Тема: <u>Основные принципы технологического прогнозирования</u>

- *Основные термины технологического прогнозирования*

- ***Прогноз*** — вероятностное утверждение о будущем с относительно высокой степенью достоверности.
- ***Технология*** — означает широкую область целенаправленного применения физических наук, наук о жизни и наук о поведении.
- ***Технологическое прогнозирование*** — это вероятностная оценка на относительно высоком уровне уверенности будущего перемещения технологии.

- ***Перемещение технологии*** — процесс освоения новой техники, новых научных разработок в различных странах.

  Бурные темпы научно-технического прогресса, возрастающее влияния науки и техники на все стороны экономической и социальной жизни обуславливают закономерный интерес к проблемам прогнозирования.

  Процессы развития науки и техники, протекающие в прошлом на протяжении десятков и сотен лет, совершаются в наши дни неизмеримо быстрее.

- Первым в истории нормативным прогнозом научно-технического прогресса на несколько лет был план электрификации России (план ГОЭЛРО), принятый по инициативе В.И. Ленина в 1922 году.

<u>Возникновение технологического прогнозирования:</u>

- в промышленности США - конец 50-х годов.
- в Западной Европе - 60 - е годы.

  Если в 1947 году прогнозированием занимались лишь около 20% крупных промышленных фирм США, то в 1966 году — 90% компаний составляли прогнозы на 3 и более лет.

Точность прогнозирования

- Процесс решения прогнозной задачи заключается в выполнении последовательности *арифметических, логических* и *других операций*, направленных на преобразование исходных данных в конечный результат.
- Последовательность и содержание этих операций определяются выбранным *методом* прогнозирования и *способом* реализации вычислительных операций. Поэтому даже при наличии точных исходных данных решение прогнозной задачи будет приближенным в силу невозможности идеально строгой формулировки задачи для применения выбранного метода.

- ***Погрешность решения прогнозной задачи*** E определяется как сумма погрешностей информационных данных $E_и$, погрешности метода E_μ, погрешности вычислений E_ν и нерегулярной погрешности E_λ:

$$E = E_и + E_\mu + E_\nu + E_\lambda ,$$

где E_λ— непредсказуемые события.

Методы изыскательного технологического прогнозирования

- Вероятность прогноза можно выразить графиком наступления события «А», (где Р- это вероятность события А)

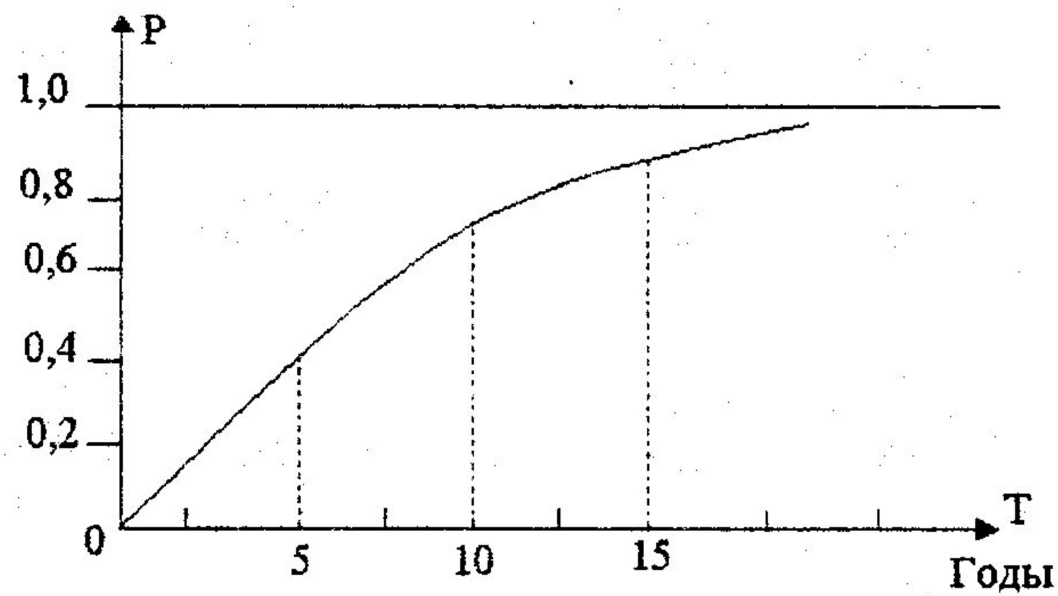


Рис. 2. График наступления события «А»

