

Специальности:	<ul style="list-style-type: none">• Авионика• Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии• Авиационный транспорт
Дисциплина:	Теория автоматического управления
Курс, семестр, уч. год:	3, осенний, 2019/2020
Кафедра:	301 – СУЛА
Руководитель обучения:	Профессор, д.т.н. Кулик Анатолий Степанович

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЛЕКЦИИ № 5

ТЕМА №1: ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИНЦИПА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПО ОТКЛОНЕНИЮ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СТАБИЛИЗАЦИИ

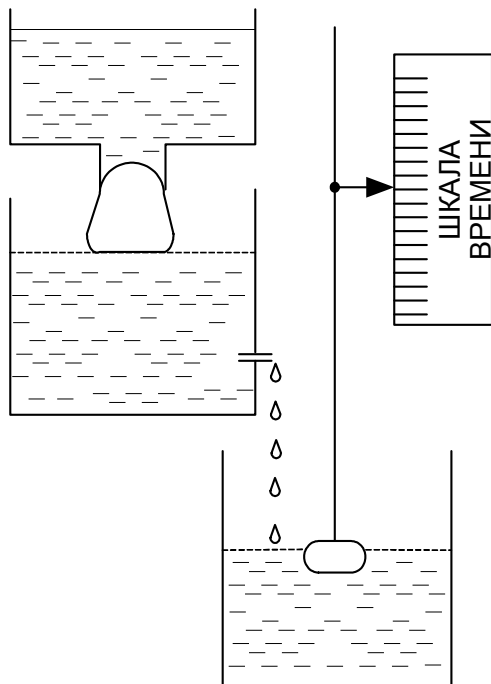


«Знающий меру доволен своим положением»

Лао-цзы (IV-III до н. э.) – китайский философ, автор трактата «Лао-цзы»

1. ПРИНЦИП АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПО ОТКЛОНЕНИЮ

История освоения и использования в практических целях принципа автоматического управления по отклонению имеет глубокие корни. На сегодня установлены такие факты. Впервые осознанно этот принцип был применен в Греции за 300 лет до н.э. при создании поплавковых регуляторов в устройстве водяных часов.



Например, из резервуара с определенным объемом вода по капле поступала в сосуд со шкалой, проградуированной в единицах времени. Часы назывались КЛЕПСИДРА (в переводе с греческого «воронка воды»). На Ближнем Востоке при построении водяных часов с начала новой эры и до XVII века использовался этот принцип (рис. 1).

Герон Александрийский, живший примерно за 120 лет до н.э., в своей книге «Пневматика» приводит несколько чертежей поплавковых регуляторов. В масляном фонаре, который изобрел Филон приблизительно в 250 году н.э., поплавковый регулятор позволял поддерживать требуемый уровень масла.

Рис. 1 – Водяные часы

Первой системой, использующей этот принцип и изобретенной в современной Европе, был регулятор температуры голландца Корнелиуса Дреббеля (1572 - 1633). В 1681 г. англичанин Дени Папен изобрел первый регулятор давления паровых котлов, работавший по принципу предохранительного клапана.

В России первым изделием с принципом автоматического управления по отклонению был поплавковый регулятор уровня воды в паровом котле, изобретенный И. Ползуновым в 1765 г. (рис. 2).

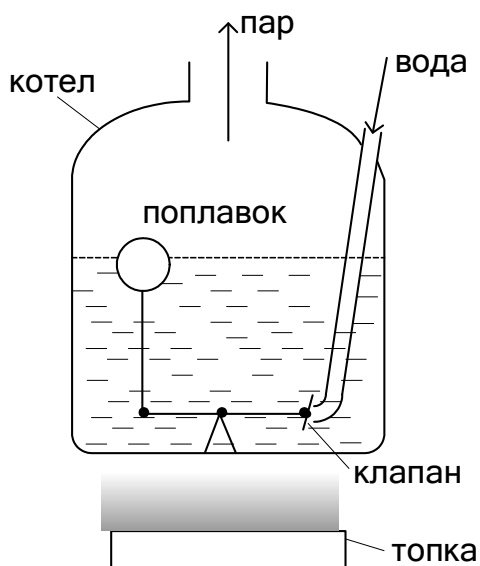


Рис. 2 – Схема поплавкового регулятора уровня воды

металлические шары за счет центробежной силы расходятся, что приводило к перемещению втулки вверх. Через рычажный механизм перемещение втулки передавалось на заслонку, которая уменьшала подачу пара в машину, что приводило к падению угловой скорости выходного вала.

Первым автоматическим регулятором промышленного назначения считается центробежный регулятор Джеймса Уатта, появившийся в 1769 г. для управления угловой скоростью вращения вала паровой машины (рис. 3).

