

УДК: 629.7

## **Теоретические основы эффективной модернизации космических систем дистанционного зондирования Земли**

О. М. Алифанов, Ю. А. Матвеев, В. В. Ламзин, В.А. Ламзин

### **Аннотация**

Рассмотрены проблемные вопросы эффективной модернизации космической системы дистанционного зондирования Земли (КС ДЗЗ) и создания модификаций космических аппаратов (КА). Сформулирована основная задача поиска рациональных проектных решений КС ДЗЗ с учетом развития (модернизации) техники в планируемый период. Приведена логическая схема расчлененного исследования основной задачи и определены её главные задачи. Исследования, проводимые с использованием разработанных методических основ, позволяют количественно оценить характеристики альтернативных вариантов КС ДЗЗ, найти их рациональные значения, установить закономерности развития техники и технологий.

### **Ключевые слова**

космическая система; дистанционное зондирование Земли; модернизация; планируемый период; проектное решение.

### **Введение.**

Анализ технических приемов по обеспечению устойчивости решений, а также эффективности разработки и эксплуатации космической техники показывает, что можно выделить два основных направления. Первое направление связано с поиском не изменяемых по существу технических и технологических решений, которые в силу заложенных в них свойств можно использовать при широком спектре условий применения изделия и действующих на него нагрузок. Дальнейшее развитие этого направления приведет, по-видимому, к созданию универсальных и существующих длительное время космических аппаратов (КА). В основе второго направления лежит представление о возможности доработки (модернизации) техники в процессе её эксплуатации, что при сравнительно малых начальных затратах позволяет наращивать эффективность использования изделий.

Анализ показывает, что второе направление - проведение модернизации космической системы дистанционного зондирования Земли (КС ДЗЗ) и создание модификаций КА - дает возможность рационально использовать научно-технический задел, продлить сроки эксплуатации системы. Роль этого направления в настоящее время значительна.

### Анализ модернизации КС ДЗЗ и создания модификаций КА.

Как показывает опыт, во многих случаях повышение эффективности КС ДЗЗ связано в основном с созданием модификаций КА для модернизации созданной ранее базовой системы, что подтверждается разработкой ряда космических программ (систем): SPOT, ERS, HELIOS, LANDSAT, CBERS и др. Особенностью разработки космических программ SPOT, ERS и HELIOS является создание системы и модификаций КА на основе 3-х унифицированных космических платформ (УКП) Mk-1, Mk-2 и Mk-3 с бортовыми обеспечивающими системами [1,2]. На рис. 1 приведены временной интервал разработки базовых КА серии Spot и их модификаций и сроки их активного существования.

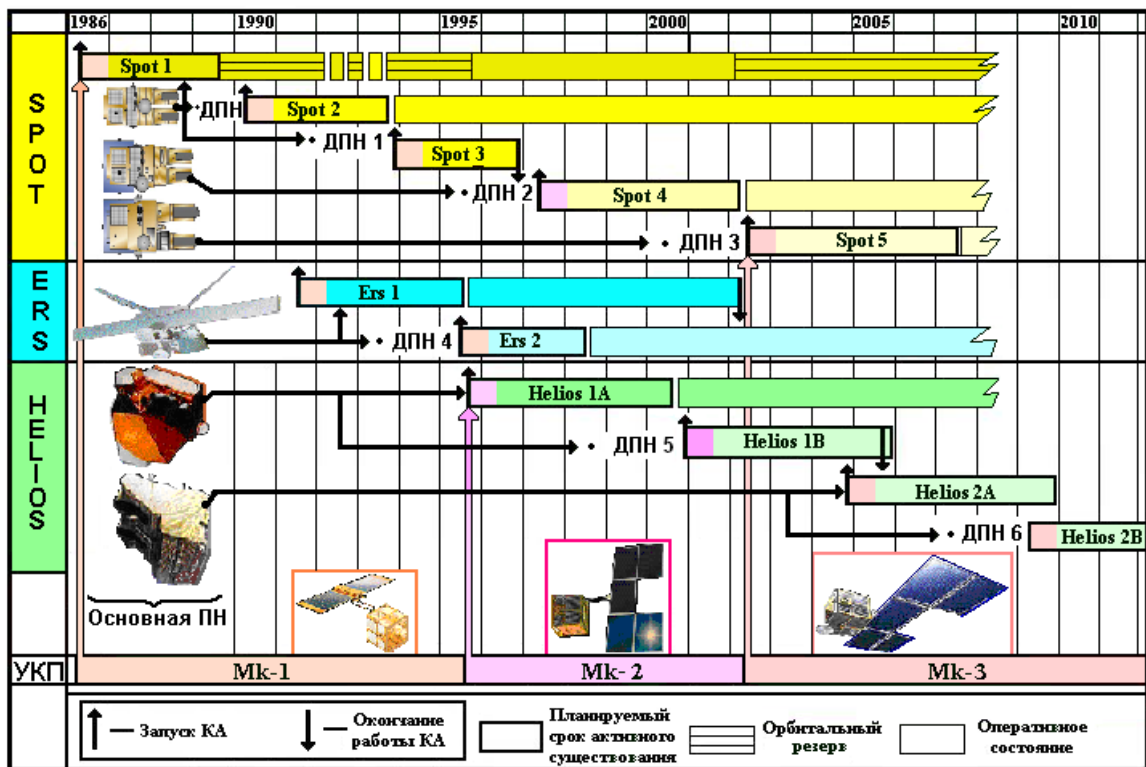


Рис. 1 - Временной интервал разработки модификаций КА серии Spot и сроки их активного существования

В сочетании с модификацией основной (ПН) и дополнительной (ДПН) полезной нагрузки это позволило повысить эффективность системы (пространственное разрешение, количество спектральных диапазонов, информационная производительность и др.), снизить затраты на создание последовательных образцов КА и системы в целом. Изменение пространственного разрешения  $R$ , изменения количества спектральных каналов  $N_{\text{кан}}$  и информационной производительности  $I_{\text{ПР}}$  КА серии Spot показано на рис. 2.

