



Негосударственное частное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Технический университет УГМК»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ  
КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**ЭЛЕКТРОПРИВОД В СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ**

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
Профиль подготовки Электрооборудование и электрохозяйство горных и  
промышленных предприятий  
Уровень высшего образования бакалавриат  
*(бакалавриат, специалитет, магистратура)*

Автор - разработчик: Бородин М. Ю., канд. техн. наук, доцент

Рассмотрено на заседании кафедры энергетики

Одобрено Методическим советом университета 30 июня 2021 г., протокол № 4

г. Верхняя Пышма  
2021

Выполнение контрольной работы заключается в составлении ответов на вопросы, указанные в соответствии с заданным вариантом. Ответы должны быть полными, с соответствующими пояснениями, с указанием необходимых формул, с разъяснением физических процессов в элементах автоматизированного электропривода, с представлением необходимых графических зависимостей, с учетом требований ГОСТ на обозначения в электрических схемах и требований по оформлению работ, предъявляемых в негосударственном частном образовательном учреждении высшего образования «Технический университет УГМК».

Заданный вариант определяется по последней цифре номера зачетной книжки.

Контрольные работы выполняются в течение семестра и представляются преподавателю до экзаменационной сессии.

Последняя цифра номера зачетной книжки	Задания
1	<p>Задача 1. При проектировании системы Г-Д с тиристорным возбудителем осуществить выбор генератора и привести принципиальную силовую схему. Паспортные данные двигателя взять из таблицы 2 (по номеру варианта)</p> <p>Задача 2. Привести структурную схему электропривода по системе Г-Д и пояснить физический смысл динамических звеньев, показанных на схеме.</p> <p>Задача 3. На рисунке приведен фрагмент схемы контура регулирования одного из параметров электропривода в системе Г-Д. Пояснить назначение регулятора и всех элементов схемы?</p>  <p>Задача 4. Начертить схему реверсивного тиристорного преобразователя и поясните порядок переключения вентилей.</p>

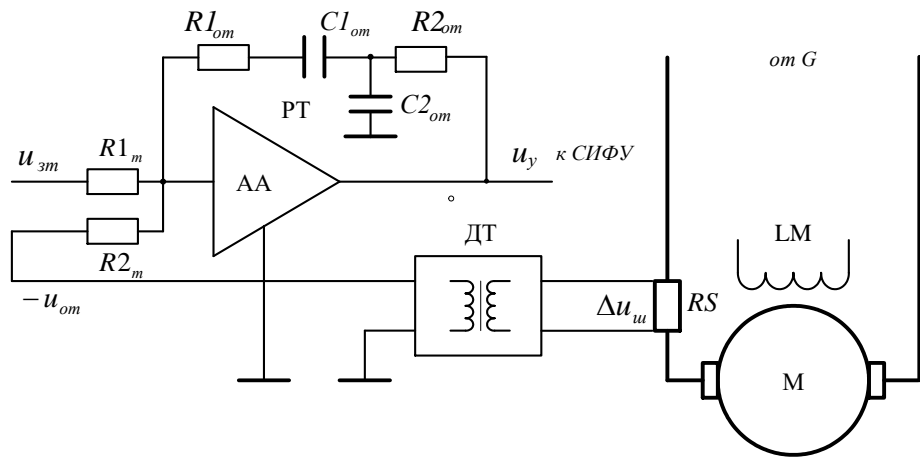
2	<p>Задача 1. Для заданного типа электродвигателя постоянного тока и 12-пульсной реверсивной схемы выпрямления рассчитать и выбрать согласующий трансформатор системы ТП-Д. Тип двигателя согласно варианту выбирается из табл.1. трансформатор выбирается из табл.3.</p> <p>Задача 2. Для выбранного типа трансформатора (в задаче1) и заданной схемы выпрямления провести расчет и выбор вентилей 12-пульсной схемы выпрямления, а также расчет и выбор сглаживающего дросселя.</p> <p>Задача 3. Рассчитать параметры структурной схемы разомкнутой системы электропривода по схеме ТП-Д. Для проведения расчетов рекомендуется воспользоваться числовыми значениями параметров, взятых из задач 1 и 2.</p> <p>Задача 4. Записать формулы для определения электромагнитной и электромеханической постоянной времени, сопротивления якорной цепи, коэффициента связи ЭДС и скорости вращения, конструктивной постоянной машины постоянного тока.</p>
3	<p>Задача 1. Для заданного типа электродвигателя постоянного тока и 12-пульсной реверсивной схемы выпрямления рассчитать и выбрать согласующий трансформатор системы ТП-Д</p> <p>Задача 2. Для выбранного типа трансформатора (в задаче1) и заданной схемы выпрямления провести расчет и выбор вентилей 12-пульсной схемы выпрямления, а также расчет и выбор сглаживающего дросселя.</p> <p>Задача 3. Рассчитать параметры структурной схемы разомкнутой системы электропривода по схеме ТП-Д. Для проведения расчетов рекомендуется воспользоваться числовыми значениями параметров, взятых из задач 1 и 2.</p> <p>Задача 4. Начертить функциональную и структурную схему схему двухконтурной системы регулирования скорости с внутренним контуром регулирования тока и пояснить назначение элементов схемы.</p>
4	<p>Задача 1. Для заданного типа электродвигателя постоянного тока и 12-пульсной реверсивной схемы выпрямления рассчитать и выбрать согласующий трансформатор системы ТП-Д. Тип двигателя согласно варианту выбирается из табл.1. трансформатор выбирается из табл.3.</p> <p>Задача 2. Для выбранного типа трансформатора (в задаче1) и заданной схемы выпрямления провести расчет и выбор вентилей 12-пульсной схемы выпрямления, а также расчет и выбор сглаживающего дросселя.</p> <p>Задача 3. Рассчитать параметры структурной схемы разомкнутой системы электропривода по схеме ТП-Д. Для проведения расчетов рекомендуется</p>

