

Специфика интегрированной логистической поддержки объекта космической техники на примере сверхмалого космического аппарата «Парус-МГТУ»

© А.Е. Бром, Н.В. Евстифеева, В.И. Майорова, Д.А. Рачкин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Освещены вопросы логистической поддержки космической техники на примере студенческого сверхмалого космического аппарата «Парус-МГТУ» — совместной работы студентов, аспирантов и профессоров кафедр ИБМ-3 «Промышленная логистика» и СМ-1 «Космические аппараты и ракеты-носители». Рассмотрены основы концепции интегрированной логистической поддержки и основные процедуры, обязательные к выполнению в рамках международных стандартов в этой области. Для аппарата «Парус-МГТУ» предложены рекомендации по обеспечению надежности электро-радиоизделий, разработан плановый график закупок комплектующих на основе решения задачи выбора поставщика.

Ключевые слова: интегрированная логистическая поддержка, космическая техника, сверхмалый космический аппарат, надежность, безотказность, анализ видов и последствий отказов, электрорадиоизделия, выбор поставщика, график закупок.

Сегодня ко всем изделиям наукоемкого машиностроения предъявляются жесткие требования: необходимо обеспечить качество выпускаемой продукции при одновременной оптимизации затрат на ее разработку и эксплуатацию и сокращении времени выхода на рынок. В последние десятилетия в России и мире активно развивается концепция интегрированной логистической поддержки изделия (ИЛП).

Интегрированная логистическая поддержка — это методология оптимизации стоимости жизненного цикла (ЖЦ) изделия с учетом наилучшей пригодности объекта техники к поддержке эксплуатации. Пригодность к поддержке эксплуатации — соответствие конструкторских характеристик изделия и его информационно-логистической системы требованию постоянной готовности к работе. Поэтому в рамках ИЛП особо актуальны процедуры и методы мониторинга и контроля соответствия фактических показателей на различных этапах ЖЦ изделия проектным требованиям в реальных условиях эксплуатации.

Стоит заметить, что основными путями снижения стоимости ЖЦ изделия являются [1]:

1) уменьшение длительности процессов проектирования и производства;

2) уменьшение количества блоков конструкции, подлежащих техническому обслуживанию или замене; агрегатирование и унификация комплектующих;

3) уменьшение в конструкции изделия количества элементов, эксплуатируемых по ресурсу, так как замена таких элементов в процессе эксплуатации существенно увеличивает стоимость технического обслуживания;

4) определение и учет требований эксплуатации при проектировании;

5) разработка эффективной инфраструктуры эксплуатации. При этом особое внимание направлено на такие ключевые моменты:

— периодичность выполнения плановых форм технического обслуживания;

— сокращение количества задач планового технического обслуживания;

6) разработка и предоставление заказчику стандартизированной информации (ИЭТР — Интерактивное электронное техническое руководство);

7) формирование стандартных алгоритмов взаимодействия между участниками ЖЦ изделия.

На выполнение этих задач направлена концепция системы ИЛП, включающая следующие структурные блоки (элементы) [2]:

- анализ логистической поддержки (АЛП, Logistic Support Analysis), проводимый на всех стадиях жизненного цикла;
- управление техническим обслуживанием и ремонтом изделия (ТОиР, Maintenance and Repair Planning), проводимое на стадиях проектирования и уточняемое на стадиях производства и эксплуатации;
- управление материально-техническим обеспечением процессов эксплуатации и обслуживания (МТО, Integrated Supply Support Procederus Planning), проводимое на стадиях проектирования и уточняемое на стадиях производства и эксплуатации;
- обеспечение персонала электронной эксплуатационной документацией (ЭЭД, Electronic Maintenance Documentation) и электронной ремонтной документацией на изделие (ЭРД).

Изначально системы ИЛП создавались для военной авиатехники. Успешные результаты такого подхода к настоящему моменту используются и в гражданском авиастроении, энергетическом машиностроении и других важных подотраслях машиностроительного производства.

