

УДК УДК 629.7.01 EDN QEZDPP

Концептуальные основы максимизации эффективности перспективных систем управления важнейших ракетно-космических летательных аппаратов на всех этапах их жизненного цикла

Г. Г. Вокин, *д.т.н., профессор, snegiri_11@mail.ru*
«НИИ КС им. А.А. Максимова» – филиал АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»,
г. Королев, Московская область, Российская Федерация

М. Ш. Насибулин, *к.т.н., snegiri_11@mail.ru*
«НИИ КС им. А.А. Максимова» – филиал АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»,
г. Королев, Московская область, Российская Федерация

О. А. Хапаев, *аспирант, snegiri_11@mail.ru*
АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», Москва, Российская Федерация

С. С. Старовойт, *аспирант, snegiri_11@mail.ru*
АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье на принятом уровне общности излагается технология комплексного синтеза перспективных систем управления ракетно-космических аппаратов большой значимости и ответственности, нацеленная на получение характеристик систем управления возможно высокого уровня. В основу упомянутой технологии положены принципы и операции методологии синергетической оптимизации и интеллектуализации. Характерно, что совершенствование системы управления предусматривается на всех этапах жизненного цикла объекта управления, что обеспечивается средствами оценки текущего состояния, адаптации и самовосстановления. Рассматриваемые системы управления, будучи активированными или постоянно действующими, целесообразны для использования в управлении такими важнейшими изделиями ракетно-космической техники, как стратегические ракеты, ракеты-носители, крылатые боевые блоки, долговременные космические станции, аппараты для изучения дальнего космоса, стратегические спутники космического мониторинга и т. д. [1]. Очевидно, что эффективные системы управления в значительной степени обеспечивают успешное функционирование объектов управления, что имеет большое значение для качественного выполнения важных задач в интересах обороны, социума и науки.

Как показывает научно-технический анализ, целесообразность в создании упомянутых систем управления вполне очевидна, а возможность создания их на базе современных программно-аппаратных средств имеет под собой все научно-технические основания.

Ключевые слова: ракетно-космические летательные аппараты, системы управления, технология исследовательского синтеза, синергетическая оптимизация и интеллектуализация, эффективность, комплексный подход, максимально эффективные системы управления, этапы жизненного цикла, тезаурусы, интеллектуоры, оптимины

Conceptual Foundations for Maximizing the Effectiveness of Advanced Control Systems for the Most Important Rocket and Space Aircraft at All Stages of Their Life Cycle

G.G. Vokin, *Dr. Sci. (Engineering), Prof., snegiri_11@mail.ru*

Maksimov Space Systems Research Institute – a Branch of FSUE Khrunichev State Research and Production Space Center, Korolev, Moscow region, Russian Federation

M.S. Nasibulin, *Cand. Sci. (Engineering), snegiri_11@mail.ru*

Maksimov Space Systems Research Institute – a Branch of FSUE Khrunichev State Research and Production Space Center, Korolev, Moscow region, Russian Federation

S.S. Starovoit, *postgraduate student, snegiri_11@mail.ru*

FSUE Khrunichev State Research and Production Space Center, Moscow, Russian Federation

O.A. Khapaev, *postgraduate student, snegiri_11@mail.ru*

FSUE Khrunichev State Research and Production Space Center, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper describes the complex synthesis technology of advanced control systems for rocket and spacecraft of high responsibility aimed at obtaining the control system characteristics of great importance and responsibility. The mentioned technology is based on the principles and operations of the methodology of the synergetic technology of their optimization and intellectualization. It is characteristic that the control system improvement is envisaged at all stages of the life cycle of the control object, which is provided by assessing the current state, adaption and self-recovery. The control systems in question being activated or permanently active are expedient for use and control of such important products of rocket and space technology as strategic rockets, launch vehicles, cruise missile units, long-term space stations, deep space exploration vehicles, and strategic space monitoring satellites etc. [1]. It is obvious that effective control systems largely ensure the successful functioning of control facilities, which is of great importance for the qualitative performance of important tasks in the interests of defense, society, and science.

As the scientific and technical analysis shows the expediency in creating the mentioned control systems is obvious, and the possibility of creating them based on modern software and hardware has all the scientific and technical grounds.

Keywords: rocket and space aircraft, control systems, research synthesis technology, synergetic optimization and intellectualization, effectiveness, integrated approach, the most effective control systems, life cycle stages, thesauruses, intellectors, optimin

Введение

Общеизвестны и не вызывают сомнений роль и значимость систем управления как важнейших составных частей ракет и космических аппаратов различного назначения, ибо они во многом определяют диапазоны функциональных возможностей объектов управления, что существенно расширяет область решаемых ими задач при их применении. Системы управления являются наиболее наукоемкими частями изделий и во многом определяют эффективность ракетно-космических объектов (РКО), что достигается благодаря высокому уровню их интеллектуализации.

