

Лекция 4: “Функциональные компоненты СУ: первичные преобразователи (датчики) и исполнительные органы”

Гончаров Олег Игоревич

Факультет вычислительной математики и кибернетики,
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

2013

Датчик (чувствительный элемент, первичный преобразователь) — устройство, преобразующее контролируемую величину в удобную для дальнейшей обработки форму.

- Любой датчик — физический объект, поэтому ему присуща собственная динамика и неидеальности.
- Идеальный датчик — усилитель с коэффициентом 1, не влияющий на объект управления.
- Обычно преобразование осуществляется в электрические сигналы.
- Интерфейс подключения датчика может быть *аналоговым* или *цифровым*.

Цифровые датчики часто осуществляют дополнительную обработку сигнала: подавление шумов, коррекцию нелинейностей.

Ряд понятий из метрологии

- **Измерение** — совокупность операций по определению соответствия измеряемой величины с единицей измерения.
- **Погрешность** — величина отклонения результата измерений от истинного значения.
 - ▶ систематическая,
 - ▶ случайная,
 - ▶ динамическая,
 - ▶ основная и дополнительная.
- **Диапазон измерений** — границы изменения изм. величины.
- **Динамический диапазон** — ограничения скорости изменения изм. величины
- **Разрешающая способность/порог чувствительности** — способность различать два значения / определять малые значения.
- **Калибровка, поверка, контроль** и т.п.

Типичные неидеальности датчиков

Датчик формирует измеренное значение y_m по “истинному” значению измеряемой величины y .

$$y_m = \mathcal{K}y$$

- **Линейные неидеальности:**

- ▶ систематическая ошибка: $y_m = y + e_s$, $e_s = \text{const}$
- ▶ случайные шумы: $y_m = y + e$, $e(t)$ — случайный процесс,
- ▶ собственная динамика $W(s)$,
- ▶ дискретизация для цифровых систем $y_m[k] = y(kT)$,
- ▶ задержка $e^{-s\tau}$.

- **Нелинейные неидеальности:**

- ▶ ограничение диапазона измерения (насыщение),
- ▶ мертвая зона,
- ▶ квантование,
- ▶ нелинейности общего вида.

Стандартный подход: приблизить датчик подходящим набором звеньев, не вдаваясь в подробности физической модели.

По выходному сигналу:

- аналоговые,
- цифровые.

По физическому принципу:

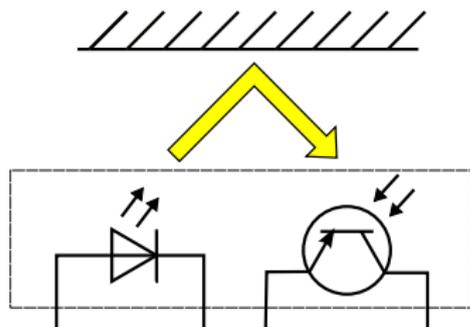
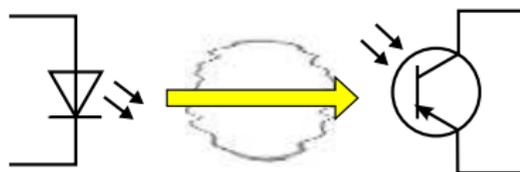
- потенциометрические,
- оптические,
- пьезоэлектрические,
- термоэлектрические,
- на эффекте Холла,
- индуктивные,
- емкостные и т.д.

По измеряемой величине.

Датчики положения

Классификация по измеряемой величине

- Концевые выключатели: контактные и бесконтактные.
- Оптические барьеры (пары).
- ИК датчики отраженного излучения.



Сигнал: напряжение, квантованный, с двумя уровнями.

