

С.И. Безденежных
С.Г. Брайткрайц, доктор технических
наук, старший научный сотрудник

Информационный подход к оценке сложности и потенциала развития технологии

В статье развивается идея представления эволюции технологий как эволюции знания. Рассматриваются информационные аспекты развития технологий. Предложена энтропийная мера оценки сложности и потенциала развития технологии. Статья может быть интересна специалистам, занимающимся инновациями, развитием технологий и разработкой научно-технических программ.

Создание и внедрений новых технологий в образцы вооружения и военной техники становится краеугольным камнем развития любой сложной системы вооружения. Так, по мнению ряда специалистов оборонной промышленности [1, 2], непрекращающееся противоборство между ведущими странами за лидерство в создании вооружений будет неуклонно смещаться в область технологического соперничества.

В этой связи, анализ процессов развития технологий, выявление законов их возникновения, совершенствования и реализации представляет актуальную задачу. Одним из важных вопросов развития технологии являются оценка ее сложности и потенциала развития. От правильности ответа на эти вопросы зависит объективность принятия решений о целесообразности постановки научно-исследовательских или опытно-конструкторских работ по созданию научно-технологического задела.

Существующие методы оценки сложности и потенциала развития технологии опираются на обработку мнений группы экспертов, из-за чего им присущи все достоинства и недостатки методов экспертных оценок. Достоверность и надежность результатов таких исследований всецело зависят от компетентности экспертов, их количества и квалификации. Результаты, полученные разными группами экспертов несравнимы между собой и, соответственно, не могут использоваться в разных исследованиях. Это указывает на необходимость поиска методов независимой от субъективного мнения эксперта количественной оценки сложности и потенциала развития технологии.

1. Эпистемологические аспекты развития технологии

При изучении современной тематической литературы обращает на себя внимание разное толкование термина технология. Следуя подходу, описанному в [2], в данной статье *технология* трактуется, как совокупность документированных *знаний* для создания технических изделий и систем.

Чтобы избежать путаницы с популярным сегодня направлением изучения *инноваций* обозначим разницу между ним и понятием технологии. Суть инновации заключается в том, что это технология, *внедренная* в выпускаемое изделие, т. е. приносящая экономический эффект. Технология же сама по себе может развиваться и без инноваций (т. е. без их реализации в изделии). Если акцентировать внимание на том, что технология – это совокупность знаний, то возникает мысль применить к ней законы развития знаний – законы *эпистемологии*.

Хотя исторически эпистемология связана с изучением истории и законов развития науки следует избегать отождествления *технологии* и *науки*. Принято считать, что научные открытия – это семена, из которых прорастают новые технологии. Однако не преуменьшая роль науки в

развитии технологий, история показывает, что многие технологические нововведения произошли без должного научного объяснения, на основании одного лишь опыта их создателей.

Например, созданный в XIX веке паровой двигатель воплотил в себе многое, из не существовавших на тот момент разделов физики, таких как термодинамика, кинетическая теория газов и гидродинамика. Аналогично, лампа накаливания, заполненная азотом, созданная в 1906 г., была разработана без теории термоионной эмиссии в газах. Развитие авиации на ранних этапах так же, как правило, опережало развитие аэродинамики.

Эпистемология различает *декларативные* и *процедурные* знания. Декларативные знания содержат в себе лишь представление о структуре неких понятий и вещей. Эти знания приближены к данным, фактам. Процедурные же знания имеют активную природу. Они определяют представления о средствах и путях получения новых знаний, проверки знаний. Это алгоритмы разного рода.

Данная концепция эпистемологии хорошо согласуется с предложенным в [2] делением технологий на продуктовые (системные) и производственные. На самом деле, системные технологии, как и декларативные знания, сконцентрированы в схемах деления, сборочных чертежах, и описывают то, как должна быть устроена продукция, чтобы удовлетворять потребности заказчика. Производственные технологии представляют собой совокупность документированных знаний о процессе изготовления изделия, и отражается в технологической документации, маршрутных картах.

В настоящее время господствующей эпистемологической теорией признана разработанная Карлом Поппером эволюционная эпистемология [3, 4]. Эволюционная эпистемология рассматривает рост знания как продукт биологической эволюции. Она основывается на двух положениях:

а) человеческая способность познавать, как и способность производить научное знание, являются результатами естественного отбора;

б) эволюция человеческого знания, подобно естественной эволюции в животном и растительном мире, – результат постепенного движения по направлению от используемых к лучшим теориям.

