

Программный комплекс автоматизированного планирования задействования средств наземного автоматизированного комплекса управления

Литвиненко А.О.

*Центральный научно исследовательский институт машиностроения,
ЦНИИмаш, ул. Пионерская, 4, Королев, Московская область, 141070, Россия
e-mail: ao-litvinenko@yandex.ru*

Аннотация

Рассматривается вопрос создания программного комплекса автоматизированного планирования задействования средств наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения и измерений. Определены цели и задачи программного комплекса, режимы функционирования и требования к их исполнению. Раскрыт структурный состав программного комплекса. Приведены результаты экспериментальной отработки программного комплекса в режимах его функционирования.

Ключевые слова: программный комплекс, планирование, космический аппарат, наземный автоматизированный комплекс управления.

В соответствии с решением Федерального космического агентства в целях обеспечения надежного управления космическими аппаратами и дальнейшего

развития наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения и измерений (далее по тексту – НАКУ) при обеспечении управления КА функции по планированию и координации применения средств НАКУ возложены на центр ситуационного анализа, координации и планирования (ЦСАКП). Организация эффективного функционирования ЦСАКП в условиях наращивания орбитальной группировки КА, формирования перспективной структуры средств НАКУ на основе малопунктных технологий управления КА с использованием унифицированных командно-измерительных станций (КИС) коллективного доступа, единых для космических аппаратов ближнего и среднего космоса, является одной из важнейших задач, решение которой способствует повышению качества управления КА.

Применение в составе НАКУ средств коллективного доступа, способных одновременно входить в состав нескольких НКУ КА, с одной стороны, обеспечивает экономическую эффективность использования ресурсов технических средств (ТС), с другой, – влечет за собой возникновение конфликтных ситуаций при целевом применении ТС. Конфликтные ситуации возникают по причине проведения плановых регламентов, восстановительных и ремонтных работ на ТС, гелиофизических ограничивающих факторов, а так же и в связи с попыткой одновременного задействования конкретного ТС в целях управления двумя и более КА.

Основной задачей ЦСАКП является рациональное (оптимальное) планирование задействования средств НАКУ при обеспечении управления ОГ КА. Планирование задействования технических средств НАКУ является сложным и

трудоемким процессом и представляет собой решение многовариантной задачи распределения ресурса ТС в соответствии с заявками секторов управления КА.

Решение этой задачи основано на ситуационном подходе с использованием результатов мониторинга системы «ОГ КА – ТС НАКУ» и прогноза развития ситуации на основе моделирования состояния рассматриваемой системы [1], в том числе и с учетом перспектив ее развития. При этом, несмотря на наращивание количественного состава управляемой ОГ КА и номенклатуры ТС НАКУ, время на формирование окончательного варианта плана задействования средств (ПЗС) НАКУ и доведение его до участников управления фиксировано и регламентируется технологической инструкцией планирования.

Наиболее эффективным направлением повышения оперативности планирования и обоснованности принимаемым решений при разрешении конфликтных ситуаций (КС) для обеспечения значений нормативного времени на планирование задействования ТС НАКУ является автоматизация процессов планирования.

С этой целью разработан программный комплекс (ПК) автоматизированного планирования задействования средств НАКУ.

Основным назначением ПК является автоматизация процессов планирования задействования ТС НАКУ и разрешения конфликтных ситуаций [2], контроля выполнения планов, проведения исследований реакции системы «ОГ КА – ТС НАКУ» на принимаемые решения по задействованию ТС, а также для создания на его основе специализированных аппаратно-программных комплексов, обеспечивающих решение сопутствующих задач.

Исходя из предназначения ПК определены следующие режимы его функционирования:

- Оперативный режим.
- Режим прогнозирования.
- Режим анализа выполнения плана и результатов прогноза.

Оперативный режим должен обеспечить:

- ежедневное планирование задействования ТС на суточный интервал с горизонтом планирования $(n+3)$, где n – текущая дата;
- контроль выполнения плана на n -ые сутки;
- оперативное реагирование на изменение ситуации в процессе выполнения плана в n -ые сутки или в интервале времени $(n+1)-(n+3)$.

Режим прогнозирования должен обеспечить оценку состояния системы «ОГ КА – ТС НАКУ» при принятии определённого решения, а также в зависимости от изменения состава и состояния КА и ТС.

Режим анализа выполнения плана и результатов прогноза должен обеспечить обработку результатов выполнения плана и прогноза с использованием статистических методов оценки.

