

## **ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМИ ЦИКЛАМИ СЛОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ, ОБЪЕКТОВ, СИСТЕМ**

М.В. Белов

**Аннотация.** Рассмотрена проблема принятия оптимальных решений в ходе управления жизненными циклами сложных изделий аэрокосмической, энергетической, ядерной, транспортной и другой сложной техники, капитальных объектов и систем энергетики, телекоммуникаций, транспорта, сельского хозяйства, сырьевых и других отраслей, а также информационно-технологических систем. Проанализированы и выделены общесистемные особенности жизненных циклов сложных изделий, объектов, систем. Предложены качественные формализмы представления жизненных циклов, сформулированы математические основания задачи оптимального управления ими. Поставлена математически строгая задача оптимального управления жизненными циклами сложных изделий, объектов, систем. Разработано алгоритмическое решение задачи оптимального управления, основанное на формализмах динамического программирования. Предложен практический способ применения алгоритма решения задачи, основанный на сценарном подходе, перечислены условия оптимизации управления жизненными циклами – условия, при которых оптимизация возможна. Представленные результаты фактически формируют инструмент оптимального управления жизненными циклами сложных изделий, объектов, систем.

**Ключевые слова:** оптимальное управление; динамическое программирование; жизненные циклы сложных изделий, объектов, систем.

### **ВВЕДЕНИЕ: АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМИ ЦИКЛАМИ И ОБЪЕКТИВНЫЕ ФАКТОРЫ, ЗАТРУДНЯЮЩИЕ ЕЁ РЕШЕНИЕ**

Концепция *жизненных циклов сложных изделий, объектов, систем*<sup>1</sup> (ЖЦИ) в настоящее время, являясь основополагающей в системотехнике [1, 2], широко распространена в практике управления созданием и применением изделий и систем аэрокосмической и оборонной отраслей, объектов и систем ядерной, нефтегазовой, энергетической, транспортной, коммуникационной и других обрабатывающих, сырьевых и сервисных индустрий, а также в сфере информационных технологий.

Однако, несмотря на широкое распространение концепции ЖЦИ, формальные основы управления ЖЦИ до сих пор не сформулированы: отсутствуют строго определённые критерии, позволившие бы сравнивать те или иные подходы, выбирать

наилучшие из них, согласовывать и интегрировать междисциплинарные решения, не говоря уже о том, что проблема управления ЖЦИ даже не поставлена как математическая задача управления. Причиной этого является высокая сложность и разнородность процессов управления ЖЦИ, вызванная сложностью самих Изделий, неопределённостью и изменчивостью внешних по отношению к ЖЦИ факторов.

Жизненный цикл является комплексной системой, а потому – предметом исследования различных областей знаний. В каждой из них разработаны модели, позволяющие изучать отдельные аспекты ЖЦИ с той или иной степенью строгости, и наличие разнородных моделей требует обоснованного выбора подходов к формированию интегральных количественных моделей ЖЦИ.

Управление комплексными системами изучается прежде всего кибернетикой и теорией систем [3, 4], а управление жизненными циклами – системотехникой [1, 5–9]. Но результаты, полученные в этих отраслях, носят, как правило, качественный характер, а модели математической теории систем [7] не позволяют ставить и решать оптимизационные задачи.

<sup>1</sup> В дальнейшем для краткости предмет жизненного цикла (изделия, объекты, системы) будем единообразно именовать Изделием с заглавной буквы.

Весьма популярной является также тема оценивания затрат в течение всего жизненного цикла создаваемой системы или изделия (см., например, работы [10, 11]). В последние годы для формирования таких оценок применяются нейронные сети, машинное обучение и другие современные подходы (см., например, работы [12–16]). Оценивание стоимости промышленных программ исследуется ведущими западными фирмами (см., например, работу [17]) и регламентируется нормативными документами различных правительственных организаций (например, Национальное аэрокосмическое агентство США [18], Офис контроля государственных расходов США [19]).

Значительное количество исследований посвящено математическим моделям поведения систем, состоящих из множества взаимосвязанных элементов, примером которой является ЖЦИ: мультиагентных систем [20–23]; взаимодействующих процессов и систем [24–27]; собственно систем, моделированию их поведения и свойств методами системного моделирования [8, 28]; различных сетевых структур (см., например, работу [29]), в частности, с помощью аппарата теории графов (см. обзоры в работах [29, 30]), управления проектами и программами [31–33]; стохастических сетей и их приложений в областях транспорта, электросетей, логистики и производства [34]; фирм (см., например, обзорную работу [35] и библиографию к ней), организаций и организационных структур ([36–38]).

Но несмотря на значительное количество созданных и проверенных практикой моделей, подходов и стандартов, прежде всего системно-инженерных, отсутствие формальных оснований существенно затрудняет управление ЖЦИ в целом, а также согласование и интеграцию результатов принятия конструкторских, технологических, экономических, организационных и других решений. Вместе с тем важность управления ЖЦИ делает актуальной проблему определения формальных оснований, разработку адекватных моделей и методов управления ЖЦИ.

Далее сформированы такие основания: проблема управления ЖЦИ формализована как математическая задача оптимального управления и предложены подходы к её решению. Использование математических формализмов обеспечивает максимально возможный уровень строгости сформулированных оснований вследствие наиболее абстрактного и формального аппарата математики среди всех областей знаний.

Будучи системой, ЖЦИ требует при исследовании системного подхода и применения принципа холизма, поэтому оптимизационная задача ставится как единая, целостная проблема, охватывающая все аспекты ЖЦИ. Мультидисциплинарность ЖЦИ затрудняет формирование такой единой постановки, и традиционным практическим подходом является моделирование и оптимизация отдельных видов и/или компонентов ЖЦИ. Это характерно, например, для исследования операций и смежных дисциплин. Однако из оптимальности частей не следует оптимальность целого. Поэтому формирование единой постановки оптимизационной задачи является принципиально важным, при этом остаётся корректной её последующая декомпозиция «сверху вниз» для решения с помощью различных математических методов на соответствующих уровнях иерархии.

---

## **1. КАЧЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМИ ЦИКЛАМИ СЛОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ, ОБЪЕКТОВ, СИСТЕМ**

---

Рассмотрим проблему управления жизненным циклом сложного Изделия, для этого введём ряд уточнений и определений, опираясь на общепринятые подходы, методы и стандарты.

Зафиксируем, что задачу будем решать применительно к изделиям аэрокосмической, энергетической, ядерной, транспортной и другой сложной техники, капитальным объектам и системам энергетики, телекоммуникаций, транспорта, сельского хозяйства, розничной торговли, сырьевых и других отраслей, а также информационно-технологическим системам.

*Жизненный цикл* Изделия будем понимать (следуя международным и российским стандартам [1, 2, 6]) как совокупность явлений и процессов, повторяющуюся с периодичностью, определяемой временем существования типовой конструкции Изделия от её замысла до утилизации или конкретного экземпляра Изделия от момента завершения его создания до утилизации.

Используем определения ([5, 39]) *проекта* как комплекса взаимосвязанных мероприятий, направленных на создание уникального продукта или услуги в условиях временных и ресурсных ограничений; а *проектной программы* – как совокупности взаимосвязанных проектов и другой деятельности, направленных на достижение общей цели и



реализуемых в условиях общих ограничений. На практике ЖЦИ обычно реализуется как проектная программа – как комплекс взаимосвязанных и скоординированных по срокам и ресурсам проектов и иных видов хозяйственной деятельности, объединенных одним типом Изделия (или экземпляром), включая его модернизацию и/или модификацию, а также всеми этапами его жизненного цикла и направленными на его разработку и/или производство и/или сопровождение эксплуатации в целях удовлетворения требований потребителей и получения положительного экономического результата. ЖЦИ представляет собой частный случай *комплексной деятельности*<sup>2</sup> (КД) [41], выполняемой сложным субъектом – *расширенным предприятием* (РП) [41] – системой автономных, но взаимодействующих фирм-предприятий, которые объединены единой структурой целей и единой технологией функционирования, при этом технологическую и бизнес-координацию осуществляет головное предприятие.

При этом программа ЖЦИ<sup>3</sup> фактически состоит из нескольких взаимосвязанных направлений деятельности, реализуемых расширенным предприятием (рис. 1):

- Создание и преобразования информационной модели (ИМ) Изделия вместе с ИМ расширенного предприятия. Это выполняется в ходе проектирования (концептуального, эскизного, рабочего и т. д.) Изделия, а также проектирования РП. Последующие модернизации снова включают в себя работы по проектированию Изделия и, при необходимости, РП.

- Создание, эксплуатация, модернизация и прекращение/завершение существования непосредственно самого расширенного предприятия.

- Создание, эксплуатация, модернизация и утилизация непосредственно самого Изделия.

