

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН**

Некоммерческое акционерное общество

**АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ  
имени Г.ДАУКЕЕВА**

кафедра \_\_\_\_\_ Электрические машины и электропривод \_\_\_\_\_

«Допущен к защите»  
Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
Оржанова Ж.К. к.т.н. профессор  
(Ф.И.О., ученая степень, звание)  
\_\_\_\_\_ « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.  
(подпись)

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

На тему: \_\_\_\_\_ Расчет каскадных схем регулируемого асинхронного  
электропривода \_\_\_\_\_

Специальность \_\_\_\_\_ электроэнергетика \_\_\_\_\_

Выполнил (а) \_\_\_\_\_ Акбергел Д.Т. \_\_\_\_\_ ЭЭ(ЭАТ) 16-7 \_\_\_\_\_  
(Фамилия и инициалы) \_\_\_\_\_ группа

Научный руководитель \_\_\_\_\_ Мустафин М.А. д.т.н., профессор \_\_\_\_\_  
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)

**Консультанты:**

**по экономической части:**

\_\_\_\_\_ Тузельбаев Б.И. к.э.н. доцент \_\_\_\_\_  
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)  
\_\_\_\_\_ « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.  
(подпись)

**по безопасности жизнедеятельности:**

\_\_\_\_\_ Мананбаева С.Е. ст.преподаватель \_\_\_\_\_  
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)  
\_\_\_\_\_ « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.  
(подпись)

Нормоконтролер: \_\_\_\_\_ Мустафин М.А. д.т.н., профессор \_\_\_\_\_  
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)  
\_\_\_\_\_ « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.  
(подпись)

Рецензент: \_\_\_\_\_ Хидолда Е. к.т.н., асс. профессор \_\_\_\_\_  
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)  
\_\_\_\_\_ « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.  
(подпись)

**Алматы 2020 г.**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН**

**Некоммерческое акционерное общество  
АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ  
имени Г.ДАУКЕЕВА**

Институт электроэнергетики и электротехники

Специальность электроэнергетика

Кафедра Электрические машины и электропривод

**ЗАДАНИЕ**

на выполнение дипломной работы

Студент Акберген Даулет Турлыбекович  
(фамилия, имя, отчество)

Тема работы Расчет каскадных схем регулируемого асинхронного  
электропривода

утверждена приказом ректора № 147 от «11» 11 2019 г.

Срок сдачи законченной работы «28» 05 2020 г.

Исходные данные к проекту требуемые параметры результатов проектирования (исследования) и исходные данные объекта

Параметры асинхронного двигателя,

Схемные решения каскадных схем

Каталоги двигателей и трансформаторов

Перечень вопросов, подлежащих разработке в дипломной работе или краткое содержание:

1 Общие сведения о каскадных системах электропривода переменного тока

2 Нагружающие устройства на базе асинхронного вентильного каскада

3.Расчёт и выбор основных элементов электропривода

4.Расчёт и построение механических характеристик АВК

5 Безопасность жизнедеятельности

6 Технико-экономическое обоснование проекта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

- 1.Схемы каскадных систем электропривода переменного тока
- 2.Схема электрического асинхронного вентильного каскада
- 3.Характеристики асинхронного вентильного каскада
- 4.Варианты нагружающих устройств для обкатки ДВС
- 5.Наружающее устройство по схеме асинхронного вентильного каскада

Рекомендуемая основная литература

1. Онищенко Г.Б. Теория электропривода: учебник. – М: Издательство Инфра-М, 2015. – 294с.
2. Онищенко Г.Б., Локтева И.Л. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания.- М.: Энергия, 1979.-200с.
3. Москаленко В.В. Системы автоматизированного управления электропривода: учебник. – М: Издательство Инфра-М, 2014. – 208с.
4. Ключев В.И. Теория электропривода. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат. – 1998. – 704 с.
5. М.А.Мустафин. Автоматизированный электропривод по схеме «Асинхронный вентильный каскад»: Учебное пособие / Алматы: АИЭС.2002.-81с.
6. Правила устройства электроустановок. РК -А., 2007.
7. Арустамов Э.А. «Охрана труда» - М., 2007.

Консультанты по проекту с указанием относящихся к ним разделов

Раздел	Консультант	Сроки	Подпись
Основная часть	Мустафин М.А.	11.11.19 - 25.05.20	
БЖД	Манабаева С.Е.	11.11.19 - 25.05.20	
Экономика	Тузельбаев Б.И.	11.11.19 - 25.05.20	

**Г Р А Ф И К**  
подготовки дипломного проекта

№ п/п	Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления руководителю	Примечание
1	Ознакомление с каскадными схемами переменного тока	14.02.2020	
2	Выбор оборудования и схем к АВК	15.03.2020	
3	Расчет каскадной схемы для АВК	16.04.2020	
4	Ознакомление с нагружающими устройствами	30.04.2020	
5	Расчет зануления двигателя на отключение	10.05.2020	
6	Расчет стоимости эксплуатации и ремонта оборудования	10.05.2020	
7	Оформление пояснительной записки и графического материала	25.05.2020	

Дата выдачи задания « 11 » ноября 20 19 г.

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ Оржанова Ж.К.  
(подпись) (Фамилия и инициалы)

Руководитель \_\_\_\_\_ Мустафин М.А.  
(подпись) (Фамилия и инициалы)

Задание принял к исполнению студент \_\_\_\_\_ Акберген Д.Т.  
(подпись) (Фамилия и инициалы)

## Аннотация

Работа посвящена вопросу расчета каскадных схем регулировочного асинхронного привода. Данная работа раскрывает способы подбора и пример расчета для внедрения каскадных схем в производстве.

В своей работе я представил примеры каскадных схем для разных мощностей. Привел пример подключения асинхронного двигателя к вентильному каскаду.

Мной был произведен расчет асинхронно вентильного каскада, с расчетом стоимости эксплуатации и ремонта оборудования по месяцам и за год. Также рассчитал для моего примера зануление двигателя на отключение.

## Андатпа

Жұмыс асинхронды басқару жетегінің каскадты тізбектерін есептеу мәселесіне арналған. Бұл жұмыста таңдау әдістерін және өндірісте каскадты схемаларды іске асырудың есептеу үлгісі көрсетілген.

Мен өз жұмысымда әртүрлі сыйымдылықтарға арналған каскадты схемалардың мысалдарын ұсындым. Асинхронды қозғалтқышты клапан каскадына қосу мысалын келтірді.

Мен асинхронды клапан каскадын есептедім, оны пайдалану мен жөндеу құнын айлармен және жылға есептеп шығардым. Менің мысал үшін қозғалтқыш өшірулі деп есептелген.

## Annotation

The work is devoted to the issue of calculating cascade circuits of an asynchronous control drive. This work reveals the selection methods and calculation example for the implementation of cascade schemes in production.

In my work, I presented examples of cascade schemes for different capacities. He gave an example of connecting an asynchronous motor to a valve cascade.

I calculated the asynchronous valve cascade, with the calculation of the cost of operation and repair of equipment for months and for a year. Also calculated for my example the engine is turned off to shut off.

## Содержание

1	Каскадные системы электропривода переменного тока.....	7
1.1	Асинхронный вентильно-машинный электрический каскад .....	7
1.2	Асинхронный вентильно – машинный электромеханический каскад.	9
1.3	Асинхронный вентильно – машинный комбинированный каскад.....	11
1.4	Асинхронный вентильный каскад .....	13
2	Расчёт и выбор основных элементов электропривода .....	17
2.1	Тиристорный выпрямитель .....	17
2.2	Расчёт и выбор элементов зависимого инвертора АВК .....	19
2.3	Расчёт и выбор устройств защиты .....	21
3	Расчет и построение характеристик разомкнутой системы АВК .....	23
3.1	Расчёт и построение естественной механической характеристики АД .....	23
3.2	Расчёт и построение механических характеристик АВК .....	26
3.3	Расчёт энергетических показателей .....	32
4	Нагружающие устройства на базе асинхронного вентильного каскада.....	36
4.1	Классификация нагружающих устройств.....	36
4.2	Нагружающие устройства на основе асинхронных вентильных каскадов.....	43
5	Безопасность жизнедеятельности.....	49
5.1	Анализ зануления на отключение двигателя с точки зрения .....	49
5.2	Расчет зануления на отключения асинхронного двигателя.....	50
5.3	Вывод по разделу безопасность жизнедеятельности .....	54
6	Технико-экономические показатели.....	55
6.1	Вывод по экономической части .....	60
	Список литературы.....	61

## 1 Каскадные системы электропривода переменного тока

Скорость вращения ротора асинхронного двигателя можно определить, как

$$\omega = \frac{2\pi f}{p_n} (1 - s), \quad (1.1)$$

где  $f$  - частота питающего напряжения;

$p_n$  - число пар полюсов;

$s$  – скольжение

Анализ (1.1) показывает, что реализовать регулирование скорости возможно изменением частоты питающего статор напряжения, числа пар полюсов ( $d$  ступенчато в специальных двигателях) и величины скольжения. В последнем случае важным является вопрос использования мощности скольжения. При реостатном регулировании эта мощность выделяется в виде тепла в регулировочных резисторах, при регулировании изменением величины напряжения питания статора – рассеивается в обмотке ротора. В обоих случаях мощность скольжения расходуется неэффективно.

В связи с этим, были разработаны различные варианты каскадных схем электропривода переменного тока. В каскадных схемах регулирование частоты вращения электродвигателя осуществляется изменением ЭДС, вводимой в обмотку ротора асинхронного электродвигателя с фазным ротором. В них мощность скольжения или преобразуется в механическую и используется на основном и дополнительных механизмах или после электрических преобразований параметров возвращается в сеть. В зависимости от вида преобразования и использования мощности скольжения, каскадные системы подразделяются на:

- вентильно-машинные;
- электромеханические;
- электрические.