В наглядной форме второе положение можно отобразить в виде схемы, представленной на рисунке 1.

2. Теория информации в развитии технологий

Достижения эпистемологии активно используются дисциплиной управления знаниями. Сам процесс управления знаниями (knowledge management) определяют как совокупность систематических процессов, благодаря которым создаются, сохраняются, распределяются и применяются основные элементы интеллектуального капитала, необходимые для успеха организации или как стратегию, трансформирующую все виды интеллектуальных активов в более высокую производительность, эффективность и новую стоимость [5].

Дисциплина управления знаниями трактует знание как форму информации, которая наполнена контекстом, основанном на опыте. Информация – это данные, которые существенны для наблюдателя из-за их значимости для наблюдателя. Данные могут быть предметом наблюдения, но не обязательно должны быть им. В этом смысле знание состоит из информации, подкрепленной намерением или направлением.

Такой подход согласуется с популярной моделью иерархии информации DIKW [6], которая располагает данные, информацию, знание, мудрость в виде пирамиды по увеличивающейся степени полезности (рисунок 2).

Таким образом, если верхний уровень пирамиды технологий – эволюция технологий, как эволюция знания объясняется законами эпистемологии, то нижний уровень – метаморфозы описания технологии, представление данных о технологии можно описать с помощью *теории информации*.

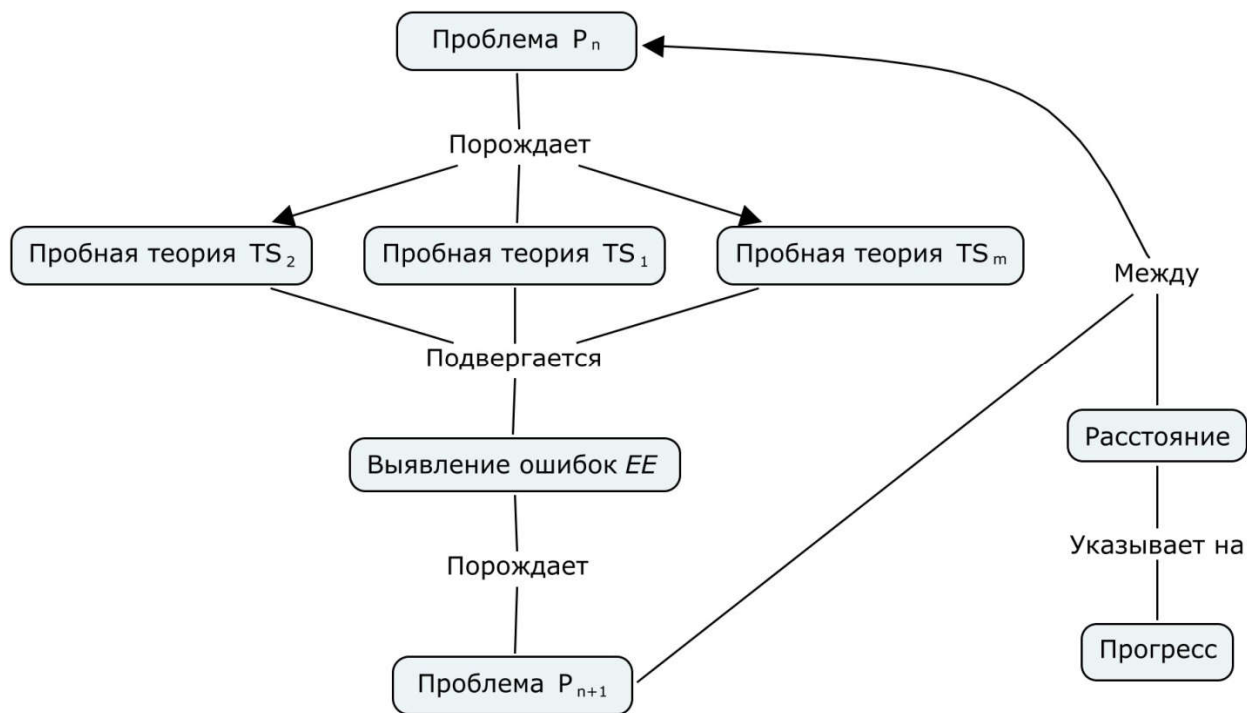


Рисунок 1 – Процесс совершенствования научных теорий в соответствии с эволюционной эпистемологией.



