

Моделирование управления электроприводом

Введение

Электропривод предназначен для преобразования электрической энергии в механическую. Обычно выделяют:

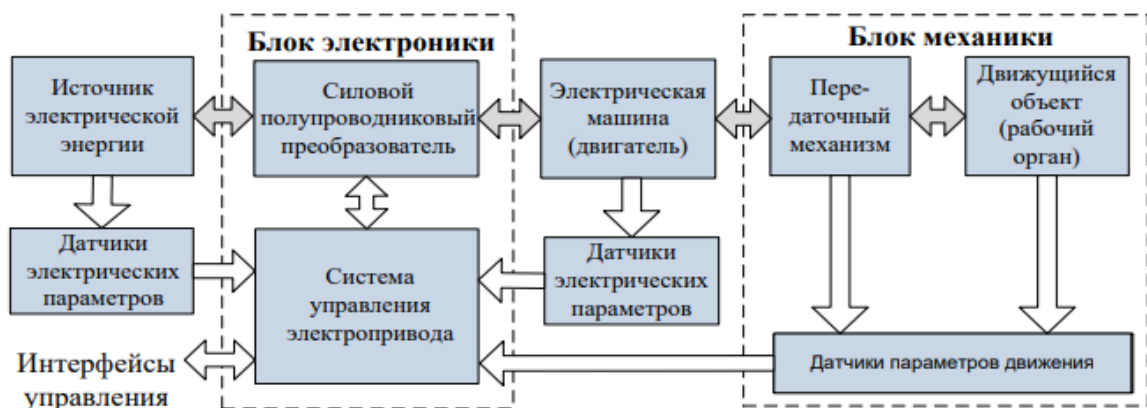
- Электродвигатели постоянного тока
- Электродвигатели переменного тока
- Шаговые электродвигатели
- Серводвигатели
- Линейные электродвигатели
- Синхронные двигатели
- Асинхронные двигатели

Понятие регулируемый электропривод включает в себя выполнение следующих функций:

- установка требуемой скорости в пределах заданного диапазона;
- стабилизация установленного значения скорости с заданной точностью при возмущающих воздействиях;
- регулирование момента, развиваемого двигателем в двигательном и тормозном режимах, и ускорения (замедления) привода;
- формирование требуемого характера изменения скорости во времени $\omega=f(t)$ с заданной точностью.

1. Структура электропривода

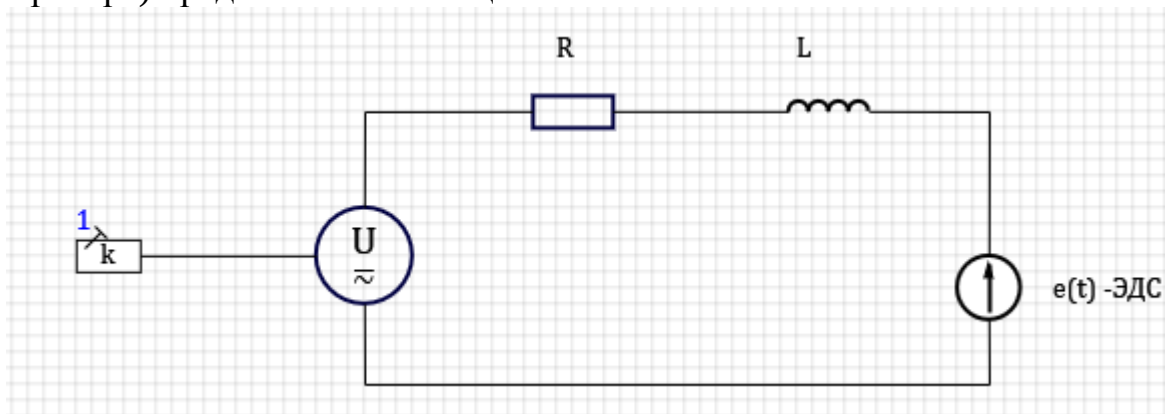
В классической компоновке электропривод состоит из неподвижной части (статора) и вращающейся части (ротора). Ротор располагается внутри статора и закрепляется в подшипниках



Построение математической модели

Электрический ток, проходя по обмотке статора, приводит к вращению ротора двигателя постоянного тока (ДПТ).

Электрическая часть ДПТ (точнее, - часть, связанная с обмоткой статора или ротора) представляется LC-цепью -



Математическая модель LC – цепочки: $U - e = iR + L \frac{di}{dt}$

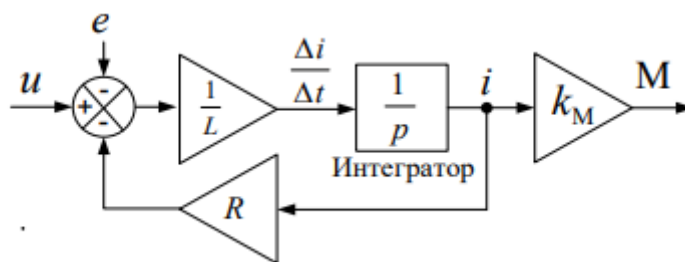
Ток i этой цепи преобразуется в крутящий момент M вала. Момент пропорционален силе тока $M = k_M \cdot i$.

Математическое описание устройства –

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} \cdot (u - e - Ri)$$

$$M = k_M \cdot i$$

Структурная схема электрической части модели (строится по мат. модели «справа-налево») –



Подключим к валу механическую нагрузку M в виде момента инерции $M_J = J \cdot \varepsilon$ (ε – Угловое ускорение вала) и момента трения $M_{ТР} = k_{ТР} \cdot \omega$, пропорционального угловой частоте вращения вала ω , а также поставим ЭДС цепи в зависимость от этой частоты $e = k_e \cdot \omega$.

$$M = M_J + M_{ТР} = J \cdot \varepsilon + k_{ТР} \cdot \omega \rightarrow \varepsilon = (M - k_{ТР} \cdot \omega) / J$$

$$\omega = \int \varepsilon dt$$

Имеем математическую модель электрической части -

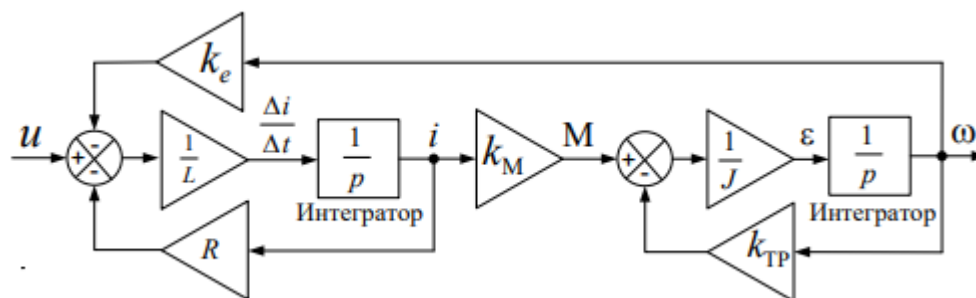
$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} \cdot (u - e - Ri)$$

$$M = k_M \cdot i$$

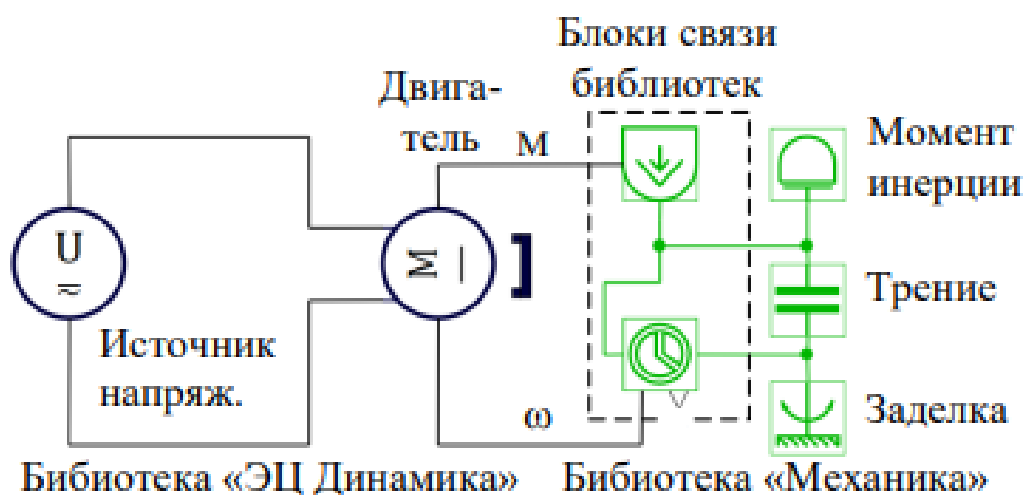
$$\varepsilon = (M - k_{ТР} \cdot \omega) / J$$