Датчики перемещения

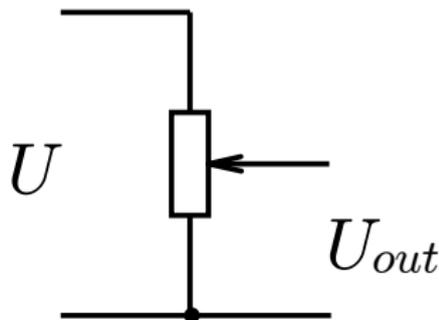
Классификация по измеряемой величине

- Потенциометрический датчик угла или линейного перемещения:

- ▶ конструктивно — переменный резистор;
- ▶ сигнал: напряжение, аналоговый;
- ▶ неидеальности: диапазон измерений ограничен, нелинейность;

- ▶
$$U_{out} = \frac{Ux}{x_M + Rx / R_{out} - Rx^2 / (R_{out}x_M)}$$
;

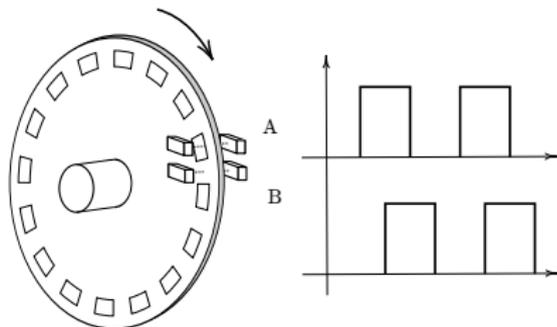
- ▶
$$U_{out} = k_M x$$
, где $k_M = \frac{U}{x_M}$.



Датчики перемещения

Классификация по измеряемой величине

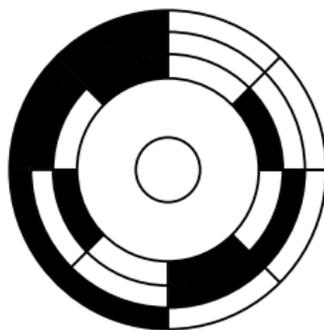
- Относительный датчик угла (оптический) или оптический энкодер:
 - ▶ конструктивно — диск с прорезями и двумя оптическими парами, смещенными на половину шага прорези;
 - ▶ сигнал: напряжение, 2 канала, квантованный;
 - ▶ угол поворота — число импульсов, направление вращения — смещения фаз сигналов.
 - ▶ неидеальности: квантование, дребезг.
- Относительный датчик угла магнитный (на эффекте Холла).
- Относительный датчик линейного перемещения.



Датчики перемещения

Классификация по измеряемой величине

- Абсолютный датчик угла (оптический) или абсолютный энкодер:
 - ▶ конструктивно — диск с двоичным кодом в каждом секторе, код считывается линейкой ИК сенсоров, что обеспечивает прямое преобразование угла в код;
 - ▶ сигнал: цифровой сигнал или квантованный по нескольким каналам;
 - ▶ неидеальности: квантование;



Датчики скорости

Классификация по измеряемой величине

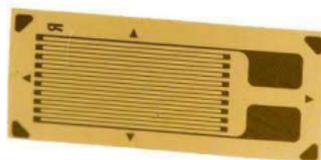
- В качестве датчика скорости может выступать энкодер.
- Тахометр:
 - ▶ конструктивно — диск с прорезями и оптическая пара;
 - ▶ на одно прохождение прорези — импульс, скорость пропорциональна частоте;
 - ▶ сигнал: квантованный;
 - ▶ неидеальности: связаны с квантованием.
- Тахогенератор:
 - ▶ конструктивно — машина постоянного тока (генератор);
 - ▶ выдаваемое напряжение пропорционально угловой скорости;
 - ▶ сигнал: аналоговый, напряжение;
 - ▶ неидеальности: шум, нелинейности.

Датчики деформации и силы

Классификация по измеряемой величине

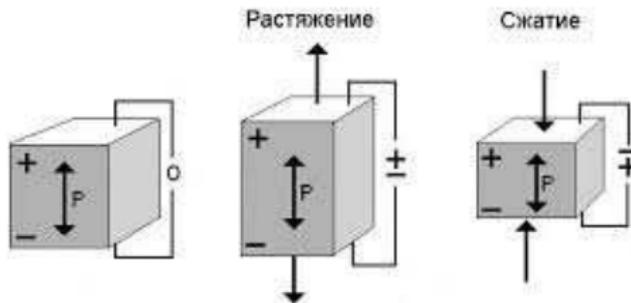
- Тензорезистивный:

- ▶ конструктивно — тензорезистор,
- ▶ преобразует смещение в изменение сопротивления.