Рисунок 2 – Пирамида модели DIKW

В пользу такого подхода свидетельствует то, что аналогичная идея применения теории информации набирает популярность среди биологов в популяционной генетике [7]. При этом набор аминокислот отождествляют с алфавитом, а гены – со словами. Так как длина последовательности гена в клетке ограничена, а чередование набора нуклеотидов подчиняется строгим правилам, эволюцию рассматривают как дискретную систему с N -состояниями различных генов.

Проецируя этот принцип представления биологической системы на развитие технологии, можно предложить следующую экспликацию понятий с точки зрения теории информации:

алфавит G_t в момент времени t – это конечное множество доступных технологий $G = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_K\}$, которые могут быть использованы при создании изделия (генофонд популяции);

слово T – конечная последовательность $\{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_K\}$, $T \in G_t$ суммарной длины N , как генотип особи, представляющая технологическую модель изделия.

3. Энтропия, как мера сложности и потенциала развития технологии

В работе [8] методом подсчета информационной энтропии технологических альтернатив было предложено измерять *многообразие* (изменчивость, фр. *variété*) технологии электрических моторов:

$$H(X_1, X_2, \dots) = \sum_{i=1}^A \sum_{j=1}^B \dots p_{ij\dots} \log \frac{1}{p_{ij\dots}}, \quad i=1, \dots, A; j=1, \dots, B; \dots, \quad (1)$$

где X_1, X_2, \dots – группы технологических альтернатив;

A, B – количество технологических альтернатив в группах;

p_{ij} – вероятность появления сочетания технологий i, j .

Здесь под технологической альтернативой понимается возможный вариант технической реализации функции изделия. Например, функция навигации может быть реализована с использованием системы спутниковой навигации, инерциальной навигационной системы, радионавигации и пр.

В качестве примера в таблице 1 показано многообразие технологии беспилотных летательных аппаратов (далее – БПЛА), популяция которых насчитывает восемь моделей с разными типами построения, процессоров и систем навигации.

Таблица 1 – Модели БПЛА

| Изделие | Составные части технологии БПЛА | | |
|----------|---------------------------------|-----------------|------------------|
| | Тип БПЛА | Архитектура ЦПУ | Навигация |
| Модель 1 | квадрокоптер (0) | ARM (0) | инерциальная (0) |
| Модель 2 | квадрокоптер (0) | x86 (1) | СНС (1) |
| Модель 3 | конвертоплан (1) | ARM (0) | инерциальная (0) |
| Модель 4 | конвертоплан (1) | x86 (1) | СНС (1) |
| Модель 5 | самолетный (2) | x86 (1) | СНС (1) |
| Модель 6 | самолетный (2) | x86 (1) | СНС (1) |
| Модель 7 | самолетный (2) | ARM (0) | СНС (1) |
| Модель 8 | самолетный (2) | x86 (1) | инерциальная (0) |

Вычислим для приведенного примера значение многообразия технологии по формуле (1). Для этого, определим вероятности появления сочетания технологий в группах. Из таблицы 1 следует, что они будут равны:

$$p_{000} = p_{011} = p_{100} = p_{111} = p_{201} = p_{210} = 0,125; \quad p_{211} = 0,25;$$

Для всех остальных сочетаний вероятность равна 0. Таким образом, численный показатель многообразия технологии БПЛА из приведенного примера будет равен:

$$H = 0,125 \cdot \log_2 8 + 0,125 \cdot \log_2 8 + 0,125 \cdot \log_2 8 + 0,125 \cdot \log_2 8 + 0,125 \cdot \log_2 8 + 0,125 \cdot \log_2 8 + 0,25 \log_2 4 = 2,75 \text{ (бит)}.$$

Развивая идею оценки количества информации в технологии и допуская мысль, что в процессе разработки изделия более-менее равновероятно рассматриваются все возможные варианты технологических альтернатив можно оценить гипотетически возможное многообразие технологии.