$$\omega = \int \varepsilon dt$$

Структурная схема, отвечающая простейшей математической модели электропривода-

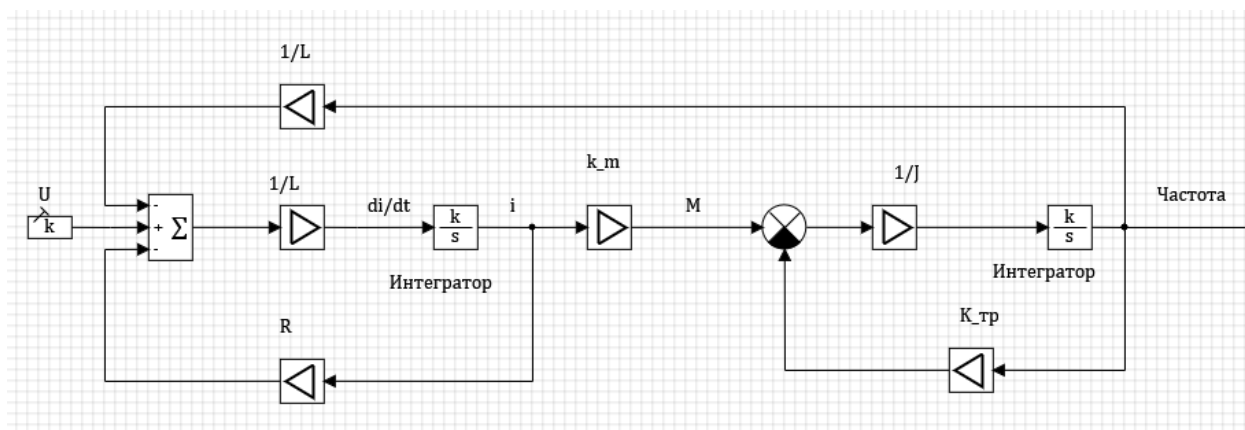


В среде SimInTech данная структурная схема будет представлять простейшую модель двигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. При использовании библиотек ЭЦ Динамика и Механика, модель имеет вид:



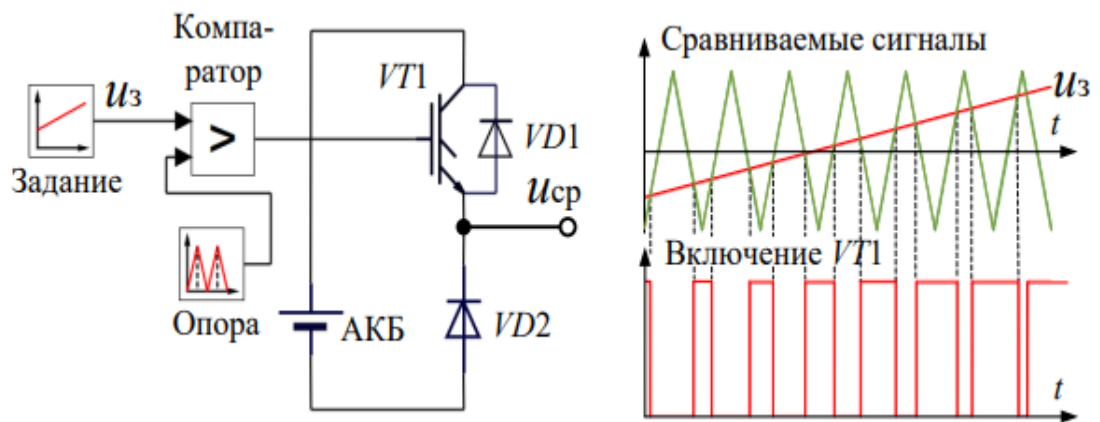
Из библиотеки «ЭЦ Динамика» в модели используются источник напряжения U и двигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов M .

Если ограничиться рассмотрением электрической части, то в среде SimInTech данная структурная схема будет представлять простейшую модель двигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов.



На выходе имеем угловую частоту ω , а на входе напряжение.

Заменяем модель источника напряжения моделью аккумуляторной батареи (АКБ) с управляемым полупроводниковым преобразователем. Модель полупроводникового преобразователя с устройством управления в SimInTec будет выглядеть -

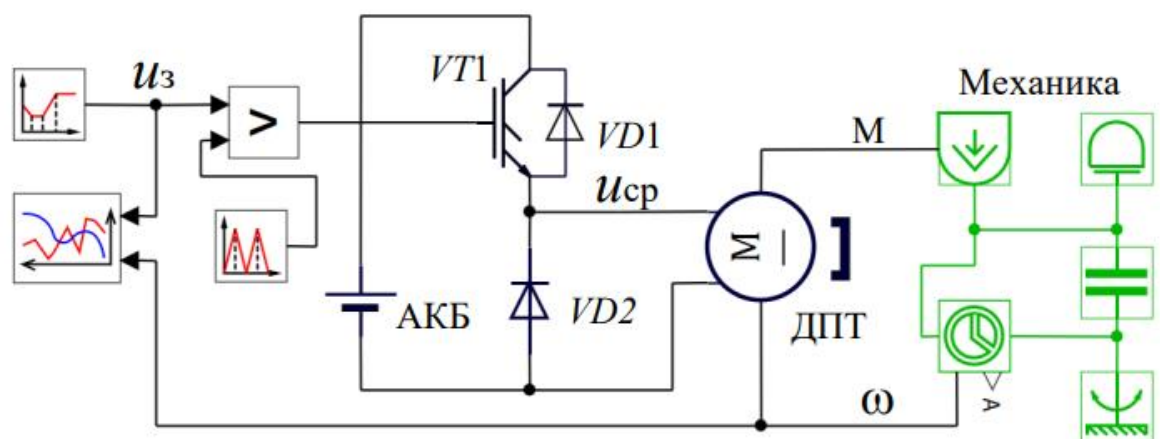


Рассмотренная модель активно-индуктивной цепочки, входящая в состав модели двигателя, является фильтром тока, и если её постоянная времени существенно больше периода опорного сигнала, то ток двигателя будет пропорционален среднему на периоде опорного треугольника напряжению, а следовательно, и сигналу задания U_3 .

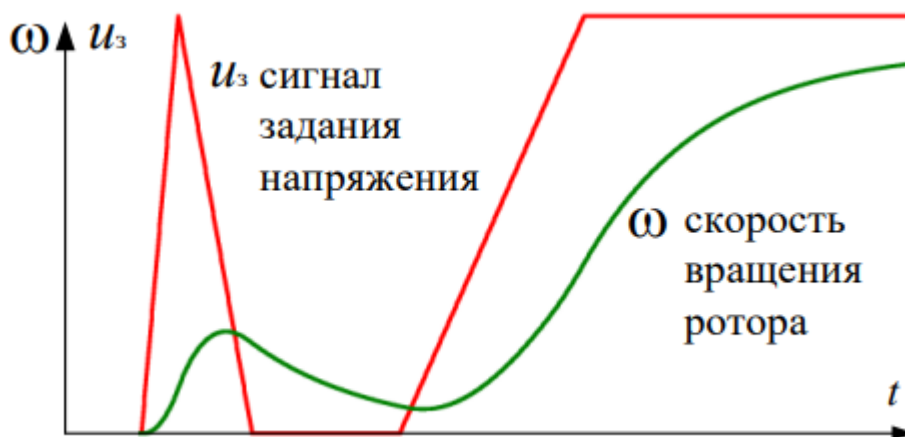
U_3 – Заданное напряжение на входе; U_{cp} – напряжение среднее.

Устройство управления, состоящее из источника линейного сигнала (Задание u_3), компаратора и генератора треугольного напряжения (Опора), изменяет среднее напряжение (u_{cp}) на выходе полупроводникового преобразователя, управляя транзисторным ключом VT1. Для этого оно преобразует сигнал задания напряжения (u_3) в широтно-модулированный сигнал.

Объединив модель полупроводникового преобразователя с моделью двигателя и нагрузки, имеем схему –



То есть, смоделировали систему, позволяющую с помощью сигнала задания u_3 управлять движением инерционного электромеханического объекта –



2. Моделирование электродвигателя постоянного тока (ДПТ)

Конструкция двигателей постоянного тока предполагает наличие скользящих электрических контактов – щёточно-коллекторного механизма, что не способствует их использованию на практике. Однако в силу простоты принципа работы и управления на примере привода постоянного тока удобно рассматривать общие принципы построения систем управления электроприводами.

Работу двигателя постоянного тока можно объяснить силой Ампера.

Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле (сила Ампера) -

$$F = B \cdot i \cdot l \cdot \sin \alpha$$

где: B – величина магнитной индукции поля;

i – значение тока в проводнике; l – длина проводника;

α – угол между направлением тока и направлением магнитной индукции поля.