В связи со сложностью и многоаспектностью задачи планирования задействования ТС при разработке ПК используется подход, позволяющий учитывать комплекс доминантных факторов, влияющих на бесконфликтное распределение ресурса ТС. Такой подход к решению проблемы автоматизации планирования реализован в ПК на основе системы взаимосвязанных модулей, каждый из которых предназначен для решения планирующим органом

определенной задачи и охватывает некоторое подмножество рассматриваемых факторов, условий и ограничений, влияющих на состояние рассматриваемой системы «ОГ КА – ТС НАКУ».

ПК позволяет осуществлять настройку модулей на различные режимы его функционирования. ПК построен по «клиент-серверной» архитектуре. Серверная часть реализована на процедурном расширении языка SQL (Structured Query Language) – «Transact-SQL». На серверную часть возложены основные расчетные задачи, связанные с формированием вариантов ПЗС, контролем целостности БД. Клиентская часть разработана на языке Delphi в среде Embarcadero RAD Studio XE. В функции клиентской части входит управление расчетом вариантов ПЗС и отображение полученных результатов в удобном для оператора виде. Визуализация результатов реализована с использованием существующих пакетов прикладных программ: DevExpress v39, FastReport 4.10.5 и EhLib 5.2.84.

Ниже приведен состав модулей, задействуемых при реализации режимов функционирования ПК.

Модуль исходных данных предназначен для формирования блока исходных данных при обеспечении оперативного планирования и прогнозирования в части характеристик зон взаимной радиовидимости «КА – ТС НАКУ».

Модуль управления расчетом является ядром программного комплекса. Входящие в него программы осуществляют формирование «управляющей» последовательности планирования КА и в соответствии с ней пошагово распределяют сеансы связи каждого КА. Также реализуется формирование и актуализация таблиц возникающих конфликтных ситуаций.

Модуль контроля выполнения ограничений предназначен для учета значений требуемых ограничений и контроля планируемых условий проведения СС. Программы модуля осуществляют построение множества вариантов ЗРВ для проведения СС в соответствии с предъявляемыми требованиями, реализуют расчет и контроль достаточности остаточного рабочего ресурса ТС НАКУ для проведения СС, а также учет ограничений на применение ТС НАКУ, связанные с проведением плановых, профилактических, восстановительных и иных работ.

Модуль оптимизации задействования ТС предназначен для выбора оптимального варианта задействования средств управления в целях проведения СС исходя из принципа обеспечения равномерной загрузки однотипных средств в рамках командно-измерительного пункта.

Модуль формирования сценариев разрешения КС предназначен для формирования сценариев разрешения КС, контроля технологии формирования сценариев разрешения КС, построения базы сценариев разрешения КС.

Модуль выбора сценариев разрешения КС предназначен для выбора сценария разрешения КС из сформированного множества возможных, при этом учитываются такие факторы как: приоритеты конфликтующих СС, приоритеты КА на данные сутки, штрафы за перемещение или отмену СС и др.

В качестве методического обеспечения при реализации модулей формирования сценариев разрешения КС и выбора сценариев разрешения КС был использован способ разрешения конфликтных ситуаций при управлении космическими аппаратами [2], заключающийся в разрешении конфликтной ситуации путем переноса времени проведения СС одного из конфликтующих КА на

время нахождения его в ЗРВ другой КИС или в другое время данной КИС, не участвующую в КС, или на ЗРВ, участвующую в КС с сеансами связи других КА, тогда последующие КС разрешаются путем переноса времени проведения СС участника нового конфликта на время его нахождения в ЗРВ свободной КИС, разрешая созданную при этом КС.

Преимущество данного способа заключается в исключении полного перебора вариантов при разрешении конфликтных ситуаций за счет отсеечения неперспективных согласно правилам формирования вариантов [2] и, следовательно, повышении оперативности расчета ПЗС. Также применение данного способа исключает полный перерасчет сформированного плана при проведении его оперативной коррекции.

Модуль оптимизации варианта ПЗС предназначен для оптимизации варианта ПЗС в части перераспределения СС на другие ТС НАКУ в случае обнаружения факта проведения одиночных СС на ТС, наличия длительных перерывов между СС и иных ресурсных дисбалансов.

Экранная оболочка и базовое меню ПК включают в свой состав модули, обеспечивающие отображение статистической информации в части характеристик ПЗС, графическое отображение разработанного ПЗС в различных видах представлениях информации, формирование отчетов с группировкой результатов по различным критериям (рисунок 1).

