



Управление целевым функционированием информационных спутниковых систем

Тема 1.

Общие теоретические основы управления техническими системами

**дтн, снс Ключников В.Ю.
(ЦНИИ машиностроения)**

Термины и определения

УПРАВЛЕНИЕ — процесс формирования целесообразного (эффективного) поведения системы.

Управление — это циклически повторяющийся процесс воздействия органа управления на управляемый объект, в котором последовательно, в реальном масштабе времени, на основании обработки исходной информации и оценки обстановки вырабатывается план достижения цели и меры для его реализации и осуществляются:

- а) передача воздействий и контроль их выполнения;
- б) коррекция плана в зависимости от изменения условий обстановки;
- в) выработка и передача новых воздействий, выбранных из множества возможных альтернативных вариантов и обеспечивающих достижение конечной конкретной цели при оптимальных затратах ресурсов.

Таким образом, под управлением понимаются процессы воздействия на подсистемы и элементы системы, которые, переводя систему из одного состояния в другое, способствуют выполнению ее основной функции при изменениях окружающей среды. Сами системы при этом не меняются.

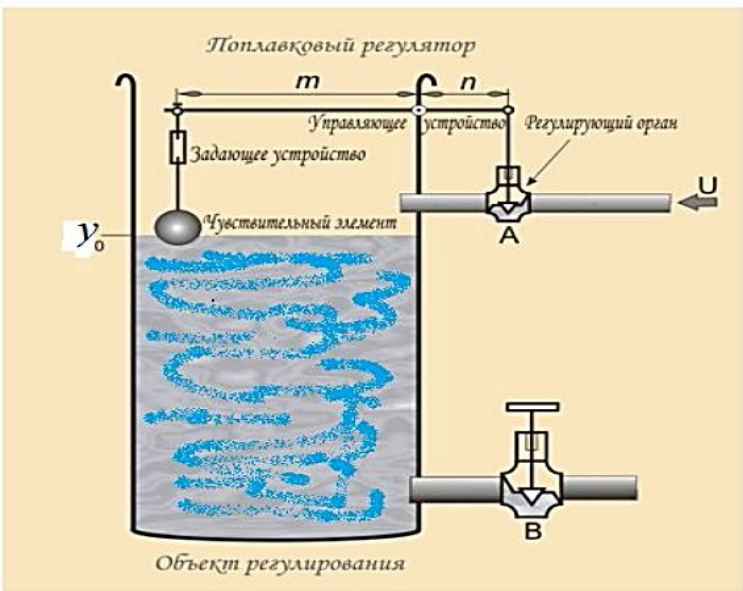
Управление является **автоматическим**, если оно осуществляется без вмешательства человека, с помощью специальных технических средств.

Автоматизированное управление осуществляется с участием человека (чем сложнее объект управления, тем сложнее полностью исключить человека из процесса управления).

Объект управления - совокупность материальных объектов, специальных технических средств, носителей вещества или энергии, среди которых осуществляется некоторый технологический процесс, нуждающийся в управлении.

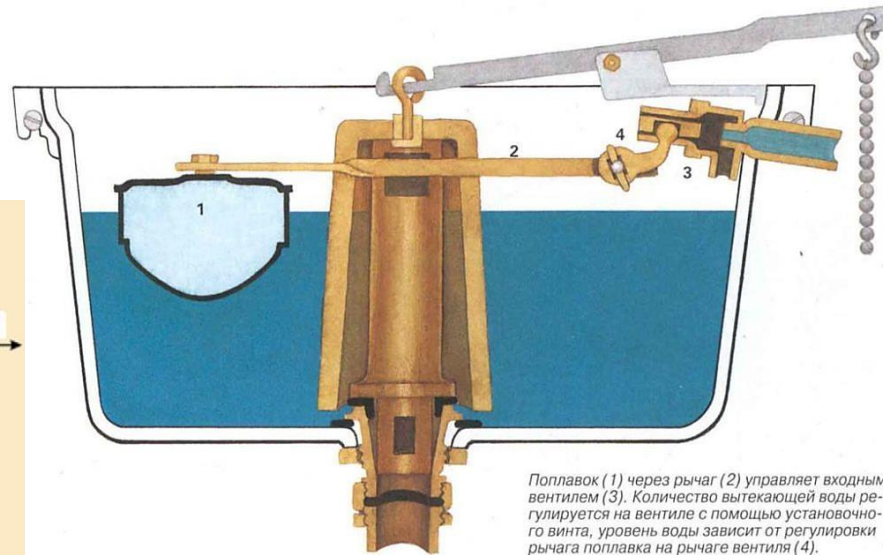
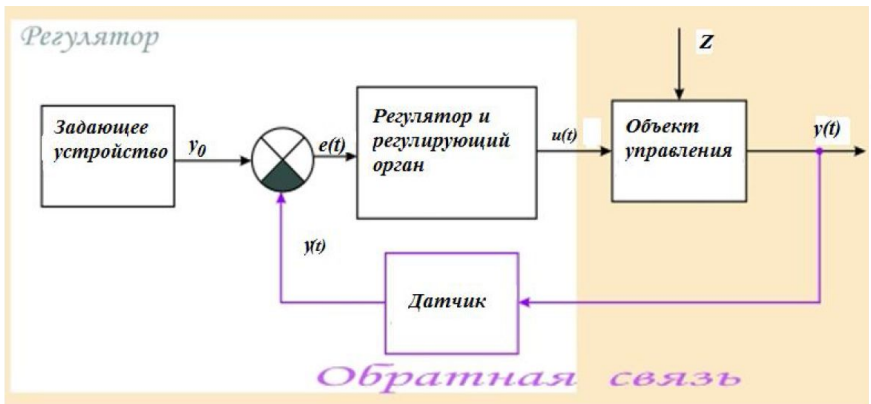
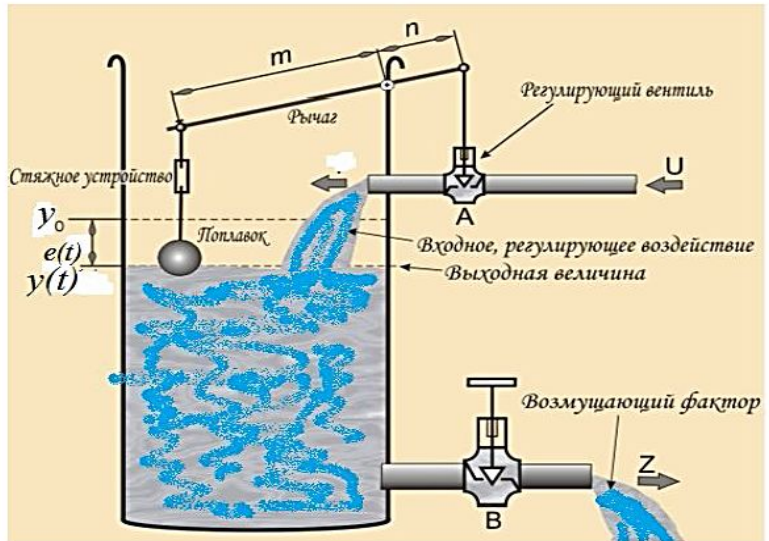
Устройство управления - это устройство, в котором вырабатываются воздействия, называемые управляющими.

Простейшие системы автоматического регулирования уровня жидкости



При ручном регулировании человек-оператор, наблюдая за показанием датчика уровня $y(t)$ (поплавок), сравнивает их с заданными значениями y_0 , то есть определяет величину отклонения $e(t) = y(t) - y_0$ и, исходя из этого, открывает регулирующий вентиль. При автоматическом регулировании человека-оператора заменяет регулятор в виде рычага, который открывает регулирующий вентиль пропорционально отклонению уровня от заданного.

Таким образом контур регулирования можно рассматривать как систему, состоящую из объекта регулирования и регулятора, который через исполнительное устройство может влиять на регулируемый параметр объекта. Информационная связь между датчиком, измеряющим регулируемый параметр, и входом регулятора называется обратной связью. Так образуется замкнутый контур управления, а сама система управления называется замкнутой.



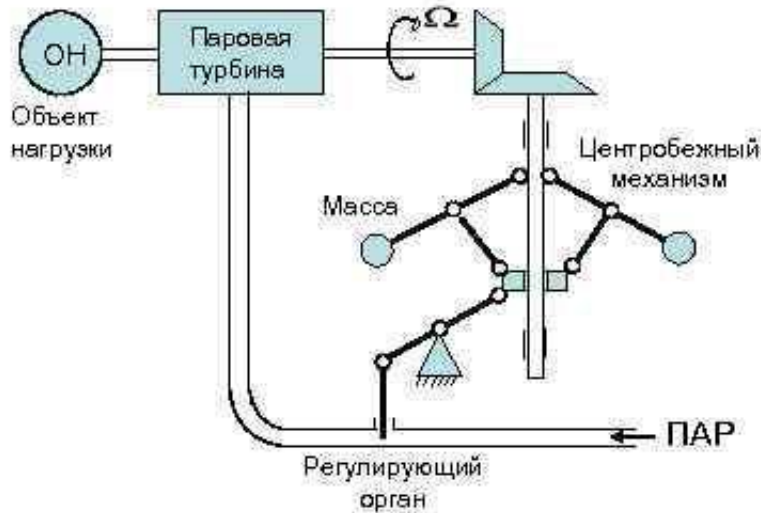
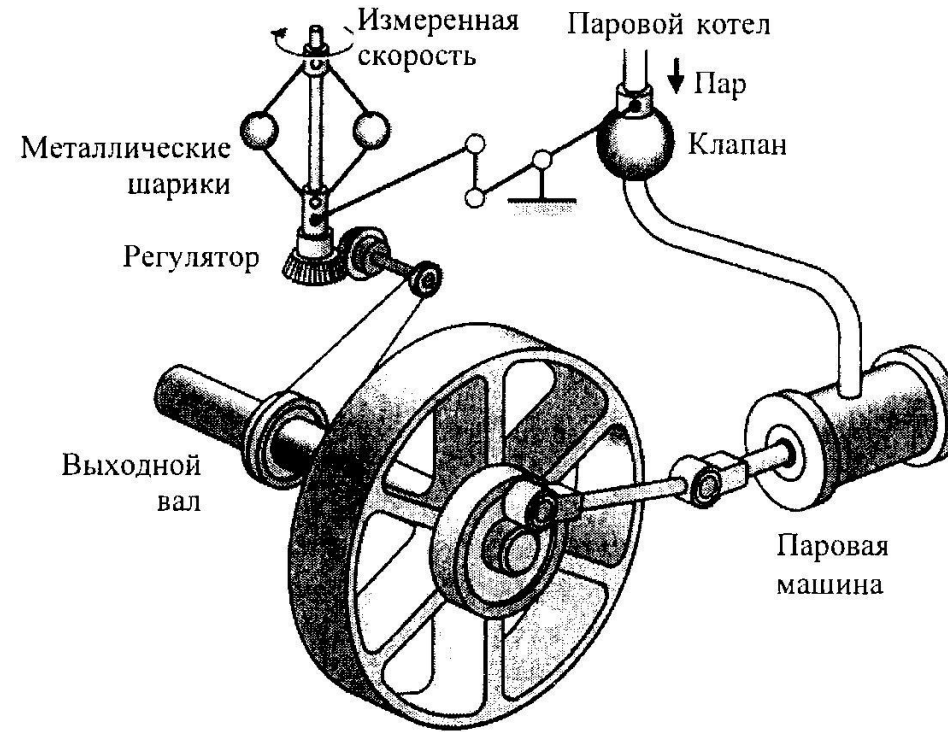
Поплавок (1) через рычаг (2) управляет входным вентилем (3). Количество вытекающей воды регулируется на вентиле с помощью установочного винта, уровень воды зависит от регулировки рычага поплавка на рычаге вентиля (4).

