

N. D. Polyakhov, R. I. Galiullin
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

CONTROL OF DOUBLE INVERTED PENDULUM

A control system of double inverted pendulum. The problems of the dynamics of the system in various modes. The simulation results show the performance of the control system. The results of modeling in Matlab/Simulink.

Double inverted pendulum, Lagrange equations, mathematical model, linearization, manageability, stabilization

УДК 629.7.083

Е. Н. Шаповалов, Ю. Б. Остапченко, А. В. Экало, С. А. Беляев
*ОАО «Научно-инженерный центр Санкт-Петербургского
электротехнического университета»*

С. А. Кудряков
Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации

Актуальные вопросы теории эксплуатации авиационной и ракетно-космической техники

На основе анализа общих черт сложных технических комплексов и проблем их эксплуатации сделан вывод об общности причин этих проблем. Дана краткая характеристика объекта и субъекта эксплуатации, в общем виде сформулирован подход к проектированию системы эксплуатации как к важнейшей задаче теории эксплуатации авиационной и ракетно-космической техники.

Эксплуатация, система эксплуатации, объект эксплуатации, субъект эксплуатации, сложный технический комплекс, авиационная и ракетно-космическая техника

По мере развития и усложнения техники менялась роль человека при ее эксплуатации, как и само отношение к процессу эксплуатации техники. Человек становился интегрированным элементом сложной системы, объективно возникающей при его взаимодействии с техникой, эффективность функционирования которой зависела как от технических составляющих, так и от деятельности человека (оператора, руководителя, собственника).

Усложнение процесса эксплуатации как процесса взаимодействия человека и техники обусловливалось появлением проблем, требующих для своего разрешения научного подхода. Во многом эти проблемы были связаны с тем, что объектами эксплуатации во многих сферах деятельности, в частности в ракетно-космической и авиационной отраслях промышленности становились

сложные технические комплексы (СТК), которым свойственны следующие характерные черты:

– иерархическая структура СТК, многоэтапность достижения цели эксплуатации и наличие функциональных подсистем. При этом невыполнение функций какой-либо подсистемой может приводить не к невыполнению задачи, стоящей перед СТК, а только к снижению эффективности его функционирования;

– персонал, необходимый для достижения цели эксплуатации СТК, представляет собой некоторое множество коллективов, функционирующих во главе с руководителями разных рангов;

– наличие органов управления подсистемами и СТК в целом, на которых возложены функции управления, планирования, организации, контроля эксплуатации, оценка складывающейся обстановки и принятие решений.

Несмотря на различия в назначении, конструкции, принципах действия СТК, можно выделить характерные черты процесса их эксплуатации:

– во-первых, процесс эксплуатации любого объекта осуществляется с целью удовлетворения потребностей человека, группы людей, сообщества (субъекта) и состоит во взаимодействии субъекта с объектом эксплуатации;

– во-вторых, можно выделить две роли субъекта эксплуатации – потребитель полезного результата и рабочее звено в системе «человек–машина»;

– в-третьих, процессы создания СТК различного назначения весьма схожи. Обязательными участниками этих процессов являются заказчик, разработчик и изготовитель, функции которых регламентированы системой нормативно-правовых и нормативно-технических документов. Взаимодействие упомянутых участников осуществляется на всех стадиях жизненного цикла СТК.

Яркими представителями СТК являются современные комплексы авиационной и ракетно-космической техники (АРКТ). Важную роль в их функционировании играет этап наземной эксплуатации (в авиации его называют технической эксплуатацией), поскольку этот этап обеспечивает надежную работу бортовых систем в процессе летной эксплуатации. Пропущенные дефекты, скрытые отказы и допущенные ошибки могут стать причиной поломки техники, аварий и катастроф.

Рассмотрим основные проблемы, возникающие на этапе наземной эксплуатации АРКТ. Их можно условно разделить на три группы.

