

# Идентификация систем. Традиции и перспективы



*Бахтадзе Наталья Николаевна*

Институт проблем управления  
имени В.А. Трапезникова РАН

Москва, 2024



Термин «идентификация»  
предложил в 1956 г. Лотфи Заде

ZADEH, L. On the identification problem // IRE Trans. of Circuit Theory, CT-3. – 1956. –P. 277-281.



**Идентификация** - построение математической модели объекта/системы посредством анализа данных функционирования (реального либо экспериментального)

**Альтернатива т.н.«строгим» моделям имитационного моделирования**, в основе которых лежат известные законы (физические, химические, и т.д.) либо инженерные и технологические расчеты



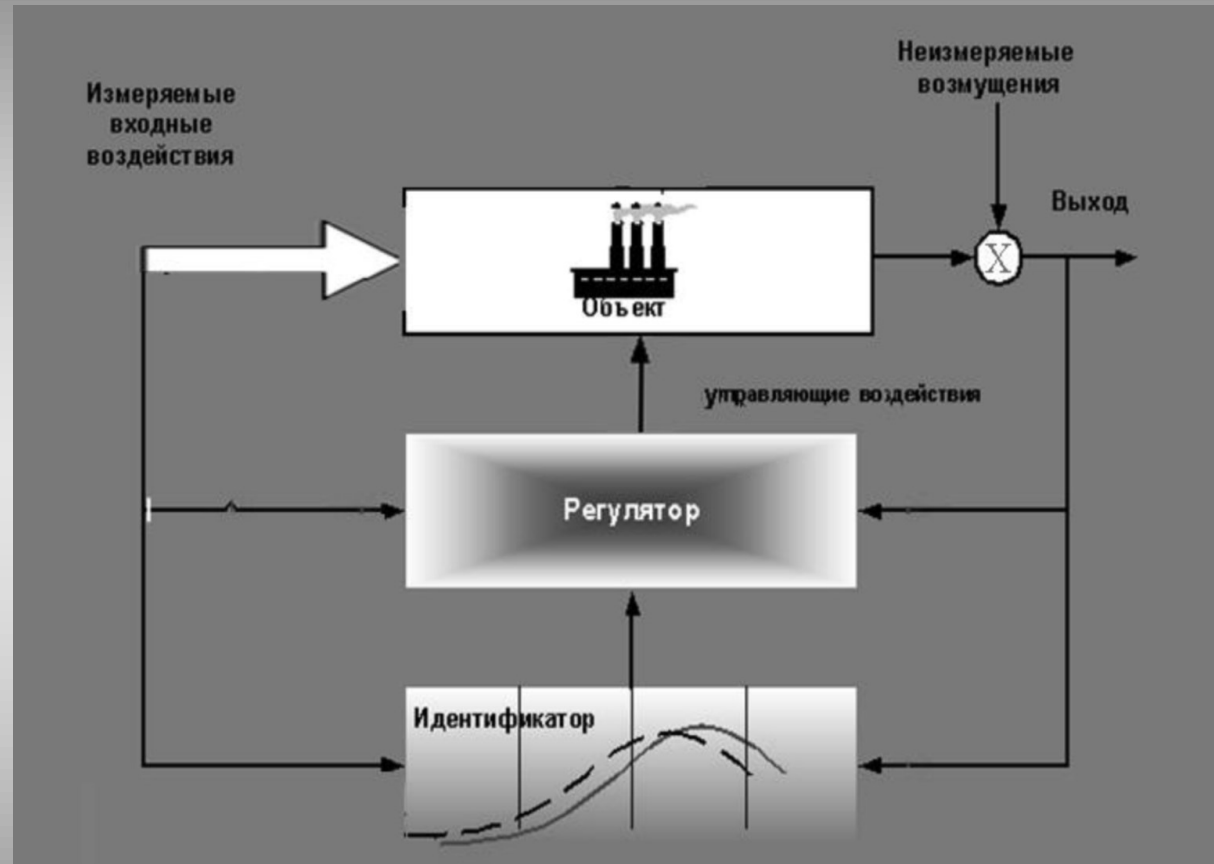
*«Идентификация систем - это интерфейс между реальным миром приложений и математическим миром теории управления и модельных абстракций».*

**Л.Льюнг**



# Цели идентификации

- анализ, изучение свойств объекта,
- решение задач управления



Понятие **адекватности модели** непосредственно связано с выполнением определенных требований к управлению.



***«Идентификация вдохнула в  
проблему построения модели  
новую жизнь, выдвинула  
требования, которые  
непосредственно вытекали из  
задачи управления».***

**Н.С. Райбман**



# Классы моделей и методов идентификации

## Методы идентификации:

- **активные и пассивные**

Активные методы используют тестовые воздействия, подаваемые на вход объекта/системы – специально сформированные сигналы (детерминированных либо стохастических).

Пассивные методы основаны на обработке статистической информации реального функционирования объекта.

- **оперативные и ретроспективные** – по признаку использования только оперативной либо еще и ретроспективной информации, а также по темпу обработки этой информации.



# Классы моделей и методов идентификации

## Идентификационные модели:

- статические и динамические;
- линейные и нелинейные;
- детерминированные и стохастические;
- стационарные и нестационарные;
- дискретные и непрерывные;
- сосредоточенные и распределенные;
- описываемые в пространствах «вход-выход» и в пространстве состояний;
- параметрические и непараметрические





# Эволюция методов идентификации

## Идентификация как обратная задача динамики

Построение оператора с известной структурой, адекватно и удовлетворительно описывающего реальное функционирование системы в смысле выбранного критерия можно интерпретировать как **обратную задачу динамики**.

Решение может не существовать, быть не единственным и может быть неустойчивым по отношению к погрешностям измерения исходных данных. Такие задачи относятся к классу **некорректно поставленных**.



# Эволюция методов идентификации

## Идентификация как обратная задача динамики



**Корректно поставленная задача в математике** — прикладная задача, математическое решение которой существует, единственно и устойчиво.

**Жак Адамар**

Для решения некорректных задач, в частности, вырожденных и плохо обусловленных СЛАУ, был предложен метод **регуляризации**. В его основе лежит учет дополнительной априорной информации.

Для получения единственного устойчивого приближенного решения СЛАУ  $Ax=b$  используются различные методы регуляризации.

Минимум **функционала Тихонова**:

$$\Omega(x, \lambda) = |Ax - b|^2 + \lambda|x - x_0|^2$$



# Эволюция методов идентификации

## Метод наименьших квадратов



А.М. Лежандр    К.Ф. Гаусс

Формулировки МНК были предложены в первом десятилетии XIX века практически одновременно А.М. Лежандром, К.Ф. Гауссом.

**МНК** состоит в замене значений измерений т.н. «модельными» значениями, которые находятся из условия минимума квадратичной функции разности модельных значений и реальных измерений («**невязки**»).



П.-С. Лаплас связал метод с теорией вероятностей

Работы А. А. Маркова в начале XX века позволили включить МНК в теорию оценивания





# Эволюция методов идентификации

## Идентификация в 20-х – 50-х гг. XX века

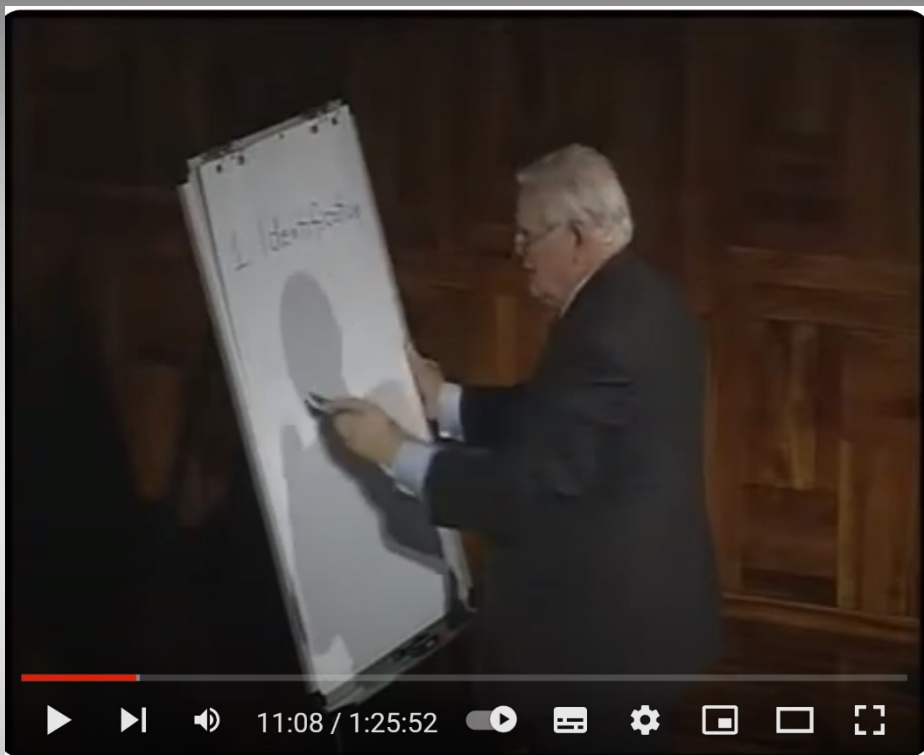
изучение реакций систем на определенные управляющие (тестовые) воздействия (ступенчатое, гармоническое, и т.д.).

ÅSTRÖM, KARL JOHAN; EYKHOFF, PIETER. *System Identification : A Survey // Automatica*, 1971. – P. 123-162.