### 1.1 Асинхронный вентильно-машинный электрический каскад

В основе работы вентильно-машинных каскадов [1,2,5] лежат те же принципы, что и в схемах вентильного каскада. Добавочная противо-ЭДС в цепи выпрямленного тока ротора создается машиной постоянного тока, которая может находиться на одном валу либо с отдельной машиной переменного тока, либо с основным асинхронным двигателем; в первом случае - это схема вентильно-машинного электрического каскада, во втором - схема электромеханического каскада. Возможны схемы комбинированных каскадов, в которых сочетаются оба принципа.

По принципу работы асинхронный вентильно-машинный электрический каскад (рисунок 1.1), по существу, не отличается от асинхронного вентильного каскада [2,5].

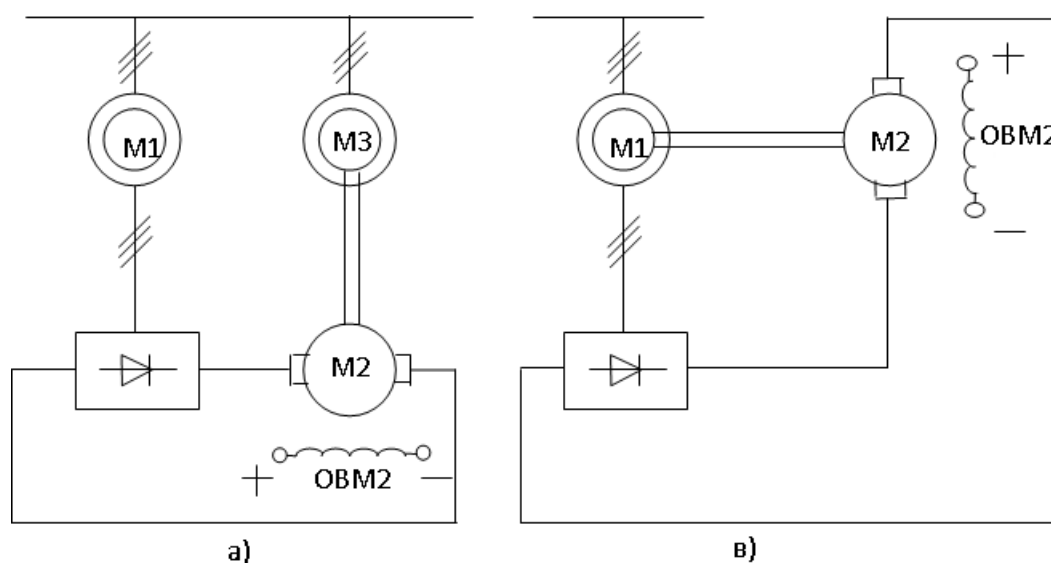


Рисунок 1.1

Роль инвертора здесь выполняет мотор-генераторный агрегат, причем машина постоянного тока М2 работает в двигательном режиме, приводя во вращение синхронный или асинхронный генератор М3, возвращающий энергию скольжения в сеть. Якорная цепь машины постоянного тока питается выпрямленным напряжением ротора асинхронного двигателя М1 через неуправляемый выпрямитель.

Машину постоянного тока выбирают по силе выпрямленного тока и напряжению ротора

$$\left. \begin{aligned} I_{дН} &= \frac{I_{2Н}}{0,78} \\ E_{яН} &= 1,35 E_{рs_{МАХ}} \end{aligned} \right\}$$

Мощность машины постоянного тока составляет часть мощности асинхронного двигателя, пропорциональную максимальному скольжению.

Вспомогательную машину переменного тока М3 можно выбрать исходя из максимальной мощности скольжения. В качестве этой машины целесообразнее применять синхронный двигатель для использования его в качестве компенсатора реактивной мощности основного асинхронного двигателя.

Для вентильно-машинных электрических каскадов принципиально



действительны все соотношения, приведенные для вентильного каскада; причем  $\varepsilon$  и  $\rho$  определяют по формулам

$$\rho_M = \frac{2\pi(r_2 + \frac{1}{2}r_{я})}{3x_p}$$

$$\varepsilon_M = \frac{E_{яH}}{k_1 E_p};$$
(1.2)

где  $r_{я}$  - суммарное сопротивление якорной цепи двигателя постоянного тока.

Управляющим воздействием в вентильно-машинном каскаде является изменение тока возбуждения машины постоянного тока, вызывающее изменение магнитного потока  $\Phi$  и противо - ЭДС. Поэтому в формулах для расчета параметров вентильно-машинного каскада  $\cos \varphi$  следует заменить на относительное значение потока.  $\varphi = \Phi / \Phi_H$

## 1.2 Асинхронный вентильно – машинный электромеханический каскад

Особенностью вентильно – машинного электромеханического каскада является то, что энергия скольжения передается через преобразователь на вал рабочей машины [1,2,5].

Электромеханический каскад состоит из асинхронного двигателя М1 с фазным ротором и машины постоянного тока М2, находящихся на одном валу. При работе с частотой вращения ниже синхронной обе машины работают в двигательном режиме, поэтому момент приводного агрегата является суммой моментов обеих машин

$$M = M_M + M_{МП}$$
(1.3)

Рассмотрим распределение нагрузки между машинами. Если пренебречь потерями, то вся мощность, потребляемая асинхронным двигателем из сети, идет на совершение полезной работы

$$P_{ПОТ} = M_M \omega_0 + M_{МП} \omega$$
(1.4)

откуда с учетом выражения (1.4) получим

$$\frac{M_M}{M} = \frac{\omega}{\omega_0}; \quad \frac{M_{МП}}{M} = 1 - \frac{\omega}{\omega_0}; \quad M_{МП} = M_M \left( \frac{\omega_0}{\omega} - 1 \right) \quad (1.5)$$

Из этих соотношений видно, что при частоте вращения, близкой к синхронной, момент привода создается главным образом асинхронным двигателем; по мере снижения частоты вращения все большую часть нагрузки воспринимает машина постоянного тока. При частоте вращения, составляющей половину синхронной, нагрузка между машинами распределяется поровну, при дальнейшем снижении частоты вращения основную часть момента создает машина постоянного тока.

По мере увеличения глубины регулирования (снижения частоты вращения в рабочем диапазоне) существенно возрастает габаритная мощность машины постоянного тока, поэтому для электромеханических каскадов предельным является диапазон регулирования 2:1.

Указанное ограничение определяется противоречием, присущим этой системе и заключающимся в том, что противо-ЭДС якоря машины постоянного тока должна уравнивать выпрямленное напряжение ротора;

однако противо-ЭДС якоря по мере уменьшения частоты вращения падает, в то время как напряжение ротора возрастает.

Машины постоянного тока выбирают, исходя из заданного диапазона регулирования по напряжению и силе тока якорной цепи.

Номинальную ЭДС якоря машины постоянного тока выбирают таким образом, чтобы при минимальной рабочей частоте вращения ее противо-ЭДС была равна выпрямленной ЭДС ротора при этой частоте, т. е.

$$E_{ЯН} = 1,35E_P \left( 1 - \frac{\omega_{MIN}}{\omega_0} \right) \quad (1.6)$$

Отсюда номинальная ЭДС машины постоянного тока должна составлять

$$E_{ЯН} = 1,35E_P \frac{\omega_{МПн}}{\omega_0} \left( \frac{\omega_0}{\omega_{MIN}} - 1 \right), \quad (1.7)$$

где  $\omega_{МПн}$  - номинальная паспортная частота вращения машины постоянного тока.

Номинальная сила тока якоря машины постоянного тока должна соответствовать силе выпрямленного тока ротора асинхронного двигателя

$$I_{ЯН} = \frac{I_{2Н}}{0,78} . \quad (1.8)$$

Номинальная габаритная мощность машины постоянного тока

$$P_{МПн} = P_M \left( \frac{\omega_0}{\omega_{MIN}} - 1 \right)$$

Зависимость момента от силы выпрямленного тока ротора имеет вид

$$M = \frac{0,14}{\omega_1} (I_d E_P - \frac{\sqrt{2}}{2} I_d^2 x_P) + C_{МП} I_d \psi , \quad (1.9)$$

где

$$C_{МП} = \frac{M_{МПн}}{I_{ЯН}} ; \quad \psi = \frac{\Phi}{\Phi_H} .$$

Уравнение механических характеристик электромеханического вентильно-машинного каскада для рабочей области I [4] имеет вид

$$M = \frac{0,61 E_P^2}{\pi \omega_1 x_P} (A_{sM} - A_{sM}^2) + \frac{0,14 \pi C_{МП} E_P \psi}{3 x_P} A_{sM} , \quad (1.10)$$

$$\text{где } A_{sM} = \frac{(1 + s_M \psi)(s - s_0)}{s(1 + q) + \rho_M} ; \quad s_0 = \frac{\varepsilon_M \psi}{1 + \varepsilon_M \psi} ; \quad \varepsilon_M = \frac{E_{ЯН} n_0}{1,35 E_P n_{МПн}} .$$

Механические характеристики каскада показывают, что перегрузочная способность ( $M_k$ ) и жесткость характеристик каскада, а также длительно допустимый (номинальный) момент возрастают при снижении частоты вращения. Поэтому электромеханический каскад называют каскадом постоянной мощности.

Характерный недостаток рассмотренного электромеханического каскада - недостаточное использование электромагнитной мощности машин постоянного тока. При работе с номинальной частотой вращения машина постоянного тока не развивает момент и вращается вхолостую.

### 1.3 Асинхронный вентильно – машинный комбинированный каскад

Отмеченного недостатка лишена схема вентильно-машинного комбинированного каскада [1,2,5]. В цепь выпрямленного тока ротора асинхронного двигателя включены последовательно две машины постоянного тока: одна из них - МП1 - расположена на одном валу с главным асинхронным двигателем М1, другая - МП2 - на одном валу с синхронной машиной М2. Таким образом в этой схеме объединены вентильно-машинные электромеханический и электрический каскады. Дополнительная ЭДС в цепи ротора создается двумя машинами, причем машина МП1 имеет постоянный номинальный поток возбуждения, и ее ЭДС всегда направлена против ЭДС ротора; изменением потока можно регулировать ЭДС машины МП2 от максимального положительного до максимального отрицательного значения.