Для ряда РКО, например, боевых ракет и космических аппаратов длительного и сверхдлительного существования трудно по определению предвидеть состояние внешней среды, поэтому для сохранения работоспособности РКО, особенно в условиях агрессивной внешней среды, системы управления должны обладать функциями адаптации и самовосстановления.

Как свидетельствует анализ, упомянутыми свойствами и функциями будут обладать РКО, если их системам управления при проектировании будет обеспечиваться высокая эффективность с помощью целого набора процедур, способов и мер на всех этапах их жизненного цикла.

В статье на концептуальном уровне представляется комплекс инновационных подходов, принципов и процедур синтеза систем управления важнейших изделий ракетно-космической техники (РКТ), которые по функциональным возможностям способны достигать максимально высоких уровней своей эффективности на всех этапах их жизненного цикла.

Желательные упомянутые свойства систем управления предлагается достигать на основе использования при их синтезе и эксплуатации целого арсенала методических приемов, способов и технических средств мониторинга текущего состояния систем на всех этапах их жизненного цикла. При таком подходе в системах управления будут наращиваться такие функциональные возможности, как адаптация, самовосстановление, улучшение динамических характеристик в условиях интенсив-

ных возмущений, что может приводить в конечном счете к повышению функциональной устойчивости и надежности систем управления.

О комплексе инновационных операций, процедур и мер, целесообразных для использования при создании и функционировании высокоэффективных систем управления перспективных изделий РКТ с расширенными возможностями на всех этапах их жизненного цикла

На основе многолетнего и масштабного опыта, накопленного в науке и технике по проектированию и эксплуатации изделий самого разнообразного назначения, выявлены, установлены и закреплены в директивных документах рациональные и целесообразные типовые этапы их жизненного цикла. Однако для изделий, выполняющих особо важные функции и работающих в тяжелых трудно прогнозируемых условиях, причем возможно длительное время, как подсказывают результаты анализа и опыт, для ряда перспективных изделий упомянутый комплекс типовых этапов жизненного цикла требует корректировки и расширения [1]. Поскольку особо важные изделия должны быть высоконадежными и эффективными, на всех этапах их жизненного цикла должны быть предусмотрены соответствующие операции, процедуры и меры, обеспечивающие упомянутые повышенные требования и свойства. Как свидетельствует практика, к таким особо важным изделиям, тем более перспективным, следует отнести баллистические ракеты стратегического назначения, их боевое оснащение, ракеты-носители и долговременные космические аппараты целого ряда типов.

Из системного подхода к исследовательскому проектированию упомянутых изделий вытекает, что повышенные их функциональные возможности, а также повышенная эффективность обеспечиваются в большей степени системами управления. Ниже как обобщение опыта на концептуальном уровне выдвигаются предложения по расширению

комплекса этапов жизненного цикла упомянутых перспективных объектов РКТ.

Поиски подходов, операций и способов, обеспечивающих наибольшую эффективность систем управления ответственных и особо важных ракетно-космических изделий на всех этапах их жизненного цикла, приводят к выводу, что для этого целесообразно принимать ряд нетрадиционных мер и выполнять ряд инновационных достаточно непростых и наукоемких операций.

В итоге установлено, что к таким методологическим процедурам следует отнести: интеллектуализацию, синергетическую оптимизацию и автоматическое самовосстановление функционирования системы после, например, отказа некоторых элементов.

Под интеллектуализацией понимаются интенсивный поиск и реализация на этапах проектирования, испытания, эксплуатации и функционирования систем управления, в том числе в режиме применения РКО, новых подходов, производственных правил, подсказок и эффективных научно-технических решений. Процессы интеллектуализации целесообразно выполнять на всех этапах жизненного цикла, но в первую очередь — на этапе исследовательского проектирования и испытаний. При этом к составным частям интеллектуализации концептуально следует отнести разработку инновационной концепции построения системы управления с учетом специфических условий работы особо важных РКО, построение возможно точных их математических моделей, выбор оптимальных значений параметров и характеристик элементов с учетом условий функционирования их в условиях применения РКО. Упорядоченная совокупность методических подходов, принципов построения, инновационных операций и процедур, используемых на различных этапах жизненного цикла систем управления при их создании, и составляющих контент интеллектуализации логично именовать тезаурусом интеллектуализации. Упомянутый контент хранится в базе памяти системы управления. Тематические тезаурусы можно рассматривать как интеллектуальные оперативные подсказывающе-справочные средства для проектанта. Это обстоятельство может серьезно сократить время проектирования системы и повысить ее качество.