С помощью этого механического устройства производилось измерение угловой скорости вращения ω . При увеличении ω

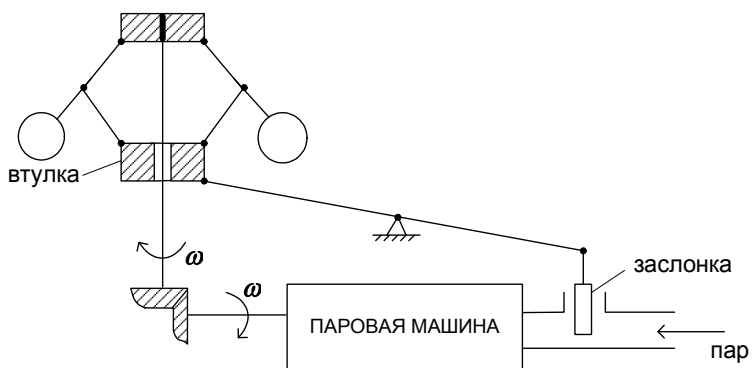
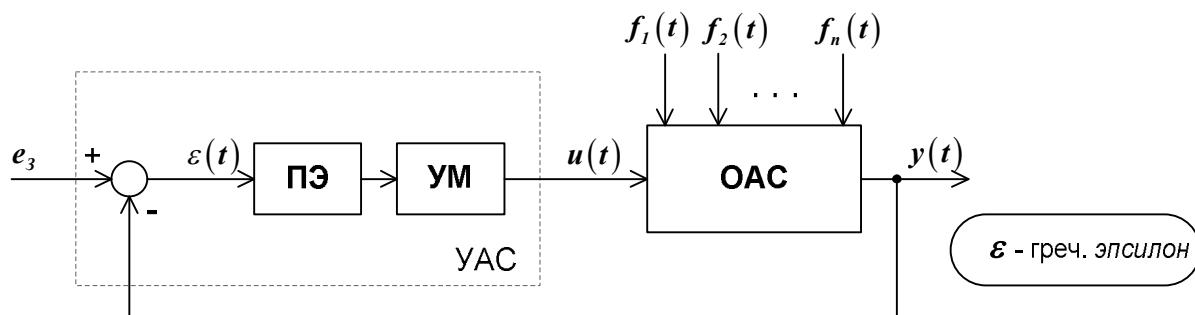


Рис. 3 – Схема центробежного регулятора Уатта

Представим информационные особенности САС, построенной с использованием принципа автоматического управления по отклонению с помощью функциональной схемы:



Здесь: ОАС – объект автоматической стабилизации; УАС – устройство автоматической стабилизации; ПЭ – преобразовательный элемент; УМ – усилитель мощности; e_3 – задающее воздействие, $e_3 = const$; $y(t)$ – стабилизируемая величина; $\varepsilon(t) = e_3 - y(t)$ – отклонение; $f_1(t), f_2(t), \dots, f_n(t)$ – возмущающие воздействия.

Итак, для реализации этого принципа необходимо осуществлять сравнение действительного значения стабилизируемой величины $y(t)$ с задающим значением – e_3 и стабилизировать в зависимости от результатов этого сравнения функцию $y(t)$. Таким образом, для реализации принципа управления по отклонению используется обратная связь.



Обратная связь – линия связи, передающая информацию и энергию с выхода функционального элемента или системы на вход функционального элемента или системы.

Различают положительные обратные связи и отрицательные. В рассматриваемой схеме связь отрицательная, так как

$$\varepsilon(t) = e_3 - y(t).$$

В рассмотренной схеме управляющее воздействие $u(t)$ формируется в зависимости от величины и знака отклонения стабилизируемой переменной от задающего воздействия. Эту зависимость в общем виде можно представить таким образом

$$u(t) = \eta[e_3, y(t)] = \eta[\varepsilon(t)].$$

2. ЗАДАЧА СТАБИЛИЗАЦИИ

Задача стабилизации заключается в парировании (компенсации) влияния возмущающих воздействий $f_1(t), f_2(t), \dots, f_n(t)$ с целью обеспечения практического постоянства стабилизируемой величины $y(t)$.



Физические величины, оказывающие дестабилизирующее, мешающее воздействие, называются **возмущающими воздействиями** или **возмущениями**.



1. Сколько возмущений действует на ОС – электрогенератор СЛ – 267?
2. Перечислите наиболее характерные?
3. Причины появления и существования возмущений?
4. Как оценить энергетические свойства возмущений?
5. Зачем оценивать энергетические свойства возмущений?

Стабилизация с использованием принципа автоматического управления по отклонению заключается в формировании отклонения стабилизируемой величины с последующей его компенсацией.