Особый интерес представляет то, каким образом методы логистической поддержки могут использоваться в космической промышленности, имеющей свою ярко выраженную специфику.

Под космической техникой (КТ) понимается совокупность орбитальных средств, предназначенных для работы в условиях космического пространства. Исходя из того, что условия работы данной техники являются, пожалуй, самыми сложными по сравнению с условиями работы изделий других отраслей, это автоматически выводит космическую промышленность в ряд наиболее сложных и наукоемких отраслей машиностроения.

Для космической промышленности характерны следующие особенности, непосредственно влияющие на структуру логистического обеспечения процессов производства и эксплуатации объектов:

- сложность и высокая стоимость изделий;
- широкая внутриотраслевая и межотраслевая кооперация: в процессе проектирования, изготовления и испытания космической техники участвует большое число исполнителей и соисполнителей;
- единичное производство продукции, следовательно, уникальность изделий;
- разнообразие и сложность технологических процессов, требующих проведения предшествующих им экспериментальных и научно-исследовательских работ;
- непрерывное повышение требований к качеству, надежности, ресурсу изделий и, что не менее важно, к культуре производства.

Жизненный цикл объекта КТ и его составных частей включает следующие этапы:

- маркетинговые исследования (выбор и обоснование направления работ);
- техническое предложение (аванпроект);
- эскизный проект;
- разработка рабочей документации и технологическая подготовка производства;
- изготовление макетов и опытных образцов, конструкторско-доводочные испытания и корректировка рабочей документации;
- изготовление летных образцов;
- запуск и летные испытания;
- эксплуатация;
- утилизация.

Особенности ЖЦ космической продукции следующие:

- обеспечение максимальной надежности и качества на предпроизводственных и производственных этапах без дальнейшего технического обслуживания и ремонта на последующих этапах ЖЦ;
- как правило, длительный срок эксплуатации техники (эффективная эксплуатация объекта КТ должна быть обеспечена

в течение ограниченных сроков его активного существования). На сегодняшний день он составляет для разных образцов КТ от 3 до 20 лет;

— ограниченные возможности утилизации, которые должны осуществляться средствами самой КТ.

Как отмечено выше, на предпроизводственных и производственных этапах необходимо обеспечить максимальный уровень надежности КТ, поскольку возможности технического обслуживания и ремонта в космическом пространстве сильно ограничены, а зачастую невозможны полностью. Проведение испытаний осуществляется на специально производимых макетах (вибропрочностном, тепловом), специализированных стендах (вибростенд, термовакуумная камера), что также значительно усложняет процесс разработки космической техники. Запуск КТ в космическое пространство — еще один немаловажный фактор, который необходимо учесть разработчику. Запуск спутника в качестве основной полезной нагрузки на ракете — дорогостоящее мероприятие, однако снижение стоимости путем попутного запуска совместно с другими космическими аппаратами на одной ракете-носителе может значительно повысить риск невыполнения миссии, главным образом по причине затруднений в поиске попутчиков [3].

Требования высокой надежности и функциональности КТ обусловлены вышеперечисленной спецификой ЖЦ и условиями реального времени в процессе запуска и эксплуатации. В настоящий момент заказчиками космической техники предъявляется требование в значении безотказной работы системы на уровне 0,99.

Для объектов космической техники, как было сказано, сильно ограничена возможность технического обслуживания, поэтому полноценная реализация концепции ИЛП невозможна. Однако элементы концепции ИЛП можно и нужно применять и к космической технике. В 2010 г. разработано руководство «International procedure specification for Logistics Support Analysis», изданное европейской ассоциацией производителей аэрокосмической техники (ASD).

Для космической техники, в частности, предлагается применение инструментов функционального анализа и анализа видов и последствий критичности отказов (АВПКО). Применение этих инструментов для изделий космической техники необходимо, чтобы обеспечить:

- «функциональную полноту и избыточность» изделия;
- максимальную надежность изделия в процессе работы;
- необходимую и достаточную номенклатуру и количество комплектующих и материалов при формировании материально-технического обеспечения (МТО) производственной стадии;

- снижение стоимости ЖЦ изделия при производстве за счет организации рациональных поставок комплектующих.