	<p>воспользоваться числовыми значениями параметров, взятых из задач 1 и 2.</p> <p>Задача 4. Замкнутая система скалярного управления с обратной связью по скорости АД. Функциональная схема. Назначение элементов. Расчет регулятора скорости.</p>
5	<p>Задача 1. Для заданного типа электродвигателя постоянного тока и 12-пульсной реверсивной схемы выпрямления рассчитать и выбрать согласующий трансформатор системы ТП-Д. Тип двигателя согласно варианту выбирается из табл.1. трансформатор выбирается из табл.3.</p> <p>Задача 2. Для выбранного типа трансформатора (в задаче1) и заданной схемы выпрямления провести расчет и выбор вентилей 12-пульсной схемы выпрямления, а также расчет и выбор сглаживающего дросселя.</p> <p>Задача 3. Рассчитать параметры структурной схемы разомкнутой системы электропривода по схеме ТП-Д. Для проведения расчетов рекомендуется воспользоваться числовыми значениями параметров, взятых из задач 1 и 2.</p> <p>Задача 4. Замкнутая система скалярного управления с обратной связью по скорости АД. Функциональная схема. Назначение элементов. Расчет регулятора скорости.</p>
6	<p>Задача 1. Для заданного типа электродвигателя постоянного тока и 12-пульсной реверсивной схемы выпрямления рассчитать и выбрать согласующий трансформатор системы ТП-Д. Тип двигателя согласно варианту выбирается из табл.1. трансформатор выбирается из табл.3.</p> <p>Задача 2. Для выбранного типа трансформатора (в задаче1) и заданной схемы выпрямления провести расчет и выбор вентилей 12-пульсной схемы выпрямления, а также расчет и выбор сглаживающего дросселя.</p> <p>Задача 3. Рассчитать параметры структурной схемы разомкнутой системы электропривода по схеме ТП-Д. Для проведения расчетов рекомендуется воспользоваться числовыми значениями параметров, взятых из задач 1 и 2.</p> <p>Задача 4. Для системы частотно-токового скалярного управления АД привести функциональную схему и пояснить назначение элементов.</p>
7	<p>Задача 1. Для заданного типа электродвигателя постоянного тока и 12-пульсной реверсивной схемы выпрямления рассчитать и выбрать согласующий трансформатор системы ТП-Д. Тип двигателя согласно варианту выбирается из табл.1. трансформатор выбирается из табл.3.</p> <p>Задача 2. Для выбранного типа трансформатора (в задаче1) и заданной схемы выпрямления провести расчет и выбор вентилей 12-пульсной схемы выпрямления, а также расчет и выбор сглаживающего дросселя.</p>

	<p>Задача 3. Рассчитать параметры структурной схемы разомкнутой системы электропривода по схеме ТП-Д. Для проведения расчетов рекомендуется воспользоваться числовыми значениями параметров, взятых из задач 1 и 2.</p> <p>Задача 4. Приведите структурную схему системы векторного управления и поясните назначение элементов</p>
8	<p>Задача 1. Для заданного типа электродвигателя постоянного тока и 12-пульсной реверсивной схемы выпрямления рассчитать и выбрать согласующий трансформатор системы ТП-Д. Тип двигателя согласно варианту выбирается из табл.1. трансформатор выбирается из табл.3.</p> <p>Задача 2. Для выбранного типа трансформатора (в задаче1) и заданной схемы выпрямления провести расчет и выбор вентилей 12-пульсной схемы выпрямления, а также расчет и выбор сглаживающего дросселя.</p> <p>Задача 3. Рассчитать параметры структурной схемы разомкнутой системы электропривода по схеме ТП-Д. Для проведения расчетов рекомендуется воспользоваться числовыми значениями параметров, взятых из задач 1 и 2.</p> <p>Задача 4. Привести структурную схему электропривода по системе Г-Д и пояснить физический смысл динамических звеньев, показанных на схеме.</p>
9	<p>Задача 1. Для заданного типа электродвигателя постоянного тока и 12-пульсной реверсивной схемы выпрямления рассчитать и выбрать согласующий трансформатор системы ТП-Д. Тип двигателя согласно варианту выбирается из табл.1. трансформатор выбирается из табл.3.</p> <p>Задача 2. Для выбранного типа трансформатора (в задаче1) и заданной схемы выпрямления провести расчет и выбор вентилей 12-пульсной схемы выпрямления, а также расчет и выбор сглаживающего дросселя.</p> <p>Задача 3. Рассчитать параметры структурной схемы разомкнутой системы электропривода по схеме ТП-Д. Для проведения расчетов рекомендуется воспользоваться числовыми значениями параметров, взятых из задач 1 и 2.</p> <p>Задача 4. При проектировании системы Г-Д с тиристорным возбудителем осуществить выбор генератора и привести принципиальную силовую схему. Паспортные данные двигателя П173-12К:</p>
10	<p>Задача 1. Для заданного типа электродвигателя постоянного тока и 12-пульсной реверсивной схемы выпрямления рассчитать и выбрать согласующий трансформатор системы ТП-Д. Тип двигателя согласно варианту выбирается из табл.1. трансформатор выбирается из табл.3.</p>