Так как ротор закреплен на валу, пара сил создает крутящий момент

$$M = 2 \cdot F \cdot R \cdot \cos \varphi$$

R – плечо силы, равное радиусу ротора

φ – угол между направлением вектора магнитной индукции и плоскостью контура ротора. При $\varphi = 90^\circ$, $M=0$. Если при переходе через $\varphi = 90^\circ$ изменится направление тока на противоположное (что обеспечивается щеточно-коллекторным механизмом), то ротор будет вращаться. Крутящий момент изменяется по закону $\cos \varphi$. Для равномерности вращения обычно используются три и более контуров ротора.

Статор ДПТ представляет собой электромагнит или постоянный магнит с некоторым количеством пар полюсов. В статорах двигателей большой мощности используются электромагниты (обмотки возбуждения). В роторах реальных двигателей используются многовитковые катушки.

Модель электрических процессов в R-L цепочке – это модель обмотки ротора:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} \cdot (u - e - Ri) \quad (2.1)$$

$$M = k_M \cdot i$$

$$\varepsilon = (M - k_{TP} \cdot \omega) / J$$

$$\omega = \int \varepsilon dt$$

e – ЭДС, наводимая в обмотке ротора при вращении в магнитном поле статора ($e = k \cdot \Phi \cdot \omega$), $u_R = i \cdot R$ – падение напряжения на активном сопротивлении обмотки. Ток в обмотке ротора преобразуется в крутящий момент двигателя M ($M = k \cdot \Phi \cdot I = k_M \cdot i$), Модель механического движения преобразует момент двигателя в частоту вращения его вала ω . В рассматриваемом случае она характеризуется моментом инерции ротора J ($M = J \frac{d\omega}{dt}$), вязким трением с коэффициентом k_{TP} и внешним нагрузочным моментом M_C . Скорость вращения ротора – ω .

Таким образом, если задать L , R , k_m , J , k_e , k_{TP} , то с помощью арифметических действий и численного интегрирования можно вычислить угловую частоту ω на выходе системы в зависимости от сигнала входного напряжения.

В SimInTech схема имеет вид -

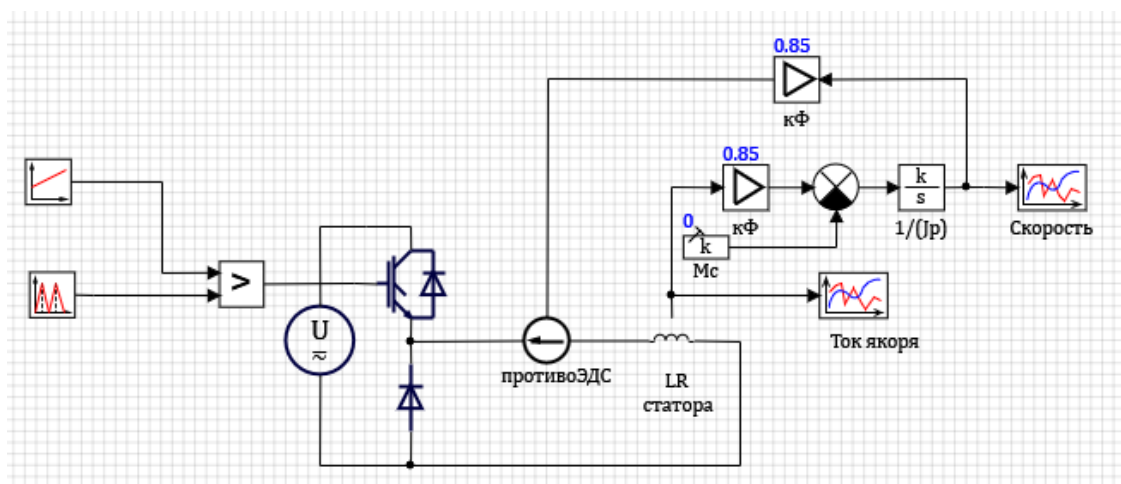


Рис.2-1 Схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ)

Скрипт страницы –

```
const Js=1, Jp=1, Gps=2;
/// Параметры ДПТ НВ
Ra = 0.2;
La = 3e-4;
kF = 0.85;
J = 0.13; /// Момент инерции двигателя
Inom = 15;
```

$I_{max} = 2 \cdot I_{nom}$;
 /// Параметры преобразователя
 $F_{pwm} = 5000$; /// частота
 $T_{pwm} = 1/F_{pwm}$;
 /// Параметры датчиков
 $U_{adc} = 3.3$

Параметры проекта –

Параметры проекта: E:\Document-20230801\SimInTech-Учеба\240916-240930-Учеба-Инженерка\ДПТ_простая.prt слой: Автоматика			
Параметры расчёта Управление расчётом Настройки проекта			
Название	Имя	Формула	Значение
[-] Основные параметры			
Минимальный шаг	hmin		1E-6
Максимальный шаг	hmax		1E-6
Шаг синхронизации задачи в пакете	synstep		0
Режим параллельного выполнения в пакете	serial_mode		Параллельный
Начальный шаг интегрирования (если 0 - выбирается автоматически)	startstep		0
Метод интегрирования	intmet		Эйлера
Начальное время расчёта	starttime		0
Конечное время расчёта	endtime		5
Относительная ошибка	relerr		0.0001
Абсолютная ошибка	abserr		1E-6
Относительная ошибка сравнения времени для дискретных блоков и источников	time_rel_error		1E-12
Начальное значение неинициализированных выходов блоков	InitOutputsValue		0
[-] Генерация кода			
[-] Управление расчётом			
[-] Настройки решения НАУ			
[-] Визуализация данных			
[-] Удалённая отладка кода			
[-] Сортировка блоков			
[-] Тонкие настройки решения СЛАУ			
[-] Тонкие настройки решения НАУ			
[-] Электрические схемы			

☐ Редактировать список параметров

Свойства источника «Треугольный сигнал»

Свойства			
Общие Порты Визуальные слои			
Название	Имя	Формула	Значение
Амплитуда	y	0.85	[0.85]
Период, с	t	T_{pwm}	[0.0002]
Смещение	dy	T_{pwm}	[0.0002]
Фаза (опережение), с	dt		[0]

Свойства «Диод силовой». Библиотека «ЭЦ – Динамика»

Свойства: ac_V2

Свойства	Параметры	Общие	Порты	Визуальные слои
Название	Имя	Формула	Значение ▲	
Параметры ВАХ				
Сопrotивление в прямом...	Ron		0.01	
Сопrotивление обратно ...	RonVD		0.01	
Падение напряжения в п...	Uf		0.7	
Падение напряжения обр...	UfVD		0.7	
Вид ВАХ	type_vax		Диод	
Параметры снаббера				
Сопrotивление снаббера...	Rsn		1000000	
Ёмкость снаббера, Ф	Csn		1E-5	
Вид снаббера	type_sn		R	
Дополнительные параметры				
Имя на схеме	sc_name			

Свойства источника напряжения библиотеки «ЭЦ – Динамика»

Свойства: ac_U1			
Свойства	Общие	Порты	Визуальные слои
Название	Имя	Формула	Значение
Амплитуда, В	Um	0	0
Постоянная соста...	Udc	220	220
Частота, Гц	f	0	0
Фаза, эл.гр.	fi	0	0
Сопrotивление ис...			
Вид цепи сопро...	TypeO...		R
Индуктивность,...	L		0.1
Активное сопр...	R		1
Дополнительные ...			