Как для военной и спецтехники, для космической техники особенностью является сложная взаимосвязь параметров «надежность — стоимость», и зачастую перед разработчиками ставится требование понизить стоимость изделия, но при этом диапазоны снижения надежности жестко ограничены.

Традиционно в производстве космической техники применяются комплектующие с самой высокой степенью надежности, которые, как правило, разрабатываются только для космического применения. Например, характеристики безотказности комплектующих для космического применения отличаются от соответствующих показателей изделий коммерческого применения примерно в 80—100 раз. Такое соотношение проявляется и в стоимости между электрорадиоизделиями (ЭРИ) космического и коммерческого применения. В последнее время в российской космической промышленности наметилась тенденция к применению в производстве РКТ элементов индустриального класса вместо дорогих и труднодоступных зарубежных благодаря тому, что для ЭРИ коммерческого класса путем реализации широкой программы отбраковочных, сверхотбраковочных и диагностических испытаний и отбора можно поднять показатели надежности в 10 раз [3].

Для обеспечения процедуры повышения надежности изделий предлагается проводить совместные процедуры функционального анализа и анализа видов, последствий и критичности отказов (АВПКО).

Использование алгоритмов функционального анализа и АВПКО для космической техники позволит определить, для выполнения каких функций изделия допускается использование элементов индустриального класса, а какие элементы необходимо доводить до уровня более высокого класса надежности.

Количественную оценку надежности элемента можно провести, используя в качестве показателя вероятность безотказной работы (ВБР). ВБР из теории надежности должна рассчитываться по следующей формуле:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где λ — интенсивность отказа элемента, 1/час; t — длительность работы элемента, час.

В АВПКО для каждого элемента структуры изделия необходимо задать значение интенсивности отказа. Интенсивность отказа рассчитывается отдельно для каждого вида элемента. Значения интенсивностей отказа для ЭРИ приводятся в справочной литературе и документации производителя, поэтому целесообразно проводить АВПКО до уровня функций каждого отдельного ЭРИ.

Значения эксплуатационной интенсивности отказов большинства групп ЭРИ рассчитываются по математическим моделям, имеющим вид:

$$\lambda_{э} = \lambda_{б} \cdot \prod_{i=1}^n K_i, \quad (2)$$

где $\lambda_{б}$ — базовая интенсивность отказов типа (группы) ЭРИ, рассчитанная по результатам испытаний ЭРИ на безотказность, долговечность, ресурс; K_i — коэффициенты, учитывающие изменения эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от различных факторов; n — число учитываемых факторов.

В сентябре 2009 г. в МГТУ им. Н.Э. Баумана в Учебно-научном молодежном космическом центре под руководством доктора технических наук, профессора кафедры «Ракеты-носители и космические аппараты» (СМ-1) В.И. Майоровой и старшего преподавателя кафедры «Аэрокосмические системы» (СМ-2) А.С. Попова стартовал проект по созданию студенческого сверхмалого космического аппарата.

В качестве задачи была выбрана проблема создания солнечного паруса — перспективного устройства космической техники, разработка которого в настоящее время требует большого количества как фундаментальных и прикладных, так и экспериментальных исследований. Для осуществления разработки предполагалось непосредственное вовлечение студентов в процесс создания космического аппарата с момента возникновения идеи, до проведения реального космического полета — осуществления космического эксперимента.

Основная идея проекта — использование в качестве светоотражающей поверхности солнечного паруса двух узких лент, которые могут быть просто намотаны на катушки. При этом солнечный парус должен быть раскрыт с борта сверхмалого космического аппарата (СКА) [4].

В настоящий момент данный проект решением Роскосмоса включен в долгосрочную программу научно-прикладных экспериментов на Международной космической станции (МКС). Перед проектной группой стоит задача создания опытно-конструкторской разработки сверхмалого космического аппарата «Парус-МГТУ».