	<p>Задача 2. Для выбранного типа трансформатора (в задаче1) и заданной схемы выпрямления провести расчет и выбор вентилей 12-пульсной схемы выпрямления, а также расчет и выбор сглаживающего дросселя.</p> <p>Задача 3. Рассчитать параметры структурной схемы разомкнутой системы электропривода по схеме ТП-Д. Для проведения расчетов рекомендуется воспользоваться числовыми значениями параметров, взятых из задач 1 и 2.</p> <p>Задача 4. При проектировании системы Г-Д с тиристорным возбудителем осуществить выбор генератора и привести принципиальную силовую схему. Паспортные данные двигателя взять из табл.2</p>
11	<p>Задача 1. Для заданного типа электродвигателя постоянного тока и 12-пульсной реверсивной схемы выпрямления рассчитать и выбрать согласующий трансформатор системы ТП-Д. Тип двигателя согласно варианту выбирается из табл.1. трансформатор выбирается из табл.3.</p> <p>Задача 2. Для выбранного типа трансформатора (в задаче1) и заданной схемы выпрямления провести расчет и выбор вентилей 12-пульсной схемы выпрямления, а также расчет и выбор сглаживающего дросселя.</p> <p>Задача 3. Рассчитать параметры структурной схемы разомкнутой системы электропривода по схеме ТП-Д. Для проведения расчетов рекомендуется воспользоваться числовыми значениями параметров, взятых из задач 1 и 2.</p> <p>Задача 4. При проектировании системы Г-Д с тиристорным возбудителем осуществить выбор генератора и привести принципиальную силовую схему. Паспортные данные двигателя взять из табл.1.</p>
12	<p>Задача 1. Для заданного типа электродвигателя постоянного тока и 12-пульсной реверсивной схемы выпрямления рассчитать и выбрать согласующий трансформатор системы ТП-Д. Тип двигателя согласно варианту выбирается из табл.1. трансформатор выбирается из табл.3.</p> <p>Задача 2. Для выбранного типа трансформатора (в задаче1) и заданной схемы выпрямления провести расчет и выбор вентилей 12-пульсной схемы выпрямления, а также расчет и выбор сглаживающего дросселя.</p> <p>Задача 3. Рассчитать параметры структурной схемы разомкнутой системы электропривода по схеме ТП-Д. Для проведения расчетов рекомендуется воспользоваться числовыми значениями параметров, взятых из задач 1 и 2.</p>

Задача 4. На рисунке приведен фрагмент схемы контура регулирования одного из параметров электропривода в системе Г-Д. Пояснить назначение регулятора и всех элементов схемы?



Задача 1. Для заданного типа электродвигателя постоянного тока и 12-пульсной реверсивной схемы выпрямления рассчитать и выбрать согласующий трансформатор системы ТП-Д. Тип двигателя согласно варианту выбирается из табл.1. трансформатор выбирается из табл.3.

Задача 2. Для выбранного типа трансформатора (в задаче1) и заданной схемы выпрямления провести расчет и выбор вентилей 12-пульсной схемы выпрямления, а также расчет и выбор сглаживающего дросселя.

Задача 3. Рассчитать параметры структурной схемы разомкнутой системы электропривода по схеме ТП-Д. Для проведения расчетов рекомендуется воспользоваться числовыми значениями параметров, взятых из задач 1 и 2.

Задача 4. На рисунке приведен фрагмент схемы контура регулирования одного из параметров электропривода в системе Г-Д. Пояснить назначение регулятора и всех элементов схемы?