- Пьезоэлектрические:

- ▶ преобразует смещение в изменение напряжения.

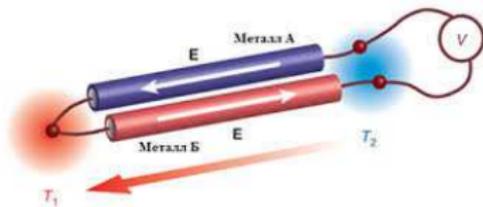


Датчики температуры

Классификация по измеряемой величине

● Термопара

- ▶ конструктивно: спай проволок из разных металлов,
- ▶ наиболее старые и распространенные датчики температуры,
- ▶ основаны на термоэфекте (эффекте Зеебека): если однородный материал со свободными электрическими зарядами имеет разные температуры на измерительных контактах, то между ними возникает потенциал,
- ▶ сила тока пропорциональна температуре,
- ▶ необходим контроль температуры холодного спая.



● Терморезистор.

● Бесконтактные датчики температуры.

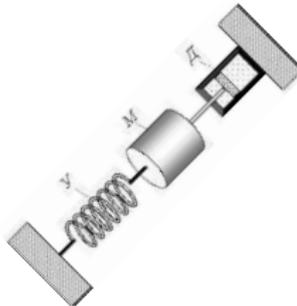
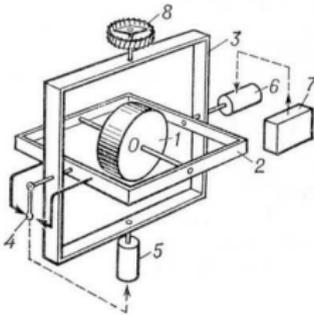
Классификация по измеряемой величине

- Давление (давление вызывает деформацию, которая измеряется разными методами).
- Расход (механический счетчик, датчики на эффекте Бернулли).
- Уровень (поплавковые, радарные и т.п.)
- Концентрация:
 - ▶ датчики концентрации кислорода (например, λ -зонд)
- Вибрации.
- Магнитного поля.

Акселерометры и гироскопы

Классификация по измеряемой величине

- Акселерометр измеряет ускорение
 - ▶ конструктивно — груз на упругом подвесе,
- Гироскопы измеряют угловые скорости.
 - ▶ механические,
 - ▶ оптические,
 - ▶ вибрационные
- На основе пары этих датчиков и системы обработки их сигналов (фильтра) строят инерциальные навигационные системы.



Исполнительные устройства осуществляют непосредственное воздействие на объект управления.

- ИУ — физический объект, ему присущи собственная динамика и неидеальности.
- В зависимости от ситуации звено системы управления может рассматриваться как ИУ или как часть ОУ. Конкретное решение зависит от влияния звена на динамику объекта. Это решение может быть принято, например, на основе анализа частотных характеристик звена, и требований к СУ.
- ИУ может включать в себя контур обратной связи и быть довольно сложным техническим объектом.
- Идеальное исполнительное устройство — усилитель с единичным коэффициентом усиления.

Определенное распространение имеют цифровые ИУ.

Неидеальности исполнительных устройств

По выходу v преобразующего устройства ИУ формирует воздействие на ОУ:

$$u = \mathcal{P}v.$$

- **Линейные неидеальности:**
 - ▶ собственная динамика $W(s)$,
 - ▶ дискретизация для цифровых систем $y_m[k] = y(kT)$,
 - ▶ задержка $e^{-s\tau}$.
- **Нелинейные неидеальности:**
 - ▶ насыщение,
 - ▶ ограничения на скорость роста,
 - ▶ мертвая зона,
 - ▶ квантование (релейные и цифровые системы),
 - ▶ люфт,
 - ▶ трение: сухое, вязкое.

Стандартный подход: приблизить ИУ подходящим набором звеньев, не вдаваясь в подробности физической модели.

Электрические приводы

Электрический привод включает:

- электрический преобразователь (формирует силовые электрический сигнал с заданной модуляцией),
- электрический двигатель (электрическая энергия → механическая),
- механический преобразователь (редуктор),
- исполнительный орган,
- датчики: позиция, скорость, усилие, сила тока, температура,
- управляющее устройство (управляет ЭП, сопряжение с задающим устройством).

