

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Невинномысский технологический институт (филиал) СКФУ

**Методические указания по выполнению лабораторных работ по  
дисциплине «Моделирование в электроприводе»**

Для студентов направления подготовки 13.03.02 – Электроэнергетика и  
электротехника, Направленность (профиль) – Электропривод и автоматика  
промышленных установок и технологических комплексов

Невинномысск 2025

## **Содержание**

**Тема «Физическое и математическое моделирование в электроприводе»**

Лабораторная работа № 1 Моделирование электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения

**Тема «Основные структурные звенья системы электропривода»**

Лабораторная работа № 2 Математическое моделирование механической части электропривода

Лабораторная работа № 3 Моделирование силовых управляемых преобразователей

**Тема «Одноконтурная система автоматического управления двигателя постоянного тока»**

Лабораторная работа № 4 Моделирование электропривода постоянного тока по системе «тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока независимого возбуждения»

**Тема «Принципы оптимизации в системах подчиненного регулирования координат»**

Лабораторная работа № 5 Моделирование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Список литературы

# **Тема «Физическое и математическое моделирование в электроприводе»**

## **Лабораторная работа № 1 Моделирование электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения**

**Цель работы:** исследование динамических свойств двигателя постоянного тока независимого возбуждения, выявление влияния параметров двигателя и нагрузки на динамические характеристики двигателя, получение навыков построения динамических характеристик при ненулевых начальных условиях.

### **1 Общие сведения и рекомендации**

Электрические машины постоянного тока представляют собой электромеханические преобразователи (ЭМП) электрической энергии в механическую и наоборот и подчиняются общим законам электромеханического преобразования энергии.

Принципиальная электрическая схема двигателя изображена на рисунке 1.1, где показаны: обмотка дополнительных полюсов (ДП), компенсационная обмотка (КО), являющиеся вспомогательными в машине, поэтому при математическом описании принимаются во внимание только их электрические параметры. Влияние вихревых токов в крупных машинах при изменении магнитного потока учитывается обмоткой ОВТ.

К числу основных обмоток, участвующих в электромеханическом преобразовании энергии, относятся обмотка якоря (ОЯ) и обмотка возбуждения (ОВ).

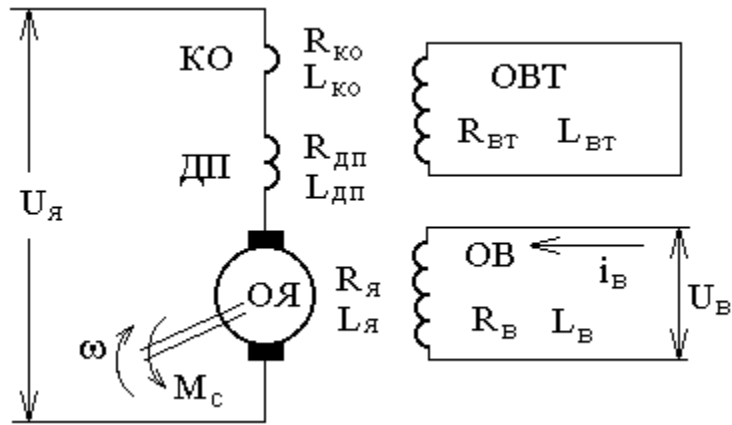


Рисунок 1.1 – Принципиальная электрическая схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Физические процессы, протекающие в цепи якоря, описываются следующим уравнением:

$$U_{\dot{y}} = R_{\dot{y}\ddot{\Sigma}} \cdot I_{\dot{y}} + k \cdot \hat{O} \cdot \omega, \quad (1.1)$$

где  $R_{\dot{y}\ddot{\Sigma}} = R_{\dot{y}} + R_{\dot{d}n} + R_{ko}$  – активное сопротивление цепи якоря, Ом;  $L_{\dot{y}\ddot{\Sigma}} = L_{\dot{y}} + L_{\dot{d}n} + L_{ko}$  – индуктивность цепи якоря, Гн;  $\Phi$  – магнитный поток обмотки возбуждения, Вб;  $k = p_i \cdot N / (2 \cdot \pi \cdot a)$  – конструктивный коэффициент;  $p_n$  – число пар полюсов;  $N$  – число активных проводников;  $a$  – число пар параллельных ветвей обмотки якоря;  $\omega$  – угловая скорость якоря,  $c^{-1}$ .

Уравнение механического движения электродвигателя имеет вид:

$$M - M_c = J \cdot d\omega/dt, \quad (1.2)$$

где  $M$ ,  $M_c$  – соответственно момент двигателя и статический момент, приведенный к валу двигателя, Н·м;  $J$  – момент инерции двигателя,  $кг \cdot м^2$ .

## 2 Задание для домашней подготовки

1. Изучить возможности и правила работы с комплектом программных средств MATLAB+Simulink+пакеты расширения.
2. Выбрать двигатель постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ), руководствуясь данными таблицы 1.
3. Для выбранного двигателя составить математические модели, описывающие его динамику в режимах пуска и изменения нагрузки.
4. Изучить теоретический материал по математическому моделированию двигателя постоянного тока независимого возбуждения, по динамической механической характеристике ДПТ НВ и динамической жесткости.

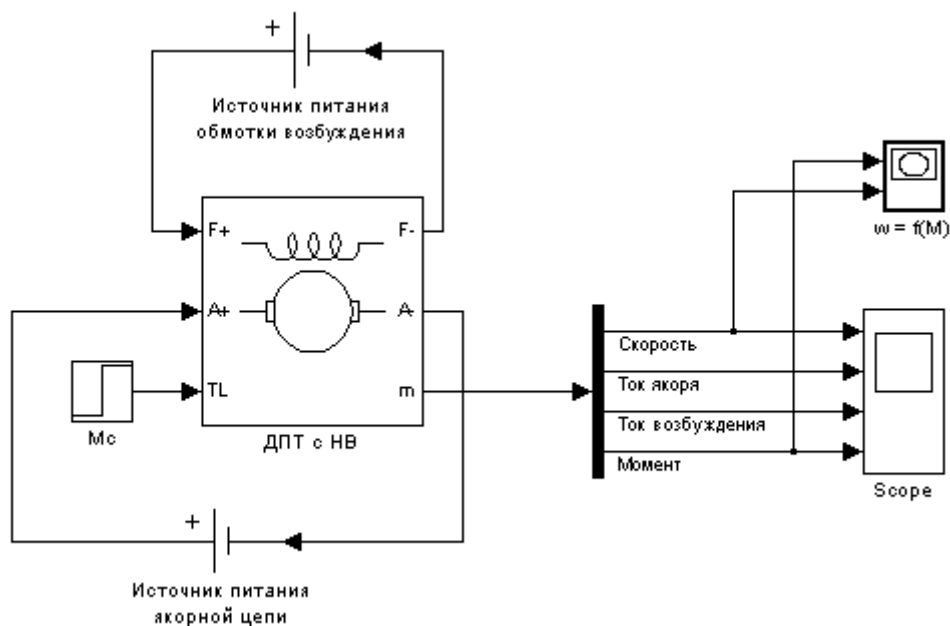


Рисунок 1.2 – Вариант модели ДПТ с НВ для исследования переходных процессов при пуске