Практическое применение этих методов было ограничено, поскольку предполагало удовлетворение требований линейности, стационарности, нормальности распределений. Скалярный случай



# Эволюция методов идентификации



## Пространство состояний 1960

Рудольф Калман  
описание системы управления  
в пространстве состояний и  
основы оптимальной  
фильтрации

Работы Р. Калмана и Р. Бьюси в 1960-х г. легли в основу методов теории рекуррентного (последовательного) оценивания.



## Идентификация систем как статистическая теория

Неполнота и неточность априорной информации, необходимость учета реальных условий функционирования и изменений во времени как характеристик самих объектов, так и условий их функционирования вызвали потребность в создании новых принципов и методов построения моделей объектов управления для решения задач анализа и синтеза

Н.С. Райбман



# Эволюция методов идентификации

## Методы максимального правдоподобия

**1965 К. Острём:** методы идентификации систем управления, основанные на минимизации критерия, зависящего от параметров модели, по своей статистической сути – **методы максимального правдоподобия**.

Модели, известные из теории математической статистики, как **ARMA (авторегрессионное скользящее среднее)** и **ARMAX (авторегрессионное скользящее среднее со входом)**, составляют основу **метода ошибки предсказания**.

*К.Ю. Острем, Н.С. Райбман. Введение в стохастическую теорию управления. М.: Мир, 1973.*

**К.Й. Острем. Лунд, Швеция, 2019**





# Эволюция методов идентификации

## Методы максимального правдоподобия

продемонстрировали преимущества метода максимального правдоподобия (ММП) над МНК

- Методы идентификации, использующие квадратичный критерий качества **чувствительны к отклонениям закона распределения от нормального**.
- МНК **утрачивает эффективность в условиях различных выбросов**, грубых ошибок, негауссовских помех с тяжелыми хвостами.
- оценки максимального правдоподобия, вообще говоря, **могут быть смещёнными**, но являются состоятельными, асимптотически эффективными и асимптотически нормальными.

Оказалось, что ММП дает хорошие результаты, если к анализу данных применяется **байесовский подход (при котором вероятность интерпретируется как мера неопределенности знаний об исследуемом объекте)**.

*Байесовская оценка решения — это статистическая оценка, минимизирующая апостериорное математическое ожидание функции потерь*





## Рекуррентные алгоритмы идентификации

Методы были направлены на получение **описания максимально «точного» описания функционирования** системы.

Ставится вопрос о **сходимости к «точным параметрам»** и исследуются связанные с ним

Вопросы **идентифицируемости систем и статистические свойства оценок.**

## Наиболее популярные Методы

**Стохастической аппроксимации** - последовательный способ улучшения оценки, использующий на каждом шаге новые наблюдения и предшествующую оценку

## Градиентные методы

Пусть целевая функция имеет вид:

$$F(\vec{x}) : \mathbb{X} \rightarrow \mathbb{R}.$$

И задача оптимизации задана следующим образом:

$$F(\vec{x}) \rightarrow \min_{\vec{x} \in \mathbb{X}}$$

В случае, когда требуется найти максимум, вместо  $F(\vec{x})$  используется  $-F(\vec{x})$

Основная идея метода заключается в том, чтобы идти в направлении наискорейшего спуска, а это направление задаётся антиградиентом  $-\nabla F$ :

$$\vec{x}^{[j+1]} = \vec{x}^{[j]} - \lambda^{[j]} \nabla F(\vec{x}^{[j]})$$

где  $\lambda^{[j]}$  задает скорость градиентного спуска и может быть выбрана

- постоянной (в этом случае метод может расходиться);
- убывающей в процессе градиентного спуска;
- гарантирующей наискорейший спуск:



# Эволюция методов идентификации 70-е – 80-е

## Наиболее популярные Методы

**Адаптивные алгоритмы идентификации**, использующие представление сигналов в частотной и временной областях

### Алгоритмы стохастической аппроксимации

**Метод подпространств** - поиск модели объекта в пространстве состояний, имеющей наименьший порядок вектора состояний, на основе импульсной переходной характеристики



# Эволюция методов идентификации 70-е – 80-е

**Актуальные задачи**

**Статистические свойства оценок**

**Идентифицируемость систем**

**Исследование смещенности оценок и ошибки дисперсии для оценивания передаточных функций объектов**

**Идентификация как проблема синтеза**



# Эволюция методов идентификации

## Идентификация: 90-е

- **Методы регуляризации** в задачах нахождения оценки весовой функции линейных и нелинейных стохастических систем
- Методы **идентификации нелинейных динамических систем**, представляемых функциональным рядом Вольтерра
- Методы **структурной идентификации** - задачи выбора операторов или систем уравнений, описывающих процессы в исследуемой системе
- **Робастные методы оценивания** позволяющие оптимально в смысле определенного критерия использовать имеющуюся априорную информацию



# Эволюция методов идентификации

## Идентификация: 60-е 90-е ИПУ РАН

- Алгоритмы **условного прогнозирования** выходной реакции объектов управления. Методы динамической оптимизации технологических процессов – **И.И. Перельман**
- Исследование **идентифицируемости** как задачи однозначной восстанавливаемости параметрического описания.  
**Б.Н. Петров: условия параметрической идентифицируемости** объектов управления **в замкнутых автоматических системах.**
- Методы идентификации объектов **с распределенными параметрами**



# Эволюция методов идентификации

Идентификация: 70-е 90-е ИПУ РАН **лаборатория идентификации**

- **Адаптивные алгоритмы.** Влияние корреляции в помехах измерений на структуру оптимальных алгоритмов, а также погрешностей вычислений на **сходимость** алгоритмов.
- **Дисперсионная теория статистически оптимальных систем,** в рамках которой характеристики оптимальной системы находятся по сложному критерию, представляющему собой функционал от дисперсионных функций различных типов.
- Методы идентификации **многомерных, нелинейных, нестационарных объектов.**



# Эволюция методов идентификации

Идентификация: 70-е 90-е ИПУ РАН

лаборатория идентификации

- Методы, основанные на идее **кусочной аппроксимации**

Фазовое пространство входного сигнала разбивается на несколько непересекающихся областей таким образом, что внутри каждой из этих областей условная дисперсия шума относительно входного сигнала приближенно постоянна

- методы **определения структуры,**
- модели объектов **с распределенными параметрами**



# Эволюция методов идентификации

Идентификация: 70-е 90-е ИПУ РАН лаборатория идентификации

## Идентификация объекта в замкнутых системах в условиях шумов и параметрических возмущений

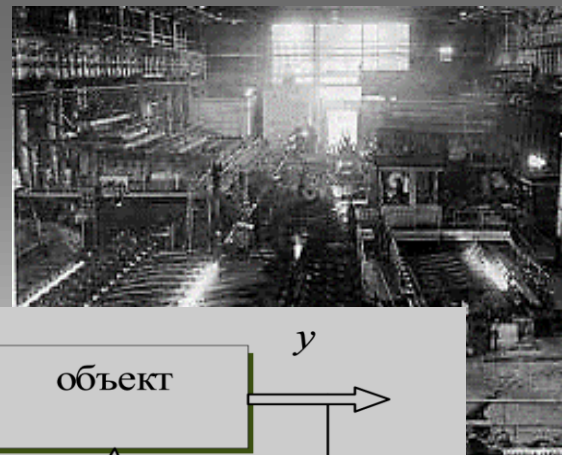
- ❑ Проблема сходимости оценок в замкнутом контуре - при коррелированности возмущений на выходе объекта и в сигнале управления.
- ❑ Алгоритмы получения состоятельных оценок параметров объекта в замкнутом контуре







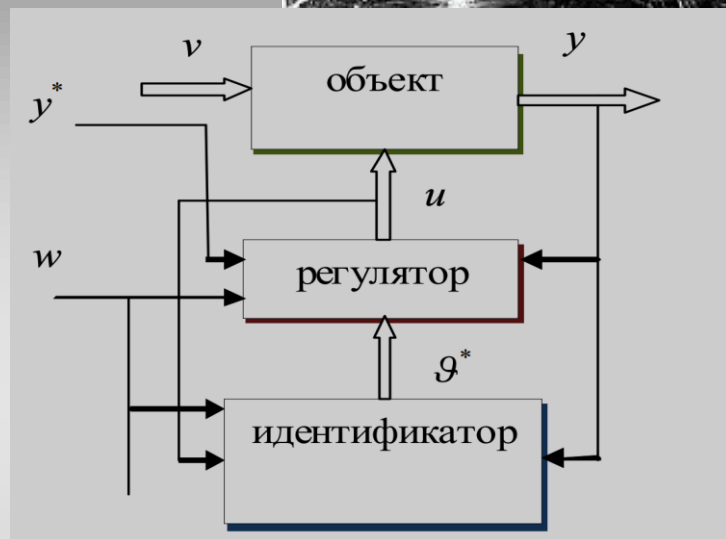
Идентификация: 70-е 90-е ИПУ РАН  
лаборатория идентификации



Адаптивные системы с  
идентификатором в цепи обратной  
связи

Система управления трубопрокатным  
станом 160 на Первоуральском  
Новотрубным заводом (ПНТЗ)

Государственная премия СССР 1976 г.





## Многочисленные приложения

Система автоматизации производств бора - Дальнегорск . Устькаменогорск: на Титаномагниевом комбинате создавалась система управления для изготовления титановой губки. Работы в области производства магния и др.

Адаптивные системы с идентификатором для управления точностью горячей прокатки бесшовных труб работали практически на всех трубных заводах страны.





# Эволюция методов идентификации



## Идентификация: 70-е 90-е

1986 г. Я.З. Цыпкин: **информационная теория идентификации, определяющая алгоритмы идентификации, оптимальные для различных классов объектов, для чего вводится понятие *оптимальных на классе функций потерь*.**

**Асимптотически оптимальные алгоритмы идентификации** - алгоритмы, обладающие максимальной скоростью сходимости при известной плотности распределения помехи.