Равновесие ЭДС в роторе контура описывается уравнением [1,5]

$$E_{dPH}s = E_{МП1н} \frac{\omega}{\omega_0} \pm E_{МП2н} \psi_{МП2} + I_d R_{\Sigma} \quad (1.11)$$

При работе в нижней части диапазона регулирования ЭДС машины МП2 должна быть направлена, против ЭДС ротора асинхронного двигателя. При номинальном потоке возбуждения  $\psi_{МП2} = 1$ , привод работает с минимальной частотой вращения

$$\omega_{\min} = \frac{E_{dPH} - E_{МП2н}}{E_{dPH} + E_{МП1н}} \omega_0. \quad (1.12)$$

Для повышения частоты вращения уменьшают силу тока возбуждения машины МП2 и доводят ее до нуля. При этом частота вращения привода примерно соответствует среднему значению диапазона регулирования. Для дальнейшего увеличения частоты вращения необходимо изменить знак ЭДС машины МП2. Это достигается изменением полярности возбуждения машины МП2. Увеличение ЭДС машины МП2 при новой полярности приводит к уменьшению результирующей .противо- ЭДС и увеличению частоты вращения двигателя. Когда  $E_{МП2} = E_{МП1}$  результирующая противо-ЭДС снижается до нуля и частота вращения привода близка к номинальному значению.

Отличительной особенностью рассматриваемого каскада является то, что при всех частотах вращения машины МП1 развивает двигательный момент, и нагрузка на валу распределяется между машинами М1 и МП1 пропорционально их номинальной мощности.

Другое положительное свойство комбинированного каскада состоит в возможности в ряде случаев обойтись без пусковых устройств, необходимых при использовании других схем каскада. Пуск привода можно осуществлять без включения в сеть асинхронного двигателя по

схеме генератор-двигатель.

Машина МП2, работающая как генератор и питающая двигатель МП1, может довести частоту вращения до  $\omega_{min}$ , после чего включением главного асинхронного двигателя можно перейти к схеме каскада.

Отдельный электромашинный агрегат МП2—М2 в рассматриваемой схеме может быть заменен на тиристорный преобразователь, который при низкой частоте рабочего диапазона регулирования работает как инвертор, а при высокой скорости как выпрямитель (рисунок 1.2).

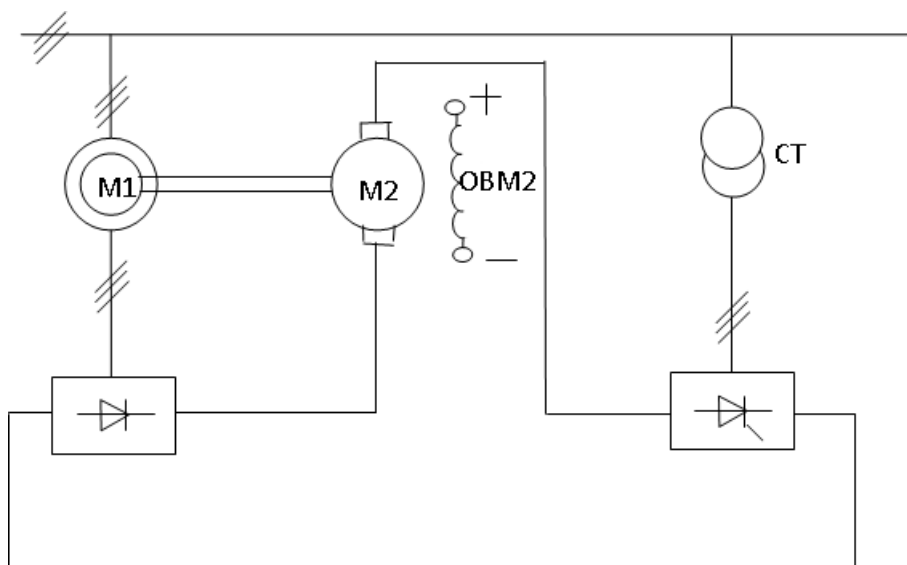


Рисунок 1.2 – Вентильно – машинный комбинированный каскад

#### 1.4 Асинхронный вентильный каскад

В асинхронном вентильном каскаде (АВК) [1,2,5] энергия скольжения ротора рекуперируется в питающую электрическую сеть через преобразователь АВК, который состоит из двух основных элементов: неуправляемого выпрямителя В и управляемого зависимого инвертора ЗИ. Кроме того, в состав привода входят сглаживающий дроссель СД, согласующий трансформатор Тр и система импульсно – фазового управления (СИФУ). Схема электропривода приведена на рисунке 1.3.

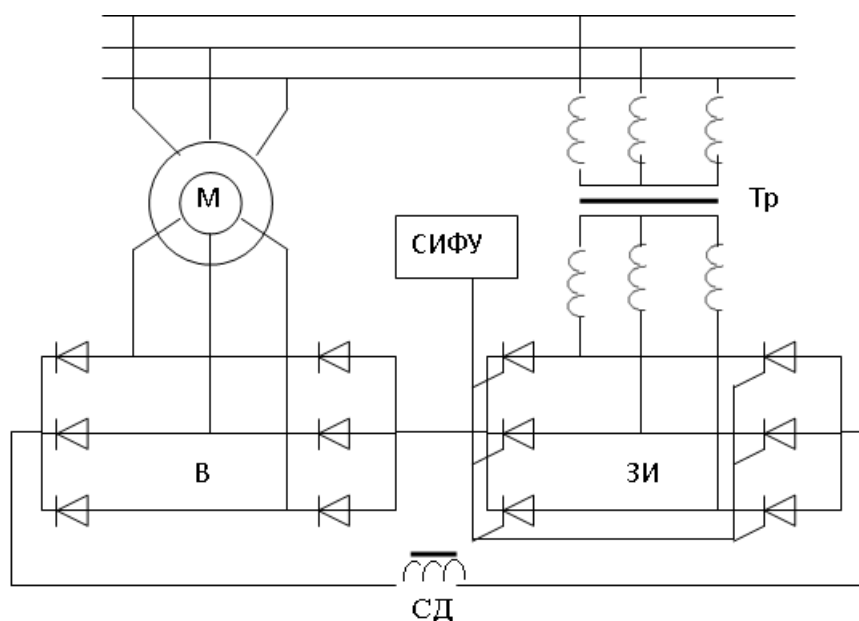


Рисунок 1.3

При работе в двигательном режиме ниже синхронной скорости ток ротора асинхронного двигателя выпрямляется, а затем преобразуется в переменный ток частоты сети с помощью управляемых тиристорov, работающих в инверторном режиме. При этом ток в первичной обмотке трансформатора, находящийся в противофазе с напряжением сети. Благодаря этому имеет место отдача активной электроэнергии в сеть.

В качестве источника добавочной ЭДС. использован тиристорный преобразователь – зависимый инвертор *ЗИ*. Для согласования напряжения ротора двигателя с напряжением сети служит трансформатор *Тр*. Дроссель *СД* служит для сглаживания пульсаций тока и напряжения в промежуточной цепи постоянного тока. В большинстве случаев промышленные установки выполнены по описанной схеме. Поэтому будем называть ее основной схемой вентильного каскада.

В рассматриваемой схеме вентильного каскада с промежуточной цепью постоянного тока функции преобразования тока и энергии скольжения разделены между двумя группами вентилей: диоды *В* работают в выпрямительном режиме, преобразуя переменный ток ротора с частотой скольжения в постоянный; тиристоры *И* работают в режиме зависимого инвертора, преобразуя выпрямленный ток ротора в переменный с частотой сети.

Принцип работы асинхронного вентильного каскада состоит в следующем. При работе в двигательном режиме при частоте вращения ниже синхронной в цепь выпрямленного тока  $I_d$  ротора введена добавочная ЭДС (противо - ЭДС). ЭДС ротора  $E_{дрн}^s$  должна уравновешивать противо - ЭДС инвертора  $E_{дв} = E_{д2}$ , падение напряжения на активных сопротивлениях роторного контура, а также падение напряжения, обусловленное процессами коммутации вентилей из-за наличия

индуктивных сопротивлений роторного контура. На рис. 59, а приведена схема замещения роторной цепи асинхронного двигателя, соответствующая основной схеме каскада при трехфазной нулевой схеме соединения тиристор инвертора. На схеме:  $e$  - мгновенное значение ЭДС ротора;  $x_p, r_p$  - индуктивное и активное сопротивления двигателя, приведенные к обмотке ротора;  $x_d, r_d$  - индуктивное и активное сопротивление цепи выпрямленного тока;  $e_{2T}, i_{2T}$  - мгновенные значения ЭДС и силы тока вторичной обмотки трансформатора  $Tp$ ;  $x_T, r_T$  индуктивное и активное сопротивления обмоток трансформатора, приведенные к его вторичной обмотке. Заменяя падение напряжения, обусловленное активным сопротивлением цепи и коммутацией вентилей, падением напряжения на эквивалентном сопротивлении  $R_{\Sigma}$  (рис.59, б), можно записать

$$E_{dph}s = E_{du} + I_d R_{\Sigma},$$

или

$$I_d = \frac{E_{dph}s - E_{du}}{R_{\Sigma}},$$

где  $E$  - выпрямленное напряжение ротора при частоте вращения и силе тока ротора, равных нулю;

$I_d$  - сила выпрямленного тока ротора.

Момент, развиваемый асинхронным двигателем (см. рис. 35, з) примерно пропорционален силе выпрямленного тока ротора. Следовательно, регулирование последней изменением величины противо-ЭДС инвертора позволяет регулировать момент и частоту вращения двигателя. Если выпрямленная противо-ЭДС инвертора равна выпрямленному напряжению ротора двигателя, то сила тока в цепи ротора и момент, развиваемый двигателем, равны нулю. При уменьшении противо-ЭДС инвертора сила тока в цепи ротора возрастает, момент двигателя увеличивается и частота вращения повышается. Так как с увеличением частоты вращения скольжение  $s$  и выпрямленное напряжение ротора  $E_{dph}s$  уменьшаются, то ускорение двигателя происходит до тех пор, пока момент двигателя не становится равным моменту нагрузки. При увеличении противо-ЭДС инвертора сила тока ротора и момент уменьшаются и частота вращения двигателя снижается. По мере уменьшения частоты вращения повышается выпрямленное напряжение ротора. Сила тока ротора и момент двигателя увеличиваются до тех пор, пока момент, развиваемый двигателем, снова не становится равным статическому моменту сопротивления. При этом двигатель начинает работать в установившемся режиме с новым значением частоты вращения

(скольжения), соответствующим уравнению (70).

При постоянстве управляющего воздействия и изменении момента нагрузки на валу привода переходный процесс протекает аналогично изложенному. Например, при увеличении момента на валу двигателя частота вращения снижается, вследствие этого возрастает ЭДС ротора и, следовательно, увеличиваются сила выпрямленного тока и момент двигателя до тех пор, пока момент двигателя не становится равным моменту сопротивления на его валу.



## 2 Расчёт и выбор основных элементов электропривода

Исходные данные асинхронного двигателя:

$P_H = 4300$  кВт – номинальная мощность;

$U_{1H} = 10000$  В – напряжение статора;

$I_{1H} = 173$  А – номинальный ток статора;

$I_{2H} = 323$  А – номинальный ток ротора;

$n_0 = 1500$  об/мин – синхронная скорость вращения;

$\eta = 0,93$  – номинальный к.п.д;

$\cos \varphi = 0.89$  – коэффициент мощности;

$U_{2H} = E_{2H} = 1000$  В – напряжение ротора;

$s_K = 8.4$  % - критическое скольжение;

$\lambda = 2.0$  – отношение критического момента к номинальному.

### 2.1 Тиристорный выпрямитель

#### 2.1.1 Максимальная ЭДС выпрямителя [5]

$$E_{2d} = 1.35E_{2H}s_{max} = 1.35 * 1000 * 1 = 1350(\text{В});$$

где  $s_{max}=1$  – максимальное скольжение при работе АВК для установки.

#### 2.1.2 Обратное повторяющееся напряжение на вентилях выпрямителя:

$$Un = k_{uz}\sqrt{2}E_{2H} = 1,4 * \sqrt{2} * 1000 = 1980(\text{В});$$

где  $K_{uz}=1,4$  - коэффициент запаса по напряжению.

#### 2.1.3 Максимальный ток нагрузки:

Принимаем, что охлаждение принудительное –  $V_{охл} = 12$  м/с.

$$I_{2MAX} = 2I_{2MAX} = 2 * 323 = 646(\text{А}).$$

#### 2.1.4 Максимальный выпрямленный ток:

$$: \frac{I_{2MAX}}{K_{CXi}} = \frac{646}{0.81} = 797(\text{А});$$

где  $K_{CXi}=0.81$  – коэффициент схемы по току.

#### 2.1.5 Средний ток, проходящий через вентиль:

$$I_{2dcp} = \frac{I_{2dmax}}{3} = \frac{797}{3} = 266(\text{А});$$

где:  $I_{2dmax}$  - максимальный выпрямленный ток.

$$I_{2MAX} = 2I_{2MAX} = 2 * 323 = 646(A);$$

2.1.6 Длительно допустимый ток вентиля с учётом запаса по току, ( $K_{зи}=1,4$  - коэффициент запаса по току):

$$I_{II} = K_{зи} K_{cx} K_{OX} I_{2CP} = 1.4 * 1.1 * 1.1 * 266 = 451(A);$$

где:  $K_{cx}=1,1$  – коэффициент схемы,

$K_{OX}=1$ , при  $V_{OXI} = 12$  м/с.

По данным  $I_{II}$  и  $U_{II}$  к установке принимаем диоды Д105-630Х-20, класс – 15 ( $I_{II} = 630$  А,  $U_{II} = 2000$  В).

Ниже представлены программа расчета и расчет выходного напряжения тиристорного выпрямителя при фазовом регулировании, выполненный в приложении «Mathcad 15» [5]. Предлагаемый вариант позволяет не только описать выходное напряжение, но и реализовать САУ выпрямителя.

### Программа расчета и расчет выходного напряжения тиристорного выпрямителя (Mathcad 15)

1. Частота и период напряжения сети

$$\omega := \pi \cdot 100 \quad \omega = 314.159 \quad T1 := \frac{2 \cdot \pi}{\omega} \quad T1 = 0.02$$

2. Переключающие функции

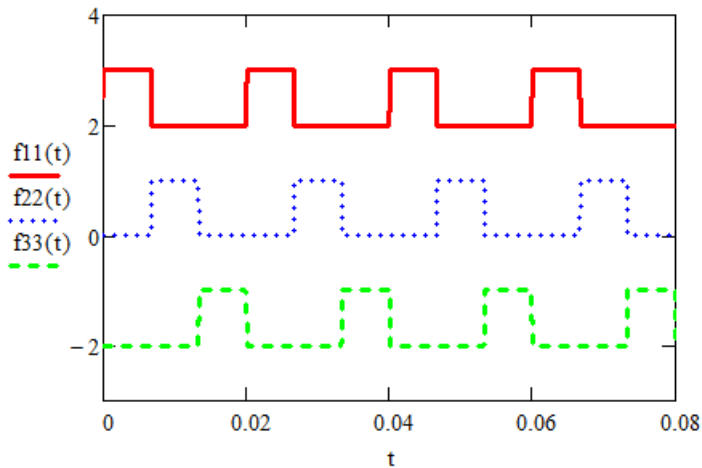
$$f1(t) := \sum_{k=0}^3 \left( \Phi(t - T1 \cdot k) - \Phi\left(t - T1 \cdot k - \frac{T1}{3}\right) \right)$$

$$f2(t) := \sum_{k=0}^3 \left( \Phi\left(t - T1 \cdot k - \frac{T1}{3}\right) - \Phi\left(t - T1 \cdot k - \frac{T1}{3} - \frac{T1}{3}\right) \right)$$

$$f3(t) := \sum_{k=0}^3 \left( \Phi\left(t - T1 \cdot k - \frac{T1 \cdot 2}{3}\right) - \Phi\left(t - T1 \cdot k - \frac{T1}{3} - \frac{T1 \cdot 2}{3}\right) \right)$$

3. Вызов графика со сдвигами переключающих функций

$$f33(t) := f3(t) - 2 \quad f11(t) := f1(t) + 2 \quad f22(t) := f2(t)$$



3. Задание угла сдвига нагрузки

$$\alpha := \frac{\pi}{3}$$

4. Переключающие функции с учетом сдвига нагрузки

$$F3(t) := f3\left(t - \frac{T1 \cdot \alpha}{2 \cdot \pi}\right) \quad F2(t) := f2\left(t - \frac{T1 \cdot \alpha}{2 \cdot \pi}\right) \quad F1(t) := f1\left(t - \frac{T1 \cdot \alpha}{2 \cdot \pi}\right)$$

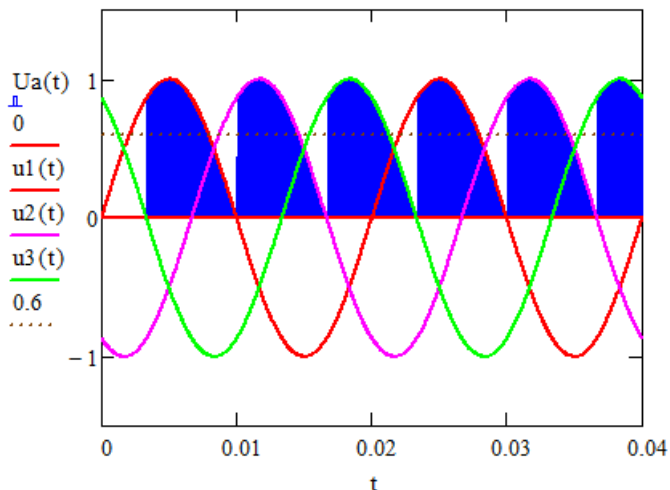
5. Напряжение вторичной обмотки трансформатора

$$u1(t) := \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{t}{T1}\right) \quad u2(t) := \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{t}{T1} - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \quad u3(t) := \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{t}{T1} - \frac{4 \cdot \pi}{3}\right)$$

6. Выходное напряжение выпрямителя

$$U1(t) := u1(t) \cdot F1(t) \quad U2(t) := u2(t) \cdot F2(t) \quad U3(t) := u3(t) \cdot F3(t)$$

$$Ua(t) := U1(t) + U2(t) + U3(t)$$



## 2.2 Расчёт и выбор элементов зависимого инвертора АВК

В качестве силовой принимаем наиболее совершенную схему включения вентилях – трёхфазную мостовую [1,2,5]. Основные её параметры и соотношения при включении вторичных обмоток трансформатора в звезду:

$K_u=0.427$  – коэффициент мостовой схемы,  $E_{d0}/E_{2\phi} = 2,34$ ,  $K_{схi} =0.81$  – коэффициент схемы по току,  $U_{п}/ E_{d0} = 0,145$ .

2.2.1 Необходимое вторичное напряжение трансформатора:

$$E_{2\phi} = K_u K_c K_\alpha E_{2d} = 0.427 * 1.05 * 1.1 * 1350 = 666(B),$$

где:  $K_u$  - коэффициент мостовой схемы;

$K_c = 1,1$  – коэффициент, учитывающий снижение напряжения в сети (при снижении напряжения в сети на 10%);

$K_\alpha = 1,1$  - коэффициент, учитывающий неполное отпирание вентилей.