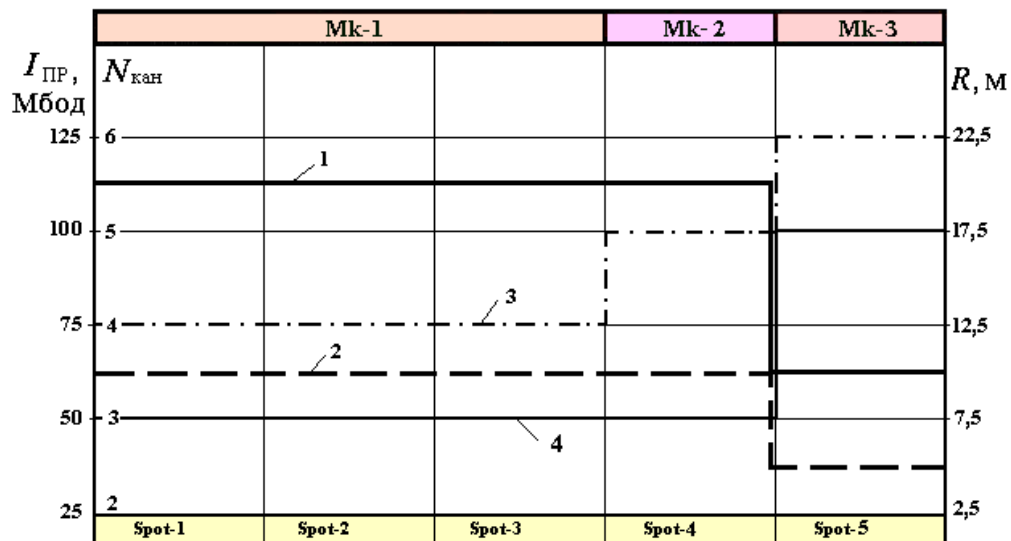


Рис. 2 – Тенденции изменения характеристик базового КА серии Spot и его модификаций: 1 - пространственного разрешения  $R$  (мультиспектральный режим съемки); 2 - пространственного разрешения  $R$  (панхроматический режим съемки); 3 - количества спектральных каналов  $N_{\text{кан}}$ ; 4 - информационной производительности  $I_{\text{ПР}}$ .

На примере основной ПН (целевой съемочной аппаратуры) и ДПН различного целевого назначения, бортовых обеспечивающих систем и УКП в целом выявлены тенденции их совершенствования для различных модификаций КА. Тенденции изменения полной массы космического аппарата  $M_{\text{КА}}$ , массы топлива  $M_{\text{Т}}$  и мощности солнечных батарей  $W_{\text{СБ}}$  модификаций КА серии Spot, Ers и Helios, созданных с использованием базовых УКП, представлены на рис. 3 [2].

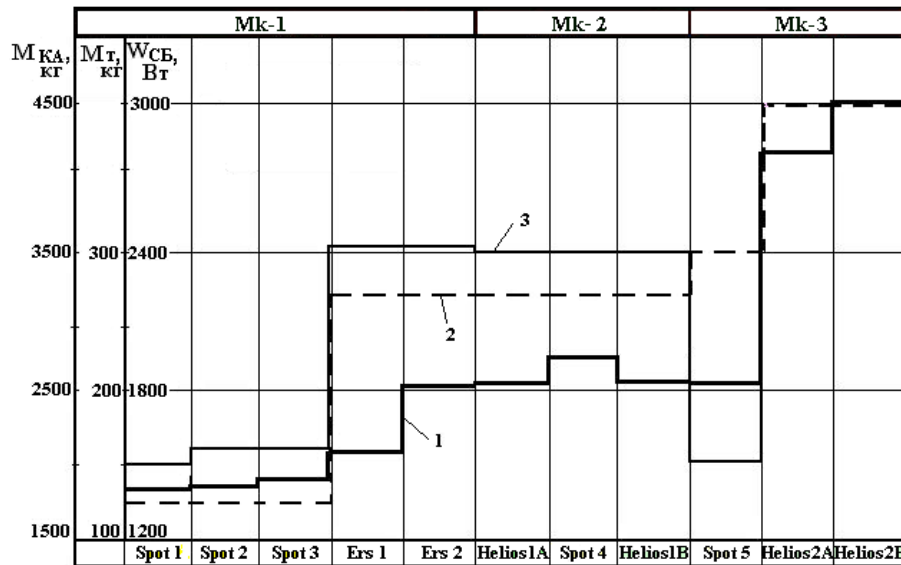


Рис. 3 - Тенденции изменения характеристик КА серии Spot, Ers и Helios: 1 - полной массы космического аппарата  $M_{KA}$ ; 2 - массы топлива  $M_T$ ; 3 - мощности солнечных батарей  $W_{CB}$ .

Аналогичные исследования проведения модернизации и создания модификаций КА проведены по ряду других КС ДЗЗ. На рис. 4 и 5 в качестве примера приведены результаты исследований наиболее длительной по эксплуатации КС для исследования природных ресурсов Земли LANDSAT (США).