Под синергетической оптимизацией понимаются процессы совместного выбора оптимальных значений всех параметров и характеристик системы управления, при этом ставится задача достижения наибольших значений критериев эффективности всех ключевых элементов и подсистем при условии, что все значения других параметров, критериев и характеристик будут оставаться в пределах, заданных проектантом на основе его опыта, расчетов и результатов испытаний. Именно в этом случае достигается максимальное значение эффективности системы управления в целом. По аналогии с предыдущим определением упорядоченную совокупность разного рода приемов, алгоритмов и способов оптимизации будем именовать тезаурусом *оптимингов*, при этом тезаурус может служить эффективным справочно-методическим руководством для проектанта в процессе практической работы.

В отношении упомянутых тезаурусов в общем случае можно сказать, что это своего рода прикладные специализированные минибиблиотеки, миниэнциклопедии, минибазы данных и знаний по определенным тематическим направлениям, которые предназначены для квалифицированного, качественного и быстрого решения задач, возникающих перед проектантом-конструктором систем управления.

Процессы автоматического самовосстановления системы должны отрабатываться на этапах проектирования и испытаний, а выполняться, как правило, на этапах эксплуатации и применения РКО. Процедура автосамовосстановления предполагает измерение некоторых параметров, определение диагностического состояния системы и ее элементов, выработку решения специальным блоком по разработанному заблаговременно алгоритму, а также последующее устранение отказа путем изменения некоторого параметра или подключения дублирующего элемента, находящегося в тезаурусе дублеров элементов системы.

Как показывает экспертный анализ, при реализации приведенных мероприятий система управления принципиально может достигать максимальных значений эффективности на всех этапах жизненного цикла, а особенно на этапе рабочего участка применения особо важных изделий РКТ.

Эффективность систем управления РКО как обобщенный показатель их качества на этапах создания, эксплуатации и штатного применения

Системы управления являются важнейшими составными частями РКО, поскольку они решают ключевую задачу функционирования РКО: обеспечение движения РКО по программной траектории с возможно большей точностью путем высокоточной стабилизации движения центра масс и относительно центра масс РКО, а также своевременное включение или выключение двигательных установок.

Как система управления в целом, так и все ее составные элементы характеризуются такими показателями, как точность, габаритно-массовые характеристики, уровень радиационной стойкости, уровень выдерживаемых перегрузок, стоимость и т. д. Все эти показатели имеют существенное значение при сравнительной оценке систем управления в целом и отдельных ее показателей в частности.

Из истории прошлого опыта известно, что в свое время предпринимались попытки систему управления охарактеризовать одним обобщенным показателем качества, при этом этот показатель формировался как сумма разнородных показателей со своими весовыми коэффициентами, которые должны были устанавливаться экспертным путем. Однако такой подход оказался не более чем формальной процедурой, не имеющей практического значения.

Как показывает научно-технический анализ и опыт, наибольшую практическую значимость имеет подход, основанный на том, что ведущим и наиболее весомым показателем, особенно для перспективных РКО, имеет точность. Поэтому при сравнительной оценке систем управления имеет наибольшее практическое смысловое значение следующее правило: систему считать более эффективной такую, которая имеет более высокую точность T при условии, что все остальные значимые

характеристики q_i , $i = 1, 2, \dots, n$, будут находиться в заданных проектантом диапазонах:

$$T \rightarrow \max, \quad Q_{iн} \leq q_i \leq Q_{iв},$$

где $Q_{iн}$, $Q_{iв}$ — нижние и верхние значения диапазонов других характеристик.

Приняв такое правило, эффективность системы можно характеризовать одним критерием, имея в виду выполнение ограничений по всем другим показателям. В связи с этим можно утверждать, что система управления будет обладать более высокой эффективностью и высоким качеством, если она имеет более высокую точность при условии выполнения упомянутых ограничений.

О содержании и характерных особенностях синергетической оптимизации и интеллектуализации систем управления РКО

Как уже отмечалось, система управления может характеризоваться с различных точек зрения значительным числом показателей. Из практики синтеза систем известно, что и при интеллектуализации, и при оптимизации довольно часто встречаются ситуации, когда операции по улучшению одного показателя приводят к ухудшению других показателей. Вот, например, некоторые действия по повышению стойкости системы к радиации и перегрузкам приводят к ухудшению габаритно-массовых характеристик.

Во избежание таких ситуаций одним из основных методических требований неукоснительно должно выполняться условие: использование возможностей интеллектуализации и оптимизации должно выполняться согласованно и совместно, при этом при улучшении одной из характеристик системы изменения других характеристик должны контролироваться, а упомянутые характеристики должны оставаться в допустимых пределах. При использовании синергетической методологии как раз и можно добиться выполнения упомянутого условия. При этом операции по интеллектуализации проводятся, как правило, экспертными способами или с использованием экспериментов,

а оптимизация при наличии моделей может осуществляться с использованием вычислительных средств.

