

УДК 519.876.2

С.И. БЕЗДЕНЕЖНЫХ
С.Г. БРАЙТКРАЙЦ, доктор
технических наук, старший
научный сотрудник

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЯМИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ПРОДУКЦИИ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Рассмотрены адаптивные подходы решения задачи управления требованиями в системах управления жизненным циклом вооружения основанных на эволюционно-технологической модели. Предложен алгоритм структурной эволюционной адаптации требований.

Ключевые слова: инновации; разработка технологий; теория информации; энтропия; эпистемология.

1. Управление требованиями в системе управления жизненным циклом продукции военного назначения

В соответствии с ГОСТ Р 56135-2014 «Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Общие положения» *управление требованиями* осуществляют в целях обоснования, детализации, нормирования и формального описания общих и специальных требований к изделию и его составным частям с учетом их взаимосвязей, а также контроля выполнения требований на этапах и стадиях жизненного цикла.

Управление требованиями осуществляют с использованием информационных технологий, позволяющих представить всю совокупность требований к продукции (или их часть) в виде интегрированной информационной модели, пригодной для решения поставленных выше задач.

Научно-методический аппарат управления требованиями наряду с методами, обеспечивающими управление конфигурацией разрабатываемых комплексов, управление проектами, управление номенклатурой устаревающих комплектующих изделий комплекса и его составных частей, а также информационные технологии поддержки жизненного цикла являются составной частью научно-методического аппарата управления жизненным циклом (ЖЦ) продукции.

Для целей управления ЖЦ используют его общую модель (разновидности этой модели), определяющую последовательность и временные рамки процессов, необходимых для реализации ЖЦ, обеспечения и контроля характеристик задаваемой, проектируемой, изготавливаемой и эксплуатируемой продукции. Указанная модель рассматривает ЖЦ как цикл существования объекта от замысла до утилизации.

В настоящее время распространены и широко применяются каскадная, итерационная и эволюционная модель ЖЦ. В [1] предложена новая эволюционно-технологическая модель ЖЦ развития вооружения, основанная на постепенном многошаговом процессе повышения уровня знаний в определенных научно-технологических областях. Идея, лежащая в основе этой модели, состоит в том, что образец следует разрабатывать по принципу приращений полезных качеств объекта так, чтобы разработчик мог использовать данные и знания, полученные при разработке более ранних версий изделия или подобных систем.

В контексте эволюционно-технологической модели ЖЦ требования рассматриваются как часть полного описания изделия, представляемого в виде структурных функциональной, технологической и физической моделей (рисунок 1). Также как и в системном проектировании [2], изменения, приводящие к эволюции, осуществляются последовательной трансформацией этих моделей, главенствующей из которых является технологическая. Она стремится адаптироваться к условиям окружающей среды на основе доступных в рассматриваемой популяции (сегменте) технологий.

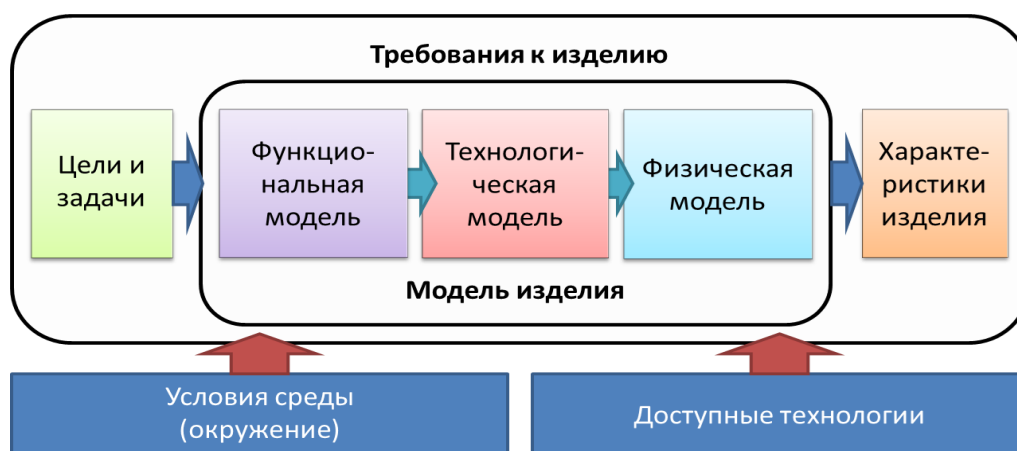


Рисунок 1 – Структурная модель изделия

Требования отражают представления заказчика о назначении, функциях, составе и параметрах изделия, так чтобы оно обладало достаточной эффективностью. При этом учитывается тот факт, что представления могут быть ошибочны и потребуют изменений. То есть весь набор требований не может быть полностью проанализирован и сформулирован заранее, до начала выполнения НИОКР. Поэтому предполагается, что требования устанавливаются частично и в ходе выполнения НИОКР уточняются в каждой последующей конструкции разрабатываемого комплекса.

