтных ситуаций между заявками различных ЦУП.

Таким образом, от состава, структуры НАКУ и качества планирования распределения его ресурса напрямую зависит возможность удовлетворения заявок ЦУП на задействование тех или иных средств управления КА, т.е. возможность выдачи управляющих воздействий на борт КА и проведения необходимого объема измерений в требуемые сроки.

Методологическая база оценивания эффективности функционирования таких сложных систем, как КС(К), основывается на использовании методологии системного подхода, принципов и методов системотехники, методов теории оптимального управления и многомодельных исследований, а также их приложений к вопросам управления космическими средствами, получивших название космической кибернетики. Развитию этого направления посвящены работы В.Н. Калинина, Б.А. Резникова, И.И. Делия и их учеников Б.В. Соколова, Ю.С. Мануйлова, А.Н. Павлова и других ученых [1-6]. Однако большинство работ перечисленных авторов ориентировано на исследование процессов функционирования НКУ КА определенного целевого назначения, например, КА навигации или связи. Работам же оценивания эффективности функционирования

НАКУ как единой системы управления КА, из которой на оперативный интервал времени выделяется ресурс для решения задач управления КА конкретных КС(К), не уделено должного внимания.

Данное обстоятельство обусловлено особенностями экстенсивного периода развития НАКУ в конце XX-го века, которые способствовали появлению большой номенклатуры типов бортовых комплексов управления КА и, соответственно, наземных средств управления КА, что привело к обоснованной декомпозиции задачи оценивания возможностей НАКУ на задачи оценивания возможностей отдельных НКУ КА.

Однако на современном этапе развития НАКУ существует тенденция к сокращению номенклатуры типов бортовых комплексов и наземных средств управления, которое в совокупности с наращиванием состава отечественной ОГ КА приводит к возрастанию числа конфликтов между ЦУП КА по задействованию общего технического ресурса НАКУ.

Кроме того, отсутствие единой методологической базы оценивания эффективности функционирования и возможностей НАКУ, которая включала бы единую систему показателей и совокупность методов её исследования, делает практически нереализуемой процедуру научного обоснования и оценивания эффективности различных вариантов развития и совершенствования НАКУ, внедрения перспективных средств и технологий управления КА.

Результаты анализа применимости научно-методического задела в области оценивания возможностей отдельных НКУ по управлению КА показывают, что их использование затруднительно для оценивания эффективности НАКУ в целом.

В первую очередь, это связано со сложностями формализации и решения задачи поиска оптимального плана задействования средств НАКУ для выполнения комплекса операций управлений ОГ КА в динамической или статической постановке. Данные сложности обусловлены большой размерностью оптимизационной задачи и невозможностью формализованного учета всей системы технологических ограничений, накладываемых на процесс управления КА различного целевого назначения (различный состав операций управления, последовательность выполнения операций, совместимость проведения операций, их длительности и т.д.).

В связи с этим, актуальной становится разработка альтернативных подходов к оцениванию эффективности НАКУ, позволяющих исходя из состава, структуры и параметров управляемой ОГ КА, НАКУ, а также требований и ограничений технологий управления КА, получать оценки показателей эффективности функционирования НАКУ КА.

2. Показатели эффективности функционирования НАКУ КА

Результаты анализа нормативных документов, эксплуатационной документации и научной литературы [2,3,7,8], регламентирующих и описывающих функционирование НАКУ КА, показывают, что для оценивания его эффективности используется различный набор показателей. При этом, одноименные показатели зачастую носят различный физический смысл, различаются и методики их определения.

Кроме того, используемые показатели эффективности, как правило, отражают внутренние свойства НАКУ. Качественные связи с метасистемой (ОГ КА) – практически не оцениваются.