Для иллюстрации существа синергетического подхода при использовании интеллектуализации и оптимизации положим, что система характеризуется двумя показателями: $q_1(\alpha_i)$, $q_2(\alpha_i)$, где α_i , $i = 1, 2, \dots, n$ — параметры, от которых зависят показатели q_1 и q_2 .

В соответствии с предлагаемой методологией отыскивается экстремум показателя q_1 , причем глобальный экстремум или наибольшее значение при условии, что $Q_{2н} \leq q_2 \leq Q_{2в}$, при этом записываются значения параметров α_i^0 , при которых достигаются упомянутые условия. После этого такие же операции проводятся для показателя q_2 . При поиске экстремумов целесообразно использовать процедуру Гаусса–Зейделя или случайный поиск. Процесс может содержать несколько кругов, а заканчиваться при выполнении условия:

$$|q_{1,i+1} - q_{1,i}| \leq \delta_1, \quad |q_{2,i+1} - q_{2,i}| \leq \delta_2,$$

где δ_1 , δ_2 — достаточно малые числа.

Значения параметров α_i^0 , при которых выполняются приведенные выше условия, являются искомыми. Такую точку в многомерном пространстве параметров будем именовать синергетически сбалансированной точкой или вариантом системы.

На рисунке приведена для иллюстрации обобщенная блок-схема поиска сбалансированных точек при проведении синергетической оптимизации и интеллектуализации.

О комплексе основополагающих принципов, лежащих в основе оптимального управления процессами и синтеза эффективных систем управления ракет и космических аппаратов повышенной ответственности, важности и стоимости

По замыслу в статье формируются дополнительные к общепринятым инновационные подходы, меры и способы, нацеленные на дальнейшее

повышение эффективности систем управления. В то же время анализ устоявшихся идей и методов управления и синтеза приводит к необходимости критического рассмотрения их места и роли в настоящее время, а также к потребности выяснения фундаментальных принципов и закономерностей, лежащих в основе оптимального управления и синтеза автоматических систем. Важность обобщения ретроспективных результатов по проблеме управления американский кибернетик А. Рапопорт (МТИ) характеризует следующим образом: «конкретные шаги, предпринимаемые с целью объединения и обобщения некоторых понятий и методов, представляют собой существенный вклад в развитие науки». К настоящему времени в ретроспективных работах выдвинуто немало предложений по проблеме управления и синтеза систем, именуемые «гипотезами», «условиями» и «законами», неучет которых при проектировании систем и разработке методов управления наносит существенный ущерб характеристикам системы.

Формулировка фундаментальных и основополагающих принципов управления процессами и синтеза автоматических систем может в значительной степени служить методологической основой для создания комплексно оптимальных систем, то есть оптимальных с точки зрения широкого круга полезных для практики критериев, используя при этом весь арсенал достижений по проблемам управления.

Абсолютную иерархию, соподчиненность принципов независимо от поставленных целей и критериев оценки эффективности достижения системной цели установить не представляется возможным» [4].

Упомянутые принципы в расширенном варианте можно было бы сформулировать отдельно, однако в данном случае эти принципы кратко формулируются с учетом тематических рамок статьи в сокращенном варианте.

Приводимые ниже результаты анализа и обобщений не претендуют на аксиоматическую их формулировку, а кратко отражают лишь существо принципов, рекомендаций и установок, лежащих, как представляется, в основе реализации оптимального управления процессами и исследовательского синтеза эффективных систем управления.

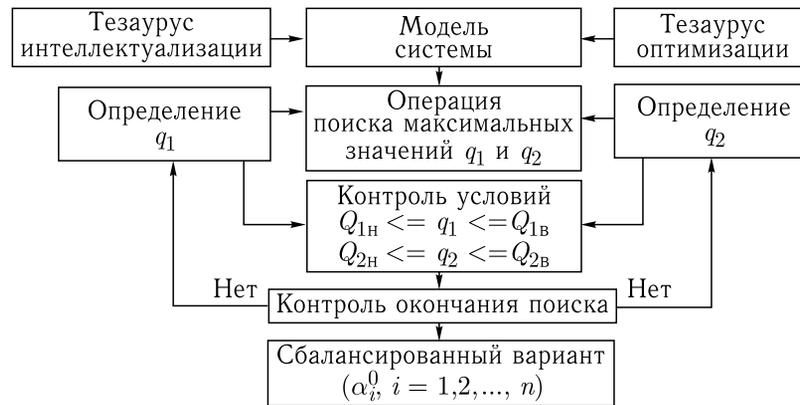


Рисунок. Схема поиска синергетически сбалансированных значений параметров системы

Принцип цели и мотивации системы. Желаемый результат функционирования системы есть глобальная цель \mathcal{C}_r системы A . Постановка глобальной цели осуществляется извне системы: для системы управления — проектантом. Для систем управления РКО глобальной целью является высокоточная реализация программного движения центра масс и относительно центра масс.