Отдельные элементы могут отсутствовать.

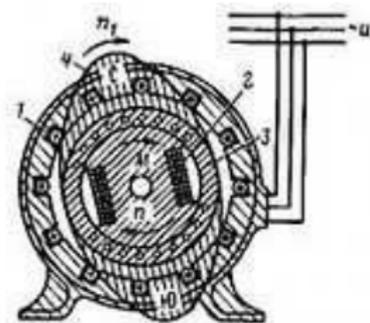
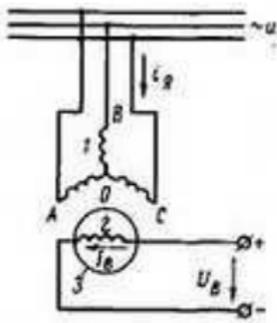
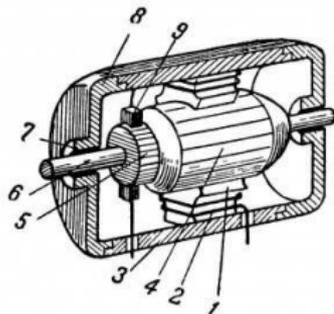
Сервопривод — привод с управление с обратной связью по параметрам движения:

- по позиции,
- по скорости,
- по усилию и т.п.

Электрические двигатели

Мы рассматриваем регулируемые двигатели.

- Двигатели постоянного тока (ДПТ):
 - ▶ коллекторные (механическая коммутация),
 - ▶ бесколлекторные (коммутация на транзисторных ключах).
- Синхронные двигатели:
 - ▶ синхронные двигатели,
 - ▶ шаговые двигатели (дискретные позиции, работает без ОС).
- Асинхронные машины.



Математическая модель ДПТ

Простая математическая модель включает 3 уравнения:

$$\begin{aligned}Li + Ri + \varepsilon &= U, & \varepsilon &= c_1 \omega \cdot f(\varphi) \\ J\dot{\omega} &= M + M_e, & M &= c_2 i \cdot f(\varphi), \\ \dot{\varphi} &= \omega,\end{aligned}$$

где I сила тока в обмотке якоря, ω — угловая скорость, ε — противо-ЭДС, вызванная изменением магнитного потока через обмотку якоря, M — момент электромагнитных сил, действующих на якорь, M_e — момент внешних сил, U — управляющее напряжение,

$$f(\varphi) = \max_{k=1, n} \left\{ \sin\left(\varphi + \frac{2\pi k}{n}\right) \right\} \approx \text{const},$$

n — число полюсов двигателя.

Математическая модель ДПТ

Линейная модель 2-ого порядка

$$\omega(s) = \frac{kU(s) + k_M(T_2s + 1)M_e(s)}{T_1T_2s^2 + T_1s + 1},$$

линейная модель 1-ого порядка

$$\omega(s) = \frac{kU(s) + k_M M_e(s)}{T_1s + 1},$$

где постоянные времени $T_1 = \frac{JR}{c_1c_2}$, $T_2 = L/R$ (обычно $T_1 \gg T_2$),
коэффициенты $k = c_1$, $k_M = \frac{R}{c_1c_2}$.

Статическая характеристика:

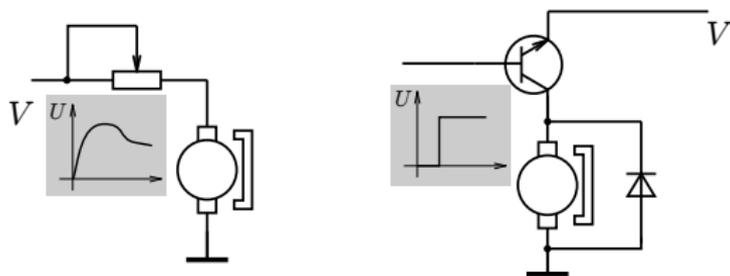
$$\omega = kU + k_M M_e$$

определяет установившийся режим объекта.

- Напряжение питания ограничено, дает насыщение по управлению.
- Сила трения покоя, дает мертвую зону.
- Люфт редуктора.
- Нелинейность реальных статических характеристик двигателя.