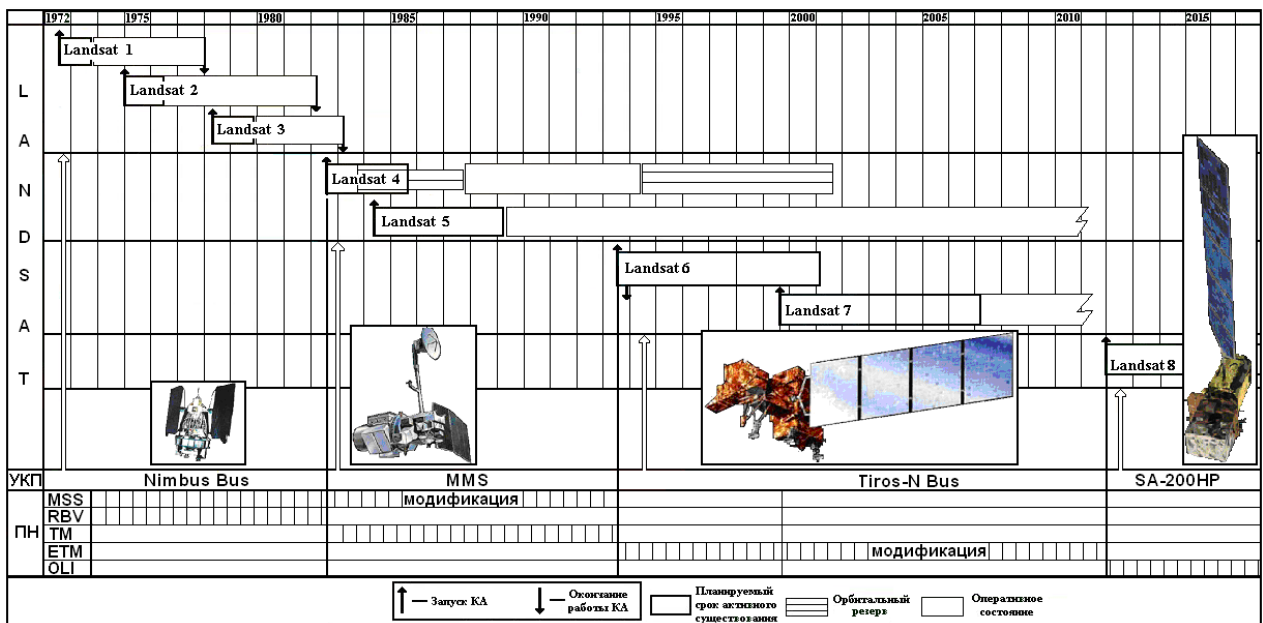


Рис. 4 - Временной интервал разработки модификаций КА серии Landsat и сроки их активного существования.

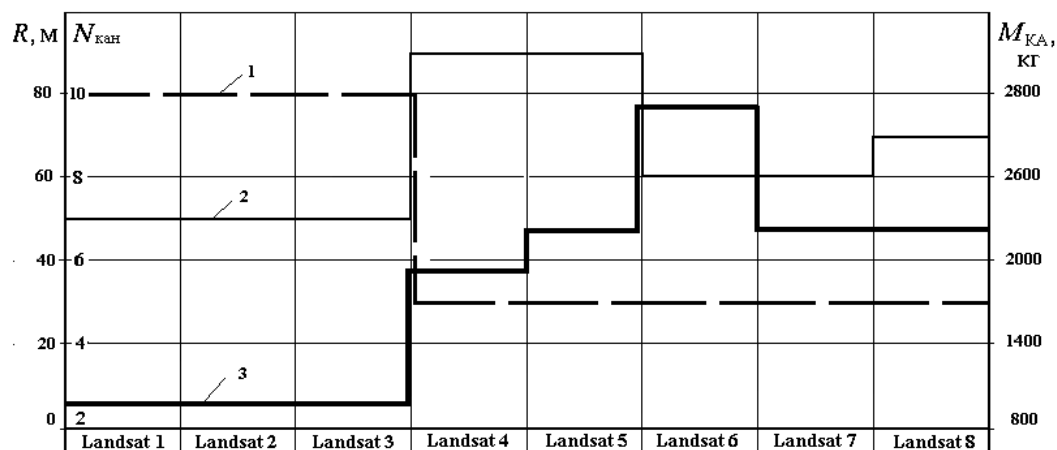


Рис. 5 - Тенденции изменения характеристик КА (базового и его модификаций) серии Landsat: 1 - пространственного разрешения  $R$  ; 2 - количества спектральных каналов  $N_{\text{кан}}$  ; 3 - массы космического аппарата  $M_{\text{КА}}$ .

При создании и эксплуатации данной КС LANDSAT широко использовались унифицированные космические платформы. Космические аппараты серии Landsat, как показано в [1], имевшие первоначальное название ERTS (Earth Resources Technology Satellite), были созданы на базе ранее разработанных космических платформ для других КА: метеорологических - Nimbus Bus и Tiros-N Bus, многоцелевого модульного - Multi-Mission Modular Spacecraft (MMS) (рис. 4). Перспективный КА Landsat 8 (другое название Landsat Data Continuity Mission (LDCM)) также разрабатывается на базе космической платформы Spectrum Astro - SA-200HP, которая используется на таких КА, как Coriolis, DS 1, GeoEye 1 и Streak. Это подтверждает целесообразность использования унифицированных космических платформ.