2.2.2 Действующее значение фазного тока вторичных обмоток трансформатора при номинальной нагрузке двигателя:

$$I_{2\phi} = I_{2H} = 323(A).$$

2.2.3 Расчётная мощность трансформатора:

$$S_{TP} = 3E_{2\phi} I_{2H} = 3 * 666 * 323 = 645.3(кВА).$$

К установке принимаем трансформаторы типа ТСЗ -1000 10/0,69-УХЛ4

$S_{тр} = 1000$  кВ\*А,  $U_{1H} = 10000$  В,  $E_{2\phi} = 690$  В,  $\Delta P_k = 9700$  Вт,  $\Delta P_{xx} = 1800$  Вт, дополнительные параметры которого равны:

$$K_m = \frac{U_{1H}}{E_{2\phi}} = \frac{10000}{690} = 14.5;$$

$$I_1 = \frac{S * 10^3}{\sqrt{3} * U_{1H}} = \frac{1000000}{\sqrt{3} * 10000} = 57.8(A);$$

$$I_2 = K_m I_1 = 14,5 * 57.8 = 838(A);$$

$$U_k = 0,3 \%, I_{xx} = 2,5 (A).$$

Длительно допустимый ток вентилей с учётом условий охлаждения и запаса по току:

$$I_n = K_z i K_{сх} I_{cp} = 1,4 * 1,05 * 266 = 391(A),$$

где  $I_{cp} = I_{2dcp}$ .

Амплитуда повторяющегося обратного напряжения:

$$U_n = K_{зи} \sqrt{2} E_{2\phi} = 1,4 * \sqrt{2} * 690 = 1362 (В),$$

где  $K_{зи} = 1,4$  - коэффициент запаса по напряжению.

К установке принимаем тиристоры Т-142-80-14 ( $U_n = 1400 В$ ).

### 2.3 Расчёт и выбор устройств защиты

В преобразователе предусматриваются следующие виды защит [1,2,5]:

- от коммутационных перенапряжений;
- от перенапряжений возникающих при отключении трансформатора без нагрузки;
- от внешних и внутренних коротких замыканий в силовой схеме.

Для защиты вентилей от коммутационных перенапряжений принимаем RC – цепочки, включаемые параллельно к каждому тиристорному вентилю. Для защиты вентилей от перенапряжений, возникающих при отключении трансформатора без нагрузки, принимаем RC – цепочку, включаемую к вторичным обмоткам трансформатора через трёхфазный мост.

Применяют следующие средства защиты тиристорных преобразователей от перегрузок по току: а) быстродействующие плавкие предохранители. В основном используются для защиты полупроводниковых приборов от внутренних коротких замыканий. Плавкий предохранитель представляет собой аппарат однократного действия. Его можно устанавливать на первичной и вторичной стороне силового трансформатора ПР1, ПР2 (рисунок 2.1), последовательно в цепи каждого тиристора и на стороне постоянного тока ПР1, ПР2. В последнем случае преобразователь можно защитить и от внешних коротких замыканий

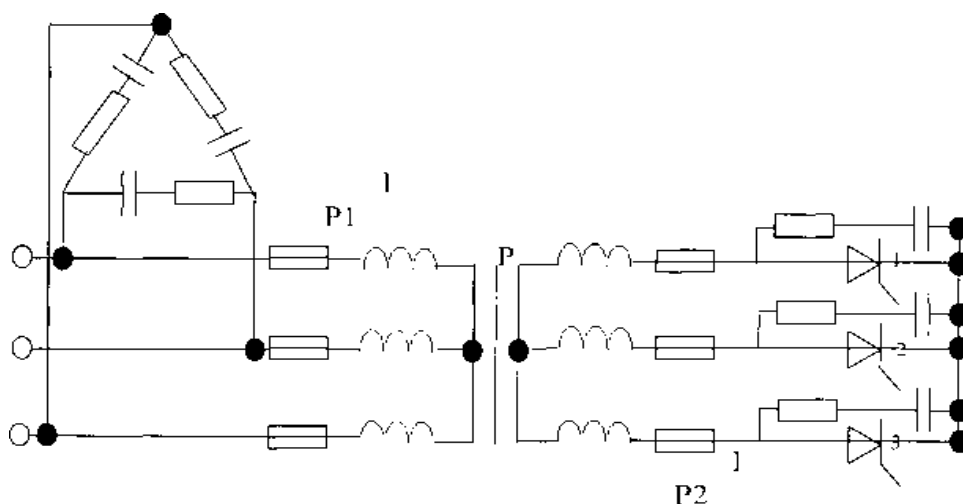


Рисунок 2.1

Для защиты преобразователя от внешних и внутренних коротких замыканий принимаем быстродействующий автоматический выключатель.

2.3.1 Ёмкость конденсатора и сопротивление резистора определяем по формулам:

$$C = \frac{10I_a}{U_n} = \frac{10 * 646}{1400} = 4,6(\text{мкФ}),$$

где  $I_a = I_{2d \max} = 646$  (А) – максимально выпрямленный ток при максимальной нагрузке двигателя:

$$R = \frac{10U_n}{I_a} = \frac{10 * 1400}{80} = 175(\text{Ом}),$$

где  $I_a = I_{п} = 80$  А – длительно допустимый ток тиристора.

2.3.2 Защита трансформатора от перенапряжений.

Выходное напряжение выпрямителя, установленного в схеме защиты, в нормальном режиме работы трансформатора соответствует величине:

$$U_1 = 2.34E_{2\phi} = 2,34 * 690 = 1615(\text{В});$$

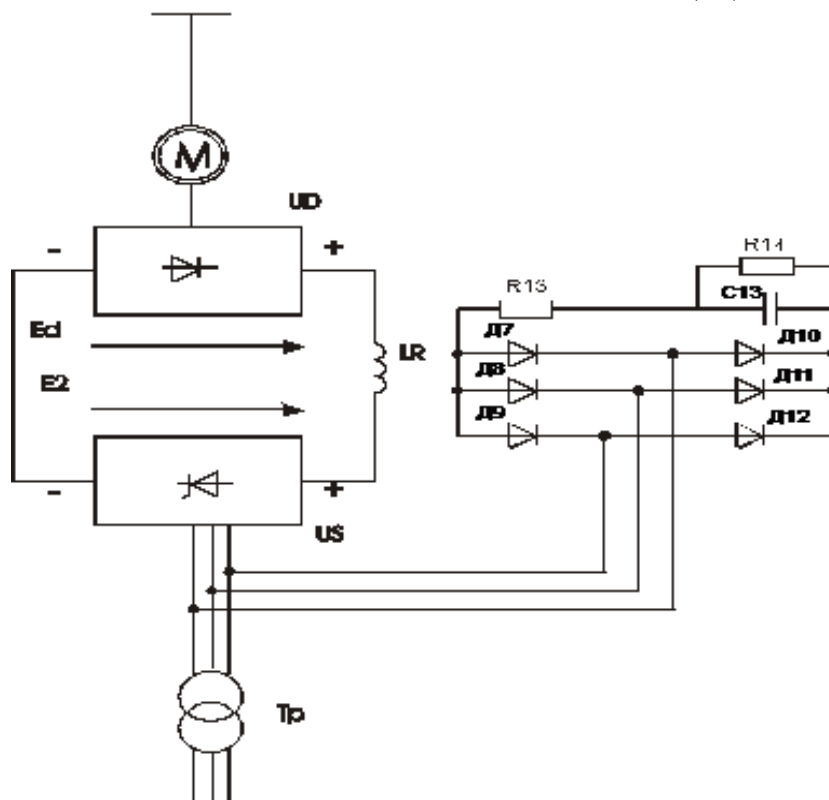


Рисунок 2.3 Защита трансформатора от перенапряжений

В момент выключения трансформатора без нагрузки, в результате прерывания тока намагничивания, напряжение на его вторичных обмотках существенно возрастает [1,2,5]. При этом выходное напряжение достигает величины

$$U_2 = 2 * U_1 = 2 * 1615 = 3230 \text{ В.}$$

В момент включения трансформатора напряжение на конденсаторе возрастает на величину

$$\Delta U = U_2 - U_1 = 3230 - 1615 = 1615 \text{ (В).}$$

При этом зарядный ток конденсатора, ограничиваемый резистором  $R_1$ , не должен превышать максимально допустимый импульсный ток диодов вспомогательного выпрямителя  $I_{пр.и.макс.}$ . Тогда

$$R_1 = \Delta U / I_{пр.и.макс.} = 1615 / 100 = 16.15 \text{ (Ом).}$$

В процессе заряда конденсатора накапливается энергия:

$$W = 0.5C(U_2^2 - U_1^2),$$

Решая приведённое уравнение относительно ёмкости конденсатора и подставляя в него значение  $I_\mu$ , получим [1,2,5]

$$C = \frac{2I_\mu U_{2\phi}}{\omega(U_2^2 - U_1^2)} = 0,087 \text{ (мкФ)},$$

$$\text{где } I_\mu = \frac{I_{xx}\%}{100} I_\phi = \frac{0.3}{100} * 58 = 0,174 \text{ (А)}$$

После подключения трансформатора конденсатор заряжается через сопротивление  $R_2$ . Время заряда не превышает  $5 * T = 5 * R_2 * C$ . Время до очередного включения составляет не менее 10 с. За это время конденсатор разрядится при условии:

$$R_2 = T / (5C) = 10 / (5 * 0,087 * 10^{-6}) = 23000 \text{ (кОм).}$$

### 3. Расчет и построение характеристик разомкнутой системы АВК

### 3.1 Расчёт и построение естественной механической характеристики АД

1. Номинальный момент двигателя:

$$M_H = \frac{9550P_H}{n_H} = \frac{9550 * 4300}{1463} = 28069(\text{Нм})$$

2. Скорость холостого хода:

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30} = \frac{3,14 * 1500}{30} = 157(\text{с}^{-1});$$

$$\text{где } n_0 = \frac{60f}{p} = \frac{3000}{2} = 1500(\text{об/мин});$$

3. Номинальная скорость двигателя:

$$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30} = \frac{3,14 * 1463}{30} = 153(\text{с}^{-1});$$

4. Номинальное скольжение:

$$s_H = \frac{(\omega_0 - \omega_H)}{\omega_0} = \frac{(157 - 153)}{157} = 0,025$$

5. Критический момент на валу двигателя:

$$M_K = \lambda M_H = 2 * 28069 = 56138(\text{Нм});$$

Построение естественной характеристики произведём по упрощённой формуле Клосса, т.к. у двигателей большой мощности  $r_1$  на порядок больше чем  $r_2$ :

$$M = \frac{2M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}.$$

Расчёт и построение естественной характеристики произведены в приложении Mathcad 15 [5].