В связи с этим, эффективность НАКУ предлагается исследовать по следующей системе показателей, отражающей основные характеристики процесса управления КА:

1) полнота управления КА – количество КА, управление которыми возможно реализовать по установленным технологическим циклам управления с использованием заданной структуры НАКУ;

2) оперативность управления КА – средний интервал времени между получением команды на проведение операции управления КА и ближайшим возможным временем её выполнения;

3) непрерывность управления КА – отношение суммарного времени нахождения КА в зоне радиовидимости средств НАКУ к исследуемому интервалу управления КА;

4) устойчивость управления КА – отношение количества КА, управление которыми возможно реализовать по установленной технологии с использованием заданной структуры НАКУ в условиях воздействия различного рода возмущений, к общему количеству КА в ОГ.

Указанные показатели эффективности рассчитываются отдельно для низкоорбитальных КА, КА системы ГЛОНАСС, а также для КА на высокоэллиптических и геостационарных орбитах.

Кроме того, для получаемых планов задействования средств НАКУ оценивается показатель загруженности средств управления, который определяется отдельно для каждого типа средств НАКУ. Показатель представляет собой среднее значение отношения суммарного времени задействования средства на исследуемом интервале времени к длительности данного интервала.

3. Методика оценивания эффективности функционирования НАКУ КА

Структурно-логическая схема методики оценивания эффективности функционирования НАКУ КА представлена на рисунке 1.

