

Применение "мягкого" моделирования для прогнозирования эволюции технических систем

Н.Б. Фейгенсон, А.Т. Кынин

Аннотация

Применяемые методики количественного прогноза изменения параметров технических систем во времени позволяют получить удовлетворительные результаты только для ограниченного числа случаев. В наиболее распространенных и практически интересных случаях изменение параметров технических систем носит нелинейный характер. Поэтому значительный интерес представляют проблемы прогноза характера возникающих нелинейностей и смены механизмов эволюционного процесса. Для решения этих проблем в работе рассматриваются возможности, варианты и некоторые результаты применения "мягкого" моделирования. Главной особенностью "мягкого" моделирования является направленность на разработку понятийного аппарата для плохо формализуемых областей знания с использованием относительно простых математических моделей. Определены основные принципы применения «мягких» моделей для прогнозирования эволюции технических систем. Сформулирована укрупненная блок-схема алгоритма «мягкого» моделирования для прогноза эволюции технических систем. Выдвинутые предложения проиллюстрированы примерами применения.

Ключевые слова:

ТРИЗ; прогноз; технические системы; моделирование.

Введение

Методы прогнозирования на базе ТРИЗ позволяют формировать неколичественные прогнозы развития технических систем. Несмотря на провозглашение лозунга «Творчество как точная наука», исследования эволюции технических систем с применением математических методов и количественных оценок удручающе малочисленны. Особенно парадоксальной эта малочисленность выглядит с учетом многочисленных накопленных фактических данных об эволюции техно-систем и изменений в интенсивно пополняемом арсенале методов, специально предназначенных для так называемого мягкого моделирования сложных нелинейных систем. В данной работе мы используемый термин «мягкое моделирование» в смысле В.Арнольда

[1]: как относительно недавно открытая возможность полезной математической теории моделей типа «чем дальше в лес, тем больше дров». В "мягком" моделировании описание функционирования производится упрощенно и отражает самое существенное свойство системы (как правило, одно, максимум два). Несмотря на кажущуюся упрощенность такого подхода, "мягкие" модели демонстрируют свою эффективность в экологии, биологии, экономике, демографии. «Теория мягкого моделирования - это искусство получать относительно надёжные выводы из анализа малонадёжных моделей» [1]. Такая стратегия моделирования приходит на смену имитационному моделированию, для которого нужно было знать сотни трудноизмеримых параметров явления. Побудительные мотивы предпринятого исследования основаны на результатах предшествующего цикла работ по изучению фактических данных об эволюции разнообразных классов технических систем – обзор содержания и сводка результатов этих работ приведен в [2]. Цель данной работы – определить основные принципы применения «мягких» моделей для прогнозирования эволюции технических систем.

Информационный фонд работы

В качестве «функциональных аналогов» - систем , сложность эволюции которых не менее чем у технических систем – анализировались подходы к моделированию следующих систем:

- количественные методы в социальной и культурной динамике (Г.А. Голицын, В.М. Петров, В.П. Рыжов)

- методы анализа структуры и динамики экосистем, экологические системы, эволюционная биоценология (Г.С. Розенберг, П.М. Брусиловский, Ю.М. Свирижев, А.В. Яблоков, Дж.М. Смит)

- биологические системы (А.В. Молчанов, А.В. Жирмунский, В.И. Кузьмин, В.А. Красилов, Г.Ю. Ризниченко, А.Б. Рубин и др.)