Рациональный путь достижения \mathcal{C}_r состоит в построении иерархической структуры подцелей \mathcal{C}_n с заданными функциональными отношениями. Иерархия достижения \mathcal{C}_r реализуется в системе соответствующей иерархической структурной системы, операторами блоков подсистем. При синтезе системы иерархическая система является основой для построения математической модели, модели ошибок и оптимального распределения требований к подсистемам, блокам и элементам.

Принцип динамической устойчивости предполагает вычисление «в зависимости от целей системы условий устойчивости, инвариантности, автономности, надежности и оптимальности по некоторым функционалам. При синтезе системы критерий оптимальности должен устремлять систему к выполнению упомянутых характеристик качества. При реализации рассматриваемого принципа используются обратные связи по отклонению («принцип Ползунова–Уатта»), по возмущению («принцип Чиколева–Пансела») или комбинированные связи по отклонениям и возмущениям («комбинированное управление»)» [3]. По своему содержанию принцип в значительной степени совпадает с классическим определением устойчивости по Ляпунову.

Принцип самоорганизации (самонастройки, самовосстановления) — «автоматическое (или по заданию оператора) изменение совокупности подсистем A_i системы A и функциональных отношений в подсистемах и между подсистемами на всех уровнях иерархии» [3] для обеспечения требуемых характеристик функционирования системы и достижения в связи с этим глобальной цели \mathcal{C}_r и ее подцелей \mathcal{C}_n . Важным условием реализации самоорганизации системы за конечное время является установление способов отбора, способов определения состояния системы или диагностики, то есть установление по данным о состоянии системы предпочтительности тех или иных структур при условии достижения цели \mathcal{C}_r .

Следует отметить, что, «несмотря на ясность некоторых общих черт самоорганизации, она остается большой загадкой, особенно применительно к большим системам. По этому поводу будет уместно привести мудрые слова А. Я. Лернера (ИПУ РАН): «...по трудности разрешения и последствиям для науки и практики атаку на проблемы самоорганизации можно сравнить с наступлением на тайну атомного ядра. И если 20 век вошел в историю науки как эпоха фундаментальных открытий в области ядерной физики, то 21 век, мы надеемся, будет ознаменован разрешением центральной проблемы кибернетики — проблемы самоорганизации»» [4].

Принцип уровней качества характеризует этапность достижения заданного или оптимального значения одного или нескольких критериев, характеризующих качество K системы A путем дополнения к начальному множеству подсистем A_i

и отношений между ними и получение на этой основе новой структуры системы, причем на каждом уровне наращивание критерия K имеет место приращение ΔK . Наращивание K при синтезе системы или некоторой технологии прекращается, если $\Delta K < \delta$, где δ — наперед заданная величина.

Существо принципа можно наглядно проиллюстрировать следующими примерами. Высококачественную механическую обработку нельзя получить технологически при помощи одного обрабатывающего инструмента. Поверхность высокой чистоты обработки, как показывает практика, можно получить только поэтапным наращиванием чистоты. В системах управления наращивание динамических качеств осуществляется в несколько этапов усложнения структуры: обратная связь по отклонению (первый уровень качества — силовой уровень), обратная связь по производной от отклонения (второй уровень качества), обратная связь по интегралу от отклонения (третий уровень качества), подключение контура оптимизации (четвертый уровень качества). Характерно, что «реализация контуров нижних уровней качества связана с большими потоками и затратами энергии, в то время как в последующих контурах наращивается мощность потока и преобразования информации.

Большой эффект, выраженный в сокращении необходимого времени, приносит рассматриваемый принцип в поисковых и распознающих системах при построении поэтапного процесса перебора, когда, по некоторым признакам, характерным для каждого этапа, существенно уменьшается число возможных вариантов» [3]. Приводимые примеры и емкие слова У.Р. Эшби (МТИ) — «...в гении замечательно умение отсеивать возможности» — хорошо отражают эту сторону принципа уровней качества. При использовании принципа облегчается реализация громоздких задач перебора, трудно решаемых задач даже с использованием суперкомпьютеров, ибо повышение даже их быстродействия только отодвигает предел расчетных возможностей, но не снимает его.

Принцип соответствия «предполагает получение своеобразной адекватности объекта и системы управления, что устанавливается экспертным путем. Принцип соответствия выражает то общее в многочисленных примерах практики и теории

управления, что для обеспечения, например, устойчивости степень сложности, детерминизма и индетерминизма, стационарности и нестационарности должны быть близкими у объекта и системы управления. Применительно к структуре системы управления выполнение принципа соответствия должно проявляться в том, что структура систем управления должна обладать возможностями перестройки» [3] в силу неопределенностей, возникающих при решении объектом разнообразных задач. Иначе говоря, число состояний системы управления должно быть не меньше числа состояний объекта управления.