# Идентификация: 90-е +



## Идентификация в условиях неопределенности

Методы на основе **интервального анализа**, основанного на методе эллипсоидов - для объектов с интервальной неопределенностью

При ограниченных возмущениях в системе и в отсутствии информации о законах их распределений - **метод гарантированного оценивания** (Назин и Поляк, 2007).

Для оценивания параметров линейных стационарных систем в условиях неопределенности - **техника линейных матричных неравенств**



# Идентификация: 90-е +

## Идентификация в условиях неопределенности

При **статистическом описании неопределенности значения** функционалов от эмпирического распределения с увеличением объема выборки наблюдений сближаются с соответствующими «теоретическими», что позволяет получать состоятельные оценки характеристик объекта

## Методы теории робастного оценивания

Основная идея робастного оценивания — это построение статистических процедур, устойчивых к возможным отклонениям от принятых вероятностных моделей распределений данных.





# Идентификация: 90-е +

**Методы прямой оптимизации весов** для нелинейных задач оценивания функции регрессии и идентификации авторегрессионных систем при непараметрической неопределенности



**Рандомизированные алгоритмы.** Рандомизация: добавление в алгоритм дополнительных, случайных, но контролируемых возмущений.



# Идентификация: 90-е +

## Метод конечно-частотной идентификации

(активная идентификация). Пробный сигнал представляет собой сумму гармоник, число которых не превышает величину вектора состояния объекта. Амплитуды и частоты этого сигнала в значительной мере влияют на точность идентификации.

Разработаны алгоритмы **(А.Г. Александров)**, которые обеспечивают малое влияние испытательного сигнала на выход объекта, по сравнению с влиянием возмущений и помех



# Идентификация: 90-е +

## Непараметрические методы

Методы на основе оценивания: **переходных и импульсных переходных характеристик, частотных и спектральных характеристик.**

**Информационно-теоретические подходы** к структурной, параметрической и непараметрической идентификации стохастических систем – применение согласованных мер зависимости случайных величин и мер расходимости вероятностных распределений.





# Идентификация: 90-е +

## Идентификация нелинейных объектов

### Статические:

- **методы линеаризации**: гармонической, статистической, малых приращений – для объектов с гладкими характеристиками и для случаев небольших отклонений и возмущений относительно номинальных режимов;
- **основанные на аппроксимации модели объекта**, если структура модели точно не известна. Полиномы Чебышева, Эрмита, Лагерра.

### Динамические:

**методы матричных операторов** - строятся функциональные полиномы, ортогональные для заданного класса входных сигналов. Процесс идентификации заключается в определении ядер на основе статистической обработки данных наблюдений.

**Ряды Вольтерра, Гаммерштейна, Винера, непрерывных и дискр. полиномов Колмогорова – Габора**

**Представление ортогональных функциональных рядов в частотной области** позволяет найти оптимальное решение в явном виде. Оценки в частотной области алгоритм быстрого преобразования Фурье



# Идентификация: 90-е +

## Идентификация нестационарных объектов

**Аппроксимационные методы:** осуществляется переход от бесконечномерного к конечномерному параметрическому пространству, а затем используются методы идентификации для стационарных объектов

**Аппроксимация** неизвестных переменных параметров:

- **полиномами** конечной степени на всем интервале;
  - Использование разложения входа и выхода объекта в ряды по экспоненциальным функциям: позволяет редуцировать задачу к линейной.
  - Исходное уравнение с полиномиальными коэффициентами с помощью разложения входа - выхода в ряды по блочно-импульсным функциям преобразуется в систему линейных алгебраических уравнений
- **ортогональными функциями**  
метод оценки коэффициентов в разложении переменных параметров по ортогональному базису в пространстве функций, суммируемых с квадратом, с использованием рекуррентного МНК

**Прямые методы** (не производится предварительная редукция к конечномерному параметрическому пространству):

**методы на основе рекуррентных алгоритмов, непараметрические методы, методы гарантированного оценивания и оптимального сглаживания, спектральные методы и нейронные сети.**



# Идентификация: 90-е +

## Идентификация объектов с распределенными параметрами

Динамика СРП описывается дифференциальными уравнениями в частных производных, интегральными и интегро-дифференциальными уравнениями

**Методы сведения моделей СРП к моделям систем с сосредоточенными параметрами:**

**метод Галеркина, метод характеристик, метод конечных элементов, дискретизация, метод моментов, разложение по ортонормальному базису, использование сплайнов.**



# Идентификация: 90-е +

## Идентификация объектов с распределенными параметрами

1. **Методы сведения моделей СРП к моделям систем с сосредоточенными параметрами**

2. **Оптимизация:**

**Градиентные методы:** Гаусса – Ньютона и Ньютона – Рафсона, Флетчера – Ривса, стохастическая аппроксимация, метод пошагового спуска, метод наискорейшего спуска и метод присоединенного состояния.

**Методы калмановской фильтрации и нелинейной фильтрации.**

**Вариационные методы** дают возможность найти состояние системы и/или зависящие от состояния, времени и координат параметры как экстремумы функционала качества (критерия).

**Методы теории оптимального управления** используются обычно в задачах оценки состояния.

**Методы нелинейного программирования** применяются, когда имеются априорные сведения о нелинейности уравнений и/или краевых условий либо о нелинейности зависимости идентифицируемых величин от координат и/или времени.



# Идентификация: 90-е +

## Идентификация объектов с распределенными параметрами

### Спектральная теория для систем с распределенными параметрами

Введено понятие **спектральной характеристики по пространственной переменной**.

Дифференциальное уравнение с частными производными на основании свойств спектральных характеристик может быть представлено бесконечномерной системой обыкновенных дифференциальных уравнений в форме Коши, правая часть которых содержит члены, учитывающие граничные условия и внешние возмущения.

**Нейросетевые модели.** Применение к СРП обусловлено затруднением применения стандартных методов идентификации вследствие нелинейности моделей, большого объема данных, неточности их измерений, а также высокой вычислительной сложностью классических методов.

**Нечеткие модели** – на основе представления СРП в виде многосвязной сосредоточенной системы.



# Идентификация: 90-е +

## Методы идентификации структуры

- задачи выбора операторов или систем уравнений, описывающих процессы в исследуемой системе

## Оценивание порядка модели. Спектрально-аналитические оценки

Непараметрическая

оценка передаточной функции  $\hat{W}(e^{i\omega}) = \frac{Y(\omega)}{U(\omega)}$  основана

на анализе данных о входе  $u(t)$  и выходе  $y(t)$  на интервале  $t \in [1, T]$ . Если  $\hat{W}(e^{i\omega})$  содержит информацию о специфике динамики объекта (величине резонансных пиков, высокочастотных срезов и фазовых сдвигов), то на основе анализа  $\hat{W}(e^{i\omega})$  можно выбрать порядок модели, чтобы адекватно отобразить динамику системы.

## Оценка размерности объекта в условиях неопределенности

Критерии Акаике: 1) оценка финальной ошибки предсказания; 2) информационный критерий Акаике; байесовский информационный критерий (BIC); критерий Шварца (SC), etc.

# L. Ljung. Perspectives on system identification. *Annu. Rev. Control.* 34(1): 1-12 (2010)

*«Let me end with a personal IFAC reflection. When I was IFAC Vice President and chairman of the Technical Board (1987–1993) there was a discussion if it was not time to abolish the long running (since 1967) Symposium series on System Identification, since **the topic had lost its luster**. In the end we did not do so. I hope I have convinced the readers that that was a wise decision».*



*«Когда я был Вице-президентом ИФАК и председателем Технического комитета, проходила была дискуссия, не пришло ли время отменить длящуюся с 1967 г. серию симпозиумов по Идентификации Систем, поскольку **тема потеряла свой блеск**. В конце концов, мы этого не сделали. Надеюсь, я убедил вас, что это было мудрое решение».*



Л. ЛЬЮНГ

Perspectives on System Identification

Пленарный доклад на 17 WC IFAC, Сеул, Южная Корея

Теория статистического обучения

Statistical Learning Theory, SLT

Машинное обучение

Machine Learning

Интеллектуальный анализ данных

Data mining

Mathematical statistics and time series analysis (cf Section 3.2) is in many respects the “mother” field of System Identification, see e.g. Deistler (2002). Here many of the basic results of Section 2 were developed. System identification is clearly a very broad field, and it is not meaningful to give a terse summary of recent trends.

Among developments with relevance to System Identification are for example the *bootstrap*, see e.g. Efron and Tibshirani (1993), and the EM algorithm, (Dempster et al., 1977). Other results of relevance to order selection are new techniques for regularization (variants of (5b)), such as *Lars*, *Lasso*, *NN-garotte*, see e.g. Hastie et al. (2001).

### 3.2 Econometrics and Time Series Analysis

*Econometrics* is a science that has grown out of statistics for extracting information from economic data, taking into account both the special features of such data and the a priori information coming from economic theory. Econometrics has a long tradition of giving inspiration to time series and difference equation modeling and its roots coincide with developments in statistics. The work on time series dates back to Jevons (1884), Yule (1927), and Wold (1938). The classic paper Mann and Wald (1943) developed the asymptotic theory for the LS estimator for stochastic linear difference equations (AR systems). The results were extended to simultaneous (multivariate) systems, where LS is not consistent, in Koopmans et al. (1950), where also central identifiability issues were sorted out and Gaussian Maximum Likelihood estimates were proposed and analyzed. Important extensions to the ARMA(X) case have been proposed by Anderson (1971) Hannan (1970) later on. The problem of errors-in-variables modeling (when there are disturbances on both input and output measurements) also has its origins in econometrics, (Frisch, 1934).