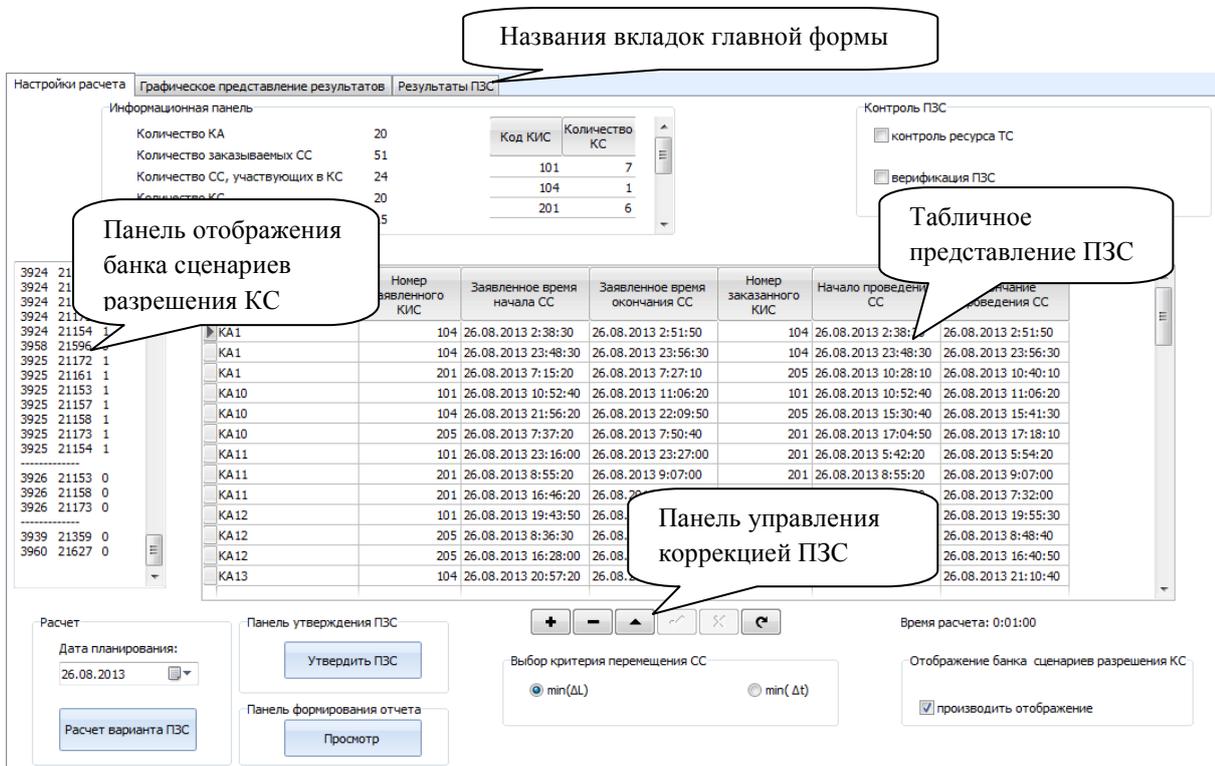


Рисунок 1. Графическая оболочка ПК

В ПК предусмотрены различные виды представления информации о сформированном варианте ПЗС, а также не вошедших в ПЗС сеансах связи с вариантами их возможного включения при снятии ограничений или их ослаблении (рисунки 2,3,4,5).