- динамические нелинейные системы (Д.С. Чернавский, Н.Н.Моисеев, С.П. Курдюмов, Г.Г. Малинецкий, В.И. Арнольд, А.А. Андронов и др.)
- модели социальных процессов (Ю.М. Плотинский, А.П.Назаретян и др.)
- наукометрические модели (В.В. Налимов, Р.Прайс)
- глобальные демографические процессы (С.П. Капица, А.В. Подлазов)
- палеонтология (А.С.Раутиан, А.Д. Поздняков, А.Г. Арманд)
- эволюционная кибернетика, изучающая происхождение и развитие целенаправленной организации в природе, мышлении, обществе и технологии (F. Heylighen, V. Turchin, В.Г.Редько)
- проблемы выбора и селекции моделей (В.В. Жерихин, Ивахненко Г.С. Г.С.Розенберг)

Анализ информационного фонда был сфокусирован на выбор наиболее адекватных по простоте и результативности подходов. Этим определились и рамки представляемой работы – наметить контуры технологии прогнозирования технических систем. Мы употребляем здесь термин «технология» в расширенной трактовке П. Друкера: как применение знаний вчерашнего дня и применения знаний к знаниям [3].

Принципы «мягкого» моделирования

В качестве наиболее перспективных подходов для прогноза путем «мягкого» моделирования можно выделить следующие подходы:

- дедуктивный метод – формулировка исходных предпосылок, определение модели поведения системы и выведение из неё динамические следствия – законы эволюции [5];
- логически безупречный метод долгосрочного прогноза – экстраполяция кривых роста до абсурда. Результат такого прогноза – вывод о смене механизма явления. Дополнительный статистический анализ структурных изменений в системе подсказывает возможные направления изменений [6];

- Принцип множественности моделей: для объяснения и предсказания структуры и/или поведения сложной системы возможно построение нескольких моделей, имеющих одинаковое право на существование. Применение этого принципа можно проследить для математического описания даже «классических» механических и гидродинамических систем. Это близко к позиции Г.П. Щедровицкого, который единственным критерием истины считает «встречный синтез» – получение одного и того же по смыслу знания несколькими разными процедурами и последующее сопоставление результатов. Как следствие этого принципа возникает различие в объяснительных и предсказывающих моделях одной и той же системы.

- «Принцип осуществимости Б.С. Флейшмана: позволяет отличить модели сложных систем от обычных математических моделей. Математические модели требуют только указания необходимых и достаточных условий существования решения (логическая непротиворечивость: что есть на самом деле?). Модели конструктивной математики дополнительно к этому требуют указания алгоритма нахождения этого решения (например, путем полного перебора всех возможных ситуаций; как надо это сделать?). Системология рассматривает только те модели, для которых этот алгоритм осуществим, т.е. решение может быть найдено с заданной вероятностью p_0 за время t_0 (p_0, t_0 - осуществимость; преодоление сложности или ответ на вопрос: что мы можем сделать?). Иными словами, принцип осуществимости может быть сформулирован следующим образом: «мы не надеемся на везение и у нас мало времени.» (цитируется по [7])

Следует отметить, что описанные подходы и принципы не являются завершённой, полной и замкнутой системой. В процессе дальнейшей работы возможна их корректировка и пополнение.

Приведем в качестве примера применения перечисленных принципов обсуждение известного закона Мура. Выделяются такие характерные особенности:

- критерии, которыми описывается действие закона Мура, «дрейфуют» со временем (скорости удвоения количества транзисторов, суммарная производительность микропроцессора, стоимость вычислений)

- время удвоения этих «дрейфующих» параметров меняется от 12 до 18 месяцев;

- выполнение закона Мура обеспечивается результатами независимых усилий – вначале исследовательских групп внутри корпорации Intel, затем и усилиями их конкурентов;

- скорость усовершенствований «подстегивается» постоянной конкуренцией в смене морально устаревающих поколений компьютером и тормозится необходимостью производить грандиозные инвестиции для освоения нового поколения ключевых технологий микроэлектроники;

- попытки определения физических пределов миниатюризации как ограничивающих пределов действия закона Мура нельзя признать состоятельными.

Таким образом, относительная длительность существования обсуждаемой прогнозной модели объяснима (апостериорно!) соблюдением вышеперечисленных принципов.