Для решения задачи стабилизации физической величины с использованием принципа автоматического управления по отклонению необходимо согласно этапу 2 блок-схемы процесса синтеза САУ (лекция №1) сформировать ОАС. Сформируем функциональную схему ОАС, исходя из возможностей универсального стенда кафедральной лаборатории «Автоматического управления».

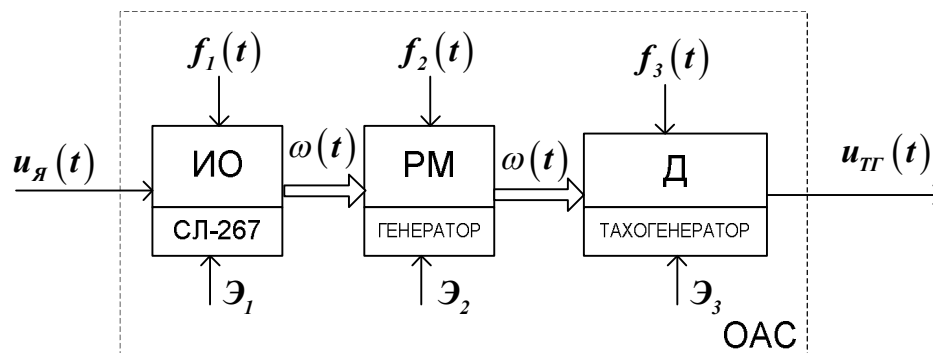
В качестве рабочего механизма (объекта стабилизации), как ранее, выбираем электрогенератор в электромеханическом блоке.

Подключение к электрогенератору активной нагрузки в различные моменты времени и различной величины представляет собой по сути дестабилизирующий фактор, т. е. возмущение для функционирования электрогенератора. Почему? Итак, электрогенератор с изменяющейся активной нагрузкой будем использовать как имитатор объекта стабилизации, на который действует я_в_н_о_е возмущение – изменяемая активная нагрузка $R_H(t)$. Все остальные возмущения (Какие?) действуют на объект стабилизации не явно.

Для обеспечения функционирования объекта стабилизации – электрогенератора необходим исполнительный орган (ИО), обеспечивающий вращение рабочего механизма (РМ) с заданной угловой скоростью. В качестве исполнительного органа используем электродвигатель постоянного тока СЛ – 267, входящий в состав электромеханического блока и соединенный с РМ (электрогенератором) муфтой.

Для измерения стабилизируемой величины рабочего механизма (электродвигателя) – угловой скорости вращения $\omega(t)$ будем использовать в качестве датчика (Д) тахогенератор, преобразующий угловую скорость в соответствующее изменение напряжения постоянного тока – $u_{ТГ}(t)$.

Функциональную схему объекта автоматической стабилизации можно представить в таком виде:



Здесь $u_{я}(t)$ – напряжение на якорную обмотку электродвигателя, В; $\omega(t)$ – угловая скорость рабочего механизма, $\frac{1}{с}$; $u_{ТГ}(t)$ – напряжение с тахогенератора, В; $f_i(t)$, $i = \overline{1, 3}$ – не измеряемые возмущения; \mathcal{E}_i , $i = \overline{1, 3}$ – электрическая энергия.

Итак, в соответствии со вторым этапом блок-схемы сформировали физический стендовый объект автоматической стабилизации угловой скорости РМ.

Третий этап процесса синтеза связан с изучением устройства, принципа действия и построения различных моделей ОАС. Устройство ОАС представляет собой по сути устройство электромеханического блока лабораторного стенда. В электромеханическом блоке использованы электродвигатели СЛ – 267. Устройство электродвигателя серии СЛ представлено в лекции №2 и там же описан принцип действия, который мы уже изучали. На практических и лабораторных занятиях были изучены устройство, принцип действия, а также получены статические, временные и частотные характеристики электромеханического блока, отражающие его функциональные и преобразовательные особенности относительно управляющего воздействия $u_{я}(t)$ и возмущающего воздействия $R_H(t)$. На основании этих знаний можно перейти к построению самых удобных и совершенных для последующего исследования моделей – математических.

**СОВЕТЫ
ЛАО - ЦЗЫ**

*Будьте внимательны к своим мыслям –
– они начало поступков.*

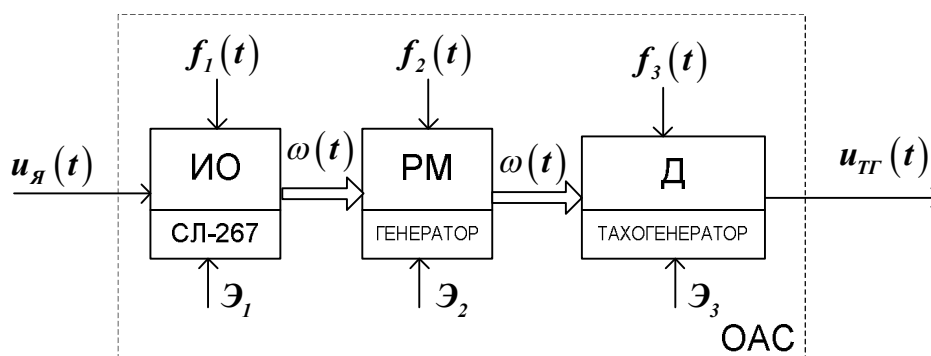
ТЕМА №2: ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ЗАМКНУТОЙ САС



«Недостаточно только получить знания: надо найти им приложение. Недостаточно только желать: надо делать.»