Космический эксперимент (КЭ) «Парус-МГТУ» является комплексным экспериментом, преследующим несколько целей.

Во-первых, эксперимент направлен на освоение технологии развертывания крупногабаритных двухлопастных тонкопленочных космических конструкций, стабилизированных вращением (рис. 1). Освоение данной технологии позволит практически ис-

пользовать солнечные паруса в качестве движителей, устанавливаемых на КА как альтернативу использованию ракетных двигателей, что позволит осуществлять маневры КА без затрат рабочего тела (например, для подъема или свода с орбиты). Проведенный эксперимент также обогатит знания о динамике крупногабаритных космических конструкций. Эти знания имеют большое значение, например, для создания будущих систем космической связи, космических солнечных электростанций, систем дистанционного зондирования и т.д.

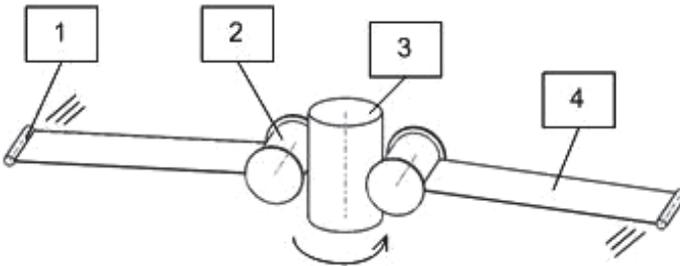


Рис. 1. Двухлопастная тонкопленочная космическая конструкция, стабилизированная вращением:

1 — концевая масса; 2 — катушка с намотанной светоотражающей лентой; 3 — центральное тело; 4 — тонкопленочный солнечный парус

Во-вторых, эксперимент направлен на проведение летных испытаний бортовой аппаратуры разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана сверхмалого космического аппарата, которая создана с широким применением электрорадиоизделий промышленного класса. Успешные летные испытания позволят использовать созданный научно-технический задел в области производства бортовой электронной аппаратуры для других космических экспериментов на сверхмалых КА.

В-третьих, эксперимент направлен на получение практического опыта разработки СКА студентами и аспирантами, занятыми в работе над проектом, а также для подготовки демонстрационных и иных материалов для обогащения учебных курсов «Проектирование КА», «Динамика конструкций КА» и другими методическими пособиями, демонстрационными материалами, лабораторными работами, затрагивающими спектр вопросов, решенных в ходе проектирования СКА.

Проведение сеансов связи с СКА в радиоловительском диапазоне частот позволяет привлечь к осуществлению эксперимента большое количество студентов и школьников, что популяризирует космические исследования, инженерное образование и научно-техническое творчество молодежи. Помимо этого данные сеансы связи способствуют укреплению отношений с международными университетами, молодежными организациями, повышают престиж российской космонавтики на международном уровне.

СКА «Парус-МГТУ» имеет нестандартный способ запуска — ручной запуск космонавтом во время внекорабельной деятельности (ВКД) на международной космической станции. Поэтому на этапе орбитального полета СКА находится в двух состояниях: хранения в составе МКС и в состоянии активной работы после запуска с МКС. Учитывая, что последовательные события являются независимыми, результирующую ВБР можно рассчитать по формуле:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (3)$$

где n — количество состояний системы.

Для космической техники и проекта «Парус-МГТУ» разработаны следующие рекомендации по обеспечению надежности (рис. 2).