Классики теории управления содержание этого принципа условно называли по-разному, но характерно: «закон необходимого разнообразия» (У.Р. Эшби), «закон адекватности» (А.Г. Ивахненко).

Принцип убывающей результативности проявляется на определенном этапе развития («жизни») или совершенствования (создания) системы, когда приращение ΔK критерия эффективности становится относительно малым ($\Delta K < \delta$, где δ — достаточно малая величина) при существенных вариациях структуры A и отношений между подсистемами.

Применительно к техническим системам рассматриваемый принцип проявляется, как правило, «в необходимости коренного изменения физического принципа действия системы при сохранении ее функционального назначения, когда возможности улучшения ее характеристик оказываются исчерпанными» [3]. Так, например, тактико-технические характеристики систем управления крылатых боевых блоков могут быть существенно повышены за счет изменения структуры боевого блока, системы управления и использования информационных средств, обеспечивающих получение внешней информации. Показательны примеры несколько из другой среды: существенно снижается градиент приращения эффективности стрельбы ракетами после достижения вероятности поражения 0,9 несмотря на значительные затраты, направленные на повышение вероятности поражения. Характерно также, что для достижения сверхзвуковых скоростей летательных аппаратов пришлось переходить на реактивные двигатели, а для повышения КПД

двигателей транспортных средств пришлось переходить с паровых двигателей на двигатели внутреннего сгорания.

Принцип достаточности можно трактовать как «оптимальное распределение подцелей между уровнями иерархии, оптимальный выбор структуры и оптимальное распределение требований между подсистемами системы. Иначе, система должна обладать достаточными возможностями для достижения глобальной цели и не иметь ничего лишнего» [3], не иметь завышенных характеристик, что может приводить только к дополнительным затратам.

Применительно к системе управления выполнение принципа достаточности проявляется в выборе такой точности информационных средств, измерения такого числа фазовых координат, «в определении таких управляющих органов и источников энергии, чтобы Ц_г системы достигалось при обеспечении требуемых динамических характеристик процессов и при минимуме экономических затрат. Выполнение принципа достаточности отражает такую стадию процесса совершенствования системы, такую полноту и детализацию информации об объекте управления» [3] и внешней среде, когда дальнейшее их повышение приводит к дополнительным затратам без существенного выигрыша в критерии эффективности системы.

В соответствии с принципом достаточности рекомендуется упрощать модель системы, особенно сложных систем, но упрощать до такой степени, чтобы, во всяком случае, качественно и правильно вскрывались изучаемые закономерности и модель была бы достаточно проста для анализа. Принцип определяет концептуально минимально необходимые возможности (энергетические, информационные, функциональные) для достижения системой глобальной цели. При этом, как очевидно, избыток или недостаток упомянутых возможностей может оказаться в равной степени вредным.

Принцип моделирования «предполагает построение в результате идентификации системы (объекта) некоторой математической или предметно-математической структуры, которая отражает поведение и свойства исследуемой системы объекта. В основе построения математических моделей лежит физическая модель системы,

определяемая условиями взаимодействия ее элементов, законами сохранения массы, количества движения, энергии и познаваемая на основе эксперимента» [3], формирования и проверки гипотез. Характерно, что предметно-математические модели описывают различные по физической природе процессы одинаковыми математическими моделями, например одинаковыми дифференциальными уравнениями.

Как показывает опыт, наибольший эффект применяемых моделей имеет место, если применяемый математический аппарат по-своему «адекватен» физической модели системы (должен выполняться принцип соответствия).

Применение принципа моделирования «является эффективным средством получения информации о свойствах и характеристиках системы, прогнозирования поведения системы в будущем, при синтезе систем управления объектами, средством существенного сокращения сроков исследования, проектирования и испытаний системы» [3], не прибегая к дорогостоящим натурным экспериментам, о чем свидетельствует ретроспективный опыт в науке и технике.

Перманентное уточнение математических моделей системы (объектов) приводит, с одной стороны, к снижению индетерминизма системы, а с другой, к упрощению структуры системы управления и алгоритмов ее функционирования. На этой основе минимизируется число альтернативных решений, вариантов и стратегий управления вплоть до единственного решения вариационной задачи оптимизации процесса управления.

Принцип обучения «характеризует способность системы аппроксимировать или усваивать свой прошлый или опыт других аналогичных систем при оптимальном или успешном достижении глобальной цели. Иначе обучение есть аппроксимация оптимального поведения системы в прошлом, используемая для выработки решений в настоящем и будущем.