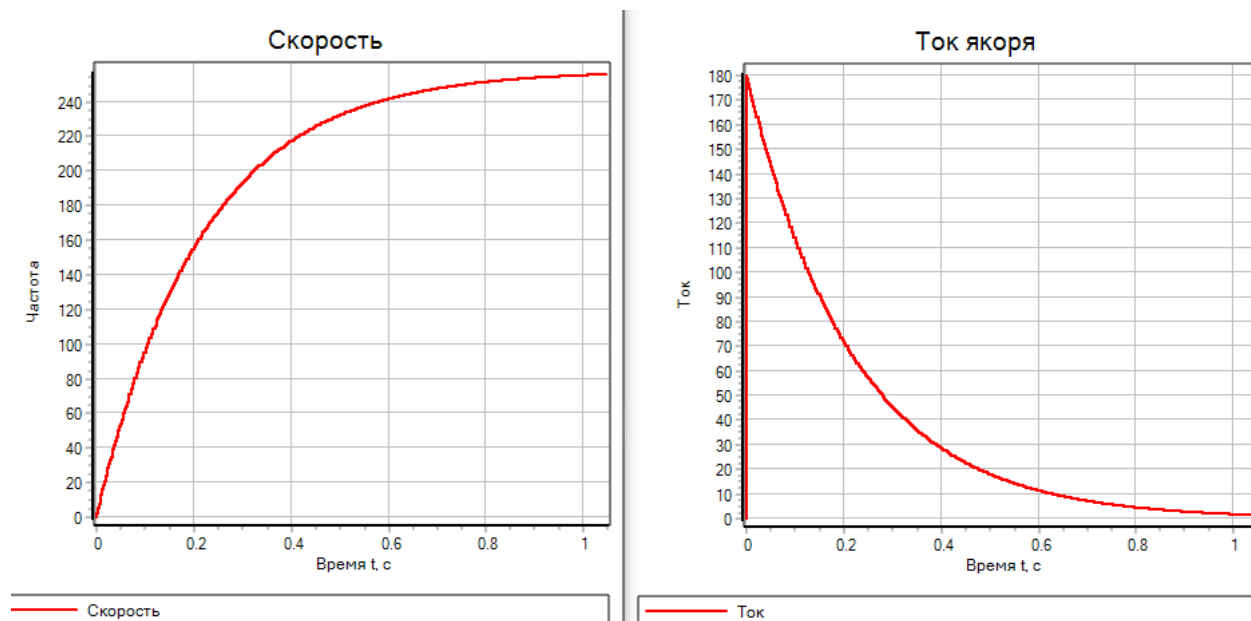
Свойства ЭДС «ЭЦ – Динамика»

Свойства : RLC2			
Свойства	Параметры	Общие	Порты
Визуальные слои			
Название	Имя	Формула	Значение
Тип элемента цепи	el_type		Идеальная ЭДС
Сопротивление элем...	R		[0]
Сопротивление шунт...	R_sh		[1000000]
Сопротивление конд...	R_c		[1E-6]
Мнимое сопротивлен...	R_im		[0]
Индуктивность, Гн	L		[0]
Ёмкость, Ф	C		[1E-6]
Источник тока, А	Isrc		[0]
Мнимый источник ток...	Isrc_im		[0]
Напряжение	U		[0]
Мнимое напряжение, В	U_im		[0]
Начальный ток индук...	IL_0		[0]
Начальное напряжен...	UC_0		[0]
Параметры задаваем...	in_ports		ЭДС;
Параметры выводим...	out_ports		

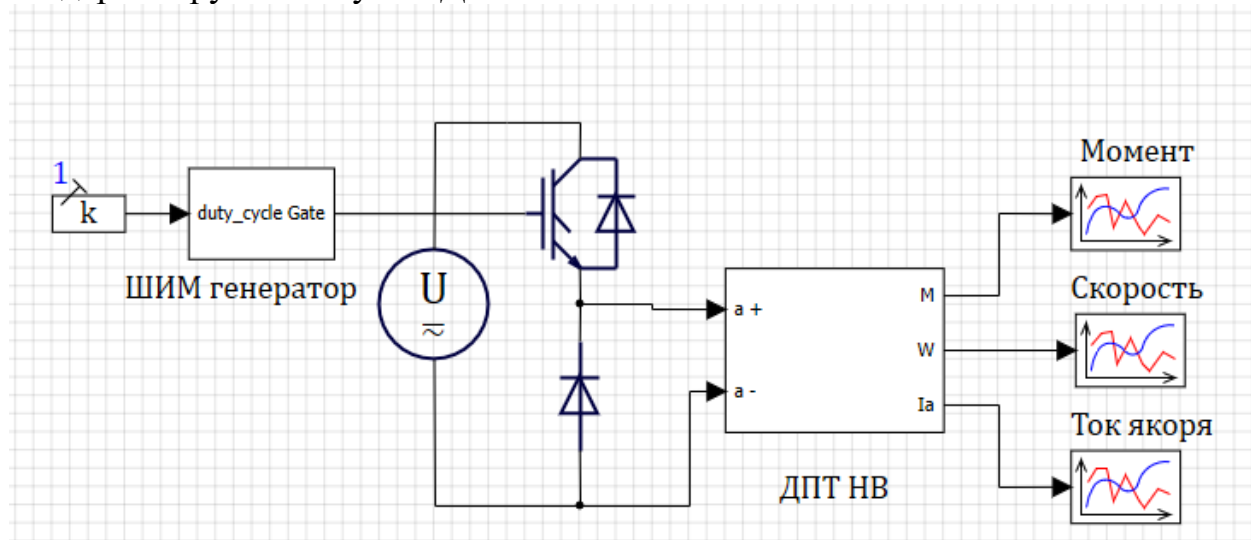
Свойства RL цепочки. Библиотека «ЭЦ – Динамика»

Свойства : RLC1			
Свойства	Параметры	Общие	Порты
Визуальные слои			
Название	Имя	Формула	Значение ▲
Параметры задаваемые из пор...	in_ports		
Тип элемента цепи	el_type		RL
Индуктивность, Гн	L	La	[0.0003]
Сопротивление элемента, Ом	R	Ra	[0.2]
Мнимое сопротивление, Ом	R_im		[0]
Ёмкость, Ф	C		[0]
Источник тока, А	Isrc		[0]
Мнимый источник тока, А	Isrc_im		[0]
Напряжение	U		[0]
Мнимое напряжение, В	U_im		[0]
Начальный ток индуктивности, А	IL_0		[0]
Начальное напряжение конден...	UC_0		[0]
Сопротивление шунта, Ом	R_sh		[1000000]
Сопротивление конденсатора, Ом	R_c		[1E-6]
Параметры выводимые в порты	out_ports		Ток;

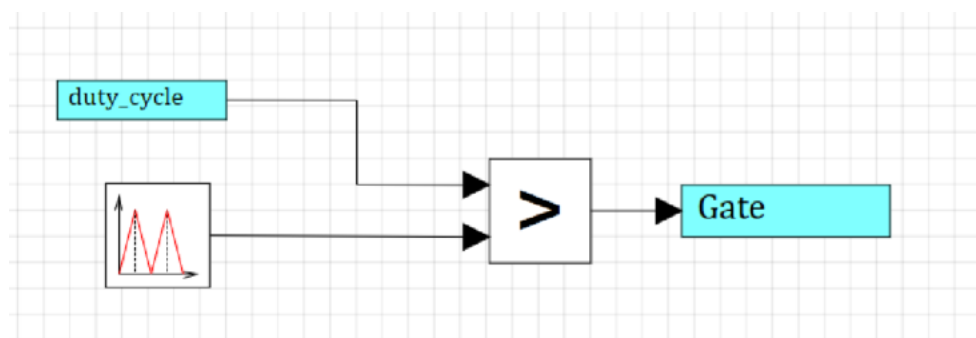
Результаты –



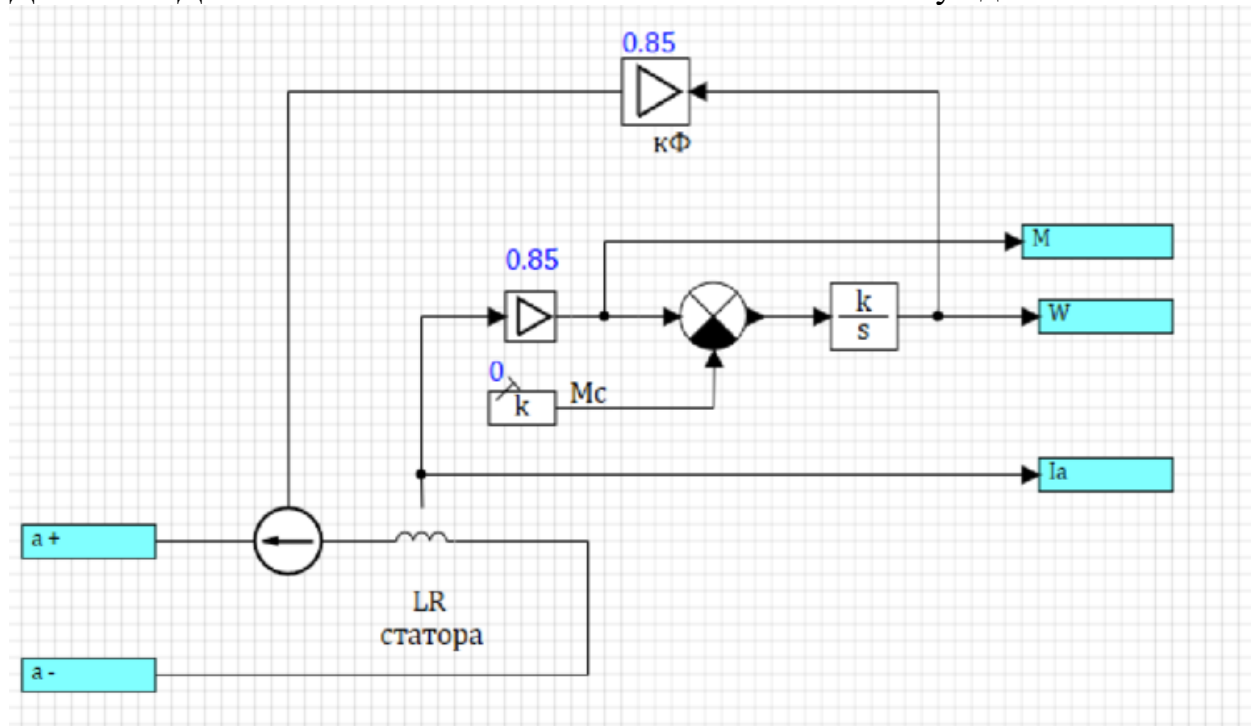
Модернизируем схему 2-1 ДПТ НВ.