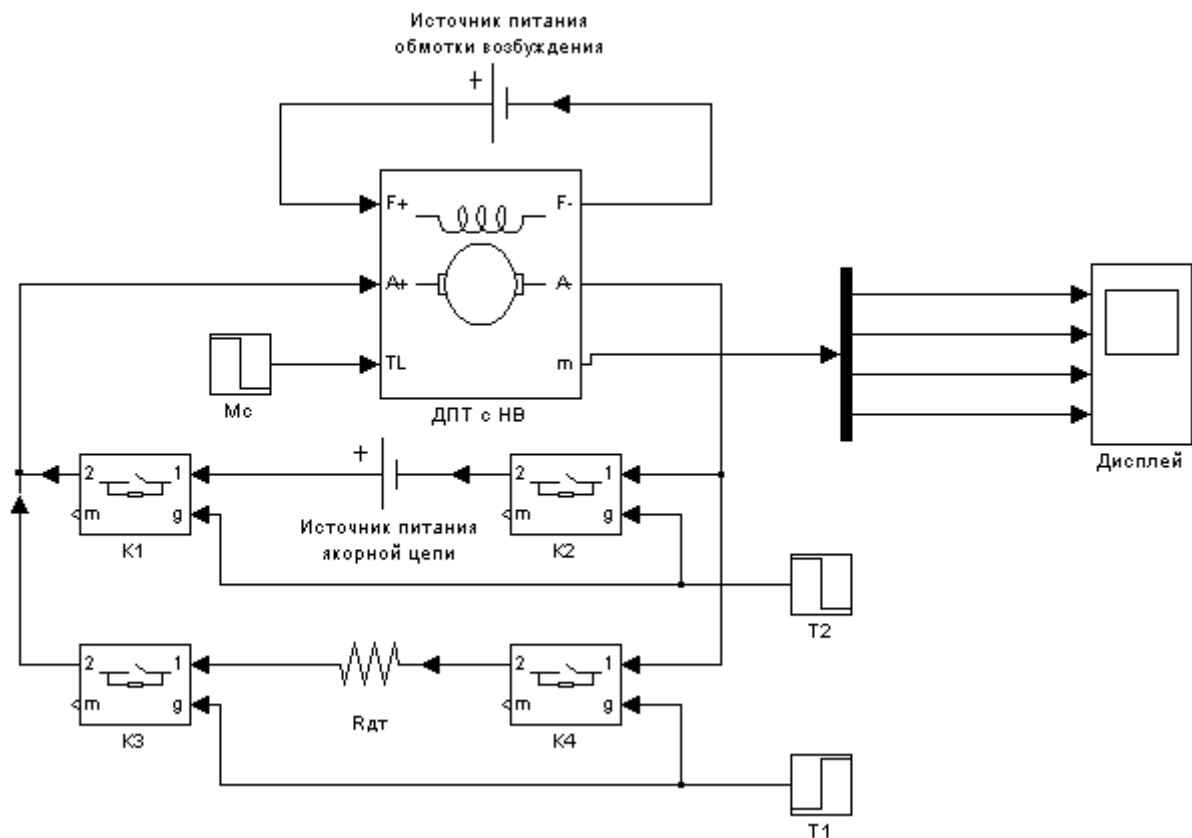


Рисунок 1.3 – Вариант модели ДПТ с НВ для исследования динамического торможения

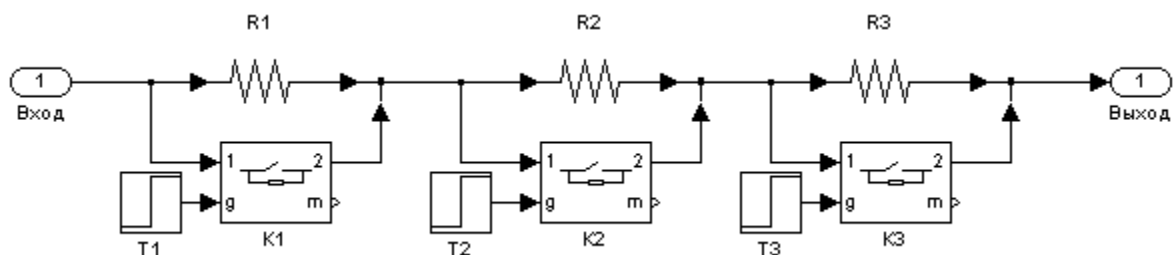


Рисунок 1.4 – Вариант модели пускового реостата

### 3 Задание к лабораторной работе

1. Составить схему модели ДПТ с НВ.
2. Рассчитать переходные процессы пуска ДПТ с НВ.
3. Рассчитать сопротивление динамического торможения, обеспечивающее двукратное ограничение тока якоря.
4. Составить схему модели динамического торможения ДПТ с НВ.

5. Составить схему для торможения ДПТ с НВ противовключением.
6. Рассчитать пусковой реостат для нормального пуска в три ступени.
7. Составить модель реостатного пуска ДПТ с НВ.
8. Рассчитать переходные процессы при ступенчатом пуске ДПТ с НВ.
9. Сделать выводы по работе.

#### **4 Содержание отчета**

Отчет должен содержать:

1. Цель работы.
2. Исходные данные в соответствии с вариантом задания.
3. Схему модели ДПТ с НВ.
4. Схему модели ДПТ с НВ при динамическом торможении.
5. Схему модели ДПТ с НВ при реостатном пуске.
6. Схему модели ДПТ с НВ при торможении противовключением.
7. Расчеты пускового реостата и сопротивления динамического торможения.
8. Результаты расчета (требуемые графики функций и таблицы результатов расчета требуемых величин).
9. Выводы по работе.

#### **5 Контрольные вопросы**

1. Назначение, основные возможности и область применения программных средств MATLAB, Simulink и пакетов расширения.
2. Физический смысл частотных и временных характеристик.

3. Охарактеризуйте каналы управления ДПТ НВ на основе полной структурной схемы двигателя и при  $\Phi = const$ .

4. Понятие о динамической механической характеристике двигателя и ее назначении. Каким образом осуществляется ее построение?

5. Как влияют параметры цепи якоря на динамическую механическую характеристику?

6. Понятие о динамической жесткости механической характеристики и ее назначении.

7. Как влияют параметры цепи якоря на динамическую жесткость механической характеристики ДПТ НВ?

Таблица 1 – Исходные данные

№	Тип двигателя	$P_{2ном},$ кВт	$U_{я},$ В	$U_{в},$ В	$n_{ном},$ об/м ин	$I_{я},$ А	$I_{в},$ А	$R_{я}+R_{дп},$ Ом	$R_{в},$ Ом	$L_{я},$ мГн	$L_{в},$ Гн	$J,$ кг*м <sup>2</sup>
1	2ПН90М	1	220	110	3000	5,27	1	4,788	110,4	48	11,2	0,004
2	2ПН100М	2	220	220	3000	10,8	0,7	1,65	318	26	45,1	0,011
3	2ПН132М	4	220	220	1500	21,65	1,37	1,08	160,8	11	18,4	0,038
4	2ПН132L	3	220	110	1000	15,62	2,44	1,824	45	18,1	5,5	0,048
5	2ПФ132М	4	440	220	1500	9,37	1,65	3,92	133,2	38,6	13,2	0,038
6	2ПН160М	13	220	220	2120	66,13	2,98	0,164	73,8	2,2	9,6	0,083
7	2ПН160L	11	440	220	1600	26,44	2,8	0,899	78,36	12,5	8,5	0,1
8	2ПО160М	6	220	220	1600	31	1,24	0,463	177,6	7,1	24,6	0,083
9	2ПО160L	10	440	220	2120	24,11	1,57	0,666	140,4	12	18,4	0,1
10	2ПФ160М	16	220	220	3150	80,15	3,45	0,0732	63,72	0,99	11,3	0,083
11	2ПФ180М	15	220	220	1500	85,5	76,01	3,73	0,168	59,04	2,7	9,4
12	2ПФ180L	25	440	220	2200	89,5	59,5	3,99	0,264	55,2	4,4	7,4
13	2ПН200М	60	440	220	3150	90,5	145,44	5,24	0,0912	42	1,6	6,1
14	2ПФ200М	22	220	220	1600	87,5	110,3	3,99	0,0912	55,2	1,6	10,6
15	2ПФ200L	30	220	220	1500	88,5	148,3	5,78	0,0612	38,04	1,2	9,3



# Тема «Основные структурные звенья системы электропривода»

## Лабораторная работа № 2 Математическое моделирование механической части электропривода

**Цель работы:** Исследование динамических свойств механической части электропривода на примере трехмассовых и эквивалентных им двухмассовых расчетных схем.

### 1 Общие сведения и рекомендации

Механическая часть реального электропривода представляет собой многомассовую упругую механическую систему, в которой наличие упругих связей накладывает определенные особенности на протекание в ней динамических процессов, отличающихся от процессов в одномассовом звене.

Для описания динамических свойств механической системы наиболее универсальными являются уравнения движения в обобщенных координатах, то есть уравнения Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial W_k}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial W_k}{\partial q_i} = Q_i, \quad (2/1)$$

где  $W_k$  – запас кинетической энергии системы, выраженный через обобщенные координаты  $q_i$  (угловые и линейные перемещения) и обобщенные скорости  $\dot{q}_i$  (угловые или линейные скорости);  $Q_i = \delta A_i / \delta q_i$  – обобщенная сила (момент или усилие), определяемая суммой элементарных работ  $\delta A_i$  всех действующих сил на возможном перемещении  $\delta q_i$ .

Число обобщенных координат, как и число уравнений Лагранжа, описывающих динамические характеристики объекта моделирования,

соответствует числу степеней свободы объекта, в данном случае – механической системы.

При наличии в кинематической схеме механической части электропривода передаточных устройств, обеспечивающих согласование форм или скоростей движения исполнительного органа с двигателем, целесообразно привести переменные и параметры механической системы к валу двигателя. Это позволяет получить расчетную схему, дающую наглядное представление о реальном влиянии действующих масс, жесткостей на динамические свойства механической части электропривода (МЧ ЭП). Кроме того, в этом случае значительно проще составить систему уравнений Лагранжа, представляющую математическую модель исследуемого объекта.

В лабораторной работе предлагается выполнить исследование динамики на примере расчетной схемы (рисунок 2.1), в которой обобщенными координатами являются угловые перемещения масс  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$ , и соответствующие им обобщенные угловые скорости  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ .

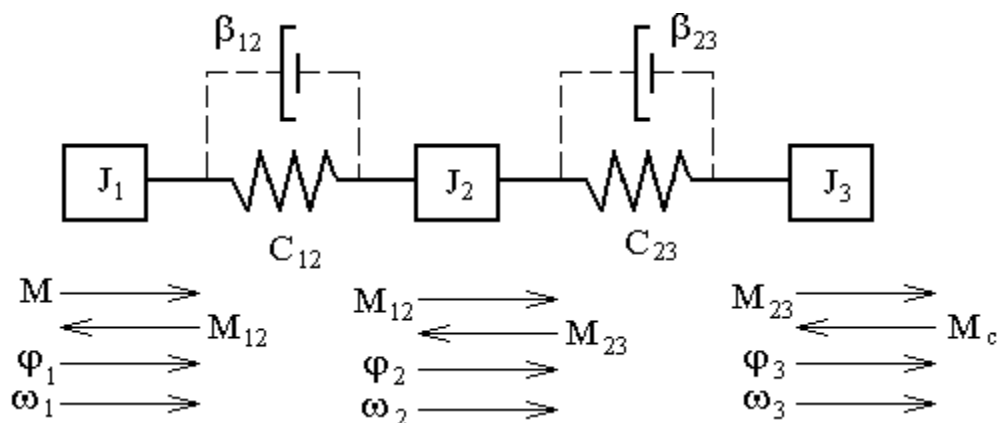


Рисунок 2.1 – Расчетная схема трехмассовой последовательной упругой системы

В расчетной схеме статические моменты, обусловленные силами трения в элементах кинематической цепи первой ( $J_1$ ) и второй ( $J_2$ ) масс, ввиду их малости приняты равными нулю. В расчетной схеме действуют:  $M$  – момент электродвигателя (ЭД),  $M_{12}$ ,  $M_{23}$  – моменты

упругой деформации,  $M_c$  – статический момент исполнительного органа рабочей машины. Кроме того, на схеме приведены следующие параметры:  $C_{12}$ ,  $C_{23}$  – жесткости упругих связей между массами,  $\beta_{12}$ ,  $\beta_{23}$  – коэффициенты внутреннего вязкого трения.

В данной лабораторной работе математическую модель системы можно разделить на две части: модель электрической части и модель механической части.

Математическая модель электрической части представляется следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{\hat{a}} = \frac{R_d}{k\hat{O}} \cdot (1 + T_{\hat{a}} \cdot p) \\ U_{\hat{y}} = R_{\hat{y}\Sigma} \cdot (1 + T_{\hat{y}} \cdot p) \cdot i_{\hat{y}} + k\hat{O} \cdot \omega_1 \\ M = i_{\hat{y}} \cdot k\hat{O} \\ T_{\hat{a}} = \frac{L_{\hat{a}}}{R_{\hat{a}}} \\ T_{\hat{y}} = \frac{L_{\hat{y}}}{R_{\hat{y}\Sigma}} \end{array} \right. \quad (1)$$

Математическая модель механической части представляется следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} M - M_{12} - M_{c1} = J_1 p \omega_1 \\ M_{12} - M_{23} - M_{c2} = J_2 p \omega_2 \\ M_{23} - M_{c3} = J_3 p \omega_3 \\ M_{12} = C_{12} (\phi_1 - \phi_2) \\ M_{23} = C_{23} (\phi_2 - \phi_3) \end{array} \right. \quad (2)$$

Структурная схема, построенная на основе этих двух моделей, представлена на рисунке 2.2.

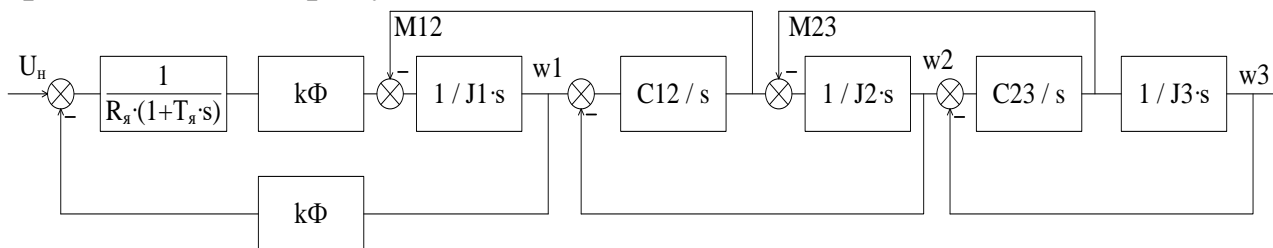


Рисунок 2.2 – Структурная схема трехмассовой механической части с последовательной расчетной схемой

На практике чаще используют эквивалентную расчетную схему двухмассовой упругой системы (рисунок 2.3), к которой приводят трехмассовую механическую систему. Однако при этом переходе теряются некоторые особенности исследуемого объекта, на что следует обратить внимание при моделировании трехмассовой и эквивалентной ей двухмассовой механических систем.

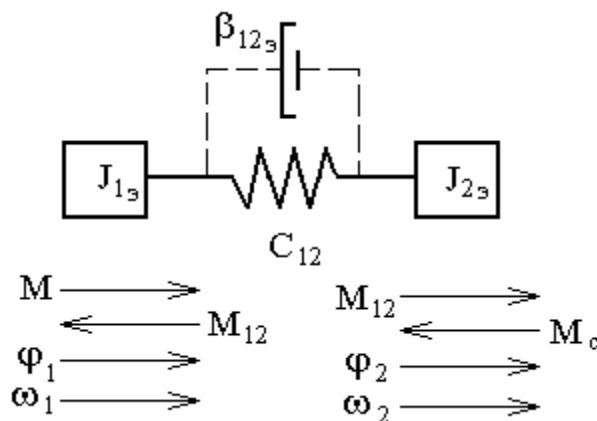


Рисунок 2.3 – Эквивалентная расчетная схема двухмассовой упругой механической системы

## 2 Задание для домашней подготовки

1. Составить математическое описание и структурную схему заданного механизма в абсолютных величинах.
2. Привести трехмассовую механическую систему к эквивалентной двухмассовой и составить для нее математическое описание и структурную схему в абсолютных единицах.

### 3 Задание к лабораторной работе

1. Набрать структурную схему трехмассовой механической части с последовательной расчетной схемой.
2. Снять частотные и временные характеристики  $\omega_1(t)$ ,  $\omega_2(t)$ ,  $\omega_3(t)$ ,  $M_{12}(t)$ ,  $M_{23}(t)$  при ступенчатом управляющем воздействии и зафиксировать передаточные функции по этим каналам.
3. Набрать структурную схему эквивалентной двухмассовой механической части и снять частотные и временные характеристики  $\omega_1(t)$ ,  $\omega_2(t)$ ,  $M_{12}(t)$ , при ступенчатом управляющем воздействии и зафиксировать передаточные функции по этим каналам.
4. Выполнить сравнительный анализ частотных и временных характеристик трех- и двухмассовой механических систем и выявить отличительные признаки между ними.
5. Осуществить варьирование параметров двухмассовой механической системы и выявить их влияние на частотные и временные характеристики объекта моделирования, изменяя параметры МЧ ЭП  $J_2$  и  $C_{12}$  изменить в пределах  $(1 \dots 3)J_2$  и  $(0.5 \dots 1.5)C_{12}$  при числе исследуемых значений не менее трех.

### 4 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Цель работы.
2. Выбор мощности и параметры выбранного электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения.
3. Расчетную и структурную схемы (математическую модель) трехмассовой механической системы в абсолютных единицах.
4. Частотные и временные характеристики трехмассовой модели механической системы. Анализ характеристик и выводы.

5. Приведение параметров трехмассовой расчетной схемы к эквивалентной двухмассовой. Математические модели двухмассовой механической системы в абсолютных единицах.

6. Частотные и временные характеристики двухмассовой эквивалентной механической системы. Анализ характеристик и выводы.

7. Сравнительный анализ частотных и временных характеристик трех- и двухмассовых систем, отличительные признаки.

8. Исследование влияния параметров двухмассовой механической системы на её частотные и временные характеристики.

9. Выводы по работе.

## **5 Контрольные вопросы**

1. Исследование динамики систем автоматического управления, методы и принципы исследования.

2. Назначение, виды и отличительные признаки расчетных схем механической части электропривода.

3. Понятие о математической модели объекта; требования, предъявляемые к математической модели.

4. Какая связь существует между частотными и временными характеристиками моделируемого объекта?

5. Как влияют параметры двухмассовой упругой механической части электропривода на частотные и временные характеристики моделируемого объекта?

Принципиальные отличия частотных и временных характеристик трех- и двухмассовых механических систем. Анализ причины отличий.