More recently, important focus has been on describing volatility clustering, i.e. more careful modeling of conditional variances for modeling and forecasting of risk (GARCH models, (Engle, 1982)), as well as on describing non-stationary behavior of interesting variables in terms of a common stationary linear combination (“co-integration”), (Engle and Granger, 1987), which gives the long run equilibrium relation between these variables. These two subjects were in focus for the Sveriges Riksbanks Prize in Economic Sciences in memory of Alfred Nobel in 2003.

of the... played an essential role, e.g. Artificial Intelligence, like Kohonen’s self-organizing and self-learning maps, (Kohonen, 1984), to Quinlan’s tree-learning for binary data, (Quinlan, 1986), and the early work on perceptrons, (Rosenblatt, 1962), that later led to neural networks. More recent efforts, include Gaussian Process Regression (kriging), e.g. Rasmussen and Williams (2006), which in turn can be traced back to general nonlinear regression. Overall, the fields on machine learning and statistical learning appear to be converging.

### 3.5 Manifold Learning

Another “learning topic” is *manifold learning*, which really is the important area of dimension reduction of high-dimensional data to nonlinear manifolds. This is a nonlinear counterpart of multivariate data analysis, such as Principal Component Analysis (PCA). Some techniques, like *kernel PCA*, (Schölkopf et al., 1999), are such extensions. Other methods are based on developing proximity matrices, often with nonparametric techniques, such as isomaps and variance unfolding. A special such technique that has been frequently used is LLE (*Local Linear Embedding*), (Roweis and Saul, 2000). It can be described as a way to determine a coordinate system in the manifold that inherits neighborhoods and closeness properties of the original data. Manifold learning has evolved into a community of its own, essentially because of its importance for computer vision and object recognition.

### 3.6 Statistical Process Control and Chemometrics

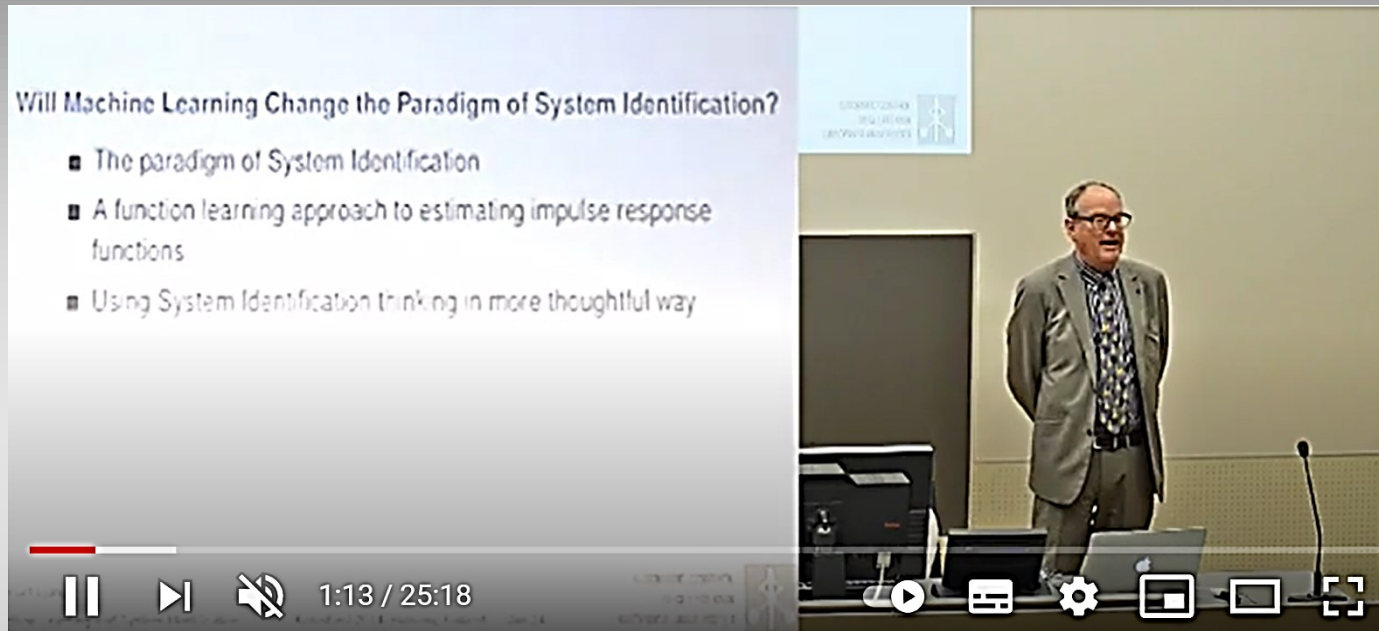
The term *chemometrics* is primarily used in process industry and stands for statistical methods for extracting information from data sets that often consist of many measured variables. The techniques are various forms of Multivariate data analysis, such as PCA, but in Chemometrics the use of Partial Least Squares (PLS), (Wold et al., 1984), has been a predominant way of projecting data onto linear subspaces. For a recent survey, see MacGregor (2003). The PLS methods are conceptually related to *subspace methods* in System Identification. *Statistical Process Control* (SPC) is a buzzword for sorting out and finding relevant information. Data mining has been applied to a



# Тенденции

Л. Льюнг

Изменит ли машинное обучение парадигму идентификации?



Will Machine Learning Change the Paradigm of System Identification?

- The paradigm of System Identification
- A function learning approach to estimating impulse response functions
- Using System Identification thinking in more thoughtful way

1:13 / 25:18

к 70-летию Хейкки Койво 24.1.2014  
Университет Аалто, Отаниеми,  
Эспоо, Финляндия.

Master classes in China, Sep 2018: Data  
Science: From System Identification to  
(Deep) Learning and Big Data.

# Конгресс IFAC, Берлин 2020

**Пленарное заседание** Learning and Control

**Reflections on the Learning-to-Control Renaissance** (Benjamin Recht)

**Дискуссия: "Control and learning – is there really a divide?"**

**Пленарное заседание** Reinforcement Learning for Process Control and Beyond

**Reinforcement Learning for Process Control and Beyond** (Jay H. Lee)

**Дискуссия: "Industrial Potential of Reinforcement Learning"**



# Идентификация сегодня

## ❑ **Методы на основе мягких вычислений.**

М.В. (Л. Заде, 1994 ) - неточные, приближённые методы решения задач, в.г., не дающие решение за полиномиальное время.  
нечёткие множества, генетические алгоритмы, эволюционное («роевое») моделирование.

## ❑ **Методы, основанные на теории статистического обучения (Statistical Learning Theory, SLT)** построения и анализа алгоритмов, обучаемых по прецедентам.

## ❑ **Алгоритмы, использующие индуктивные знания** – закономерности, извлекаемые из всей совокупности данных (и пополняемые) об объекте и его функционировании на основе их анализа,

## ❑ **Методы на основе регуляризации** – для асимптотического уменьшения смещения оценок



# Идентификация сегодня

## □ Методы на основе регуляризации

Регуляризация в статистике, машинном обучении, теории обратных задач — **метод добавления некоторых дополнительных ограничений к условию с целью решить некорректно поставленную задачу или предотвратить переобучение.**

Чаще всего эта информация имеет вид штрафа за сложность модели.



# Идентификация сегодня

## □ Методы на основе регуляризации

В представленных ниже формулах для эмпирического риска  $Q$ :  $\mathcal{L}$  является функцией потерь, а  $\beta$  — вектором параметров  $g(x, \beta)$  из модели алгоритма, а  $\lambda$  — неотрицательный гиперпараметр, являющийся коэффициентом регуляризации.

### $L_2$ -регуляризация

Определение:

$L_2$ -регуляризация, или регуляризация Тихонова (англ. *ridge regularization* или *Tikhonov regularization*):

$$Q(\beta, X^l) = \sum_{i=1}^l \mathcal{L}(y_i, g(x_i, \beta)) + \lambda \sum_{j=1}^n \beta_j^2.$$

Минимизация регуляризованного соответствующим образом эмпирического риска приводит к выбору такого вектора параметров  $\beta$ , которое не слишком сильно отклоняется от нуля. В линейных классификаторах это позволяет избежать проблем мультиколлинеарности и переобучения.

### $L_1$ -регуляризация

Определение:

$L_1$ -регуляризация (англ. *lasso regularization*), или регуляризация через манхэттенское расстояние:

$$Q(\beta, X^l) = \sum_{i=1}^l \mathcal{L}(y_i, g(x_i, \beta)) + \lambda \sum_{j=1}^n |\beta_j|.$$

Виды: гребневая регрессия, лассо, эластичная сеть,...

Известно более 2000 методов регуляризации для разных моделей и алгоритмов идентификации



# Идентификация сегодня

## □ Методы на основе регуляризации

В классическом подходе к решению задачи параметрической настройки сложность (**порядок**) модели необходимо выбирать, как правило, из конечного семейства альтернатив.

В подходах, основанных на регуляризации, **структура модели контролируется путем настройки параметров регуляризации**, что делает этап выбора модели более надежным



# Идентификация сегодня

- ❑ Алгоритмы идентификации, основанные на нейронных сетях
- ❑ **Situational Awareness - Ситуационная осведомленность** – учет при построении моделей информации о состоянии внешней среды
- ❑ **Reinforcement learning – обучения с подкреплением**, когда система обучается, взаимодействуя с некоторой средой.

Действия переводят систему в новое состояние и модель получает от системы некоторое вознаграждение/штраф.

**Состояния объектов** - пары «ситуация, принятое решение», **отклики** - значения функционала качества, характеризующего правильность принятых решений (реакцию среды).