На этой схеме две субструктуры:
ШИМ генератор



ДПТ НВ - Двигатель постоянного тока независимого возбуждения



Скрипт страницы -

```
const Js=1, Jp=1, Gps=2;
/// Параметры ДПТ НВ
Ra = 0.2;
La = 3e-4;
kF = 0.85;
J = 0.13;
Inom = 15;
Imax = 2*Inom;

/// Параметры преобразователя
Fpwm = 5000;    //Частота ШИМ
Tpwm = 1/Fpwm;

/// Параметры датчиков
Uadc = 3.3;
```

Параметры расчёта:

🔗 Параметры проекта: E:\Document-20241016\SimInTech-Учеба\240916-Учеба-Инженерка (241027)\RESULT-241027\1-ДПТ НВ (без регулятора(241027)\ДПТ_БезРегулятора(241012

Параметры расчёта	Управление расчётом	Настройки проекта	
Название	Имя	Формула	Значение
📁 Основные параметры			
Минимальный шаг	hmin		1E-6
Максимальный шаг	hmax		1E-6
Шаг синхронизации задачи в пакете	synstep		0
Режим параллельного выполнения в пакете	serial_mode		Параллельный
Начальный шаг интегрирования (если 0 - выбирается автоматически)	startstep		0
Метод интегрирования	intmet		Эйлера
Начальное время расчёта	starttime		0
Конечное время расчёта	endtime		0.5
Относительная ошибка	relerr		0.0001
Абсолютная ошибка	abserr		1E-6
Относительная ошибка сравнения времени для дискретных блоков и источников	time_rel_error		1E-12
Начальное значение неинициализированных выходов блоков	InitOutputsValue		0
🔗 Генерация кода			
🔗 Управление расчётом			
🔗 Настройки решения НАУ			
🔗 Визуализация данных			
🔗 Удалённая отладка кода			
🔗 Сортировка блоков			
🔗 Тонкие настройки решения СЛАУ			
🔗 Тонкие настройки решения НАУ			
🔗 Электрические схемы			

Свойства «Источник напряжения» библиотеки «ЭЦ- Динамика»

Постоянная составляющая, В Udc 220

Активное сопротивление, Ом 1

Свойства «ЭЦД – полупроводниковый безынерционный элемент» библиотеки «ЭЦ- Динамика»

 Свойства : RLC3

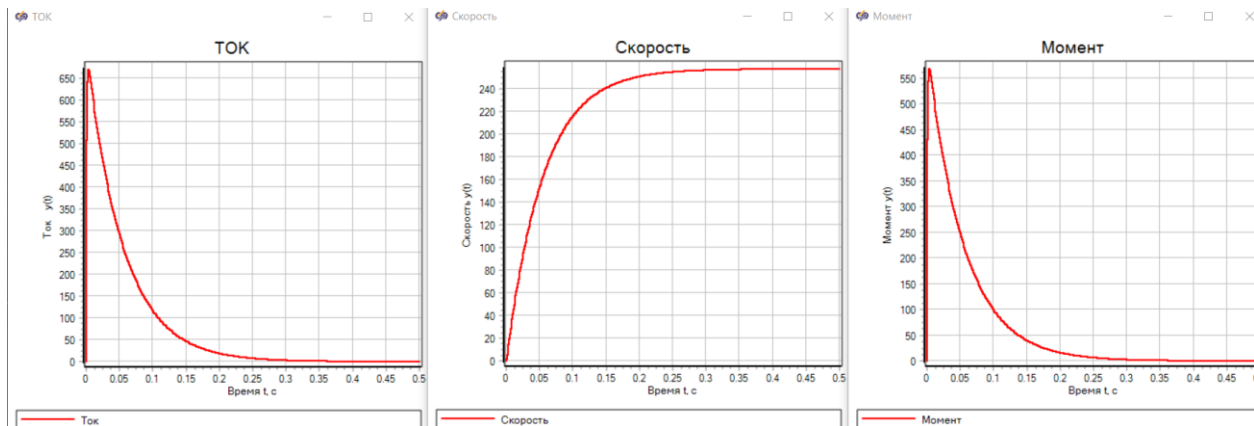
Свойства	Параметры	Общие	Порты	Визуальные слои	
Название			Имя	Формула	Значение
Тип элемента цепи			el_type		RL
Сопротивление элемента, Ом			R	Ra	[0.2]
Индуктивность, Гн			L	La	[0.0003]
Источник тока, А			Isrc		[0]
Мнимый источник тока, А			Isrc_im		[0]
Напряжение			U		[0]
Мнимое напряжение, В			U_im		[0]
Начальный ток индуктивности, А			IL_0		[0]
Параметры задаваемые из портов			in_ports		
Параметры выводимые в порты			out_ports		Ток;

Свойства «LR статора» библиотеки «ЭЦ- Динамика»

 Свойства : RLC3

Свойства	Параметры	Общие	Порты	Визуальные слои	
Название			Имя	Формула	Значение
Тип элемента цепи			el_type		RL
Сопротивление элемента, Ом			R	Ra	[0.2]
Индуктивность, Гн			L	La	[0.0003]
Источник тока, А			Isrc		[0]
Мнимый источник тока, А			Isrc_im		[0]
Напряжение			U		[0]
Мнимое напряжение, В			U_im		[0]
Начальный ток индуктивности, А			IL_0		[0]
Параметры задаваемые из портов			in_ports		
Параметры выводимые в порты			out_ports		Ток;

Результат



Электрическая часть модели -

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} \cdot (u - e - Ri) = \frac{1}{L} (u - k_E \cdot \omega - iR), \quad U = u - e; \quad (2.1)$$

представляет собой апериодическое звено. Действительно, из уравнения (2.1) в операторном виде – $U = iR + i \cdot L s = i \cdot (R + Ls)$

Передаточная функция =>

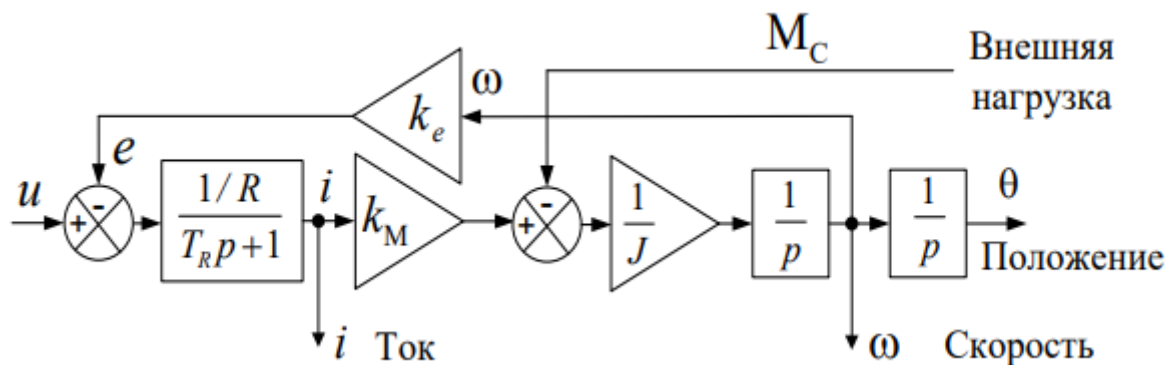
Выход/Вход = i / U ->

$1/(R + Ls) = \frac{1/R}{\frac{L}{R}s + 1} = \frac{K}{T_R \cdot s + 1}$, $T_R = \frac{L}{R}$ – постоянная времени ротора (постоянная времени LR-цепочки.