14	<p>Задача 1. Для заданного типа электродвигателя постоянного тока и 12-пульсной реверсивной схемы выпрямления рассчитать и выбрать согласующий трансформатор системы ТП-Д. Тип двигателя согласно варианту выбирается из табл.1. трансформатор выбирается из табл.3.</p> <p>Задача 2. Для выбранного типа трансформатора (в задаче1) и заданной схемы выпрямления провести расчет и выбор вентилей 12-пульсной схемы выпрямления, а также расчет и выбор сглаживающего дросселя.</p> <p>Задача 3. Рассчитать параметры структурной схемы разомкнутой системы электропривода по схеме ТП-Д. Для проведения расчетов рекомендуется воспользоваться числовыми значениями параметров, взятых из задач 1 и 2.</p> <p>Задача 4. Приведите типовую схему АВК с трехфазным диодным выпрямителем и тиристорным инвертором . Поясните назначение элементов силовой схемы.</p>

**Критерии оценки выполнения контрольной работы:**

- оценка **«удовлетворительно»** ставится при правильном решении задач по заданному варианту, надлежащем письменном оформлении, выполнении схем и графиков в соответствии ГОСТ и удовлетворительных ответах при защите контрольной работы;
- оценка **«хорошо»** ставится при правильном решении задач по заданному варианту и надлежащем письменном оформлении, выполнении схем и графиков в соответствии ГОСТ, при выполнении задач студентом даны комментарии по каждому действию и обоснования по применению тех или иных типовых методик и обоснованных ответах при защите контрольной работы.
- оценка **«отлично»** при правильном решении задач по заданному варианту и надлежащем письменном оформлении, выполнении схем и графиков в соответствии ГОСТ, при



выполнении задач студентом даны комментарии по каждому действию и обоснования по применению тех или иных типовых методик, даны подробные выводы по полученным результатам и показаны отличные знания при защите контрольной работы.

## Приложение 1

Таблица 1- Технические характеристики тихоходных электродвигателей постоянного тока

Тип электродвигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин	Номинальное напряжение якоря, В	Номинальный ток якоря, А	Номинальный КПД	Момент инерции ротора, кгм <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7
П2-630-214-8КУ4	3150	125	930	3640	0,936	10180
П2-630-214-8КУ4	2500	90	750	3550	0,939	10370
П2-630-214-8КУ4	3150	90	930	3650	0,930	13650
П2-800-253-8КУ4	5000	90	930	5720	0,942	52750
П2-630-213-4КУ4	1600	71	930	1945	0,890	9000
П2-630-214-8КУ4	2000	71	600	3600	0,926	10370
П2-630-215-8КУ4	2500	71	750	3570	0,934	13890
П2-630-216-8КУ4	3150	71	930	3680	0,924	16250
П2-800-253-8КУ4	4000	71	750	5690	0,937	52750
П2-800-255-8КУ4	5000	63	930	5740	0,937	61160
П2-630-213-4КУ4	1250	56	750	1820	0,916	9170
П2-630-214-4КУ4	1600	56	930	1945	0,880	9500

П2-630-215-8КУ4	2000	56	600	3640	0,916	13890
П2-630-216-8КУ4	2500	56	750	3620	0,921	16560
П2-800-253-8КУ4	3200	56	600	5770	0,924	52750
П2-800-255-8КУ4	4000	50	750	5740	0,929	61160
П2-800-256-8КУ4	5000	50	930	5780	0,931	67020
П2-630-214-4КУ4	1250	45	750	1830	0,911	9680
П2-630-216-8КУ4	2000	45	600	3670	0,908	16560
П23-50-3К	1150	40	930	1410	0,877	13930
П26-40-4К	1520	40	600	2860	0,886	18250
П2-630-215-4КУ4	1600	40	930	2000	0,868	12950
П26-50-4К	1920	40	750	2860	0,894	19620
П26-65-7К	2400	40	930	2845	0,907	22170

Таблица-2. Технические характеристики быстроходных электродвигателей постоянного тока

Тип электродвигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин	Номинальное напряжение якоря, В	Номинальный ток якоря, А	Номинальный КПД	Момент инерции ротора, кгм <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7
П2-450-121-4	160	500	440	400	0,895	15,2
П2-450-121-4	250	800	440	610	0,920	15,2
П2-450-121-6	315	1000	440	765	0,925	15,2
П2-450-121-6	400	1250	440	965	0,935	15,2
П2-450-122-4	160	400	440	400	0,940	19,7
П2-450-122-4	250	630	440	615	0,916	19,7
П2-450-122-6	315	800	440	765	0,930	19,7
П2-450-123-4	160	315	440	400	0,880	25,6
П2-450-123-4	250	500	440	610	0,905	25,6
П2-450-123-6	315	630	440	765	0,926	25,6
П2-450-123-6	400	800	440	965	0,935	25,6
П2-450-123-4	160	250	440	410	0,865	33,5