Если в детерминированных системах время синтеза оптимальных управлений и принятия решений определяется только видом алгоритма, то в индетерминированных системах неизбежно возникает процесс перебора альтернативных вариантов. Технически реализуемым путем сокращения

времени поиска приемлемых (оптимальных) решений или синтеза управлений в системах с малой априорной информацией является либо предварительное обучение системы (путем использования аппроксимации опыта), либо придание системе функции самообучения (самоорганизации)» [4]. При этом самообучение связывается с наличием в структуре системы звеньев с функцией самооценки состояния и поведения системы, заложенных в системе проектантом. Результаты аппроксимации опыта поведения системы по прошлым или по текущим данным могут представляться и накапливаться в своеобразной базе данных (в тезаурусе интеллектуализации или оптимизации).

В заключение подраздела следует отметить, «что всякая наука и теория вообще построены на основе аппроксимации и усвоения предшествующего опыта и знаний и направлены на сокращение числа альтернатив, средств и времени на поиск решений по определению состояния, поведения и развития систем в прошлом, в настоящем времени и в будущем. Сформулированные выше на концептуальном уровне основные принципы управления процессами и синтеза автоматических систем могут быть методологической основой комплексного анализа и синтеза оптимальных или к близким к оптимальным» [4] автоматических систем и, в частности, перспективных систем управления объектами РКТ повышенной ответственности и важности.

Об основных этапах технологии максимизации характеристик систем управления перспективных изделий РКТ на основе синергетической оптимизации и интеллектуализации процессов их создания, эксплуатации и штатного применения

Наиболее характерной составной частью изложенного подхода к созданию и использованию систем управления РКО является то обстоятельство, что поочередное улучшение всех характери-

стик осуществляется на всех этапах жизненного цикла, при этом при оптимизации одной характеристики на другие проектантом накладываются технически обоснованные ограничения. При таком подходе все характеристики поднимаются до возможно максимальных своих значений, при этом исключаются варианты улучшения одних характеристик в ущерб другим. В таком случае процессы создания и применения систем управления будут иметь синергетический характер, что означает: на всех этапах жизненного цикла принимаются меры по одновременному улучшению всех характеристик, обеспечивая при этом значения варьируемых параметров и важнейших характеристик в заданных проектантом допустимых диапазонах.

Использование такого комплексного подхода при создании и применении систем управления важнейших объектов РКТ продиктовано также тем обстоятельством, что мало того, что они предназначены для выполнения ответственных задач, так они являются еще очень и очень затратными изделиями. В связи с этим и предъявляются максимально повышенные требования к системам управления с целью обеспечения их работоспособности при выполнении возложенных на них задач.

Не прибегая к детальному изложению содержания работ, выполняемых на каждом из этапов, а также учитывая содержание предыдущих разделов статьи, отметим в качестве основных в первую очередь следующие этапы создания и применения систем управления упомянутых изделий РКТ:

- замысел создания системы управления на концептуальном уровне;
- определение перечня функций и задач, возлагаемых на систему;
- экспертное определение структуры системы;
- обоснование выбора физической основы составных частей и элементов системы;
- проведение предпроектных опытно-теоретических исследований, разработка алгоритмов стабилизации движения РКО;
- аванпроектное, экспертное и рабочее проектирование системы;
- изготовление опытных образцов системы и ее элементов;
- проведение лабораторных и стендовых испытаний;

- проведение мероприятий по улучшению характеристик системы;
- работы по адаптации системы на объекте управления;
- проведение наземных и летных испытаний;
- доработка системы;
- серийное производство системы;
- разработка инструкций по эксплуатации системы;
- эксплуатация и штатное применение системы при выполнении объектом РКТ возлагаемых на него задач.

Особо надо отметить, что на каждом из этапов должны выполняться соответствующие мероприятия по синергетической оптимизации и интеллектуализации, перечень которых должен содержаться в тезаурусах каждого из этапов жизненного цикла.

Важнейшим из показателей системы управления является точность. Основные составляющие ошибки системы — ошибки информационных средств (измерителей параметров движения), динамические и методические ошибки. Что касается уменьшения инструментальных и методических ошибок, то надо констатировать, что конкретные пути и способы решения этих задач выходят за тематические рамки статьи и имеют большие и известные наработки и заделы, при этом соответствующие операции и научно-технические решения могут быть включены в тематический тезаурус и могут использоваться при проектировании систем.

Как показывает анализ, наиболее наукоемкими операциями являются мероприятия по обеспечению устойчивости и высокой динамической точности в условиях труднопрогнозируемых и постоянно действующих возмущений.

В связи с этим предлагается комплекс операций, при реализации которых обеспечивается предельно высокая динамическая точность и высокое быстродействие систем стабилизации параметров движения в условиях постоянно действующих возмущений.