Передаточная функция -

$$W = \frac{1/R}{\frac{L}{R}s + 1} = \frac{K}{T_R \cdot s + 1} \quad (2.2)$$

С учетом вида передаточной функции апериодического звена модель ДПТ принимает вид –



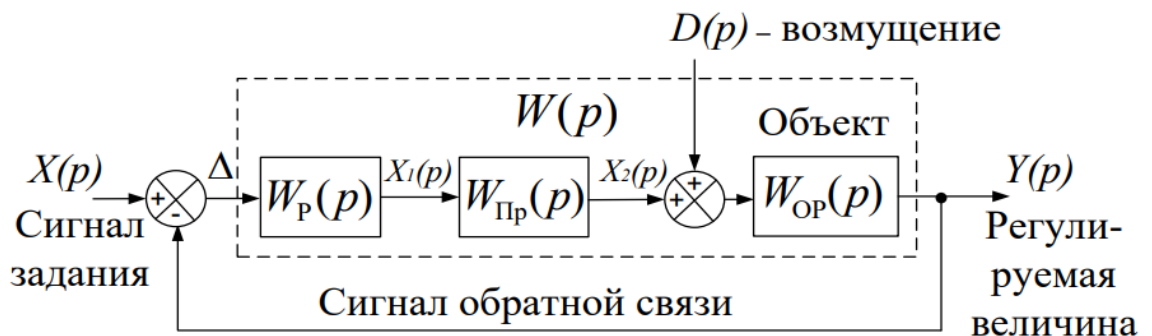
Рассмотрим параметры движения электропривода:

- вращающий момент двигателя
- скорость вала двигателя
- положение вала двигателя (или рабочего органа).

В автоматизированном электроприводе моментом, скоростью и положением управляют соответствующие системы автоматического регулирования.

3.1. Необходимые сведения из автоматического регулирования.

Структура системы автоматического регулирования (САР) имеет вид:



Функция этой системы – поддержание значения регулируемого параметра $Y(s)$ равным заданному $X(s)$. Для этого ошибка между заданным и реальным значениями параметра (Δ) преобразуется в сигнал воздействия на объект регулирования $X_2(s)$, устремляющий эту ошибку к нулю.

Передаточная функция разомкнутой САР, записывается так:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{\Delta} = W_p(s) \cdot W_{пр}(s) \cdot W_{оп}(s) \quad (3.1)$$

где:

$W_p(s)$ – передаточная функция регулятора, определяющая алгоритм вычисления управляющего воздействия $X_1(s)$

$W_{пр}(s)$ – передаточная функция преобразователя, реализующего вычисленное регулятором воздействие

$W_{оп}(s)$ – передаточная функция объекта регулирования.

Передаточная функция замкнутой САР с единичной обратной связью, имеет вид:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{W(s)}{W(s) + 1} \quad (3.2)$$

Правильно спроектированная система должна обеспечивать поддержание заданного значения $X(s)$, минимизируя влияние возмущения $D(s)$.

3.2. Некоторые сведения о цифровых системах управления

В общем случае в состав цифровой системы управления входят:

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

ДЦП – дискретно цифровой преобразователь;

ЦР – цифровой регулятор;

ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь.

К объекту регулирования подключены

АД – аналоговые датчики;

ДД – дискретные датчики.

4. Регулирование электропривода

Система называется астатической, если при любом постоянном задающем воздействии установившаяся ошибка регулирования равна нулю.

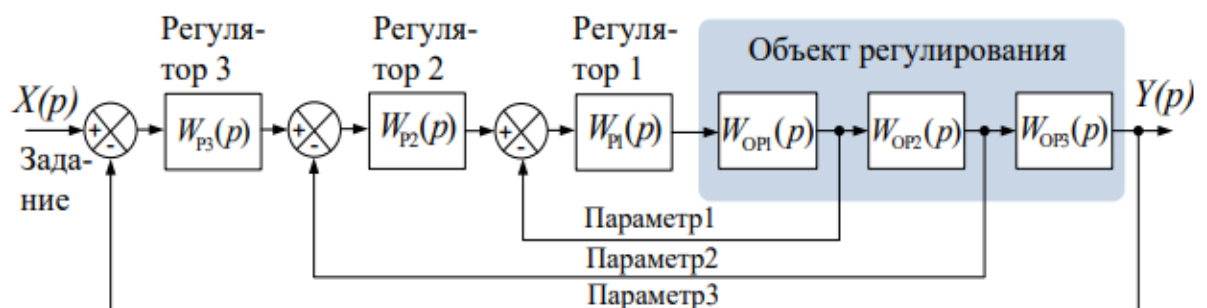
Система называется статической, если при любом постоянном задающем воздействии установившаяся ошибка регулирования не равна нулю. Эта ошибка называется статической.

В электроприводах, статизм или астатизм САР связан с видом передаточной функции регулятора.

Параметры движения привода связаны друг с другом (подчиненное регулирование):

- моментом двигателя постоянного тока при постоянном поле статора можно управлять, меняя ток ротора: $M = f_1(i)$
- скоростью (угловой частотой) вала двигателя можно управлять, меняя его момент: $\omega = f_2(M)$
- положение вала можно изменять, управляя его скоростью (частотой вращения): $\theta = f_3(\omega)$

Трёхконтурная система подчинённого регулирования в общем виде строится в соответствии со структурой –



Объект регулирования представляется в виде последовательно соединённых типовых динамических звеньев с передаточными функциями $W_{OP1}(s)$, $W_{OP2}(s)$, $W_{OP3}(s)$. Для управления каждым параметром применяются отдельные регуляторы $W_{P1}(s)$, $W_{P2}(s)$, $W_{P3}(s)$ включённые таким образом, что

выход одного регулятора является заданным воздействием для другого. Система состоит из «вложенных» друг в друга контуров регулирования.

Кроме структуры вложенных контуров, подчинённое регулирование предполагает так называемую последовательную коррекцию. Этот приём помогает определить передаточную функцию в контуре регулятора. Передаточная функция контуре. Она выбирается исходя из желаемой передаточной функции разомкнутой системы регулирования:

$$W(s) = \frac{1}{\alpha \cdot T_{\mu} \cdot s \cdot (T_{\mu} \cdot s + 1)} \quad (4.1)$$

Значения коэффициентов α и T_{μ} подобраны для переходного процесса замкнутой системы.

Эмпирически установлены параметры:

$$\alpha = 2;$$

Время переходного процесса по отношению к T_{μ} (определяемое при ошибке отработки $< 5\%$) – 4.7;

Перерегулирование 4.3 %.

5. Регулирование контура тока.

Согласно структуре системы подчинённого регулирования, основой управления всеми параметрами движения ДПТ должна быть система управления моментом, а поскольку момент пропорционален току ротора – система управления током. Назовем эту систему автоматического регулирования контуром тока. Смысл данной следящей системы в том, чтобы с помощью сигнала отрицательной обратной связи i_{fb} получить нужное значение тока ротора i_{set}

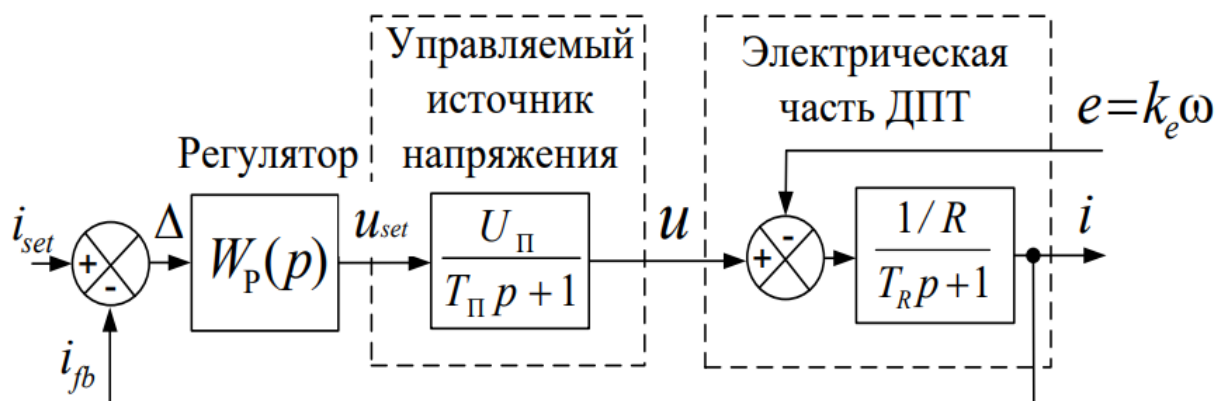


Рис.5.1. Контур тока

На вход регулятора подаётся сигнал ошибки Δ между заданным значением тока i_{set} и его реальной величиной i_{fb} (сигналом обратной связи). Регулятор вырабатывает сигнал u_{set} , управляющий источником напряжения, которое прикладывается к ротору и изменяет его ток, уменьшая ошибку Δ . Передаточная функция управляемого источника напряжения представляет

собой аperiodическое звено с постоянной времени T_{Π} и коэффициентом усиления U_{Π} .