П2-450-123-4	250	400	440	620	0,902	33,5
П2-450-123-6	315	500	440	775	0,920	33,5
П2-450-123-6	400	630	440	980	0,930	33,5
П172-12К	1100	750	550	2130	0,939	350
П173-12К	1300	750	660	2090	0,943	380
П18-33-9К	1600	750	750	2270	0,940	790
П18-40-9К	1950	750	900	2300	0,942	870
П173-12К	1100	600	550	2125	0,941	380
П18-33-9К	1300	600	660	2105	0,936	790
П18-40-9К	1600	600	750	2270	0,940	870
П18-50-9К	1950	600	900	2300	0,943	970
П18-33-9К	1100	500	550	2145	0,932	790
П18-40-9К	1300	500	660	2100	0,939	870
П18-50-9К	1600	500	750	2270	0,940	970

Таблица 3 - Технические характеристики вентиляных трансформаторов

Тип трансформатора	Номинальная мощность, кВА	Линейное напряжение первичной обмотки, В	Фазное напряжение вторичной обмотки, В	Потери, Вт		Напр. КЗ, %
				холостого хода	короткого замыкания	
1	2	3	4	5	6	7
ТСП10/0,7	7,3	380	205	130	320	4,7
ТСП10/0,7	7,3	660	205	130	320	4,7
ТСП16/0,7	14,6	380	205	140	550	5,2
ТСП16/0,7	14,6	660	410	140	550	5,2
ТСП25/0,7	29,1	380	205	210	1100	5,5
ТСП25/0,7	29,1	660	205	210	1100	5,5
ТСП25/0,7	29,1	380	410	210	1100	5,5
ТСП25/0,7	29,1	660	410	210	1100	5,5
ТСП63/0,7	58	380	205	330	1900	5,5
ТСП63/0,7	58	660	205	330	1900	5,5
ТСП63/0,7	58	380	410	330	1900	5,5
ТСП63/0,7	58	660	410	330	1900	5,5
ТСП100/0,7	93	380	205	440	2300	5,8
ТСП100/0,7	93	660	205	440	2300	5,8
ТСП125/0,7	117	380	410	520	2700	5,8
ТСП125/0,7	117	660	410	520	2700	5,8
ТСЗП160/0,72	143	380	101	795	2400	4,5
ТСЗП160/0,74	143	380	202	795	2400	4,5
ТСЗП160/0,73	142	380	315	795	2400	4,5

ТСЗП160/0,71	147	380	416	795	2400	4,7
ТСЗП250/0,71	230	380	100	915	3600	4,5
ТСЗП250/0,72	235	380	208	915	3800	4,7
ТСЗП250/0,75	237	380	267	825	3400	4,4
ТСЗП250/0,74	220	380	315	915	3400	4,4
ТСЗП250/0,73	235	380	416	915	3700	4,7
ТСЗП400/10	362	6000	205	1600	4700	5,3
ТСЗП400/10	351	6000	310	1600	4700	5,6
ТСЗП400/10	364	6000	409	1600	4500	5,3
ТСЗП400/10	402	6000	569	1600	5200	5,8
ТСЗП630/10	580	6000	205	2000	6450	5,9
ТСЗП630/10	554	6000	313	2000	5600	5,9
ТСЗП630/10	580	6000	410	2100	6000	5,9
ТСЗП630/10	645	6000	570	2100	6350	6,2
ТСЗП1000/10	725	6000	205	2650	8000	5,4
ТСЗП1000/10	878	6000	310	2650	8000	5,5
ТСЗП1000/10	938	6000	415	2650	8000	5,6
ТСЗП1000/10	1007	6000	570	2650	8400	6,0
ТСЗП1000/10	1007	6000	712	2650	8400	6,0
ТСЗП1600/10	1450	6000	410	3400	12500	5,5

## Приложение 2

### Примеры расчета

#### Пример 1. Расчет и выбор согласующего трансформатор электропривода системы УВ-Д скиповой подъемной установки

Принимается к проектированию реверсивная двенадцатипульсная трехфазная схема выпрямления, которая предусматривает использование двух трехфазных мостовых выпрямителей, соединенных последовательно. Каждый мостовой выпрямитель питается от отдельного трансформатора с различным соединением вторичных обмоток (“звезда” и “треугольник”).

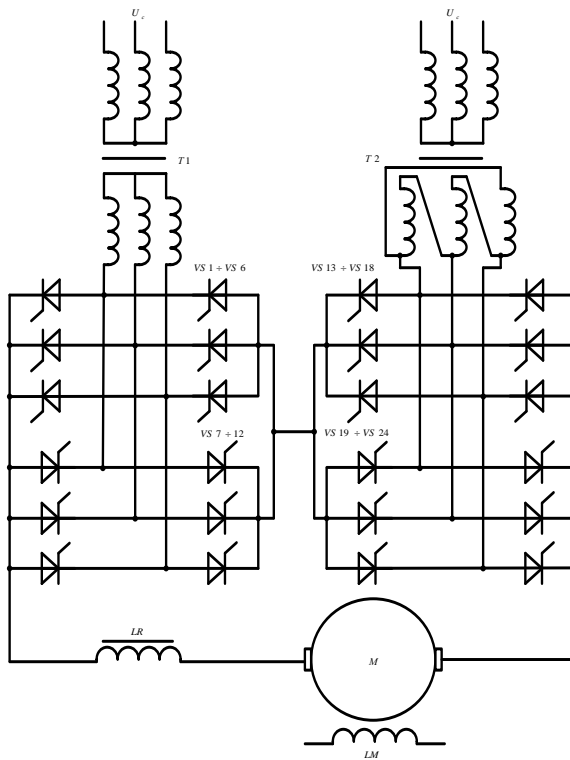


Схема реверсивного электропривода системы ТП-Д с двенадцатипульсовой схемой выпрямления