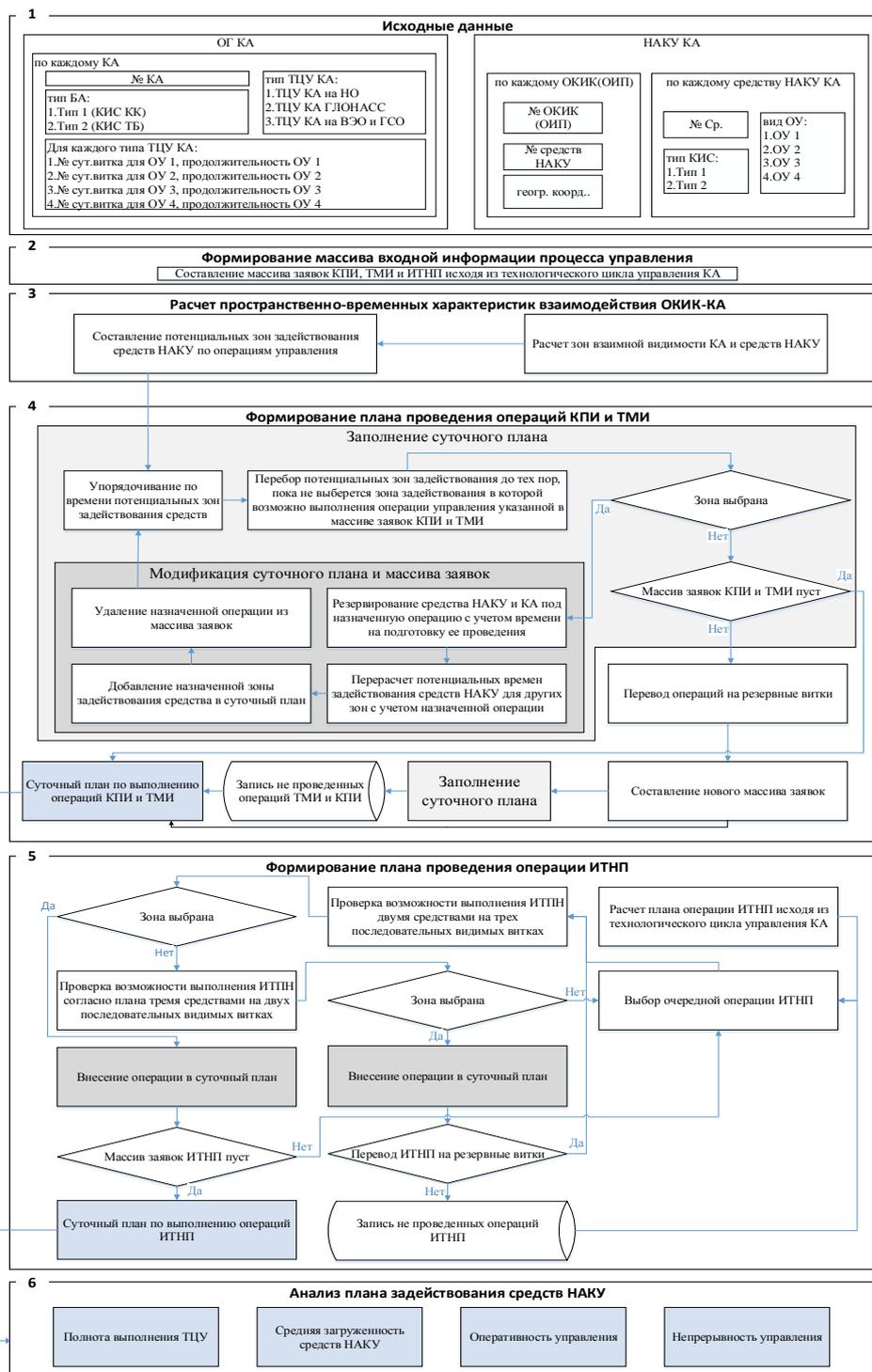


Рисунок 1 – Структурно-логическая схема методики оценивания эффективности функционирования НАКУ КА

Методика включает в себя 6 основных блоков.

В первом блоке задаются исходные данные о составе, структуре и параметрах управляемой ОГ КА, НАКУ КА, а также системе технических и технологических ограничений, накладываемых на процесс управления КА.

Данные об орбитальной группировке содержат информацию о пространственном положении каждого КА, типе его бортового комплекса управления, а также структуре и параметрах технологического цикла управления (ТЦУ), установленного изготовителем КА в эксплуатационной документации.

Технологическим циклом управления КА называют циклически повторяющуюся последовательность операций управления КА с учетом объемов (длительностей) их выполнения и системы отношений между ними (совместность, несовместность, следование), направленную на обеспечение работоспособности бортовых систем КА [7].

Именно ТЦУ КА обуславливают сложность решения задачи оценивания эффективности функционирования НАКУ, т.к. возможности НАКУ по проведению необходимого количества операций управления КА нельзя получить простым суммированием возможностей по выполнению операций отдельными средствами НАКУ или отдельными командно-измерительными комплексами (ОКИК).

К основным операциям управления КА относятся:

- закладка командно-программной информации (КПИ) на борт КА для решения задач командно-программного обеспечения процесса управления КА;
- сверка, фазирование и коррекция бортовой шкалы времени (СФК) для решения задач частотно-временного обеспечения процесса управления КА;
- прием и обработка телеметрической информации (ТМИ) для решения задач

информационно-телеметрического обеспечения процесса управления КА;

– проведение и обработка измерений текущих навигационных параметров (ИТНП) для решения задач баллистико-навигационного обеспечения процесса управления КА.

В представленной методике ТЦУ КА задаются сопоставлением каждой операции управления КА номера видимого суточного витка, на котором средства НАКУ должны её выполнить.

В связи с тем, что длительность операции СФК в сравнении с остальными операциями управления является небольшой, а её выполнение осуществляется, как правило, совместно с операцией закладки КПИ, указанные операции объединены в единую операцию.

Наземный автоматизированный комплекс управления КА задается географическими координатами ОКИК и их оснащением средствами управления КА. Каждое средство управления описывается определенным функционалом – видами операций управления, которые оно выполняет, а также типом бортовой аппаратуры КА, с которыми данное средство взаимодействует.

Система технических и технологических ограничений информационного взаимодействия НАКУ-КА также учитывает:

– возможность (невозможность) одновременного проведения операций управления несколькими средствами по одному КА;

– нормативное время, необходимое каждому типу средств для подготовки к проведению операции управления по очередному КА;

– возможность последовательного проведения нескольких операций управления при нахождении КА в одной зоне радиовидимости.