Электрические преобразователи для ДПТ

В реальных системах непрерывное регулирование может быть недопустимо из-за потерь энергии на регулирующем элементе:



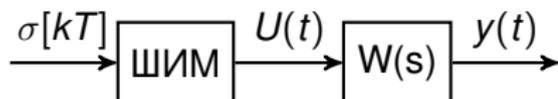
Широтно-импульсная модуляция:



$$U(t) = \begin{cases} \operatorname{sgn} \sigma(nT) V & \text{при } nT \leq t < (n + \gamma_n)T, \\ 0 & \text{при } (n + \gamma_n)T \leq t < (n + 1)T, \end{cases}$$

где $\gamma_n = \chi |\sigma(nT)|$ — коэффициент заполнения, $0 \leq \gamma_n \leq 1$.

Широтно-импульсная модуляция



ШИМ-элемент выдает импульсы амплитудой V с периодом T , длительность импульса пропорциональна $|\sigma[nT]|$.

$$U(t) = \sum_{i=0}^{\infty} A \operatorname{sgn} \sigma[iT] [1(t - iT) - 1(t - (i + \gamma_i)T)],$$

$$\gamma_i = \chi |\sigma[iT]|,$$

χ – коэффициент модуляции, удовлетворяет $0 < \chi < \inf \frac{1}{\sigma(t)}$.

Широтно-импульсная модуляция

Свойства

- 1 Нелинейна,
- 2 Линеаризация: разложим переходную характеристику $W(s)$ в ряд Тейлора в т. $(t - iT)$:

$$h(t - (i + \gamma_i)T) = h(t - iT) + \gamma_i T k(t - iT) + \underline{O}(\dot{w}T^2).$$

Получаем при малых γ_i (или в случае, если $h(t)$ хорошо приближается линейной функцией)

$$y[nT] = \chi VT \sum_{i=0}^{\infty} k[(n - i)T] \sigma[iT].$$

Таким образом при $T\omega_{1/2} \ll 1$ ШИМ эквивалентна домножению на коэффициент σAT , где $\omega_{1/2}$ — частота полосы пропускания.

Широтно-импульсная модуляция

В реальных установках модуляция не всегда может быть сведена простой модели:

- Объект управления достаточно быстродействующий, что “отрабатывает” импульсы ШИМ.
- Необходимость учета внутренней динамики переключателей.
- Задержка в контуре управления на T , измерение величин сигналов внутри периода.
- Более чем два уровня импульсов, непрямоугольная форма импульса.

Это может привести к эффектам типа:

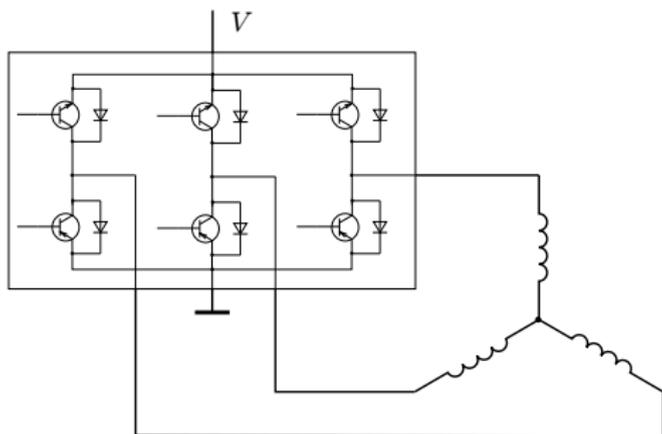
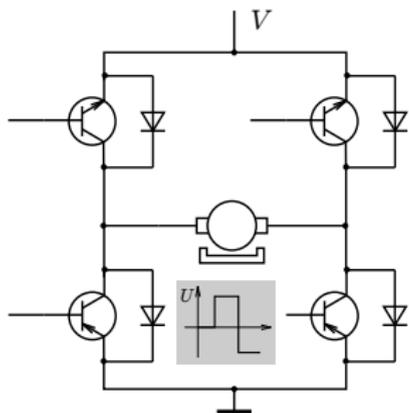
- Смещение среднего значения сигнала на некоторую величину.
- Устойчивый периодический режим.
- Необходимости проводить оптимизацию на уровне времен переключений.