Обратная связь

Простейший Центробежный регулятор скорости вращения



РЕГУЛЯТОР УАТТА



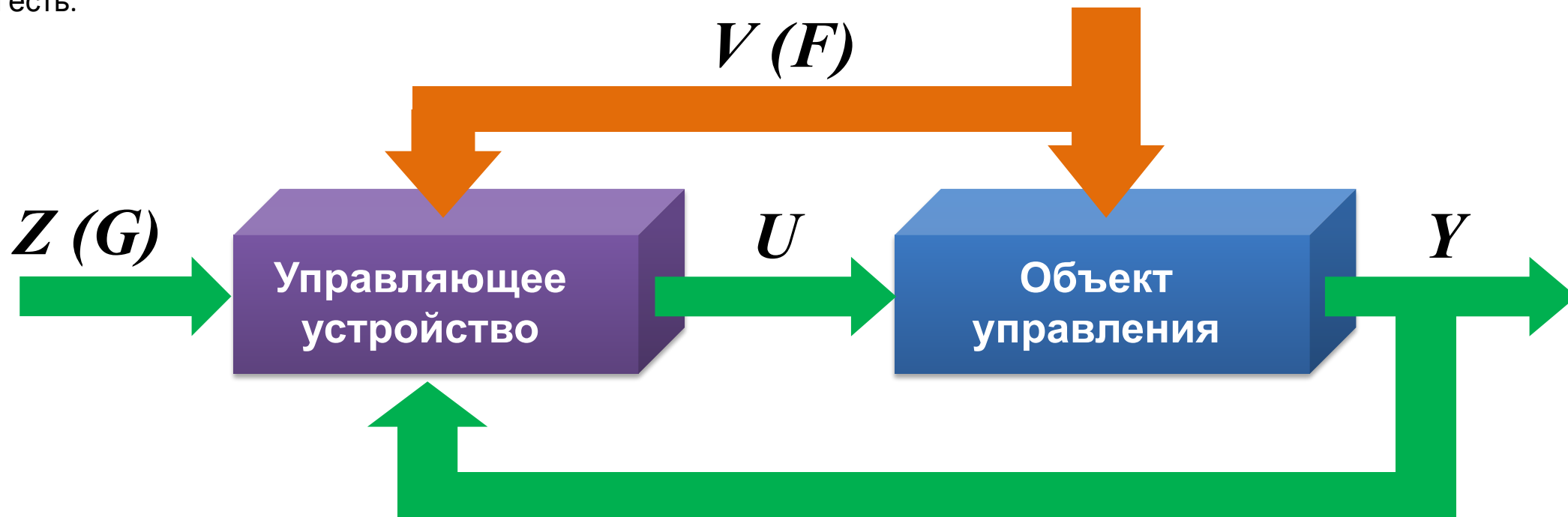
Для паровой машины с регулятором Уатта **управляющий объект – сам регулятор, управляемый – паровой котел.** Как только скорость маховика начинает превышать установленные пределы, объем подачи пара уменьшается пропорционально этой скорости, и, наоборот, когда скорость падает ниже установленных пределов, увеличивается объем подачи пара. Регулятор не выясняет причин увеличения или уменьшения скорости, он просто поддерживает заданный режим работы паровой машины



Структура системы автоматического управления

Система автоматического управления (САУ) – совокупность объекта управления и управляющего устройства.

Назначение САУ состоит в обеспечении с возможно большей точностью определенной заранее предписанной взаимосвязи управляемых величин Y с задающими воздействиями Z и более полном подавлении влияния возмущающих воздействий и помех V , если они есть.



U – управляющее воздействие

$Z(G)$ – задающее воздействие

$V(F)$ – возмущающее воздействие

Y – выходные переменные

Фундаментальные принципы управления

Два основных принципа:

1. Принцип разомкнутого управления (управление по внешнему воздействию)
2. Принцип замкнутого управления (управление по отклонению)

Принцип разомкнутого управления может реализоваться в двух видах:

- управление по задающему воздействию
- управление по возмущению

Достоинства: - прямой характер управления (быстродействие)

- простота
- надежность

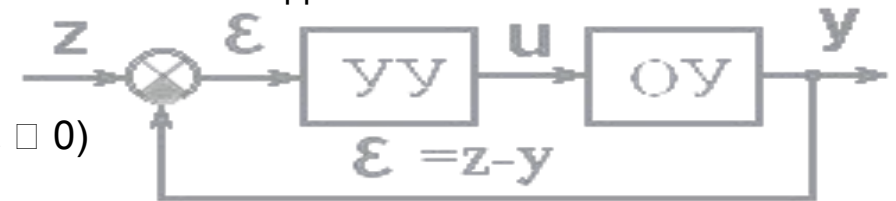
Недостатки: - низкая точность (большое количество неконтролируемых воздействий)

- нестационарность характеристик объектов управления
- громоздкость управляющего устройства при большом количестве внешних воздействий

Принцип замкнутого управления:

ε – ошибка управления или регулирования ($\varepsilon \neq 0$)

Сумматор – устройство сравнения сигналов



Достоинства: - универсальный характер управления

- принципиальная независимость результатов управления от количества значений внешних воздействий

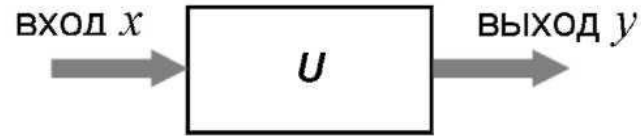
- высокая точность

Недостатки: - более низкое быстродействие

- склонность замкнутых систем к автоколебаниям, связанная с процессом циркулирования управляющей информации по замкнутому контуру

Комбинированное управление – симбиоз разомкнутой и замкнутой системы управления

Математическое описание системы управления: простейшие примеры

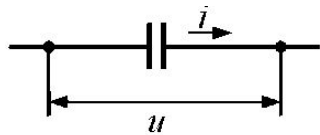


Математически описать систему управления - это значит найти оператор, связывающий входы и выходы. Запись $y = U[x]$ означает, что выход y получен в результате применения оператора U ко входу x . С помощью оператора можно предсказать реакцию объекта на любой входной сигнал.

$$U[x] = \int_0^t x(t) dt . \quad - \text{ оператор интегрирования.}$$

$$U[x(t)] = \dot{x}(t) = \frac{dx(t)}{dt} . \quad - \text{ оператор дифференцирования - вычисляет производную. Обратный оператор по отношению к оператору интегрирования.}$$

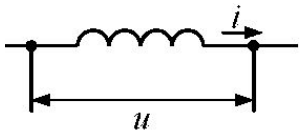
Примеры:



$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt} = C p u(t)$$

- ток i (в амперах), проходящий по цепи с конденсатором, пропорционален производной от разности потенциалов u (в вольтах) на его пластинах; здесь C - емкость конденсатора (измеряется в фарадах).

Кроме того, падение напряжения u на катушке индуктивности пропорционально производной от проходящего тока i (где L - индуктивность (измеряется в генри):



$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt} = L p i(t)$$

Обобщенное математическое описание объектов и систем управления (линейный случай)

$$\begin{aligned}
 & a_n y^{(n)} + a_{n-1} y^{(n-1)} + \dots + a_1 y^{(1)} + a_0 y = \\
 & = b_m u^{(m)} + b_{(m-1)} u^{(m-1)} + \dots + b_1 u^{(1)} + b_0 u + \\
 & + c_r v^{(r)} + c_{(r-1)} v^{(r-1)} + \dots + c_1 v^{(1)} + c_0 v
 \end{aligned}$$

- линейное дифференциальное уравнение, в котором u, v является входами, а y – выходом, a, b, c – коэффициенты, могут быть нулевыми.

При исследовании линейных систем широко применяются так называемые *операторные методы*. Операции дифференцирования и интегрирования заменяются алгебраическими операциями умножения и деления за счет применения специальных преобразований, что резко упрощает все процедуры преобразования и исследования математических моделей объектов и систем.

Из *операторных* методов наиболее известны:

1) Преобразование Лапласа:

$$X(p) = L\{x(t)\} = \int_0^{\infty} x(t) e^{-p \cdot t} dt$$

2) Преобразование Фурье:

$$X(j \cdot \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega \cdot t} dt$$

Применяем преобразование Лапласа к дифференциальному уравнению, с учетом нулевых начальных условий.

Получим:

$$\begin{aligned}
 & (a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0) \cdot Y(p) = \\
 & = (b_m p^m + b_{(m-1)} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0) \cdot U(p) + \\
 & + (c_r p^r + c_{(r-1)} p^{r-1} + \dots + c_1 p + c_0) \cdot V(p) \\
 & \left(\sum_{i=0}^n a_i p^i \right) \cdot Y(p) = \left(\sum_{i=0}^m b_i p^i \right) \cdot U(p) + \left(\sum_{i=0}^r c_i p^i \right) \cdot V(p) \\
 & \quad \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \\
 & \quad A(p) \qquad \qquad \qquad B(p) \qquad \qquad \qquad C(p)
 \end{aligned}$$

$$A(p)Y(p) = B(p)U(p) + C(p)V(p) \quad \text{при нулевом возмущающем воздействии:}$$

$$A(p)Y(p) = B(p)U(p) \qquad \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{B(p)}{A(p)} = W(p) \quad \text{- передаточная функция}$$

Передаточной функцией объекта или системы называется отношение изображения по Лапласу выходной переменной к изображению по Лапласу входной при нулевых начальных условиях.