Типовая мощность трансформатора определяется при из условия  $U_d = U_{ном} / 2 = 300$  В для двенадцатипульсовой схемы выпрямления и  $I_d = I_{ном} = 3640$  А.

$$S_{mp} = \kappa_s \cdot \kappa_c \cdot \kappa_i \cdot \kappa_r \cdot U_d \cdot I_d \cdot 10^{-3} = 1,05 \cdot 1,2 \cdot 1,1 \cdot 1,05 \cdot 300 \cdot 3640 \cdot 10^{-3} = 1589,2 \text{ кВА},$$

где  $\kappa_s = 1,05$  - коэффициент, характеризующий отношение мощности цепи постоянного тока в идеальном выпрямителе с трехфазной мостовой схемой к мощности трансформатора (табл. 1.1);  $\kappa_c$ ;  $\kappa_i$ ;  $\kappa_r$  - принимаются в соответствии с рекомендациями, приводимыми в п.1.3.

Необходимое фазное напряжение вторичной обмотки согласующего трансформатора определяется по формуле

$$U_{2\phi} = \frac{\kappa_c \cdot \kappa_r}{\kappa_u} \cdot U_d = \frac{1,2 \cdot 1,05}{2,34} \cdot 300 = 161,5 \text{ В},$$

где  $\kappa_u = 2,34$  - коэффициент, характеризующий отношение напряжений в идеальном выпрямителе с трехфазной мостовой схемой.

Линейное напряжение вторичной обмотки трансформаторов

$$U_{2л} = \sqrt{3} \cdot U_{2\phi} = \sqrt{3} \cdot 161,5 = 279,7 \text{ В}$$

Действующее значение тока вторичной обмотки трансформаторов из известных соотношений для схемы выпрямления

$$I_2 = \kappa_m \cdot I_d = 0,817 \cdot 3640 = 2974 \text{ А},$$

где  $\kappa_m = 0,817$  - коэффициент, характеризующий отношение токов вторичной обмотки согласующего трансформатора и цепи постоянного тока в идеальном выпрямителе с трехфазной мостовой схемой.

По полученным данным выбираем два трансформатора типа ТСЗ-1600/10 с техническими данными (табл. 3):

$$S_{\text{тр.ном}} = 1600 \text{ кВА}; U_{1\text{л.ном}} = 6000 \text{ В}; U_{2\text{л.ном}} = 400 \text{ В}; P_{\text{КЗ}} = 16000 \text{ Вт}; P_{\text{ХХ}} = 4200 \text{ Вт};$$

$$u_{\kappa} \% = 5,5\%.$$

Номинальный ток первичной обмотки в соответствии с (1.6)

$$I_{1\text{ном}} = \frac{S_{\text{тр.ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{ном}}} = \frac{1600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 154 \text{ А}.$$

Коэффициент трансформации может быть определен по приближенной формуле

$$\kappa_{\text{тр}} \approx \frac{U_{1\text{ном}}}{U_{2\text{ном}}} = \frac{6000}{400} = 15.$$

Активное сопротивление трансформатора определяется в соответствии с формулой

$$R_{\text{тр}} = \frac{P_{\text{КЗ}}}{3 \cdot I_{1\text{ном}}^2 \cdot \kappa_{\text{тр}}^2} = \frac{16000}{3 \cdot 154^2 \cdot 15^2} = 0,001 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление трансформатора определяется

$$X_{\text{тр}} = \frac{u_{\kappa} \% \cdot U_{1\text{ном}}}{100 \cdot I_{1\text{ном}} \cdot \kappa_{\text{тр}}^2} = \frac{5,5 \cdot 6000}{100 \cdot 154 \cdot 15^2} = 0,0095 \text{ Ом}.$$

Активное сопротивление сглаживающего дросселя предварительно может быть принято в соответствии с рекомендациями

$$R_{\text{др}} = \frac{R_{\text{тр}}}{3} = \frac{0,001}{3} = 0,0003 \text{ Ом}.$$

Эквивалентное активное сопротивление, учитывающее снижение выпрямленного напряжения из-за коммутационного процесса в преобразователе определяется

$$R_{\kappa} = \frac{p \cdot X_{\text{тр}}}{2 \cdot \pi} = \frac{12 \cdot 0,0095}{2 \cdot 3,14} = 0,0182 \text{ Ом}.$$

Эквивалентное активное сопротивление преобразователя, учитывая двенадцатипульсную схему выпрямления, определяется по формуле

$$R_n = 2 \cdot R_{\text{тр}} + R_{\text{др}} + 2 \cdot R_{\kappa} = 2 \cdot 0,001 + 0,0003 + 2 \cdot 0,0182 = 0,0387 \text{ Ом}.$$

Имеющиеся данные позволяют проверить выбранный трансформатор по условиям обеспечения необходимой величины напряжения вторичной обмотки трансформатора.