По правилу комбинаторного произведения число сочетаний технологий в группах технологических альтернатив X можно посчитать перемножением количества элементов (мощностей множеств):

$$C = \prod_{i=1}^N |X_i|. \quad (2)$$

Соответственно вероятность появления технологии в том или ином составе будет одинакова и равна:

$$p = C^{-1}. \quad (3)$$

Тогда, величину полного многообразия технологии можно записать, подставив (2), (3) в (1) в виде:

$$H(X_1, X_2, \dots, X_N) = C \left(p \log \frac{1}{p} \right) = \log \prod_{i=1}^N |X_i| = \sum_{i=1}^N \log |X_i|. \quad (4)$$

Полученная таким образом величина будет возрастать одновременно с усложнением структуры технологии (увеличением количества используемых технологий) и ростом в ней количества технологических альтернатив. Предлагается использовать эту величину для оценки сложности технологии.

Так как все логарифмы пропорциональны, то выбор основания определяет лишь единицу измерения информации. На практике, используют несколько оснований, но при анализе информационных процессов на ЭВМ и др. устройствах в основном используют основание 2 (единица измерения – бит).

Так как, количество технологических альтернатив величина положительная, то:

$$\lim_{|X_i| \rightarrow +\infty} \sum_{i=1}^N \log_a |X_i| = +\infty. \quad (5)$$

Другими словами, при росте количества составных технологий и технологических альтернатив величина H будет расти бесконечно, отражая рост сложности технологии.

Так же как и информационная энтропия, предложенная информационная мера сложности технологии обладает следующими преимуществами:

1. Мера сложности непрерывна, то есть изменение значения величины вероятности на малую величину вызывает малое результирующее изменение функции.

2. Сложность технологии равна сумме сложностей технологий в нее входящих.

На рисунке 3 представлен график роста показателя сложности технологии при составе от одной до ста тысяч альтернатив.

Возвращаясь, к примеру с беспилотными летательными аппаратами из таблицы 1 посчитаем сложность технологии для следующих технологических альтернатив:

Тип БПЛА = { квадрокоптер, конвертоплан, самолетный } ;

Архитектура ЦПУ = { ARM, x 86 } ;

Способ навигации = { СНС, инерциальная } ;

$H(\text{Тип БПЛА}, \text{Архитектура ЦПУ}, \text{Способ навигации}) = \log_2(3) + \log_2(2) + \log_2(2) = 3,5849625$ (бит) .

Предложенный способ определения сложности технологии оценивает гипотетически возможное разнообразие. Достижение на практике такого разнообразия лишено смысла. В то же время, разница между возможным и существующим многообразием может дать количественную

оценку потенциала развития (уровень проработанности) технологии в существующем технологическом окружении.

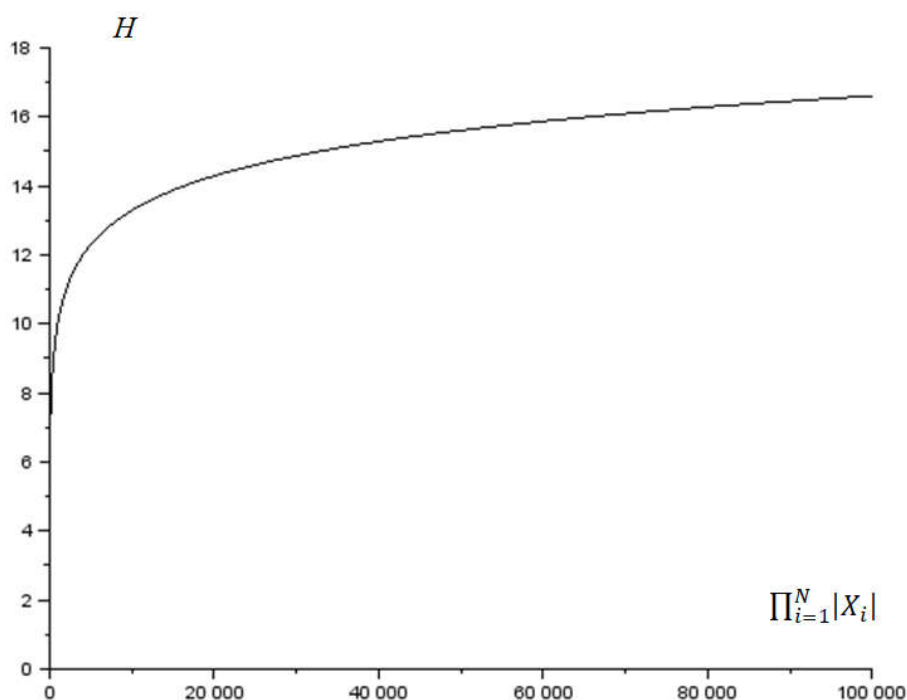


Рисунок 3 – Рост сложности технологии в зависимости от количества используемых технологий (M) и технологических альтернатив ($\prod_{i=1}^N |X_i|$)