# Программа и расчет токов и момента АД (Mathcad 15)

Ввод исходных данных:

$$\begin{aligned} P_n &:= 4300000 & r_1 &:= 0.213 & r_2 &:= 0.21 & l_1 &:= 0.2598 & l_2 &:= 0.2619 & l_3 &:= 0.254 \\ u_{1x} &:= 10000 & w &:= \pi \cdot 100 & s_n &:= 0.01 & p_n &:= 2 & u_{x1} &:= 10000 & u_{1y} &:= 0 \\ u_{2x} &:= 0 & u_{2y} &:= 0 \end{aligned}$$

Проекции токов статора на оси x, копируются из решения "Given - Find"

$$I_{x1}(s) := u_{x1} \cdot \frac{(r_2^2 \cdot r_1 + w^2 \cdot s^2 \cdot l_2^2 \cdot r_1 + w^2 \cdot s^2 \cdot l_3^2 \cdot r_2)}{(r_2^2 \cdot r_1^2 + r_2^2 \cdot w^2 \cdot l_1^2 + 2 \cdot r_2 \cdot r_1 \cdot w^2 \cdot l_3^2 \cdot s + w^2 \cdot s^2 \cdot l_2^2 \cdot r_1^2 + w^4 \cdot s^2 \cdot l_2^2 \cdot l_1^2 + w^4 \cdot s^2 \cdot l_3^4 - 2 \cdot w^4 \cdot s^2 \cdot l_2 \cdot l_3^2 \cdot l_1)}$$

$$I_{y1}(s) := -w \cdot u_{x1} \cdot \frac{(l_1 \cdot r_2^2 + l_1 \cdot w^2 \cdot s^2 \cdot l_2^2 - w^2 \cdot s^2 \cdot l_3^2 \cdot l_2)}{(r_2^2 \cdot r_1^2 + r_2^2 \cdot w^2 \cdot l_1^2 + 2 \cdot r_2 \cdot r_1 \cdot w^2 \cdot l_3^2 \cdot s + w^2 \cdot s^2 \cdot l_2^2 \cdot r_1^2 + w^4 \cdot s^2 \cdot l_2^2 \cdot l_1^2 + w^4 \cdot s^2 \cdot l_3^4 - 2 \cdot w^4 \cdot s^2 \cdot l_2 \cdot l_3^2 \cdot l_1)}$$

$$I_1(s) := \sqrt{I_{x1}(s)^2 + I_{y1}(s)^2}$$

$$\begin{aligned} I_{x1}(s_n) &= 434.041 & I_{y1}(s_n) &= -207.384 & \text{определение тока статора} \\ I_1(s_n) &= 481.04 \end{aligned}$$

Проекции токов ротора на оси x, копируются из решения "Given - Find"

$$I_{x2}(s) := (-r_2 \cdot l_1 - s \cdot r_1 \cdot l_2) \cdot l_3 \cdot s \cdot w^2 \cdot \frac{u_{x1}}{(r_2^2 \cdot r_1^2 + r_2^2 \cdot w^2 \cdot l_1^2 + 2 \cdot r_2 \cdot r_1 \cdot w^2 \cdot l_3^2 \cdot s + w^2 \cdot s^2 \cdot l_2^2 \cdot r_1^2 + w^4 \cdot s^2 \cdot l_2^2 \cdot l_1^2 + w^4 \cdot s^2 \cdot l_3^4 - 2 \cdot w^4 \cdot s^2 \cdot l_2 \cdot l_3^2 \cdot l_1)}$$

$$I_{y2}(s) := w \cdot s \cdot l_3 \cdot u_{x1} \cdot \frac{(l_2 \cdot s \cdot w^2 \cdot l_1 - r_2 \cdot r_1 - w^2 \cdot s \cdot l_3^2)}{(r_2^2 \cdot r_1^2 + r_2^2 \cdot w^2 \cdot l_1^2 + 2 \cdot r_2 \cdot r_1 \cdot w^2 \cdot l_3^2 \cdot s + w^2 \cdot s^2 \cdot l_2^2 \cdot r_1^2 + w^4 \cdot s^2 \cdot l_2^2 \cdot l_1^2 + w^4 \cdot s^2 \cdot l_3^4 - 2 \cdot w^4 \cdot s^2 \cdot l_2 \cdot l_3^2 \cdot l_1)}$$

$$I_2(s) := \sqrt{I_{x2}(s)^2 + I_{y2}(s)^2}$$

$$\begin{aligned} I_{x2}(s_n) &= -443.398 & I_{y2}(s_n) &= 87.96 & \text{определение тока ротора} \\ I_2(0.025) &= 1.018 \times 10^3 \end{aligned}$$

$P_1(s) := 3 \cdot u_{1x} \cdot I_{x1}(s)$  определение электромагнитной мощности АД

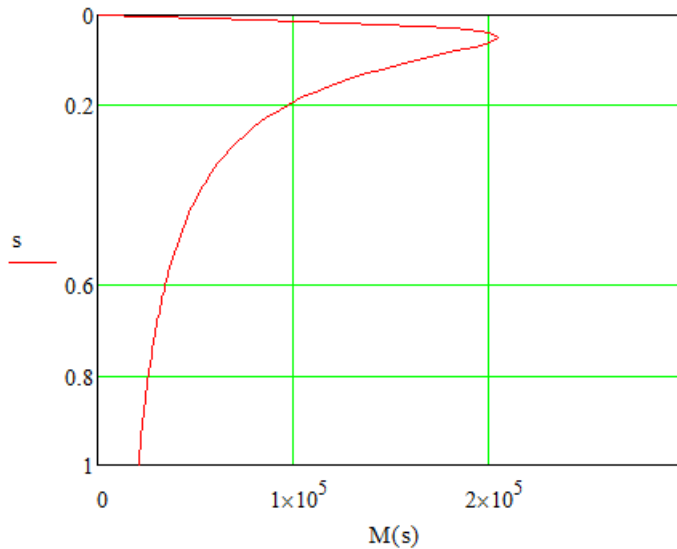
$$P_1(s_n) = 1.302 \times 10^7$$

$M(s) := \frac{3 \cdot p_n \cdot l_3}{1} \cdot (I_{y1}(s) \cdot I_{x2}(s) - I_{x1}(s) \cdot I_{y2}(s))$  определение электромагнитного момента АД

$$M(s_n) = 8.195 \times 10^4$$

$$\xi_s := 1,099 \dots 0$$

Вызов и построение декартова графика



### 3.2 Расчёт и построение механических характеристик АВК

1. Индуктивное сопротивление фазы двигателя, приведённое к ротору:

$$X_P = \frac{E_{2H}^2}{2\omega_0 \lambda M_H} = \frac{1000^2}{2 * 157 * 2 * 28069} = 0.057(\text{Ом});$$

2. Активное сопротивление одной фазы статора:

$$r_1 = \frac{U_{1H} s_H}{\sqrt{3} I_{1H}} = \frac{10000 * 0.025}{\sqrt{3} * 173} = 0.835(\text{Ом});$$

где  $U_{1H} = 10000$  В – напряжение статора двигателя,  
 $s_H = 0.025$  – номинальное скольжение двигателя,  
 $I_{1H} = 173$  А – номинальный ток статора.

3. Активное сопротивление обмотки ротора:

$$r_2 = \frac{105 M_H s_H}{I_{2H}^2 2p} = \frac{105 * 28069 * 0.025}{323^2 * 4} = 0.177(\text{Ом}).$$

где:  $M_H = 28069$  Н\*м – номинальный момент двигателя,  
 $I_{2H} = 323$  А – номинальный ток ротора.

4. Коэффициент трансформации двигателя:

$$K_{TP.Дв.} = \frac{U_{1H}}{E_{2H}} = \frac{10000}{1000} = 10$$

5. Активное сопротивление обмотки статора, приведённое к ротору:

$$r_1' = \frac{s_n}{K_{TP.Дв.}} = \frac{0.025}{10} = 0.0025$$

6. Коэффициент трансформации трансформатора:

$$K_m = \frac{U_{1H}}{E_{2\phi}} = \frac{10000}{690} = 14,5$$

7. Активное сопротивление первичной обмотки трансформатора:

$$r_T = \frac{\Delta P_K}{3I_{1H}^2 K_T^2} = \frac{9700}{3 * 58^2 * 14,5^2} = 0.0046(Ом).$$

8. Индуктивное сопротивление фазы трансформатора:

$$X_T = \frac{U_{K\%} U_{1\phi}}{100 I_{1H} K_T^2} = \frac{0,3 * 5780}{100 * 58 * 14,5^2} = 0.0014(Ом),$$

где:  $U_{K\%} = 0,3 \%$  - напряжение короткого замыкания трансформатора  
зависимого инвертора,

$I_{1H} = 58 \text{ А}$  – ток первичной обмотки трансформатора.