# Идентификация сегодня

**Алгоритмы обучения с подкреплением для решения задач прогнозирования и управления**

**Методы, основанные на семплинге** (Монте-Карло, метод временных различий, Q-learning, SARSA, Expected SARSA).

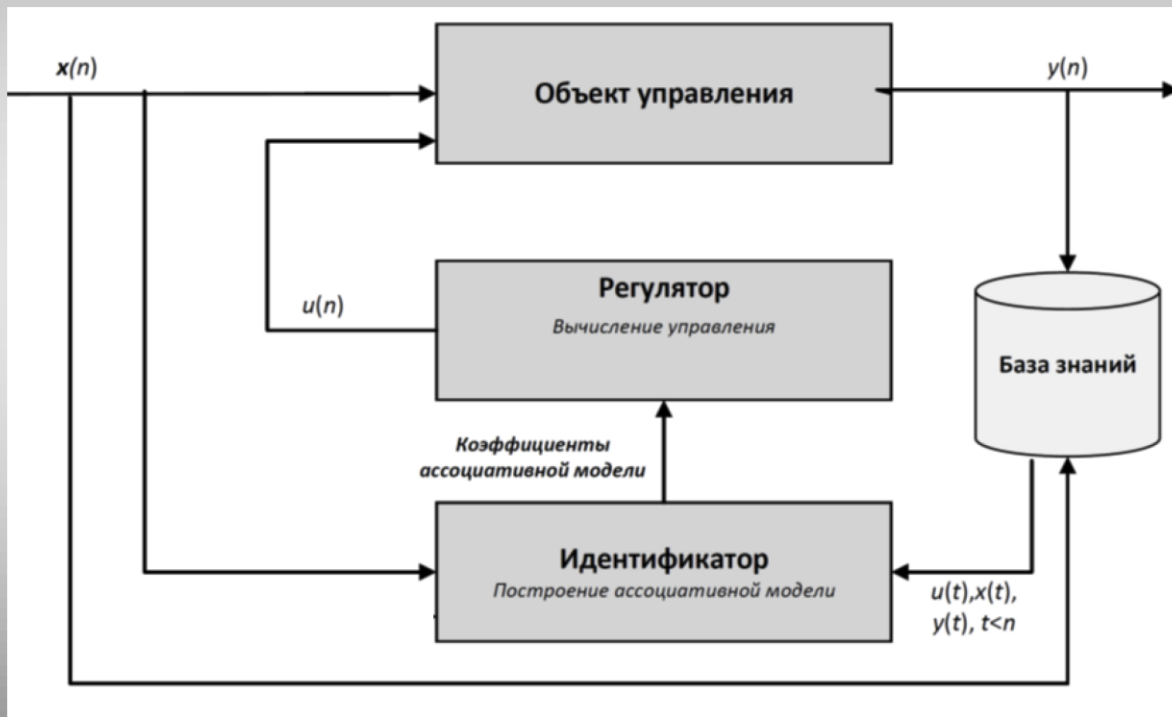
**Обучение с подкреплением на основе модели (model-based reinforcement learning)** позволяет эффективно решать задачи, в которых взаимодействие со средой является дорогой операцией





# Идентификация сегодня

## Методы идентификации на основе ассоциативного поиска



- алгоритмы, использующие индуктивные знания – закономерности, извлекаемые из всей совокупности данных об объекте и его функционировании на основе их анализа



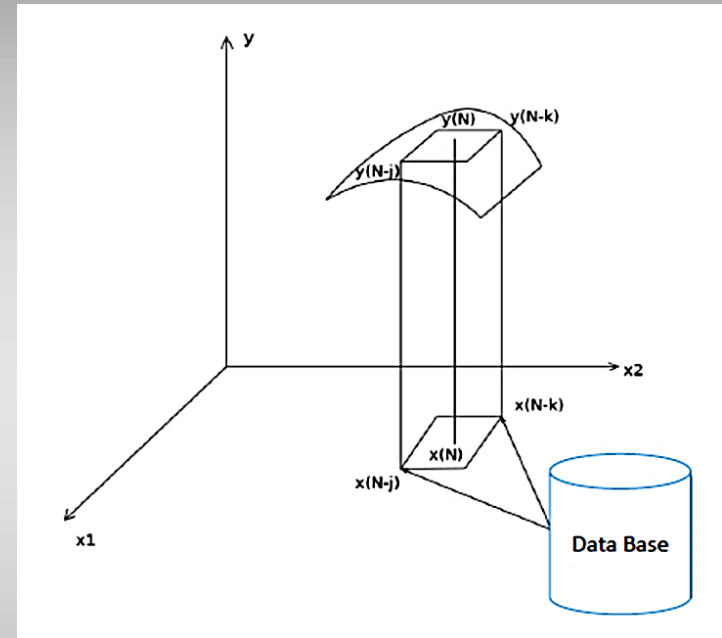
# Идентификация сегодня

## Методы идентификации на основе ассоциативного поиска

- Процесс извлечения индуктивных знаний сводится к восстановлению (ассоциативному поиску) знания по его фрагменту
- Знание интерпретируется как ассоциативная связь между образами.
- В качестве **образа** используются «**наборы признаков**», т.е. компонент векторов входов – входных переменных.

Из базы знаний производится отбор пар значений  $x_{N-j,s}$  и  $y_{N-i}$  :

$$d(\overline{x_N}, \overline{x_{N-j}}) \leq D_N,$$



### Точечная модель

Алгоритмы машинного обучения подразумевают поэтапное приближение откликов модели к истинным значениям (которые в обучающем Data Set известны заранее)



# Идентификация сегодня

## Методы построения интеллектуальных предиктивных моделей нелинейных нестационарных систем на основе ассоциативного поиска и вейвлет-анализа

$$\begin{aligned} x(t) &= \sum_{k=1}^N c_{L,k}^x(t) \varphi_{L,k}(t) + \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^N d_{l,k}^x(t) \psi_{l,k}(t), \\ y(t) &= \sum_{k=1}^N c_{L,k}^y(t) \varphi_{L,k}(t) + \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^N d_{l,k}^y(t) \psi_{l,k}(t), \end{aligned} \quad (2.17)$$

где  $\varphi_{L,k}(t)$  – масштабирующие функции;  $\psi_{l,k}(t)$  – вейвлет-функции, которые получают из материнских вейвлетов посредством масштабирования и сдвига:

$$\psi_{l,k}(t) = 2^{l/2} \psi_{\text{mother}}(2^l t - k) \quad (2.18)$$

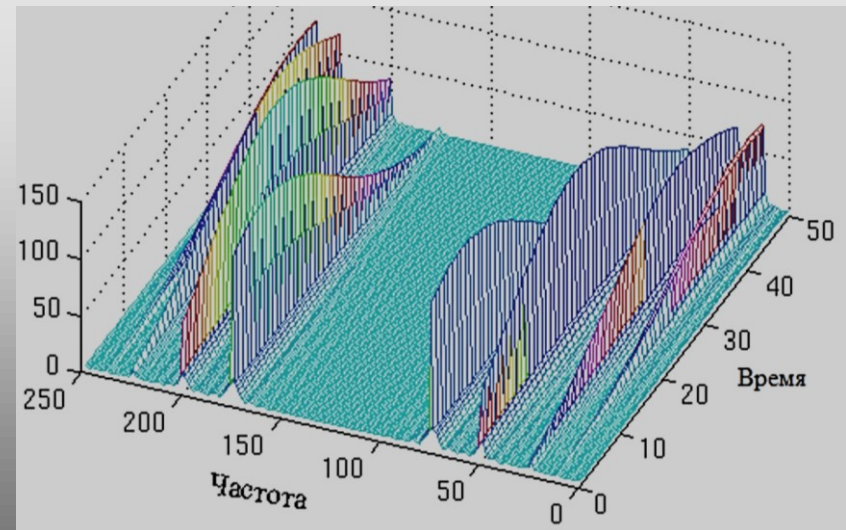
В качестве материнских рассматриваются вейвлеты Хаара.  $l$  – уровень детализации;  $c_{L,k}$  – масштабирующие коэффициенты,  $d_{l,k}$  – детализирующие коэффициенты. Коэффициенты вычисляются с помощью алгоритма Малла [2.86].