Разработка концепции и проектирование (см. рис. 1) заключаются в создании и преобразовании описаний Изделия и расширенного предприятия в виде текстовых документов, чертежей, схем и в

других форматах, причём как в форме считавшихся традиционными бумажных документов, так и компьютерных данных (CAD, PDM и других инженерных платформ, а также ERP, CRM и прочих видов корпоративных систем управления). Кроме этого, разрабатываются и используются для принятия инженерных и управленческих решений различные расчётные модели, позволяющие оценить и исследовать (на основе текущего описания) свойства Изделия и расширенного предприятия. Расчётные модели транслируют проектные, инженерные, логистические и другие решения различных групп сотрудников в функциональные показатели изделия. Вся совокупность описаний и расчётных моделей образует информационную модель Изделия или РП соответственно (см. рис. 1).

- На ранних этапах ЖЦИ выполняется предварительный анализ потребности в Изделии, его ожидаемых характеристик, выполнимости и эффективности бизнес-идеи, формируются технические требования к Изделию. Будучи отражёнными в операционных концепциях в виде моделей целевого применения Изделия, требования определяют желаемый образ функционирования будущего Изделия. В результате НИР и ОКР формируются ИМ составляющих элементов (агрегатов, систем, узлов), явлений и процессов функционирования Изделия. В ходе рабочего проектирования, конструкторско-технологической подготовки производства формируются технологические и производственные описания и модели Изделия, сопровождаемые моделями расширенного предприятия и отдельных предприятий как его составляющих частей. При прохождении каждого существенного этапа разрабатываемые ИМ пополняются, актуализируются и детализируются, на их основе проверяется и подтверждается соответствие текущего образа Изделия желаемому, намеченному при разработке концепта (см. рис. 1).

Управление ЖЦИ означает управление комплексной деятельностью [41] расширенного предприятия: воздействие субъекта управления на объект управления, призванное обеспечить его поведение, приводящее к достижению целей субъекта управления. Более конкретно определим процесс управления ЖЦИ как комплексную деятельность,

- реализуемую в рамках программы ЖЦИ в течение всего жизненного цикла Изделия;

- осуществляемую сотрудниками РП, чьи конструкторские, проектные, технологические, производственные и другие решения влияют на характеристики программы ЖЦИ;

<sup>2</sup> Деятельность [40] – активное взаимодействие человека с окружающей действительностью, в ходе которого человек выступает как субъект, целенаправленно воздействующий на предмет. Комплексная деятельность [41] – деятельность, обладающая нетривиальной внутренней структурой, с множественными и/или изменяющимися субъектом, технологией, ролью предмета деятельности в его целевом контексте.

<sup>3</sup> Здесь и далее состав и последовательность фаз жизненного цикла будем приводить, следуя стандартам [2, 42], однако все результаты, утверждения и выводы остаются справедливыми и применительно к другим составам фаз ЖЦ.

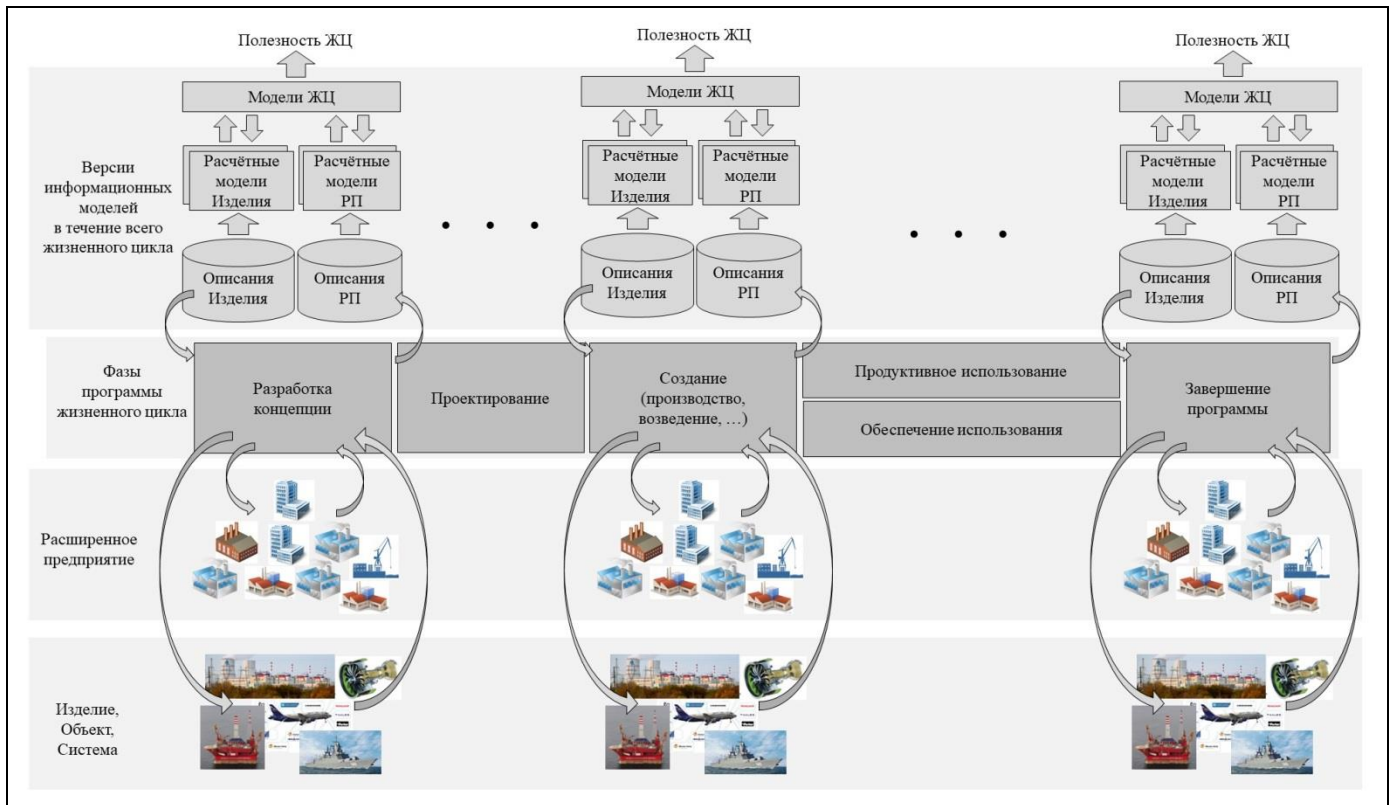


Рис. 1. Жизненный цикл, Изделие, расширенное предприятие и их информационные модели

- координируемую назначенной для этого выделенной группой специалистов – офисом управления программой ЖЦИ;

- в целях обеспечения рыночно/экономически обоснованных значений характеристик полезности программы и достижения таким образом целей программы ЖЦИ;

- заключающуюся в:

- сборе, систематизации и предоставлении прогнозных и фактических данных, определяющих значения характеристик полезности;

- определении и согласовании целевых значений характеристик, на её основе – лимитов на характеристики Изделия и РП, которые в свою очередь, декомпозируются на лимиты по компонентам Изделия и РП, группам работ РП;

- принятии конструкторских, проектных, технологических, производственных и других решений в целях соблюдения лимитов на характеристики на основании прогнозирования эволюции ЖЦИ (и Изделия, и РП);

- реализации ответственности за соблюдение лимитов теми фирмами, подразделениями и конкретными сотрудниками (конструкторами, технологами и др.), чьи решения/действия влияют на соответствующий компонент Изделия и/или РП.

По существу, ЖЦИ является не чем иным, как реализацией одного или нескольких элементов де-

ятельности, направленных на получение выгод, т. е. бизнесом или несколькими бизнесами на основании создания, производства, использования предмета ЖЦИ (изделия, системы, объекта). Такой взгляд на ЖЦИ позволяет сформулировать обобщённую структуру целей деятельности/бизнеса, идентичную структуре формирования полезности. На рис. 2 такая структура, соотносённая с фазами ЖЦИ, представлена применительно к сложному объекту или системе, а на рис. 3 – применительно к сложному изделию.

Структуры полезности/целей сформированы с точки зрения реализующего ЖЦИ субъекта, структуры в целом самоочевидны и не требуют комментариев: прямоугольники с закруглёнными углами представляют цели и подцели, стрелки соединяют подцели с целями. Штриховыми стрелками показаны зависимости полезности Изделия от работ по проектированию (в том числе концептуальному), производству, обеспечению функционирования и утилизации, эти зависимости также носят характер связей «цель – подцель»: чтобы Изделие обладало полезными для потребителя свойствами, эти свойства должны быть заложены в ходе проектирования, производства и т. д.