- Примером изыскательного технологического прогнозирования может служить разработка автомобиля на водородном топливе, которая выполняется во многих странах мира.
- ***Научно-техническое прогнозирование в автомобильной промышленности, требует ответа на следующие вопросы:***
  1) каковы *будут* возможности выпускаемых отраслью машин в ближайшие 5-10-15 лет при условии сохранения объективно сложившихся тенденций развития данной отрасли (исследовательский прогноз);

2) каковы будут требуемые значения характеристик машин, производимых в отрасли в ближайшие 5-10-15 лет, для эффективного решения задач различных групп потребителей этих машин (нормативный прогноз);

3) каков будет разрыв между возможными и потребными значениями характеристик машин в последующие 5-10-15 лет (прогноз целей научно-технического развития);

4) какие проблемы и задачи научного, технического, экономического и организационного характера необходимо решить для достижения научно-технического развития отрасли (прогноз ресурсов).

- *Смена поколений машин* является конкретным отображением использования результатов *фундаментальных наук* в общественном производстве.
- Эволюционное изменение характеристик машин внутри поколения можно выразить логической сигмоидальной кривой.

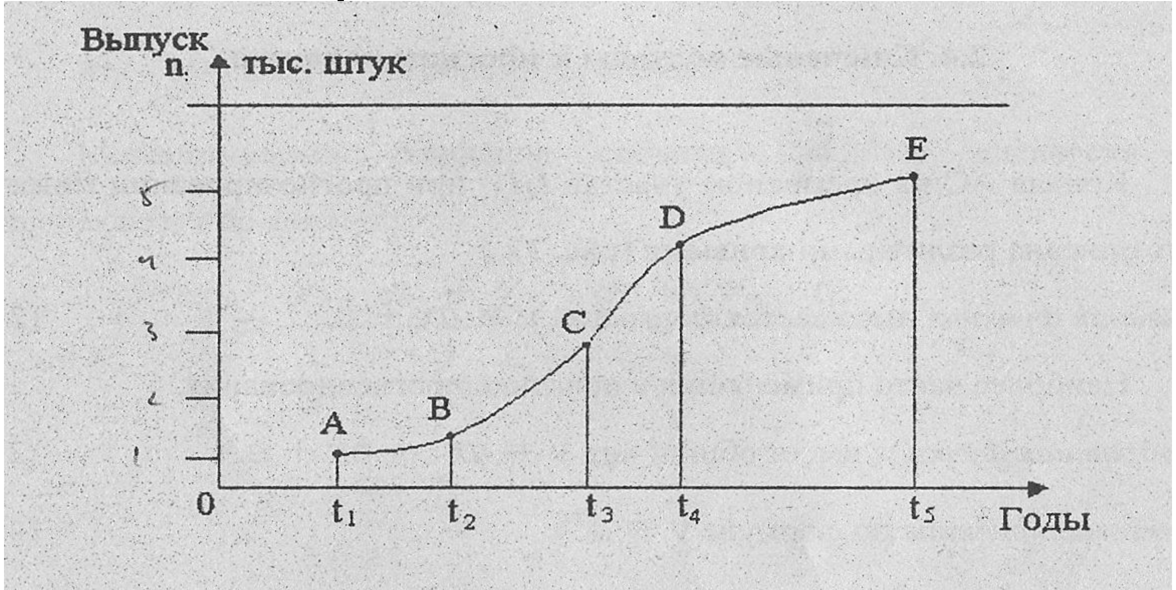


Рис. 3 Сигмоидальная кривая выпуска автомобилей.

- Время жизни поколения машин равно $\mathbf{t_1}$-$\mathbf{t_5}$.
- На отрезке $\mathbf{t_1}$ $\mathbf{t_2}$ появляются первые модели машин нового поколения, хотя преобладают машины старого поколения.

Период времени $\mathbf{t_1}$ $\mathbf{t_2}$ в течение которого появляются первые машины нового поколения, имеющие малый удельный вес в общем парке автомобилей отрасли, называют *латентным периодом*.