Во втором блоке методики осуществляется формирование массива заявок на проведение операций закладки КПИ, приема ТМИ и ИТНП исходя из технологического цикла управления каждым КА. Заявка включает в себя следующий набор параметров:

- номер КА;
- тип операции управления;
- номер видимого суточного витка, на котором требуется провести операцию управления;
- длительность выполнения операции управления.

В третьем блоке производится расчет пространственно-временных характеристик взаимодействия ОКИК-КА в следующей последовательности:

1) с использованием модели движения КА в нормальном гравитационном поле Земли осуществляется прогноз движения КА на исследуемый интервал времени и расчет зон взаимной видимости КА и средств управления для каждого ОКИК;

2) в результате проведенных расчетов составляется массив потенциальных зон задействования средств НАКУ для проведения операций управления с учетом технической совместимости средств управления с бортовой аппаратурой КА. Каждая потенциальная зона задействования средства НАКУ задается следующим набором параметров:

- номер ОКИК;

- номер средства управления;
- номер КА;
- тип операции управления;
- время входа в зону видимости;
- время выхода из зоны видимости;
- номер суточного витка;
- номер видимого суточного витка (видимые витки номеруются последовательно);
- потенциальное время начала задействования средства (изначально равно времени входа в зону видимости);
- потенциальное время окончания задействования средства (изначально равно времени выхода из зоны видимости).

В четвертом блоке методики осуществляется формирование плана проведения операций закладки КПИ и приема ТМИ. Для этого производится упорядочивание потенциальных зон задействования средств управления по времени их начала. Далее осуществляется последовательный перебор потенциальных зон задействования до выполнения условия соответствия параметров очередной выбранной зоны задействования параметрам хотя бы одной заявки из массива заявок закладок КПИ и приема ТМИ. Заявка может быть выполнена в рассматриваемой зоне задействования средства, если её параметры (номер КА, тип операции управления и номер видимого суточного витка) совпадают с параметрами выбранной потенциальной зоны задействования, а интервал времени между

потенциальным началом и окончанием задействия средства больше интервала времени, требуемого для проведения операции управления. При выборе зоны задействия осуществляется процедура исключения соответствующего интервала времени из других потенциальных зон задействия для данных КА и средства управления.

В случае, если в процессе последовательного перебора устанавливается, что множество потенциальных зон задействия исчерпано или условие соответствия параметров зон задействия параметрам хотя бы одной заявки из массива заявок закладок КПИ и приема ТМИ не выполняется, план проведения операций закладок КПИ и приема ТМИ считается сформированным, после этого осуществляется переход к формированию плана проведения операций ИТНП.

В пятом блоке методики осуществляется формирование плана проведения операции ИТНП. Для КА на высокоэллиптических, геостационарных орбитах и КА системы ГЛОНАСС планирование операций ИТНП проводится по тому же алгоритму, что и планирование операций закладок КПИ и приема ТМИ. Для низкоорбитальных же КА на процесс планирования проведения операций ИТНП накладываются дополнительные ограничения. В настоящее время для данных КА предпочтительная технология проведения ИТНП предусматривает выполнение последовательных измерений двумя средствами НАКУ на трех последовательных витках или тремя средствами на двух последовательных витках. С учетом данных требований, формируется план проведения операции ИТНП, который совместно с планом проведения операций закладок КПИ и приема ТМИ составляют план задействия средств НАКУ.

В шестом блоке методики осуществляется расчет показателей эффективности функционирования НАКУ КА путем анализа рассчитанного плана задействования средств НАКУ.

Расчет устойчивости управления КА осуществляется многократным решением задачи планирования задействования средств НАКУ для различных конфигураций НАКУ.