9. Индуктивность трансформатора:

$$L_T = \frac{X_T}{2\pi f} = \frac{0.0014}{314} = 4,45 \times 10^{-6} (\Gamma H);$$

10. Активное сопротивление преобразователя:

$$R_{II} = 2r_T + \frac{3X_T}{\pi} = 0.0046 + \frac{3 * 0.0014}{3.14} = 0.0059(Ом);$$

11. Индуктивное сопротивление сглаживающего дросселя принимаем:

$$12. \quad L_{сд} = 1.5 * 10^{-3} (\Gamma H);$$

13. Сопротивление двигателя:

$$R_{Дв}(s) = 2r_2 + 2r_1' s + \frac{3X_p s}{\pi} = 2 * 0.0177 + 2 * 0.0025s + \frac{3 * 0.057s}{\pi} =$$

$$= 0.0354 + 0.06s$$

получили, что сопротивление двигателя есть функция, зависящая от скольжения – s.

14. Суммарное сопротивление:

$$R_{\Sigma}(s) = R_{П} + R_{ДВ} + R_{Сд} = 0.0059 + 0.0354 +$$

$$+ 0.06s = 0.0413 + 0.06s$$

где:  $R_{П} = 0,0059$  Ом – сопротивление преобразователя,  
 $R_{ДВ}(s) = 0,0354 + 0,06 * S$  – сопротивление двигателя,  
являющееся функцией скольжения,  
 $L_{Сд} = 0,0015$  Гн – индуктивность сглаживающего дросселя.

Аналитическое выражение механических характеристик АВК

$$M = \frac{6E_p^2}{\pi\omega_1 X_p} \left( \frac{s - s_0}{s(1+q) + p} - \left[ \frac{s - s_0}{s(1+q) + p} \right]^2 \right)$$

или, обозначая

$$A_s = \frac{s - s_0}{s(1+q) + p}$$

$$M = \frac{6E_p^2}{\pi\omega_1 X_p} (A_s - A_s^2)$$

Максимальный момент АД при схеме включения равен

$$M_{\text{макс}} = k_M M_H = \frac{E_p^2}{2\omega_1 X_p}$$

В практических расчетах бывает удобнее пользоваться моментом, выраженным в относительных единицах, т. е. отнесенным к номинальному паспортному моменту двигателя:

$$M_{o.e.} = \frac{M}{M_H} =$$

$$= 3,82k_M \left( \frac{s - s_0}{s(1+q) + p} - \left[ \frac{s - s_0}{s(1+q) + p} \right]^2 \right) =$$

$$= 3,82k_M (A_s - A_s^2)$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_0}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 600}{60} = 62,8 \text{ рад/сек.}$$

$$\rho = \frac{X_T}{4X_p} + \frac{2\pi r_2}{3X_p} + \frac{\pi r_T}{6X_p} = \frac{0,0014}{4 \cdot 0,057} + \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,0177}{3 \cdot 0,057} + \frac{3,14 \cdot 0,0046}{6 \cdot 0,057} = 1,078$$

Скольжение холостого хода:

$$s_0 = \varepsilon \cos \beta + \lambda$$

$$\varepsilon = \frac{k_2 E_{2T}}{k_1 E_p} = \frac{1,17 \cdot 690}{1,35 \cdot 1000} = 0,598$$

$$\lambda = \frac{\Delta U}{k_1 E_p} = \frac{3 \cdot 18,5}{1,35 \cdot 1000} = 0,04$$

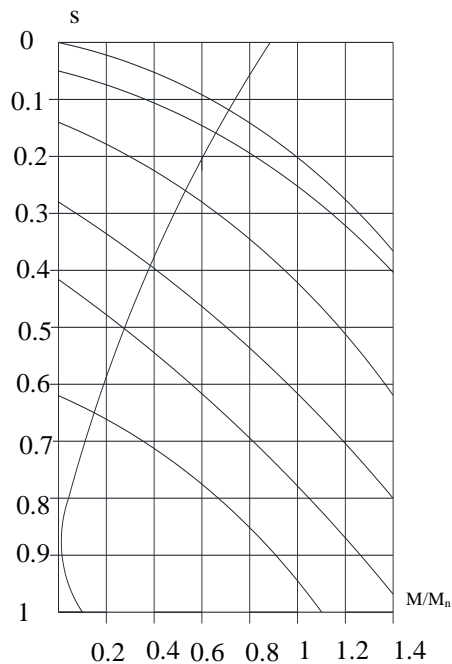
$$q = \frac{2\pi r_1'}{3X_p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,0025}{3 \cdot 0,057} = 0,092$$

Расчетные данные характеристики сведены в таблице 1.  
Механические характеристики показаны на рисунке .

$\beta$ , град	$s_0$	s	$A_s$	$A_s^2$	$A_s - A_s^2$	M/M <sub>H</sub> отн. ед.
93,8	0	0,05	0,044	0,002	0,042	0,32
93,8	0	0,15	0,12	0,015	0,105	0,8
93,8	0	0,3	0,21	0,05	0,16	1,22
90	0,04	0,09	0,042	0,002	0,04	0,3
90	0,04	0,2	0,12	0,015	0,105	0,8
90	0,04	0,36	0,22	0,05	0,17	1,3
75	0,19	0,4	0,14	0,02	0,12	0,92
75	0,19	0,6	0,23	0,06	0,17	1,3
60	0,34	0,5	0,1	0,01	0,09	0,69

60	0,34	0,8	0,24	0,06	0,18	1,38
45	0,46	0,6	0,08	0,006	0,074	0,57
45	0,46	0,9	0,21	0,045	0,165	1,26
15	0,62	0,65	0,02	0,0003	0,0197	0,15
15	0,62	0,95	0,16	0,025	0,135	1,03

Таблица 1



## Программа расчета и расчет механических характеристик АВК (Mathcad 15)

Рисунок 3.1 Механическая характеристика

### 1. Исходные данные

$$E_{2k} := 1000 \quad U_{2T} := 1220 \quad \omega := 157.08 \quad k_1 := 1.35 \quad k_2 := 2.34 \quad r_2 := 0.177$$

$$x_p := 0.057 \quad r_{11} := 0.0025 \quad r_T := 0.0046 \quad x_T := 0.0014 \quad r_d := 0.001$$

### 2. Эквивалентное сопротивление цепи выпрямленного тока

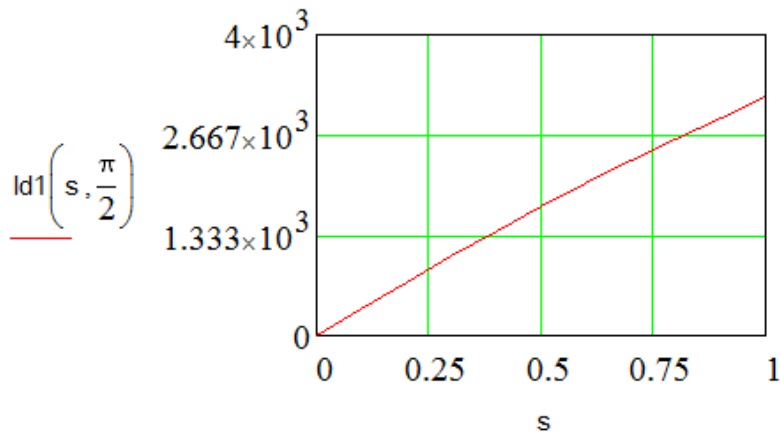
$$\text{Re}(s) := \left( \frac{3 \cdot x_p \cdot s}{\pi} \right) + \left( \frac{3 \cdot x_T}{\pi} \right) + 2 \cdot r_2 + 2 \cdot r_{11} \cdot s + r_d + 2 \cdot r_T$$

### 3. Величина выпрямленного тока в функции скольжения

$$I_{d1}(s, b) := \frac{k_1 \cdot E_{2k} \cdot s - k_2 \cdot U_{2T} \cdot \cos(b)}{\text{Re}(s)}$$

### 4. Вызов графика

$$s := 0, 0.1.. 1$$



6. Момент на 2 участке

$$M2(s,b) := \left(\frac{1.17}{\omega}\right) \cdot Id1(s,b) \cdot \sqrt{E2k^2 - 2 \cdot xp^2 \cdot Id1(s,b)^2}$$

7. Граничное значение тока

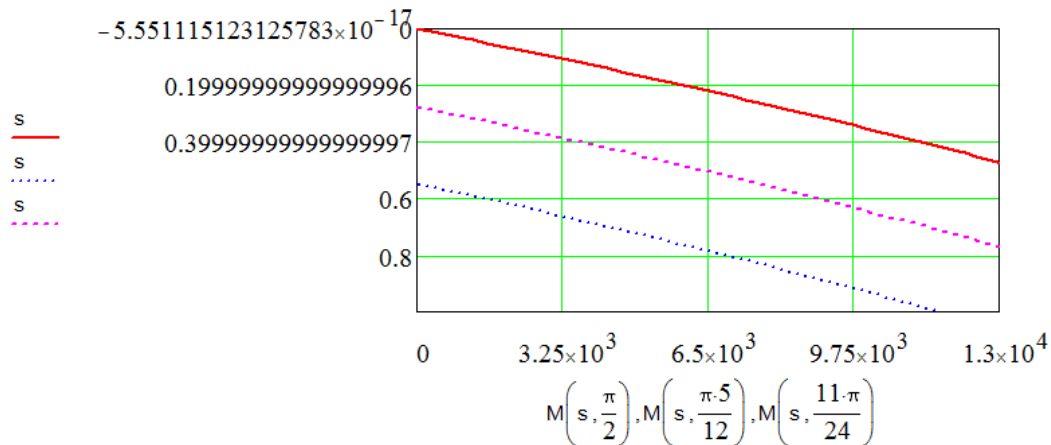
$$Idn := \frac{E2k}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot xp} \quad Idn = 6.203 \times 10^3$$