Для этого необходимо найти среднее значение ЭДС преобразователя при номинальном токе нагрузки для двенадцатипульсной схемы выпрямления

$$E'_d = 2 \cdot U_d + I_d \cdot R_n = 2 \cdot 300 + 3640 \cdot 0,0387 = 741 \text{ В}.$$

Максимальное выпрямленное напряжение (при  $\alpha = 0^0$  эл.) для двенадцатипульсовой схемы

$$U_{d0} = 2 \cdot \kappa_u \cdot U_{2\phi,ном} = 2 \cdot 2,34 \cdot 230 = 1076 \text{ В},$$

где  $U_{2\phi,ном} = U_{2л,ном} / \sqrt{3} = 400 / \sqrt{3} = 230 \text{ В}$ .

С учетом возможного падения напряжения сети  $U_c$  на 5% и ограничения минимального угла регулирования значением  $\alpha_{\min} = 20^0$  эл.

$$E_d'' = 0,95 \cdot U_{d0} \cdot \cos \alpha_{\min} = 0,95 \cdot 1076 \cdot 0,94 = 961 \text{ В}.$$

Так как выполняется соотношение  $E_d'' = 961 \text{ В} > E_d' = 741 \text{ В}$ , то трансформатор, по условиям обеспечения необходимой величины напряжения вторичной обмотки, выбран правильно.

Пусковой ток согласно расчетам нагрузочной диаграммы

$$I_{dn} = I_d \cdot \frac{M_{\max}}{M_{ном}} = 3640 \cdot \frac{546,6 \cdot 10^3}{341,3 \cdot 10^3} = 5830 \text{ А}.$$

## Пример 2. Расчет и выбор вентиля двенадцатипульсовой схемы выпрямления

Так как пусковой ток имеет значительную величину, принимается параллельное включение трех вентилях. Среднее значение тока, протекающего через один вентиль при максимальном (пусковом) токе нагрузки, в соответствии с выражением

$$I_{в.ср} = \frac{\kappa_e \cdot I_{dn}}{\kappa_n \cdot n} = \frac{0,33 \cdot 5830}{0,9 \cdot 3} = 712,6 \text{ А},$$

где  $\kappa_e = 0,33$  - коэффициент, характеризующий отношение токов в идеальном выпрямителе с трехфазной мостовой схемой

$\kappa_n = 0,9$  - коэффициент неравномерности протекания токов при параллельном включении тиристор;  $n = 3$  - количество параллельно включенных вентилях.

Максимальное обратное напряжение на вентиле по формуле

$$U_{обр} = \kappa_{обр} \cdot U_{d0} = 1,05 \cdot 1076 = 1130 \text{ В},$$

где  $\kappa_{обр} = 1,05$  - коэффициент, характеризующий соотношение между  $U_{обр}$  и  $U_{d0}$  для трехфазной мостовой схемы.

Найденные значения  $I_{в.ср}$  и  $U_{обр}$  используются для выбора вентиля преобразователя. При этом должны выполняться следующие условия:

- средний ток через вентиль  $I_{в.ср}$  не должен превышать предельного тока  $I_n$  выбираемого вентиля при соответствующей температуре его корпуса или типе охладителя и заданных условий охлаждения (табл. 1.4), т.е.  $I_{в.ср} \leq I_n$ ;

- максимальное обратное напряжение на вентиле не должно превышать рекомендуемого рабочего напряжения  $U_p$ , величина которого определяется классом вентиля по напряжению т.е.  $U_{обр} \leq U_p$ .

Принимаются к установке тиристоры типа Т 243-800 в количестве 72 шт. (при параллельном включении по 3 вентиля). Предельный ток вентиля  $I_n = 800 \text{ А} > I_{с.р} = 712,6 \text{ А}$ , класс по напряжению – 15 с рекомендуемым рабочим напряжением  $U_p = 1200 \text{ В} > U_{обр} = 1130 \text{ В}$ .

### Пример 3. Расчет и выбор сглаживающего дросселя

Индуктивность сглаживающего дросселя, включаемого последовательно с якорной обмоткой двигателя, выбирается из условий обеспечения непрерывного тока двигателя в заданном диапазоне нагрузок (от  $I_{d.\min}$  до  $I_{d.\max}$ ) и ограничения пульсаций мгновенного значения выпрямленного тока до 3-5% от  $I_{d.\text{ном}}$ . Кроме этого, сглаживающий дроссель должен обеспечивать ограничение тока через вентили при коротком замыкании на стороне постоянного тока.