4. Программное средство оценивания эффективности функционирования НАКУ КА

На основе предложенной методики разработано программное средство, позволяющее автоматизировать процессы формирования рационального плана задействования средств НАКУ и оценивания эффективности его реализации. Программное средство реализовано с использованием кроссплатформенного инструментария разработки программного обеспечения Qt 4.8.4. Структура программного средства представлена на рисунке 2.

Программное средство состоит из трех модулей:

- модуль ввода исходных данных, в котором осуществляется выбор моделируемой ОГ КА, ТЦУ каждым КА, а также состав и структура НАКУ;
- модуль формирования плана задействования средств НАКУ;
- модуль расчета показателей эффективности функционирования НАКУ;
- модуль отображения результатов планирования и оценивания эффективности функционирования НАКУ.



Рисунок 2 – Структура программного средства оценивания эффективности функционирования НАКУ

Результаты планирования отображаются в табличной (рисунок 3) и графической (рисунок 4) формах. Кроме того, имеется возможность наблюдения взаимодействия средств управления с КА при отработке полученного плана задействования НАКУ в 3D режиме (рисунок 5).

Рассчитанные показатели эффективности функционирования НАКУ представляются в виде столбчатых диаграмм (рисунок 6), что облегчает восприятие полученных результатов.

КА	ОКИК	Средство	Операция	Начало	Окончание	Видимый виток
КА8-3	ОКИК 9	КК	КПИ	02:50:10	02:54:15	1
КА8-3	ОКИК 9	МА9	ТМИ	04:33:30	04:35:55	2
КА8-3	ОКИК 2	КК	КПИ	21:54:20	21:58:25	12
КА8-3	ОКИК 9	МА9	ТМИ	23:51:45	23:54:10	13
КА8-3	ОКИК 9	КК	ИТНП	02:54:20	02:56:00	1
КА8-3	ОКИК 10	КК	ИТНП	02:56:05	02:57:45	1
КА8-3	ОКИК 9	КК	ИТНП	04:36:00	04:37:40	2