Иоганн Вольфганг ГЕТТЕ (1749 – 1832) – немецкий философ и естествоиспытатель, писатель

Функциональная схема ОАС, исследуемого на лабораторном стенде, может быть представлена так:



Здесь $u_{я}(t)$ – напряжение на якорную обмотку электродвигателя, В; $\omega(t)$ – угловая скорость рабочего механизма, $1/c$; $u_{тг}(t)$ – напряжение с тахогенератора, В; $f_i(t)$, $i = \overline{1, 3}$ – неизмеряемые возмущения; \mathcal{E}_i , $i = \overline{1, 3}$ – электрическая энергия.

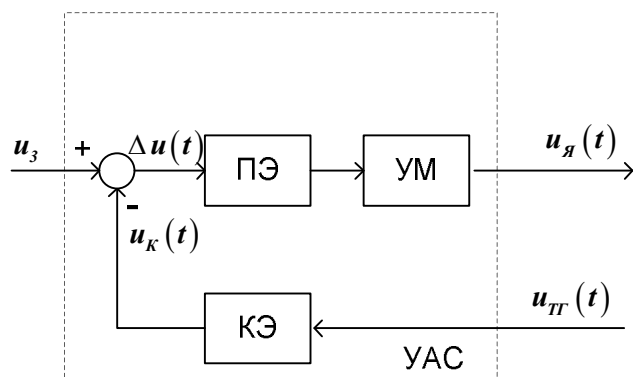
Согласно блок-схеме процесса синтеза САУ (лекция № 1) после исследования и анализа функциональных свойств ОАС следует перейти к формированию структуры и параметров УАС. Сделаем это с помощью функциональной и структурной схем.

Вспомним:



Функциональная схема системы – это такое графическое представление системы, на котором изображены функциональные элементы и связи между ними с разъяснением физических процессов, протекающих в функциональных элементах и системе в целом.

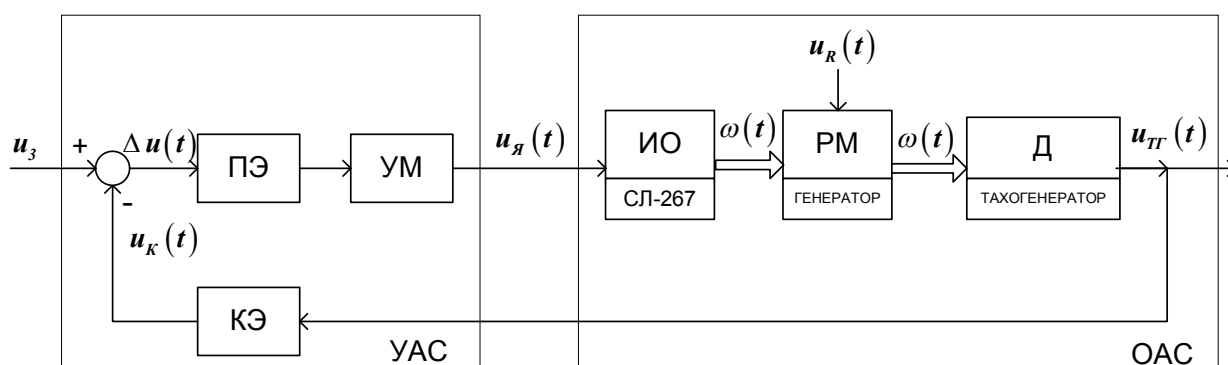
Исходя из сути принципа автоматического управления по отклонению функциональную схему УАС, применительно к лабораторному стенду можно представить таким образом:



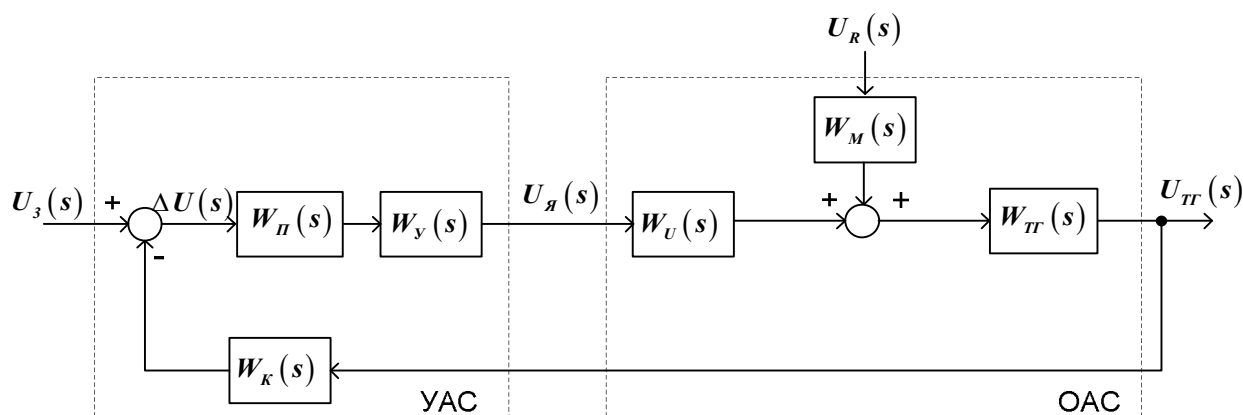
Здесь ПЭ – преобразовательный элемент; УМ – усилитель мощности; КЭ – корректирующий элемент; УАС – устройство автоматической стабилизации; u_3 – задающее воздействие, B , $u_3 = const$; $\varepsilon(t)$ – отклонение; $u_{я}(t)$ – напряжение на

якорную обмотку электродвигателя, B ; $u_{ТГ}(t)$ – напряжение с тахогенератора, B .

Тогда функциональная схема замкнутой САС может быть представлена в таком виде:



В линейном приближении процессы, происходящие в замкнутом контуре представленной САС, можно изобразить с помощью структурной схемы такого вида:



Где $W_{П}(s)$ – передаточная функция ПЭ; $W_{У}(s)$ – передаточная функция УМ; $W_{К}(s)$ – передаточная функция КЭ; $U_3(s)$ – изображение задающего воздействия; $\Delta U(s)$ –

изображение отклонения; $U_{\text{Я}}(s)$ – изображение управляющего воздействия $u_{\text{Я}}(t)$; $U_{\text{R}}(s)$ – изображение возмущающего воздействия $u_{\text{R}}(t)$; $U_{\text{ТГ}}(s)$ – изображение напряжения тахогенератора.

Рассмотрим основные передаточные функции замкнутой САС, исходя из её структурной схемы. При этом будем пользоваться известными правилами (лекции №3) преобразования структурных схем.

1. Передаточная функция разомкнутой системы. Различают: по управляющему и возмущающему воздействиям. Передаточная функция разомкнутой системы по управляющему воздействию представляет собой отношение изображения стабилизируемой величины – $U_{\text{ТГ}}(s)$ (Почему?) к изображению задающего воздействия при нулевых начальных условиях

$$W(s) = \frac{U_{\text{ТГ}}(s)}{U_3(s)}.$$

При вычислении этой передаточной функции размыкается обратная связь и принимается в силу принципа суперпозиции $U_{\text{R}}(s) \equiv 0$, тогда

$$W(s) = \frac{U_{\text{ТГ}}(s)}{U_3(s)} = W_{\text{П}}(s) \cdot W_{\text{У}}(s) \cdot W_{\text{У}}(s) \cdot W_{\text{ТГ}}(s).$$

Передаточная функция разомкнутой системы равна произведению (почему?) передаточных функций функциональных элементов, расположенных на линии управления, связывающей задающее воздействие со стабилизируемой величиной. Размерность передаточной функции определяется отношением размерностей $\frac{[u_{\text{ТГ}}(t)]}{[u_3]}$.

Передаточная функция разомкнутой системы по возмущающему воздействию это:

$$W_f(s) = \frac{U_{\text{ТГ}}(s)}{U_{\text{R}}(s)} = W_{\text{М}}(s) W_{\text{ТГ}}(s).$$

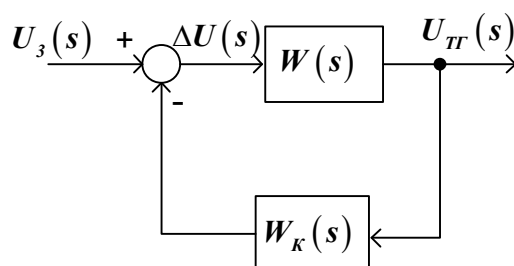
Целесообразно проверять правильность выполненных преобразований при получении передаточной функции по ее размерности.

2. Основная передаточная функция замкнутой системы

определяется отношением изображения стабилизируемой величины $U_{TR}(s)$ к задающему воздействию $U_3(s)$ при нулевых начальных условиях

$$\Phi(s) = \frac{U_{TR}(s)}{U_3(s)}.$$

При этом считаем, что $U_R(s) \equiv 0$. Поэтому функциональную схему можно представить в следующем виде:



$$U_{TR}(s) = W(s) \cdot [U_3(s) - W_K(s) \cdot U_{TR}(s)] = W(s) \cdot U_3(s) - W(s) \cdot W_K(s) \cdot U_{TR}(s);$$

$$U_{TR}(s) + W(s) \cdot W_K(s) \cdot U_{TR}(s) = W(s) \cdot U_3(s) \rightarrow$$

$$[1 + W(s) \cdot W_K(s)] \cdot U_{TR}(s) = W(s) \cdot U_3(s) \rightarrow$$

$$\Phi(s) = \frac{U_{TR}(s)}{U_3(s)} = \frac{W(s)}{1 + W_K(s) \cdot W(s)}.$$

3. Передаточная функция замкнутой системы по возмущающему воздействию. Это

$$\Phi_f(s) = \frac{U_{TR}(s)}{U_R(s)} = ?$$

Пожалуйста, получите её выражение!

ТЕМА №3: ЛИНЕАРИЗОВАННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОАС



«Пот кто учится, не размышляя, впадает в заблуждение. Пот кто размышляет, не желая учиться, окажется в затруднении.»

Конфуций (Кун - цзы) (ок. 551 – 479 гг. до н. э.) – мыслитель древнего Китая

Линеаризованные математические модели ОАС можно получить двумя способами:

Первый – исходя из законов сохранения, используя аналитическую линеаризацию нелинейных функциональных зависимостей, получают структуры моделей и, производя соответствующие расчёты по паспортным данным функциональных элементов, определяют параметры моделей.

Второй – исходя из экспериментальных характеристик (статических, временных и частотных), используя графическую линеаризацию, устанавливают структуру и вычисляют параметры моделей.

Математическая линеаризованная модель ИО+РМ была получена в лекции № 2. В форме линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами модель имеет такой вид:

$$T_{эм}T_{э} \frac{d^2\omega(t)}{dt^2} + T_{эм} \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = k_1 u_{я}(t) - k_2 T_{э} \frac{dM_c(t)}{dt} - k_2 M_c(t), \quad (1)$$

здесь $\omega(t) = \Delta\omega(t)$; $u_{я}(t) = \Delta u_{я}(t)$; $M_c(t) = \Delta M_c(t)$; $T_{эм}$ – электромеханическая постоянная времени, с; $T_{э}$ – электромагнитная постоянная времени, с; k_1 – коэффициент передачи по управляющему – $u_{я}(t)$ воздействию, $\frac{1}{B \cdot c}$; k_2 – коэффициент передачи по возмущающему – $M_c(t)$ воздействию, $\frac{1}{H \cdot m \cdot c}$; $\omega(t)$ – угловая скорость рабочего механизма, $\frac{1}{c}$; $u_{я}(t)$ – напряжение управления, подаваемое на якорную обмотку электродвигателя, В; $M_c(t)$ – момент сопротивления рабочего механизма, Н·м.

Если в качестве характеристики момента сопротивления рабочего механизма использовать $u_R(t)$, то уравнение (1) можно представить в таком виде

$$T_{\text{ЭМ}}T_{\text{Э}}\frac{d^2\omega(t)}{dt^2}+T_{\text{ЭМ}}\frac{d\omega(t)}{dt}+\omega(t)=ku_{\text{Я}}(t)-k_B T_{\text{Э}}\frac{du_R(t)}{dt}-k_B u_R(t), \quad (2)$$

здесь $k=k_I$, а k_B – коэффициент передачи по возмущающему – $u_R(t)$ воздействию, $1/B \cdot c$.

Применив к обеим частям уравнения (2) преобразование Лапласа с использованием основных теорем операционного исчисления, получим

$$\underbrace{(T_{\text{ЭМ}}T_{\text{Э}}s^2+T_{\text{ЭМ}}s+I)}_{A(s)}\Omega(s)=\underbrace{k}_{B(s)}U_{\text{Я}}(s)-\underbrace{k_B T_{\text{Э}}s+k_B}_{R(s)}U_R(s), \quad (3)$$

здесь $\Omega(s)$ – изображение выходного сигнала $\omega(t)$; $U_{\text{Я}}(s)$ – изображение управляющего воздействия $u_{\text{Я}}(t)$; $U_R(s)$ – изображение возмущающего воздействия $u_R(t)$; $A(s)$, $B(s)$ и $R(s)$ – соответствующие полиномы комплексной переменной преобразований Лапласа s .