Укрупненный алгоритм «мягкого» моделирования

В результате анализа информационного фонда удалось сформировать укрупненную блок-схему алгоритма «мягкого» моделирования для прогноза эволюции технических систем

1. Цель: установление целей и рамок прогноза, ожидаемых результатов и формата их представления. Средства: типовой перечень целей прогноза, включая описание различий прогнозирования роста и развития; техника выявления предпочтений лиц, принимающих решения; таблица соотношения «горизонт – точность прогноза»; перечень и набор образцов типовых форматов представления прогноза

2. Цель: Формирование комплекса простых моделей для описания поведения прогнозируемой технической системы. Средства: пополняемый банк эволюционных моделей с описанием объяснительных механизмов и примеров применения;

3. Цель: оценка правдоподобности и границ адекватности путем тестирования отобранных моделей. Средства: ретроспективный прогноз; статистические методы проверки гипотез (включая средства нечисловой статистики); экстраполяция до абсурдных значений; оценка методом разделения экспериментальных данных на обучающую и прогнозируемую выборки.

4. Цель: выбор наиболее адекватных моделей селекцией и протестированных моделей. Средства: метод группового учета аргументов; методы факторного анализа; «модельный штурм»; математические методы «сшивания» моделей; экспертное назначение коэффициентов доверия; методы агрегирования моделей; иконологическое моделирование; нелинейная оптимизация методом Нелдера–Мида и т. д.

5. Цель: Формирование сценариев возможного развития технической системы. Средства: алгоритм сценарного планирования; «знаниевый реактор» С. Переслегина; модернизированные/адаптированные методики Развития Творческого Воображения; Roadmapping.

6. Сравнительный анализ сценариев. Средства: сравнительные таблицы; интерактивное обсуждение, формирование окончательного варианта прогнозных исследований.

Пример применения «мягкого» моделирования

Некритичное использование любой модели для прогноза развития технических систем может привести к серьезным ошибкам. Такой прогноз делается на основе анализа начального этапа уже совершившейся эволюции. В то же время, реальный процесс развития системы неизбежно включает в себя результаты последующих исследований, проведенных на более поздних этапах.

Иногда форма начального участка кривой может искажаться и отличается от идеализированного представления. Это приводит к тому, что долгосрочный прогноз, сделанный по такому участку, может значительно отличаться от реального изменения параметра. Существенное влияние количества учитываемых точек начального участка эволюции на точность результатов прогноза были показано В. Бердоновым [8].

Кроме того, все вышеупомянутые модели требуют знания предела развития системы. Значения физического предела развития могут быть в ряде случаев рассчитаны теоретически, но параметры реальных ТС крайне редко достигают своих физических пределов [9]. Как правило, значения достигаемых пределов ниже, чем физических, и определяется экономическими или организационными причинами.

Анализ развития различных технических систем (источники света, телевизоры, аккумуляторы, железнодорожные локомотивы, двигатели) показал, что каждая новая система развивается быстрее, чем предыдущая, и достигает более высоких значений главного параметра (См. Рис.1) [10].

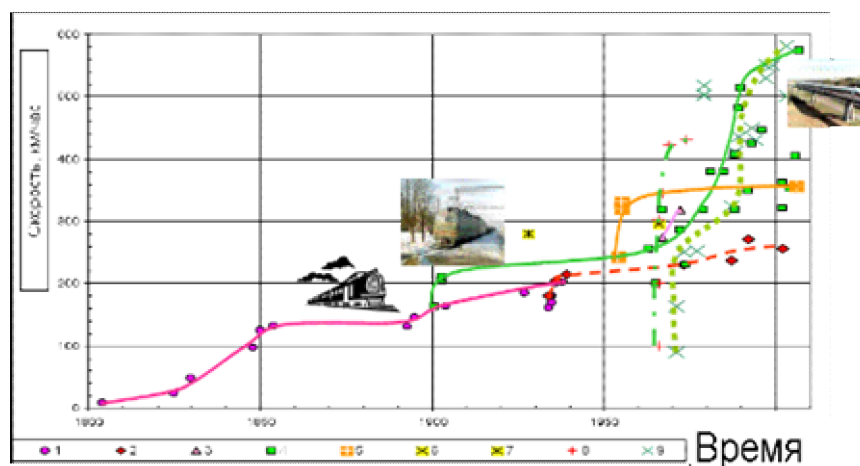


Рис.1. Изменение скорости железнодорожного транспорта от времени. Обозначения: паровоз (1), дизель (2), локомотив с газовой турбиной (3), электровоз с несколькими двигателями (4), электровоз-локомотив (5), реактивный локомотив (6), ракетный привод (7), поезд на воздушной подушке (8), поезд на магнитной подушке (9).