1. Большое число обнаруживаемых неисправностей бортовых систем и агрегатов при каждом цикле подготовки летательного аппарата (ЛА) к полету, устранение которых часто требует оперативного принятия решений. При этом важно установить не только причины неисправностей, но и влияние выявленных неисправностей на функционирование бортовых систем и агрегатов. Опыт показал, что их целесообразно классифицировать по этому признаку, по крайней мере, на три группы. С теми неисправностями, которые не приводили к невыполнению целевой задачи, можно было допускать ЛА к полету. Во вторую группу входили те неисправности, которые обязательно должны быть устранены перед полетом. Наконец, это неисправности, при которых ЛА не допускался к полету, так как был недопустимо высок риск аварии.

2. Большое количество нештатных ситуаций. Помимо неисправностей в процессе предполетной подготовки ЛА возникает достаточно большое количество сбоев и других отклонений результатов выполнения технологических операций от установленных требований. Такие отклонения были названы нештатными ситуациями. Неопределенность, связанная с причинами возникновения нештатных ситуаций, различными сценариями их развития, которые могли привести к происшествиям (катастрофам, авариям, поломкам техники), а также с возможностью принятия неверных решений по выходу из этих ситуаций, обуславливает высокую степень опасности процессов наземной эксплуатации. Значительная тяжесть последствий происшествий, к которым могли приводить нештатные ситуации, обуславливали необходимость поиска методов предотвращения аварий при наземной эксплуатации АРКТ, обоснования мер защиты персонала, окружающей природной среды и сопряженных объектов.

3. Значительное число ошибок эксплуатирующего персонала. Такие ошибки можно условно разделить на три группы.

Во-первых, так называемые нарушения технологической дисциплины, или несоблюдение установленной технологии выполнения операций.

Во-вторых, нарушения требований безопасности, что часто приводит к нештатным ситуациям.

В-третьих, неверные решения, принимаемые руководителями работ по выходу из нештатных ситуаций.

Анализ эксплуатационных проблем и закономерностей их возникновения позволяет определить их причины и, соответственно, направления исследований по поиску способов их устранения или снижения влияния на конечный результат – успешное осуществление полета ЛА.

Прежде всего, это низкая надежность АРКТ, что проявлялось в большом количестве обнаруживаемых дефектов.

Вторая причина – это недостаточная безопасность процессов эксплуатации АРКТ. Термин «безопасность» связывается с событием перехода эксплуатируемого образца АРКТ в такое состояние (называемое опасным), которое приводит к утрате здоровья или жизни людей (в первую очередь, эксплуатирующего персонала), а также к нанесению ущерба окружающей природной среде свыше допустимых пределов. Переход АРКТ в опасное состояние во многом зависит от свойств,

которые должны быть приданы ей для защиты персонала от воздействия опасных факторов при проектировании и реализованы при эксплуатации.

Третья причина – недостаточное применение научного подхода к рациональной организации эксплуатационных процессов, направленного на обоснование состава и структуры органов управления эксплуатацией, эксплуатационных подразделений, а также обеспечение их взаимодействия.

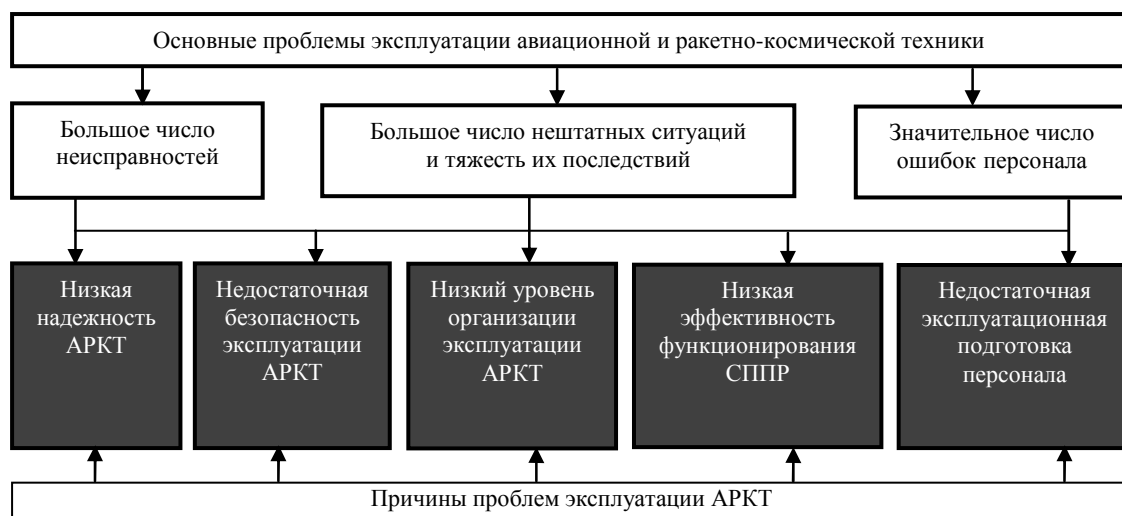
Четвертая причина связана с недостаточной эффективностью функционирования системы поддержки принятия решений (СППР) при эксплуатации АРКТ. Принимаемые решения должны быть обоснованы с учетом всех возможных их последствий и приняты в установленные сроки, как правило, сжатые. Полностью исключить риск принятия неправильного решения невозможно, но свести его к минимуму – это реальная задача. Функционирование СППР должно быть направлено на предоставление лицу, принимающему решение (ЛПР), необходимой для принятия решения информации.