Заметим, что содержание всех фаз ЖЦИ, кроме «Продуктивного использования», включает в себя выполнение работ различных видов – по проекти-



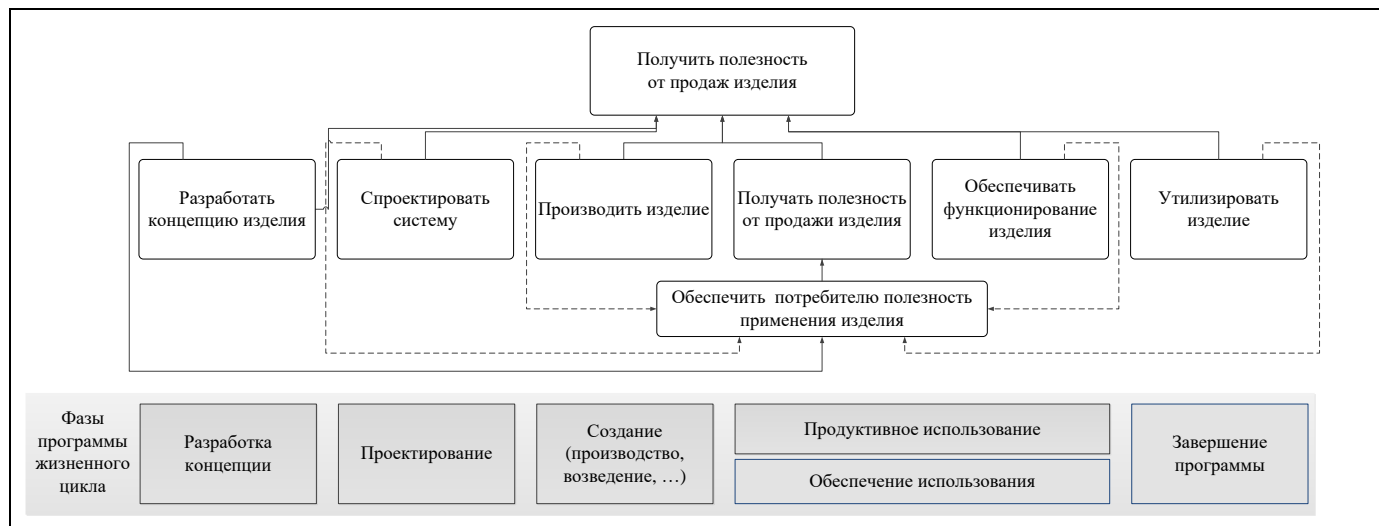


Рис. 2. Структура формирования полезности или целей комплексной деятельности, выполняемой в ходе ЖЦ сложной системы или объекта

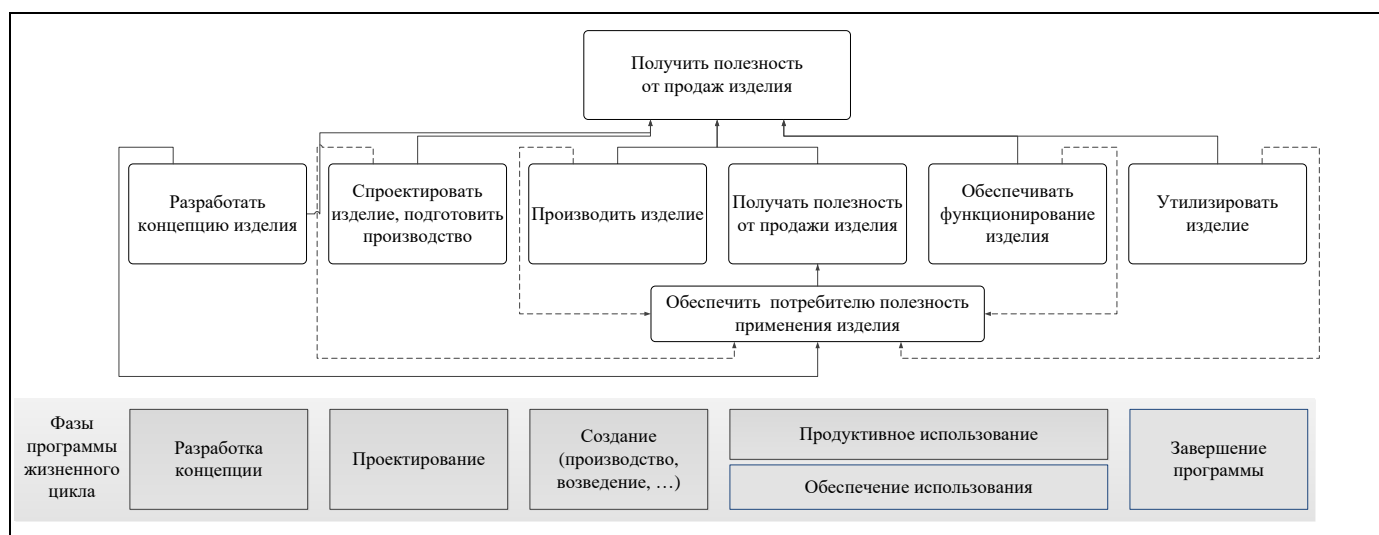


Рис. 3. Структура формирования полезности или целей комплексной деятельности, выполняемой в ходе ЖЦ сложного изделия

рованию, производству, обеспечению функционирования и утилизации Изделий. Для фазы «Продуктивное использование» характерно прежде всего получение целевой полезности, выгод (вместе с выполнением сопутствующих работ). Фактически работы всех видов в течение ЖЦИ носят вспомогательный, но неизбежный характер и выполняются лишь ради получения целевой полезности и выгод в ходе фазы «Продуктивного использования». На уровне общесистемного «кросс-индустриального» обобщения содержание ЖЦИ может быть сформулировано следующим образом.

- Все фазы ЖЦИ характеризуются издержками выполнения соответствующих видов работ, направленных на создание и целенаправленное изменение Изделия и РП, а также их информацион-

ных моделей. При этом достигаемые цели деятельности и формируемая полезность носят вспомогательный, «внутренний», характер – цели достигаются и полезность формируется в интересах субъекта ЖЦИ, а не внешних потребителей.

- Фазе «Продуктивное использование» свойственно получение целевой для субъекта ЖЦИ полезности на основании полезности и выгод, предоставляемых внешним потребителям в результате применения Изделия.

В бизнес-практике управляющим субъектом (или субъектом, реализующим ЖЦИ) обычно является офис управления программой ЖЦИ во главе с одним из руководителей головного предприятия, а управляемым объектом – всё РП, реализующее ЖЦИ. Управляющее воздействие представляет со-

бой всю совокупность принимаемых офисом управления программой ЖЦИ решений и оформленных как договоры, распоряжения, регламенты, письма и другие документы в электронной или бумажной форме. Поведением управляемого объекта является вся совокупность элементов КД РП (производственных, инженерных, технологических, логистических, сбытовых, административных, финансовых и др.), включая также управленческую деятельность вышестоящих хозяйствующих субъектов над подчинёнными.

При рассмотрении любой проблемы управления объектом, в состав которого входят люди, ключевым свойством является их способность активного выбора – действовать соответственно своим внутренним мотивам и предпочтениям. Кроме того, РП представляет собой многоуровневую иерархическую организацию (взаимосвязанную и иерархически подчинённую совокупность предприятий, их подразделений и сотрудников), поэтому процессы функционирования РП и управления им носят многоуровневый иерархический характер. При этом и наличие людей в составе РП, и их свойство активного выбора, и их ключевая роль в осуществлении ЖЦИ являются универсальными свойствами, характерными для всех без исключения ЖЦИ и РП.

Традиционным в таких случаях является применение теоретико-игровых подходов и методов теории иерархических игр [43], теории активных систем [44], теории управления организационными системами [45], теории контрактов [46]. С точки зрения этой области знаний расширенное предприятие составляет многоуровневую иерархическую динамическую сетевую активную систему с неопределённостью и с ограничениями на совместную деятельность активных элементов<sup>4</sup> (АЭ) в виде технологических сетей [47–49]. На практике для расширенного предприятия, как правило, соблюдаются все предположения<sup>5</sup>, которые позволяют применять теоремы о декомпозиции, сфор-

<sup>4</sup> Активными элементами на практике являются фирмы, департаменты, отделы, цеха, рабочие группы, сотрудники.

<sup>5</sup> Гипотеза рационального поведения сотрудников – предположение о том, что субъект с учётом всей имеющейся у него информации выбирает действия, которые приводят к наиболее предпочтительным для него результатам деятельности; предположение о взаимной однозначности технологических функций относительно действий субъектов и результатов их предшественников в текущем периоде или предположение о полной наблюдаемости действий субъектов со стороны вышестоящего управляющего центра; предположение об информированности управляющего центра об общественно обусловленных значениях функции затрат и резервной полезности субъектов, которое справедливо в условиях развитого рынка труда.

мулированные и доказанные в работах [47–49]. Тогда из теорем о декомпозиции следует, что для любой осуществимой траектории ЖЦИ и независимо от конкретных технологических связей между АЭ (от технологии ЖЦИ и организации РП) управляющий субъект может построить компенсаторную систему стимулирования АЭ, которая:

- реализует траекторию действий АЭ как равновесие в доминантных стратегиях;
- декомпозирует задачу управления по АЭ, их действиям и по периодам времени;
- обеспечивает гарантированно (по всем возможным дальновидностям АЭ) минимальные затраты управляющего субъекта на реализацию этой траектории.