- На временном отрезке $\mathbf{t_2}$ $\mathbf{t_4}$ происходит бурное развитие машин нового поколения. Этот процесс отражается на кривой резко возрастающим участком **BD** — *период роста*.

- На временном отрезке $\mathbf{t_4}$ $\mathbf{t_5}$ происходит постепенный спад темпов роста параметров машин данного поколения: физический принцип себя исчерпал. Отрезок кривой DE характеризует процесс резкого замедления роста параметров. Этот период называется *периодом сатурации.* Именно в этот период появляются идеи применения машин нового поколения.
- Точка **С** называется точкой перегиба и характеризует начальный момент от экспоненциального роста к сигмоидальной кривой.

Сигмоидальная кривая должна удовлетворять следующим условиям:

- кривая должна иметь точку перегиба;
- не содержать точек экстремума;
- должен существовать предел, к которому в бесконечности приближается кривая.

Сигмоидальные кривые применяются для кратко- и среднесрочного прогнозирования роста научно-технических параметров внутри одного поколения машин отрасли.

Ключевые подходы к прогнозированию

- Кривая **АС** на временном участке $\mathbf{t_1}$ $\mathbf{t_3}$ при прогнозировании может быть описана различными кривыми.

Линейная функция выражается формулой $y = ax + b$.

Наиболее часто применяется в практике прогнозирования.

Квадратная функция имеет общий вид $y = ax^2 + bx + c$.

Степенная функция по формуле $y = x^n$.

Показательная функция имеет уравнение $y = a^x$.

Наиболее часто применяют уравнение $y = e^x = exp.e$.

- При проведении экстраполяционных расчетов исследователь должен четко представить возможные сроки прогноза.

- *Существует правило, по которому срок прогноза равен 1/3 исходного ряда.*

Пример:

- если имеется ряд развития машин с 1990 по 2002 год, то по этим данным можно сделать прогноз на *четыре* года с 2003 по 2007 г.г.

- *Методом эвристического* прогнозирования называется метод получения и специальной обработки прогнозных оценок объекта путем опроса экспертов.
- Информационный массив прогнозирования включает в себя заполненные экспертами таблицы и *анкеты*. Этот метод относится к классу исследовательских и применяется для определения времени совершения события в будущем.

- Эксперт может дать три оценки срока наступления события А:

1. a_i оптимистическая оценка;
2. b_i - пессимистическая оценка;
3. m_i - мода, наиболее вероятная оценка.

Математическое ожидание события $\bar{A}$ и дисперсия σ определяются по формулам:

$$\bar{A} = \frac{\gamma_1 \cdot a_i + \gamma_2 \cdot m_i + \gamma_3 \cdot b_i}{\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3}$$

$$\sigma_i^2 = \frac{(b_i - \alpha_i)^2}{\gamma_4}$$

- На основании полученных значений $\bar{A}$ и σ строятся модели прогнозируемого объекта для нескольких лет.

<u>Теоретические основы прогнозирования технического состояния машин</u>

- *<u>Основные требования, предъявляемые к прогнозированию технического состояния автомобилей .</u>*

Целью деятельности специалиста по технической эксплуатации автомобильного транспорта является обеспечение оптимального уровня затрат на поддержание работоспособности автомобиля в заданных условиях эксплуатации.

- Реализация этой цели возможна при наличии информации об изменении технического состояния автомобиля в прошлом, его состояния в момент прогнозирования и методики прогнозирования на будущее.

Можно выделить три этапа полного прогнозирования:

1) ретроспекция;
2) диагностика;
3) прогноз.

- Первый этап — «ретроспекция» — заключается в исследовании прогнозируемого процесса в прошлом, выявлении и уточнении характеристик и структурных параметров процесса с его анализом и расчленением, установлении характера и изменений этих показателей. В результате исследований разрабатывают динамическую модель изучаемого процесса.
- На втором этапе — «диагностика» — устанавливают начальные и допускаемые изменения характеристик параметров, проводят их измерение, а также выбирают методы прогнозирования.

- Третий, заключительный, этап обычно включает прогноз параметров процесса в будущем.
  для прогнозирования необходимо знать:
  1) критерии отказа (износ деталей, температура деталей, образование и развитие трещин, стоимость устранения отказа);
  2) методы количественного прогнозирования (функциональные закономерности);
  3) методику сбора данных или измёрения значений деталей в эксплуатации;
  4) основные факторы, влияющие на интенсивность изменения технического состояния автомобилей.