Выбор входных векторов из базы индуктивных знаний осуществляется в соответствии с требованием:

$$\begin{aligned} |x(t^*) - x(t)| &\leq |x(t^*)| + |x(t)| = \left| \sum_{k=1}^N c_k^* \varphi_k(t^*) + \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^N d_{jk}^* \psi_{jk}(t^*) \right| + \\ &+ \left| \sum_{k=1}^N c_k \varphi_k(t) + \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^N d_{jk} \psi_{jk}(t) \right| \leq \left| \sum_{k=1}^N c_k^* \varphi_k(t^*) \right| + \left| \sum_{k=1}^N c_k \varphi_k(t) \right| + \\ &+ \sum_{j=1}^L \left| \sum_{k=1}^N d_{jk} \psi_{jk}(t) \right| + \sum_{j=1}^L \left| \sum_{k=1}^N d_{jk}^* \psi_{jk}(t^*) \right| \leq c_L + L \tilde{c}_j = C = \text{const} > 0. \end{aligned}$$

$$\tilde{c}_j = \frac{N}{2^{j-1}} \max_{k=1, \dots, N/2^j} \tilde{c}_{jk}. \quad (2.19)$$

Исследуются кратномасштабные вейвлет-разложения входов и выходов



# Прогноз выкипания 10% керосиновой фракции для установки ЭЛОУ-АВТ-6

$$T(t) = \sum_{i=1}^4 b_i F_i(t-1) + b_5 F_5(t-3) + b_6 F_6(t-5) + \sum_{i=7}^{12} b_i F_i(t-7),$$

где  $T(t)$  – прогноз значения температуры выкипания 10% фракции «150-250°C»;  $F_1$  – текущее значение расхода нефти после Н1 (3 поток);  $F_2$  – текущее значение расхода фр.62-105°C с установки;  $F_3$  – текущее значение расхода фр.290-350 С с установки;  $F_4$  – текущее значение расхода сырой нефти перед обессоливанием на установку;

$F_5$  – значение расхода циркулирующей флегмы от Н-11/1,2, Т-20 в П-2/2 (1 поток) в момент времени  $t - 3$ ;

$F_6(t - 5)$  – значение расхода фр.150-250°C С цех 2 в момент времени  $t - 5$ ;

$F_7(t - 7)$  – значение расхода фр.НК85°C с установки в момент времени  $t - 7$ ;

$F_8(t - 7)$  – значение расхода воздуха горения П1-1 в момент времени  $t - 7$ ;

$F_9(t - 7)$  – значение расхода воздуха горения П1-1 в момент времени  $t - 7$ ;

$F_{10}(t - 7)$  – значение расхода раствора щелочи 2-ого хода после ЭДГ в момент времени  $t - 7$ ;

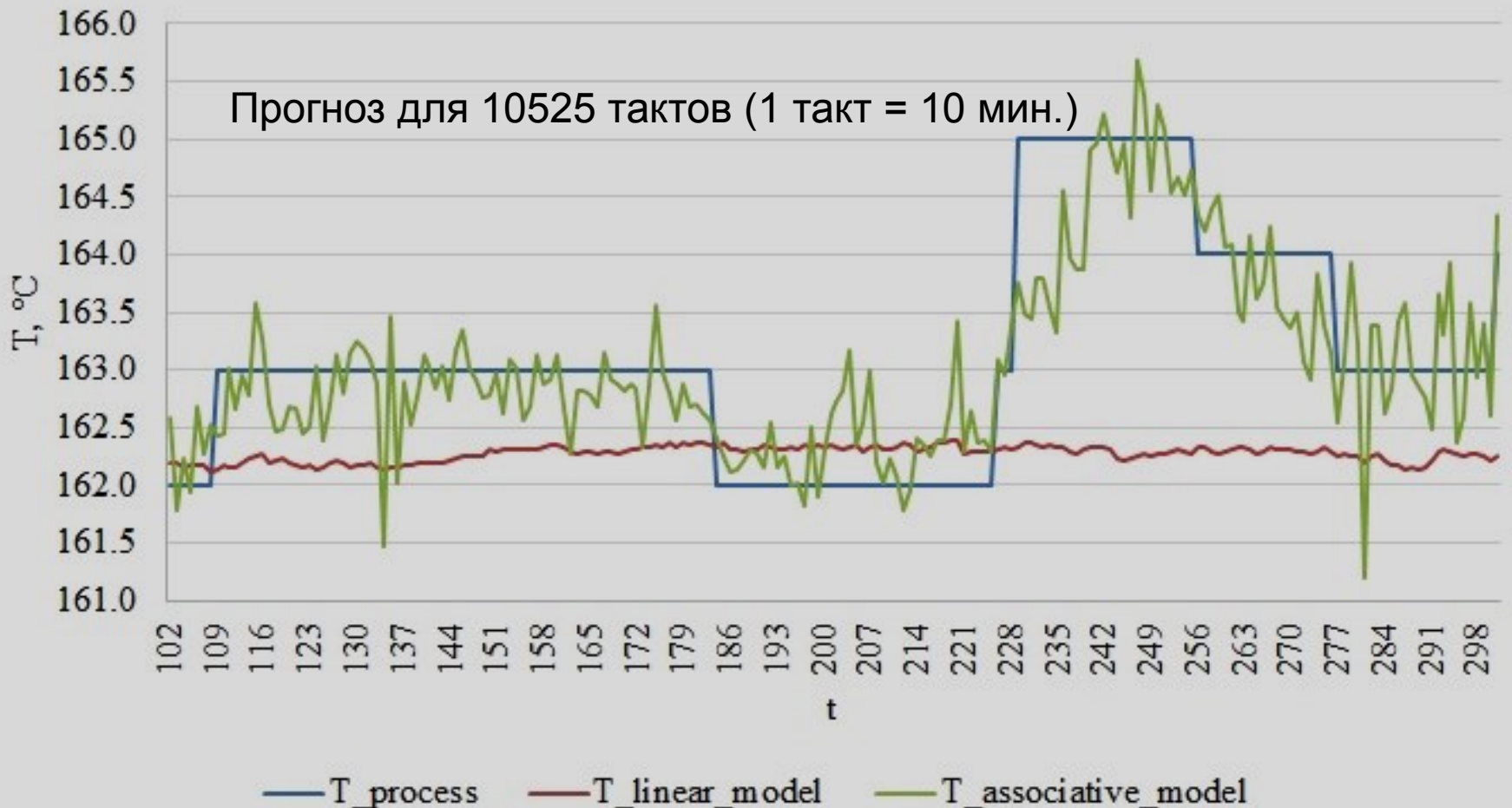
$F_{11}(t - 7)$  – значение расхода циркулирующей флегмы от Н-11/1,2, Т-20 в П-2/2 (3 поток) в момент времени  $t - 7$ ;

$F_{12}(t - 7)$  – значение расхода воды в Э-1/1 в момент времени  $t - 7$ ;  $b_1, \dots, b_{12}$

– коэффициенты модели.

# Прогноз температуры выкипания 10% керосиновой фракции для установки ЭЛОУ-АВТ-6

Данные лабораторного анализа температуры выкипания 10% фракции «150-250°C» ( $T_{process}$ ) по времени  $t$ , прогноз температуры выкипания 10% фракции «150-250°C» на основе линейной модели ( $T_{linear\_model}$ ) и ассоциативной модели ( $T_{associative\_model}$ )



# Трейдинг. Прогноз цены акций компании

Профиль компании: WY / Weyerhaeuser Company -интегрированный лесопромышленный холдинг. Рыночная капитализация 159 млрд. долл. США.

Пусть выбрана модель, имеющая следующую структуру:

$$S_N = \sum_{j=0}^2 a^j S_{p-i_0+j} + \sum_{i=0}^2 b^i M_{N-l_1-i} + \sum_{i=0}^2 c^i SP_{N-l_2-i} + \sum_{i=0}^2 d^i EURUSD_{N-l_3-i}$$

где:

$a = (a^0, a^1, a^2), b = (b^0, b^1, b^2), c = (c^0, c^1, c^2), d = (d^0, d^1, d^2)$  - параметры, подлежащие определению;

$p, i_0, l_1, l_2, l_3$  - индексы в обозначениях п.2.4;

$S_N$  - цена акции в момент времени  $N$ ;

$SP_N$  - значение индекса S&P500 в момент времени  $N$ ;

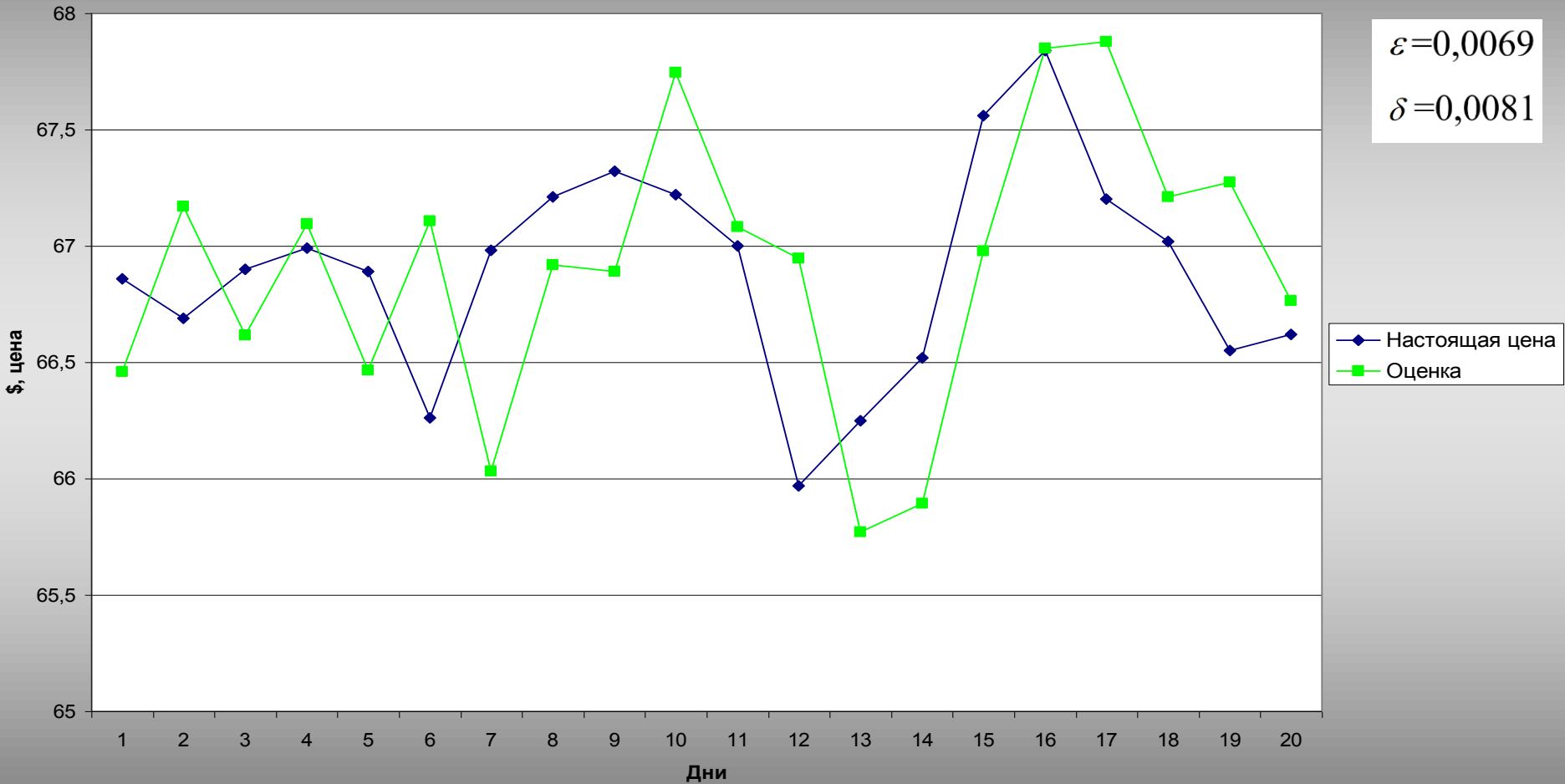
$M_N$  - цена на акцию компании из одинаковой отрасли с  $S_N$ .