Наконец, пятая причина – недостаточная подготовка персонала по эксплуатации АРКТ. В современных условиях эксплуатации АРКТ существенно изменяется роль эксплуатирующего персонала, значительно повышаются требования к его квалификации. Специалисты по эксплуатации АРКТ – это не только исполнители принятых разработчиком решений, изложенных в эксплуатационной документации (традиционная роль эксплуатирующего персонала), но и полноправные участники подготовки, принятия и реализации решений по выходу из многочисленных нештатных ситуаций, возникающих в процессе опытной отработки, ввода в эксплуатацию и эксплуатации АРКТ.

Рисунок иллюстрирует взаимосвязь основных проблем эксплуатации АРКТ и причин их возникновения.

Анализ основных способов решения эксплуатационных проблем [1], [2] показал, что они могут быть реализованы как на доэксплуатационных стадиях жизненного цикла АРКТ, так и на стадии их эксплуатации. Первое направление традиционное, связанное с обеспечением требуемого качества АРКТ при проектировании. К характеристикам назначения добавились характеристики надежности и безопасности, а в дальнейшем – и характеристик других свойств, составляющих эксплуатационное качество изделия [3], [4]. Для расчета характеристик эксплуатационного качества были разработаны методы теории надежности.

Как показал опыт, методов обеспечения высокого эксплуатационного качества АРКТ на доэксплуатационных стадиях оказалось недостаточно [1], [3], поскольку при решении многих эксплуатационных проблем, таких как оценивание влияния эксплуатационных факторов на результаты эксплуатации, обеспечение длительной эксплуатации комплексов, расчет риска принимаемых решений и т. п. требовалось использование апостериорной (т. е. полученной при эксплуатации) информации. Для этого необходимо было разрабатывать специальное научно-методическое обеспечение, подготовить персонал и организовать его использование в рамках функционирования СППР при эксплуатации АРКТ. Решением этих задач и занималась теория эксплуатации, которая на первых порах рассматривалась как раздел теории надежности, связанный с разработкой научных методов, обеспечи-



вающих надежность технических устройств на стадии их эксплуатации [1].

Анализ накопленного опыта эксплуатации АРКТ показал, что решение эксплуатационных проблем целесообразно осуществлять в рамках системы эксплуатации (СЭ), которая объективно создается при эксплуатации любого объекта, но для этого ей должны быть приданы соответствующие свойства.

Иными словами, при создании комплекса АРКТ должна целенаправленно разрабатываться система его эксплуатации, в состав которой должны входить функциональные подсистемы, предназначенные для рациональной организации эксплуатационных процессов, связанных с достижением цели функционирования АРКТ, и решения возникающих эксплуатационных проблем. Таким образом, СЭ является организационно-технической системой [3].

При этом на первый план выходит обеспечение высокого качества эксплуатации, а высокое эксплуатационное качество АРКТ – лишь необходимое, но не достаточное условие достижения цели эксплуатации АРКТ.

Анализ накопленного опыта эксплуатации АРКТ и решения возникавших проблем позволяет сформулировать исходные положения которые могут лежать в основе теории эксплуатации АРКТ [3]:

1. Эксплуатация – процесс взаимодействия субъекта с объектом эксплуатации.