Прогнозирование по среднестатистическому изменению параметра

- Этот метод позволяет предсказывать изменение параметра по данным среднестатистического его изменения при отсутствии информации о наработке в прошлом.
- *Исследователь оперирует следующими данными:*
  - текущим значением параметра объекта исследования, $u\,(t)$;
  - номинальным значением параметра,
  - допускаемым значением параметра в эксплуатации, u_{∂}
  - математической моделью изменения параметра.

- Задача состоит в том, чтобы определить остаточный ресурс объекта $t_{ост}$ с известной величиной υ_c- скорости изменения параметра:

$$t_{ост} = \frac{u_д - u(t)}{\upsilon_c}$$

Линейная аппроксимация параметра определяется по формуле:

$$u(t) = \upsilon_c \cdot t + u_1 + u_{ном}$$

- Одним из критериев работоспособности детали, элемента конструкции является несущая способность, сопротивление хрупкому и усталостному разрушению.
- Критерии работоспособности агрегата или автомобиля в целом выбирают в зависимости от конкретных условий работы. При заданных рабочих режимах интенсивность изменения технического состояния агрегата, а, следовательно и отказа, зависит от состояния среды и изменения свойств материала, неизбежного при изменении температуры на поверхности трения.
- За экономический критерий технического состояния автомобиля принимаются удельные затраты на поддержание работоспособности.

- Если учитывать влияние эксплуатационных факторов на интенсивность изменения параметра (например, изнашивания), уравнение примет степенную функцию:

$$u(t) = \upsilon_c \cdot t^{\alpha} + u_1 + u_{ном}$$

В этом случае остаточный ресурс определится по формуле:

$$t_{ост} = \sqrt[\alpha]{\frac{u_{\partial} - u(t)}{\upsilon_c}},$$

- *Пример*
  Определите остаточный ресурс гильзопоршневой группы двигателя по количеству газов, прорывающихся в картер на холостом ходу. Измерение параметра показало *59 л/мин.* Допускаемая и номинальная величина равна 90 и 28 *л/мин.* Известно, что изменение количества газов, прорывающихся в картер подчиняется степенной функции $u(t) = \upsilon_c \cdot t^{\alpha} + u_1$

с показателем степени $\alpha=1,3$ при показателе приработки $u_1=1$ *л/мин.* Время работы двигателя составило 2000 часов.

- Решение:

1) Из уравнения для текущего значения параметра, ч

$$u(t) = u_{ном} + \upsilon_c \cdot t^{\alpha} + u_1$$

$$59 \cdot 60 = 28 \cdot 60 + \upsilon_c \cdot 2000^{1,3} + 1 \cdot 60$$

Найдём υ_c - скорость среднего статистического измерения параметра, *л/ч*:

$$\upsilon_c = \frac{30 \cdot 60}{2000^{1,3}} = 0,09$$

2) Из уравнения допускаемой величины параметра

$$u_{\partial} = u(t) + \upsilon_{\text{с}} \cdot t_{ост}^{a}$$

Найдём $t_{ост}$, *ч*:

$$90 \cdot 60 = 59 \cdot 60 + 0{,}09 \cdot t_{ост}^{1,3}$$

$$t_{ост} = \sqrt[1,3]{\frac{31 \cdot 60}{0{,}09}} = 2087 \ (час)$$

Ответ:

Ожидаемый оставляет остаточный ресурс составляет 2087 часов.

Прогнозирование по реализации изменения параметра

- При прогнозировании по реализации считают, что изменение параметра элемента характеризуется экстраполяционной функцией, которая определяется по изменению параметра в прошлом.

• Функции могут выражаться:

1) линейной функцией в общем виде $y = ax + b$;

по времени $u(t) = at + b$;

по пробегу $u(l) = al + b$;

2) квадратной функцией в общем виде $y = ax^2 + bx + c$;

по времени $u(t) = at^2 + bt + c$;

по пробегу $u(l) = al^2 + bl + c$;

3) показательной функцией в общем виде $y = y_0 \cdot e^{at}$;

по времени $u(t) = u_0 \cdot e^{at}$;

по пробегу $u(l) = u_0 \cdot e^{al}$;

где u_0 – нулевое значение функции.