Таблица 2 – Варианты заданий

Вар. №	Параметры								
	$J_2$	$J_3$	$C_{12}$	$C_{23}$	$\lambda_{12}$	$\lambda_{23}$	$M_c$	$\varepsilon_{max}$	$\omega$
1.	0.1	0.6	100	125	0.1	0.1	20	50	105
2.	0.2	0.5	125	150	0.15	0.15	40	50	105
3.	0.3	0.4	150	100	0.2	0.2	80	50	105
4.	0.1	0.7	150	125	0.1	0.1	20	75	157
5.	0.2	0.5	175	150	0.2	0.2	30	75	157
6.	0.3	0.3	200	175	0.3	0.3	40	75	157
7.	0.15	0.8	175	200	0.1	0.15	50	100	230
8.	0.2	0.9	200	150	0.2	0.2	75	100	230
9.	0.25	1.0	150	125	0.3	0.25	100	100	230
10.	0.3	1.1	250	200	0.15	0.1	30	125	262
11.	0.4	1.3	275	225	0.2	0.15	60	125	262
12.	0.5	1.4	300	250	0.25	0.3	90	125	262
13.	0.35	0.9	250	300	0.15	0.25	15	150	314
14.	0.45	1.2	225	250	0.25	0.2	30	150	314
15.	0.55	1.5	275	225	0.3	0.15	45	150	314

## Лабораторная работа № 3

### Моделирование силовых управляемых преобразователей

**Цель работы:** Исследовать модели силовых управляемых преобразователей.

#### 1 Общие сведения и рекомендации

Модель диода состоит из последовательно включенных резистора  $R_{on}$ , индуктивности  $L_{on}$ , источника постоянного напряжения  $V_f$  и ключа SW (рис.3.1). Блок логики управляет работой ключа. При положительном напряжении на диоде ( $V_{ak} - V_f$ ) происходит замыкание ключа и через прибор начинает протекать ток. Размыкание ключа (выключение диода) выполняется при снижении тока  $I_{ak}$ , протекающего через диод, до нуля.

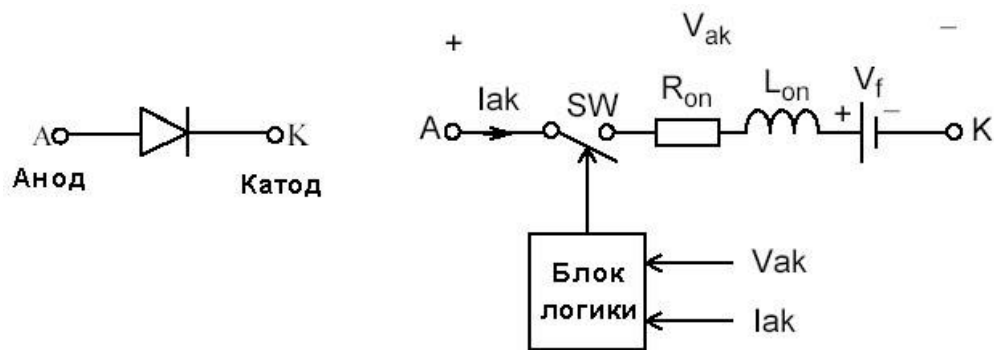


Рисунок 3.1 – Модель диода

Статическая вольт-амперная характеристика модели диода показана на рисунке 3.2.

В модели параллельно самому диоду включена последовательная RC-цепь, выполняющая демпфирующие функции.

Упрощенная модель тиристора состоит из последовательно включенных резистора  $R_{on}$ , индуктивности  $L_{on}$ , источника постоянного напряжения  $V_f$  и ключа SW (рис.3.3).



Рисунок 3.2 – Статическая ВАХ модели диода

Блок логики управляет работой ключа. При положительном напряжении на тиристоре ( $V_{ak} - V_f$ ) и наличии положительного сигнала на управляющем электроде ( $g$ ) происходит замыкание ключа и через прибор начинает протекать ток. Размыкание ключа (выключение тиристора) выполняется при снижении тока  $I_{ak}$ , протекающего через тиристор, до нуля.

В уточненной модели тиристора длительность управляющего импульса должна быть такой, чтобы при включении анодный ток тиристора превысил ток удержания ( $I_l$ ). В противном случае включение не произойдет. При выключении тиристора длительность приложения отрицательного напряжения анод-катод должна превышать время выключения тиристора ( $T_q$ ). В противном случае произойдет автоматическое включение тиристора даже если управляющий сигнал равен нулю.

Статические вольт-амперные характеристики модели тиристора для включенного и выключенного состояний показаны на рис 3.4.

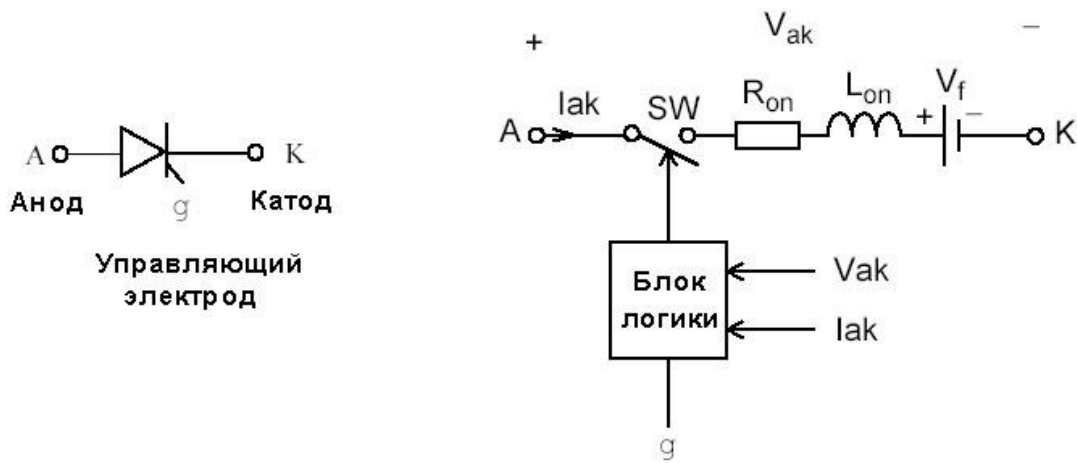


Рисунок 3.3 – Упрощенная модель тиристора

В модели параллельно самому тиристоры включена последовательная RC-цепь, выполняющая демпфирующие функции.

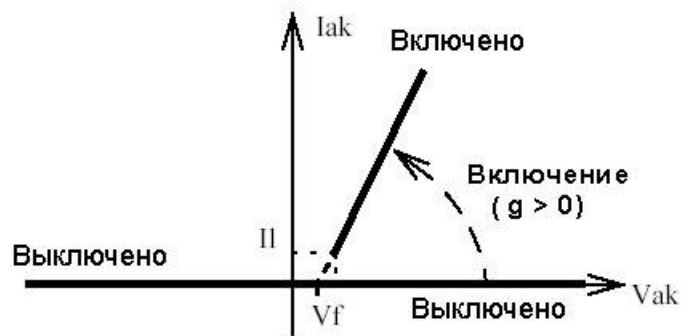


Рисунок 3.4 – Статические ВАХ модели тиристора

Модель полностью управляемого тиристора состоит из последовательно включенных резистора  $R_{on}$ , индуктивности  $L_{on}$ , источника постоянного напряжения  $V_f$  и ключа SW (рис.3.5). Блок логики управляет работой ключа. При положительном напряжении на тиристоре  $(V_{ak}-V_f)$  и наличии положительного сигнала на управляющем электроде ( $g$ ) происходит замыкание ключа и через прибор начинает протекать ток. Для выключения прибора достаточно управляющий сигнал снизить до величины равной нулю. Выключение

GTO-тиристора произойдет также при спадании анодного тока до нуля несмотря на наличие управляющего сигнала.

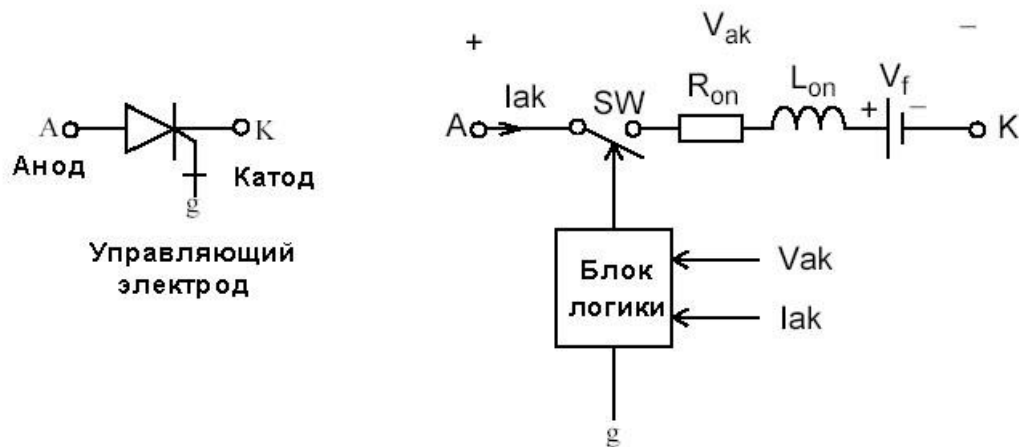


Рисунок 3.5 – Модель полностью управляемого тиристора

Статические вольт-амперные характеристики модели полностью управляемого тиристора для включенного и выключенного состояний показаны на рисунке 3.6.