Из состава требований выделяются требования назначения и задачи, выполняемые изделием. Главным критерием при принятии изделия на вооружение (снабжение) становится способность выполнения изделием своих задач, а не соответствие всем требованиям технического задания.

С использованием структурных функционально-технологических схем происходит мониторинг возможностей популяции (аналогичных комплексов), состояния базовых и критических технологий, а также условий функционирования для каждого типа вооружения.

Управление требованиями происходит не в рамках создания отдельного образца вооружения (программы), а в ретроспективе развития типажа вооружения.

2. Этапы управления созданием сложного технического объекта

Как правило, управление сложным объектом включает следующие этапы [3] (рисунок 2): формулировка целей управления; выделение объекта управления; структурный синтез модели; параметрический синтез модели; синтез управления; реализация управления.

На первом этапе формулируют задачи, которые должно решать изделие (постановка целей управления). Заказчик (субъект управления) формулирует задачи в соответствии со своим пониманием того, как изделие должно применяться. Условия среды, в которой функционирует изделие, представляются как конечный набор параметров $S = (s_1, \dots, s_e)$. Эти параметры составляют фазовое пространство ситуаций $\{S\}$. Каждая точка этого пространства определяет конкретную ситуацию, сложившуюся вокруг изделия.

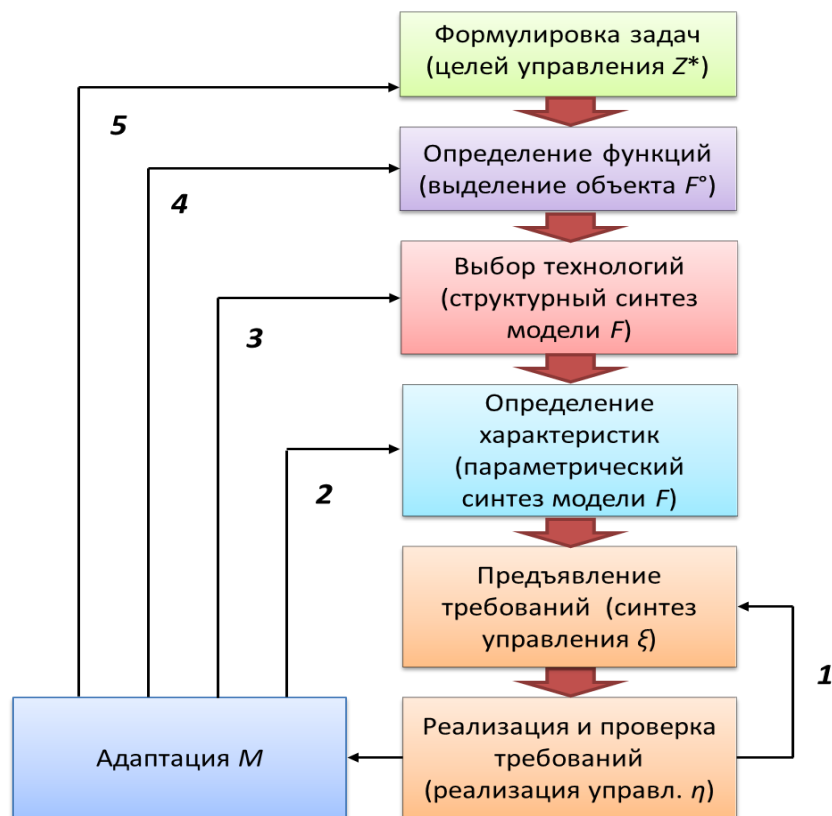


Рисунок 2 – Последовательность этапов управления сложным объектом

Изменения среды приводят к соответствующей эволюции ситуации, что определяет движение точки S вдоль траектории фазового пространства. В экономике эти изменения принято называть «рыночной тягой» (market pull) или «тягой потребностей» [4].