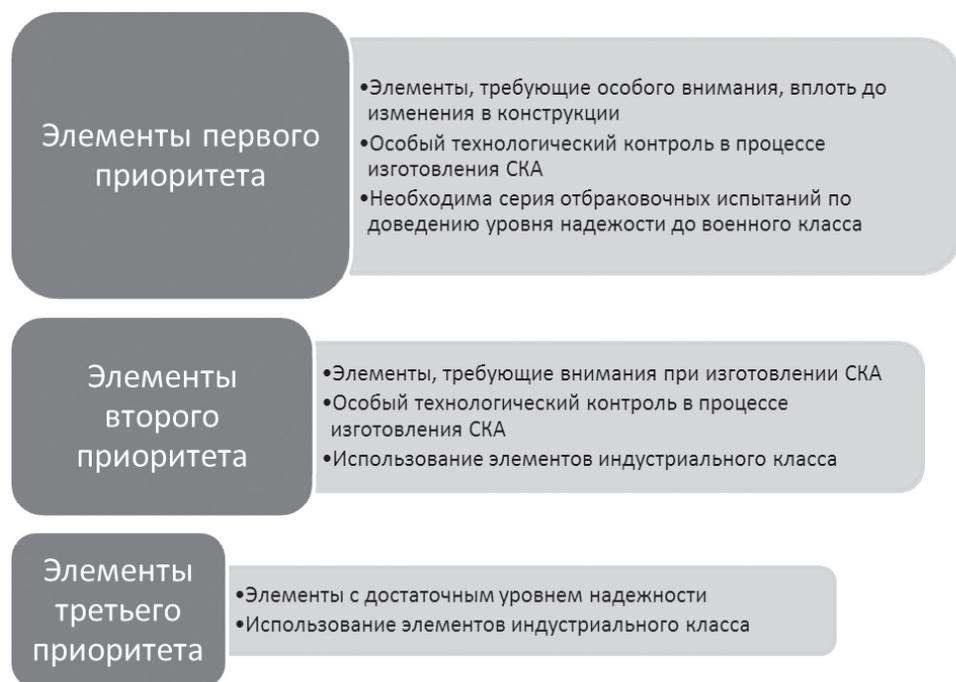


Рис. 2. Рекомендации по обеспечению надежности

Элементы ЭРИ индустриального класса надежности имеют коэффициент качества $K = 10$. Их можно довести до уровня качества, соответствующего военной технике ($K = 1$), применяя комплекс дополнительных отбраковочных испытаний (табл. 1) [3].

Рассчитать количество закупаемых изделий для проведения отбраковочных испытаний можно средствами математической статистики.

Отбраковочные испытания

Рекомендуемые дополнительные испытания	Ожидаемое для ЭРИ улучшение качества
Измерение электрических параметров по ужесточенным нормам для нормальной, положительной и отрицательной температур	1,9
10 термоциклов с измерением электрических параметров	1,6
Термотренировка (ТТ) в течение не менее 168 ч при максимальной рабочей для данного элемента температуре	2
Измерение информативных параметров после ТТ	1,5

Воспользуемся формулой для определения объема выборки при случайном отборе с известной долей признака и неизвестным объемом генеральной совокупности:

$$n = \frac{t^2 pq}{\Delta^2}, \quad (4)$$

где n — количество элементов в выборке; t — коэффициент доверия (определяется по таблице значений функции Лапласа $F(t)$, при условии известной исследователю доверительной вероятности); p — доля брака в выборочной совокупности; q — доля качественной продукции в выборочной совокупности; Δ — заданная точность.

Выполнив эти расчеты, получаем четкую номенклатуру и количество закупаемых элементов изделия для материально-технического обеспечения производственного этапа.

Для закупки комплектующих для любого космического аппарата необходимо выбрать поставщика. Выбор поставщика чрезвычайно важен, поскольку именно от него зависят надежность, качество и стоимость поставки оборудования. Для решения задачи выбора поставщика предлагается использовать метод рейтинговых оценок. Выбор приоритетного поставщика с помощью этой методики осуществляется последовательно.

Изначально производится структурирование решаемой проблемы: задается общая цель решения задачи, формулируются критерии, определяются возможные поставщики. Для проекта «Парус-МГТУ» необходимо выбрать поставщика для группы ЭРИ индустриального назначения, не изготавливаемых на заказ. Структурирование задачи проиллюстрировано на рис. 3.