Основная ПН (целевая съемочная аппаратура (ЦСА)) КА серии Landsat включает телевизионные камеры RBV (return beam vidicon), многоспектральное сканирующее устройство MSS (multispectral scanner), тематический картограф ТМ (Thematic Mapper), усовершенствованный тематический картограф ЕТМ (Enhanced Thematic Mapper) и его модификацию ЕТМ+, а также перспективную съемочную аппаратуру OLI (Operational Land Imager).

Преимуществом в реализации и создании модификаций ЦСА при изменении целевых задач (расширение количества спектральных диапазонов, повышение разрешающей способности и др.) подтверждается следующими примерами (рис. 4). На КА Landsat 3, вместо 3-х телевизионных камер RBV, каждая из которых работала в узком спектральном

диапазоне, устанавливались две панхроматические камеры RBV [1]. КА Landsat 4 оснащен модифицированным вариантом многоспектрального сканирующего устройства MSS и, вместо камер RBV, установлена новая съемочная аппаратура - тематический картограф ТМ [1]. На КА Landsat 6 в качестве ЦСА вместо MSS и ТМ использовалась усовершенствованная спектральная система (тематический картограф) ЕТМ, а на КА Landsat 7 – её модификация ЕТМ+.

Результатом проведенного анализа является определение общих направлений модернизации КС ДЗЗ и создания модификаций КА, которые включают:

1. Повышение эффективности системы достигается путем частичной или полной её модернизации; модернизация системы предполагает создание модификаций КА.

2. Модернизация системы в основном связана с улучшением характеристик съемочной аппаратуры модификаций КА, в частности, увеличением и расширением спектральных диапазонов работы, увеличением ширины полосы захвата, улучшением значения пространственного разрешения.

3. Модификация КА в основном предполагает следующие изменения по целевой съемочной системе: установка дополнительных комплектов однотипной аппаратуры, усовершенствование отдельных элементов модифицируемой аппаратуры и изменение режимов её работы, применение новых схемных решений, увеличение ресурса работы подсистем КА в целом, реализация однотипных элементов в различной аппаратуре.

4. Модификация КА предполагает следующие технические решения по бортовым служебным системам:

- сохранение характеристик ряда бортовых служебных систем;
- широкое применение новых технических и технологических решений по элементной базе с целью снижения массовых, геометрических и энергетических характеристик;
- установку дополнительных комплектов отдельных подсистем и агрегатов;
- доработку системы или её элементов для достижения оптимальных значений их характеристик.

### **Постановка основной задачи проектирования КС ДЗЗ с учетом развития техники в планируемый период.**

Особенность анализа перспективных проектов КС ДЗЗ заключается в том, что должно учитываться развитие техники в планируемый период. Опыт показывает, что в течение жизненного цикла система претерпевает изменения, совершенствуется: проводится комплекс работ, обеспечивающих приспособление системы к новым условиям функционирования, её

модернизация. В указанном случае обоснованными являются постановка и решение проектной задачи с учетом развития системы, когда вопросы модернизации системы обсуждаются на ранних этапах её разработки. Модернизация системы связана с заменой подсистем на новые, более совершенные, и введением в строй модификаций КА, которые созданы на основе базового изделия.

Как обобщение основной проектной задачи на случай, когда априори учитывается возможность доработки техники, изменения параметров КС ДЗЗ и её характеристик в планируемый период её эксплуатации, сформулируем динамическую задачу проектирования подобной системы с учетом развития (модернизации) техники за это время. Постановка задачи: определить параметры базовой КС ДЗЗ и функции изменения её параметров при проведении модернизации системы в планируемый период с тем, чтобы обеспечить выполнение целевой задачи с эффективностью не меньше заданной, а математическое ожидание суммарных затрат на реализацию проекта КС ДЗЗ было минимальным.

Воспользовавшись опытом постановки проектно-конструкторских задач, запишем основную задачу проектирования КС ДЗЗ с учетом развития техники в планируемый период в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 MC_{\Sigma}^{KC}(\cdot) = & M_{\alpha} \int_{t_n}^{t_0} C_{P.C}(\Pi(t), \alpha_0(t_0, \Pi(t))) \eta(t) dt + \sum_{i=1}^n M_{\alpha_M} \alpha_M \int_{t_{ni}}^{t_i} C_M^i(\Pi(t), \alpha_M(t_i, \Pi(t))) \eta^i(t) dt + \\
 & + \sum_{i=1}^n M_{\alpha_{\Xi}} \alpha_{\Xi} \int_{t_{ni}}^{t_{i+1}} C_{\Xi}^i(\Pi(t), \alpha_{\Xi}(t_i, \Pi(t))) \eta^{\Xi_i}(t) dt - MC_{\Pi}(\cdot) \rightarrow \min_{\Pi(t) \in G(\cdot)} ; \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\sigma_{\alpha} C_{\Sigma}^{KC}(\cdot) \leq (\sigma_{\alpha} C_{\Sigma}^{KC})^{\text{зад}} ;$$

$$W(\Pi^1, \Pi^2(t), P_{\Xi_i}(t, N(t)), N_i, \Pi(t)) \geq W^{\text{зад}} \quad \text{для } \forall t \in \langle T \rangle ;$$

$$T_{P.C_i}(\Pi^1, \Pi^2(t), P_{\Xi_i}(t, N(t))) \leq T_{P.C}^{\text{зад}} ;$$

$$\Pi(t) = \Pi(t)^{\text{зад}} ,$$

где  $MC_{\Sigma}^{KCH}(\cdot)$ ,  $\sigma_{\alpha} C_{\Sigma}^{KCH}(\cdot)$  - соответственно математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение суммарных приведенных затрат (затрат с учетом дополнительных потерь из-за отвлечения средств (дисконтирования затрат), распределенных во времени) на разработку КС ДЗЗ, её создание, модернизацию и эксплуатацию за период  $t_n - t_k$  ( $t_n$  и  $t_k$  - соответственно моменты начала разработки и конца эксплуатации системы);

$M_{\alpha} \int_{t_n}^{t_0} C_{P.C}(\cdot) \eta(t) dt$  - математическое ожидание суммарных приведенных затрат на разработку

базовой КС ДЗЗ, её создание и ввод в эксплуатацию к моменту времени её начала эксплуатации  $t_0$ ;  $\sum_{i=1}^n M_{\alpha_M} \int_{t_{H_i}}^{t_i} C_M^i(\cdot) \eta^{M_i}(t) dt$  - математическое ожидание затрат на проведение  $n$  модернизаций системы ( $t_{H_i}$  и  $t_i$  - соответственно, начало и окончание работ при  $i$ -й модернизации);  $\sum_{i=1}^n M_{\alpha_{\mathcal{E}}} \int_{t_{H_i}}^{t_{i+1}} C_M^i(\cdot) \eta^{\mathcal{E}_i}(t) dt$  - математическое ожидание затрат на эксплуатацию КС ДЗЗ ( $t_{H_i}$  и  $t_{i+1}$  - соответственно, начало и окончание эксплуатации системы после  $i$ -й модернизации);  $\eta(t)$ ,  $\eta^{M_i}(t)$ ,  $\eta^{\mathcal{E}_i}(t)$  - соответственно, коэффициенты дисконтирования затрат (приведения затрат к моменту окончания эксплуатации системы  $t_k$ ) на разработку КС ДЗЗ, её создание, ввод в эксплуатацию,  $i$ -е модернизации и эксплуатации;  $\Pi(t)$  - вектор-функция изменения параметров КС ДЗЗ ( $\Pi(t) = (\Pi^1, \Pi^2(t_i), P_0(\cdot), P_{M_i}(\cdot), P_{\mathcal{E}_i}(\cdot), N_i, t_i, n)$ );  $\Pi^1$  - целочисленный вектор параметров, определяющих состав и структурные особенности КС ДЗЗ;  $\Pi^2(t_i)$  - вектор-функция изменения параметров КС ДЗЗ в момент окончания  $i$ -й её модернизации  $t_i$ ;  $P_0(t, N(t))$ ,  $P_{M_i}(t, N_i(t))$ ,  $P_{\mathcal{E}_i}(t, N_i(t))$  - соответственно, функции изменения надежности КС ДЗЗ при разработке и создании (изготовлении) его базового варианта, после её  $i$ -й модернизации и в  $i$ -й период ( $t_{i+1} - t_{H_i}$ ) эксплуатации;  $N_i(\cdot)$  - число испытаний элементов КС ДЗЗ при разработке и создании базовой системы ( $i = 0$ ) и при её  $i$ -х модернизаций;  $N_i$  - число космических аппаратов при создании базовой КС ДЗЗ ( $i = 0$ ) и после проведения  $i$ -й её модернизации;  $\alpha_0(\cdot)$ ,  $\alpha_{M_i}(\cdot)$  и  $\alpha_{\mathcal{E}_i}(\cdot)$  - соответственно, коэффициенты проектных моделей, так называемых определяющих параметров, используемых при выборе характеристик базовой КС ДЗЗ, проведении  $i$ -х модернизаций системы, а также в ходе её эксплуатации;  $MC_{\text{Л}}(\cdot)$  - математическое ожидание ликвидного капитала - средств, возвращаемых при снятии подсистем КС ДЗЗ с эксплуатации и их утилизации;  $W(\cdot)$  - функция, определяющая эффективность применения КС ДЗЗ при базовом варианте системы и после её  $i$ -х модернизаций;  $T_{P,C_i}(\cdot)$  - функция, определяющая сроки разработки и создания базовой КС ДЗЗ и сроки её работы при  $i$ -х модернизациях;  $\Psi(t)$  - функция целевой нагрузки на КС ДЗЗ в период её эксплуатации;  $G(\cdot)$  - область допустимых значений функции параметров  $\Pi(t)$ , задаваемая системой внешних и внутренних функциональных связей;  $\langle T \rangle$  - планируемый период времени функционирования КС ДЗЗ ( $\langle T \rangle = t_k - t_0$ ); зад - индекс,



характеризующий заданное значение функции (параметра).

При таком подходе варьируются не параметры, как в обычных задачах проектирования, а функции изменения параметров  $\Pi(t)$ , где  $t$  определяет дискретное время проведения модернизации:  $t = (t_1, t_2, \dots, t_n)$ ,  $n$  – число модернизаций.

Задача (1) является задачей комплексной оптимизации, при решении которой одновременно с определением рациональной структуры системы  $\Pi^1$  и поиском оптимальных параметров (см. вектор-функцию  $\Pi(t)$ ) вырабатывается рациональный процесс обеспечения надежности базового объекта при его создании и модернизации, а также программа модернизации - число и сроки модернизации в планируемый период. Проведение проектного анализа в данном случае представляет сложную проблему.

Полагается, что к моменту проведения исследований имеется прогноз изменения значений целевой нагрузки  $\Pi(t)$  на КС ДЗЗ в планируемый период времени. При оптимизации варьируемые параметры и функции выбираются с учетом ограничений. Они должны удовлетворять требованию по вероятности выполнения задачи и находиться в области  $G(\cdot)$ , задаваемой функциональными и параметрическими, внешними и внутренними связями. Важным моментом является ограничение на длительность разработки. Фактор времени может быть решающим при модернизации КС ДЗЗ. Если положить число модернизаций  $n$  равной нулю, то целевая функция  $MC_{\Sigma}^{KC}(\cdot)$  будет содержать два слагаемых, определяющих математическое ожидание затрат на разработку и создание КС ДЗЗ, и её эксплуатацию. Кроме того  $\Pi(t) = \Pi(t_0)$ . Таким образом, статическая задача проектирования КС ДЗЗ [3] реализуется как частная динамической задачи.

Следует отметить и другие основные особенности сформулированной задачи (1):

1. Задача - многопараметрическая и многокритериальная. При оптимизации варьируемые параметры и функции выбираются с учетом ограничений. Они должны удовлетворять требованию эффективности применения КС ДЗЗ, времени разработки и создания (изготовления) системы и находиться в области, задаваемой функциональными и параметрическими, внешними и внутренними связями. Важным моментом является ограничение на длительность разработки и создания  $T_{p.c.}(\cdot)$ .

При записи многокритериальной проектной задачи в данном случае используется метод ограничений. Критерием в процессе поиска рационального её решения являются средние приведенные затраты на реализацию проекта КС ДЗЗ. При выборе рационального решения проводится оценка суммарных приведенных затрат на реализацию проекта (на

разработку, создание, запуск КА, эксплуатацию и на проведение модернизации в планируемый период), а также определяется функциональная (целевая) эффективность КС ДЗЗ (информационная производительность, пространственное разрешение и др.). Одновременно оцениваются сроки разработки создания базовой системы и сроки таких работ при проведении модернизации (трудоемкости работ).

Оценка приведенных затрат (затрат с учетом дополнительных потерь из-за отвлечения средств (дисконтирования затрат), распределенных во времени) является в данном случае важным моментом, который может оказывать значительное влияние на выбор проектного решения. Так как суммарные затраты являются случайной величиной и имеют разброс, при поиске рационального решения определяется среднее их значение и оценивается величина разброса (определяется среднее квадратичное отклонение суммарных затрат). По ограничению среднего квадратичного отклонения таких затрат, по существу, можно определить величину риска реализации проекта КС ДЗЗ.

2. Другой особенностью задачи является то, что по существу она имеет динамический и стохастический характер. Динамический характер обусловлен тем, что при поиске рационального решения определяются функции, задающие программу модернизации КС ДЗЗ в планируемый период, а также процесс отработки и обеспечения надежности:  $P_0(t, N(t))$ ,  $P_{M_i}(t, N_i(t))$ ,  $P_{\Sigma_i}(t, N_i(t))$ .

### **Схема расчлененного исследования основной задачи проектирования.**

Очевидно, решение динамической задачи проектирования КС ДЗЗ с учетом развития техники в планируемый период включает анализ процесса развития и поиск оптимальной модернизации системы. В таком случае задачу модернизации можно определить на основе схемы расчлененного исследования динамической задачи проектирования. Используя приемы декомпозиции, сформируем логическую схему расчлененного исследования основной задачи проектирования КС ДЗЗ с учетом развития (модернизации) техники в планируемый период (рис. 6).



Рис. 6 - Схема расчлененного исследования основной задачи проектирования КС ДЗЗ

Главными проектными задачами являются:

1. Прогнозирование определяющих параметров, условий функционирования к моменту  $t_i$  (метод временных сечений).
2. Оптимизация параметров и процесса отработки и обеспечения надежности базовой КС ДЗЗ.
3. Задача оптимизации программы развития КС ДЗЗ в планируемый период.

В данном случае, оставляя в стороне вопросы решения задачи оптимизации параметров и процесса обеспечения надежности базовой КС ДЗЗ, для которой подходы и методы решения подробно представлены в [4], рассмотрим задачу оптимизации программы развития КС ДЗЗ в планируемый период (задача III, рис. 7).

Если использовать обозначения задачи (1), то задача оптимизации программы развития КС ДЗЗ в планируемый период имеет вид

$$MC_{\Sigma}^{КС}(\cdot) = \sum_{i=1}^n \left[ M_{\alpha_M} \int_{t_{n_i}}^{t_i} C_M^i(\Pi(t), t_i, N_i, \alpha_M) \eta^i(t) dt \right] +$$

$$+ \sum_{i=1}^n \left[ M_{\alpha_3} \int_{t_{нi}}^{t_{i+1}} C_{\alpha_3}^i(\Pi(t), P_{\alpha_3}(t_i), t_i, N_i, \alpha_3) \eta^{\alpha_3}(t) dt - MC_{\alpha_3}^i(\cdot) \right] \rightarrow \min_{\Pi(t), P_{\alpha_3}(t_i), t_i \in G(\cdot)} \quad (2)$$

$$\sigma_{\alpha} C_{\Sigma}^{KC}(\cdot) \leq (\sigma_{\alpha} C_{\Sigma}^{KC})^{\text{зад}};$$

$$W(\Pi^2(t), P_{M_i}(t_i, N_i(t)), P_{\alpha_3}(t_i, N_i, \Pi^2(t)), N_i, \Pi(t)) \geq W^{\text{зад}} \quad \text{для } \forall t \in \langle T \rangle;$$

$$T_{P.C_i}(\Pi(t)) \leq T_{P.C_i}^{\text{зад}};$$

$$\Pi(t) = (\Pi(t_i), P_{M_i}(\cdot), PR(t));$$

$$\Pi(t) = \Pi(t)^{\text{зад}}.$$

$$\Pi^1 = \Pi^1{}^{\text{зад}};$$

$$\Pi^2(t_0) = \Pi^2(t_0)^{\text{зад}};$$

Критерием поиска решения в этом случае являются средние приведенные затраты на реализацию программы модернизации КС ДЗЗ. Параметры базовой системы заданы. Сформулированная задача (2) решается итерационно с использованием приемов её декомпозиции.

Особенности задачи заключаются в следующем: определено начальное состояние (базовая космическая система ДЗЗ); варьируются не параметры, а функции изменения их (т.е. задача динамическая); оптимизация проводится в среднем (критерий – математическое ожидание) при условии выполнения нагрузки, переменной (случайной или неопределенной) во времени.

Программу модернизации системы определяет вектор-функция, которая включает в себя: программу ввода в строй модификаций КА; число элементов системы (число однотипных модификаций КА ДЗЗ) при проведении  $i$ -й модернизации; срок проведения  $i$ -й модернизации; число модернизаций КС ДЗЗ в планируемый период; параметры системы при проведении  $i$ -й модернизации; функцию изменения надежности КС ДЗЗ при  $i$ -й её модернизации; функцию изменения надежности эксплуатации КС при  $i$ -й её модернизации.

Задача оптимизации программы развития КС ДЗЗ в планируемый период решается в два этапа. Вначале определяются параметры системы при  $i$ -ых модернизациях в планируемый период. Каждая  $i$ -я модернизация связана с заменой подсистем. В частности, при  $i$ -й модернизации могут вводиться в строй новые КА или их модификации, оснащенные новой целевой аппаратурой.

Результаты исследования первого этапа (оценки характеристик КС ДЗЗ при  $i$ -ых модернизациях) используются на втором этапе при определении рациональной программы

модернизации КС ДЗЗ в планируемый период, для определения которой используется метод динамического моделирования.

Представленный методический подход позволяет конструктивно и целенаправленно формировать рациональную программу развития (модернизации) базовой КС ДЗЗ в планируемый период.

### **Анализ главных задач модернизации КС ДЗЗ.**

Выделяя группу параметров  $t_i$ ,  $n$  и  $N_i$  при поэтапной оптимизации задачи определим главные задачи модернизации КС ДЗЗ:

- оптимизация параметров КС ДЗЗ при модернизации и процесса обеспечения надёжности к моменту  $t_i \in \langle T \rangle$ ;
- оптимизация программы модернизации - числа, сроков и объема модернизаций в планируемый период  $\langle T \rangle$ .

Особенностью проектного анализа модернизации КС ДЗЗ является комплексный характер исследований. При этом одновременно определяется рациональная структура системы  $\Pi^1$ , проектные параметры подсистем  $\Pi^2(\cdot)$ , определяется процесс отработки и обеспечения надёжности, а также программа модернизации - число и сроки модернизации в планируемый период. Проведение проектного анализа в данном случае представляет сложную проблему.

Анализ показывает, что к основным особенностям решения задачи оптимизации параметров КС ДЗЗ при модернизации и процесса обеспечения надёжности к моменту  $t_i \in \langle T \rangle$  относятся:

- необходимость формирования множества допустимых изменений (замен подсистем), вносимых в базовый проект при модернизации КС ДЗЗ;
- прогнозирование определяющих параметров, задающих внутренние и внешние функциональные связи к моменту  $t_i$ ;
- реализация процедуры уточнения связей проектной модели при особенностях проектно-конструкторских решений (ПКР) заменяемых подсистем;
- комплексная оптимизация параметров и процесса обеспечения надёжности КС ДЗЗ при модернизации.

Результаты решения задачи: при  $i$ -й оптимальной модернизации КС ДЗЗ находятся параметры, а также функция изменения надёжности, определяющая процесс формирования

модернизации, при которых эффективность функционирования системы в период  $\langle T_i \rangle^{\text{зад}}$  не ниже заданного уровня, а математическое ожидание суммарных затрат на проведение модернизации в ограниченный срок  $(t_i - t_{n_i})$  и эксплуатацию минимальны.

Как показано в [3], особенностью проектных исследований КС ДЗЗ при модернизации к моменту  $t_i \in \langle T \rangle$  является необходимость учёта изменений ПКР при замене подсистем, динамики функциональных связей. В таком случае вопросы модернизации КС ДЗЗ и создания модификаций КА взаимосвязаны и взаимообусловлены.

Анализ показывает, что рациональным подходом к поиску эффективного решения является реализация метода многоуровневой согласованной оптимизации. В основе метода: схема многоуровневого управления разработкой; многоуровневая модель проектных исследований; статистический метод согласованного оптимизационного поиска [5].

Задача оптимизации программы модернизации - числа, сроков, состава модификаций КА ДЗЗ  $PR(t) = (t_i, N_i, n)$ , а также  $P_{\mathcal{E}_i}(t_i)$  - надежности её эксплуатации после  $i$ -й модернизации по своему характеру - задача синтеза. Данные для ее решения получают при анализе модернизаций КС ДЗЗ в планируемый период. Здесь реализуется важный методический прием. Применяя пространственно-временную декомпозицию (по существу это метод временных сечений) и имитационное моделирование - оптимизацию параметров модификации КА для момента времени  $t_i \in \langle T \rangle$ , получают необходимые данные для формирования интегральных аппроксимирующих зависимостей для решения динамической задачи оптимизации программы развития КС ДЗЗ. Особенностью метода сечений является его использование в качестве эмпирической основы расчетных данных, а также для анализа закономерностей развития новой техники на основе результатов проектного моделирования с учетом фактора времени.