Такая система стимулирования отражает принцип согласованного управления<sup>6</sup> и даёт возможность применить «схему оптимизации управления предприятием» (подраздел 3.4.5 [49]). Это, в свою очередь, позволяет математически корректно устранить неопределённость активного выбора АЭ и рассматривать управляющее воздействие как совокупность *планов действий* всех АЭ, выполнение которых выгодно этим АЭ и которые поэтому все АЭ будут стремиться выполнять. Реализация принципа согласованного управления в бизнес-практике означает, что вышестоящие менеджеры таким образом формируют задания/планы и системы стимулирования для подчинённых сотрудников, подразделений, предприятий, чтобы выполнение планов было выгодно подчинённым и они стремились бы их выполнять. С помощью такого управления, в частности, происходит транслирование стратегических целей фирмы всем сотрудникам вплоть до рядовых.

Определим класс методов и подходов исследования ЖЦИ, имеющих «кросс-индустриальный» характер и пригодных для применения в различных отраслях, для этого рассмотрим несколько важных особенностей реализации ЖЦИ и, как следствие, моделей управления ЖЦИ (см. рис.1).

Прежде всего, расширенное предприятие, реализуя ЖЦИ, играет двойственную роль: оно выступает и как субъект, и как объект комплексной деятельности, так как практически всегда в рамках программы ЖЦИ возникает необходимость создавать и изменять кооперацию предприятий, создавать новые технологии и, следовательно, новые предприятия.

<sup>6</sup> Согласованное управление [45] – управление, при котором выполнение плана выгодно субъектам (является равновесием их игры).



Кроме того, будучи сложными системами, и Изделие, и РП требуют представлений с различных точек зрения [2] (например, функциональной, геометрической, энергетической, экономической, надёжностной и др.), поэтому на практике и Изделие, и РП всегда характеризуются множественными описаниями и моделями.

К тому же, если сами изделия, объекты, системы имеют существенную индустриальную специфику и нередко бывают уникальными, то расширенные предприятия, а также жизненные циклы имеют множество общесистемных, «кросс-индустриальных» сходных функций и видов деятельности (финансово-экономическую, кадровую, в существенной степени логистическую и др.), что позволяет использовать для них унифицированные описания и модели. На практике это выражается в том, что все предприятия используют одни и те же лучшие практики организации операционной деятельности, одни и те же шаблоны бизнес-процессов, одни и те же информационно-технологические платформы (ERP, CRM, MES и т. д.).

Наконец, в подавляющем большинстве случаев (если не всегда) полезность ЖЦ оценивается с экономической точки зрения, а экономические подходы, в свою очередь, носят «кросс-индустриальный» характер, отражающий обобщающие свойства экономической области знаний. Поэтому экономические описания и модели Изделия, расширенного предприятия и жизненного цикла являются типовыми для различных индустрий, что позволяет применять унифицированные подходы. Также именно в экономической сфере проявляется существенная рефлексивность ЖЦИ: экономические показатели Изделия, с одной стороны, определяют экономические показатели ЖЦИ и РП, с другой – зависят от них. В частности, себестоимость Изделия с учётом всего ЖЦ зависит от характеристик РП, и наоборот. Поэтому экономические описания и модели Изделия, и РП, и ЖЦИ представляют собой взаимосвязанную систему.

Таким образом, в основу общесистемного «кросс-индустриального» представления ЖЦИ положим экономические подходы и методы, описывающие процессы формирования полезности/ценности и сопутствующие этому издержки.

Перейдём теперь к описанию количественной модели управления ЖЦИ – сформулируем необходимые четыре компонента оптимизационной задачи:

- переменные состояния управляемой системы и внешней среды;
- ограничения;

- закономерности, отражающие связи между переменными;

- целевые функции активных участников и критерий эффективности управления.

---

## 2. ФОРМАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМИ ЦИКЛАМИ СЛОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ, ОБЪЕКТОВ, СИСТЕМ

---

Практический анализ особенностей жизненных циклов позволяет охарактеризовать управление ЖЦИ как разворачивающийся во времени многошаговый процесс принятия решений в условиях неопределённости с целью достичь наиболее предпочтительного для субъекта управления результата на всём ЖЦИ.

В рамках сложившейся практики хозяйственной жизни (бизнеса) ЖЦИ рассматриваются как активы – объекты, которые формируют или должны формировать положительный хозяйственный/бизнес-результат. Поэтому в качестве критерия управления ЖЦИ целесообразно использовать оптимизацию единого количественного показателя – эффекта или полезности ЖЦИ, выбирая в качестве такого показателя одну из широко распространённых в экономике характеристик прибыльности, денежного потока, добавленной стоимости или иных.

Задачу будем рассматривать в дискретном представлении времени, состояние ЖЦИ будем характеризовать на каждом периоде  $t$  некоторой (может быть, векторной) величиной  $x(t)$ , принимающей значения из множества  $X$  возможных значений,  $x(t) \in X$ . Полагаем, что субъект управления выбирает в периоде  $t$  элемент  $u(t)$  из множества возможных решений (и действий)  $U$ ,  $u(t) \in U$ . Управляющее воздействие  $u(t)$  на практике (при условии использования согласованной системы стимулирования, см. выше) соответствует совокупности планов действий всех составляющих элементов РП (фирм, их подразделений и отдельных сотрудников), формируемых в ходе следования планам офиса управления программой ЖЦИ.

Независимо от выбора управляющего воздействия  $u(t)$  и состояния ЖЦИ  $x(t)$ , в каждом периоде реализуется некоторое значение неопределённых факторов различной природы, описывающееся вектором  $\omega(t) \in \Omega$ , где  $\Omega$  – множество всех возможных значений неопределённых факторов.

На природу элементов и размерность векторов  $x(t)$ ,  $u(t)$  и  $\omega(t)$ , как и на множества  $X$ ,  $U$  и  $\Omega$ , не будем накладывать никаких ограничений (за исключением обеспечивающих достижимость соответ-

ствующих максимумов или минимумов). Также значения состояний ЖЦИ и неопределённых факторов будем понимать в расширенном смысле, включая в них, при необходимости, элементы, относящиеся к текущему периоду  $t$  и некоторому набору предыдущих периодов (возможно, всей предыстории от начального периода моделирования  $t_1$  до текущего периода  $t$  включительно). В частности, под переменными состояниями ЖЦИ  $x(t)$  можно понимать полную информационную модель пары <само Изделие (объект, система); расширенное предприятие, реализующее ЖЦИ>.

Значение неопределённых факторов  $\omega(t)$  неизвестно субъекту на момент выбора управляющего воздействия  $u(t)$ , но становится известным апостериори. В зависимости от реализовавшихся значений  $x(t)$ ,  $u(t)$  и  $\omega(t)$ , ЖЦИ эволюционирует и к следующему ( $t + 1$ )-му шагу его состояние принимает значение

$$x(t + 1) = F(x(t), u(t), \omega(t), t), \quad (1)$$

где  $F(\cdot)$  – функция динамики ЖЦИ, некоторая известная функция, описывающая закономерности изменения состояния ЖЦИ во внешней среде в зависимости от принимаемых решений – управляющих воздействий.

Эффект или полезность ЖЦИ  $\Phi(\cdot)$  в течение периода моделирования  $[t_1; t_2]$  будем описывать в традиционной форме:

$$\begin{aligned} \Phi(\{x(\cdot), u(\cdot), \omega(\cdot)|t_1; t_2\}) &= \\ &= \sum_{\tau=t_1}^{t_2} \delta_{\tau, t_1, t_2} \varphi(x(\tau); u(\tau); \omega(\tau); \tau). \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\varphi(\cdot)$  – известная частная функция полезности ЖЦИ с точки зрения субъекта управления,  $\delta_{\tau, t_1, t_2}$  – функция дальновидности управляющего субъекта, а нотация  $\{x(\cdot), u(\cdot), \omega(\cdot)|t_1; t_2\}$  означает зависимость от кортежа значений  $x(\cdot)$ ,  $u(\cdot)$ ,  $\omega(\cdot)$  на промежутке моделирования  $[t_1; t_2]$ .

В дальнейших выкладках для упрощения записи функцию дальновидности  $\delta_{\tau, t_1, t_2}$  указывать в явном виде не станем, предполагая, что она, будучи заданной, может быть учтена как множитель в частной функции полезности  $\varphi(\cdot)$ .

Использование дискретного представления времени, приведение принимаемых решений и влияния неопределённости к единому (в каждом периоде) моменту времени отражает сложившуюся практику функционирования РП, когда планирование и отчётность реализуются применительно к отчётным периодам (для ЖЦИ это фазы, этапы и более детальные периоды, не обязательно равной продолжительности) и не сужает возможности данного формализма.

Фрактальная иерархия элементов деятельности, работ и, соответственно, принимаемых решений также адекватно реализуется в рамках предложенного формализма: деятельность и принятие решений подчинённых уровней иерархии моделируется в описании (2) процесса эволюции ЖЦИ – функции  $F(\cdot)$ .