- ***<u>При решении задачи расчета ресурса исследователь должен иметь:</u>***

  - результаты измерения параметра;

  - допускаемую величину параметра в эксплуатации;

  - наработку объекта на период измерения параметра объекта исследования.

Планирование и проведение многофакторного эксперимента

- Основой прогнозирования является знание процессов, закономерности их развития.
- Многофакторный эксперимент позволяет проводить активный эксперимент с факторами, влияющими на техническое состояние узла, агрегата или в целом автомобиля.
- Полученные результаты эксперимента описывают уравнением, которое называется ***математической моделью.***

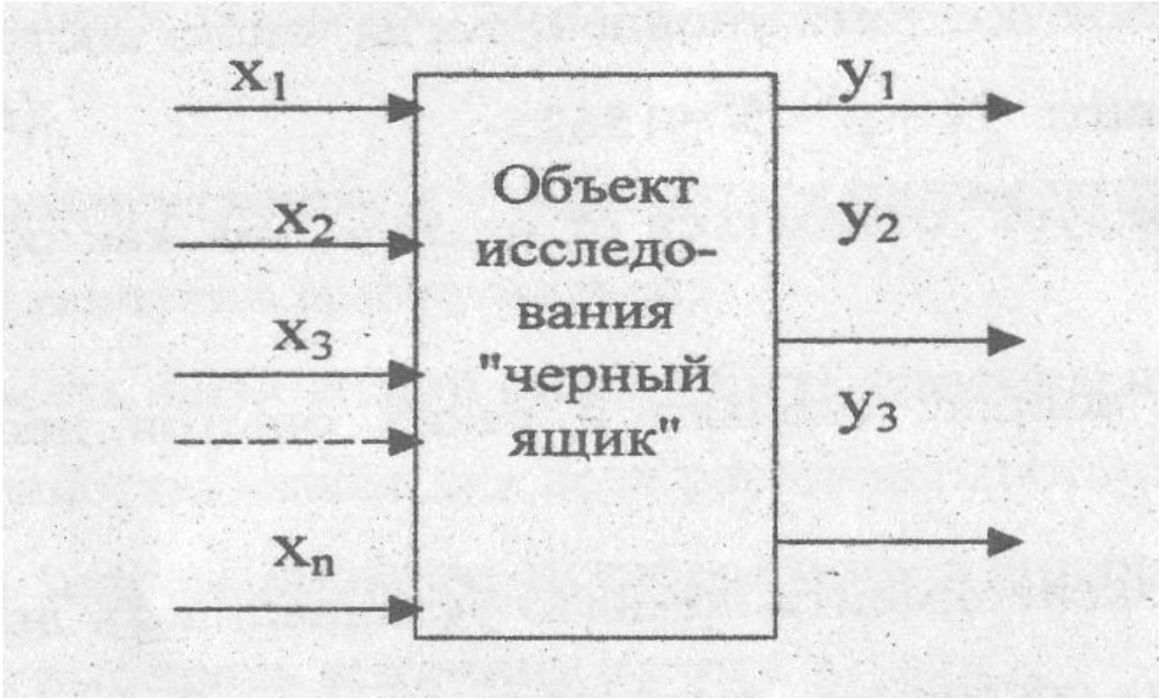
- *Планирование эксперимента* — это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью.
  При этом экспериментатор должен:
  - провести минимум опытов;
  - одновременно варьировать всеми переменными, определяющими процесс, по специальным правилам- алгоритмам;
  - использовать математический аппарат;
  - выбрать четкую стратегию проведения эксперимента.

- ***Классический* эксперимент** - представляет собой последовательность однофакторных экспериментов, при которых все независимые переменные, кроме одной, принимаются постоянными. В таких экспериментах невозможно определить характер взаимодействия факторов между собой.

Факторы и параметры оптимизации в планировании многофакторного эксперимента

- Многофакторное планирование позволяет получить математическую модель процесса, в котором задействованы одновременно все факторы.

  Содержание планирования проиллюстрируем исследованием “черного ящика”. Например, пусть *объектом* исследования является *износ деталей*.