Такой прием имеет важный методический смысл, знаменует переход от экстраполяции зависимостей и значений параметров к математическому моделированию новой техники в планируемый период с учетом фактора времени и установлению рациональных путей развития. Точность исследований в этом случае зависит от возможностей проектного моделирования, опыта создания и развития научных основ проектирования КА, от точности оценки динамики развития смежных отраслей, прогноза определяющих параметров. На точность влияют также методические ошибки (объем, состав оценок, точность интерполяции).

Анализ показывает, что применение метода сечений и приемов аппроксимации дает

возможность исследовать развитие КС ДЗЗ в планируемый период времени на основе интегрофункциональных зависимостей с предысторией. Использование данных моделирования является необходимым условием для оценки закономерностей создания новой техники и может позволить найти количественные и качественные изменения при замене подсистем, дает возможность исследовать условия, обеспечивающие направленное развитие, определить рациональную программу работ. Для успешной реализации методов требуются развитая информационная база и специальное математическое обеспечение. Использование результатов таких исследований, сравнительная оценка альтернативных вариантов КА и модификаций КА с учетом динамики развития повысят обоснованность решений.

### **Выводы.**

1. Рассмотрены проблемные вопросы модернизации КС ДЗЗ, создания модификаций КА как одного из важных направлений продления сроков эффективной эксплуатации системы. Показано, что проведение модернизации КС ДЗЗ, создания модификаций КА в общем случае позволяет продлить срок эффективного применения техники.

2. Дана постановка основной задачи проектирования КС ДЗЗ с учетом развития (модернизации) техники в планируемый период, схема её расчлененного исследования и определены главные проектные задачи.

3. Сформулирована постановка одной из главных проектных задач: оптимизации программы развития КС ДЗЗ в планируемый период. Рассмотрены особенности решения задачи. Показано, что данная задача решается в два этапа:

- вначале определяются рациональные параметры системы при  $i$ -ых модернизациях в планируемый период (главная задача модернизации 1 - оптимизация параметров системы при модернизации и процесса обеспечения надежности к моменту прогноза );

- результаты исследования первого этапа используются на втором при определении рациональной программы модернизации (главная задача модернизации 2 - оптимизация программы модернизации - числа, сроков и объема модернизаций в планируемый период).

4. Показано, что модернизация и поиск рациональных проектных решений проводятся комплексно и согласованно с оптимизацией параметров модификаций КА и параметров заменяемых подсистем. Комплексные исследования позволяют учесть динамику функциональных связей, найти рациональное решение по продлению срока эффективного применения КС ДЗЗ при ограниченных затратах.

5. Разработанный методический аппарат технико-экономического анализа альтернативных проектных решений КС ДЗЗ позволяет получить необходимые количественные оценки при выборе проектных решений КА и их модификаций, установить закономерности развития техники и технологий, оценить, в частности для КА, эффективность использования унифицированных космических платформ и повышения ресурса работы отдельных подсистем и КА в целом.

6. Методические основы технико-экономического анализа могут применяться при корректировке программ развития КС ДЗЗ, определении требований к перспективным КА и их модификациям.

Работа выполнена в рамках реализации мероприятия 1.1 ФЦП «Научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. Госконтракт 02.740.11.0471 от 30.09.2009 г.

### **Библиографический список**

1. Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. - М.: Издательство А и Б, 1997, 296 с.

2. Матвеев Ю.А., Ламзин В.В. Метод выбора проектных параметров модификаций космических аппаратов дистанционного зондирования Земли при наличии ограничений.// Журнал «Вестник МАИ», Москва, 2008, т.15, №1. С. 44-55.

3. Матвеев Ю.А., Ламзин В.В. Модернизация космических систем дистанционного зондирования Земли при наличии ограничений.//Общероссийский научно-технический журнал «Полет», № 10, Москва, 2007. С. 11 - 16.

4. Матвеев Ю.А., Ламзин В.В. Оптимизация параметров космической системы дистанционного зондирования Земли с учетом особенностей проектно-конструкторских решений космических аппаратов. Журнал «Вестник МАИ», Москва, 2009, т.16, №6, С. 55 - 66.

5. Матвеев Ю.А. Статистический метод многоуровневой многоэтапной оптимизации характеристик ЛА. В кн.: Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации, М.: Наука, 1983. С. 176 – 181.

### **Сведения об авторах**

Алифанов Олег Михайлович, профессор Московского авиационного института (государственного технического университета), д.т.н., . МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993; тел.: (499) 158-58-65; e-mail: alf@cosmos.com.ru  
Матвеев Юрий Александрович, профессор Московского авиационного института



(государственного технического университета), д.т.н. МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993; тел.: (499) 158-42-88; e-mail: matveev\_ya@mail.ru

Ламзин Владимир Владимирович, старший научный сотрудник Московского авиационного института (государственного технического университета), к.т.н. МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993; тел.: 8-916-846-58-36; e-mail: matveev\_ya@mail.ru

Ламзин Владимир Алексеевич, доцент Московского авиационного института (государственного технического университета), к.т.н. МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993; тел.: (499) 158-42-88; e-mail: matveev\_ya@mail.ru