Проявление неопределённости, порождаемой каждым из возможных источников [41] – внешней средой, технологией и предметом КД, комплексным субъектом деятельности – полноценно отражается через влияние неопределённых факторов – процесса  $\omega(\cdot)$  – и на эволюцию ЖЦИ (функцию  $F(\cdot)$ ), и на эффект, полезность ЖЦИ (функцию  $\varphi(\cdot)$ ).

Тогда задачу оптимального управления ЖЦИ поставим как максимизацию эффекта ЖЦИ на промежутке  $[t_1; t_2]$  в многошаговой постановке (3) с учётом выражений (1) и (2):

$$\Phi(\{x(\cdot), u(\cdot), \omega(\cdot)|t_1; t_2\}) \rightarrow \max_{\{u(\cdot)|t_1; t_2\}; u(t) \in U} \cdot \quad (3)$$

Сформулированная задача (1)–(3) представляет собой классическую задачу динамического программирования с дискретным временем и неопределённостью. Не накладывая ограничений на характер неопределённости, с помощью нотации  $\text{def}_{\omega(\cdot)} \{\cdot\}$  обозначим оператор устранения неопределённости  $\omega(\cdot)$  (с помощью метода гарантированного результата, ожидаемой полезности или иного метода).

Тогда задача оптимального управления примет вид

$$\text{def}_{\omega(\cdot)} \{\Phi(\{x(\cdot), u(\cdot)|t_1; t_2\}; \{\omega(\cdot)|t_1; t_2\})\} \rightarrow \max_{\{u(\cdot)|t_1; t_2\}; u(t) \in U} \cdot \quad (4)$$

с учётом выражений (1), (2) и при начальных условиях  $x(t_1 - 1) = x_0$ .

### 3. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Сформируем в наиболее общем виде алгоритм поиска оптимального управления – последовательности решений  $u^*(t)$ , обеспечивающих максимальное возможное значение эффекта ЖЦИ.

Решение задачи (1)–(4) будем основывать на принципах оптимальности Беллмана и обратной индукции. Следуя им, запишем задачу (4) в виде

$$\begin{aligned} &\text{def}_{\omega(\cdot)} \{\Phi(\{x(\cdot), u(\cdot)|t_1; t_2\}; \{\omega(\cdot)|t_1; t_2\})\} = \\ &= \text{def}_{\omega(\cdot)} \sum_{\tau=t_1}^{t_2} \varphi(x(\tau); u(\tau); \omega(\tau); \tau) \rightarrow \max_{\{u(\cdot)|t_1; t_2\}; u(t) \in U} \cdot \end{aligned}$$





Введём функцию Беллмана  $J(x, t) = \max_{\{u(\cdot); t; t_2\}; u(\tau) \in U(\cdot)} \text{def}_{\omega(\cdot)} \sum_{\tau=t}^{t_2} \varphi(x(\tau); u(\tau); \omega(\tau); \tau)$  и получим для неё рекуррентное выражение, начиная с  $t_2$ -го периода и уменьшая номер периода.

Для финального  $t_2$ -го периода будет справедливо

$$J(x, t_2) = \max_{u \in U} \{ \text{def}_{\omega(t_2)} \{ \varphi(x, u, \omega(t_2), t_2) \} \}. \quad (5)$$

Для  $(t_2 - 1)$ -го периода

$$\begin{aligned} J(x, t_2 - 1) &= \\ &= \max_{u \in U} \{ \text{def}_{\omega(t_2-1)} \{ \varphi(x, u, \omega(t_2-1), t_2-1) \} \} + \\ &+ \max_{u \in U} \{ \text{def}_{\omega(t_2-1)} \{ \text{def}_{\omega(t_2)} \{ \varphi(F(x, u, \omega(t_2-1), t_2-1), \\ &\quad u(t_2), \omega(t_2), t_2) \} \} \} = \\ &= \max_{u \in U} \{ \text{def}_{\omega(t_2-1)} \{ \varphi(x, u, \omega(t_2-1), t_2-1) + \\ &\quad + J(F(x, u, \omega(t_2-1), t_2-1), t_2) \} \}. \end{aligned}$$

Продолжая по индукции и уменьшая номер периода, получим в общем случае рекуррентное выражение для функции Беллмана для всех  $t \in [t_1; t_2 - 1]$  в порядке убывания в виде

$$J(x, t) = \max_{u \in U} \left\{ \text{def}_{\omega(t)} \left\{ \varphi(x, u, \omega(t), t) + J(F(x, u, \omega(t), t), t+1) \right\} \right\}. \quad (6)$$

Выражения (5) и (6) позволяют вычислить последовательность функций  $J(x, t)$  для всех  $t \in [t_1; t_2]$  в порядке убывания номера периода  $t$ . После получения решения  $J(x, t)$ , подставив начальное значение  $x_0$  при  $t_1 - 1$ , можно получить также для всех  $t \in [t_1; t_2]$  в порядке возрастания номера периода  $t$  оптимальную стратегию управления – последовательность оптимальных решений  $u^*(t)$  – вместе с оптимальной траекторией  $x^*(t)$  реализации ЖЦИ.

$$u^*(t) = \arg \max_{u \in U} \{ \text{def}_{\omega(t)} \{ \varphi(x^*(t), u, \omega(t), t) + J(F(x^*(t), u, \omega(t), t), t+1) \} \}; \quad (7)$$

$$x^*(t+1) = \text{def}_{\omega(t)} \{ F(x^*(t), u^*(t), \omega(t), t) \}. \quad (8)$$

Полученные соотношения (5)–(8) задают строгий алгоритм принятия оптимальных решений по управлению ЖЦИ и таким образом составляют формальные основания управления ЖЦИ, базирующиеся на следующем формализме:

- состояние и поведение ЖЦИ формализовано вектором  $x(t) \in X$ ;
- принимаемые управленческие решения описаны вектором  $u(t) \in U$ ,
- неопределённость всех видов представлена вектором  $\omega(t) \in \Omega$ ;

- динамика ЖЦИ и внешней среды описана функцией  $F(\cdot)$  – соотношение (1);

- эффект ЖЦИ формализован в виде функции  $\varphi(\cdot)$  и соотношения (2).

Рассматриваемой задаче (1)–(4) и алгоритму её решения (5)–(8) присущ ряд фундаментальных свойств. Обсудим эти свойства и способы применения данного подхода для практического управления ЖЦИ, согласования и интеграции разнородных (инженерных, финансово-экономических, организационных и других решений, принимаемых в ходе реализации ЖЦИ).

Запишем два частных случая оптимизационной задачи, имеющих важное практическое значение.

Во многих случаях частная функция полезности принимает форму разности между полученными выгодами  $h(\cdot)$  и суммой издержек  $c_i(\cdot)$  различных видов:

$$\begin{aligned} \varphi(x(\tau), u(\tau), \omega(\tau), \tau) &= h(x(\tau), u(\tau), \omega(\tau), \tau) + \\ &+ \sum_i c_i(x(\tau); u(\tau); \omega(\tau); \tau). \quad (9) \end{aligned}$$

Эффект, в свою очередь, определяется как дисконтированная с постоянным коэффициентом  $\delta$  сумма частных полезностей  $\varphi(\cdot)$ :

$$\begin{aligned} \Phi(\{x(\cdot), u(\cdot), \omega(\cdot)\}; t_1; t_2) &= \\ &= \sum_{\tau=t_1}^{t_2} \delta^{(\tau-t_1)} [h(x(\tau); u(\tau); \omega(\tau); \tau) - \\ &- \sum_i c_i(x(\tau); u(\tau); \omega(\tau); \tau)]. \quad (10) \end{aligned}$$

Функция (9) представляет большинство (если не все) экономических постановок, так как позволяет трактовать выгоды и издержки как элементы и денежного потока, и счёта прибылей и убытков, и накопленной ценности. Соответственно, эффект (10) может интерпретироваться и как чистый денежный поток (*net present value*) жизненного цикла как инвестиционного актива, и как взвешенная суммарная прибыль, и как добавленная стоимость (*economic value added, shareholders value added, market value added*).