После того как выявлены основные критерии, привлеченными экспертами устанавливается их значимость экспертным путем. Для того чтобы выставить оценки поставщику, необходимо разработать систему взаимосвязи характеристики поставщика и соответствующего ей количества баллов [5]. Возможная взаимосвязь характеристик поставщика и его коммерческого предложения

для производителей космической техники представлена в табл. 2. Балльная оценка критериев вырабатывается исходя из накопленного опыта и анализа предложений.

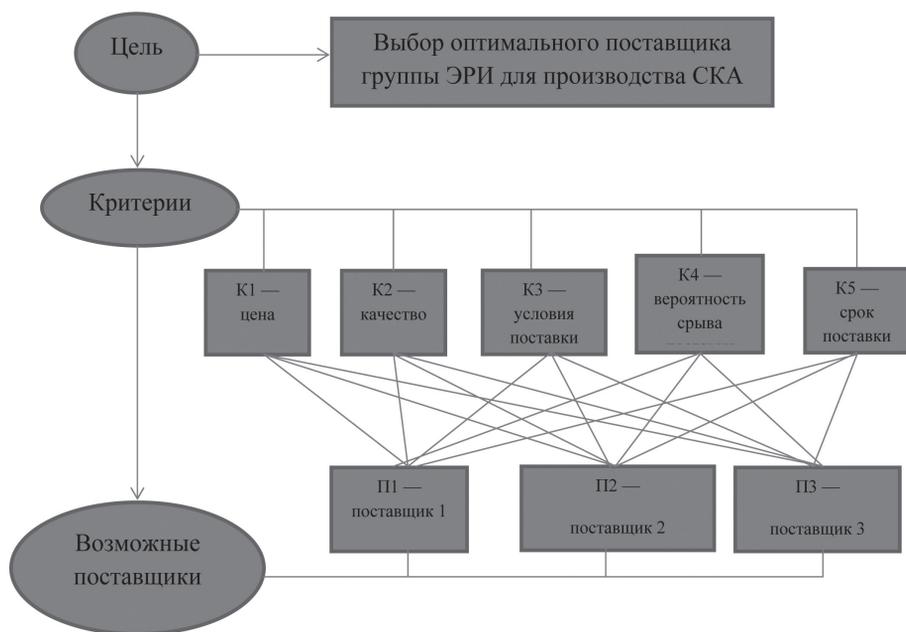


Рис. 3. Структурированная задача выбора поставщика

Таблица 2

Балльная оценка критериев

Характеристика поставщика	Баллы	Критерий оценки
Цена	0	Цена выше предложенной другими компаниями
	1	Цена равна предложенной другими компаниями
	2	Цена незначительно ниже предложенной другими компаниями
	3	Цена немного ниже предложенной другими компаниями
	4	Цена на порядок ниже предложенной другими компаниями
	5	Цена значительно ниже предложенной другими компаниями
Качество	0	Качество плохое
	1	Качество изделия нехорошее
	2	Качество изделия среднее
	3	Качество изделия неплохое, но непостоянное
	4	Качество изделия хорошее, потребители довольны
	5	Качество изделия постоянное, высокое

Окончание табл. 2

Характеристика поставщика	Баллы	Критерий оценки
Условия поставки	0	100% предоплата
	1	Оплата сразу после получения товара
	2	Отсрочка платежа от 1 до 15 банковских дней
	3	Отсрочка платежа от 16 до 30 банковских дней
	4	Отсрочка платежа от 31 до 47 банковских дней
	5	Отсрочка платежа от 48 до 60 банковских дней
Вероятность срыва поставки	0	Возможна вероятность поставки
	5	Срыв поставки невозможен
Срок поставки	0	Срок больше 56 дней
	1	Срок от 35 до 56 дней
	2	Срок от 21 до 35 дней
	3	Срок от 7 до 21 дня
	4	Срок от 3 до 7 дней
	5	Срок меньше 3 дней

Далее высчитывается значение рейтинга по каждому критерию путем произведения удельного веса критерия (v_i) на его экспертную балльную оценку (c_i) для данного поставщика. Затем суммируют полученные значения рейтинга по всем критериям и получают итоговый рейтинг для конкретного поставщика. Сравнивая полученные значения рейтинга для разных поставщиков, определяют наилучшего партнера. Если рейтинговая оценка дает одинаковые результаты для двух и более поставщиков по основным критериям, то процедуру повторяют с использованием дополнительных критериев. Данные по результатам оценки экспертами поставщиков по каждому критерию и значимости критериев представлены в табл. 3.