Используя принцип суперпозиции (в чём его суть?) можем представить операторное уравнение (3) в форме следующих двух передаточных функций

$$\begin{aligned} U_R(s) \equiv 0 &\longrightarrow W_U(s) = \frac{\Omega(s)}{U_{\text{Я}}(s)} = \frac{k}{T_{\text{ЭМ}}T_{\text{Э}}s^2 + T_{\text{ЭМ}}s + I}; \\ U_{\text{Я}}(s) \equiv 0 &\longrightarrow W_M(s) = \frac{\Omega(s)}{U_R(s)} = \frac{-k_B(T_{\text{ЭМ}}s + I)}{T_{\text{ЭМ}}T_{\text{Э}}s^2 + T_{\text{ЭМ}}s + I}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $W_U(s)$ – передаточная функция соединения ИО+РМ по управляющему воздействию; $W_M(s)$ – передаточная функция соединения ИО+РМ по возмущающему воздействию.

Изображение выходного сигнала $\Omega(s)$ с помощью передаточных функций можно представить так:

$$\Omega(s) = W_U(s)U_{\text{Я}}(s) + W_M(s)U_R(s) = \frac{k}{T_{\text{ЭМ}}T_{\text{Э}}s^2 + T_{\text{ЭМ}}s + I}U_{\text{Я}}(s) - \frac{k_B(T_{\text{ЭМ}}s + I)}{T_{\text{ЭМ}}T_{\text{Э}}s^2 + T_{\text{ЭМ}}s + I}U_R(s). \quad (5)$$

Новым функциональным элементом в ОАС является датчик – тахогенератор, преобразующий угловую скорость РМ в соответствующее изменение напряжения постоянного тока $u_{\text{ТГ}}(t)$. Тахогенератор представляет собой безинерционный

функциональный элемент, статическая характеристика которого в рабочем диапазоне угловых скоростей аппроксимируется такой зависимостью

$$u_{TR}(t) = k_{TR} \omega(t), \quad (6)$$

где k_{TR} – коэффициент передачи тахогенератора, B/c . Применив преобразование Лапласа к уравнению (6), получим операторное уравнение вида

$$U_{TR}(s) = k_{TR} \Omega(s), \quad (7)$$

здесь $U_{TR}(s)$ – изображение напряжения тахогенератора $u_{TR}(t)$; $\omega(s)$ – изображение угловой скорости $\omega(t)$. Тогда передаточная функция тахогенератора

$$W_{TR}(s) = \frac{U_{TR}(s)}{\Omega(s)} = k_{TR}. \quad (8)$$

Теперь операторное уравнение ОАС представимо в таком виде

$$\begin{aligned} U_{TR}(s) &= W_U(s)W_{TR}(s)U_Y(s) + W_M(s)W_{TR}(s)U_R(s) = \\ &= \frac{k \cdot k_{TR}}{T_{\text{ЭМ}}T_{\text{Э}}s^2 + T_{\text{ЭМ}}s + 1}U_Y(s) - \frac{k_B \cdot (T_{\text{Э}}s + 1)}{T_{\text{ЭМ}}T_{\text{Э}}s^2 + T_{\text{ЭМ}}s + 1}U_R(s). \end{aligned} \quad (9)$$

Исследуем функциональные особенности ОАС, включающего ИО+РМ+Д, с помощью линеаризованной модели (9). Определим переходные характеристики.

$$U_R(s) \equiv 0 \longrightarrow U_{TR}(s) = \frac{k \cdot k_{TR}}{T_{\text{ЭМ}}T_{\text{Э}}s^2 + T_{\text{ЭМ}}s + 1}U_Y(s),$$

$$U_Y(s) = \frac{A}{s} \longrightarrow U_{TR}(s) = \frac{k \cdot k_{TR} \cdot A}{s(T_{\text{ЭМ}}T_{\text{Э}}s^2 + T_{\text{ЭМ}}s + 1)},$$

$$u_{TR}(t) = L^{-1}\{U_{TR}(s)\} = L^{-1}\left\{\frac{k \cdot k_{TR} \cdot A}{s(T_{\text{ЭМ}}T_{\text{Э}}s^2 + T_{\text{ЭМ}}s + 1)}\right\}.$$

Для действительных и различных корней характеристического уравнения $A(s) = 0 \longrightarrow T_{\text{ЭМ}}T_{\text{Э}}s^2 + T_{\text{ЭМ}}s + 1 = 0$, полином $A(s)$ можно представить как $(s + \alpha)(s + \beta)$, где α и β – корни, тогда

$$\begin{aligned} L^{-1}\left\{\frac{k \cdot k_{TR} \cdot A}{s(T_{\text{ЭМ}}T_{\text{Э}}s^2 + T_{\text{ЭМ}}s + 1)}\right\} &= L^{-1}\left\{\frac{k \cdot k_{TR} \cdot A / T_{\text{ЭМ}}T_{\text{Э}}}{s(s + \alpha)(s + \beta)}\right\} = \left| \begin{array}{l} \text{с помощью таблицы} \\ \text{преобразования Лапласа} \end{array} \right| = \\ &= \frac{k \cdot k_{TR} \cdot A}{T_{\text{ЭМ}}T_{\text{Э}}}\left[\frac{1}{\alpha\beta} + \frac{\beta e^{\alpha t} - \alpha e^{\beta t}}{\alpha\beta(\alpha - \beta)}\right]. \end{aligned}$$

Итак,

$$u_{TR}(t) = \frac{k \cdot k_{TR} \cdot A}{T_{\text{ЭМ}}T_{\text{Э}}}\left[\frac{1}{\alpha\beta} + \frac{\beta e^{\alpha t} - \alpha e^{\beta t}}{\alpha\beta(\alpha - \beta)}\right]. \quad (10)$$

Пример 1. Построим график переходного процесса для ОАС, заданного передаточной функцией вида

$$W(s) = \frac{U_{TR}(s)}{U_{Я}(s)} = \frac{0,4}{0,0025 \cdot s^2 + 0,2 \cdot s + 1}; \quad U_{Я}(s) = \frac{12}{s};$$

$$U_{TR}(t) = L^{-1}\{U_{TR}(s)\} = L^{-1}\left\{\frac{0,4}{s \cdot (0,0025 \cdot s^2 + 0,2 \cdot s + 1)}\right\}.$$

Определим корни характеристического уравнения

$$0,0025 \cdot s^2 + 0,2 \cdot s + 1 = 0;$$

$$s_{1,2} = \frac{-0,2 \pm \sqrt{0,04 - 4 \cdot 0,0025}}{2 \cdot 0,0025} = \frac{-0,2 \pm 0,1732}{0,005};$$

$$s_1 = -5,36, \quad s_2 = -74,64.$$

Проверка:

$$s_1 = -5,36 \longrightarrow 0,0025 \cdot (-5,36)^2 + 0,2 \cdot (-5,36) + 1 =$$

$$= 0,071824 - 1,072 + 1 \approx 0;$$

$$s_2 = -74,64 \longrightarrow 0,0025 \cdot (-74,64)^2 + 0,2 \cdot (-74,64) + 1 =$$

$$= 13,927 - 14,928 + 1 \approx 0.$$

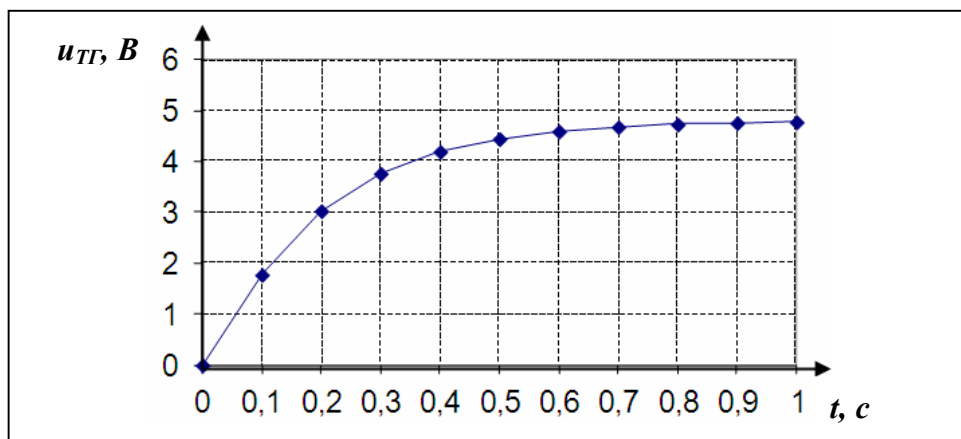
Подставив в выражение (10) получим

$$U_{TR}(t) = 4,8 \cdot 400 \left[\frac{1}{400,07} + \frac{74,64 \cdot e^{-5,36t} - 5,36 \cdot e^{-74,64t}}{400,07 \cdot (5,36 - 74,64)} \right] =$$

$$= 4,8 \cdot (1 - 1,0774 \cdot e^{-5,36t} + 0,0774 \cdot e^{-74,64t}).$$

Проверка:

t, c	u_{TG}, B
0	0,0000
0,1	1,7744
0,2	3,0297
0,3	3,7642
0,4	4,1940
0,5	4,4454
0,6	4,5925
0,7	4,6786
0,8	4,7290
0,9	4,7584
1	4,7757



**СОВЕТИ
КОНФУЦИЯ** :

Не делай другому того, чего себе не пожелаешь!