Рисунок 3 – Табличное представление плана задействования средств НАКУ

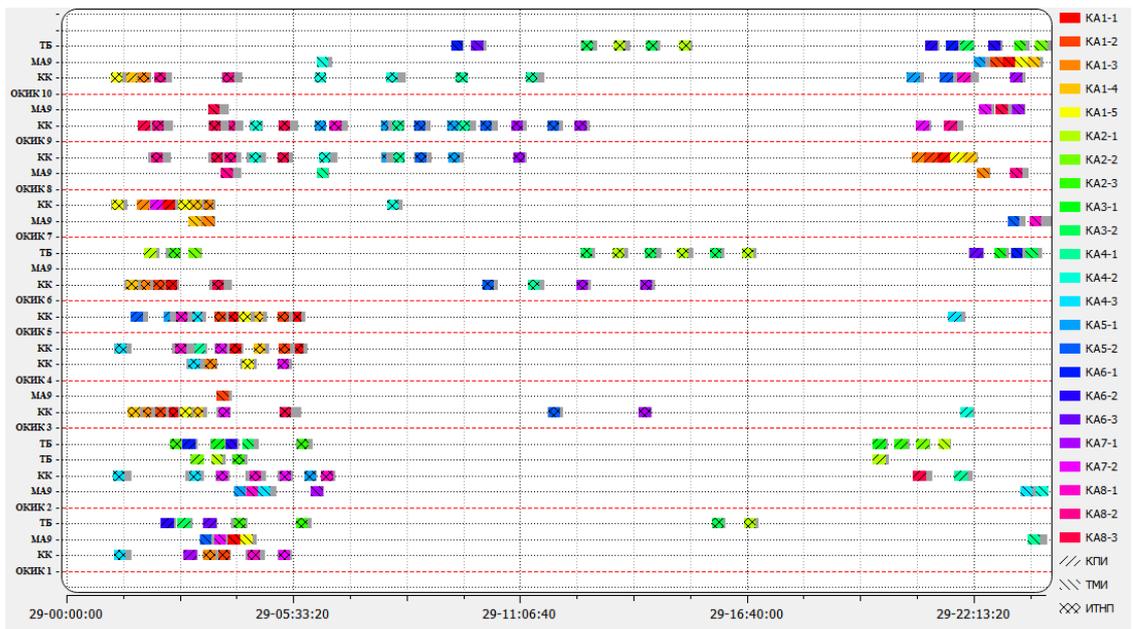


Рисунок 4 – Графическое представление плана задействования средств НАКУ



Рисунок 5 – Отображение в 3D режиме плана функционирования средств НАКУ

На основе разработанного программного средства был проведен ряд экспериментов для различного состава ОГ КА и конфигураций НАКУ. Основной целью эксперимента являлось сравнение значений показателя полноты управления КА, получаемых с использованием разработанной методики и существующего подхода.

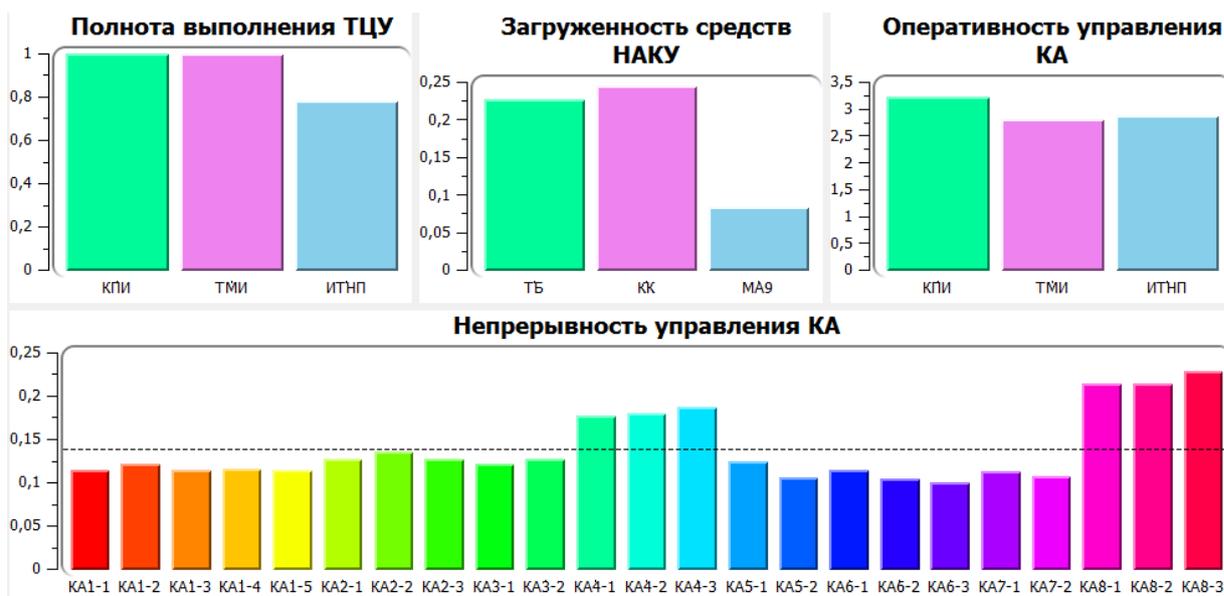


Рисунок 6 – Графическое представление показателей эффективности функционирования средств НАКУ КА

Существующий подход заключается в разработке планов задействования средств НАКУ отдельно для каждой космической системы (комплекса) и координации полученных планов на предмет имеющихся конфликтов в задействовании общего ресурса. В связи с тем, что функция координации планов в практике управления КА не автоматизирована и носит эвристический характер, в работе использовался алгоритм координации, описанный в [9, 10].