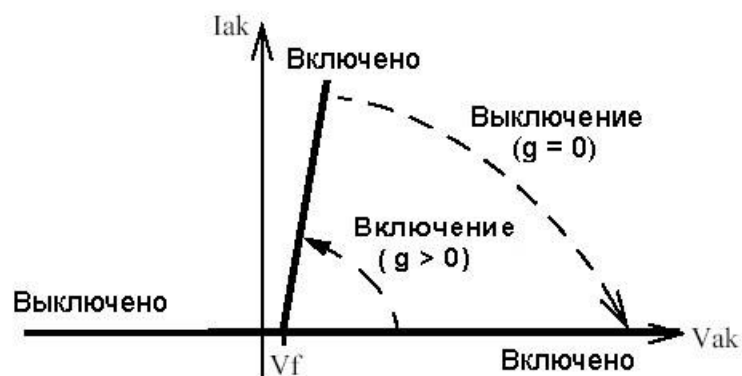


Рисунок 3.6 – Статические ВАХ модели полностью управляемого тиристора

В модели параллельно самому тиристоры включена последовательная RC-цепь, выполняющая демпфирующие функции.

В модели учитывается также конечное время выключения тиристора. Процесс выключения разбит на два участка (рис.3.7) и характеризуется, соответственно, временем спада ( $T_f$ ), при котором анодный ток уменьшается до 0.1 от тока в момент выключения ( $I_{max}$ ) и временем затягивания ( $T_t$ ), при котором анодный ток уменьшается до нуля.

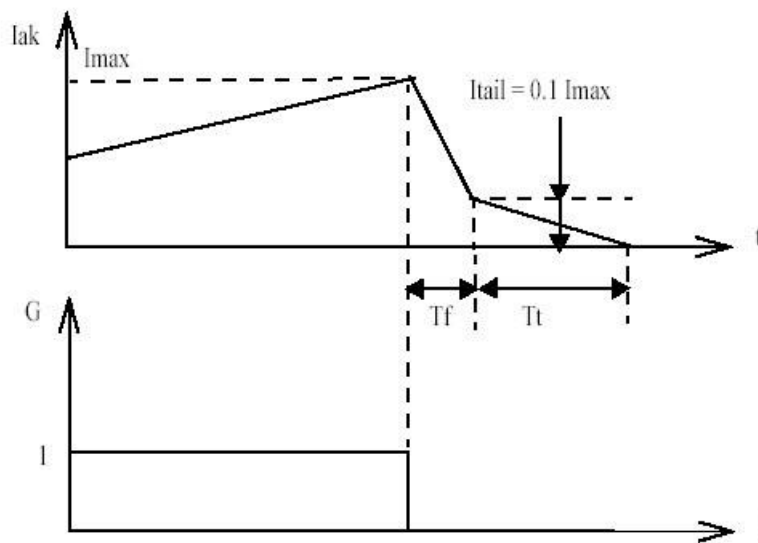


Рисунок 3.7 – Процесс выключения полностью управляемого тиристора

Модель IGBT транзистора состоит из последовательно включенных резистора  $R_{on}$ , индуктивности  $L_{on}$ , источника постоянного напряжения  $V_f$  и ключа SW (рис.3.8). Блок логики управляет работой ключа. Включение прибора происходит в случае, если напряжение коллектор-эмиттер положительно и больше, чем  $V_f$ , на затвор транзистора подан положительный сигнал ( $g > 0$ ). Выключение прибора происходит при уменьшении сигнала на затворе до нуля ( $g = 0$ ). При отрицательном напряжении коллектор-эмиттер транзистор находится в выключенном состоянии.

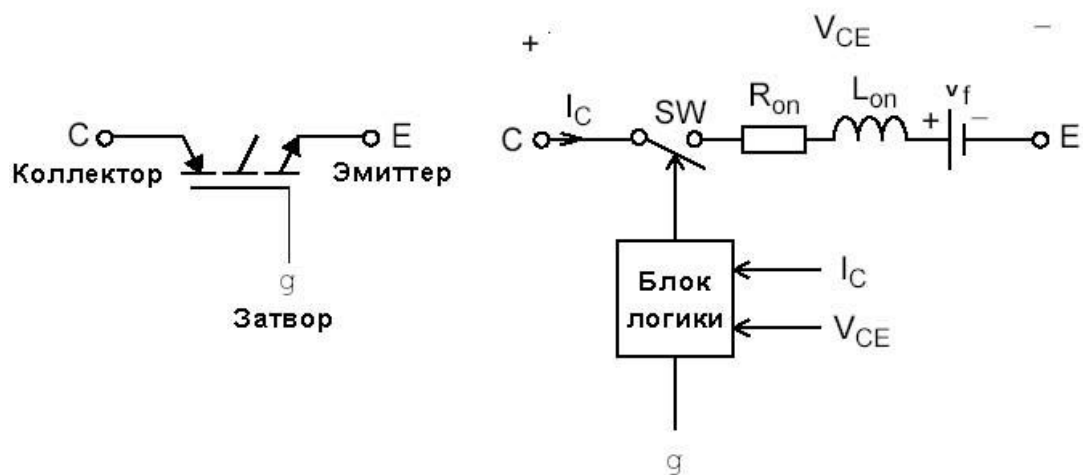


Рисунок 3.8 – Модель IGBT транзистора

Статические вольт-амперные характеристики модели IGBT транзистора для включенного и выключенного состояний показаны на рисунке 3.9.

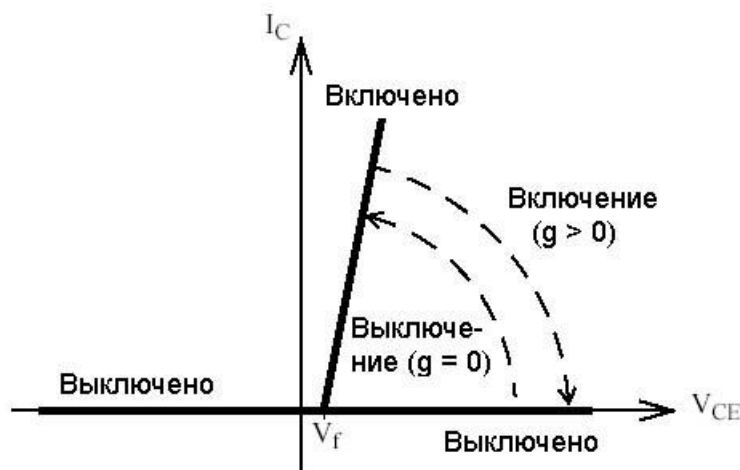


Рисунок 3.9 – Статические ВАХ модели IGBT транзистора

В модели параллельно самому прибору включена последовательная RC-цепь, выполняющая демпфирующие функции.

В модели учитывается также конечное время выключения транзистора. Процесс выключения разбит на два участка (рис.3.10) и

характеризуется, соответственно, временем спада ( $T_f$ ), при котором ток коллектор-эмиттер уменьшается до 0.1 от тока в момент выключения ( $I_{max}$ ) и временем затягивания ( $T_t$ ), при котором ток уменьшается до нуля.

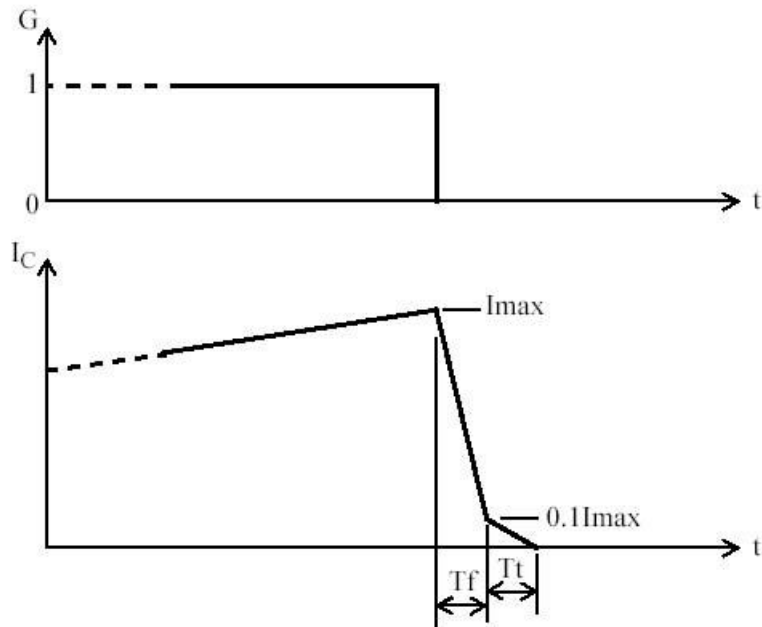


Рисунок 3.10 – Процесс выключения IGBT транзистора

В модели параллельно самому прибору включена последовательная RC-цепь, выполняющая демпфирующие функции.

Блок, моделирующий универсальный мост, позволяет выбирать количество плеч моста (от 1 до 3), вид полупроводниковых приборов (диоды, тиристоры, идеальные ключи, а также полностью управляемые тиристоры, IGBT и MOSFET транзисторы, шунтированные обратными диодами). В модели можно также выбрать вид зажимов А, В и С (входные или выходные). На рис. 3.11 в качестве примера представлены схемы тиристорного трехфазного моста для обоих вариантов вида входных зажимов.