2. В основе эксплуатации любых объектов лежит необходимость удовлетворения определенных потребностей субъекта эксплуатации.

3. Потребность отражает объективное стремление субъекта эксплуатации к познанию окружающего мира, к повышению своего благосостояния.

4. Эксплуатация осуществляется при влиянии окружающей природной среды и других объектов на процесс взаимодействия субъекта с объектом эксплуатации.

5. При эксплуатации любых объектов неизбежно расходуются ресурсы, необходимые для получения полезного эффекта.

6. Результаты эксплуатации – это целевой эффект и другие последствия эксплуатации объекта: расход ресурсов, нанесение ущерба окружающей природной среде, другим объектам и т. п.

7. Взаимодействие субъекта с объектом эксплуатации строится таким образом, чтобы объем ресурсов для удовлетворения потребности был минимально возможным.

Сущность эксплуатации любого объекта – извлечение пользы, удовлетворение потребности субъекта (человека, сообщества). От субъекта для удовлетворения потребности требуются затраты усилий и ресурсов в процессе взаимодействия субъекта с объектом эксплуатации по заданной технологии в объективно возникающей (создаваемой) системе эксплуатации.

Таким образом, можно говорить о трех важнейших концептах эксплуатации – субъект, объект, система эксплуатации, – присущих процессу эксплуатации любого объекта.

Субъектами эксплуатации являются собственник, который распоряжается целевыми результатами использования объекта эксплуатации (ОЭ) по назначению и обеспечивает необходимые для его эксплуатации ресурсы, и персонал (управляющий, эксплуатирующий, обслуживающий, вспомогательный), который осуществляет все эксплуатационные процессы. Вопросы обоснования характеристик субъектов эксплуатации, их функций, анализа и синтеза организационных и иных структур, необходимых для их взаимодействия, проработаны недостаточно [5]–[7]. Причем, здесь можно говорить о достаточно высокой общности этих проблемных вопросов для СТК различного назначения.

Актуальной задачей теории эксплуатации является исследование СТК как объекта эксплуатации [8]. Модели ОЭ должны быть направлены на описание существенных черт СТК, от которых зависит степень удовлетворения потребности субъекта. ОЭ, как правило, рассматривается в двух аспектах: средство удовлетворения потребности и объект, состоянием которого нужно управлять. Накопленный опыт эксплуатации АРКТ позволяет выделить четыре вида ОЭ в зависимости от необходимости управления его состоянием и роли эксплуатирующего персонала в этих процессах:

1. Управляющие воздействия по поддержанию и восстановлению качества ОЭ не предусматриваются, его эксплуатация сводится только к получению целевого результата. В этом случае при выходе ОЭ из строя (отказе) он заменяется новым (исправным), а отказавший объект утилизируется.

2. Управляющие воздействия по поддержанию и восстановлению качества ОЭ предусматриваются и полностью возложены на эксплуатирующий персонал. При этом предполагается, что известны закономерности изменения состояния ОЭ, что позволяет полностью разработать ком-

плекс управляющих воздействий для поддержания состояния ОЭ на требуемом уровне и отразить его в эксплуатационной документации.

3. Управляющие воздействия по поддержанию и восстановлению качества ОЭ предусматриваются, однако не все их характеристики (объем, периодичность и необходимые ресурсы) могут быть определены заранее. Основной причиной этого служит отсутствие полной информации о закономерностях изменения состояния ОЭ. Во многих случаях такая информация может быть получена только в процессе эксплуатации. Та часть функций по управлению состоянием ОЭ, которая может быть установлена заранее, как правило, возлагается на персонал. Остальные функции включая получение необходимой информации о закономерностях изменения состояния ОЭ и обоснование характеристик управляющих воздействий возлагаются на специализированные (сервисные) организации по управлению техническим состоянием ОЭ.

4. Управляющие воздействия по поддержанию и восстановлению качества ОЭ предусматриваются, и они полностью возлагаются на специализированные (сервисные) организации по управлению техническим состоянием ОЭ. Характеристики этих управляющих воздействий (объем, периодичность и необходимые ресурсы) определяются заранее и/или в процессе эксплуатации ОЭ.