<u>*Входными величинами в черный ящик будут*</u>:

p - давление удельное;

V - скорость относительных перемещений деталей;

S - зазор между деталями; τ - время работы;

F - площадь контакта; T - температура.

- <u>*Выходными величинами будут:*</u>
  γ - скорость изнашивания;

  А - работа ударной нагрузки в сопряжении;
  И - величина износа детали.

  Переменные $\mathbf{x_1, x_2, ... x_n}$ - называются **факторами**. Выходные величины $\mathbf{y_1, y_2, ... y_n}$ - называются **откликом или параметром оптимизации**.

  Каждый фактор может принимать в опыте одно из нескольких значений. Такие значения будем называть **уровнями**.

- Обозначим число факторов через - **k**, а число уровней - через **p**.

Чтобы узнать число состояний выходных параметров оптимизации следует возвести число уровней **p** в степень числа факторов **k**

$$N = p^k$$

В нашем примере число факторов **k=6.**

Пусть факторы имеют по пять уровней, тогда число состояний выходных параметров составит:

$$N = p^k = 5^6 = 15625$$

- В этих условиях следует отказаться от опытов, так как объем данных слишком велик.
  Следует поставить вопрос: сколько и каких опытов необходимо включать в эксперимент?
  При планировании эксперимента принято устанавливать два уровня для каждого фактора, тогда состояние выходного параметра будет принимать например, при k=6

$$p^k = 2^6 = 64$$

- Например, при исследовании износа детали U=f(p, V, S, τ, F, T) возможны следующие значения факторов:

	Уровень	
	(–)	(+)
p, Н/мм^2	2	4
V, м/с	0,3	0,6
S, мм	0.1	0,3
τ, с	120	360
F, м^2	0,01	0,016
T, ^{0}C	80	100

- Нижнии уровень ообозначают (-)
- Верхний уровень обозначают (+)

- ***Параметр оптимизации*** - это признак, по которому мы должны оптимизировать процесс (выходной параметр).

Параметр оптимизации должен быть:

- эффективным, как показатель;
- универсальными (то есть отражать состояние исследуемого процесса);
- количественным и выражаться одним числом;
- иметь физический смысл, быть простым и вычисляемым;
- существующим для всех различных состояний факторов.

<u>К факторам предъявляют следующие требования:</u>

1) Управляемость.
2) Непосредственное влияние на объект исследования.
3) Сочетание факторов не должно приводить к остановке эксперимента.

Математическое описание процесса изменения выходного параметра (выбор модели)

- Под моделью мы понимаем вид функции отклика:

$$y=f\,(x_1,x_2,\ldots..x_n)$$

Математическая модель позволяет предсказать дальнейший результат опыта.

Обычно для математической модели выбирают полином:

$$y=B_0+B_1X_1+B_2X_2+\ldots..+BnXn$$

Если неизвестную функцию заменяем полиномом, то эта операция называется *апроксамацией*

Полный факторный эксперимент.

- Для проведения эксперимента необходимо установить уровни факторов. Их устанавливают по результатам аналогичных опытов.
- ***Основной*** - нулевой уровень находится между min(-) и max(+) значениями. Интервал J между min и max должен быть одинаковым. Например, при исследовании износа детали

  $U=f\,(p, V, S, \tau, F, T)$ приняты следующие значения;

	(-)	0	(+)	J
$x_1 = p$, Н/мм^2	2	3	4	1
$x_2 = V$, м/с	0,3	0,45	0,6	0,15
$x_3 = S$, мм	0,1	0,2	0,3	0,1
$x_4 = \tau$, с	120	240	360	120
$x_5 = F$, м^2	0,01	0,013	0,016	0,003
$x_6 = T$, ^{0}C	80	90	100	10

- Интервалы выбирают из условий работы агрегата.

Уровни факторов имеют численные значения при составлении уравнения и рассчитываются по формуле:

$$x_i = \frac{\overline{x}_i - \overline{x}_{i0}}{J}$$

Пример: $x_{1н} = \dfrac{2-3}{1} = -1$; $x_{1В} = \dfrac{4-3}{1} = +1$,

где X1Н – нижний уровень, X1В – верхний уровень,

$\overline{x}_i$, $\overline{x}_{i0}$, - реальные физические значения.