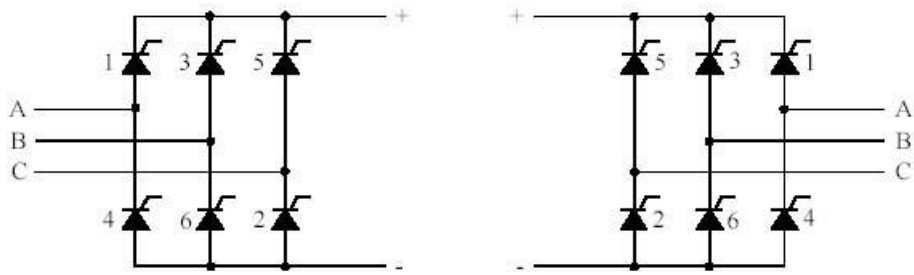


Рисунок 3.11 – Схемы тиристорного трехфазного моста

Подготовка к работе. Для получения допуска к работе студент должен знать принцип работы диода, тиристора, биполярного и полевого транзисторов, устройство однополупериодного выпрямителя, управляемого однополупериодного выпрямителя, импульсного регулятора напряжения, широтно-импульсного преобразователя постоянного напряжения, полумостового однофазного инвертора, трехфазного управляемого тиристорного выпрямителя, однофазного инвертора, расчетные соотношения для типовых схем, статические и динамические характеристики указанных устройств.

## 2 Задание к лабораторной работе

Получив вариант задания, студент, руководствуясь указаниями преподавателя, составляет схемы соответствующих виртуальных моделей.

Задавая время и параметры входных координат, студент проводит исследование и получает временные и энергетические характеристики.

### **3 Содержание отчета**

Отчет должен содержать следующие пункты:

- 1) цель работы;
- 2) исходные данные;
- 3) схемы виртуальных моделей УВ;
- 4) настройки блоков управления;
- 5) результаты моделирования и измерения временных и энергетических характеристик;
- 6) выводы для каждой исследуемой модели.

### **4 Контрольные вопросы**

1. Охарактеризуйте математическую модель диода.
2. Какие математические модели существуют для описания тиристора?
3. Охарактеризуйте математическую модель IGBT транзистора.
4. Какие математические модели существуют для описания тиристорного преобразователя постоянного тока? Охарактеризуйте критерии выбора той или иной модели.

## **Тема «Одноконтурная система автоматического управления двигателя постоянного тока»**

### **Лабораторная работа № 4 Моделирование электропривода постоянного тока по системе «тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока независимого возбуждения»**

**Цель работы:** исследование динамических свойств электропривода (ЭП) по системе тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ), работающего по разомкнутому циклу.

#### **1 Общие сведения и рекомендации**

Для реализации указанной цели лабораторной работы нужно, прежде всего, ознакомиться с математическим описанием и структурными схемами разомкнутых электромеханических систем (ЭМС), обратив особое внимание на обобщенную ЭМС с линеаризованной механической характеристикой.

В структурную схему исследуемой электромеханической системы входит двигатель постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ), двухмассовая упругая механическая часть, рассмотренные ранее, и тиристорный преобразователь в качестве регулируемого источника напряжения.

Тиристорный преобразователь характеризуется своими регулировочными и внешними характеристиками в режимах непрерывного и прерывистых токов, коэффициентом усиления, динамическими характеристикам в переходных процессах. Входной координатой тиристорного преобразователя (ТП) является напряжение управления ( $U_y$ ), выходной координатой – выпрямленная

ЭДС, величина которой обозначается в установившемся режиме ( $E_d$ ), а в переходных процессах ( $e_d$ ).

Управляющие свойства ТП определяются характеристиками управления  $E_d=f(U_y)$ . Внутренняя координата ТП – угол отпирания  $\alpha$  определяется характеристикой системы импульсно-фазового управления (СИФУ) в виде математического описания  $\alpha=f_y(U_y)$ , а внешняя координата – математическим описанием характеристики вентильной группы  $E_d=f_{\alpha}(\alpha)$ . Результирующая характеристика управления ТП представляет собой функцию  $E_d=f_{\alpha}[f_y(U_y)]=f(U_y)$ . Поскольку для всех ТП характеристики управления вентильных групп одинаковы, то вид результирующей характеристики ТП будет зависеть от характеристики СИФУ, которая определяется формой опорного напряжения: косинусоидальной или пилообразной.

Динамические свойства тиристорного преобразователя определяются неполной управляемостью тиристоров и параметрами сети, ведущей преобразователь. В зависимости от исполнения СИФУ и его инерционности тиристорный преобразователь для линейного участка характеристики управления представляется передаточными функциями вида:

$$W(p) = \frac{E_d(p)}{U_y(p)} = \frac{k_n}{T_n p + 1}, \quad (3.1)$$

$$W(p) = \frac{k_n \cdot e^{-\tau \cdot p}}{T_n p + 1}, \quad (3.2)$$

$$W(p) = k_n \cdot e^{-\tau \cdot p}, \quad (3.3)$$

где  $k_n$ ,  $T_n$  – соответственно, коэффициент усиления и постоянная времени тиристорного преобразователя,  $T_n=0,01 \dots 0,015$  с;  $\tau_n$  – чистое запаздывание,  $\tau_n=0,007 \dots 0,015$  с.

Математическое описание динамических процессов, протекающих в управляемом выпрямителе, является

многовариантным, зависящим от требуемой степени адекватности, определяемой задачами конкретного исследуемого электропривода. Для выбора типа математической модели ТП вводится показатель  $K_p$ , равный отношению длительности переходного процесса в системе автоматического управления к длительности проводимости отдельного вентиля.

При  $K_p < 10$  применяют импульсные модели, при  $K_p < 30$  – непрерывные нелинейные модели и при  $K_p > 30$  – упрощенные непрерывные модели. Чем большее значение имеет показатель  $K_p$ , тем менее точной моделью ТП можно воспользоваться при исследовании динамических процессов электропривода. Учитывая значения  $K_p$  для промышленных электроприводов, чаще применяют непрерывные модели тиристорных преобразователей.

## **2 Задание для домашней подготовки**

1. Подготовить математическое описание и структурную схему тиристорного преобразователя.
2. Подготовить математическую модель и структурную схему регулируемого электропривода постоянного тока.
3. Изучить теоретический материал по анализу устойчивости систем со звеньями чистого запаздывания.

## **3 Задание к лабораторной работе**

1. Составить схему модели неуправляемого выпрямителя в соответствии с вариантом задания (нулевая или мостовая).
2. Составить схему модели ЭП по системе «Тиристорный преобразователь – ДПТ НВ».
3. Рассчитать переходные процессы ДПТ НВ при питании якоря от управляемого выпрямителя при различных  $U_y$ .

4. Рассчитать переходные процессы наброса и сброса нагрузки (момент нагрузки номинальный).

5. Исследовать форму питающего напряжения и тока якоря при питании якоря ДПТ НВ от тиристорного преобразователя и сравнить их с графиками при питании якоря ДПТ от источника бесконечной мощности.

6. Сделать выводы.

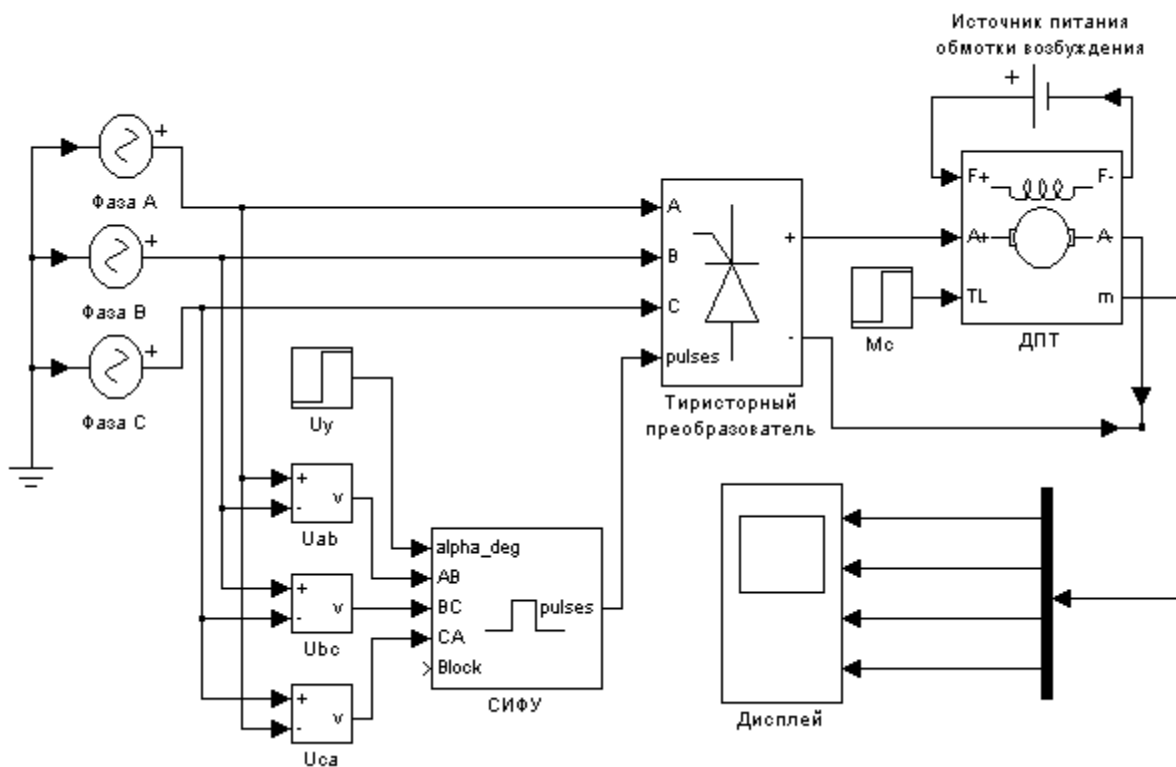


Рисунок 3.1 – Вариант модели ЭП по системе «тиристорный преобразователь – ДПТ НВ»

#### 4 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Цель работы.
2. Схему модели ЭП по системе «тиристорный преобразователь – ДПТ НВ».
3. Графики переходных процессов пуска ДПТ НВ при питании от управляемого выпрямителя (момент нагрузки равен 0).