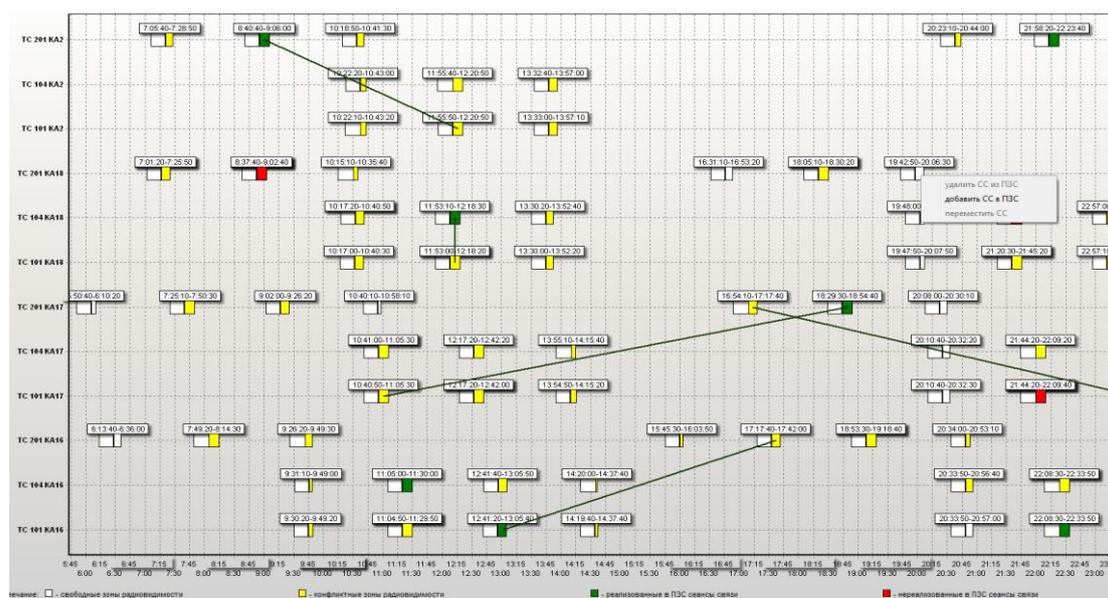


Рисунок 2. Фрагмент из схемы распределения СС

Схема распределения СС на рисунке 2 является интерактивной и позволяет оператору вручную вносить необходимые коррективы в сформированный ПЗС. При этом в случае нарушения действиями оператора абсолютных значений граничных условий по проведению СС или потенциальному возникновению конфликтной ситуации выдается оповещение о наступившем событии, которое оператор может проигнорировать.

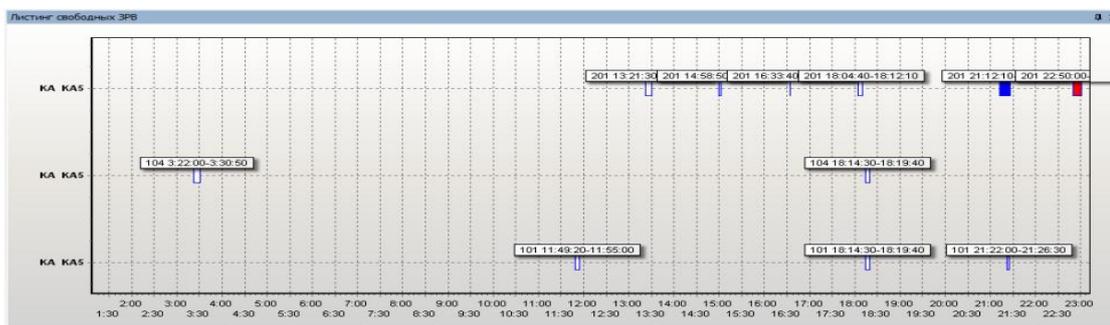


Рисунок 3. Графическое представление листинга свободных зон радиовидимости

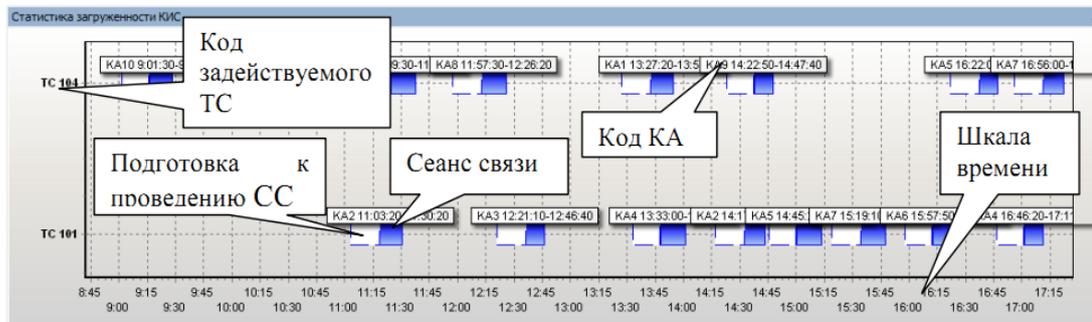


Рисунок 4. Графическое представление периодов задействования КИСов

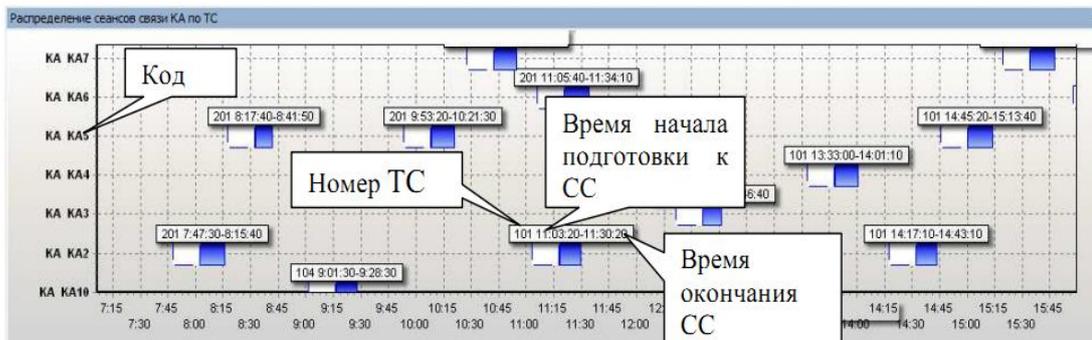


Рисунок 5. Графическое представление распределения СС КА на ТС

Используя представления информации о ПЗС на рисунках 3-5, оператор видит картину свободных зон видимости по КА с наличием не вошедших в ПЗС сеансов связи, загруженность технических средств управления и распределение вошедших в ПЗС сеансов связи КА по техническим средствам и временной оси, тем самым имея достаточную картину для принятия решения о включении не вошедших в ПЗС сеансов связи в рамках определенной зоны радиовидимости путем изменения ограничений в допустимых пределах.

Модуль анализа выполнения ПЗС предназначен для осуществления подготовки данных о результатах выполнения плана и прогноза состояния системы «ОГ КА – ТС НАКУ» путем ведения электронных форм (автоматического и/или с участием оператора) с дальнейшей систематизацией и анализом результатов. Результаты проведенного анализа могут быть применены для оценки различного рода управленческих решений, например: при формировании приоритетов КА или их отдельных СС на будущие сутки, выдачи рекомендаций по времени проведения ТО на ТС НАКУ и т.д.

Для подтверждения выполнения требований, предъявляемых к ПК в различных режимах его функционирования, была проведена экспериментальная отработка ПК.

В оперативном режиме функционирования ПК на месячном интервале проводилось дублирующее планирование задействования ТС НАКУ в целях обеспечения управления ОГ КА в составе: «Луч-5А», «Луч-5Б», «Луч-5В», «Электро-Л»№1, «Ресурс-П№1», «Ресурс-П№2», «Канопус-В№1», БКА и «Кондор-Э» (710-КС). Результаты экспериментальной отработки ПК показали полную

идентичность разработанных при этом ПЗС - сформированным операторами при использовании аппаратно-программного комплекса, функционирующего к настоящему времени в ЦСАКП.

Для экспериментальной отработки режима прогнозирования состояния системы «ОГ КА – ТС НАКУ» решалась задача оценки достаточности ТС НАКУ при управлении ОГ КА изменяющегося состава при условии безотказной работы элементов контура управления.

Оцениваемыми параметрами при расчете являлись:

- Q – объем плана задействования средств НАКУ, определяемый как $(N_3^{CC} - N_{пл}^{CC})/N_3^{CC}$, где N_3^{CC} – количество заказанных Секторами управления КА сеансов связи; $N_{пл}^{CC}$ – количество запланированных в ПЗС сеансов связи.
- Т – время расчета итогового варианта ПЗС.

Расчеты проводились при учете следующих условий и ограничений:

- в состав ОГ КА входят низкоорбитальные КА (высота орбит которых 700 км, наклонение 98°) в основной контур управления которых входят КИС общего доступа (однотипные);
- одновременно на этапе летных испытаний (ЛИ) находятся 25% от количества КА;
- при штатной эксплуатации (ШЭ) для управления КА требуется 3 СС в сутки, на этапе ЛИ – 8 СС в сутки;
- приоритет сеансов связи с КА на этапе ЛИ выше, чем у КА на этапе ШЭ;

- режим работы КИС – круглосуточный (без плановых профилактических работ);
- допустимое время расчета итогового варианта ПЗС (согласно технологической инструкции планирования) составляет 2 часа.

Изначально на тестовых данных был проведен «стресс-тест» (нагрузочное тестирование), призванный оценить устойчивость ПК к пиковым нагрузкам по: числу планируемых СС космических аппаратов, количеству разрешаемых КС при проведении планирования. Всего проводилось 5 серий испытаний: для управления ОГ КА, меняющей свою численность с 5 до 45 КА, для управления задействуются 2 КИС (на 2-х КИП) (графики голубого цвета); 3 КИС на 3-х КИП для КА на этапе ЛИ, 2 КИС на 2-х КИП на ШЭ (красного); 3 КИС на 2-х КИП (графики зеленого цвета); 4 КИС на 2-х КИП (сиреневого); 6 КИС на 3-х КИП для КА на ЛИ, 4 КИС (на 2-х КИП) для КА на ШЭ.