Автоматические системы стабилизации каналов системы управления движением изделий РКТ будут оптимально устойчивыми и будут обладать максимальной динамической точностью и высоким быстродействием в результате выполнения на эта-

пах синтеза и применения систем управления следующего комплекса операций:

- предварительное формирование структуры и выбор параметров системы стабилизации, обеспечивающих удовлетворительное выполнение основных функций по стабилизации параметров движения;
- синтез оптимальных управляющих воздействий при условии минимизации интегральных функционалов заданного проектантом типа [2], обеспечивающих:
 - отрицательные значения полной производной по времени функции Ляпунова, принятой в виде положительно-определенной формы фазовых координат;
 - поддержание максимально достижимого уровня значений упомянутой производной с учетом энергетических возможностей исполнительных органов системы;
 - равенство нулю угла между вектором скорости текущей представляющей точки системы, контактирующей с поверхностью Ляпунова, и нормалью к этой поверхности в упомянутой точке.

Комплекс перечисленных операций является результатом обобщения ряда работ, в том числе и работы [2], при этом правомерность и эффективность операций математически обоснованы рядом соответствующих доказательств, приведенных в работе [2]. Алгоритмы по реализации упомянутой операции могут помещаться в одном из тезаурусов, содержащих рекомендуемые алгоритмы улучшения характеристик стабилизации движения центра масс и относительно центра масс объекта управления.

При этом надо подчеркнуть, что оптимальные управления, обеспечивающие максимальные значения динамической точности и повышенное быстродействие являются функциями только лишь текущих фазовых координат каналов стабилизации движения, при этом для определения оптимальных управлений используются математические модели каналов стабилизации параметров движения. Функция оптимального управления может определяться на каждом такте БЦВМ или могут быть

заложены в память БЦВМ соответствующие аппроксимационные зависимости, подготовленные заблаговременно. Надо отметить, что оптимальные управляющие воздействия синтезируются и используются только на этапе применения изделия РКТ, при этом учитываются ограничения, вытекающие из конечной эффективности исполнительных органов управления (рулевых машинок или рулевых реактивных двигателей). По данным автора, предлагаемый способ синтеза оптимальных управляющих воздействий является оригинальным, так как в специальной литературе по вопросам оптимизации аналогов способа не обнаружено. Характерной особенностью способа является также то обстоятельство, что он не связан с введением, например, сопряженных систем и дополнительных искусственных переменных, начальные значения которых не представляется, в частности, возможным установить. Для специалистов по методам оптимизации эти трудности хорошо известны, что и ограничивает возможности применения известных способов, хотя, на первый взгляд, они кажутся многообещающими.

Заключение

Полномасштабное использование предложенного комплексного подхода при синтезе систем управления особо ответственных летательных аппаратов РКТ может позволить проектировать с учетом разного рода ограничений максимально совершенные их варианты, используя при этом весь арсенал возможностей улучшения их характеристик, избежать бытующего среди проектировщиков устаревшего и приводящего к излишним экономическим затратам мнения, что «хорошую систему нельзя построить сразу, что она создается лишь в процессе совершенствования, модернизации и постепенного доведения до нужной кондиции» [4]. По результатам анализа рассмотренных предложений есть основания предполагать, что комплексное использование рассмотренных ме-

тодологических принципов и возможностей синергетической технологии оптимизации и интеллектуализации систем управления при их создании, эксплуатации и применении, а также внедрение современных программно-аппаратных средств могут эффективно способствовать существенному сокращению времени создания современных систем управления с максимально улучшенными характеристиками при одновременном учете ограничений материальных и финансовых затрат, необходимых для их создания. Комплекс предложенных методических подходов и процедур, как видится в развитии, может послужить основой для создания методических рекомендаций практического характера по проектированию эффективных систем управления.

Список литературы

1. *Вокин Г.Г.* О концептуальных основах создания ракетного оружия нового класса — дистанционно-кибернетического оружия. Труды научно-технической конференции АО «ВПК "НПО машиностроения"», 2023.
2. *Вокин Г.Г.* Оптимально-устойчивое управление движением объектов. Принцип оптимальной устойчивости. Труды 3-й НТК «Перспективы использования новых технологий и научно-технических решений в изделиях ракетно-космической техники разработки ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», ИПУ РАН, 2003.
3. *Аверьянов А.П., Азаренко Л.Г., Вокин Г.Г., Кащеев Н.А., Мачнева Л.А., Чаплинский В.С.* Введение в ракетно-космическую технику. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2018. 380 с.
4. *Азаренко Л.Г.* Методология коммерческого использования результатов инновационной космической деятельности предприятий ракетно-космической отрасли: Дисс.... д.э.н.: 08.00.05, Королев 2012, 346 с.

Дата поступления рукописи
в редакцию 08.11.2023
Дата принятия рукописи
в печать 16.02.2024