4. Графики переходных процессов наброса и сброса нагрузки (момент нагрузки равен  $M_{ном}$ ).

5. Результаты расчета (требуемые графики функций и таблицы результатов расчета требуемых величин).

6. Выводы по работе.

## **5 Контрольные вопросы**

1. Какие математические модели существуют для описания тиристорного преобразователя постоянного тока? Охарактеризуйте критерии выбора той или иной модели.

2. Как выглядят частотные и временные характеристики ТП при ступенчатом управляющем и возмущающем воздействиях?

3. Как влияют электромагнитная и электромеханическая постоянные времени на динамические характеристики электропривода с одномассовой механической частью?

4. Как получить оптимальные условия демпфирования механических колебаний электроприводом?

5. Как отражаются на частотных и временных характеристиках условия оптимального демпфирования механических колебаний?

6. Учет звеньев чистого запаздывания при анализе устойчивости технических систем.

## Тема «Принципы оптимизации в системах подчиненного регулирования координат»

### Лабораторная работа № 5 Моделирование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

**Цель работы:** Освоить методику составления структурной модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Исследовать основные динамические характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при пуске, набросе и сбросе нагрузки. Исследовать переходные процессы при динамическом торможении АД.

#### 1 Общие сведения

Состояние многофазной машины переменного тока в стационарном и переходном режимах описывается потокосцеплениями обмоток статора  $\psi_s$  и ротора  $\psi_r$ , а также угловой скоростью ротора  $\omega$ . Потокосцепления являются направленными величинами, вращающимися в плоскости, перпендикулярной оси двигателя. Если считать эту плоскость комплексной, то потокосцепления могут быть представлены векторами. Эти векторы непосредственно связаны с векторами токов статора и ротора:

$$\dot{\psi}_s = \dot{i}_s L_s + \dot{i}'_r L_m; \quad (4.1)$$

$$\dot{\psi}_r = \dot{i}'_r L_r + \dot{i}_s L_m, \quad (4.2)$$

где  $i_s$ ,  $i_r'$  – ток статора и приведенный ток ротора;  $L_s$ ,  $L_r$ ,  $L_m$  – индуктивности обмоток статора, ротора и намагничивания.

Каждый вектор тока и пропорциональный ему вектор потока равен геометрической сумме компонент, образуемых в отдельных фазах. Для трехфазной обмотки, оси которой смещены в пространстве на  $120^\circ$ , результирующий вектор тока будет:

$$i = \frac{2}{3} (i_a + i_b e^{j120^\circ} + i_c e^{j240^\circ}). \quad (4.3)$$

Токи в фазах можно определить из проекции вектора тока на соответствующие оси обмоток. Например,  $\hat{i}_a = | \dot{i} |$ .

Изложенная методика применима непосредственно к линейным, симметричным машинам с синусоидальным распределением потока, питающимся от симметричной сети синусоидальными напряжениями и токами. Путем определенного расширения математического описания могут быть учтены такие факторы, как несимметрия поля, высшие гармоники, переменные параметры.

В координатной системе, вращающейся относительно оси обмотки с угловой скоростью  $\omega_k$ , для каждой трехфазной обмотки справедливо уравнение:

$$u^k = i^k R + \frac{d\psi^k}{dt} + j\omega_k \psi^k, \quad (4.4)$$

где индексом  $k$  у символов векторов обозначена выбранная координатная система.

В часто применяемой координатной системе, вращающейся синхронно с частотой статора, можно записать следующее уравнение напряжений для статора двигателя:

$$\dot{u}_s = i_s R_s + \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_s \psi_s, \quad (4.5)$$

где  $R_s$ ,  $\omega_s$  – активное сопротивление обмоток статора и угловая частота поля статора; соответственно для ротора:

$$\dot{u}_r = i'_r R'_r + \frac{d\psi_r}{dt} + j\omega_s \psi_r, \quad (4.6)$$

где  $R'_r$ ,  $\omega_r$  – приведенное активное сопротивление обмоток ротора и угловая частота тока ротора.

Момент двигателя соответственно будет:

$$M = \frac{3}{2} k_s \operatorname{Im}\{\psi_s i'_r\} z_p = -\frac{3}{2} k_r \operatorname{Im}\{\psi_r i'_s\} z_p, \quad (4.7)$$

где  $z_p$  – число пар полюсов машины;  $k_s$ ,  $k_r$  – коэффициенты электромагнитной связи статора ( $k_s = L_m/L_s$ ) и ротора ( $k_r = L_m/L_r$ ).

В АД вследствие равномерности воздушного зазора магнитные сопротивления остаются постоянными при любых взаимных расположениях обмоток статора и ротора. Поэтому для описания АД можно использовать любую ортогональную систему координат, вращающуюся в пространстве с произвольной скоростью. Эти уравнения в векторной форме, записанные во вращающейся с произвольной частотой системе координат, имеют следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U}_s = R_s \dot{I}_s + \frac{d\dot{\Psi}_s}{dt} + j\omega_k \dot{\Psi}_s, \\ 0 = R_r \dot{I}_r + \frac{d\dot{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega) \dot{\Psi}_r, \\ \dot{\Psi}_s = L_s \dot{I}_s + L_m \dot{I}'_r, \\ \dot{\Psi}_r = L_m \dot{I}_s + L_r \dot{I}'_r, \\ \dot{I}_m = \dot{I}_s + \dot{I}'_r, \\ \dot{\Psi}_m = L_m \dot{I}_m, \\ M_{эм} = \frac{3}{2} Z_p k_r (\dot{\Psi}_r \times \dot{I}_s), \\ M_{эм} - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \end{array} \right. \quad (4.8)$$

где  $\dot{U}_s$ ,  $\dot{I}_s$ ,  $\dot{\Psi}_s$  – результирующие векторы напряжения, тока и потокосцепления статора;  $\dot{I}_r$ ,  $\dot{\Psi}_r$  – те же параметры для ротора;  $\dot{I}_m$ ,  $\dot{\Psi}_m$  – результирующие вектора тока намагничивания и потокосцепления в воздушном зазоре;  $L_s = L_{s\sigma} + L_m$ ,  $L_r = L_{r\sigma} + L_m$  – полные индуктивности соответственно статора и ротора ( $L_{s\sigma}$ ,  $L_{r\sigma}$  – соответственно индуктивности рассеяния статора и ротора,  $L_m$  – индуктивность контура намагничивания);  $\omega$ ,  $\omega_k$  – электрическая частота вращения ротора асинхронного двигателя (АД) и частота вращения системы координат;  $Z_p$  – число пар полюсов;  $M$ ,  $M_c$  – электромагнитный момент двигателя и момент сопротивления нагрузки;  $J$  – момент инерции двигателя;  $T_r = \frac{L_r}{R_r}$  – электромагнитная постоянная времени роторной цепи;  $\omega_i$ ,  $\omega_{2i}$  – соответственно частота вращения вектора  $\dot{I}_s$  и относительное скольжение ротора относительно  $\dot{I}_s$ .

Конфигурация структурной схемы асинхронного двигателя зависит от выбранного типа модели и системы координат. Рассмотрим формирование структурных схем двухфазных моделей со скоростью вращения координатной системы  $\omega_k=0$  и  $\omega_k=\omega_s$ .

Для составления структурной схемы в неподвижных осях используем систему уравнений, а также уравнение момента двигателя, записанное в проекциях на оси:

$$M = \frac{2}{3} Z_p L_m (i_{rd} i_{sq} - i_{rq} i_{sd}) \quad (4.9)$$

и уравнение движения:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \quad (4.10)$$

## 2 Порядок выполнения работы

1. Определить основные параметры асинхронного двигателя в соответствии с вариантом задания.
2. Составить структурную схему, по которой будут исследованы основные динамические режимы.
3. Исследовать пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором под нагрузкой (момент нагрузки равен  $0,5 M_{ном}$ ).
4. Исследовать переходной процесс наброса дополнительной нагрузки (момент дополнительной нагрузки равен  $M_{ном}$ ).
5. Исследовать переходной процесс сброса нагрузки (момент дополнительной нагрузки равен  $M_{ном}$ ).
6. Исследовать переходные процессы при динамическом торможении АД.
7. Сделать выводы по работе.