Типовые (элементарные) динамические звенья

- 1) Пропорциональное звено (ПЗ) $W_{\text{П}}(p) = k$
- 2) Дифференцирующее звено (ДЗ) $W_{\text{Д}}(p) = p$
- 3) Интегрирующее звено (ИЗ) $W_{\text{И}}(p) = \frac{1}{p}$
- 4) Пропорционально-дифференцирующее звено (ПД) $W_{\text{ПД}}^{\text{К}}(p) = T_{\text{ПД}} p + 1$
 $W_{\text{ПД}}^{\text{ПП}}(p) = p + \alpha \quad T = \frac{1}{-\alpha} \quad (t_p \approx 3 \div 5T)$
- 5) Апериодическое звено (АЗ) $W_{\text{А}}^{\text{К}}(p) = \frac{1}{T_{\text{А}} p + 1} \quad W_{\text{А}}^{\text{ПП}}(p) = \frac{1}{p + \alpha}$
- 6) Пропорционально-дифференцирующее звено 2-го порядка (ПД2)
 $W_{\text{ПД}}^{\text{К}}(p) = T_{\text{Д}}^2 p^2 + 2\xi T_{\text{Д}} p + 1 \quad W_{\text{ПД}}^{\text{ПП}}(p) = p^2 + 2\alpha p + \alpha^2 + \beta^2$
- 7) Колебательное звено (КЗ) $W_{\text{К}}^{\text{К}}(p) = \frac{1}{T_{\text{к}}^2 p^2 + 2\xi T_{\text{к}} p + 1} \quad W_{\text{К}}^{\text{ПП}}(p) = \frac{1}{p^2 + 2\alpha p + \alpha^2 + \beta^2}$
 $0 < \xi < 1$

Звенья 1,3,5,7 – являются физически **реализуемыми**, т.е. реальными, а 2,4,6 – физически **не реализуемыми** т.е. идеальными.

$$W_{\text{ПД}}^{\text{И}}(p) = T_{\text{Д}} p + 1 \quad W_{\text{ПД}}^{\text{Р}}(p) = \frac{T_{\text{Д}} p + 1}{T p + 1} \quad (\text{но } T \ll T_{\text{Д}} \text{ и } T \rightarrow 0)$$

Структурная схема системы автоматического управления

Обозначение	Название	Свойства
$\frac{x(t)}{x(p)}$	Направление распространения сигнала	Обладает свойством однонаправленности
$x(p) \rightarrow [W(p)] \rightarrow y(p)$	Динамическое звено, характеризуемое математической моделью	Звено в схеме имеет один вход и один выход
	▪ - узлы	Сигнал при прохождении через узел не делится на части
	Сумматор $Y = X_1 - X_2 + X_3$	Имеет много входов и только один выход

1) Параллельное соединение

$$Y_1 = W_1 x \quad Y = Y_1 + Y_2 + Y_3$$

$$Y_2 = W_2 x \quad Y = x(W_1 + W_2 + W_3)$$

$$Y_3 = W_3 x \quad W^{ПАР}(p) = \sum_{i=1}^n W_i(p)$$

2) Последовательное соединение

$$\begin{cases} Y_1 = W_1 x \\ Y_2 = W_2 Y_1 \\ Y = W_3 Y_2 \end{cases} \quad \begin{cases} Y = W_1 W_2 W_3 x \\ W_3^{ПОР}(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p) \end{cases}$$

3) Обратная связь

$$\begin{cases} \varepsilon = x + Y_2 \\ Y = W_1 \varepsilon \\ Y_2 = W_2 Y \end{cases} \quad \begin{cases} \varepsilon = \frac{Y}{W_1} & \frac{Y}{W_1} - W_2 Y = x \\ \frac{Y}{W_1} = x + W_2 Y & \frac{(1 - W_1 W_2) Y}{W_1} = x \quad \frac{Y}{x} = \frac{W_1}{1 + W_1 W_2} \\ Y_2 = W_2 Y & W_3^{ОС}(p) = \frac{W_1}{1 + W_1 W_2} \end{cases}$$

Структурной схемой в теории автоматического управления называется графическое изображение математической модели автоматической системы в виде соединения звеньев.

Разбиение сложной передаточной функции на элементарные составляющие (типовые звенья) не является чисто математическим приемом. Любое реальное устройство физически или технологически может быть разбито на совокупность динамических звеньев низкого порядка. Переход от реальных объектов (элементов) САУ к их математическим моделям позволяет абстрагироваться от физических принципов систем, поэтому структурная схема является основой универсальных методов анализа и синтеза математических систем.

Оценка качества систем автоматического управления



Под *качеством управления* в динамической системе понимают совокупность показаний как качественного, так и количественного типа, которые характеризует основные свойства системы и в установившемся состоянии и в процессе реализации функции управления. Эти показатели также должны позволять произвести оценку соответствия результатов управления целям и требованиям управляемой технологии.

Для оценки качества систем управления используют понятие как *критерий качества*. Под ним понимается математическое выражение или система выражений, позволяющая вычислить количественную оценку качества управления по результатам исследований системы или ее математической модели.

Частотные характеристики линейных динамических звеньев и систем

Наряду с преобразованием Лапласа для математического описания, преобразования и исследования линейных объектов и систем используется преобразование Фурье, которое можно рассматривать как частный случай преобразования Лапласа, когда произвольная, абстрактная независимая переменная p рассматривается как мнимая конкретная переменная $j\omega$ которую называют мнимой частотой.

Переход от операторной записи к частотной форме осуществляется простой подстановкой вместо аргумента p аргумент $j\omega$.

$$W_A(p) = \frac{1}{Tp + 1} \quad p = j\omega$$

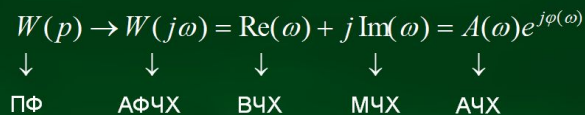
$$W_A(j\omega) = \frac{1}{Tj\omega + 1} \quad \text{- по ней строится АФЧХ}$$

АФЧХ – амплитудно-фазовая частотная характеристика

Амплитудная и фазовая частотные характеристики.



Таким образом, в ТАУ применяется 5 основных частотных характеристик, построенных по схеме:



$$W_A = \frac{1}{Tj\omega + 1} = \frac{1 - Tj\omega}{(1 + Tj\omega) \cdot (1 - Tj\omega)} = \frac{1 - Tj\omega}{1 + T^2\omega^2} =$$

$$= \frac{1}{1 + T^2\omega^2} - j \frac{T\omega}{1 + T^2\omega^2}$$

\downarrow
ВЧХ

\downarrow
МЧХ

ВЧХ – $\text{Re}(w)$, МЧХ – $\text{Im}(w)$

ВЧХ - вещественная частотная характеристика

МЧХ - мнимая частотная характеристика

АЧХ - амплитудно - частотная характеристика

ФЧХ - фазо - частотная характеристика

$$W(j\omega) = \text{Re}(\omega) + j \text{Im}(\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$$

$$A(\omega) = \sqrt{\text{Re}^2(\omega) + \text{Im}^2(\omega)} \quad \text{- АЧХ}$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{\text{Im}(\omega)}{\text{Re}(\omega)} \quad \text{- ФЧХ}$$

$$A(\omega) = |W(j\omega)|$$

$$\varphi(\omega) = \arg W(j\omega)$$

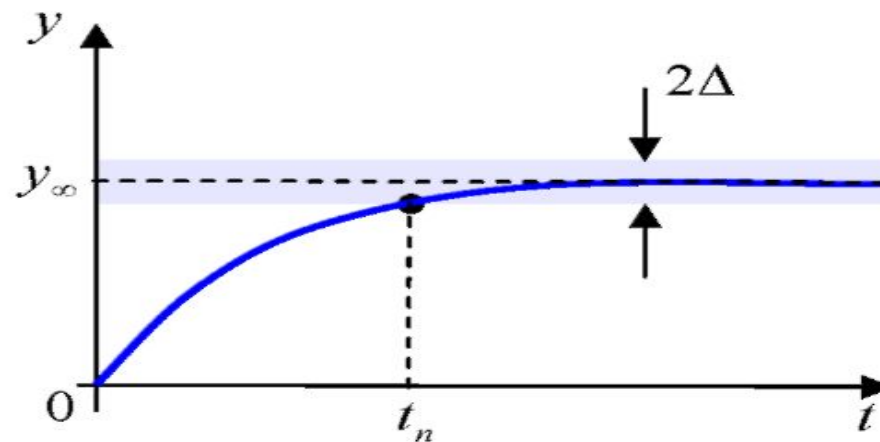
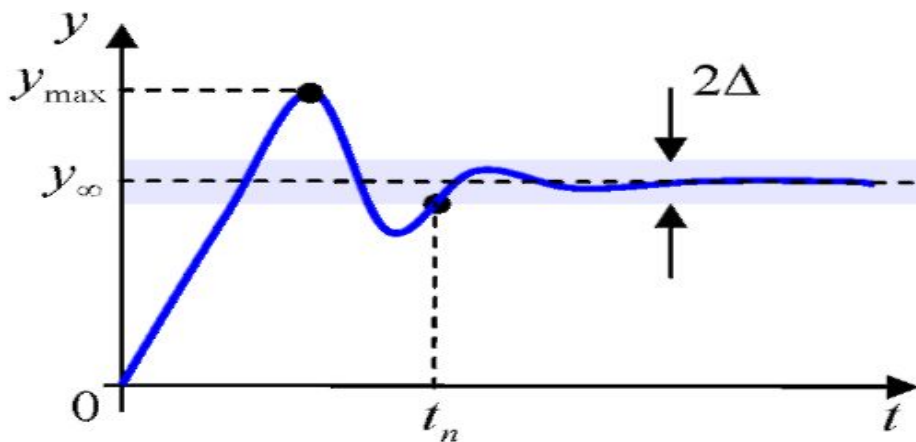
$$\text{Re}_A(\omega) = \frac{1}{1 + T^2\omega^2}$$

$$\text{Im}_A(\omega) = -\frac{T\omega}{1 + T^2\omega^2}$$

Частотные характеристики любого линейного звена можно получить экспериментально, подавая ему на вход гармонические воздействия различной частоты, дожидаясь установления частоты любого сигнала и фиксируя отношение сигналов и разность их фаз, как функцию частоты. На этом свойстве линейных объектов и систем основываются экспериментальные методы математического анализа.

Переходные процессы в системе управления

Хорошо спроектированная система должна не только быть устойчивой и поддерживать заданную точность в установившемся режиме, но и плавно переходить на новый режим при изменении заданного значения выхода (уставки). Качество переходных процессов обычно **оценивается** по переходной характеристике (реакции системы на единичный ступенчатый входной сигнал).