В результате, потенциал развития технологии БПЛА, с типорядом летательных аппаратов представленных в таблице 1, будет равен:

$$3,5849625 - 2,75 = \mathbf{0,83496} \text{ (бит) .}$$

В процессе разработки новых изделий показатель потенциала будет снижаться. Теоретически он может достигнуть 0, когда будут созданы изделия со всеми вариантами технологических альтернатив, что, как правило, экономически не оправдано.

Одновременно, существует противоположный процесс препятствующий проработке всех вариантов технологии – изменения в группах технологических альтернатив. Другими словами, пока будут разрабатываться изделия со всеми возможными комбинациями составных частей, с большой долей вероятности появятся новые технологические альтернативы, которые снова увеличат потенциал развития технологии.

Предложенный способ определения потенциала развития технологии будет правильно работать и при установлении предпочтений на множестве технологических альтернатив. Он обладает теми же полезными характеристиками, что и показатель сложности.

Таким образом, в данной статье предложено, применить законы эпистемологии (законы развития знаний) к развитию технологий. Основная мысль статьи заключается в том, метаморфозы описания технологии, предложено описать с помощью терминов *теории информации*.

Опираясь на предложенную информационную нотацию, в авторами предложена энтропийная мера и способ подсчета сложности и потенциала развития технологии. Преимуществом такого подхода является то, что:

1. Это количественная мера, независимая от мнения экспертов и проводимого эксперимента;

2. Мера непрерывна, то есть изменение значения величины вероятности на малую величину вызывает малое результирующее изменение функции.

3. Мера аддитивна, то есть сложность технологии (как и потенциал развития) равна сумме сложностей технологий в нее входящих.

Недостатком предложенного способа является то, что он рассматривает возможность реализации всех вариантов построения как равновероятные события, т. е. не учитывает возможную полезность (эффективность) создаваемых изделий. В некоторой степени это отражает неопределенность знания непроверенного экспериментом.

Предложенный в статье информационный подход к представлению процесса развития технологий открывает новые возможности применения формальных методов теории информации в изучении процессов создания сложных технических систем. Так в ближайшей перспективе предлагается рассмотреть пути применения методов условной энтропии для дополнения функционально-технологических моделей и энтропийного кодирования (кодирования без потерь) как способа выявления основных требований к техническим системам.

Список использованных источников

1. Н.Масляев Как вернуть конкурентоспособность? // Советник президента: сетевой журнал URL: http://sovetnikprezidenta.ru/93/5_vis_tehno.html (дата обращения: 07.07.2018).

2. Буренок В.М., Ивлев А.А., Корчак В.Ю. Развитие технологий XXI века: проблемы планирование, реализация. – Тверь: ООО «Купол», 2009.

3. Лахути Д.Г., Садовский В.Н., Финн В.К. Эволюционная эпистемология и логика социальных наук: Карл Поппер и его критики. – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 464 с.

4. Редько В.Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект: Модели и концепции эволюционной кибернетики. – М.: ЛИБРОКОМ, 2013. 224 с.

5. Мильнер Б.З. Управление знаниями: эволюция и революция в организации. – М.: Инфра-М, 2003. – 177 с.

6. David Weinberger The Problem with the Data-Information-Knowledge-Wisdom Hierarchy // Harvard Business Review: 2010. URL: <https://hbr.org/2010/02/data-is-to-info-as-info-is-not#> (дата обращения: 07.07.2018).

7. Хойл Ф. Математика эволюции. – Ижевск: R&S, 2012. – 144 с.

8. Almeida E. Une analyse evolutionniste du changement dans la technologie des moteurs electriques. – Гренобль, 1999. – С. 73-105.