СТК, такие как комплексы АРКТ, относятся, как правило, к третьему или четвертому виду ОЭ.

Подходы к описанию объекта эксплуатации могут быть различными, но, исходя из сущности процесса эксплуатации, обобщенная модель любого объекта эксплуатации (обозначим его R_e) должна отражать, во-первых, его эксплуатационное качество (свойства, обуславливающие получение целевого результата), во-вторых, технологию его эксплуатации, в-третьих, необходимые ресурсы, в-четвертых, средства эксплуатации (в том числе документацию), в-пятых, условия, в которых должна осуществляться эксплуатация (факторы окружающей природной среды, сопряженных объектов, воздействие противника). Обобщенная модель ОЭ может быть записана в виде кортежа

$$R_e = \langle \{A\}, \{Th\}, \{C\}, \{D_e\}, \{B\} \rangle,$$

где $\{A\}$ – множество свойств, составляющих эксплуатационное качество ОЭ, и их характери-

стик; $\{Th\}$ – множество технологических процессов эксплуатации ОЭ и их характеристик; $\{C\}$ – множество ресурсов, необходимых для эксплуатации ОЭ, и их характеристик; $\{D_e\}$ – множество средств эксплуатации и их характеристик; $\{B\}$ – множество факторов, характеризующих условия эксплуатации ОЭ.

Проблематика моделирования ОЭ проработана явно недостаточно. Сложившаяся практика проектирования технических устройств, как правило, нацелена на создание изделий с высоким уровнем целевых свойств, а вопросам обеспечения высокого уровня эксплуатационно-технических свойств уделяется недостаточное внимание. В результате получаются комплексы, которые неудобно эксплуатировать, которые наносят ущерб природной среде, обладают недостаточным уровнем безопасности и т. д.

Обобщенная модель субъекта эксплуатации (обозначим его S) должна описывать потребности субъекта, его свойства как рабочего звена системы эксплуатации (квалификацию), состав органов управления и эксплуатационных подразделений и их взаимодействие, условия эксплуатации.

Эта модель имеет вид

$$S = \langle \{П\}, \{Kv\}, \{Str\}, \{B\} \rangle,$$

где $\{П\}$ – множество, описывающее потребности субъекта эксплуатации; $\{Kv\}$ – множество характеристик, описывающих квалификацию эксплуатирующего персонала; $\{Str\}$ – множество, описывающее организационную структуру, необходимую для эксплуатации ОЭ (органы управления, количество специалистов, их специальности, состав эксплуатационных подразделений и т. п.).

Ключевой проблемой теории эксплуатации АРКТ является создание (проектирование) системы эксплуатации, обоснования ее структуры и функций при взаимодействии субъекта и объекта эксплуатации. В структуру каждой СЭ обязательно входят подсистема (система) управления эксплуатацией (СУЭ) и управляемая подсистема (система), реализующая принятые решения по эксплуатации. В зависимости от количества этапов эксплуатации и способов (процессов) управления техническим состоянием АРКТ необходимы подсистемы, реализующие эти этапы и процессы.

Функции СУЭ обусловлены необходимостью обеспечения высокого качества эксплуатации и могут быть условно разделены на две группы:

– управление процессом эксплуатации (планирование, организация, оперативное управление, контроль) с целью обеспечения высокого качества эксплуатации АРКТ;

– обеспечение подготовки и переподготовки эксплуатирующего персонала.

Сложность процессов функционирования системы эксплуатации обуславливает необходимость разработки комплекса моделей, представляющих собой описание преобразований действий (усилий) субъекта эксплуатации при его взаимодействии с ОЭ в целевой результат и отражающих различные аспекты этого взаимодействия. В самом общем случае модели могут иметь вид $S \times R_e \rightarrow \mathcal{E}$, где \mathcal{E} – целевой результат эксплуатации ОЭ.

Постановки многих задач, связанных с исследованием процессов функционирования системы эксплуатации, анализом взаимодействия объекта и субъекта эксплуатации, заданием требований к характеристикам этого взаимодействия, базируются на принципе наименьшего действия (принципе Гамильтона).