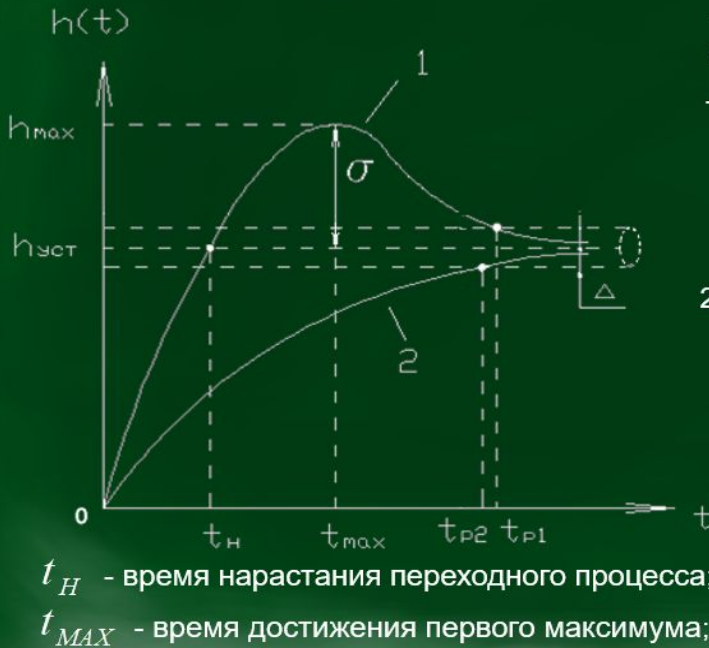
Время переходного процесса t_n - время, через которое регулируемая величина «входит в коридор» шириной 2Δ вокруг установившегося значения y_∞ . Это значит, что при $t > t_n$ значение выхода отличается от установившегося не более, чем на Δ . Обычно величина Δ задается в процентах от установившегося значения, чаще всего 2% или 5%.

Перерегулирование σ - показывает, на сколько процентов максимальное значение выхода y_{\max} превышает установившееся значение y_∞ :

$$\sigma = \frac{y_{\max} - y_\infty}{y_\infty} \cdot 100\%$$

Оценка качества системы управления по виду переходного процесса

Вид переходного процесса зависит не только от динамических и статических свойств исследования системы, но и от вида входных воздействий, для которых этот процесс получен. Чаще всего переходным процессом называют реакцию системы на единичное ступенчатое воздействие.



1) Переходной процесс с перерегулированием, где σ - величина перерегулирования.

$$\sigma = \frac{h_{MAX} - h_{уст}}{h_{уст}} \cdot 100\%$$

В реальных системах $\sigma \leq 35\%$

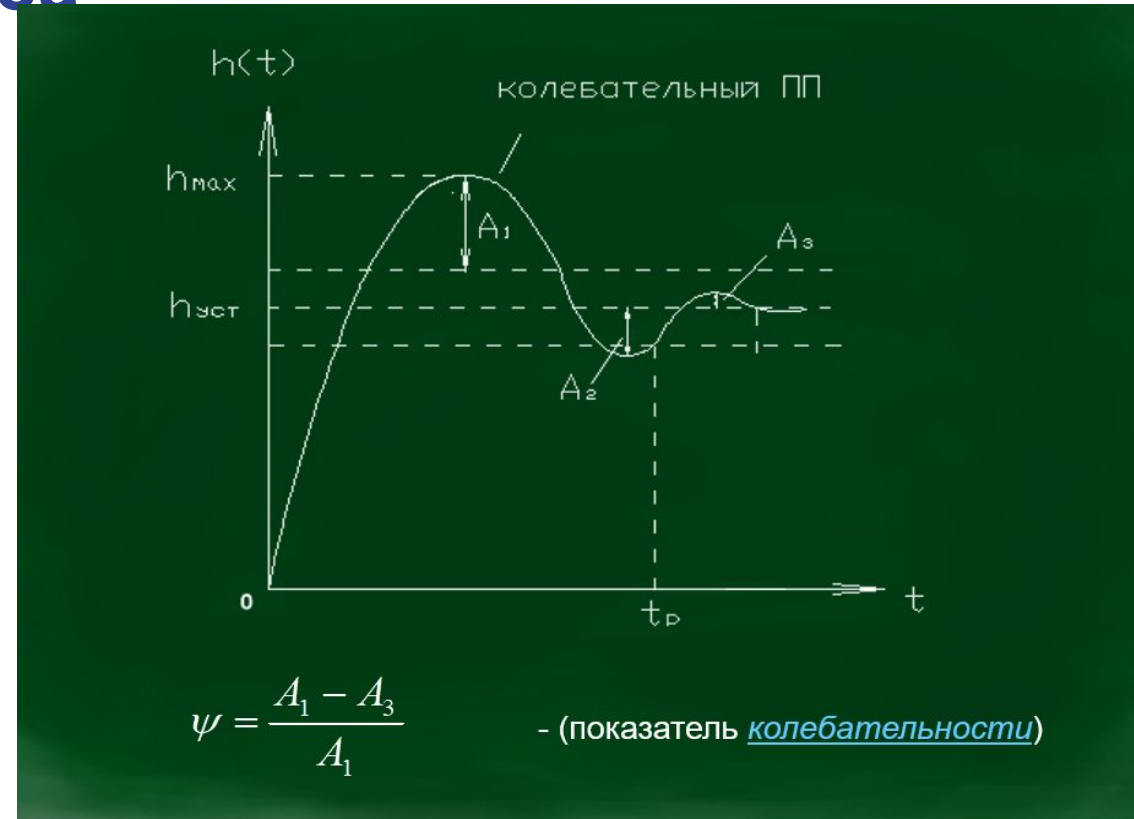
2) Аperiodический переходной процесс

$\Delta_{\text{доп}}$ - допустимая трубка регулирования (по сути - допустимое отклонение переходного процесса от $h_{уст}$)

$$\Delta_{\text{доп}} = 1\% - 10\%$$

Самые распространенные - 3% и 5%

t_{p1} - время регулирования переходного процесса



Прямой метод исследования качества системы управления состоит из 2-х основных этапов:

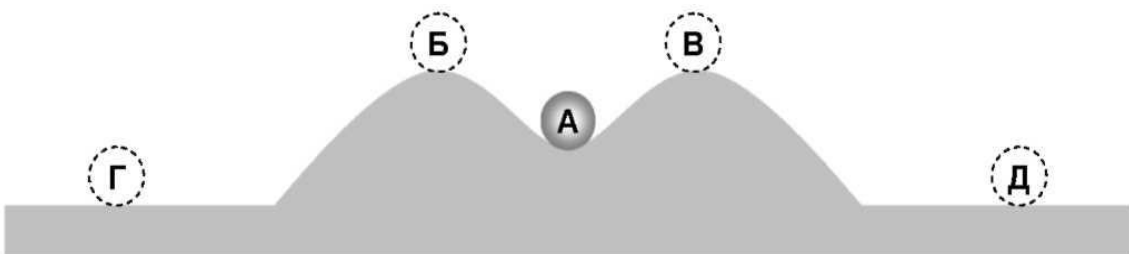
- 1) Построение переходного процесса;
- 2) Исследование переходного процесса и формирование показателей качества и критериев оценки.

Построение переходных процессов возможно 2-мя путями.

- а) Экспериментальное исследование (в условиях эксплуатации)
- б) Моделирование переходных процессов в системе (применяют при теоретическом исследовании и математическом моделировании).

Устойчивость систем автоматического управления

1. Общее понятие об устойчивости



В положениях Б и В шарик также находится в положении равновесия, но оно неустойчиво, так как при малейшем сдвиге в сторону шарик скатывается с вершины.

В положениях Г и Д равновесие шарика нейтральное - при небольшом смещении он остается в новом положении. При этом говорят, что система нейтрально устойчива, то есть находится на границе устойчивости.

Можно показать, что система «шарик-горка» - нелинейная. Как мы увидели, для нее

- устойчивость - не свойство системы, а свойство некоторого положения равновесия;
- может быть несколько положений равновесия, из них некоторые - устойчивые, а некоторые - нет;
- положение равновесия может быть устойчиво при малых отклонениях (система устойчива «в малом») и неустойчиво при больших («в большом»).

2. Определение устойчивости системы

Пусть дано уравнение движения системы: $\frac{dx(t)}{dt} = f(x, t)$

- система дифференциальных уравнений первого порядка, в нем правая часть зависит только от значений t и $x(t)$, но не от производных.

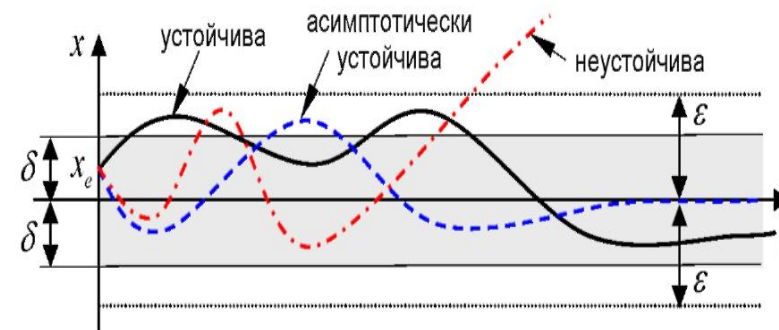
Система называется устойчивой по Ляпунову в положении равновесия x^* , если при начальном отклонении от положения равновесия x^* не более, чем на δ , траектория движения отклоняется от x^* не более, чем на ε , причем для каждого ε можно найти соответствующее ему $\delta(\varepsilon)$:

$$|x_0 - x^*| < \delta \Rightarrow |x(t) - x^*| < \varepsilon \text{ при всех } t > 0.$$

Фактически это означает, что чем меньше начальное отклонение, тем меньше траектория движения отклоняется от положения равновесия. Если кроме того вектор состояния стремится к положению равновесия, то есть,

$$|x(t) - x^*| \rightarrow 0 \text{ при } t \rightarrow \infty,$$

система называется асимптотически устойчивой в положении равновесия x^* .