В этом случае уравнения Беллмана примут вид:

$$J(x, t_2) = \max_{u \in U} \left\{ \text{def}_{\omega(t_2)} \left\{ h(x(t_2); u(t_2); \omega(t_2); t_2) - \sum_i c_i(x(t_2); u(t_2); \omega(t_2); t_2) \right\} \right\}. \quad (11)$$

$$\begin{aligned} J(x, t) &= \max_{u \in U} \left\{ \text{def}_{\omega(t)} \left\{ h(x(t); u(t); \omega(t); t) - \sum_i c_i(x(t); u(t); \omega(t); t) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \delta J(F(x, u, \omega(t), t), t+1) \right\} \right\}. \quad (12) \end{aligned}$$

Ещё одним частным случаем является продолжительный ЖЦ с не заданным априори сроком завершения и, начиная с некоторого периода времени, стационарной динамикой

$$x(t+1) = F(x(t), u(t), \omega(t)). \quad (13)$$

В этом случае уравнения Беллмана сводятся к единственному уравнению (14):

$$J(x) = \max_{u \in U} \left\{ \text{def}_{\omega} h(x; u; \omega) - \sum_i c_i(x; u; \omega) + \delta J(F(x, u, \omega)) \right\}. \quad (14)$$

Решение данного уравнения  $J(\cdot)$  даёт оптимальное управление (15):

$$u^* = \arg \max_{u \in U} \left\{ \text{def}_{\omega} h(x; u; \omega) - \sum_i c_i(x; u; \omega) + \delta J(F(x, u, \omega)) \right\}. \quad (15)$$

Реализующее ЖЦИ расширенное предприятие включает в себя в качестве основных элементов сотрудников – индивидов, обладающих способностью активного выбора, т. е. РП является активной системой. Эта особенность проблемы, рассмотренная выше в § 1 (а также в работах [47–49]), задаёт условия оптимизации управления ЖЦИ в виде необходимости соблюдения гипотезы рационального поведения, предположения о взаимной однозначности технологических функций и предположения об информированности управляющего субъекта (см. сноску 5 выше, а также работы [47–49]).

Существенно также, что расширенное предприятие является многоуровневой активной системой, включающей в себя иерархию технологически связанных фирм, их подразделений, рабочих групп, сотрудников. В таких условиях практическое формирование оптимального управления  $u^*(t_{\text{тек}})$  заключается в согласованном планировании в многоуровневой иерархической динамической активной системе. Данная задача подробно рассмотрена в подразделе 2.2 [50] и подразделе 7.1 [49], разработанные в указанных работах алгоритмические модели согласованного планирования целесообразно применить для формирования оптимального плана  $u^*(t_{\text{тек}})$  реализации ЖЦИ.

Другой важной особенностью задачи оптимального управления ЖЦИ является не столько необходимость учёта неопределённых факторов  $\omega(\cdot)$ , сколько характер и особенности этих факторов. Следуя изложенному в работе [41], все возможные виды неопределённости будем относить к истинной неопределённости (возможность наступ-

ления уникальных или редко повторяющихся событий, которые не объясняются существующими фундаментальными законами и для которых нет достаточного объёма априорных наблюдений) или измеримой неопределённости (возможность наступления априори непредсказуемых, но многократно повторявшихся ранее или/и описываемых фундаментальными закономерностями событий). В рассматриваемой проблеме управления ЖЦИ принципиальным является присутствие не только измеримой, но также и истинной неопределённости. Это вызвано, прежде всего, длительностью ЖЦИ и изменчивостью (технологической, политической, хозяйственной и т. д.) внешнего окружения, креативным характером процессов ЖЦИ (как минимум, на ранних стадиях – при проектировании самого изделия, фактически заключающемся в создании новых знаний о самом будущем изделии, его функционировании во внешней среде и производстве изделия), а также наличием индивидов с их способностью активного выбора в составе комплексного субъекта деятельности. Присутствие истинной неопределённости, задающей поведение  $\omega(\cdot)$ , а следовательно, и ЖЦИ, и его эффекта (из-за зависимостей (1), (2)) затрудняет устранение неопределённости и решение задачи.

Традиционно для устранения неопределённости используются априорные знания об источниках и механизмах порождения (устраняемой) неопределённости. В данной задаче из-за истинной неопределённости такие знания никогда не могут считаться объективными и исчерпывающе полными (относительно описываемых объектов и явлений) и, как следствие, – неизменными. Недостаток знаний об объективных закономерностях заставляет использовать субъективные оценки и предположения для устранения неопределённости – оператор  $\text{def}\{\cdot\}$  в алгоритме (5)–(8). Применительно к дина-

мически развивающимся явлениям, таким как ЖЦИ, оценки и предположения, на практике формируются в виде наборов сценариев [51], описывающих эволюцию явлений в условиях, когда управление является гибким – зависит заранее рассчитанным образом от реализовавшихся значений факторов неопределённости. Сценарный подход [51] широко применяется для принятия решений, в частности, прогнозирования и планирования, в областях, где истинная неопределённость наиболее значительна – в экономике, в социальной, политической сфере. В основе подхода лежит экспертное формирование сценариев поведения анализируемой системы и использование их для расчётов и



прогнозов. Применение сценарного подхода является, по сути, субъективным, эвристическим способом формирования знаний со всеми присущими ему недостатками. Однако в условиях, когда инструментальное объективное исследование невозможно, на практике применяется именно такой подход. В данной задаче сценарии  $\{x_0; \{\Omega_n^*(t) | t_1 \leq t \leq t_2\}; \{U_n^*(t) | t_1 \leq t \leq t_2\}\}$  состоят из начальных значений  $x_0$ , упорядоченных по номеру периода  $t$  последовательностей множеств  $\Omega_n^*(t)$  состояний неопределённых факторов и множеств  $U_n^*(t)$  управленческих решений (зависящих от вектора  $\omega(t)$ ).

Ещё одним важным аспектом данной задачи и практического применения предлагаемого оптимизационного подхода является изменчивость условий внешней среды и реализации истинной неопределённости технологии, предмета и субъекта, что приводит к потере актуальности полученных оптимальных стратегий управления с течением времени. Поэтому целесообразной практикой следует считать регулярное решение задачи (с учётом всей имеющейся текущей информации) и формирование оптимальных управлений. То есть перед принятием решения в каждом текущем периоде  $t_{\text{тек}}$  целесообразно повторять решение задачи (1)–(15) для промежутка  $t_{\text{тек}} \leq t \leq t_2$ , предварительно актуализировав используемые априорные знания (сценарии и другие предположения). Таким образом, фактически из всего оптимального управления  $\{u^*(\cdot) | t_{\text{тек}}; t_2\}$  всегда используется только ближайший по времени план  $u^*(t_{\text{тек}})$ , поэтому, вообще говоря, остальные управления  $\{u^*(\cdot) | t_{\text{тек}} + 1; t_2\}$  можно и не рассчитывать, следуя выражениям (7)–(8). С практической точки зрения описанную актуализацию оптимальной стратегии необходимо выполнять при фиксации каждой базовой конфигурации (*baseline*) [2] в ходе всего ЖЦИ.

При использовании сценарного подхода интерпретация результатов решения задачи включает в себя оговорку об оптимальности управления при соблюдении принятых предположений – реализации одного из сценариев. С одной стороны, подобные оговорки снижают ценность оптимизации, с другой – такое обоснование является, несомненно, лучшим среди возможных, особенно если набор рассматриваемых сценариев настолько широк, что возможность реализации ЖЦИ по пути, отличному от всех таких сценариев, пренебрежимо мала. Данное замечание является ещё одним условием оптимизации управления ЖЦИ.

Векторы  $x(\cdot)$  состояния управляемого объекта, ЖЦИ, управления  $u(\cdot)$ , неопределённых факторов

$\omega(\cdot)$  и соответствующие множества их возможных значений  $X$ ,  $U$ , и  $\Omega$  описывают сложные объекты и явления ЖЦИ (Изделие, РП, технологию, их эволюцию и функционирование в сложной технологической, политической, экономической внешней среде). Функция  $F(\cdot)$  формализует всё разнообразие эволюции ЖЦИ – изменения пары <Изделие; расширенное предприятие> – вследствие принятия управленческих решений, выполнения конструкторских, технологических, производственных и других работ, формирования и согласования планов, контроля их исполнения и реализации других активностей внутри РП. В свою очередь, функция  $\varphi(\cdot)$  (а также выгоды  $h(\cdot)$  и издержки  $c_i(\cdot)$ ) отражает зависимость эффекта ЖЦИ от всех значимых аспектов реализации ЖЦИ.

Вместе с тем аналитическое решение задачи (1)–(15) в общем случае не представляется возможным. Поэтому для практической реализации алгоритма (5)–(8) и (11)–(15) необходимо использование индустриально-специфических моделей, которые представят функции  $F(\cdot)$ ,  $\varphi(\cdot)$ ,  $h(\cdot)$  и  $c_i(\cdot)$  и отразят сложные взаимосвязи между характеристиками состояний ЖЦИ  $x(\cdot)$ , принимаемых управленческих решений  $u(\cdot)$  и неопределённых факторов  $\omega(\cdot)$ , а также их влияние на эффект ЖЦИ  $\varphi(\cdot)$ . Такие модели обеспечат быстрое получение численных значений  $F(\cdot)$ ,  $\varphi(\cdot)$ ,  $h(\cdot)$  и  $c_i(\cdot)$  при различных сценариях и позволят применить предложенные алгоритмы (5)–(8) и (11)–(15), графическая метафора этих алгоритмов приведена на рис. 4.

И наконец, перечислим в виде единого списка все рассмотренные ранее условия оптимизации управления ЖЦИ – условия, при которых предложенный подход остаётся математически строгим.

- Гипотеза рационального поведения сотрудников РП – предположение, что субъект с учётом всей имеющейся у него информации выбирает действия, которые приводят к наиболее предпочтительным для него результатам деятельности.