Этот принцип в достаточной мере соответствует одному из основных положений теории эксплуатации любых технических устройств: наилучшим (наиболее совершенным с точки зрения эксплуатации) считается то изделие, при эксплуатации которого необходимо затрачивать минимум усилий при

прочих равных условиях. Формально это можно записать следующим образом:

$$F(S, R_e) \rightarrow \mathcal{E}$$

при условии $\{C\} \in \{C\}^{\min}$, где $F(S, R_e)$ – функционал, отражающий получение целевого результата \mathcal{E} при взаимодействии субъекта эксплуатации с ОЭ R_e ; $\{C\}^{\min}$ – множество минимально возможных затрат ресурсов для получения целевого результата эксплуатации.

Таковы, на наш взгляд, основные проблемные вопросы, связанные с развитием теории эксплуатации, важнейшим направлением которой является научно-методическое обеспечение создания системы эксплуатации СТК.

Любая научная теория представляет собой систему знаний, описывающую и объясняющую определенную совокупность явлений, дающую обоснование всех выдвинутых положений и сводящую открытые в данной области законы к единому основанию. Объединение знания в теорию определяется ее предметом. В этом смысле можно говорить об эксплуатации АРКТ как о предмете исследований, который представляет собой органически связанную группу явлений.

Единый подход к проектированию СЭ объектов АРКТ (методология проектирования СЭ) позволит существенно облегчить процесс создания систем эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Половко А. М. Основы теории надежности. М.: Наука, 1964. 446 с.

2. Вопросы математической теории надежности / под ред. Б. В. Гнеденко. М.: Радио и связь, 1983. 376 с.

3. Организация эксплуатации вооружения, военной и специальной техники: учеб. пособие / Е. Н. Шаповалов, В. И. Звягин, А. И. Птушкин и др.; ВКА им. А. Ф. Можайского. СПб., 2012. 304 с.

4. Основы эксплуатации космических средств: учеб. / В. И. Звягин, А. И. Птушкин, Е. Н. Шаповалов и др.; ВИКУ им. А. Ф. Можайского. СПб., 2000. 500 с.

5. Транспрофессиональная подготовка современных специалистов: миф или реальная необходимость / С. А. Кудряков, Ю. Б. Остапченко, Е. Н. Шаповалов, В. В. Романцев // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 8. С. 94–98.

6. Остапченко Ю. Б., Кудряков С. А., Шаповалов Е. Н. Актуальные проблемы профессиональной подготовки специалистов для сложных технических объектов

на примере космодрома Байконур. Социально-психологические, педагогические и медико-психофизиологические проблемы модернизации общества на евразийском пространстве // материалы науч.-практ. конф. 28–29 нояб. 2013 г. / под ред. Т. В. Орловой, М. Ю. Спириной, А. А. Торопыгиной; МИЭП при МПА ЕврАзЭС. СПб., 2013. Ч. 2. С. 136–146.

7. Проблемы профессиональной подготовки специалистов для эксплуатации сложных технических объектов в современных условиях / Ю. Б. Остапченко, С. А. Кудряков, В. В. Романцев, С. А. Беляев // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 8. С. 90–94.

8. Шаповалов Е. Н., Кудряков С. А. Эксплуатация авиационных и ракетно-космических систем: нужна ли единая теория // материалы III Междунар. науч.-практ. конф. «Человек и транспорт. Эффективность. Безопасность. Эргономика». 15–18 сент. 2014 г., Санкт-Петербург / ПГУПС. СПб., 2014. С. 361–364.

E. N. Shapovalov, Yu. B. Ostapchenko, A. V. Ekalo, S. A. Belyaev
REC&ETU Research and engineering center of Saint-Petersburg electrotechnical university

S. A. Kudryakov
Saint-Petersburg state university of civil aviation

ACTUAL PROBLEMS OF THE THEORY OF AVIATION AND AEROSPACE TECHNOLOGY OPERATION

On the basis of common features of complex technical systems and their operational problems concluded common causes of these problems. A brief description of the object and subject of the operation, generally formulated an approach to the design of the system of exploitation as the most important problem in the theory of operation of aviation and aerospace technology.

Operation, operating system, an object of exploitation, the subject operation, complex technical systems, aviation and aerospace technics