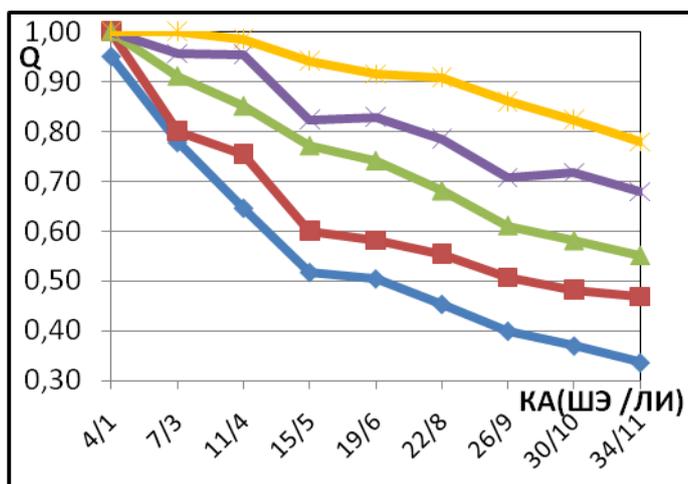


Рисунок ба. Графики зависимости $Q(N_{КА})$

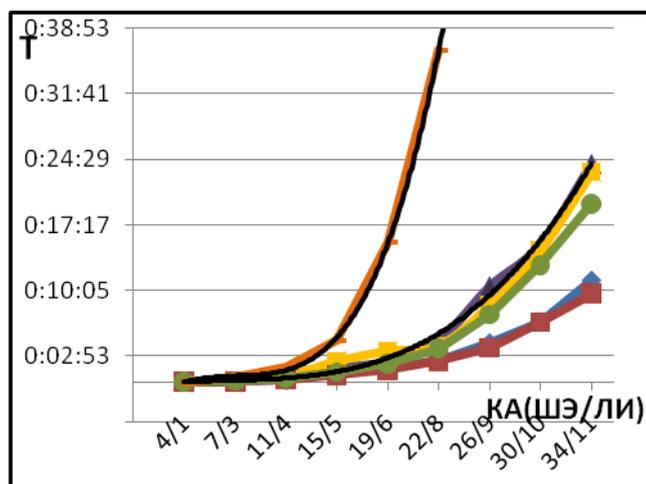


Рисунок бб. Графики зависимости $T(N_{КА})$

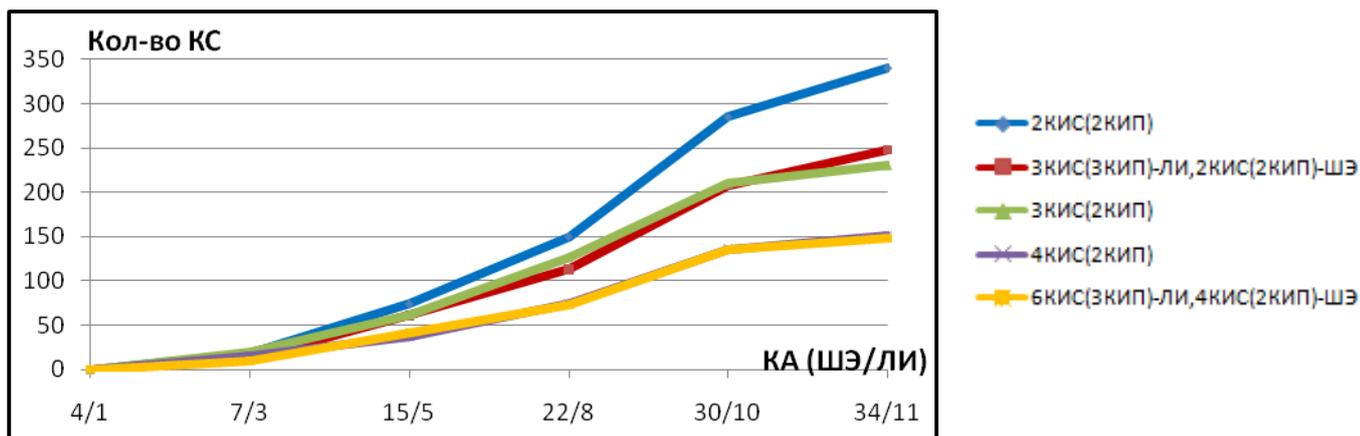


Рисунок 6в. Графики зависимости $N_{КС}(N_{КА})$

Из представленных данных на рисунке 6а видно, что ПК способен реализовать планирование сеансов связи 45КА (34 на этапе ШЭ, 11 на этапе ЛИ), автоматически разрешая до 350 конфликтных ситуаций (рис. 6в), при различном состоянии системы «ОГ-КА». Максимальное время расчета итогового ПЗС из представленных вариантов порядка 25 минут.

С целью оценки показателя оперативности ПК по расчету итогового ПЗС выявлена наиболее критическая зависимость $T(N_{КА})$, обладающая наибольшей степенью роста. Для этого на основе полученных данных построены графики зависимости времени расчета ПЗС от количества КА, для управления которых выдаются заявки на задействование средств НАКУ (рисунок 6б). Прогноз времени расчета ПЗС (T) за границы интервала проведенного расчета осуществим методом экстраполяции. Из 5-ти рассчитанных вариантов наибольшей степенью роста обладает график, изображенный сиреневым цветом – 4КИС (на 2-х КИП).

Наиболее точно анализируемый график аппроксимируется полиномиальной функцией третьей степени:

$$Y = 0,00004 * x^3 - 0,00022 * x^2 + 0,00048 * x - 0,00029 \quad (1)$$

Принимая допущение, что характер полиномиального тренда не изменится, определим прогнозное время расчета ПЗС при увеличении количества КА.

Подставляя в формулу (1) вместо «X» количество КА, требующих для своего управления заказа сеансов связи, получим прогнозируемые значения времени расчета ПЗС (таблица №1).

Прогнозируемые значения времени расчета ПЗС

№1

Кол-во КА	Время расчета ПК	
	Т расчета	Т прогноза
5	0:00:01	0:00:01
10	0:00:08	0:00:10
15	0:00:27	0:00:22
20	0:01:34	0:00:58
25	0:02:21	0:02:19
30	0:04:40	0:04:46
40	0:15:11 ^{*)}	0:14:20
50	-	0:32:25
60	-	1:01:47
73	-	2:00:00

^{*)} Расчет проводился на ПЭВМ под управлением ОС Windows 7 SP1 x32 с характеристиками: Intel Core 2 Duo CPU E8500 3.17GHz, RAM DDR2 2Gb.

Для сравнительного анализа на рисунке 6б приведен график (оранжевого цвета), отражающий зависимость времени расчета итогового ПЗС комбинаторным методом (полного перебора) от количества КА, подавших свои заявки, который наиболее точно аппроксимируется полиномиальной функцией четвертой степени:

$$Y = 0,00002 * x^4 + 0,00016 * x^3 - 0,00147x^2 + 0,00347 * x - 0,00219 \quad (2)$$

Исследуя данную зависимость, можно отметить, что уже при численности управляемой ОГ КА, приближающейся к 40 единицам, время расчета превышает регламентированное.

Далее осуществлялась проверка режима анализа выполнения плана и результатов прогноза ПК на предмет возможности оценки принимаемых решений в случае реализации предлагаемого варианта плана. Для этого решалась задача оценки достаточности ТС НАКУ при управлении ОГ КА заданного состава на основе гипотетических данных по состоянию системы «ОГ КА – ТС НАКУ» с учетом принимаемых решений по вводу/выводу ТС из контура управления КА.

В качестве ОГ КА рассмотрена группировка низкоорбитальных КА, из 19 КА, для управления которыми планируется задействовать 8 ТС НАКУ, территориально расположенных на 4 площадках, геодезическое положение которых максимально правдоподобно описывает местоположения КИП НАКУ: Балтийского, Западного, Центрального и Восточного (таблица 2).

Количественный состав КИС на командно-измерительных пунктах №2

Наименование площадки	Балтийский (БКИП)	Западный (ЗКИП)	Центральный (ЦКИП)	Восточный (ВКИП)
Кол-во расположенных КИС	3	2	2	1

Орбитальное построение рассматриваемой группировки выбрано таким образом, чтобы наиболее правдоподобно описать структуру орбитального построения перспективной группировки КА, в которой подавляющее большинство перспективных низкоорбитальных КА будут находиться на солнечно-синхронных

орбитах с высотами в диапазоне 520-820 км. При расчетах выбраны усредненные характеристики орбит: высота –700 км, наклонение орбиты – 98°.

Рассматриваемая ОГ КА включает 5 орбитальных систем (ОС): 3-и по 4КА, 2-е по 2КА. А также 2 КА, не входящих в ОС, и 1 КА на орбите подобной МКС по своим орбитальным характеристикам. КА в рамках ОС равномерно разнесены вдоль плоскости орбиты по углу истинной аномалии. Орбитальные плоскости, в которых располагаются КА (кроме КА на орбите МКС), равномерно разнесены по долготе восходящего узла.

Результаты расчета приведены в таблице 3.

Результаты расчета состояния системы «ОГ КА – ТС НАКУ»

№3

Показатели	Исходный	- БКИС3	- БКИС3, БКИС2	- ЦКИС2	- ЗКИС2
Объем плана (Q)	1	1	0,99	0,96	1
Кол-во КС	25	37	48	38	34
Время расчета плана (Т)	00:00:47	00:01:06	00:02:15	00:01:01	00:00:55
Коэффициент загрузки ТС	ЗКИС1-17% ЗКИС2-13% ЦКИС1-22% ЦКИС2-26% ВКИС1-27% БКИС1-12,3% БКИС2-24,4% БКИС3-24,2%	ЗКИС1-17,3% ЗКИС2-15,2% ЦКИС1-22% ЦКИС2-27,7% ВКИС1-30,7% БКИС1-28,1% БКИС3-0%	ЗКИС1-30% ЗКИС2-17% ЦКИС1-23,9% ЦКИС2-29,7% ВКИС1-32,6% БКИС1-33% БКИС2-0% БКИС3-0%	ЗКИС1-22,5% ЗКИС2-15% ЦКИС1-29% ЦКИС2-0% ВКИС1-29% БКИС1-15,9% БКИС2-24,4% БКИС3-24,2%	ЗКИС1-24,5% ЗКИС2-0% ЦКИС1-25,5% ЦКИС2-25,8% ВКИС1-25,3% БКИС1-15% БКИС2-24,4% БКИС3-26%

Как видно из результатов расчета, приведенных в таблице 3 столбце с «Исходный», ПК осуществляет расчет плана задействования средств (8 ТС в целях управления 19 КА) менее чем за 1 минуту, при этом разрешая 25 возникших конфликтных ситуаций, и обеспечивает включение в ПЗС всех заявленных секторами управления КА сеансов связи.

Воспользовавшись программами модуля анализа выполнения плана можно оценить влияние принимаемых управленческих решений на реализацию плана задействования средств и оценить загрузку применяемых ТС управления.

Из представленных в таблице 3 данных видно, что при исключении из контура управления одной КИС, расположенной на Балтийском КИП (столбец «- БКИС3»), как и одной КИС на Западном КИП (столбец «- ЗКИС2»), в плане задействования средств будут реализованы все заявки секторов управления КА. При этом можно наблюдать перераспределение загрузки технических средств в части значительного увеличения загруженности ТС, расположенных на той же площадке (КИП). При выводе же из контура управления (по различным причинам, в том числе и плановое ТО) одной КИС на Центральном КИП (столбец «- ЦКИС2»), возникает риск невыполнения технологического цикла управления отдельными КА, в связи с отсутствием возможности удовлетворения заявок на проведение СС.

Заключение

1. Создан программный комплекс автоматизированного планирования задействования ТС НАКУ, который позволит:

- повысить оперативность расчета плана задействования средств НАКУ и его оперативной коррекции с учетом разрешения конфликтных ситуаций [3];
- повысить качество формируемого плана за счет использования результатов оценки прогнозируемого состояния системы «ОГ КА – ТС НАКУ» при условии исполнения принимаемого плана;
- сделать ПК адаптивным к применяемым технологиям планирования задействования средств НАКУ, набору учитываемых критериев и ограничений за счет концентрации функций управления расчетом и контроля ограничений в отдельных модулях ПК.

2. Проведена экспериментальная отработка разработанного ПК, которая показала соответствие ПК заявленным требованиям в режимах его функционирования.

Благодарность

Автор выражает искреннюю признательность и благодарность научному руководителю А.Н. Дудко за активное участие и деятельную помощь на всех этапах выполнения работы.

Библиографический список

1. Дудко А.Н., Литвиненко А.О., Сохраный Е.П. Использование метода ситуационного анализа при планировании задействования технических средств наземного автоматизированного комплекса управления с целью обеспечения управления орбитальной группировкой космических аппаратов научного и социально-экономического назначения // Космонавтика и ракетостроение. 2012. №4(69). С.128-141.

2. Дудко А.Н., Кучеров Б.А., Литвиненко А.О., Сохранный Е.П. Метод планирования бесконфликтного задействования наземных технических средств при обеспечении управления группировкой космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2014. №1(74). С.155-163.
3. Способ разрешения конфликтных ситуаций при управлении полетами космических аппаратов. Патент РФ 2566171. МПК В64G 3/00./ ФГУП ЦНИИмаш / Дудко А.Н., Кучеров Б.А., Литвиненко А.О., Овечко В.М., Паздников В.Ю., Сохранный Е.П. Бюл. №29. Оpubл. 20.10.2015.