Таблица 3

Расчет рейтинга поставщика

Поставщик \ Критерий	Поставщик			v_i	$c_{п1} \cdot v_i$	$c_{п2} \cdot v_i$	$c_{п3} \cdot v_i$
	П1	П2	П3				
К1	2	3	4	0,15	0,3	0,45	0,6
К2	5	3	4	0,5	2,5	1,5	2
К3	1	3	2	0,1	0,1	0,3	0,2
К4	5	5	5	0,15	0,75	0,75	0,75
К5	4	5	3	0,1	0,4	0,5	0,3
Рейтинг поставщика					4,05	3,5	3,85

Самым важным критерием в экспертном методе было выбрано качество продукции, что является основным фактором при производстве космической техники. Самый большой рейтинг по результатам расчета был присвоен Поставщику 1, эта компания выбирается поставщиком группы ЭРИ.

Зная номенклатуру и количество закупаемого оборудования, необходимо ответить на вопрос о том, когда его закупать. На рис. 4 представлен плановый график закупок оборудования.

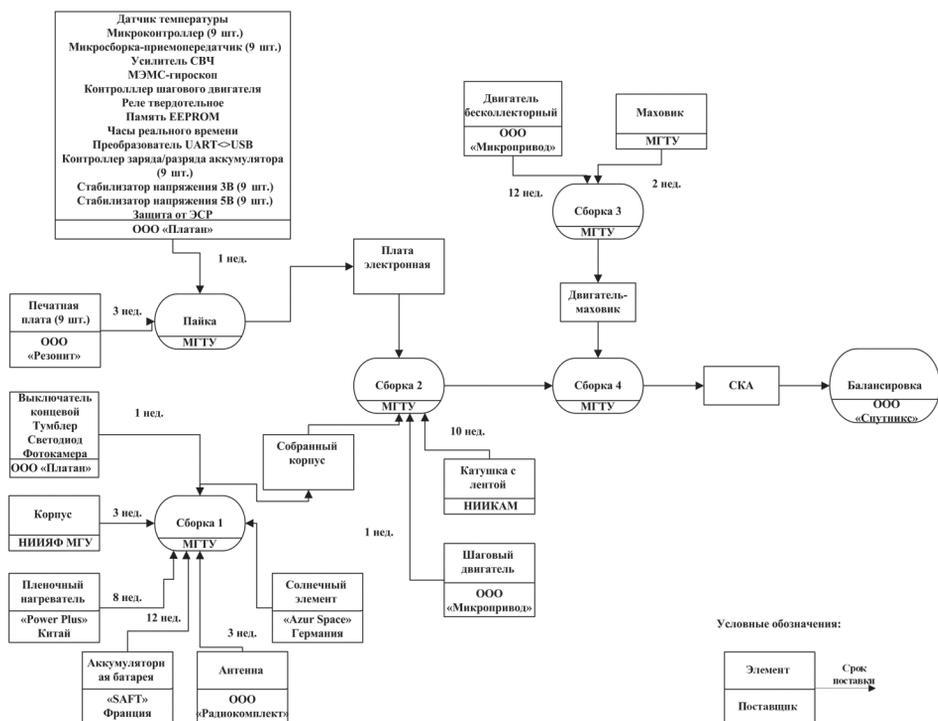


Рис. 4. Плановый график закупок оборудования

На рис. 4 показано, к какому этапу производства какой элемент конструкции должен быть в наличии. Сроки поставки обуславливаются договорными обязательствами. Максимальная длительность поставки — 12 недель, минимальная — 1 неделя. Чтобы иметь комплектующие в наличии с максимальной вероятностью к началу соответствующего этапа производства и минимизировать риски задержки поставки, рекомендуется организовать доставку оборудования к началу изготовления летного образца (дата в соответствии с разработанным планом-графиком работ — 06.02.2013). График размещения заказов соответствующим поставщикам представлен в табл. 4.