$$\varepsilon = \frac{1}{N-m+1} * \sum_{i=k}^N \frac{|S_i - S_i^*|}{S_i}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N-m+1} * \sum_{i=k}^N \frac{(S_i - S_i^*)^2}{S_i^2}}$$

# Трейдинг. Прогноз цены акций компании

Профиль компании: WY / Weyerhaeuser Company - интегрированный лесопромышленный холдинг. Рыночная капитализация 159 млрд. долл. США.









# Идентификация сегодня

## Методы идентификации на основе ассоциативного поиска: приложения

- Прогнозирование показателей ТП в промышленности
- Прогнозирование динамики спроса,
- Прогнозирование динамики фондового рынка на основе интеллектуальных алгоритмов для процессов трейдинга и стресс-тестинга,
- Идентификация и прогнозирование состояния агрегатов БП автомобилей в автоматизированной бортовой системе управления, с использованием *интеллектуального анализа технологических данных* реального времени,
- Методы идентификации в производственной и транспортной логистике: методы прогнозирования объема автоперевозок и показателей, характеризующих эффективность расписания на основе исследования динамики перевозочных процессов.
- Прогнозирования характерных технологических ситуаций доменного процесса на основе анализа видеопотока данных с видеокамер на фурмах доменной печи в режиме реального времени.





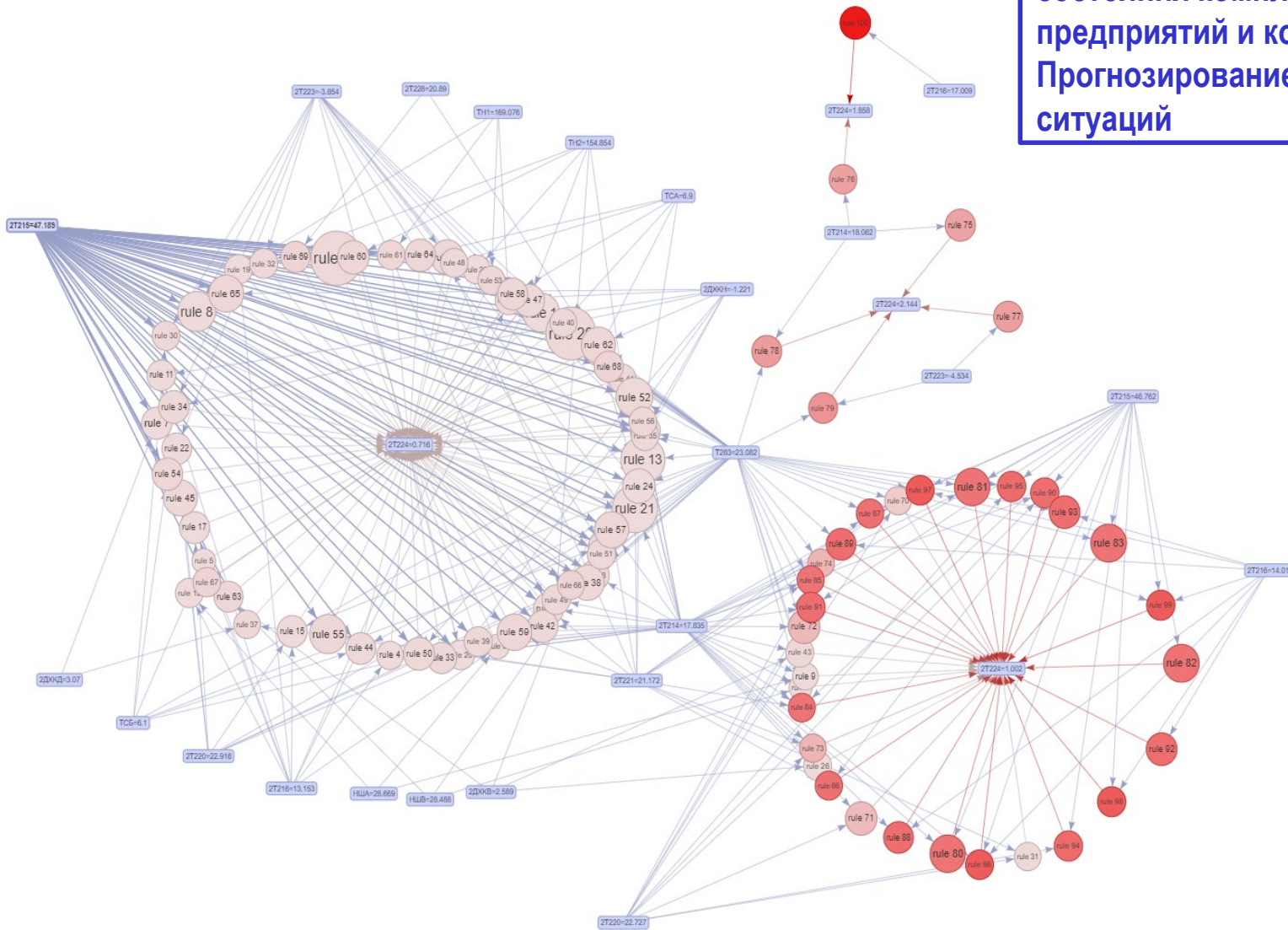
# Идентификация сегодня

## Методы идентификации на основе ассоциативного поиска

- Идентификация технологических процессов непрерывных и полунепрерывных промышленных производств (в частности, химических и нефтепереработки),
- Программно-алгоритмические комплексы автоматизации управления технологическими процессами химических производств и нефтепереработки
- Методы автоматической дистанционной диагностики готовности к общему первичному регулированию частоты (ОПРЧ) генерирующего оборудования электростанций в ходе реальной эксплуатации
- Методы управления режимами систем электроснабжения в общей системе иерархического координированного адаптивного управления режимами ЕЭС,

# Ассоциативные методы идентификации ситуаций

Цифровые методы идентификации ситуаций и прогнозирования состояния комплекса ресурсов предприятий и компаний. Прогнозирование нештатных ситуаций





# Идентификация сегодня

## Сценарное прогнозирование динамических процессов и ситуаций методом ассоциативного поиска

Интеллектуальные предиктивные **модели динамики состояния исследуемых процессов** в технических, промышленных, природных и социальных системах на несколько временных тактов вперед

*Фрагмент видеопотока с видеокамер, установленных на фурмах доменной печи*



очень быстрое движение средних и крупных фрагментов с большим перепадом контрастности изображения.



**Описание динамики:**  
быстрое движение крупных и средних фрагментов средней интенсивности с малым перепадом контрастности



движение средних фрагментов средней скорости с малым перепадом контрастности изображения.



# Идентификация сегодня

## Методы построения предиктивных моделей для систем на основе индуктивных знаний. Ассоциативный поиск

Интеллектуальные предиктивные **модели динамики ситуаций** (производственных, экономических, социальных, ...) **в виде сценариев**

Модели **ситуаций** учитывают дополнительные внешние трудно формализуемые факторы, например, состояние комплекса разных ресурсов, психологические особенности лица, принимающего решение, и т.д.

### Стабильность функционирования программного обеспечения

Исследована работа сервисов реализации решения целевых задач ЦЭС на базе действующей инфраструктуры (физических машин, сети, виртуальных машин, операционной системы). Для стабильности функционирования системы управления ЦЭС необходимо обеспечить стабильность работы базовых программных компонентов всех сервисов системы управления ЦЭС, самих сервисов прогнозирования, используемых библиотек и пакетов, вспомогательных сервисов нормализации, фильтрации и обогащения данных, а также стабильности функционирования самой системы управления отказоустойчивостью базовых программных компонентов сервисов прогнозирования. Показатель стабильности ПО будет иметь вид:

$$S_a = \frac{1}{N} \sum_{bp=1}^N S_{abp} \cdot \frac{1}{M} \sum_{c=1}^M S_{ac} \cdot \frac{1}{K} \sum_{lp=1}^K S_{alp} \cdot \frac{1}{L} \sum_{s=1}^L S_{as} \cdot \frac{1}{Q} \sum_{ft=1}^Q S_{aft}, \quad (5)$$

где:

- $N$  – число базовых программных компонентов сервисов управления ЦЭС;
- $M$  – число используемых сервисов интеллектуального управления ЦЭС;
- $K$  – число используемых библиотек и пакетов в сервисах интеллектуального управления ЦЭС;
- $L$  – число используемых вспомогательных сервисов для поддержки и корректной работы программного обеспечения сервисов решения целевых задач ЦЭС;
- $Q$  – число используемых компонентов в системе управления отказоустойчивостью сервисов управления ЦЭС;
- $S_a$  – общая стабильность программного обеспечения ЦЭС ( $S_a \leq 1$ );
- $S_{abp}$  – стабильность функционирования  $N$ -го базового программного компонента сервисов управления ЦЭС ( $S_{abp} \leq 1$ );
- $S_{ac}$  – стабильность функционирования  $M$ -го интеллектуального сервиса управления ЦЭС ( $S_{ac} \leq 1$ );
- $S_{alp}$  – стабильность функционирования  $K$ -ой используемой библиотеки и пакета, используемых в сервисах управления ЦЭС ( $S_{alp} \leq 1$ );
- $S_{as}$  – стабильность функционирования  $L$ -го используемого вспомогательного прикладного сервиса для обеспечения корректной работы интеллектуальных сервисов прогнозирования ( $S_{as} \leq 1$ );
- $S_{aft}$  – стабильность  $Q$ -го компонента системы управления отказоустойчивостью сервисов управления ЦЭС ( $S_{aft} \leq 1$ ).