В соответствии с методом последовательной коррекции приравниваем передаточную функцию разомкнутой системы по управляющему воздействию к выражению для желаемой передаточной функции (4.1):

$$W(s) = W_P(s) \cdot \frac{U_{\Pi}}{T_{\Pi}s + 1} \cdot \frac{1/R}{T_Rs + 1} = \frac{1}{\alpha \cdot T_{\mu} \cdot s \cdot (T_{\mu} \cdot s + 1)} \quad (5.1)$$

Передаточная функция регулятора:

$$W_P(s) = \frac{(T_{\Pi}s + 1) \cdot (T_Rs + 1) \cdot R}{\alpha U_{\Pi} \cdot T_{\mu} \cdot s \cdot (T_{\mu} \cdot s + 1)} \quad (5.2)$$

Инерционность управляющего устройства должна быть меньше инерционности управляемого объекта, поэтому будем считать, что $T_{\Pi} < T_R$. Примем $T_{\Pi} = T_{\mu}$ и после преобразований формулы (5.2) приходим к передаточной функции пропорционально-интегрального регулятора:

$$W_P(s) = k_p + \frac{k_i}{s}, \quad k_p = \frac{L}{\alpha U_{\Pi} \cdot T_{\Pi}}, \quad k_i = \frac{R}{\alpha U_{\Pi} \cdot T_{\Pi}}$$

При этом передаточная функция разомкнутой системы примет вид:

$$W(s) = \frac{1}{\alpha \cdot T_{\Pi} \cdot s \cdot (T_{\Pi} \cdot s + 1)} \quad (5.3)$$

Обычно выбирают $\alpha = 2$ – это называется настройкой на модульный оптимум.

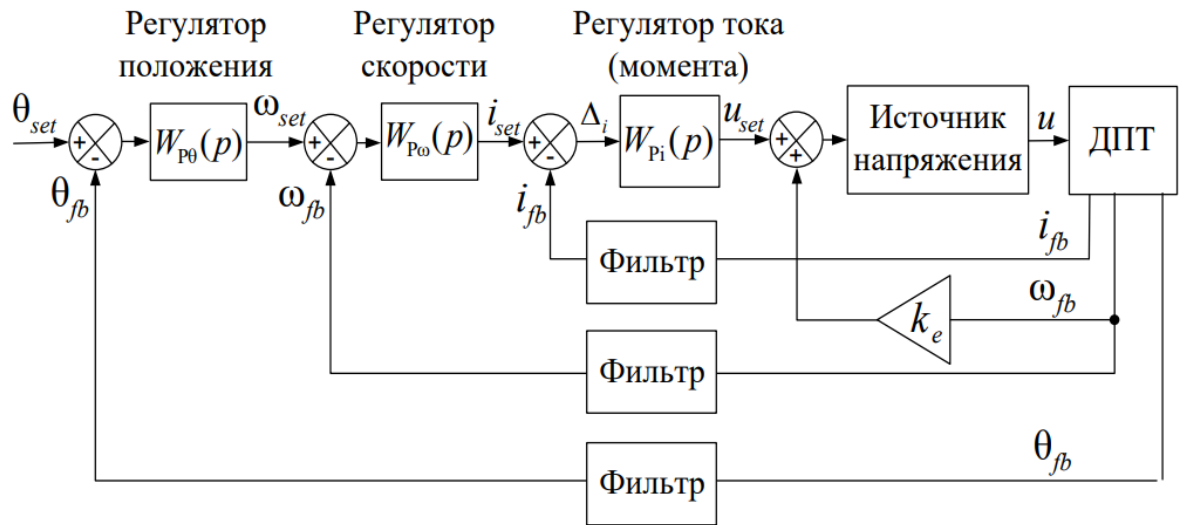
Очевидно, что отсутствие учёта довольно большого количества факторов, влияющих на работу привода, при расчёте параметров регулятора делает метод последовательной коррекции весьма приближённым, особенно для цифровых САР. Более точный синтез и исследование режимов работы контуров возможны с помощью цифрового (численного) моделирования.

При расчёте коэффициентов было проигнорировано присутствие ЭДС, наводимой в обмотке ротора. Если в системе есть датчик скорости вращения, то проигнорированное при синтезе регулятора влияние ЭДС можно компенсировать. ЭДС вращения в электродвигателе противодействует управляющему напряжению. Следовательно, для компенсации её воздействия вычисленную величину ЭДС нужно прибавить, с соответствующим нормирующим коэффициентом k_e , к выходному сигналу регулятора.

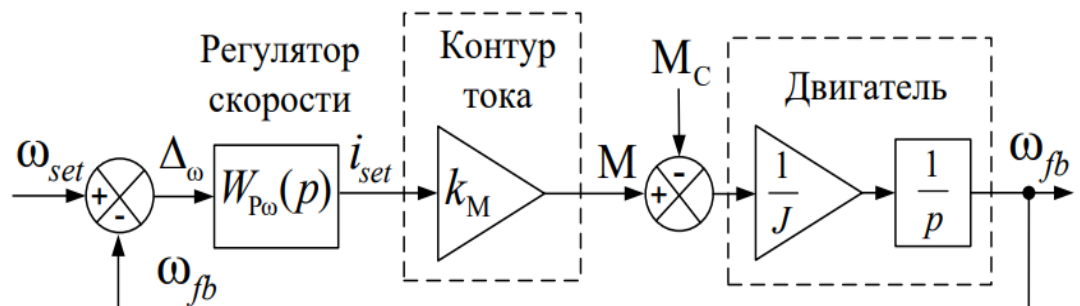
Однако сама структура систем подчинённого регулирования при построении СУ электроприводов остается основной. Сначала синтезируется и настраивается самый быстрый внутренний контур тока, затем более медленный контур скорости и наконец – внешний, ещё более медленный, контур положения.

5.1. Структура трёхконтурной системы регулирования.

Структура трёхконтурной системы регулирования положения вала ДПТ представлена на рисунке -



Обычно переходные процессы в контуре тока заканчиваются существенно быстрее переходных процессов в контуре скорости. В этом случае можно считать, что заданный регулятором скорости ток i_{set} , безынерционно преобразуется в момент. Тогда контур скорости можно представить в виде -

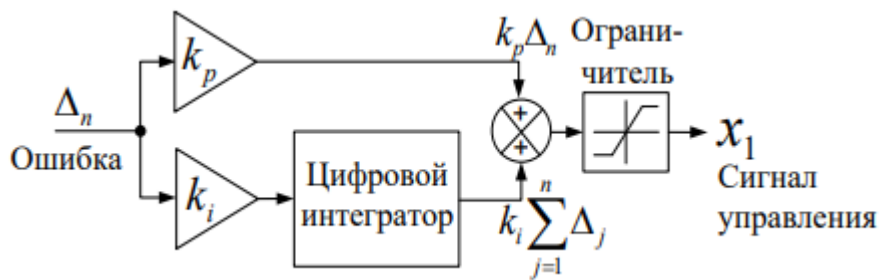


5.2. Цифровой ПИ-регулятор.

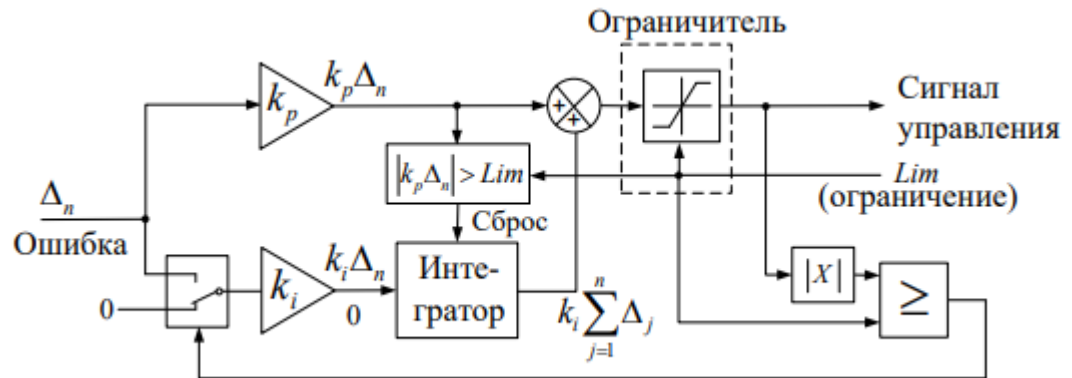
На вход регулятора в n -м цикле расчёта подаётся сигнал ошибки регулирования Δ_n . Из него регулятор вырабатывает сигнал управления, равный сумме пропорциональной и интегральной составляющих:

$$x_I = k_p \cdot \Delta_n + k_i \cdot \sum_{j=1}^n \Delta_j.$$

Сигнал управления в любой реальной САР ограничен по величине, соответственно, в регуляторе должен быть реализован режим насыщения.