Для элементов первой зоны приоритета необходимо учесть срок отбраковочных испытаний. Расчетная длительность испытаний составит 51 день (ориентировочно 8 недель). Поэтому разместить заказ на эти комплектующие необходимо за 9 недель, т.е. 10.10.2013.

График размещения заказов

Поставщик	Срок поставки	Дата размещения заказа
Поставщик 1	1	28.11.2013
Поставщик 2	3	21.11.2013
Поставщик 3	3	21.11.2013
Поставщик 4	8	17.10.2013
Поставщик 5	12	19.09.2013
Поставщик 6	3	21.11.2013
Поставщик 7	12	19.09.2013
Поставщик 8	1	28.11.2013
Поставщик 9	10	03.10.2013

Важно подчеркнуть, что выбор поставщика является комплексной многоуровневой процедурой, от результатов которой во многом зависят надежность и успешность проекта по созданию объекта КТ.

Успешное внедрение полученного опыта по созданию сверхмалого космического аппарата «Парус-МГТУ» в учебный процесс позволит существенно повысить практическую составляющую образовательной компоненты учебных программ аэрокосмических специальностей и программ магистерской подготовки «Логистика ресурсосбережения наукоемкого производства» и «Интегрированная логистическая поддержка аэрокосмической техники».

Кроме того, важную роль играют изучение международных правил и процедур в области создания систем логистической поддержки для аэрокосмической техники и получение обширных знаний студентами во многих междисциплинарных областях, без чего невозможно успешное продвижение российских наукоемких разработок на мировом рынке.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бром А.Е., Колобов А.А., Омельченко И.Н. *Интегрированная логистическая поддержка жизненного цикла наукоемкой продукции*. А.А. Колобов, ред. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 296 с.
- [2] Судов Е.В., Левин А.И., Петров А.В., Чубарова Е.В. *Технологии интегрированной логистической поддержки изделий машиностроения*. Москва, ООО Издательский дом «ИнформБюро», 2006, 232 с.
- [3] Данилин Н.С. *Информационные технологии и сертификация элементной базы новых российских космических телекоммуникаций*. Москва, РТА ГТК, 2000, 76 с.
- [4] Rachkin D., Tenenbaum S., Dmitriev A., Nerovniy N., Kotsur O., Vorobyov A. 2-blades deploying by centrifugal force solar sail experiment (IAC-11. E2.3.8). *Proceedings of 62nd International Astronautical Congress*, Cape Town, SA, 2011.

- [5] Липатова О.Н. Организационно-экономические решения при выборе поставщиков. *Вестник АГТУ, Сер. Экономика*, 2012, № 2, с. 54—58.

Статья поступила в редакцию 18.10.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бром А.Е., Евстифеева Н.В., Майорова В.И., Рачкин Д.А. Специфика интегрированной логистической поддержки объекта космической техники на примере сверхмалого космического аппарата «Парус-МГТУ». *Гуманитарный вестник*, 2013, вып. 10. URL: <http://hmbul.bmstu.ru/catalog/econom/log/111.html>

Бром Алла Ефимовна — д-р техн. наук, профессор кафедры «Промышленная логистика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: ibm3@ibm.bmstu.ru

Евстифеева Наталья Владимировна — аспирант кафедры «Промышленная логистика» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Майорова Виктория Ивановна — д-р техн. наук, профессор кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана, руководитель Учебно-научного молодежного космического центра.

Рачкин Дмитрий Анатольевич — аспирант кафедры «Аэрокосмические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана.