

УДК 51-77

Формализация представления целенаправленно развивающихся процессов

Скопин И.Н. (Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирский государственный университет)

Обсуждаются возможности изучения процессов на основе представления их с помощью спиралей развития. Вводятся геометрические понятия, связанные со спиралью, позволяющие моделировать развитие проекциями траекторий на различные плоскости пространства факторов.

Ключевые слова: *целенаправленный процесс, траектория развития, факторы развития, критерий развития; S-кривая, улитка развития, моделирование.*

1. Введение

Моделирование развития является весьма актуальным методом изучения в самых разных прикладных областях. От точности прогноза естественных, социальных и иных процессов зависит качество управления, надежность работы проектируемых приборов и агрегатов, с одной стороны, а с другой — успешность выполнения социальных, экономических и иных проектов. В то же время, инструментальная поддержка моделирования развития как средства управления соответствует потребности далеко не всегда. Так, вполне удовлетворительно представляют развитие модели, основанные на выявленных закономерностях, которые описываются математическими методами.¹ Однако, если процесс развивается под воздействием разнонаправленных факторов, механическое соединение закономерностей, связанных с каждым из них, неадекватно реальному поведению. Это особенно заметно, когда исследователь имеет дело с так называемыми открытыми системами, при изучении которых дифференциальные уравнения, статистические зависимости и иные соотношения дают лишь ориентиры, помощью которых можно принимать те или иные разумные решения.

Для класса управляемых процессов, которые характеризуются наличием цели развития, часто рекомендуется использовать так называемые S-кривые. Этот метод предлагается, например, в документе международной организации Project Management Institute «Руководство к своду знаний по управлению проектами (Руководство РМВОК®)», где он отнесен к разряду «лучших практик» (The Best Practices) проектного менеджмента. Вот

¹ Очень точно представил этот вопрос еще в 1997 на семинаре при Президентском совете РФ В.И. Арнольд в своем докладе, посвященном практическому использованию так называемых “жестких” и “мягких” математических моделей [1].

как определяется S-кривая в РМВОК: «Это график зависимости от времени итоговых затрат, трудозатрат, процента выполнения работ или других количественных показателей. Название получено от характерной S-образной (более пологой в начале и конце и более крутой в середине) формы кривой развития проекта, имеющего плавное начало, более быстрое развитие и плавное окончание. Термин также используется для обозначения кривой распределения вероятности, получаемой в результате моделирования, которое применяется в количественном анализе рисков» [2]. Использование S-кривых для анализа развития процессов хорошо себя зарекомендовало в самых разных исследовательских областях. Существуют различные методики их построения. Но, к сожалению, все они приводят лишь к качественным оценкам [3]. Слабое место S-кривых как аналитического инструмента в том, что они не дают средств, которые позволили бы выявлять влияние отдельных факторов на развитие процессов.

В работе [4] была предложен подход к анализу экономических систем, который за счет специальных построений позволяет преодолеть указанный недостаток S-кривых. Его идея связана с использованием тройной спирали развития, отражающей главные факторы эффективности как экономики в целом, так и ее отраслей. Проекция спирали на плоскость фиксированного времени образует улитку, разбиваемую на секторы, которые представляют в модели развития последовательность фаз процесса. Для каждой фазы в множестве факторов, влияющих на развитие процесса, выявляются те, влияние которых, наиболее существенно. Эта модельная структура дает возможность анализа многофазных процессов в разных аспектах, используя общие для всех фаз критерии оценки качества развития. При моделировании экономических процессов такие критерии в конечном итоге сводятся к стоимостным характеристикам и инвестиционной привлекательности проектов.

Моделирование физических процессов, на которых основывается функционирование приборов и агрегатов реальных производств также может рассматриваться как развитие, и во многих случаях для них также могут быть выполнены построения, аналогичные спирали развития.

Идея улитки весьма продуктивна и может быть распространена на исследования в других областях, для которых понятие развития процессов рассматривается как одно из ключевых положений. Улитка привлекательна для так называемых междисциплинарных исследований, когда приходится совместно моделировать системы влияющих друг на друга автономных процессов, поведение которых подчинено разнородным правилам и законам. В этом случае она имеет хорошие перспективы по отношению к решению сложной задачи согласования поведения автономных моделей процессов системы, что весьма актуально, например, при проектировании и разработке приборов и устройств.

Обязательным условием адекватности использования улитки является корректное определение общего для модели критерия качества развития системы, которому подчинены критерии моделей составляющих процессов.

В связи с тем, что потребность изучения таких систем весьма высока, представляется важным точное описание подхода, которое в дальнейшем можно конкретизировать для тех или иных исследований. В основе такого описания лежат понятия, характеризующие целенаправленно развивающийся процесс как геометрический объект в пространстве факторов, называемый далее конусом траекторий. Целенаправленность в этих построениях связывается с соответствием траектории критерию развития, который рассматривается в качестве аналога S-кривой. Построение проекций траекторий на различные плоскости отражает картину допустимого и оптимального поведения процесса во времени.

В последующих разделах дается мотивация предлагаемого подхода, формально определяются только что обозначенные понятия, а также процедуры оперирования, необходимые при построении моделей развития и анализе их использования. Возможности подхода иллюстрируются условными примерами, относящимися к области проектирования приборов и устройств. Предлагаемые материалы рассматриваются как концептуальная основа программного инструментария поддержки исследований моделей развития. Необходимыми элементами поддержки являются средства геометрического представления процессов как объектов многомерного пространства факторов, а также функции задания параметров этих объектов и извлечения информации о связях факторов развития с геометрией. В заключении подводятся итоги и намечаются перспективы дальнейшего исследования.

Работа поддержана грантом РФФИ № 14-07-0048.5

2. Критерий и траектории развития

Процессы как объекты моделирования используются в различных исследованиях и технологиях очень давно. В соответствии с направлениями использования выделяются различные аспекты процессов. Довольно распространенным является бихевиористское понимание процесса как черного ящика, перерабатывающего входную информацию и ресурсы в выходные продукты. Эта позиция позволяет говорить о целенаправленности развития процесса производства некоего продукта и определять системы связанных между собой процессов, изучать их взаимодействия с системных позиций. Поведение таких систем часто представляют в виде интегрирующего процесса со своими входами и

выходами. Рассматривая выходные продукты системы в качестве цели ее развития, можно ставить задачи оптимизации интегрирующего процесса.

К сожалению, такая позиция не может быть принята для всех систем хотя бы потому, что цель интегрирующего процесса не складывается из целей составляющих процессов. Не менее существенно, что желательные цели меняются со временем, а зачастую просто не определены для системы в целом. Это характерно, в частности, для развивающихся процессов, для которых последствия реализации идеи внедрения результатов разработки часто не предсказуемы. Точнее было бы задавать критерии развития, характеризующие текущие предпочтения и отражающие прогнозы развития.

Формально *критерий развития* можно рассматривать как функцию (функционал) F , зависящую от времени и совокупности *факторов* a_1, \dots, a_n , которые влияют на процесс, и на которые процесс влияет, вырабатывающую значения из множества с отношением полного порядка. Для определенности далее в качестве области значений F рассматривается \mathbf{R} .

Зависимость критерия от времени характерна для развивающихся процессов. Она практически всегда проявляет себя при переходе от одной фазы процесса к другой. Определяя фазовые переходы как смену факторов, наиболее существенных для развития, изменения критерия во времени естественно ограничивать фазовыми переходами, а в стабильные по отношению к оцениванию качества периоды развития использовать не зависящие от времени критерии.

Считается, что для фиксированных начального момента зарождения процесса $t = 0$ и времени его окончания $t = E$ любая *траектория развития* есть направленная кривая \mathfrak{C} в $n+2$ -мерном пространстве (время, область значений F плюс n факторов, изменяющихся с течением времени), точки которой задаются формулой:

$$R = \left(t, F(t, a_1(t), \dots, a_n(t)), a_1(t), \dots, a_n(t) \right), 0 \leq t \leq E.$$

Любая кривая \mathfrak{C} , для которой определены начало и конец, определяет естественный порядок \preccurlyeq на множестве точек, из которых она состоит. Для траекторий развивающихся процессов этот порядок должен соответствовать временному упорядочиванию. Таким образом при моделировании развития нужно рассматривать только такие кривые, для которых справедливо:

$$(1) \quad \forall R', R'' \in \mathfrak{C} (R' \preccurlyeq R'' \equiv (R'_t < R''_t)).$$

Здесь и далее нижним индексом t обозначена временная координата точки кривой.

Следующее ограничение запрещает траектории иметь пропуски во времени, что вполне соответствует интуитивному пониманию развития процесса:

$$(2) \quad \forall t \in [0, E] \exists R (R \in \mathfrak{C}).$$

Далее, некорректными считаются кривые, которые имеют возвраты по времени:

$$(3) \quad \forall R', R'' \in \mathfrak{C} (R' \neq R'') \supset \neg(R'_t = R''_t).$$

Для некоторых прикладных исследований возврат по времени, в принципе, может трактоваться как срыв текущего процесса и образование нового. Но в нашем рассмотрении такое допущение только усложнило бы понимание.

Соотношения (1 – 3) называются условиями корректности траектории развития. Они вполне соответствуют тому, что можно считать развитием процесса, оставаясь на формальном уровне рассмотрения. Здесь стоит отметить, что мы разрешаем временной координате траектории иметь разрывы первого рода: если она имеет предел слева от точки разрыва (отличный от предела справа), то образующуюся ступеньку следует трактовать как внешнее воздействие на модельный и/или реальный процесс, результатом которого становится изменение состояния.

Условия корректности траектории в дальнейшем специально не оговариваются, поскольку другие кривые в качестве представления траекторий не рассматриваются. Последнее замечание на этот счет, важное в дальнейшем, — следующее легко выводимое свойство: корректная траектория пересекается с любой плоскостью константного времени $\tau \in [0, E]$ в точности в одной точке; если константа времени τ находится вне указанного интервала, то с такой плоскостью траектория не пересекается.

Понятно, что далеко не все кривые соответствуют реально осуществимым траекториям. Взаимосвязи и зависимость факторов определяют множество тех кривых, из которых можно выбирать отвечающие критерию развития процесса. Информация об этом извлекается из априорных соглашений, из закономерностей, характерных для прикладной области и для решаемой задачи. Продуктивный источник данных о соотношениях между факторами в динамике их развития — автономные модели процессов, которые отражают разные аспекты отдельных фаз главного целенаправленно развивающегося процесса. Такие модели далее называются аспектными.

Для адекватности использования аспектного моделирования важно, чтобы аспектные модели выполнялись не независимо от расчетов модели развития, а как запросы на поставку ей данных о факторах, влияющих на развитие. Для реализации аспектных моделей можно рекомендовать весь арсенал средств, который сегодня используется в практике математического моделирования процессов и явлений. Концептуальный обзор таких средств можно найти в работе [5]. В терминах этой работы аспектные модели следует рассматривать как привнесенную в решение задачи моделирования развития интеллектуальность.

Вопросы, связанные с аспектными моделями и, в частности, с их взаимодействиями, выходят за рамки настоящей работы. Мы сосредоточиваем внимание на основных принципах моделирования развития, а потому считаем, что вся необходимая информация о факторах предоставляется до выполнения расчетов по главной модели и по требованиям, в ходе этих расчетов. Модель развития, которая рассматривается как главная, играет роль организующего и управляющего процесса активизации междисциплинарной системы моделей всех процессов, используемых для получения информации о развитии. Это соглашение позволяет считать, что в качестве представления траекторий используются только те кривые из $n+2$ -мерного пространства, точки которых удовлетворяют условиям, связанным с априорными соглашениями и с соотношениями, получаемыми при аспектном моделировании.

Траектория начинается в точке плоскости $t = 0$, называемой *начальной*, которая соответствует значениям факторов в начальном состоянии моделируемого процесса:

$$Begin = (0, F(0, a_1(0), \dots, a_n(0)), a_1(0), \dots, a_n(0)),$$

и заканчивается в *конечной* точке:

$$end = (E, F(E, a_1(E), \dots, a_n(E)), a_1(E), \dots, a_n(E)).$$

Траектория процесса отслеживается до того момента, когда она достигает плоскости $t = T$ — *конец отслеживания*:

$$End = (T, F(T, a_1(T), \dots, a_n(T)), a_1(T), \dots, a_n(T)).$$

Фиксируя *Begin*, разработчик указывает на все процессы, траектории которых начинаются в этой точке. В общем случае выбор начальной точки неоднозначен, и она назначается из некоторого множества $DBegin$, лежащего в плоскости $t = 0$. Это множество называется *областью допустимости начала траектории*.

Пусть DE — множество конечных точек траекторий, начинающихся в $DBegin$, на которых достигаются целевые значения факторов. Это множество разбивается на три класса, соответствующие трем вариантам завершения процесса:

- $DEnd >$. В этот класс попадают точки из DE , для которых $E > T$, что означает, что процесс завешается позже окончания отслеживания.
- $DEnd =$. В этот класс, равный пересечению DE с плоскостью $t = T$, попадают точки, для которых $E = T$, что означает одновременность завершения и отслеживания процесса.
- $DEnd <$. В класс попадают точки из DE , для которых $E < T$, что означает, что процесс завершается раньше окончания отслеживания.

Траектории, заканчивающиеся в $DEnd <$ и их процессы в зависимости от специфики моделирования развития можно трактовать по-разному:

- Для одних процессов завершение раньше окончания отслеживания *невозможно* или *запрещено*, и тогда соответствующие траектории должны быть исключены из множества допустимых.
- Для других оно *нейтрально*, т.е. не влияет на качество развития процесса, и тогда при формальном рассмотрении эти траектории можно продлить до плоскости $t = T$, задавая процессу, выполняющемуся в соответствии какой-либо из них, константное, т.е. не меняющее значений факторов поведение.
- Для третьих раннее прекращение процесса является *дополнительным бонусом* в его оценке.

Следующие примеры поясняют это разграничение.

Разрабатывая прибор электронно-лучевой сварки, среди прочего необходимо обеспечить фокусировку испускаемого пучка электронов, согласованную по времени с подготовкой свариваемого материала. Более раннее выполнение фокусировки некорректно. Поэтому при моделировании ее допустимая траектория не должна завершаться до окончания процесса подготовки и наоборот. Как следствие, для обоих процессов нужно зафиксировать общее время завершения выполнения и отслеживания. В этом примере траектория фокусировки из $D_{End} <$ приведет к снижению качества процесса сварки из-за простоя подготовленного свариваемого материала, а завершение подготовки в $D_{End} >$, скорее всего, недопустимо, но это проявится в оценке как нарушение условия $End \in D_{End}$ для траектория при достижении ею плоскости $t = T$.

Примером раннего завершения процесса, оцениваемого при прочих равных условиях как заслуживающего бонус, для сварки может служить моделирование охлаждения. Если использованию сваренной детали в других процессах препятствует высокая температура, то анализ траекторий охлаждения может подсказать разработчику, что в приборе целесообразен кулер.

Бонусная трактовка траекторий из класса $D_{End} <$ предпочтительна, когда есть возможность перераспределения высвобождающихся ресурсов и организации использующего процесса в точке E . Поскольку денежные критерии качества очевидно удовлетворяют этому условию, такая трактовка характерна для большинства экономических моделей.

Считается, что модель процесса задана правильно, если выполняется одно из трех условий:

$$(1) D_{End} \neq \emptyset;$$

$$(2) D_{End} > \neq \emptyset;$$

(3) $DEnd < \neq \emptyset$ и досрочное завершение процесса правомерно.

Это утверждение мотивируется следующим образом:

- Если выполнено условие (1), то для соответствующих траекторий осмыслена оценка качества развития процесса в конце отслеживания.
- Условие (2) означает, что каждая траектория, заканчивающаяся в $DEnd > \neq \emptyset$, содержит точку R_T пересечения с плоскостью $t = T$. Множество всех таких точек, обозначаемое как DR , может использоваться для промежуточных оценок качества траекторий, заканчивающихся в $DEnd >$.
- Выполнение условия (3) может пополнить множество DR , если следующим образом модифицировать траекторию процесса:
 - для нейтральной оценки досрочного завершения она продлевается до плоскости $t = T$ с константным поведением, т.е. с сохранением значений факторов, равными тем, которые они получили при завершении;
 - для бонусной оценки кроме того нужно модифицировать критерий, корректируя оценку качества на константном окончании траектории.

Таким образом, для правильно заданной модели процесса можно определить *область результатов допустимых траекторий*, которая обозначается как $DResult = DEnd \cup DR$.

Следует отметить, что с формальной точки зрения можно исключить из рассмотрения траектории класса $DEnd >$. Это достигается объявлением T временем завершения одного процесса и заданием другого, который представляет в модели остаток траектории, разбиваемой на две части. Учитывая это замечание в дальнейшем мы считаем, что область $DResult$, лежащая в плоскости окончания отслеживания $t = T$, содержит конечные точки кривых, представляющих все такие траектории.

При моделировании развития процесса целесообразно выделить на плоскости $t = T$ точку наиболее предпочтительного завершения процесса. Для такой точки вектор $(Begin, End)$ рассматривается как особая идеальная траектория, которая ведет из заданной начальной точки в выбираемую конечную. Понятно, что выбор точки End зависит от критерия, но на формализованном уровне рассмотрения фиксировать эту зависимость не следует. Моделирование развития предполагает анализ различных вариантов траекторий, и первый шаг в подготовке расчетов связан с экспертной оценкой того, какие точки начала и конца отслеживания целесообразно выбрать для дальнейшего анализа. Это главные ориентиры изучения процесса. В дальнейшем вектор $(Begin, End)$ называется *трендом траекторий развития*.

Реальная траектория, разумеется, существенно отклоняется от тренда и даже не столько потому, что критерий может оказаться не определенным, например, в начале процесса — эта техническая трудность преодолима формальным доопределением F . Дело в том, что в адекватном критерии оценки целенаправленного развития процесса необходимо отражать не только получаемые результаты и прогресс в достижении цели, но также затрачиваемые на это ресурсы и другие факторы.

3. Оценка качества траектории развития

Содержательной основой оценки качества выполнения процесса является степень приближения его траектории к цели. Это положение конкретизируется, во-первых, выбором функции-критерия F , а во-вторых, процедурой, запускаемой для вычисления этой функции. Как уже отмечалось, далеко не всегда достижением цели можно считать равенство F целевому, т.е. априорно фиксируемому показателю. Так, целевым показателем разогрева парового котла является определенная температура пара при фиксированном давлении. Но нагревание не должно происходить слишком быстро — для котла известна максимально допустимая скорость последующего разогрева, когда достигнута определенная температура. Поэтому, формируя функцию критерия, необходимо наряду с целевым показателем предусмотреть оценивание качества процесса в ситуациях риска нарушения допустимости. Что же касается запуска функции F , то это действие должно определяться, исходя из текущей температуры и режима работы нагревателя. Функция F всегда должна быть готова к осуществлению замера критерия с тем, чтобы заблокировать возможный перегрев котла. Иными словами, при описанной стратегии разогрева запуск этой функции для замера заданного критерия может быть осуществляться в любой точке траектории процесса.

Представленная иллюстрация указывает на то, что оценку качества развития процесса не всегда следует связывать с вычислением функции-критерия F лишь в точке End , т.е. в конце отслеживания траекторий. В зависимости от специфики решаемой задачи для анализа может требоваться анализ качества и в других точках траектории R_{τ_i} в моменты τ_i , $1 \leq i \leq k$, где k — число отслеживаемых точек:

$$R_{\tau_i} = \left(\tau_i, F(\tau_i, a_1(\tau_i), \dots, a_n(\tau_i)), a_1(\tau_i), \dots, a_n(\tau_i) \right), 0 \leq \tau_i \leq T,$$

Оценивание в точке $R_{\tau_1} = End$ при $k = 1$, называется *финальным*. Оно связывается с итогами развития. Это тот случай, когда дополнительные замеры не предусматриваются.

Когда требуется получать информацию в ходе выполнения процесса в фиксированных точках траектории, т.е. при $k > 1$, оценивание называется *расширенным*. Оно полезно,

например, для процессов существенным аспектом качества которых является равномерность развития, когда скачки тех или иных факторов не допускаются или нежелательны. Это характерно для моделирования при разработке приборов и устройств. В том или ином виде степень неравномерности должна отражаться в критерии.

Если есть потребность и возможность получать оценки, вычисляя их в любой точке, то оценивание называется *непрерывным*. Пример с паровым котлом иллюстрирует один из вариантов такого оценивания. Из него видно, что для анализа качества процесса не обязательно передавать всю информацию, извлекаемую при непрерывном оценивании, — она может использоваться, в частности, для локальных корректировок траектории. Отметим также, что непрерывное оценивание позволяет контролировать ход модельного выполнения процесса с заданным уровнем точности.

Финальное, расширенное и непрерывное оценивания могут сводиться к друг другу. Расширенное оценивание есть частный случай непрерывного, финальное — вырожденный случай расширенного, а потому и непрерывного. Имея расширенное или непрерывное оценивание, легко подобрать новый критерий развития, имитирующий получение оценочной информации в промежуточных точках в ходе вычисления финальной оценки по новому критерию.

К сожалению, как часто бывает, принципиальная эквивалентность ситуаций никак не связана с возможностью одинакового оперирования в них на практике. Поэтому при реализации оценивания нужен тот вид критерия, который адекватен задаче моделирования и предметной области. Так, для решения оптимизационных задач финальные критерии более удобны, а когда требуется следить за колебаниями значений некоторых факторов, разумно расширенное или непрерывное оценивание.

Поскольку мы ограничиваемся формальным рассмотрением подхода, последнее замечание позволяет в дальнейшем говорить преимущественно о финальном оценивании, имея ввиду возможность подмены функции-критерия, т.е. использования вместо F , функции F_e , которая требуемую информацию извлекает из всей траектории, но предъявляет ее для анализа лишь в конце отслеживаемого развития процесса.

4. Конусы траекторий

Множество всех возможных траекторий, исходящих из точки начала тренда *Begin*, можно рассматривать как конус с вершиной в этой точке и с основанием, содержащим точку *End* и лежащим на плоскости $t = T$, перпендикулярной временной оси. Вектор (*Begin*, *End*) задает ось этого конуса.

Это слишком большой конус, т.к. он включает в себя заведомо избыточные кривые. По этой причине разумно выделить в нем часть, огибающую все допустимые траектории. В результате для фиксированного начала всех таких траекторий образуется конус, в качестве основания которого на плоскости $t = T$ можно выбрать область $DResult$ окончаний допустимых траекторий. Поскольку начальная точка может выбираться в области $DBegin$ произвольно, рассматривается объединение всех таких конусов. В результате строится усеченный конус, который содержит все допустимые траектории развития процесса. Его основаниями являются $DBegin$ и $DResult$,² лежащие на плоскостях $t = 0$ и $t = T$. В качестве оси этого конуса естественно выбрать луч, которому принадлежит вектор тренда $(Begin, End)$. Вершина оси имеет отрицательную временную координату, что допускает вполне разумную трактовку: отсекаемая основанием $DBegin$ часть конуса рассматривается как область результатов допустимых траекторий некоторого уже завершённого процесса, в дальнейшем именуемого *предысторией отслеживаемого процесса развития*.

Продолжения траекторий за пределы плоскости $t = T$ ни при каких обстоятельствах не могут влиять на продвижение их к области допустимости. Не всякое развитие приводит к тому, что точка End достигается: возможно выполнение процесса, которое не приводит в область результатов, что означает недопустимость траектории. При моделировании имеет смысл рассматривать их также и, в частности, выяснять степень приближения траекторий к цели.

Задать вид оснований конусов и их поверхностей не представляется возможным, поскольку они существенно зависят от интерпретации модели. Но это и не нужно — для анализа достаточно знать соотношения и интервалы значений факторов a_1, \dots, a_n , которые влияют на развитие процесса. То же можно сказать о допустимых траекториях. Для анализа требуется знать не их конкретный вид, а лишь периоды их *стационарного поведения* и смены тенденций, т.е. перехода от одного стационарного периода к другому. Если траекторию можно было бы считать достаточно гладкой функцией, то стационарность означала бы постоянство всех частных производных, а переходы между периодами стационарности — нарушениями этого свойства. Это можно сделать, используя проецирование траекторий на различные плоскости. В следующем разделе обсуждается проецирование, которое может приводить к образованию S-кривых развития.

² Точнее было бы говорить о минимальных связных областях, содержащих все точки из $DBegin$ и $DResult$, соответственно. Минимальность можно понимать, как выбор области с самой короткой границей, с самой малой площадью или в каком-либо ином смысле.

5. Проекция траектории развития на плоскость (время, критерий)

Как показано в [4], цикл развития процесса можно представлять в виде S-кривой, на которой выделяются участки *вживания* (детство), *роста* (расцвет) и *исчерпания ресурсов* (старость). Эти участки соответствуют секторам различного влияния факторов, определяющих критерий развития. Если кривая траектории является витком спирали, раскручивающимся в конусе допустимых траекторий между основаниями *DBegin* и *DResult*, то ее проекция на плоскость (t, F) оказывается S-кривой. Правильная S-кривая получается, когда траектория не допускает возвратов по времени, что соответствует интуитивному представлению развития процесса.

На S-кривой определены точки ее начала, минимума, максимума и окончания. Их прообразы на траектории разделяют указанные выше участки:

- начало спирали, прообраз минимума — *вживание*,
- прообразы минимум и максимум — *рост*,
- прообраз максимум и конец витка — *исчерпание ресурсов*.

Участок роста естественным образом делится на участки *первичного* и *затухающего* *роста*, которые разделяются прообразом пересечения S-кривой с проекцией тренда $(Begin, End)$, т.е. идеальной траектории. Плоскости, построенные в указанных точках перпендикулярно оси t , делят траекторию на четыре части.

Представленные положения иллюстрирует рис. 1, показывающий проекцию траектории процесса в соответствии с введенными выше обозначениями. Заштрихованным прямоугольником выделен образ значений функции F на основаниях *DBegin* и *DResult* конуса всех допустимых траекторий, начинающихся и заканчивающихся на этих основаниях. Серым цветом окрашен конус допустимых траекторий, начинающихся в точке *Begin* тренда — его проекция выделена жирным отрезком. Область допустимости таких траекторий указана прямоугольником с точечной заливкой (он наложен на проекцию основания *DResult* конуса и для наглядности несколько сдвинут вправо). Проекция некоторой допустимой траектории показана жирной кривой. Вертикальными штриховыми линиями отмечены моменты бифуркации, т.е. фазовых переходов процесса. Конус предыстории выделен пунктиром.

Представление цикла развития процесса в виде S-кривой, т.е. как витка спирали не является ограничением, поскольку процессы с более чем одним витком можно формально, а чаще всего и по существу считать составными, т.е. состоящими из двух и более процессов. Рассмотрение составных процессов полезно еще и потому, что реальные

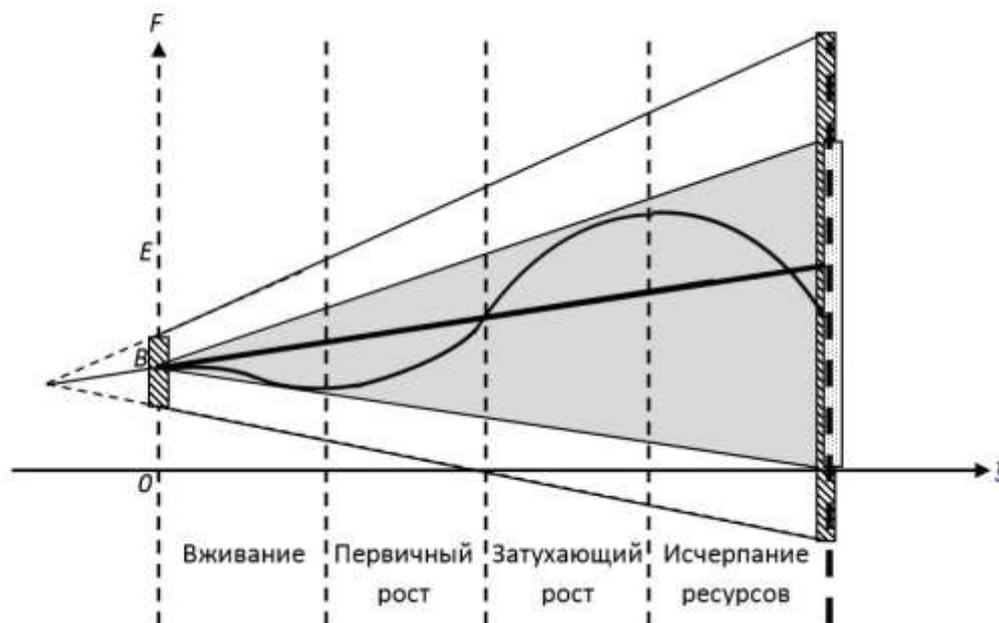


Рис. 1. Проекция траектории развития проекта на плоскость (t, F)