- Величина интервала влияет на результат исследования, так как при постановке эксперимента можно “проскочить” оптимум. Поэтому как выбор основного уровня, так и ширина интервала влияет на результаты эксперимента.
- В общем случае эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов, называется **полным факторным экспериментом.**

- Условия эксперимента можно записать в виде таблицы, где строки соответствуют различным опытам, а столбцы - значениям факторов. Такие таблицы называются - **матрицами**.
Матрица планирования эксперимента 2^2 (полный факторный эксперимент)

$$N = 2^2 = 4$$

Номер опыта n_i	ФАКТОРЫ	
	x_1	x_2
1	–	–
2	+	–
3	–	+
4	+	+

- Матрица планирования $2^3 = 8$ (полный факторный эксперимент)

Номер опыта n_i	ФАКТОРЫ			y, параметр оптимизации	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$, определяющий контраст
	x_1	x_2	x_3		
1	−	−	+	y_1	+
2	−	+	−	y_2	+
3	+	−	−	y_3	+
4	+	+	+	y_4	+
5	−	−	−	y_5	−
6	−	+	+	y_6	−
7	+	−	+	y_7	−
8	+	+	−	y_8	−

- Произведения факторов x_1 x_2 x_3 показывают их взаимодействие и называются *определяющим контрастом*.
- В матрице планирования эксперимента знаки (—) и (+) обозначают два уровня факторов: нижний и вёрхний.
- *Полный факторный эксперимент обладает избыточностью информации*.
- Поэтому экспериментатор может исключить несущественные результаты эксперимента и сократить число опытов.

- Пример:

  для оценки влияния трёх факторов на параметр оптимизации можно воспользоваться половиной полного факторного эксперимента 2^3, используя опыты с первого по четвертый, или с пятого по восьмой. Эти половины матрицы называются ***полурепликой***.
- Полуреплики отличаются между собой знаком в произведении факторов по опытам. Для опытов с первого по четвертый это произведение

  $\mathbf{x_1\ x_2\ x_3 = +1}$, а с пятого по восьмой опыты

  $\mathbf{x_1\ x_2\ x_3 = -1}$. Каждая из полуреплик представляет *дробный факторный эксперимент*.

- Пример: полуреплика с первого по четвёртый опыт:

Номер опыта n_i	ФАКТОРЫ			$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$, определяющий контраст
	x_1	x_2	x_3	
1	–	–	+	+
2	–	+	–	+
3	+	–	–	+
4	+	+	+	+

Полуреплика обозначается условно в виде 2^{3-1}

- Объединение двух полуреплик в одной матрице представляет полный факторный эксперимент.
- При постановке эксперимента могут быть примеры от ½ до 1/16 реплик.

Число факторов	Дробная реплика	Условное обозначение	Число опытов	
			для дробной реплики	для полного факторного эксперимента
3	½ -реплика от 2^3	2^{3-1}	4	8
4	½ -реплика от 2^4	2^{4-1}	8	16
5	$^1/_4$-реплика от 2^5	2^{5-2}	8	32
6	$^1/_8$-реплика от 2^6	2^{6-3}	8	64
7	$^1/_{16}$-реплика от 2^7	2^{7-4}	8	128

- При построении полуреплики 2^{3-1} существует всего две возможности приравнять x_3: $x_3 = +x_1x_2$ или $x_3 = -x_1x_2$ поэтому есть только две полуреплики. Соотношения $x_3 = +x_1x_2$, $x_3 = -x_1x_2$ называются *генерирующими соотношениями*. Произведение трех факторов для полуреплик могут иметь два значения:

  1) $x_1x_2x_3=+1$ или 2) $x_1x_2x_3=-1$

  Символическое обозначение произведения всех факторов, равного (+1) или (-1), называется *определяющим контрастом*.