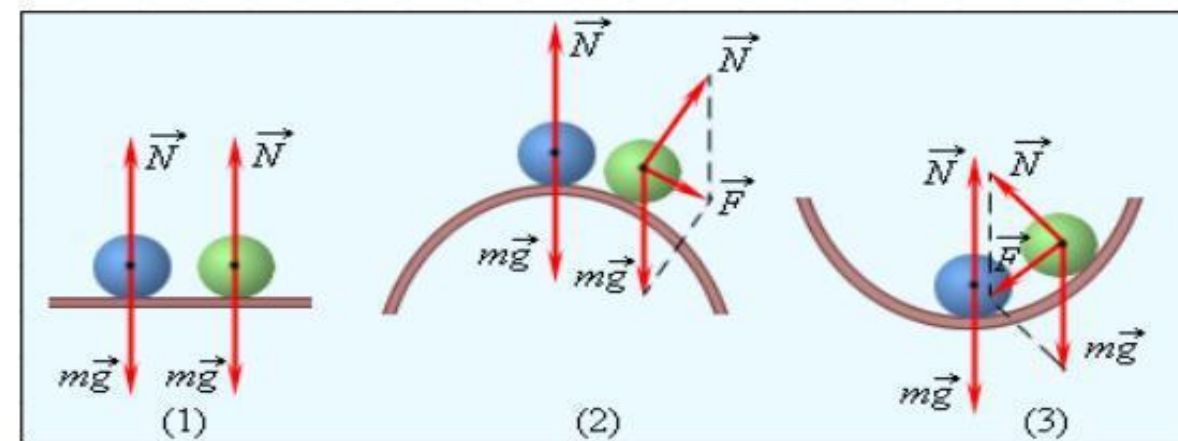
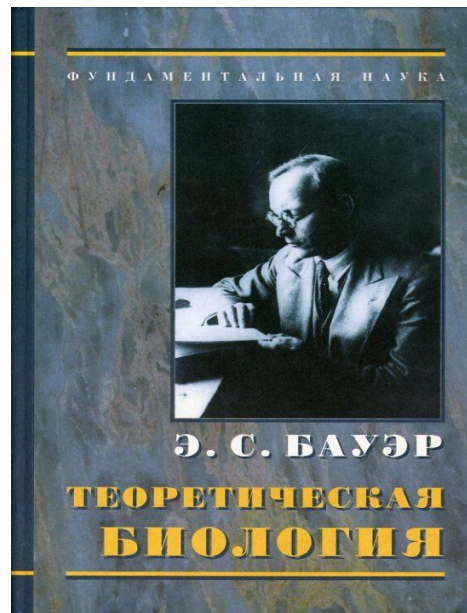


Принцип устойчивого неравновесия живых систем

(Принцип устойчивого неравновесия Э.С. Бауэра)



Эрвин Бауэр (1890 – 1938 гг)



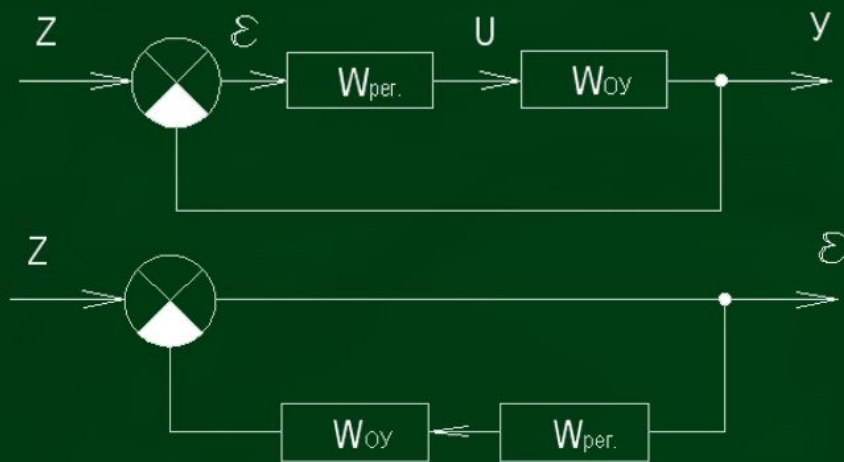
- (1) – безразличное равновесие,
- (2) – неустойчивое равновесие,
- (3) – устойчивое равновесие

В основе жизни лежит принцип устойчивого неравновесия: **"все и только живые системы никогда не бывают в равновесии и исполняют за счет своей свободной энергии постоянно работу против равновесия, требуемого законами физики и химии при существующих внешних условиях"**.

В соответствии с этим принципом выделение и использование свободной энергии в живой системе сопровождается постоянным разрушением и восстановлением структуры живой ткани, обладающей свободной энергией и находящейся в неравновесном состоянии. Для этого процесса необходимо поступление в систему извне определенных, в первую очередь органических веществ. Таким образом, направленное специфическое взаимодействие со средой в целевых ситуациях поведения необходимо для существования живой материи. Поэтому живая система должна быть

Анализ частных показателей точности и быстродействия автоматических систем

Анализ точности обработки типовых степенных воздействий.



Для анализа точности работы системы необходимо определить передаточную функцию по каналу ошибки.

$$W_{3C}^{\varepsilon}(p) = \frac{1}{1 + W_{PC}(p)} = \frac{S(p)}{S(p) + L(p)} = K_{\varepsilon} p^{\nu} \frac{S_K(p)}{N_K(p)}$$

Оценка ошибки в зависимости от порядка астатизма

- 1) Если система является статической, то она обрабатывает единичное ступенчатое воздействие с ошибкой = βK_{ε} , линейно-нарастающее и параболическое с ошибкой = ∞
- 2) Если система является астатической 1 порядка, то при ступенчатом воздействии ошибка равна нулю, при линейно-нарастающем - βK_{ε} , а при параболическом стремится к бесконечности
- 3) При астатизме 2-го порядка, при ступенчатом и линейно-нарастающем, ошибка равна нулю, а при параболическом - βK_{ε}

$$W_{PC}(p) = \frac{L(p)}{S(p)} = K_{PC} p^{-\nu} \frac{L_K(p)}{S_K(p)}$$

$$W_{3C}^{\varepsilon}(p) = \frac{1}{1 + K_{PC} p^{-\nu} \frac{L_K(p)}{S_K(p)}} = \frac{p^{\nu} S_K(p)}{p^{\nu} S_K(p) + K_{PC} L_K(p)}$$

Чем больше ω , тем точнее получается переходной процесс, но запасы устойчивости уменьшаются.

$$W_{3C}^{\varepsilon}(p) = \frac{\varepsilon(p)}{Z(p)}; \quad \varepsilon(p) = Z(p) \cdot W_{3C}^{\varepsilon}(p); \quad Z(p) = \frac{\beta}{p^{\gamma}}$$

$$\varepsilon(p) = \beta K_{\varepsilon} p^{\nu-\gamma} \frac{S_K(p)}{N_K(p)}$$

Из последних выражений видно, что ошибка тем меньше, чем меньше коэффициент K_{ε} . Также видно, что ошибка меньше, чем больше K_{PC} , т.е. для улучшения точности работы системы необходимо **увеличивать** K_{PC} , но сильное увеличение последнего может привести к ухудшению устойчивости системы, поэтому его значение ограничивают предельно допустимым.

Оценка быстродействия замкнутой системы по частоте среза ЛАЧХ разомкнутой системы



$$t_p \approx \frac{(3-4)\pi}{\omega_{CP}}$$

Коэффициент в числителе тем больше, чем выше порядок системы и порядок астатизма.

Управляемость — одно из важнейших свойств системы управления, описывающее возможность перевести систему из одного состояния в другое.

Состояние $x(t_1)$ линейной системы управляемо, если существует такой вход $u(t)$, который переводил бы начальное состояние $x_0(t_1)$ в конечное состояние $x_k(t_2)=0$ (начало координат) за конечный интервал времени $(t_2 - t_1)$. Система называется *полностью управляемой*, если все компоненты её вектора состояний управляемы.

Пусть существует система порядка n (с n компонентами вектора состояния), p входами и q выходами, записанная в виде:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t) \\ y(t) &= C(t)x(t) + D(t)u(t)\end{aligned}$$

где

$x(t) \in \mathbb{R}^n$; $y(t) \in \mathbb{R}^q$; $u(t) \in \mathbb{R}^p$;

$\dim [A(\cdot)] = n \times n$, $\dim [B(\cdot)] = n \times p$, $\dim [C(\cdot)] = q \times n$, $\dot{x}(t) := \frac{dx(t)}{dt}$

$\dim [D(\cdot)] = q \times p$,

Здесь $x(\cdot)$ — «вектор состояния», $y(\cdot)$ — «вектор выхода», $u(\cdot)$ — «вектор входа», $A(\cdot)$ — «матрица системы», $B(\cdot)$ — «матрица входа», $C(\cdot)$ — «матрица управления», $D(\cdot)$ — «сквозная матрица».

Для системы можно составить *матрицу управляемости*:

$[B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B]$

Согласно критерию управляемости если ранг матрицы управляемости равен n , система является полностью управляемой.

Наблюдаемость является свойством системы, показывающим, можно ли по выходу полностью восстановить информацию о состояниях системы.

Система называется наблюдаемой, если на конечном интервале времени по выходу системы в конце этого интервала $y(t_1) \in \mathbb{R}^q$ при известном управляющем воздействии $u(t) \in \mathbb{R}^p$ можно определить все начальные компоненты вектора состояния $x(t_0) \in \mathbb{R}^n$. Соответственно наблюдаемыми состояниями системы являются те компоненты вектора состояния, которые можно восстановить по условиям, приведённым выше.

Более формально можно сказать, что наблюдаемость позволяет по выходу системы судить о процессах, происходящих внутри неё. Ввиду того, что состояния системы играют важную роль в управлении с помощью обратных связей, важно, чтобы они были наблюдаемыми.

Пусть существует система порядка n (с компонентами вектора состояния), входами и выходами, записанная в виде:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t) \\ y(t) &= C(t)x(t) + D(t)u(t)\end{aligned}$$

где

$x(t) \in \mathbb{R}^n$; $y(t) \in \mathbb{R}^q$; $u(t) \in \mathbb{R}^p$;

$\dim [A(\cdot)] = n \times n$, $\dim [B(\cdot)] = n \times p$, $\dim [C(\cdot)] = q \times n$, $\dot{x}(t) := \frac{dx(t)}{dt}$

$\dim [D(\cdot)] = q \times p$,

Здесь $x(\cdot)$ — «вектор состояния», $y(\cdot)$ — «вектор выхода», $u(\cdot)$ — «вектор входа», $A(\cdot)$ — «матрица системы», $B(\cdot)$ — «матрица входа», $C(\cdot)$ — «матрица управления», $D(\cdot)$ — «сквозная матрица».

Для системы можно составить *матрицу наблюдаемости*:

$[C \ CA \ CA^2 \ \dots \ CA^{n-1}]^T$

Согласно критерию наблюдаемости если ранг матрицы наблюдаемости равен n , система является полностью наблюдаемой.

Обычно регулятор строится на основе некоторых приближенных (номинальных) моделей объекта управления (а также приводов и датчиков) и внешних возмущений. При этом поведение реального объекта и характеристики возмущений могут быть несколько иными. Поэтому требуется, чтобы разработанный регулятор обеспечивал устойчивость и приемлемое качество системы при малых отклонениях свойств объекта и внешних возмущений от номинальных моделей. В современной теории управления это свойство называют робастностью (грубостью). Иначе его можно назвать **нечувствительностью к малым ошибкам моделирования объекта и возмущений**.