Результаты экспериментов позволяют сделать следующие выводы:

- по показателю полноты управления КА использование разработанной методики дает тот же результат, что и существующий подход для состава ОГ, не превышающего 15 КА;
- при дальнейшем увеличении состава ОГ КА, либо уменьшении количества средств управления, планы задействования средств НАКУ, сформированные с

использованием разработанной методики, эффективнее планов, полученных с помощью существующего подхода, по показателю полноты управления. В первую очередь, это объясняется тем, что разработанная методика учитывает возможность проведения нескольких операций управления КА в пределах одной зоны радиовидимости КА, что позволяет более рационально использовать ресурс НАКУ;

– программная реализация разработанной методики позволяет, по сравнению с известными подходами [9], в 1,5-2 раза сократить время, необходимое на формирование плана задействования средств НАКУ для управления ОГ КА и оценивание эффективности его реализации. Данное обстоятельство обусловлено наличием процедуры бесконфликтного планирования задействования средств НАКУ, позволяющей избежать затраты времени на координацию планов, получаемых для различных КА.

Заключение

Разработанная методика является развитием научно-методического аппарата оценивания эффективности функционирования НАКУ и позволяет оперативно получать оценки целевых возможностей различных конфигураций НАКУ с учетом сложной системы технических, технологических и пространственно-временных ограничений, накладываемых на процесс управления КА.

На основе предложенной методики можно корректно, с формальной точки зрения, сформулировать и решить ряд интересных и актуальных научно-практических задач анализа и синтеза автоматизированных систем управления КА, функционирующих в различных условиях обстановки. К таким задачам относятся:

- 1) оценивание эффективности функционирования НАКУ в различных условиях обстановки;
- 2) оценивание целевых возможностей перспективного НАКУ и перспективных технологий управления КА;
- 3) планирование задействования средств как отдельных НКУ, так и НАКУ в целом, для реализации программ управления КА;
- 4) обоснование различного рода требований как к отдельным типам средств управления КА, так и к НАКУ в целом;
- 5) обоснования направлений развития и совершенствования НАКУ.

Библиографический список

1. Калинин В.Н., Соколов Б.В. Динамическая модель и алгоритм оптимального планирования комплекса работ с запретами на прерывание // Автоматика и телемеханика. 1987. № 1. С.106-144.
2. Резников Б.А., Делий И.И. Математическое обеспечение управления подвижными объектами. – Л.: МО СССР, 1986. – 149 с.
3. Соколов Б.В. Комплексное планирование операций и управление структурами в АСУ активными подвижными объектами. – СПб.: МО РФ, 1992. – 232 с.
4. Москвин Б.В., Михайлов Е.П., Павлов А.Н., Соколов Б.В. Комбинированные модели управления структурной динамикой информационных систем // Известия Вузов. Приборостроение. 2006. Т.49. № 11. С.7-12.
5. Мануйлов Ю.С., Новиков Е.А. Алгоритм локально-оптимального управления технологическим процессом // Сборник трудов «Экономическая

кибернетика: системный анализ в экономике и управлении». – СПб.: ГУЭФ, 2005, № 12, С.56 – 61.

6. Калинин В.Н. Оптимальное планирование информационного взаимодействия космического аппарата с дискретной средой на поверхности Земли // Информация и космос. 2015. № 3. С. 150 – 158.

7. Мануйлов Ю.С., Калинин В.Н., Гончаревский В.С., Делий И.И. Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса управления. - СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2010. – 609 с.

8. Павлов А.Н., Соколов Б.В., Москвин Б.В., Верзилин Д.Н. Военная системотехника и системный анализ. – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2010. – 251 с.

9. Литвиненко А.Ю. Программный комплекс автоматизированного планирования задействия средств наземного автоматизированного комплекса управления // Труды МАИ, 2016, № 86:
<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=67829>

10. Дудко А.Н., Кучеров Б.А., Литвиненко А.О., Сохранный Е.П. Метод планирования бесконфликтного задействия наземных технических средств при обеспечении управления группировкой космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2014. №1(74). С.155-163.