Величина граничного тока преобразователя  $I_{d.гп} = I_{d.\min}$  определяется минимальной нагрузкой при расчете нагрузочной диаграммы (см. п.3.2.3), из которой  $M_{\min} = M_{m1} = 116,9 \cdot 10^3 \text{ Нм}$ , тогда

$$I_{d.гп} = I_{d.\min} = I_d \cdot \frac{M_{\min}}{M_{\text{ном}}} = 3640 \cdot \frac{116,9 \cdot 10^3}{341,3 \cdot 10^3} = 1246,8 \text{ А.}$$

Необходимая индуктивность для ограничения зоны прерывистых токов до  $I_{d.гп}$  в соответствии с (1.16) для двенадцатипульсной схемы выпрямления

$$L = 0,0327 \cdot \frac{U_{2л}}{\omega_c \cdot I_{d.гп}} = 0,0327 \cdot \frac{400}{314 \cdot 1246,8} = 3,34 \cdot 10^{-5} \text{ Гн.}$$

Для определения индуктивности, предназначенной для сглаживания пульсаций выпрямленного тока, определяется амплитуда пульсаций первой гармоники выпрямленного напряжения при  $\alpha = 30^\circ$  эл.

$$U_{nm} = \frac{2\sqrt{\cos^2 \alpha + p^2 \sin^2 \alpha}}{p^2 - 1} U_{d0} = \frac{2\sqrt{0,866^2 + 12^2 \cdot 0,5^2}}{12^2 - 1} \cdot 1076 = 91,2 \text{ В.}$$

Считается приемлемой величина амплитуды основной гармоники выпрямленного тока  $I_{nm} = (0,03 \div 0,05) I_d = 0,05 \cdot 3640 = 182 \text{ А}$ . При этих условиях величина индуктивности, необходимая для ограничения пульсаций, в соответствии с формулой

$$L = \frac{U_{nm}}{p \cdot \omega_c \cdot I_{nm}} = \frac{91,2}{12 \cdot 314 \cdot 182} = 13,3 \cdot 10^{-5} \text{ Гн.}$$

Необходимая, для ограничения тока через вентили при коротком замыкании на стороне постоянного тока, индуктивность дросселя в соответствии с (1.23):

$$L = \frac{1,5\sqrt{2} \cdot U_{2л}}{\omega_c (I_{дон} - I_{нач})} = \frac{1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot 400}{314 \cdot (48000 - 5830)} = 6,4 \cdot 10^{-5} \text{ Гн,}$$



где  $I_{дон} = n \cdot I_{yo} = 3 \cdot 16000 = 48000$  А – допустимый ток при коротком замыкании;  $n = 3$  – количество вентилях, включенных параллельно;  $I_{yo} = 16000$  А – величина ударного тока для тиристора типа Т 243-800 в соответствии с данными табл. 1.4;  $I_{нач} = I_{дн} = 5830$  А – начальный ток, соответствующий неблагоприятному моменту короткого замыкания – во время пусковых процессов.

Суммарная индуктивность согласующих трансформаторов

$$L_{mp} = \frac{2 \cdot X_{mp}}{\omega_c} = \frac{2 \cdot 0,0095}{314} = 6,05 \cdot 10^{-5} \text{ Гн.}$$

Индуктивность якорной цепи двигателя приближенно может быть определена в соответствии с (1.32)

$$L_{дв} = \frac{\kappa \cdot U_{ном}}{p_n \cdot \omega_{ном} \cdot I_{ном}} = \frac{0,1 \cdot 600}{4 \cdot 5,86 \cdot 3640} = 70,3 \cdot 10^{-5} \text{ Гн,}$$

где  $\kappa = 0,1$  – для машин с компенсационной обмоткой;

Для определения требуемой индуктивности сглаживающего дросселя, выбирается наибольшее из полученных значений  $L = 13,3 \cdot 10^{-5}$  Гн, тогда

$$L_{др} = L - L_{дв} - \kappa_{\phi} \cdot L_{mp} = (13,3 - 70,3 - 2 \cdot 6,05) \cdot 10^{-5} = -69,1 \cdot 10^{-5} \text{ Гн,}$$

где  $\kappa_{\phi} = 2$  – количество фаз трансформатора, участвующих в коммутации вентилях при трехфазной мостовой схеме выпрямления.

Отрицательная величина требуемой индуктивности означает, что нет необходимости в установке сглаживающего дросселя, так как индуктивности якорной цепи двигателя и трансформатора достаточны, чтобы обеспечить заданные параметры по ограничению зоны прерывистых токов и уровня пульсаций выпрямленного тока и напряжения.

**В приведенных примерах отражены типовые методики расчета и выбора элементов силовой части современных полупроводниковых систем управления электроприводами постоянного и переменного тока.**