- При выборе полуреплик 2^{4-1} возможно восемь решений:

1) $x_4=x_1x_2$ 3) $x_4=x_2x_3$ 5) $x_4=x_1x_3$ 7) $x_4=x_1x_2x_3$
2) $x_4=-x_1x_2$ 4) $x_4=-x_2x_3$ 6) $x_4=-x_1x_3$ 8) $x_4=-x_1x_2x_3$

Разрешающая способность этих полуреплик различна. Реплики 1-6 имеют по три фактора в определяющем контрасте, а 7-8 по четыре.
Реплики 7-8 имеют максимальную разрешающую способность и называются ***главными***.
Определяющий контраст находится для главной реплики, умножением правой и левой частей на x_4:

$$x_4x_4=x_1x_2x_3x_4 \Longrightarrow 1=x_1x_2x_3x_4$$

$$x_4x_4=-x_1x_2x_3x_4 \Longrightarrow 1=-x_1x_2x_3x_4$$

- Разумен выбор главной полуреплики, если имеется достоверная информация о большей значимости тройных взаимодействий по сравнению с парными или о незначимости парных взаимодействий.

- При выборе полуреплики для пяти факторов возможны 22 варианта 2^{5-1} (16 опытов). Реплики $x_5=x_1x_2x_3x_4$ и $x_5=-x_1x_2x_3x_4$ имеют наибольшую разрешающую способность.

- Рассмотрим пример построения матрицы планирования эксперимента.
  Допустим, что выбран вариант 5 с генерирующими соотношениями: $x_4=x_1x_3$ и $x_5=x_1x_2x_3$, а определяющие контрасты равны:

$$1=x_4x_1x_3$$

$$1=x_5x_1x_2x_3.$$

Пример построения матрицы дробного факторного эксперимента 2^{5-2}

Номер опыта n_i	ФАКТОРЫ				
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	+	+	–	–	–
2	–	–	–	+	–
3	+	–	–	–	+
4	–	+	–	+	+
5	+	–	+	+	–
6	–	+	+	–	–
7	+	+	+	+	+
8	–	–	+	–	+

- Графу x_1 заполняем произвольно по свойству симметрии. Графы x_2 и x_3 заполняем подбором знаков плюс и минус по свойствам симметрии и ортогональности матрицы. Графу x_4 заполняем по генерирующему соотношению: $x_4 = x_1x_3$. В графе x_5 знаки фактора подсчитываем по генерирующему соотношению: $x_5 = x_1x_2x_3$.

- Матрицы являются табличным планом проведения эксперимента.
- По результатам опытных данных получают уравнение, которое называется математической моделью.

- Пусть, например, проведен эксперимент по полуреплике 2^{3-1} с генерирующим соотношением $x_3 = x_1x_2$, то есть с определяющим контрастом $x_1x_2x_3=1$, и получены значения параметров оптимизации y.

Номер опыта n_i	ФАКТОРЫ			$x_1x_2x_3$, определяющий контраст	y, параметр оптимизации
	x_1	x_2	x_3		
1	–	–	+	+	5
2	–	+	–	+	7
3	+	–	–	+	9
4	+	+	+	+	15
$в_0$					9
$в_1$	3				
$в_2$		2			
$в_3$			1		

- Уравнение регрессии будем искать в виде:
  $y = в_0 + в_1 x_1 + в_2 x_2 + в_3 x_3$

Коэффициент $\boldsymbol{в_0}$ определяется по формуле:

$$в_0 = \frac{\sum_{i=1}^{N} y_i}{N}$$

где N- число опытов; y_i –значение параметра оптимизации в эксперименте по опытам.

$$в_0 = \frac{5+7+9+15}{4} = 9$$

- Коэффициенты уравнения *в1,в2,в3* определяются по формуле:

$$в_i = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_{ji} y_i}{N}$$

где *j*- знаки факторов, *j*=(+),(-); *i*- номер опыта , *i*=1…N

$$в_1 = \frac{-5-7+9+15}{4} = 3$$

$$в_2 = \frac{-5+7-9+15}{4} = 2$$

$$в_3 = \frac{5-7-9+15}{4} = 1$$

- Подставим в уравнение регрессии полученные значения факторов и получим математическую модель:

- $y=9+3x_1+2x_2+1x_3$

Проверим точность полученной математической модели. Подставим в кодовых обозначениях значения факторов.

$y_1=9+3(-1)+2(-1)+1(+1)=5$

$y_2=9+3(-1)+2(+1)+1(-1)=7$

$y_3=9+3(+1)+2(-1)+1(-1)=9$

$y_4=9+3(+1)+2(+1)+1(+1)=15$

- Полученные расчётные значения по математической модели соответствуют экспериментальным данным.

- Такие математические модели называются ***адекватными***.