- Предположение о взаимной однозначности технологических функций РП относительно действий субъектов и результатов их предшественников в текущем периоде или предположение о полной наблюдаемости действий субъектов со стороны вышестоящего управляющего центра.

- Предположение о взаимной однозначности технологических функций РП относительно действий субъектов и результатов их предшественников в текущем периоде или предположение о полной наблюдаемости действий субъектов со стороны вышестоящего управляющего центра.

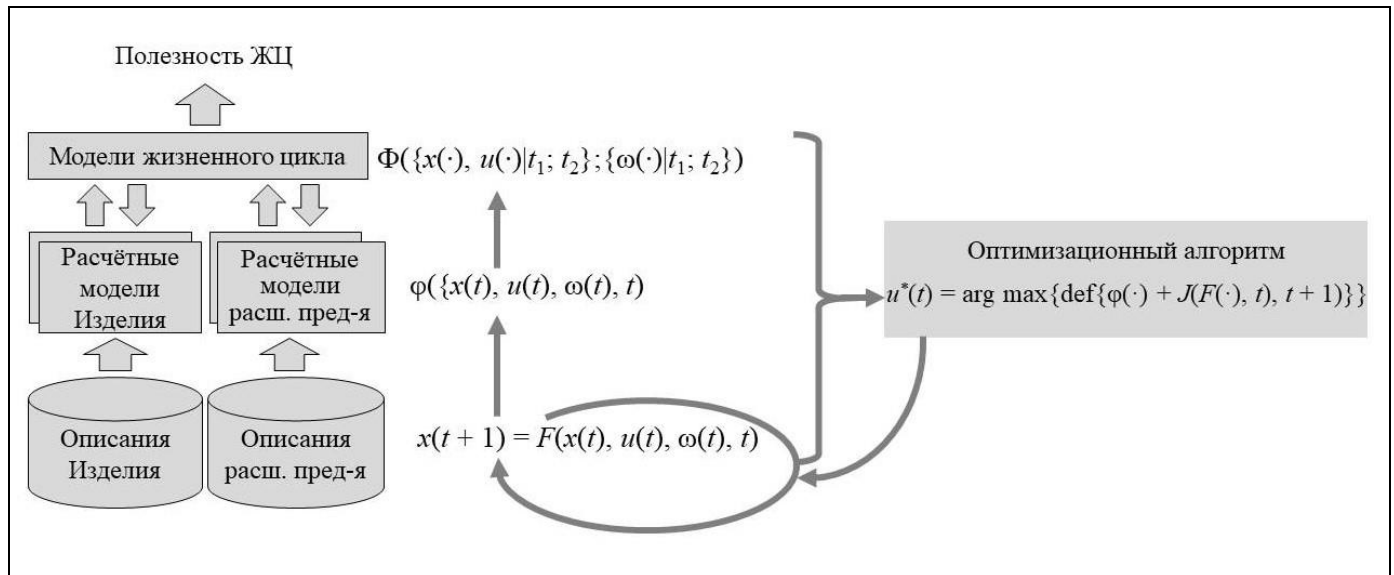


Рис. 4. Логика реализации оптимизационного алгоритма

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

### ИНСТРУМЕНТ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЖЦИ

В заключение перечислим полученные ранее результаты.

- Сформулирована математически строгая задача оптимального управления жизненными циклами сложных изделий аэрокосмической, энергетической, ядерной, транспортной и другой сложной техники, капитальных объектов и систем энергетики, телекоммуникаций, транспорта, сельского хозяйства, сырьевых и других отраслей, а также информационно-технологических систем.

- Предложен формальный алгоритм решения задачи оптимального управления.

- Предложен практический способ применения алгоритма решения задачи на практике, основанный на сценарном подходе, перечислены условия оптимизации управления ЖЦИ – условия, при которых оптимизация возможна.

Данные результаты фактически составляют *инструмент оптимального управления ЖЦИ*.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *The Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK) v. 1.2* / Ed. by Pyster A., Olwell A. (eds). – Hoboken: The Trustees of the Stevens Institute of Technology, 2013. – <http://www.sebokwiki.org> просмотрен 29-08-2021.
2. *ISO/IEC/IEEE 15288:2015. Systems and Software Engineering – System Life Cycle Processes*.
3. *Новиков, Д.А. Кибернетика: Навигатор. История кибернетики, современное состояние, перспективы развития* – М.: Ленанд, 2016. – 160 с. [Novikov, D.A. *Kibernetika: Navigator*.

*Istoriya kibernetiki, sovremennoe sostoyanie, perspektivy razvitiya* – Moscow: Lenand, 2016. – 160 s. (In Russian)]

4. *Перегудов, Ф.И. Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ* – М.: Высшая школа, 1989. – 320 с. [Peregudov, F.I. *Tarasenko, F.P. Vvedenie v sistemnyi analiz*. – Moscow: Vysshaya shkola, 1989. – 320 s. (In Russian)]
5. *ГОСТ Р 54871-2011. Проектный менеджмент. Требования к управлению программой*. [GOST R 54871-2011. *Proektnyi menedzhment. Trebovaniya k upravleniyu programmoi*. (In Russian)]
6. *ГОСТ Р 56136-2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения*. [GOST R 56136-2014. *Upravlenie zhiznennym tsiklom produktsii voennogo naznacheniya. Terminy i opredeleniya*. (In Russian)]
7. *Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем*. – М.: Мир, 1973. – 344 с. [Mesarovich, M., Mako, D., Takahara, I. *Teoriya ierarkhicheskikh mnogourovnevnykh sistem*. – Moscow: Mir, 1973. – 344 s. (In Russian)]
8. *Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа*. – М.: Наука, 1981. – 488 с. [Moiseev, N.N. *Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza*. – M.: Nauka, 1981. – 488 s. (In Russian)]
9. *Rebovich, G. Enterprise Systems Engineering: Advances in the Theory and Practice* / Rebovich, G., White, B. (Eds). – Boca Raton: CRC Press, 2011. – 459 p.
10. *Farr, J.V. Systems Life Cycle Costing: Economic Analysis, Estimation, and Management (Engineering Management)*. 1st Edition. – CRC Press, 2011. – 316 p.
11. *Gupta, Y., Chow, W.S. Twenty-Five Years of Life Cycle Costing Theory and Application: A Survey* / *The Intern. Journal of Quality and Reliability Management*. – 1985. – Vol. 2. – P. 51–76.
12. *Leszczynski, Z., Jasinski, T. Comparison of Product Life Cycle Cost Estimating Models Based on Neural Networks and Parametric Techniques—A Case Study for Induction Motors*. – *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12, art. no. 8353. – P. 2 – 14. – DOI: 10.3390/su12208353.
13. *Liu, H., Gopalkrishnan, V., Ng, W.K., et al. An Intelligent System for Estimating Full Product Life Cycle Cost at the Early*