Примечание: результаты расчета переходных процессов асинхронного двигателя в основных динамических режимах должны быть представлены в виде графиков функций  $M=f(t)$ ,  $I_1=f(t)$ ,  $\omega=f(t)$  и фазового портрета –  $\omega=f(M)$ , а также в виде таблицы результатов расчета этих величин (количество точек должно быть достаточно для полного представления переходного процесса).

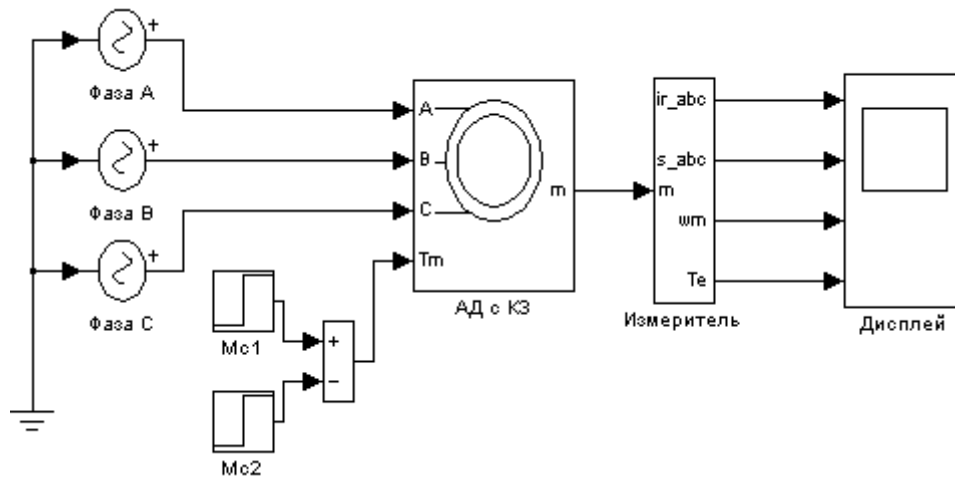


Рисунок 4.1 – Вариант модели для исследования переходных процессов пуска, наброса, сброса нагрузки

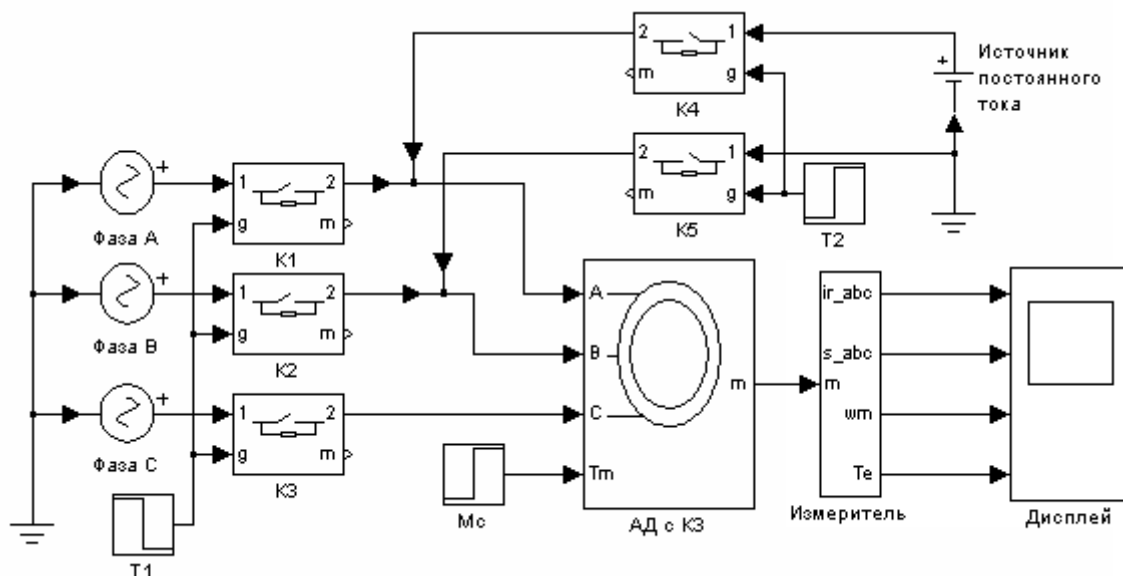


Рисунок 4.2 – Вариант модели для исследования переходных процессов при динамическом торможении АД

### 3 Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Исходные данные, в соответствии с вариантом задания.
3. Структурная схема модели для исследования динамических режимов работы асинхронного двигателя при прямом подключении к сети.
4. Структурная схема модели АД для исследования режима динамического торможения.
5. Результаты расчета (требуемые графики переходных процессов и таблицы результатов расчета требуемых величин).
6. Выводы по работе.

Таблица 3 – Исходные данные

		Данные двигателя											
№ варианта	Тип двигателя	$P_2$	$\eta$	$\cos$	$I_{ном}$	$S_{ном}$	$X_m$	$R_1$	$R_2$	$M_{max}$	$M_{пуск}$	$S_k$	$J$
		кВт	%	-	А	-	Ом	Ом	Ом	-	-		
1	4А100S2У3	4,0	86,5	0,89	7,9	0,033	95,0	1,51	1,01	2,5	2,0	0,28	0,0059
2	4А160S2У3	15,0	88,0	0,91	28,4	0,021	31,0	0,403	0,171	2,2	1,4	0,12	0,048
3	4А180S2У3	22,0	88,5	0,91	41,4	0,019	19,1	0,207	0,106	2,5	1,4	0,125	0,07
4	4А200L2У3	45,0	91,0	0,9	83,3	0,018	12,95	0,071	0,053	2,5	1,4	0,115	0,17
5	4А100L4У3	4,0	84,0	0,84	8,6	0,046	61,5	1,72	1,36	2,4	2,0	0,315	0,011
6	4А100M4У3	11,0	87,5	0,87	21,9	0,028	32,1	0,432	0,321	3,0	2,2	0,195	0,04
7	4А100S4У3	22,0	90,0	0,9	41,2	0,020	21,4	0,219	0,112	2,3	1,4	0,14	0,19
8	4А200L4У3	45,0	92,0	0,9	82,4	0,016	12,3	0,091	0,045	2,5	1,4	0,1	0,45
9	4А112M6У3	4,0	82,0	0,81	9,1	0,051	48,2	1,86	1,49	2,5	2,0	0,38	0,021
10	4А160M6У3	15,0	87,5	0,87	29,9	0,026	22,1	0,457	0,206	2,0	1,2	0,14	0,18
11	4А200M6У3	22,0	90,0	0,9	41,2	0,023	21,9	0,267	0,128	2,4	1,3	0,135	0,4
12	4А200L6У3	30,0	90,5	0,9	55,8	0,021	14,6	0,181	0,087	2,4	1,3	0,135	0,45
13	4А132S8У3	4,0	83,0	0,7	10,4	0,061	33,7	1,43	1,22	2,6	1,9	0,36	0,042
14	4А160M8У3	11,0	87,0	0,75	25,5	0,025	17,2	0,568	0,267	2,2	1,4	0,15	0,18
15	4А200L8У3	22,0	88,5	0,84	44,8	0,027	15,2	0,304	0,142	2,0	1,2	0,13	0,45

#### **4 Контрольные вопросы**

1. Назначение, основные возможности и область применения программных средств MATLAB, Simulink и пакетов расширения.
2. Физический смысл частотных и временных характеристик.
3. Понятие о динамической механической характеристике двигателя и ее назначении. Каким образом осуществляется ее построение?
4. Как влияют параметры статора и ротора на динамическую механическую характеристику?
5. Понятие о динамической жесткости механической характеристики и ее назначении.

## Список литературы

1. Дьяконов, В.П. MATLAB 6/6.1/6.5+SIMULINK 4/5 в математике и моделировании: Полное руководство пользователя / В.П.Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. 576с.
2. Моделирование систем: учебник / С.И. Дворецкий и др. – М.: Академия, 2009. – 320 с. – (Высшее профессиональное образование).
3. Москаленко, В.В. Электрический привод: Учебник/ В.В.Москаленко. – М.: Академия, 2007. – 368с. – (Высшее профессиональное образование).
4. Советов, Б.Я. Моделирование систем: практикум: учебное пособие/ Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.:Высшая школа,2003. – 295 с.
5. Теория автоматического управления: учебник / под ред. В.Б.Яковлева. – Изд. 3-е, стер. – М.: Высшая школа, 2009. – 567 с.
6. Шишмарев, В.Ю. Основы автоматического управления: учебное пособие / В.Ю. Шишмарев. – М.: Академия, 2008. - 352 с..
7. Шишмарев, В.Ю. Типовые элементы систем автоматического управления: учебник / В.Ю.Шишмарев. – 4-е изд., стер. – М. : Академия, 2009. – 304 с..