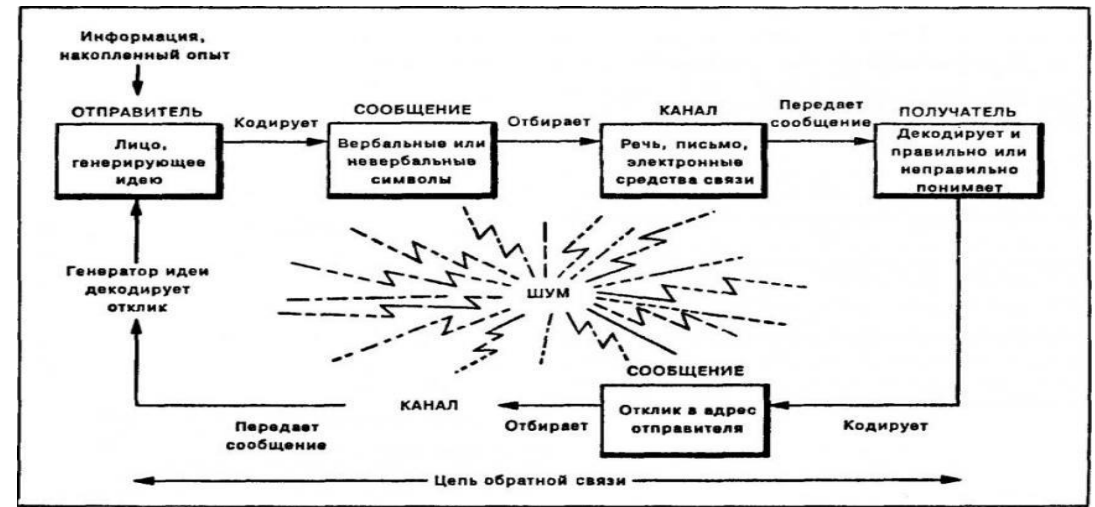
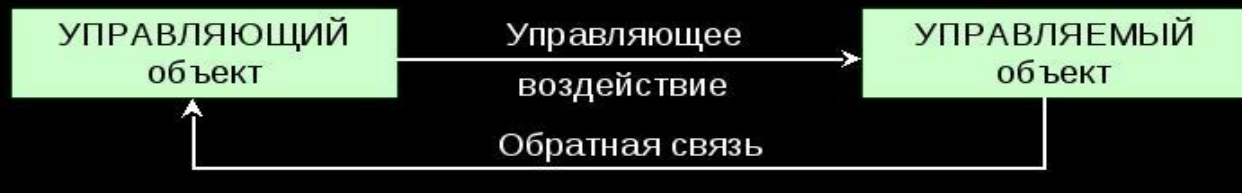
Различают несколько задач, связанных с робастностью:

- **робастная устойчивость** - обеспечить устойчивость системы при всех допустимых отклонениях модели объекта от номинальной;
- **робастное качество** - обеспечить устойчивость и заданные показатели качества системы при всех допустимых отклонениях модели объекта от номинальной;
- **гарантирующее управление** - обеспечить заданные показатели качества системы при всех допустимых отклонениях модели возмущения от номинальной (считая, что модель объекта известна точно).

Обратная связь в технике — это процесс, приводящий к тому, что результат функционирования какой-либо системы влияет на параметры, от которых зависит функционирование этой системы. Другими словами, на вход системы подаётся сигнал, пропорциональный её выходному сигналу (или, в общем случае, являющийся функцией этого сигнала). Часто это делается преднамеренно, чтобы повлиять на динамику

Управление происходит эффективнее, если управляющий не только отдаёт команды, т.е. работает прямая связь, но и принимает информацию от объекта управления о его состоянии.

Обратная связь — это процесс передачи информации о состоянии объекта управления управляющему объекту.



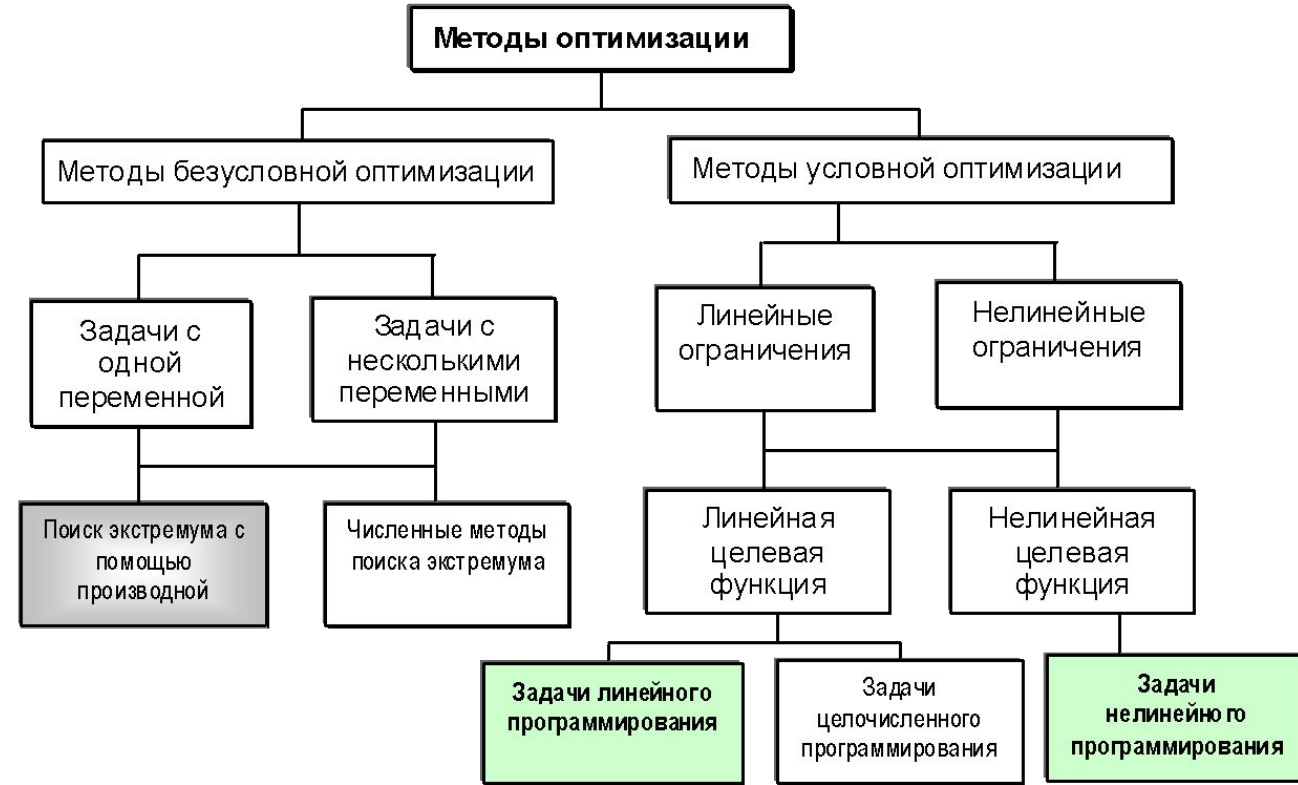
Различают положительную и отрицательную обратную связь. **Отрицательная обратная связь** изменяет входной сигнал таким образом, чтобы противодействовать изменению выходного сигнала. Это делает систему более устойчивой к случайному изменению параметров. **Положительная обратная связь**, наоборот, усиливает изменение выходного сигнала. Системы с сильной положительной обратной связью проявляют тенденцию к неустойчивости, в них могут возникать незатухающие колебания, то есть система становится генератором.

Понятие об оптимальном управлении

В соответствии с этим принципом управление должно быть наилучшим. Можно выделить два типа задач оптимального управления:

1. Оптимизация конечного состояния объекта управления. Исследуется и оптимизируется конечное состояние объекта, каким "путем" объект пришел в это состояние не учитывается. Задачи этого типа получили распространение в системах организационного и социально – экономического управления. Например, задача планирования выпуска продукции. Решаются такие задачи с использованием методов математического программирования (метода исследования операций). Другой пример – минимизация отклонения от заданного конечного состояния – терминальное управление.

2. Оптимизация динамики (переходного процесса) состояния объекта управления. Рассматривается траектория переходного процесса, а конечный результат не представляет интереса. Эти задачи наиболее применимы в технике и при управлении технологическими процессами. Решаются они на основе вариационного исчисления, таких методов, как принцип максимума Понтрягина, Беллмана и др.



Принципиальная возможность строгой постановки задачи оптимизации существует лишь в случае аналитического описания критерия оптимизации q и функций ограничений $A_i(x_j)$.

Ограничения в задачах оптимизации могут касаться:

- доступных ресурсов (средств, времени);
- природы рассматриваемых процессов и учитываемых переменных;
- особенностей принятия допущений и области значений переменных.

Классификация систем автоматического управления

Классификацию САУ можно производить по различным принципам и признакам, но наиболее общую классификацию можно представить в виде следующих схем:

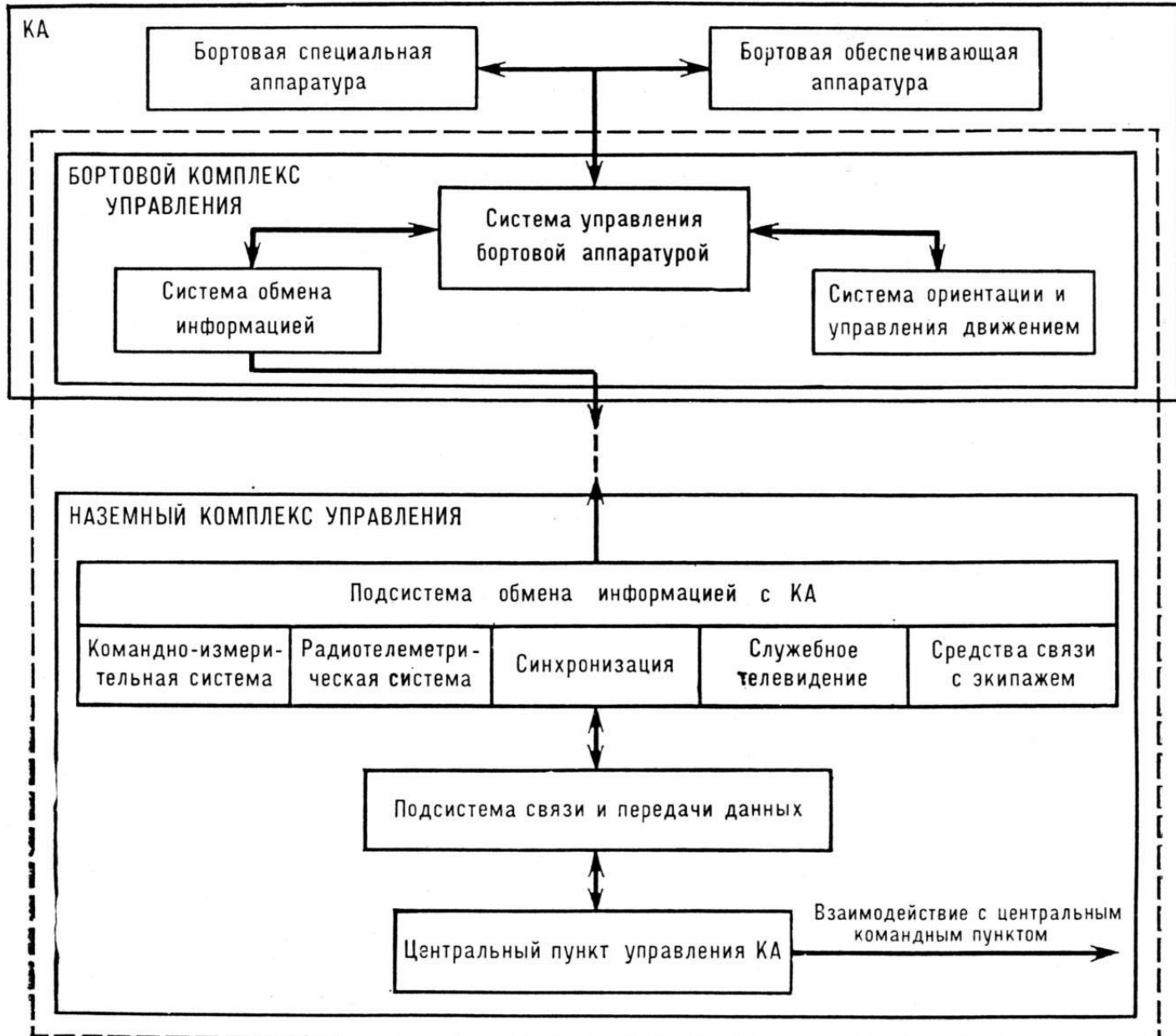


Понятие об автоматизированных системах управления

Автоматизированная система управления или АСУ — комплекс аппаратных и программных средств, предназначенный для управления различными процессами в рамках технологического процесса, производства, предприятия. АСУ применяются в различных отраслях промышленности, энергетике, транспорте и т. п. Термин "автоматизированная", в отличие от термина "автоматическая" подчёркивает сохранение за человеком-оператором некоторых функций, либо наиболее общего, целеполагающего характера, либо не поддающихся автоматизации. АСУ с системой поддержки принятия решений, являются основным инструментом повышения обоснованности управленческих решений.



Автоматизированная система управления космическим аппаратом



Автоматизированная система управления космическими аппаратами - совокупность наземных и бортовых средств для автоматизированного управления движением космических аппаратов (КА) и обеспечения нормального функционирования их бортового оборудования.

Состоит из наземного (НКУ) и бортового (БКУ) комплексов управления.

НКУ формирует программы управления и вводит их в БКУ, выдаёт команды управления на основе телеметрического контроля и оценки состояния КА, измеряет параметры его орбиты для прогнозирования его движения.

БКУ управляет бортовой аппаратурой КА в соответствии с введённой программой, обеспечивает автоматический контроль аппаратуры КА и управление ею в автономном режиме.

Наземный автоматизированный комплекс управления КА (НАКУ КА) представляет собой функциональное и техническое объединение средств и измерительных комплексов космодромов (ИКК), а также центров (пунктов) управления КА и предназначен для управления КА и информационного обеспечения пусков ракетно-космической техники.

Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 30.01.1956 г. предписывалось создание первого искусственного спутника Земли, что послужило основанием для начала работ по формированию в 1957 году специального комплекса средств наблюдения, измерения, контроля и управления первыми ИСЗ, впоследствии названного **«Командно-измерительным комплексом» (КИК)**.

Практические работы по созданию **КИК** начались с организации при 4-м ЦНИИ МО «Центра по руководству и координации работ комплекса измерительных средств, средств связи и службы единого времени». Всего, на территории СССР функционировали 7 наземных командно-измерительных пунктов **(КИП)**.

Автоматизированный наземный комплекс управления орбитальными средствами - совокупность технических средств и сооружений центров, пунктов управления и отдельных командно-измерительных комплексов с информационным и математическим обеспечением, предназначенная для формирования наземных комплексов управления орбитальными средствами, обеспечения автоматизации процессов управления их функционированием.

Наземный комплекс управления орбитальными средствами - совокупность технических средств и сооружений из состава НАКУ Оср объединенных в единый комплекс для решения задач управления орбитальными средствами с момента выведе-ния на орбиту в целях обеспечения их применения по целевому назначению

Примечание: В зависимости от объекта управления НКУ могут подразделяться на НКУ КА, НКУ РБ, НКУ МБ и др.

Измерительный пункт – совокупность сооружений и (или) подвижных средств с техническими средствами, предназначенными для измерения параметров траекторий ракет и орбитальных средств, приема и обработки телеметрической информации.

Командно-измерительный пункт - измерительный пункт совмещенный с техническими средствами, предназначенным для выдачи управляющей информации на орбитальные средства

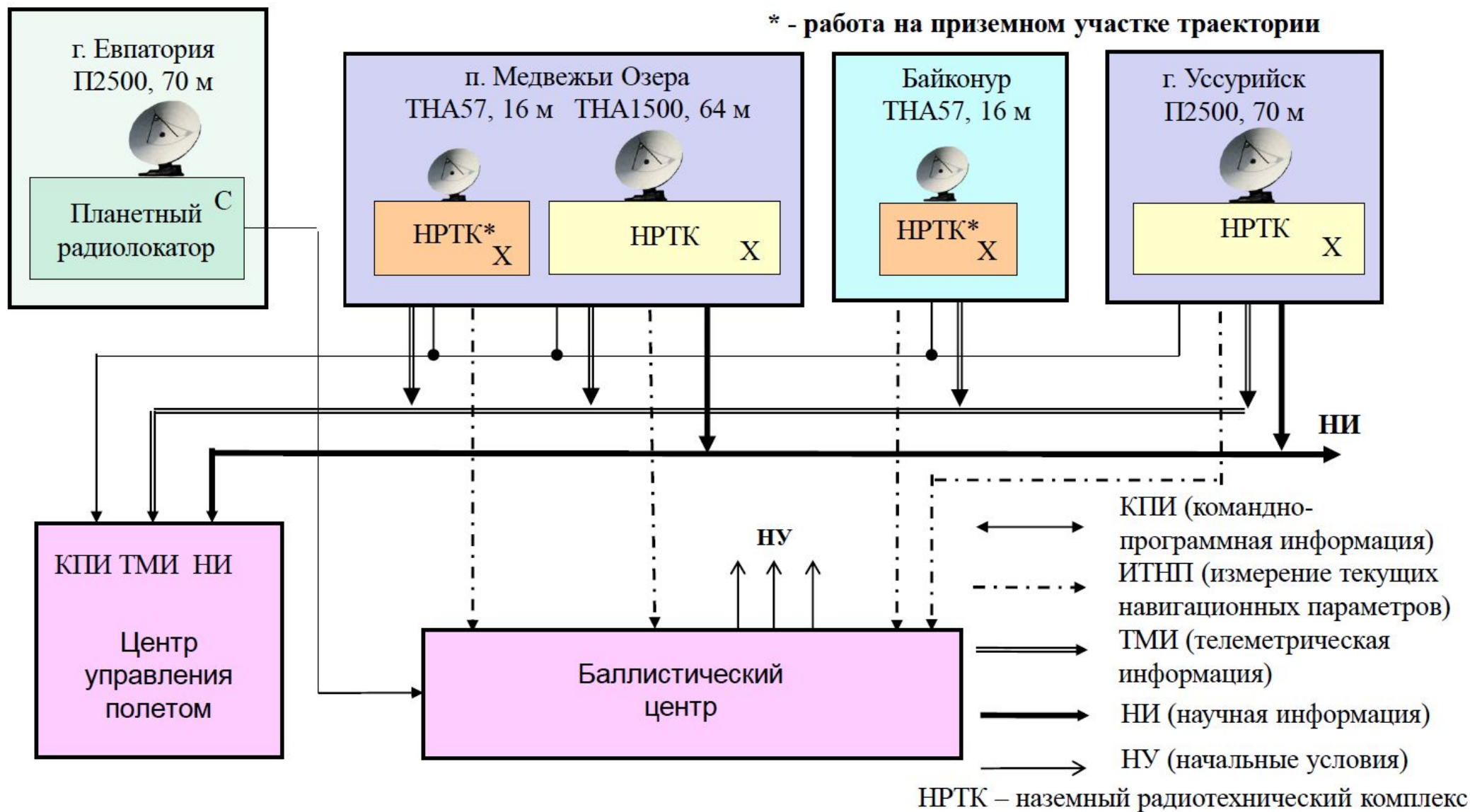
Центр управления полетом космических аппаратов - сооружения с техническими системами и технологическими средствами наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами, предназначенными для управления космическими аппаратами, деятельностью обслуживающего персонала пунктов управления, командно-измерительных пунктов, планирования и координации их работы при лётных испытаниях и эксплуатации космических систем, комплексов .

Пункт управления космическими аппаратами - совокупность сооружений и (или) подвижных средств с техническими системами и технологическими средствами наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами, предназначенными для управления космическими аппаратами при испытаниях и эксплуатации космических систем, комплексов.

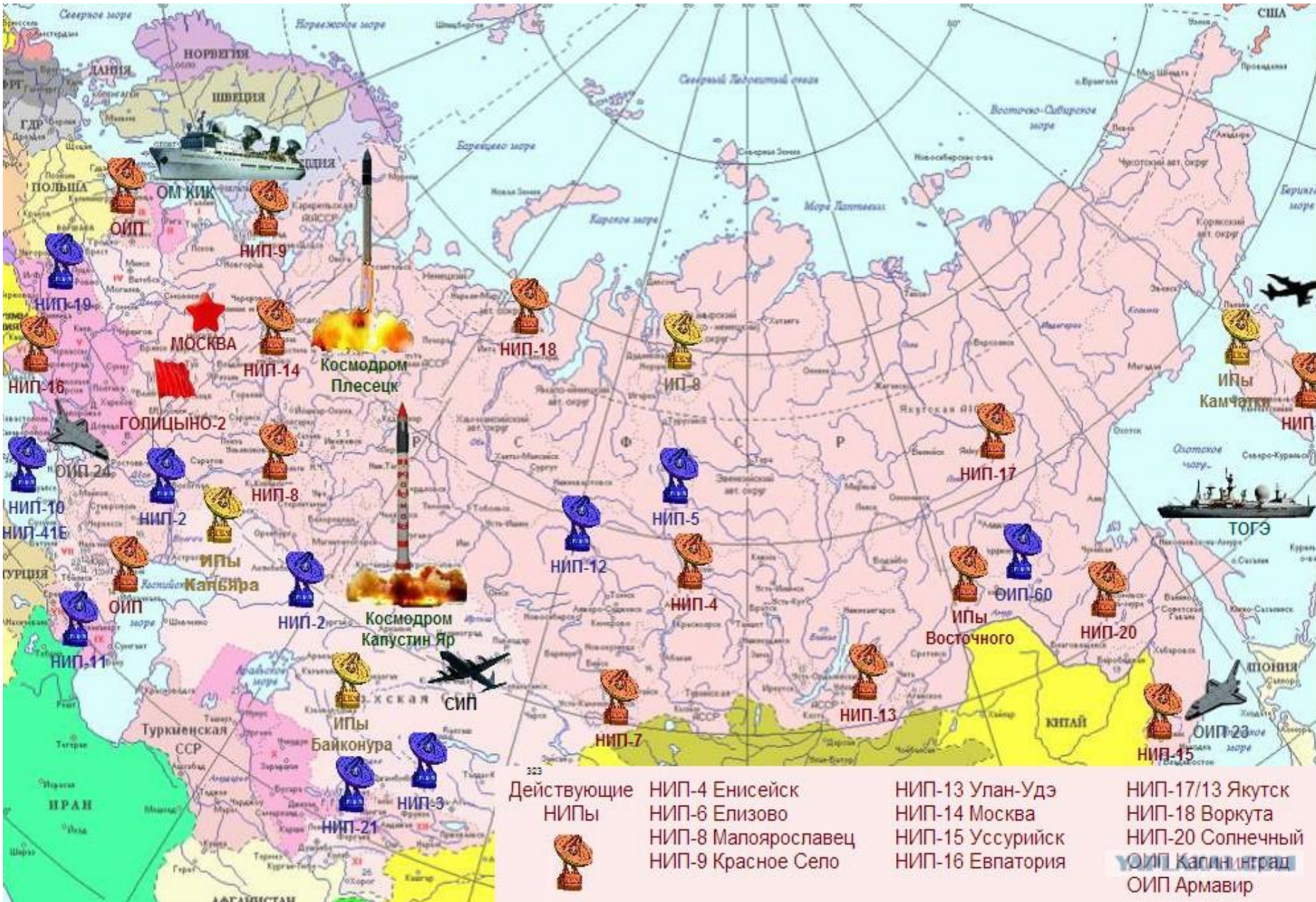
Баллистический центр – совокупность сооружений с техническими средствами, предназначенная для решения задач баллистического обеспечения функционирования элементов космических систем, комплексов.