Заказчик формулирует цели управления в виде перечня задач, которые должно решать изделие $Z^* = (z_1, \dots, z_k)$, где каждой целевой параметр z_i однозначно определяется положением точки S . Например, для беспилотного летательного аппарата ближнего действия такими задачами могут являться ведение оптикоэлектронной разведки (z_1), корректировка огня артиллерии (z_2), контроль маскировки войск (z_3). Каждая из задач тесно связана с состояниями среды, которую хочет сформировать командир: осведомленность о действиях противника, поражение объектов противника, обеспечение скрытности действий.

Второй этап управления заключается в выделении объекта управления из среды. Задача заключается в том, чтобы для сформированного множества целей $\{Z^*\}$, исходя из имеющихся ресурсов R , определить такой вариант изделия, который по критерию достижимости этих

целей окажется лучше всех. Другими словами, для каждой цели, определяют способ ее достижения – функции изделия, обеспечивающие решение стоящих перед изделием задач. В результате строится функциональная модель изделия.

Каждая из целей (z_1, z_2, z_3) предполагает выполнение определенного алгоритма: взлет (f_1), полет в район выполнения боевой задачи (f_2), выполнение боевой задачи (f_3), полет из района выполнения боевой задачи (f_2), выполнение посадки (f_4). При этом задачи z_1 и z_3 могут быть решены в режиме автономного полета по предварительной программе (f_{31}), однако решение задачи z_3 связано с получением развединформации в режиме времени, близкому к реальному, и постоянной корректировкой полетной программы. В связи с этим к функциям комплекса необходимо добавить корректировку программы полета (f_{32}), передачу разведданных в ходе полета (f_{33}).

Третий этап включает структурный синтез модели. Под структурой понимают форму зависимости F состояния изделия Y от его неуправляемого (X) и управляемого (U) входов $Y = F(X, U)$. Эта зависимость определяется некоторым алгоритмом, который задает последовательность преобразования входной информации X и U в выходную Y . Другими словами, определяется, каким образом выделенный из среды в функциональную модель объект должен реализовывать эти функции.

Этот порядок обусловлен возможностями доступных технологий. Например, реализация функций полета (f_2) может быть осуществлена выбором одной из технологий построения летательного аппарата – самолетной, мультикоптерной, смешанной схемы (конвертоплана). Функция передачи данных может быть реализована с использованием технологий спутниковой связи, УКВ связи, лазерных систем передачи данных и пр. Выбранная схема задает структуру последующих требований. В результате формируется структурная функционально-технологическая схема (СФТС) изделия.

Следующий *четвертый этап* состоит в параметрическом синтезе модели $Y = F(X, U, C)$, т.е. определении ее параметров $C = (c_1, \dots, c_k)$. Определение параметров зависит не только от сформированной СФТС, но в значительной мере обуславливается реализацией выбранных технологий в конкретной физической модели. Так, технология передачи

данных в УКВ диапазоне позволяет организовать связь с БПЛА на дистанции до 300 км, однако другие ограничения на конструкцию летательного аппарата могут снизить этот параметр, например, до 40 км.

Синтез управления *на пятом этапе* связан с принятием решения о том, каким должно быть управление U , чтобы в точке S пространства ситуаций достигнуть применением изделия заданной цели управления Z^* .

Это решение базируется на сформированной модели изделия F , заданных целях Z^* , полученной информации о состоянии среды X и объекта Y . Решение также учитывает выделенные ресурсы R , которые представляют собой ограничения, накладываемые на управление U . Синтез управления заключается в решении вариационной задачи, которая формируется путем соответствующих преобразований и свертки критериев качества управления.

Принятие решения на создание комплекса с БПЛА заключается в разработке тактико-технического задания (ТТЗ) на опытно-конструкторскую работу и включении соответствующих работ в Программу вооружения. Акт управления здесь заключается в разработке и предъявлении требований. Требования ТТЗ являются тем управляющим воздействием U , программой, которая должна привести изделие и систему требований в новую точку среды S .

Заключительный *шестой этап* состоит в реализации управления. Реализация управления связана с применением управляющего воздействия, полученного на предыдущем этапе, т.е. с использованием сформированных требований ТТЗ в ходе выполнения опытно-конструкторской работы и проведением последующих государственных и войсковых испытаний.

Если управление реализовано, а на испытаниях выясняется, что его цель не достигнута, приходится возвращаться к одному из предыдущих этапов. Как правило, контур управления, который используется при управлении объектами, замкнут на этап синтеза управления (стрелка 1 на рисунке 2). На нем формируется новое управляющее воздействие, отражающее новую сложившуюся в среде ситуацию.

Известно, что задача формирования требований к сложной системе вооружения может не иметь единственного решения. Однако даже если допустить существование единственных оптимальных требований, то система управления требованиями должна реализовать та-

кое воздействие, чтобы достичь их в условиях высокой динамики развития технологий и существенной продолжительности цикла управления. Это приводит к необходимости расширения приведенного выше цикла управления за счет введения этапа *адаптации*, т.е. коррекции всех этапов управления. Адаптация здесь выступает в роли глубокой обратной связи, улучшающей процесс управления сложной системой.

3. Виды адаптации требований

Адаптация как процесс приспособления системы управления требованиями к специфическим свойствам изделия и технологий имеет несколько иерархических уровней, соответствующих рассмотренным ранее этапам управления сложным объектом.

Параметрическая адаптация связана с коррекцией и подстройкой параметров C модели. Необходимость в такого рода адаптации возникает ввиду изменения характеристик управляемого объекта. Эти изменения связаны с эволюцией возможностей *базовых технологий*. Например, увеличение емкости LiPo батарей на 10% позволят увеличить продолжительность полета БПЛА с 50 до 55 мин.

Структурная адаптация требуется тогда, когда коррекция параметров не позволяет сформировать адекватную модель объекта. Если в процессе эволюции объекта его структура изменяется, то такая ситуация складывается постоянно. Указанное обстоятельство приводит к необходимости адаптации структуры модели и реализуется методами структурной адаптации. Адаптация структуры обычно вызвана созданием новых *критических технологий*, качественно изменяющих состав технологий, которые могут быть использованы при разработке изделия. Так, например, появление технологии графитовых аккумуляторов (в несколько раз более емких и не чувствительных к температуре) структурно заместит технологию повсеместно применяемых в БПЛА LiPo батарей.

Адаптация объекта производится, когда структурная адаптация модели не позволяет повысить эффективность функционирования (например, какие-то цели управления не достигаются). Эта адаптация связана с изменением объекта, т.е. пересмотром границы, разделяющей объект и среду. Скажем, задача целеуказания при корректировке артогна решалась в диалоговом режиме посредством телефонной связи, однако такой разведывательно-ударный контур фактически не позволяет обслу-

живать движущиеся цели. Решением является изменение функциональной модели и реализация либо функции лазерного целеуказателя цели, либо функции автоматической передачи координат на орудие.

При этом следует учитывать, что расширение объекта приводит, как правило, к повышению его управляемости, но требует дополнительных ресурсов для реализации управления (т. е. последующего структурного и параметрического синтеза).

Адаптация целей управления осуществляется, когда все предыдущие меры неэффективны. В этом случае определяется новое множество целей $\{Z * \}'$, достижение которых обеспечивается созданной системой управления. Ввиду того что объект эволюционирует (вместе со средой), изменяется и множество достигаемых им целей. Важно знать, какие именно цели могут быть поставлены перед системой управления.

В результате этого процесса фактически адаптируется субъект, который изменяет свои потребности так, чтобы они удовлетворялись путем реализации нового множества целей, достигаемых системой управления в данный период времени. Поэтому адаптацию целей иногда называют адаптацией потребностей субъекта.

Как видно, все указанные выше четыре уровня адаптации системы управления решают одну и ту же задачу – обеспечение достижения системой поставленных целей.

Параметрическая и структурная адаптация обычно являются результатами эволюции технологий и отражают принятую в экономике модель «технологического толчка» (technology push). Она представляется в виде причинно-следственной цепочки, в начале которой находятся фундаментальные исследования, а в конце – производство и распространение инноваций.

Верхние уровни – адаптация объекта и адаптация целей – отражают модель «рыночной тяги» или «тяги потребностей» (market pull). Толчком для создания инноваций в этой модели считается выявленная потребность, а НИОКР становится последующим этапом, позволяющим удовлетворить запросы заказчика.

Каждый вышестоящий уровень адаптации требует для реализации времени в несколько раз больше, чем предыдущий, т. е. работает значительно медленнее. Верхние уровни адаптации должны включаться лишь в том случае, если нижние не могут эффективно отследить изме-

нения, произошедшие в объекте. В рамках развития системы вооружения это означает, что нет смысла разрабатывать новый образец, пока не исчерпан модернизационный потенциал существующих изделий.

Среди рассмотренных возможных видов адаптации требований выделяется структурная адаптация как наиболее соответствующая параметрам эволюционно-технологической модели жизненного цикла. Методы структурной адаптации подразделяют на альтернативные и эволюционные [5]. Альтернативная адаптация отличается тем, что множество E_W допустимых структур W невелико и содержит две – пять альтернативных структур. Эволюционная адаптация позволяет решать задачи на неограниченном множестве допустимых структур.

4. Алгоритм структурной эволюции требований

Задача адаптации возникает в том случае, если отсутствует информация, необходимая для оптимизации объекта. В целом адаптация является частным случаем управления и заключается в изменении управляемого фактора U таким образом, чтобы поддерживать некие заданные функционалы объекта в требуемом состоянии независимо от действия всякого рода внешних и внутренних воздействий. На его структуру основное влияние оказывают целевые ограничения Z^* и сам объект. Цель адаптации заключается в решении задачи

$$Q(U) \rightarrow \min_{U \in S} \Rightarrow U^*, \quad (1)$$

где $S: \begin{cases} H(U) \geq 0, \\ G(U) = 0, \end{cases}$

$Q(U)$ – минимизируемые критерии;

$H(U)$ – критерии неравенства;

$G(U)$ – критерии равенства.

Задачи такого рода при заданных модели F объекта F° и распределении $p(X)$ называют задачами стохастического программирования, которые отличаются тем, что минимизируемые функционалы и функционалы ограничений являются стохастическими, т.е. математическими ожиданиями [3]. Кроме этого, сложность задачи адаптации обусловлена еще и тем, что нет точной модели объекта F и отсутствует достоверная информация о распределении $p(X)$ состояний среды X . Более того, эти параметры также изменяются во времени непредсказуемым образом.

Одним из методов решения задач такого рода является *эволюционная адаптация*. По сути, эволюционная адаптация моделирует процесс биологической эволюции. Этот алгоритм отличается введением незначительных вариаций структуры δW , моделирующей случайные мутации, которые также незначительно изменяют эффективность Q адаптируемого объекта. При этом выполняется условие Гёльдера-Липшица:

$$|Q(W + \delta W) - Q(W)| \leq \mu \|\delta W\|, \quad (2)$$

где $\mu = const$, а под нормой вариации структуры $\|\delta W\|$ следует понимать число, характеризующее степень изменения структуры этой вариацией δW .

С точки зрения эволюционно-технологической модели жизненного цикла для описания требований к изделию нормой такой вариации может служить количество изменяемых технологий.

«Мутации» структуры δW и правило отбора, позволяющее выявлять ее благоприятные вариации, образуют механизм эволюции, с помощью которого строится последовательность улучшающихся структур

$$W_0 \rightarrow W_1 \rightarrow \dots \rightarrow W_N \rightarrow W_{N+1} \rightarrow \dots, \quad (3)$$

обладающих свойством

$$W_N \succ W_{N+1} (N = 1, \dots), \quad (4)$$

где знак предпочтения имеет смысл:

$$Q(W_{N-1}) > Q(W_N). \quad (5)$$

Рассмотрим один из возможных алгоритмов структурной эволюции требований. Пусть структура требований W в ходе их НИОКР изменяется, причем эти изменения, т. е. вариации (мутации) δW структуры W , принадлежат заданному множеству Ξ возможных изменений:

$$\delta W \in \Xi. \quad (6)$$

Множество Ξ определяется ограничениями H и G так, что при соблюдении (6) выполняются условия

$$S: \begin{cases} H(W + \delta W) \geq 0, \\ G(W + \delta W) = 0, \end{cases} \quad (7)$$

если $H(W) \geq 0$ и $G(W) = 0$, где H и G – заданные функционалы ограничений.

Таким образом, будем считать, что множество S вариаций δW определено и задача состоит в оптимизации заданного функционала задач, определенного на структуре W :

$$Q(W) \rightarrow \min_{W \in S}. \quad (8)$$

Процесс эволюции структуры требований W происходит поэтапно. На первом этапе порождаются измененные (мутировавшие) структуры:

$$W_{0i} = W_0 + \delta W_i (i = 1, \dots, k_0), \quad (9)$$

где δW_i – i -я случайная вариация (мутация) структуры, ограниченная (6), а число новых структур k_0 является параметром, который назначается исходя из конкретных условий эволюции.

Новые требования (9) оцениваются по критерию эффективности

$$Q_{0i} = Q(W_{0i}) (i = 1, \dots, k_0). \quad (10)$$

После этого происходит процедура отбора, в ходе которого структуры с большим значением минимизируемого функционала Q выбывают, в результате чего на следующий этап эволюции остается q_0 лучших структур. Можно воспользоваться алгоритмом вероятностного отбора, при котором требования, имеющие большое значение минимизируемого критерия, выбывают с большей вероятностью, чем требование с меньшим критерием. Например, вероятность выбывания для $Q > 0$ может быть определена так:

$$p_{0i} = \frac{Q_{0i}}{\sum_{i=1}^{k_0} Q_{0i}}, (i = 1, \dots, k_0). \quad (11)$$

При этом процесс выбора выбывающих структур завершается тогда, когда осталось q_0 структур. Может сложиться ситуация, когда лучшая из новых сформированных структур хуже исходной W_0 . В таком случае логично сохранить W_0 на следующий этап эволюции.

На втором этапе эволюции каждая из оставшихся структур изменяется аналогично (9) и дает столько вариаций, что их общее число вместе с предшествующими равно k_1 . Последующий отбор оставляет на следующий этап эволюции q_1 структур. Этот процесс повторяется снова и снова.

В результате такой эволюции алгоритм будет стремиться отбирать структуры с необходимым малым значением критерия качества, среди которых находится и оптимальная структура. Случайность вариации δW обеспечивает сходимость процесса эволюции к оптимальному решению W^* .

Параметры k_i и q_i ($i = 0, 1, \dots$) позволяют изменять численность множества рассматриваемых структур и задают критерий отбора. Так, при $q = 1$ на следующий цикл эволюции оставляется одна лучшая структура. Такая стратегия эффективна при наличии одного экстремума

у задачи (8). Однако, как было отмечено выше, задача управления требованиями многоэкстремальна и требует $q_i > 1$ и тем больше, чем сложнее поиск глобального экстремума. Численность популяции k_i также влияет на эффективность процесса эволюции. При большем k_i эволюция имеет глобальную тенденцию, но идет медленнее, так как требует значительных ресурсов. Значение этих параметров следует подобрать эвристически на экспериментальных данных, учитывая их специфику, цели и результаты.

Подводя итоги, следует отметить, что поскольку задача управления требованиями в системе управления жизненным циклом продукции военного назначения не может быть решена методами стохастического программирования, выход может быть найден в применении адаптационных методов. Среди рассмотренных возможных видов адаптации подходящей выглядит структурная адаптация, как наиболее соответствующая параметрам эволюционно-технологической модели жизненного цикла. При этом предложенный алгоритм эволюционной адаптации рассматривается без параметрической подстройки. Параметрическая адаптация, если она необходима для повышения эффективности моделируемой структуры, может быть введена перед этапом эволюционного отбора и реализована с помощью существующих параметрических методов.

Список использованных источников

1. Буренок В.М., Ивлев А.А., Корчак В.Ю. Развитие технологий XXI века: проблемы, планирование, реализация. Тверь: ООО «Купол», 2009. 624 с.
2. Леонов А.В., Пронин А.Ю. Проблемы и пути создания высокотехнологичной продукции в условиях диверсификации предприятий оборонно-промышленного комплекса. М.: ИНФРА-М, 2019. 351 с.
3. Растрингин Л.А. Адаптация сложных систем. Рига: Зинатне, 1981. 375 с.
4. Харгадон Э. Управление инновациями: опыт ведущих компаний / Пер. с англ. А.Н. Свирид; под ред. Н.А. Левинской. М.: Вильямс, 2007. 304 с.
5. Канчавели А.Д. Структурная адаптация организационно-экономической системы в условиях современного предпринимательства // Российское предпринимательство. 2002. Том 3. №4. С. 67-76.