- Design Stage // Intern. Journal of Product Lifecycle Management. – 2008. – No. 2(2-3). – P. 96–113.
14. *Loyer, J.L.* A MBSE Probabilistic Framework for Preliminary Lifecycle Costing of Mechanical Products / J.L. Loyer, E. Henriques // INCOSE International Symposium. – Las Vegas, NV, 2014. – Vol. 24, iss. 1. – P. 182–195.
  15. *Oduyemi, O., Okoroh, M. and Dean, A.* Developing an artificial neural network model for life cycle costing in buildings. In: Raidén, A.B. and Aboagye-Nimo, E. (Eds). – Procs 31st Annual ARCOM Conference. – Lincoln, UK, 2015. – P. 843–852.
  16. *Wang, G., Roedler, G.J., Pena, M., Valerdi, R.A.* A Generalized Systems Engineering Reuse Framework and its Cost Estimating Relationship // INCOSE International Symposium. – Las Vegas, NV, 2014. – Vol. 24, iss. 1. – P. 274–297.
  17. *Captain, T.* Can we afford our own future? Why R&D programs are late and over-budget – and what can be done to fix the problem. – Deloitte Development LLC, 2009. – 28 p.
  18. *NASA Cost Estimating Handbook. Version 4.0.* – NASA Headquarters. Cost Analysis Division. – Washington, DC (US): National Aeronautics and Space Administration, 2015.
  19. *GAO Cost Estimating and Assessment Guide. Best Practices for Developing and Managing Capital Program Costs.* GAO-09-3SP. – United States Government Accountability Office. – Washington, D.C., 2009. – 440 p.
  20. *Holland, J.* Studying Complex Adaptive Systems // Journal of Systems Science and Complexity. – 2006. – Vol. 19(1). – P. 1–8.
  21. *North, M.* A Theoretical Formalism for Analyzing Agent-based Models // Complex Adaptive Systems Modeling, 2014. – Vol. 2, art. no. 3. – DOI: 10.1186/2194-3206-2-3. – <http://link.springer.com/article/10.1186/2194-3206-2-3>.
  22. *Rzevski, G., Skobelev, P.* Managing Complexity. – London: WIT Press, 2014. – 216 p.
  23. *Sanchez-Anguix, V., Tunali, O., Aydoğan, R., Julian, V.* Can Social Agents Efficiently Perform in Automated Negotiation? – Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, art. no. 6022. – <https://doi.org/10.3390/app11136022>.
  24. *Alagar, V.S., Periyasamy, K.* Calculus of Communicating Systems. In: Specification of Software Systems. in Computer Science. London: Springer, 2011. – [https://doi.org/10.1007/978-0-85729-277-3\\_15](https://doi.org/10.1007/978-0-85729-277-3_15).
  25. *Bergstra, J.* Process Algebra for Synchronous Communication / Information and Control. – 1984. – Vol. 60. – P. 109–137.
  26. *Hoare, C.* Communicating Sequential Processes. – New York: Prentice Hall, 1985. – 256 p.
  27. *Milner, R.* A Calculus of Communicating Systems. – Lecture Notes in Computer Science. – Heidelberg: Springer Verlag, 1980. – Vol. 92. – 171 p.
  28. *Estefan, J.* Survey of MBSE Methodologies. – Seattle, Wa: INCOSE, 2008. – 70 p. – [http://www.omg-sysml.org/mbse\\_methodology\\_survey\\_revb.pdf](http://www.omg-sysml.org/mbse_methodology_survey_revb.pdf).
  29. *The Oxford Handbook of the Economics of Networks.* – Oxford: Oxford University Press, 2016. – 856 p.
  30. *Jackson, M.* Social and Economic Networks – Princeton: Princeton University Press, 2010. – 520 p.
  31. *Бурков, В.Н., Горюдзе И.А., Ловецкий С.Е.* Прикладные задачи теории графов. – Тбилиси: ВЦ АН ГССР, 1974. – 232 с. [*Burkov, V.N., Gorydze, I.A., Lovetskii, S.E.* Prikladnyye zadachi teorii grafov. – Tbilisi: VTs AN GSSR, 1974. – 232 s. (In Russian)]
  32. *Голенко-Гинзбург, Д.И.* Стохастические сетевые модели планирования и управления разработками – Воронеж: Научная книга, 2010. – 284 с. [*Golenko-Ginzburg, D.I.* Stokhasticheskie setevye modeli planirovaniya i upravleniya raz-
  33. *Матвеев, А.А., Новиков Д.А., Цветков А.В.* Модели и методы управления портфелями проектов – М.: ИПУ РАН, 2005. – 206 с. [*Matveev, A.A., Novikov, D.A., Tsvetkov, A.V.* Modeli i metody upravleniya portfelyami proektov – М.: IPU RAN, 2005. – 206 s.]
  34. *Kelly, F., Yudovina, E.* Stochastic Networks. – Cambridge: Cambridge University Press, 2014. – 230 p.
  35. *Клейнер Г.Б.* Эволюция и модернизация теории предприятия // Экономическая трансформация и экономическая теория. 5-й Междунар. симпозиум по эволюционной экономике. – М.: ИЭ РАН., 2004. – 27 с. [*Kleiner, G.B.* Evolyutsiya i modernizatsiya teorii predpriyatiya // Ekonomicheskaya transformatsiya i ekonomicheskaya teoriya. 5-i Mezhdunar. simpozium po evolyutsionnoi ekonomike. – М.: ИЭ РАН., 2004. – 27 s. (In Russian)]
  36. *Возжаков А.В., Гитман М.Б., Столбов В.Ю.* Модели принятия коллективных решений в производственных системах // Управление большими системами. – 2015. – Вып. 58. – С. 161–178. [*Vozhakov, A., Gitman, M., Stolbov, Y.* Models of collective decision-making in production. – Large-Scale System Control. – 2015. – Iss. 58. – P. 161–178. (In Russian)]
  37. *Минцберг, Г.* Структура в кулаке: создание эффективной организации. Пер. с англ. под ред. Ю. Н. Каптуревского. – СПб.: Питер, 2004. – 512 с. [*Mintzberg, H.* Structure in Fives: Designing Effective Organizations. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1983. – 312 p.]
  38. *Adizes, I.* Managing Corporate Lifecycles: An updated and expanded look at the Corporate Lifecycles. – The Adizes Institute Publishing, 2004. – 460 p.
  39. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide).* 6<sup>th</sup> edition. – Project Management Institute, 2017. – 579 p.
  40. *Белов М.В., Новиков Д.А.* Модели деятельности. – М.: Ленанд, 2021. – 220 с. [*Belov, M.V., Novikov, D.A.* Modeli deyatel'nosti. – Moscow: Lenand, 2021. – 220 s. (In Russian)]
  41. *Белов М.В., Новиков Д.А.* Методология комплексной деятельности. – М.: Ленанд, 2018. – 320 с. [*Belov, M.V., Novikov, D.A.* Methodology of Complex Activity: Foundations of Understanding and Modelling. – Cham: Springer, 2020. – 223 p.]
  42. *ISO/IEC/IEEE 24748-1:2018.* Systems and software engineering – Life cycle management – Part 1: Guidelines for life cycle management.
  43. *Гермейер, Ю.Б.* Игры с непротивоположными интересами. – М.: Наука, 1976. – 327 с. [*Germeier, Yu.B.* Igra s neprotivopolozhnymi interesami. – М.: Nauka, 1976. – 327 s. (In Russian)]
  44. *Бурков, В.Н.* Основы математической теории активных систем. – М.: Наука, 1977. – 255 с. [*Burkov, V.N.* Osnovy matematicheskoi teorii aktivnykh sistem. – М.: Nauka, 1977. – 255 s. (In Russian)]
  45. *Новиков Д.А.* Теория управления организационными системами: 3-е изд. – М.: Физматлит, 2012. – 604 с. [*Novikov, D.A.* Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami: 3-e izd. – М.: Fizmatlit, 2012. – 604 s.]
  46. *Bolton, P., Dewatripont, M.* Contract Theory. – Cambridge: MIT Press, 2005. – 740 p.
  47. *Белов М.В.* Согласованное управление многоэлементными динамическими организационными системами. Ч. 1. Динамическая организационная система в составе одного центра и множества агентов // Проблемы управления. – 2020. – № 1. – С. 39–47. [*Belov, M.V.* Incentive-Compatible

- Control in Dynamic Multi-Agent Systems. Part 1. Contracts In Dynamic System With One Principal And Multiple Agents. – Control Sciences. – 2020. – No. 1. – P. 39–47. (In Russian)]
48. Белов М.В. Согласованное управление многоэлементными динамическими организационными системами. Ч. 2. Многоуровневая динамическая организационная система // Проблемы управления. – 2020. – № 2. – С. 36–46. [Belov, M.V. Incentive-Compatible Control in Dynamic Multi-Agent Systems. Part 2. Contracts in Dynamic Hierarchical Multi-Agent System. – Control Sciences. – 2020. – No. 2. – P. 36–46. (In Russian)]
49. Belov, M., Novikov, D. Optimal Enterprise. Structures, Processes and Mathematics of Knowledge, Technology and Human Capital. – CRC Press, 2021. – 344 p.
50. Белов М.В., Новиков Д.А. Управление жизненными циклами организационно-технических систем. – М.: Ленанд, 2020. – 384 с. [Belov, M.V., Novikov, D.A. Upravlenie zhiznennymi tsiklami organizatsionno-tehnicheskikh sistem. – Moscow: Lenand, 2020. – 384 s. (In Russian)]
51. Dewar, J. Assumption Based Planning a Tool for Reducing Avoidable Surprises. – Cambridge: Cambridge University Press, 2002. – 248 p.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии чл.-корр. РАН Д.А. Новиковым.*

*Поступила в редакцию 25.09.2021,  
Принята к публикации 22.11.2021.*

**Белов Михаил Валентинович** – д-р техн. наук, Сколковский институт науки и технологий, г. Москва,  
✉ mbelov59@mail.ru.

## OPTIMAL CONTROL OF THE LIFE CYCLE OF COMPLEX SYSTEMS

M.V. Belov

Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

✉ mbelov59@mail.ru

**Abstract.** This paper considers optimal decision-making during the life cycle management of complex systems of aerospace, power, nuclear, transport, and other complex entities, capital objects and systems of the power, telecommunications, transport, agriculture, raw material, and other industries as well as information systems. The system-wide peculiarities of the life cycles of complex systems are identified and analyzed. Qualitative formalisms to represent life cycles are proposed; mathematical foundations of the problem of their optimal control are described. A mathematically rigorous optimal control problem for the life cycle of complex products, objects, and systems is stated. An algorithmic solution of the optimal control problem based on the formalisms of dynamic programming is developed. A practical way of applying this algorithm based on the scenario approach is proposed; the conditions of life cycle control optimization (under which optimization is possible) are listed. The results presented below are an optimal control tool for the life cycle of complex products, objects, and systems.

**Keywords:** optimal control; dynamic programming; life cycles of complex products, objects, and systems.