Широтно-импульсная модуляция

Примеры систем с ШИМ с числом состояний большим, чем два

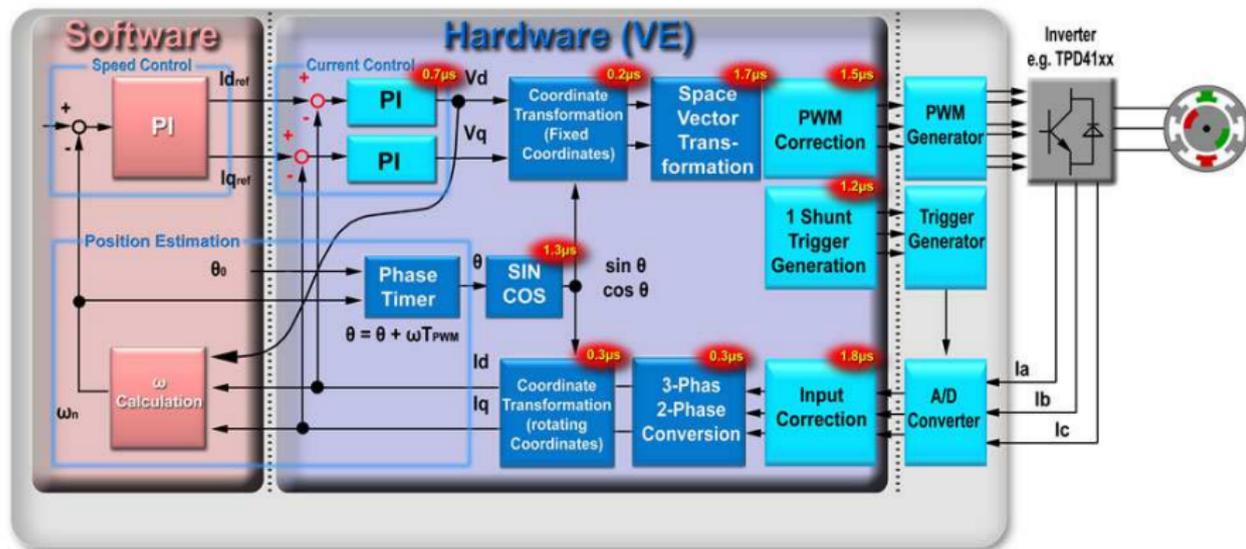
Слева — типовая схема включения ДПТ, электрический преобразователь может находится в 4-х состояниях, его выходной сигнал — в 3-х.

Справа — схема включения синхронного двигателя, всего 8 состояний преобразователя, используется т.н. векторная модуляция.



Структура вентиляного привода

Приведена, чтобы напугать

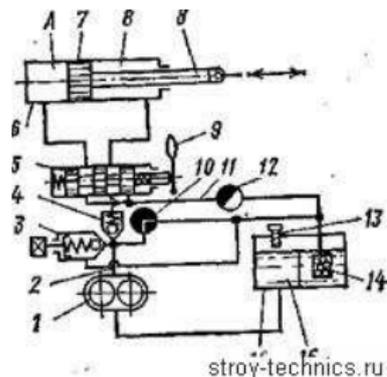


M370 Vector Engine Concept

- Depending on Control Algorithm
- Fixed Processing
- Selectable Processing/Settings

Гидравлический привод

Приведен, чтобы напугать



Гидравлические приводы отличаются “простотой управления и автоматизации”...

$$\dot{x} = v,$$

$$M\dot{v} = p_1 S_1 - p_2 S_2,$$

$$\dot{p}_1(t) = \frac{E}{V_1 + S_1 x(t)} \left[\mu u(t) \sqrt{2 \frac{|p_1 - p_-|}{\rho}} \operatorname{sgn}(p_1 - p_-) - S_1 \dot{x} \right],$$

$$\dot{p}_2(t) = \frac{E}{V_2 - S_2 x(t)} \left[\mu u(t) \sqrt{2 \frac{|p_+ - p_2|}{\rho}} \operatorname{sgn}(p_+ - p_2) - S_2 \dot{x} \right].$$