Центр системы информационно-телеметрического обеспечения - сооружение с техническими системами и технологическими средствами наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами, предназначенными для сбора, обработки, хранения телеметрической информации и выдачи результатов обработки в центры и пункты управления, командные пункты

Структурная схема наземного комплекса управления межпланетными космическими аппаратами



Расположение научно-измерительных пунктов (НИПов)



Номер НИП	Альтернативное название	Ближайший город
Голицыно-2	НИП Центра космических полетов	Г. Краснознаменск
НИП-1	ИП-1Д	Пл.18, Байконур
НИП-2	-	Станция Макат, пл.42, Байконур
НИП-4	г. Енисейск-4	Г. Енисейск
НИП-6	-	Г. Вулканный (вблизи п. Елизово)
НИП-7	Кура	п. Ключи
НИП-8	-	П. Малоярославец (Переславский район Ярославской области)
НИП-9	-	П. Красное Село
НИП-13	-	С. Ниж. Тальцы (вблизи г. Улан-Удэ)
НИП-14	Щёлково-7	Г. Щёлково
НИП-15	Восточный Центр дальней космической связи	Г. Галёнки, Приморский край
НИП-17	-	Г. Якутск
НИП-18	-	г. Воркута
НИП-20	-	Г. Солнечный (административный)

Поляков К.Ю. Теория автоматического управления для «чайников». Санкт-Петербург, 2008 г

Малышев В.В., Боброников В.Т., Дарнопых В.В., Шидловский А.В. Планирование целевого функционирования космических аппаратов и систем: задачи, методы и алгоритмы их решения. Учебное пособие, М.: МАИ, 2002 г



Спасибо за внимание!



Обобщенная динамическая модель преобразования вещества и энергии в биологической системе

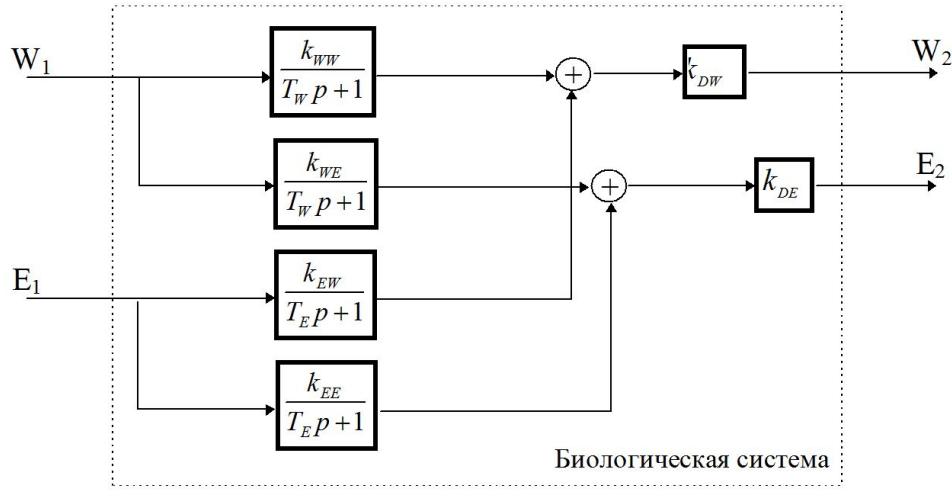


Рис. 2. Обобщенная модель преобразования вещества и энергии в биосистеме

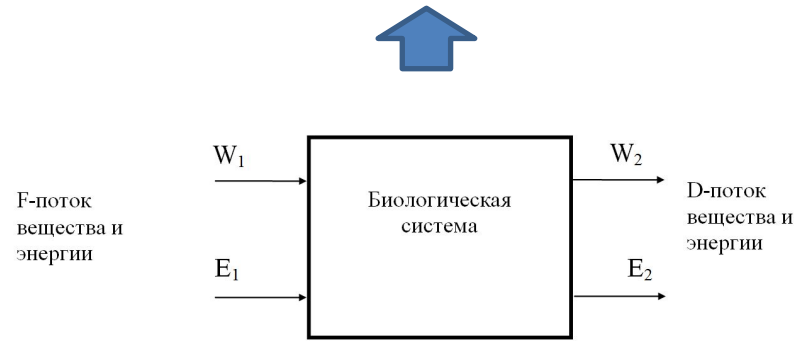


Рис. 1. Преобразование вещества и энергии в биосистеме

$$\frac{d^2 W_2}{dt^2} = \frac{k_{DW} k_{WW}}{T_W} \cdot \frac{dW_1}{dt} + \frac{k_{DW} k_{WW}}{T_E T_W} \cdot W_1 + \frac{k_{DW} k_{EW}}{T_E} \cdot \frac{dE_1}{dt} + \frac{k_{DW} k_{EE}}{T_E T_W} E_1 - \frac{T_W + T_E}{T_E T_W} \cdot \frac{dW_2}{dt} - \frac{1}{T_E T_W} \cdot W_2;$$

$$\frac{d^2 E_2}{dt^2} = \frac{k_{DE} k_{WE}}{T_E} \cdot \frac{dW_1}{dt} + \frac{k_{DE} k_{WE}}{T_E T_W} \cdot W_1 + \frac{k_{DE} k_{EE}}{T_W} \cdot \frac{dE_1}{dt} + \frac{k_{DE} k_{EE}}{T_E T_W} E_1 - \frac{T_W + T_E}{T_E T_W} \cdot \frac{dE_2}{dt} - \frac{1}{T_E T_W} \cdot E_2;$$

$$W_1 = W_2 + B;$$

$$E_1 = E_2 + Q.$$

$$\dot{W}_2 - A_1 W_2 = A_2 \dot{E}_2 + A_3 E_2 + A_4$$

$$E_2 - B_1 E_2 = B_2 \dot{W}_2 + B_3 W_2 + B_4.$$

где

$A_1 = \frac{k_{WW} k_{DW} - 1}{T_W + T_E (1 - k_{WW} k_{DW})};$	$B_1 = \frac{k_{EE} k_{DE} - 1}{T_E + T_W (1 - k_{EE} k_{DE})};$
$A_2 = \frac{T_W k_{EW} k_{DW}}{T_W + T_E (1 - k_{WW} k_{DW})};$	$B_2 = \frac{T_E k_{WE} k_{DE}}{T_E + T_W (1 - k_{EE} k_{DE})};$
$A_3 = \frac{T_E k_{EW} k_{DW}}{T_W + T_E (1 - k_{WW} k_{DW})};$	$B_3 = \frac{T_W k_{WE} k_{DE}}{T_E + T_W (1 - k_{EE} k_{DE})};$
$A_4 = \frac{k_{DW} (B k_{WW} + Q k_{EW})}{T_W + T_E (1 - k_{WW} k_{DW})};$	$B_4 = \frac{k_{DE} (B k_{WE} + Q k_{EE})}{T_E + T_W (1 - k_{EE} k_{DE})};$

- W_1 - аккумулирующий поток вещества (F-поток);
- E_1 - аккумулирующий поток энергии (F-поток);
- W_2 - диссипативный поток вещества (D-поток);
- E_2 - диссипативный поток энергии (D-поток);
- k_{WW} - коэффициент преобразования F-потока вещества в биомассу, характеризующий эффективность использования биосистемой веществ, поступающих из внешней среды или от другой биосистемы для собственного развития;
- k_{WE} - коэффициент использования F-потока вещества для накопления внутренней энергии, характеризующий долю аккумулирующего потока вещества, используемую для синтеза запасов высокоэнергетических веществ (например, затраты H_2 для синтеза АТФ из АДФ в клетке);
- k_{EW} - коэффициент использования F-потока энергии для образования биомассы, характеризующий долю энергии, непосредственно получаемой биосистемой из внешней среды или от других систем для накопления биомассы (например, - доля энергии солнечного света, используемой для фотосинтеза);
- k_{EE} - коэффициент преобразования F-потока энергии во внутреннюю энергию биологической системы, характеризующий эффективность непосредственного использования биосистемой энергии, поступающей из внешней среды или от другой биосистемы для собственного развития;
- k_{DW} - коэффициент диссипации биомассы;
- k_{DE} - коэффициент диссипации внутренней энергии;
- T_W - период цикла преобразования вещества;
- T_E - период цикла энергетического преобразования;
- B - биопродуктивность;
- Q - энергетическая мощность биосистемы, характеризующая запасы энергии химических связей в системе и тепловой энергии.

1. При $k_{WW} k_{DW} \rightarrow 1$ и $k_{WE} k_{DE} \rightarrow 1$ БС устойчива.
2. При $k_{WW} k_{DW} < 1$ и $k_{WE} k_{DE} < 1$ БС расходует энергии и вещества меньше, чем потребляет;
3. При $k_{WW} k_{DW} > 1$ и $k_{WE} k_{DE} > 1$ БС расходует энергии и вещества больше, чем потребляет. В этом случае B и Q будут уменьшаться (БС истощается). БС потеряет устойчивость.
4. При $k_{WW} k_{DW} \rightarrow 0$ и $k_{WE} k_{DE} \rightarrow 0$ БС неустойчива. Физиологически такое состояние можно квалифицировать как смерть БС.

Клюшников В.Ю. Обобщенная динамическая модель преобразования вещества и энергии в биологической системе // Двойные технологии. №3. 2001 г. С. 53-56.