# Идентификация сегодня

## Методы построения предиктивных моделей для систем на основе индуктивных знаний. Ассоциативный поиск

Создание интеллектуальных технологий гибкого про-активного управления на основе сценарных предиктивных ассоциативных моделей процессов и ситуаций

На основе сценарных предиктивных моделей формируются оптимальные управляющие воздействия для различных сценариев эволюции состояния динамических процессов различной природы и для прогнозируемой динамики развития ситуаций

Так, для  $p = 2$  ассоциативная модель будет иметь вид:

$$y^m(n+2) = \sum_{i=1}^n a_i y(n+1-i) + y^m(n+1) + \sum_{j=1}^Q \sum_{i=1}^M b_{ij} x_j(n+2-i) + \sum_{i=3}^R c_i u(n+2-i) + u^m(n) + u^m(n+1) \quad (8)$$

$$y(n+1) \leq Y, y(n+2) \leq Y, u(n) \leq U, u(n+1) \leq U. \quad (9)$$

Требуется определить управляющие воздействия, которые соответствуют достижению определенного заданного («нормативного»), например, экстремального значения критерия:

$$y^m(n) = \max_{|y| \leq Y} y(n), \quad |y| \leq Y. \quad (10)$$

В этом случае в (8) делается подстановка желаемого (оптимального, «нормативного») значения  $\hat{y} = y^m$ . Псевдорешения системы уравнений (значения коэффициентов актуальной модели и значение управляющего воздействия в момент  $n$ ) будут иметь вид:

$$\alpha = \hat{X}^+ y^m, \quad \hat{X}^+ = (\hat{X}^* \hat{X})^{-1} \hat{X}^*. \quad (11)$$

Задача сценарного прогнозирования может формулироваться иначе. Например, нормативное значение (10) заменяется на требование достижения оптимума только в момент  $n+p$ , а для моментов  $n+1, n+2, \dots, n+p-1$  требуется лишь удовлетворение ограничениям (5).

Еще один тип сценария предполагает требование к управляющим воздействиям обеспечить определенную динамику системы в моменты  $n+1, n+2, \dots, n+p-1$ . В частности, значения выходов  $y(n+1), y(n+2), \dots, y(n+p-1)$  должны соответствовать своим специальным критериям. В простейшем случае эти критерии совпадают с ограничениями (9).



# Идентификация сегодня

**Методы и алгоритмы формирования и коррекции прогноза для нестационарных процессов на основе обработки количественной информации и экспертного анализа событий внешней среды, оказывающих влияние на изменения в этих процессах.**

Анализ текущей ситуации на когнитивной карте (ККС) для выявления экспертно - значимых событий, способных вызвать изменения в прогнозируемом процессе;

Обнаружение в реальном времени «неявных» изменений, тенденций, свойств и взаимосвязей между прогнозируемым параметром и связанными с ним компонентами, «замаскированных» неконтролируемыми случайными возмущениями





# Идентификация сегодня

## Методы идентификации стохастических систем на основе теоретико-информационных мер зависимости

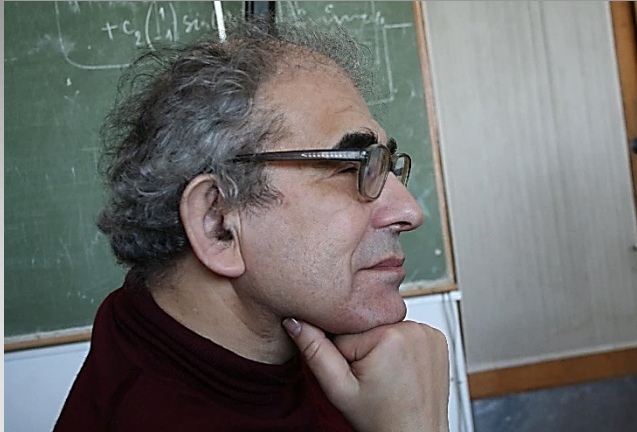
- Алгоритм преобразования состоятельной меры зависимости в состоятельную меру зависимости по Реньи (то есть удовлетворяющую как минимум всем аксиомам Реньи за исключением аксиомы об инвариантности взаимнооднозначных преобразований случайных величин).
- Обобщение аксиоматики Реньи на случай множественной зависимости.
- Метод выбора входных и выходных переменных модели на основе состоятельных по Реньи мер зависимости и меры гетерогенности (то есть неравномерности вклада переменных в модель).
- Построение мер зависимости по Реньи на основе дивергенций Реньи и Цаллиса.







# Идентификация сегодня



**Методология оценивания  
информационных возможностей  
алгоритмов структурной идентификации  
в условиях априорной структурной  
неопределенности.**



# Идентификация сегодня

**Разработка методов и алгоритмов  
идентификации и управления плазмой в  
токамаках**

**Методы на основе количественной теории обратной связи  
(QFT),**

**Метод подпространств,**

...

**Пример: Идентификация передаточной функции,  
связывающей уставку тока в центральном соленоиде  
токамака Глобус-М2 и тока плазмы.**





# Идентификация сегодня

Подход к менеджменту и управлению, получивший название

## **Data driven**

Data Driven Decision - «решения, принятые на основе данных».

Этот метод стал альтернативой подхода HiPPO (Highest Paid Person's Opinion — «мнение самого высокооплачиваемого сотрудника») — принятию решений на основе мнения руководства.

**Data driven modeling** – построение моделей на основе обработки и анализа больших данных в реальном времени

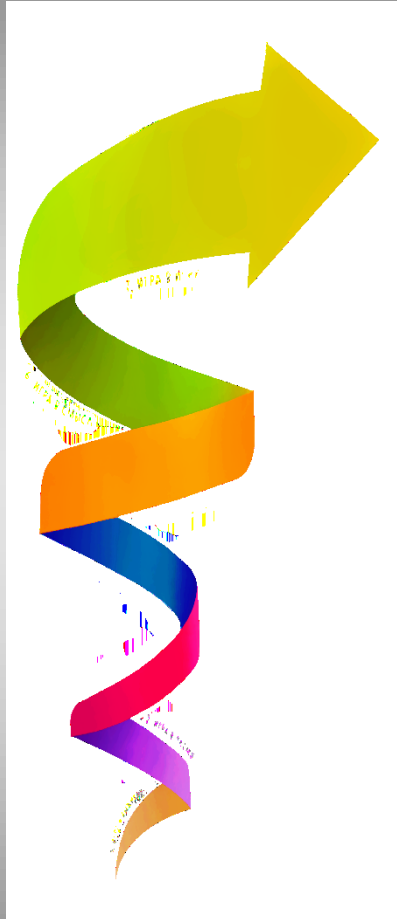
Технологии слияния гетерогенных данных в реальном времени (“Data Fusion”)



# Эволюция

## Технологии:

- интеллектуальная роботизация и автоматизация,
- цифровизация,
- информационные технологии, обработка и анализ больших данных,
- технологические разработки,
- бизнес-модели,
- ...



## Новые методы:

- математической статистики
- непараметрической идентификации
- ядерные технологии регуляризации
- нейронные сети
- генеративный искусственный интеллект
- цифровые интеллектуальные модели
- управление с прогнозирующей моделью

Спасибо за внимание!



# Идентификация сегодня

□ **Reinforcement learning – обучения с подкреплением**, когда система обучается, взаимодействуя с некоторой средой.

— это метод машинного обучения, при котором модель не имеет сведений о системе, но имеет возможность производить какие-либо действия в ней. Действия переводят систему в новое состояние и модель получает от системы некоторое вознаграждение.

**Роль объектов играют пары «ситуация, принятое решение», ответами являются значения функционала качества, характеризующего правильность принятых решений (реакцию среды).**

“Среда” обычно формализуется как **марковский процесс принятия решений (МППР)** с конечным множеством состояний. Вероятности выигрышей и перехода состояний в МППР обычно являются величинами случайными, но стационарными в рамках задачи.



# Идентификация сегодня

**Марковский процесс принятия решений** (Markov decision process (MDP)) — спецификация задачи последовательного принятия решений для полностью наблюдаемой среды с марковской моделью перехода и дополнительными вознаграждениями.

При обучении с подкреплением, в отличие от обучения с учителем, не предоставляются верные пары „входные данные-ответ“, а принятие субоптимальных решений (дающих локальный экстремум) реализует **компромисс между исследованием неизученных областей и применением имеющихся знаний.**



**Количественная теория обратных связей (QFT) – методы, использующие частотное представление моделей для удовлетворения критериев качества при наличии неопределенностей.**

Неопределенности: в характеристиках объекта и/или на его вход подаются неизвестные возмущения