Это приводит к тому, что форма кривой развития изменяется. Такое изменение можно в общем случае представить в относительных координатах, как семейство несимметричных кривых, имеющих различную кривизну (См. Рис.2).

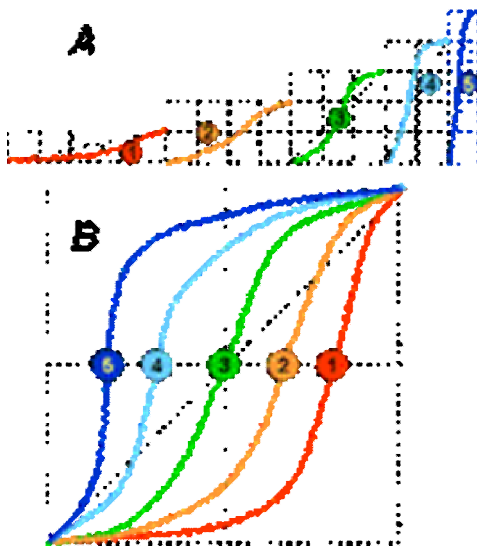


Рис. 2. Изменение формы и характера кривых развития в абсолютных (А) и относительных (В) координатах.

Следовательно, предлагаемая для описания модель должна отвечать нескольким критериям:

- модель быть «привязана» к точкам, расположенным на начальном участке кривой;
- модель должна описывать несимметричные кривые;
- модель должна давать возможность спрогнозировать возможное значение технического предела развития.

Широко используемые логистические кривые и модели Перла и Гомперца не отвечают первым двум критериям. Кроме того, они слишком «привязаны» именно к конечным точкам зависимости, наименее определенных в начальный, наиболее интересный для прогноза период эволюции. Это радикально осложняет возможность надежного прогноза.

В работе [11] рассмотрены применения различных видов уравнений для описания количественных кривых зависимости массы добываемой нефти от времени. В ней показано, что логистические кривые справедливы только для случая линейного падения скорости роста рассмотренного параметра. Эта модель так называемого «подавляемого роста» соответствует, как уже было отмечено, только симметричным кривым.

В той же работе было замечено, что для описания несимметричных кривых могут быть использованы уравнения, использующие так называемое ядро Кольрауша, которое соответствует растянутой во времени экспоненте и является аналогом распределения Вейбулла в математике. Эта зависимость имеет вид:

$$y_i = 1 - \exp\left[-\exp\left(\frac{a}{b} \cdot (x_i - x_0)\right)^b\right] \cdot (y_\infty - y_0) + y_0 \quad (1),$$

где y_0 , x_0 – координаты начальной точки зависимости, y_∞ – предельное значение параметра, a и b – параметры модели. Подобное уравнение ранее было использовано для описания изменения механических характеристик натуральных, искусственных и синтетических волокон при их пластификации [12].

На Рис. 3 представлен пример описания этим уравнением временной зависимости эффективности источников света. Нами показано, что данная модель удовлетворительно описывает реальные кривые развития. Преимуществом данной модели является то, что в логарифмических координатах она с достаточной точностью описывается прямой линией (См. Рис.4).

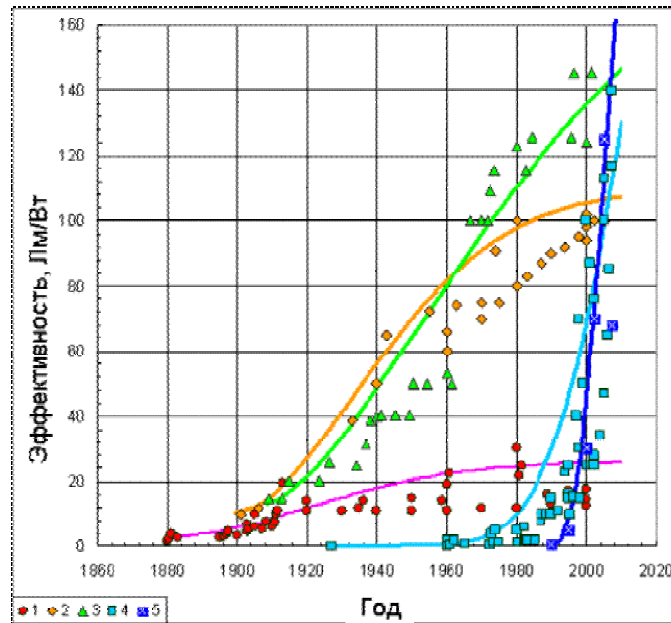


Рис.3. Зависимость эффективности от времени для: ламп накаливания (1), флуоресцентных ламп (2), дуговых ламп (3), светодиодов (4) и органических светодиодов (5). Точки – экспериментальные данные, линии – расчет по уравнению (1).

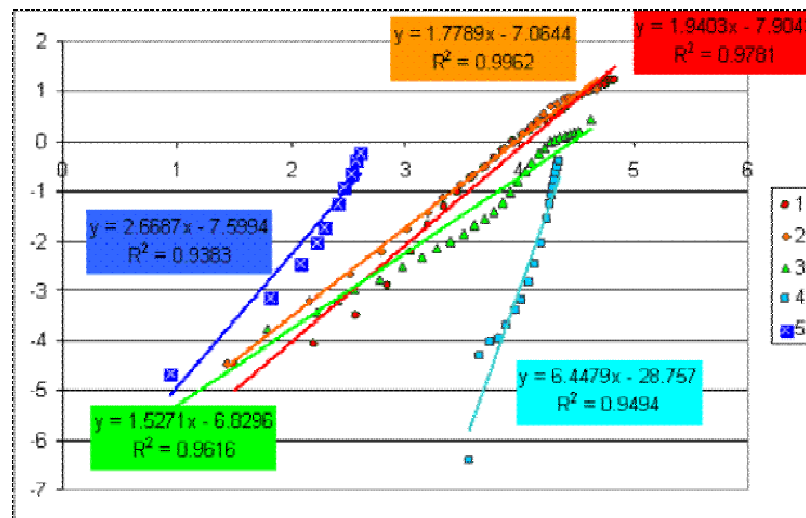


Рис.4. Зависимость эффективности от времени в логарифмических координатах для: ламп накаливания (1), флуоресцентных ламп (2), дуговых ламп (3), светодиодов (4) и органических светодиодов (5). Точки – экспериментальные данные, линии – расчет по уравнению (1).

Уравнение (1) позволяет, задавшись примерным значением предельного значения параметра y_{∞} , проводить подбор уточненного значения этого параметра, исходя из требований линейности этой зависимости. Такой подбор может осуществляться с использованием методов наименьших квадратов, или градиентного спуска. Предлагаемая модель, также, описывает реальные зависимости более корректно, чем логистическая кривая. Пример сравнительного описания модельной кривой с помощью предлагаемой и логистической моделей представлен на Рис. 5.

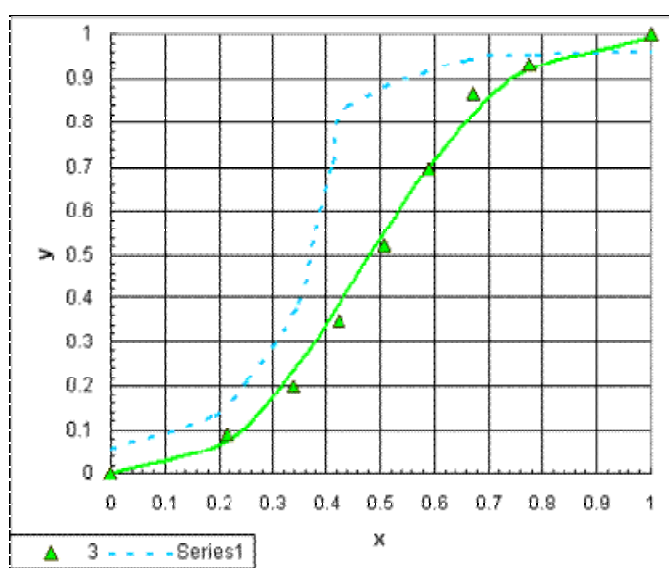


Рис.5. Описание модельной кривой 3 на Рис.2 по предлагаемой экспоненциальной модели (сплошная линия) и по логистической модели (пунктир) в относительных координатах.

Для случаев, у которых не определены пределы роста и известны только начальные точки зависимости, применение подобного уравнения является достаточно проблематичным. Однако, эту проблему можно решить, используя линейность уравнения (1) в логарифмических координатах. Если принять это предположение, то появляется возможность подобрать соответствующие параметры уравнения, используя методы наименьших квадратов, или градиентного спуска.

По нашему мнению, в перспективе такие зависимости могут быть описаны с помощью модели роста Капицы-Баренблатта, которая соответствует гиперболическому росту параметра, который в определенный момент сменяется «катастрофой», то есть сменой механизма роста. В нашем случае такая смена механизма соответствует перегибу S-образной кривой.

Заключение

Предложен, синтезирован и описан подход к «мягкому» моделированию эволюции технических систем. Сформулированы базовые принципы и показаны примеры практического применения предлагаемого подхода. Предложен укрупненный алгоритм применения «мягкого» моделирования для описания эволюции и прогноза технических систем. Показан пример применения «мягкого» моделирования для описания эволюции источников света

Литература

1. Арнольд В. И. «Жесткие» и «мягкие» математические модели. М. : МЦНМО, 2004. 32 с.
2. A. Kynin, N. Feygenson V. Lenyashin // S-Curve as a Model for Description of Technical System Development. In International Journal of Systematic Innovation, 2010 (in press).
3. Эдерсхейм Э. Лучшие идеи Питера Друкера / Пер. С англ. Под ред. А.А. Чернова.- СПб.: Питер, 2008 – 384 с.
4. Адаптировано из http://www.chronos.msu.ru/TERMS/razumovsky_predvidenie.htm
5. Голицын Г.А., Петров В.М. Социальная и культурная динамика: долговременные тенденции (информационный подход). – М.: КомКнига, 2005.- 272 с.
6. Налимов В.В., Мульченко З.М. Наукометрия Изучение развития науки как информационного процесса. - М.:Наука, 1969. – 192 с.
7. Г.С. Розенберг Системно-методологические проблемы современной экологии http://www.krc.karelia.ru/doc_download.php?id=1306&table_name=section&table_ident=6
8. Бердоносков В.Д., личное сообщение, декабрь 2009 г.

9. Alexander Kynin, Vasily Lenyashin, Naum Feygenson. S-Curve as a Model for Description of Technical System Development. The 1st International Conf. on Systematic Innovation 2010.01.22-25, Taiwan.
10. Кынин А.Т., Леняшин В.А. СИСТЕМНОЕ РАССМОТРЕНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, Доклады на TRIZ-fest 24-26 Июля, Санкт-Петербург, 2008 С.257-271.
11. Соколов В.А. Эволюционные уравнения, как феноменологические модели разработки нефтегазовых залежей. Нефтегазовое дело, 2006.
12. Гребенников С.Ф., Кынин А.Т., Ключев Л.Е. Сорбция водяного пара текстильными материалами. // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. - 1998, №2, С.176-183.