процессы всегда состоят из других процессов, т.е. подпроцессов, со своими осями развития, факторами влияния и критериями развития. Они формируют данный процесс, поддерживая его или противодействуя его развитию. В свою очередь, рассматриваемый процесс является подпроцессом системы, развитие которой естественно трактовать как интегрирующий процесс. Вопрос о том, как формируются системы процессов, относится к области конкретизирующей интерпретации модели. На абстрактном уровне можно указать лишь на следующие положения:

1. Интегрирующий процесс имеет те же стадии, периоды развития, которые определяются (своей) S-кривой. Если для него осмысленно определение оси развития, то период роста разбивается на первичный и затухающий рост.
2. S-кривая интегрирующего процесса может быть представлена как огибающая семейства составляющих его подпроцессов, или, что то же, можно подобрать критерий развития, выстраивающий процесс в соответствии с положением 1.
3. Системы процессов, возникающие в связи с декомпозицией изучаемого процесса и включением его в системы более высоких уровней, обладают фрактальными свойствами, что позволяет использовать для их анализа общую методологическую основу фрактального анализа.

Рассмотрение S-кривых как проекций конусов траекторий развития может оказаться полезным для преодоления главного недостатка этого инструмента — неразличимость значимости факторов для развития на разных фазах. В то же время, не следует ожидать от

этого слишком многого. Вопрос о механизмах, благодаря которым интеграция процессов приводит к образованию процесса, подчиняющегося указанным условиям, остается открытым. По-видимому, его уместно ставить лишь по отношению к области применения модели развития.

S-кривая является проекцией траектории специального вида, соответствующего четырем указанным выше периодам (участкам) развития. Ничто не препятствует рассмотрению процессов, траектории которых отражают другие соглашения о развитии. Так, при проектировании любого прибора или устройства в траектории его работы различаются три фазы: включение, стационарное функционирование и выключение. Каждая из этих фаз имеет свои группы факторов, влияющих на качество использования. Структура фаз, а значит, и вид траектории развития зависят как от особенностей элементарных актов работы устройства, так и от целей моделирования.

Для иллюстрации траектории развития, проекция которой отлична от S-кривой, рассмотрим задачу определения срока эксплуатации лампы накаливания. Здесь процесс развития — серия элементарных актов, каждый из которых состоит из включения, горения и выключения, связанных с ростом усталости — фактором, интегрирующим физические свойства материалов, от которых зависит работоспособность лампы. Усталость резко нарастает при включении и выключении и плавно растет на фазе горения. Когда этот фактор становится больше порогового значения, лампа перегорает. Процесс нарастания усталости лампы выходит за рамки нашего обсуждения — можно считать, что данные, необходимые в решении задачи о сроках эксплуатации, получены путем аспектного моделирования.

Адекватная модель для данной задачи связывается с построением траектории процесса развития как многократного повторения элементарных актов, пока усталость не достигнет порогового значения. Критерием качества развития может служить время работы лампы, накапливаемое в ходе выполнения элементарных актов с финальным оцениванием. Для анализа хода процесса более информативный критерий — уровень накопленной усталости в каждой точке траектории или разность порогового значения с текущей усталостью. В этом случае появляется возможность отслеживать фазовые переходы траектории. Тренд развития начинается в точке с нулевой временной координатой и начальными значениями параметров аспектной модели усталости. Конечная точка тренда задается с пороговым значением усталости и варьируется вокруг желаемого гарантийного срока эксплуатации. Проекция траектории развития на плоскость (время, критерий) для первого критерия мало информативна, тогда как следуя второму критерию, появляется возможность сравнивать рост усталости на разных элементарных актах.

6. Технологические аспекты моделирования развития

Задача изучения развития представлена в предыдущих разделах без привлечения содержательной информации о моделируемых процессах. Введенные понятия отражают в точности то, что может быть сделано, оставаясь на уровне формализованной абстракции. В то же время, эта абстракция позволяет указать на архитектурные решения, которые при надлежащем наполнении средствами, связанными с содержанием исследования, могут стать основой практического комплекса инструментальной поддержки изучения развития. В данном разделе обсуждаются главные из таких решений.

Основная концепция инструментального комплекса заключается в следующем. Развитие процесса связывается с геометрическим представлением его траекторий, направляемых функцией критерия развития. Для отслеживания траекторий используется содержательная информация, которая определяется априорно постулируемыми закономерностями и аспектным моделированием. В комплексе должна быть обеспечена возможность связи геометрической и содержательной информации для свободного доступа к ней. Эти положения определяют главные требования к архитектуре комплекса.

Средства комплекса, предлагаемые для модельного исследования, подразделяются на *базовые*, которые используются во всех моделях, и *специализированные*, отражающие специфику предметной области. В состав базовых средств включены заготовки в виде абстрактных классов, методов и интерфейсов, которые для специализированных средств играют роль технологических шаблонов: с помощью механизма наследования абстрактные заготовки конкретизируются и, тем самым, становятся пригодными для использования в программах моделей.

Комплекс предусматривает следующие возможности описания поведения процесса:

- Поддержка определения факторов развития процесса и пространства факторов посредством соглашений о них как об информационных объектах.
- Абстрактные средства геометрического оперирования представлением процесса как конуса его траекторий в многомерном пространстве факторов, т.е. построение оснований конусов, трендов траекторий и конкретных траекторий, а также сечений конусов и различных фигур, допускающих их трактовку как свойств объектов предметной области. Набор средств геометрического оперирования может пополняться в зависимости от потребностей конкретного моделирования. Он регламентируется заданным критерием развития, трендом, известными соотношениями между факторами и другими особенностями.

- Абстрактные шаблоны для задания аспектных моделей, которые служат регламентирующим стандартом представления зависимостей между факторами и изменения факторов во времени в содержательных аспектных моделях.

Для реального использования этих и других средств моделирования развития инструментальный комплекс должен обеспечивать ввод, вывод и хранение информации, стандартизованные элементы управления и другие общесистемные возможности. В частности, в качестве очень важных компонентов комплекса рассматривается подсистема сопоставления результатов модельных расчетов для разных вариантов развития процесса. Обсуждение общесистемного аспекта инструментария моделирования выходит за рамки настоящей работы — это особая тема, имеющая лишь косвенное отношение к задаче формализованного представления моделей развития.

Завершая обсуждение эскиза технологических аспектов моделирования развития, отметим, что предлагаемый подход хорошо сочетается с методами имитационного моделирования динамики взаимодействия процессов. При их применении нужно на ряду с основным процессом развития определить аспектные модели как систему процессов, для которых основной процесс рассматривается в качестве интегрирующего компонента. В этой системе управление задается с помощью событийного механизма, который согласуется с моделью развития следующим образом.

Для аспектных процессов определяются события, генерируемые ими, и реакции на них других процессов в связи с фазовыми переходами. При имитации производства и потребления ресурсов, к таким событиям относятся начало и конец потребления некоторого ресурса, начало и конец его производства, приостановка активности процесса при исчерпании ресурса, начало активности процесса и его завершение. Примеры реакций — возобновление активности процесса при появлении ресурса, выбор нового поведения. Общая для всех процессов реакция — пересчет критериев развития. Предметом анализа при имитационной динамической стратегии являются протоколы событий процессов с целью выяснения фазового поведения интегрирующего процесса. Вопросы организации имитационного моделирования, основанного на событийном взаимодействии процессов, можно найти в работе [6].

7. Заключение

Предлагаемая формализация моделирования развития процессов построена на их геометрическом представлении. Предпосылкой подхода является традиция использовать S-кривые при анализе развития. В отличие от обычных S-кривых, предложенный подход позволяет учитывать отдельные факторы и их сочетания, в той или иной степени

влияющие на развитие. Это достигается путем рассмотрения факторов как элементов построения конуса возможных траекторий и отслеживания динамики критерия развития. Другие варианты проецирования траекторий и, в частности, построение проекций на плоскости различных факторов дают возможность отслеживания значимости влияния факторов на качество развития процесса. Эта задача выходит за рамки рассмотрения настоящей работы. Учитывая ее особую важность, мы намерены посвятить другим вариантам проецирования специальное исследование.

Геометрическое представление развивающихся процессов согласуется с использованием иных моделей процессов и явлений различной природы, которые продуцируют информацию о факторах развития изучаемого процесса. В частности, правомерно применение методов статистического анализа и математического моделирования. Предоставление этой информации возможно не только до проведения расчетов по модели развития, но и в динамике выполнения расчетов.

Все построения, связанные с предлагаемым подходом, могут быть использованы при изучении развития процессов, которые подчиняются закономерностям, отличным от S-кривых, но сходных с ними с точки зрения управления. В частности, по этой причине подход можно рекомендовать для использования при проектировании приборов и устройств, рассматривая такие критерии качества развития как стабильная работоспособность за гарантированные сроки эксплуатации, потребление ресурсов и др.

Список литературы

1. Арнольд В. И. «Жесткие» и «мягкие» математические модели. // М.: МЦНМО, 2004. — 32 с.
2. S-кривая (S-Curve) // Глоссарий РМВОК. URL: <http://www.pm-glossary.com/> (дата обращения: 6.01.2016).
3. Крамер А. Размышления над S-кривой URL: <http://www.metodolog.ru/01490/01490.html> (дата обращения: 6.01.2016).
4. Бадулин Н.А. «Улитка инноваций», «тройная спираль» и другие круговые процессы в экономике // В кн.: Инноватика-2012: Сборник материалов VIII Всероссийской школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (25-28 апреля 2012 г.). Т.1, 2012. — с. 7 – 29.
5. Ильин В.П., Скопин И.Н. О производительности и интеллектуальности суперкомпьютерного моделирования. — Программирование, 2016, № 1. — с 10 – 25.
6. Скопин И.Н. Иерархичность и моделирование развивающихся систем // В кн.: Проблемы системной информатики: Сб. науч. тр. / Под ред. В.Н. Касьянова. — Новосибирск: Ин-т систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН, 2010. — с. 188 – 214.