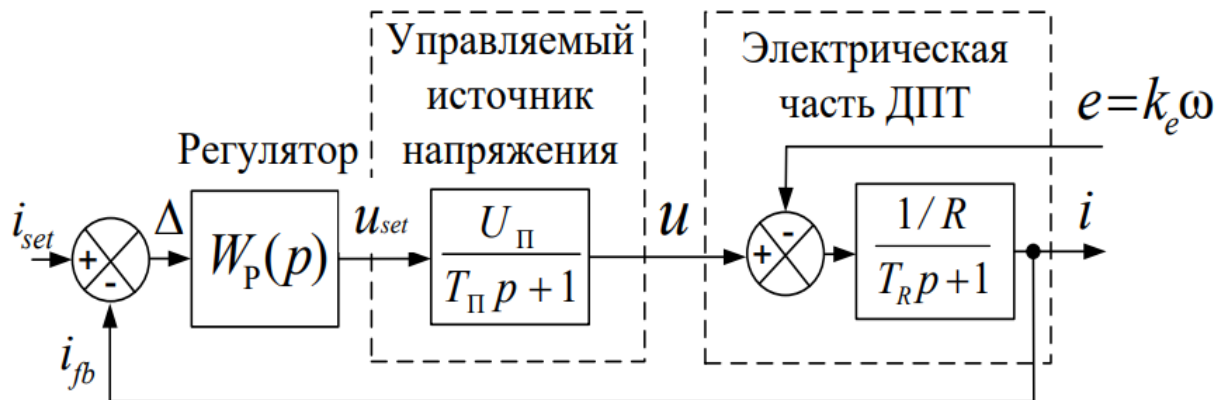


Для того чтобы избежать перерегулирования с последующими колебаниями в режиме насыщения надо изменить схему регулятора.

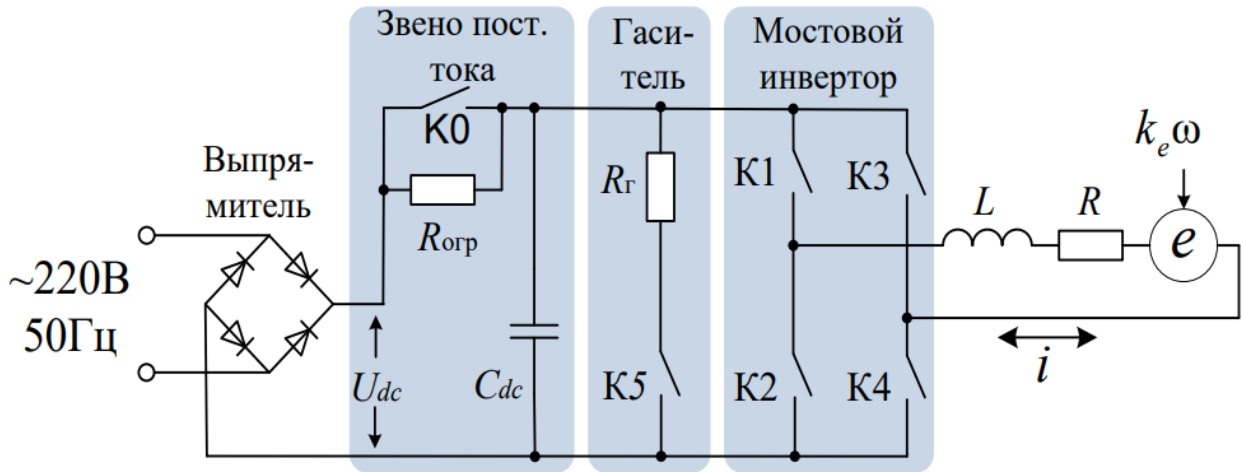


5.3. Силовой преобразователь.

Обратимся к системе автоматического регулирования контуром тока



Управляемый источник напряжения, используемый для непосредственного воздействия на двигатель (ДПТ) может быть представлен схемой

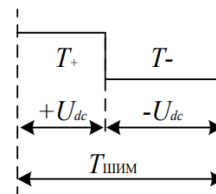


В момент подключения преобразователя к сети все ключи преобразователя разомкнуты, при этом ток заряда конденсатора C_{dc} ограничивается на допустимом для сети и диодов выпрямителя уровне величиной резистора $R_{огр}$. После завершения заряда ключ $K0$ замыкается. Ключ $K5$ предназначен для рассеяния энергии в случае перехода двигателя в генераторный режим, например, при торможении. На ключевых элементах $K1...K4$ построен мостовой преобразователь. В диагональ моста включается обмотка ротора двигателя ($R-L-e$). С помощью широтно-импульсной модуляции (далее ШИМ) мостовой преобразователь формирует из напряжения U_{dc} среднее напряжение, прикладываемое к этой обмотке. Данное напряжение может иметь различную полярность, а следовательно, может формировать в обмотке и разнополярный ток, что делает возможным получение на валу электродвигателя разнонаправленного крутящего момента.

5.4. Формирования среднего напряжения с помощью ШИМ.

Период ШИМ-преобразования $T_{ШИМ}$ выбирается существенно меньшим, чем L/R постоянная времени обмотки двигателя. Если замкнуты ключи $K1$ и $K4$, то к обмотке прикладывается напряжение $+U_{dc}$, а если замкнуты $K2$ и $K3$, то $-U_{dc}$. ($T_{ШИМ} = T_+ + T_-$). Среднее напряжение на периоде ШИМ определяется соотношением

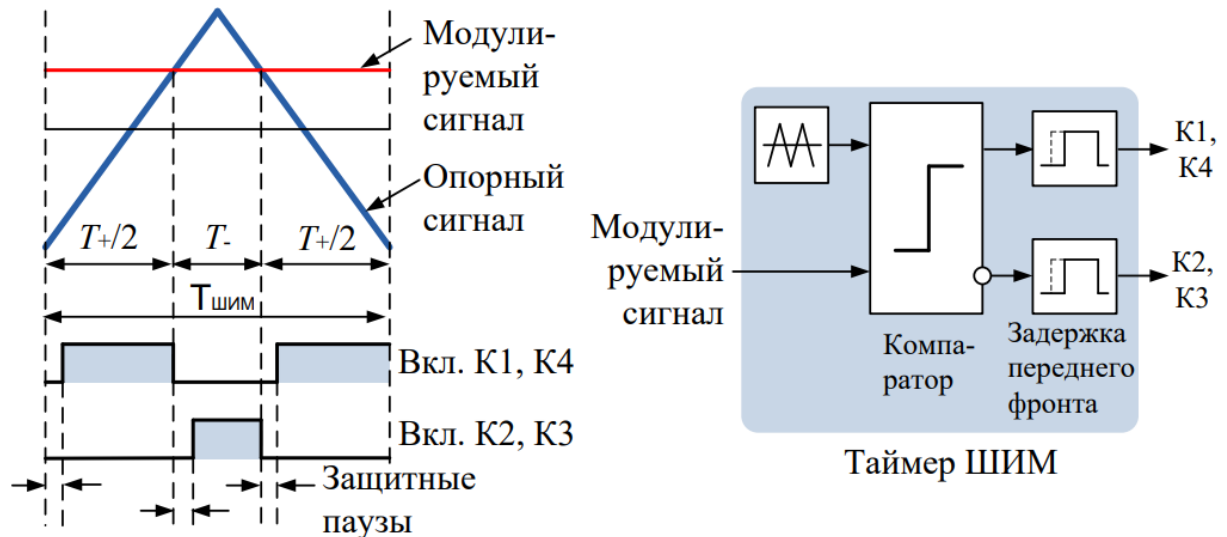
$$u = U_{dc} \cdot \frac{T_+ - T_-}{T_{ШИМ}}$$



Где: U_{dc} – напряжение звена постоянного тока; $T_{ШИМ}$ – период ШИМ-преобразования; T_+ – время включения $K1 - K4$ внутри $T_{ШИМ}$; T_- – время включения $K2 - K3$ внутри $T_{ШИМ}$.

Сигнал, открывающий ключ, обычно задерживают относительно закрывающего сигнала на время, с гарантией исключая возможность «сквозняка».

ШИМ-модуляция реализуется с помощью сравнения модулируемого сигнала с опорным



Процессоры, ориентированные на управление двигателями, имеют специальные таймеры, позволяющие реализовывать ШИМ-преобразование. Таймер формирует нарастающе-убывающий опорный код и, сравнивая его с модулируемым значением, вырабатывает сигнал управления полупроводниковым ключом. Если постоянная времени обмотки ротора (L/R) существенно больше периода ШИМ, то пульсации тока в ней будут невелики, и можно считать, что к обмотке приложено напряжение, равное среднему на периоде ШИМ.