8. Механические характеристики

$$M(s,b) := \text{if}( Id1(s,b) < Idn, M1(s,b), M2(s,b) )$$

$$s := 0, 0.01.. 1$$

9. Вывод результата в графическом виде



### 3.3 Расчёт энергетических показателей

Расчет к.п.д. производится по формуле:

$$\eta_k = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{пол}} + \Delta P}$$

$$P_{\text{пол}} = \frac{Mn}{975 \cdot 9,81}$$

Где  $M$  и  $n$  берутся как координаты точек пересечения кривой  $M_c = f(n)$  с механическими характеристиками. Постоянные потери асинхронного двигателя

$$\begin{aligned} k_{a.d.n.} &= P_H \frac{1 - \eta_H}{\eta_H} - M_H \omega_1 s_H \left(1 + \frac{r_1'}{r_2}\right) = \\ &= 4300 \frac{1 - 0,93}{0,93} - \frac{28069 \cdot 62,8 \cdot 0,025}{1000} \left(1 + \frac{0,0025}{0,0177}\right) = 273,5 \text{ кВт} \end{aligned}$$

Постоянные потери в вентильном каскаде

$$k_k = 1,05 k_{a.d.n.} + \Delta P_{x.x.m.p} = 1,05 \cdot 273,5 + 1,8 = 289 \text{ кВт}$$

Переменные потери определяются по

$$v_k = I_d^2 R'_{\text{экв}} + I_d \Delta U$$

$I_d$  находится по формуле

$$I_d = \frac{\sqrt{E_p}}{2X_p} - \sqrt{\frac{E_p^2}{2X_p^2} - \frac{\sqrt{2}\omega_1 M}{k_1 X_p}}$$

$$R'_{\text{экв}} = 2r_2 + 2r_1' + \frac{r_T}{2} =$$

$$= 2 \cdot 0,0177 + 2 \cdot 0,0025 + \frac{0,0046}{2} = 0,0427 \text{ ом}$$

Расчет КПД сведен в таблице 2.

п, об/мин	М, отн.ед.	P <sub>пол</sub> , кВт	I <sub>d</sub> , А	v <sub>к</sub> , кВт	ΔP, кВт	P <sub>пол</sub> +ΔP, кВт	η <sub>к</sub>
-----------	------------	------------------------	--------------------	----------------------	---------	---------------------------	----------------



1305	0,87	3332	3222,8	2232	2521	5853	0,57
1110	0,74	2411	2665,9	1783	2072	4483	0,54
930	0,62	1692	2178,7	1412	1701	3393	0,50
750	0,5	1100	1713,9	1077	1366	2466	0,45
525	0,35	539	1159,9	701	990	1529	0,35

Таблица 2.

Расчет коэффициента мощности производится по:

$$\cos \varphi_k = \nu \frac{P_{\text{дв}} - P_{\text{тр}}}{\sqrt{(P_{\text{дв}} - P_{\text{тр}})^2 + (Q_{\text{дв}} + Q_{\text{тр}})^2}}$$

Разность  $P_{\text{дв}} - P_{\text{тр}} = P_{\text{пол}} + \Delta P$ ;  $\nu = 0,955$

Реактивная мощность двигателя

$$Q_{\text{дв}} = P_{\text{дв}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{дв}}$$

Значение  $\cos \varphi_{\text{дв}}$  находится по формуле:

$$\cos \varphi_{\text{дв}} = \frac{0,815 I_d}{\sqrt{2} E_p} \sqrt{\frac{2E_p^2 - \sqrt{2} X_p E_p I_d}{(0,815 I_d)^2 + I_0^2 k_T^2}}$$

$P_{\text{дв}}$  определяется по:

$$P_{\text{дв}} = M \omega_0 + \Delta P_{\text{м.ст}} + \Delta P_{\text{ст.ст}}$$

где  $\Delta P_{\text{м.ст}}$  – потери в меди статора;  $\Delta P_{\text{м.ст}} = 3 I_1^2 r_1$ ;

$\Delta P_{\text{ст.ст}}$  – потери в стали равны  $0,5 k_{\text{а.д.н}}$

Реактивная мощность трансформатора определяется следующим выражением

$$Q_{\text{тр}} = \sqrt{(1,22 I_d E_{2\phi})^2 - P_{\text{тр}}^2}$$

Расчетные значения коэффициента мощности сведены в таблице 3.

Таблица 3

п, об/мин	M, Н·м	$I_d, A$	$P_{\text{дв}} - P_{\text{тр}}, \text{кВт}$	$P_{\text{дв}}, \text{кВт}$	$P_{\text{тр}}, \text{кВт}$	$\cos \varphi_{\text{дв}}$	$Q_{\text{дв}}, \text{квар}$	$Q_{\text{тр}}, \text{квар}$	$\cos \varphi_k$	$\cos \varphi_{\text{компл}}$
1305	24420	3222,8	5853	3936	1917	0,38	9590	2713	0,41	0,94
1110	20771	2665,9	4483	3337	1146	0,43	6958	2244	0,42	0,95
930	17403	2178,7	3393	2790	603	0,48	5109	1834	0,42	0,95
750	14035	1713,9	2466	2246	220	0,51	3756	1443	0,41	0,94
525	9824	1159,9	1529	1573	-43	0,5	2695	976	0,37	0,83

Поскольку коэффициент мощности очень низок, необходимо добавить компенсирующее устройство.

Мощность конденсаторной батареи

$$Q'_k = (P_{\text{дв}} - P_{\text{мп}}) \operatorname{tg} \arccos 0,5 = 5853 \cdot 1,73 = 10126 \text{квар}$$

$$Q_{\text{комп}} = Q_k - Q'_k = Q_{\text{дв}} + Q_{\text{мп}} - Q'_k = 9590 + 2713 - 10126 = 2177 \text{квар}$$

Коэффициент мощности с учетом компенсирующего устройства

$$\cos \varphi_{\text{комп}} = \frac{P_{\text{дв}} - P_{\text{мп}}}{\sqrt{(P_{\text{дв}} - P_{\text{мп}})^2 + (Q_{\text{дв}} + Q_{\text{мп}} - Q'_k)^2}}$$

Зависимость энергетических показателей привода от скорости вращения показаны на рис 3.2.

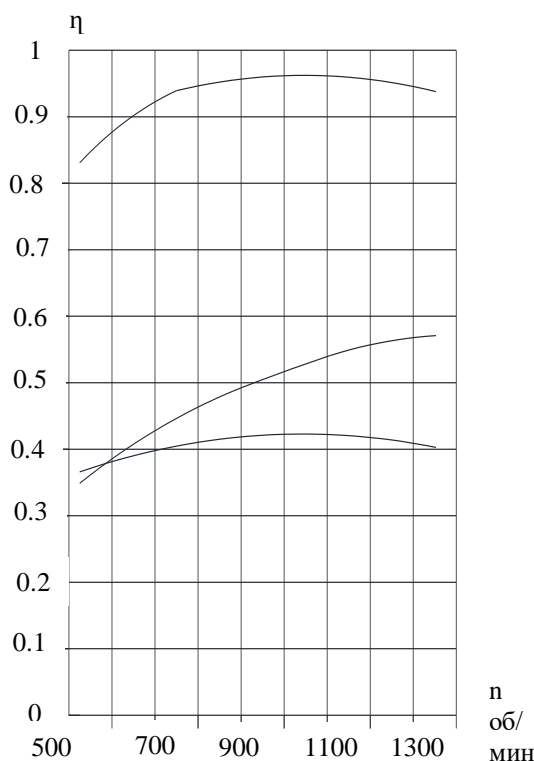


Рисунок 3.2 . Энергетические показатели привода.

## 4. Нагружающие устройства на базе асинхронного вентильного каскада

### 4.1 Классификация нагружающих устройств

Нагружающие (тормозные) устройства (НУ) служат для обкатки двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и дизельных двигателей различного типа. Процесс обкатки бывает горячий, когда НУ является нагрузкой для работающего испытуемого двигателя, и холодным, когда НУ вращает выключенный испытуемый двигатель. При горячей обкатке желательно обеспечить возврат (рекуперацию) преобразованной энергии двигателя в сеть. Для обкатки используются следующие варианты НУ [1,5,7].

1. Механические НУ. Механические тормоза применяются в настоящее время крайне редко ввиду явно выраженных недостатков, заключающихся в первую очередь в низкой экономичности, сложности стабилизации нагрузочного момента, отсутствии холодной обкатки двигателя.

2. Нагружающее устройство по схеме “машина постоянного тока - резистор”. Данная система НУ применяется в настоящее время достаточно редко. Обладая такими достоинствами, как возможность реализации режима холодной обкатки, простота и точность регулирования частоты вращения и нагрузочного момента, также НУ имеют и существенные недостатки. Одними из основных среди них являются низкая экономичность, обусловленная потерями энергии испытуемого двигателя в резисторе, и использование дорогой и сложной в обслуживании машины постоянного тока.

В настоящее время подобные системы модернизируют введением тиристорного преобразователя вместо резистора.

3. Нагружающие устройства с частичной рекуперацией энергии испытуемого ДВС. К этой группе НУ относятся в основном НУ на базе асинхронной машины (АМ) с фазным и короткозамкнутым ротором, в которых часть энергии испытуемого ДВС через статор АМ генерируется в питающую сеть.

3.1 Нагружающее устройство на основе АМ с жидкостным регулятором цепи ротора.

К этой группе НУ относятся самые распространенные в нашей стране НУ (рисунок 4.1). использование асинхронной машины с фазным ротором и резисторным регулятором в цепи ротора в качестве НУ впервые было предложено советскими учеными в 40-х годах [1,5,7].

Заводы выпускают такие НУ на мощности до 160 кВт при максимальной частоте вращения 3000 об/мин. Многие моторостроительные заводы страны оснащены именно такими НУ. К достоинствам рассматриваемых НУ относятся прежде всего простота,

высокая надежность и малая стоимость. Именно эти качества обусловили широкое распространение подобной системы в нашей стране.

Регулирование частоты вращения в режиме холодной обкатки до значения, не превышающего синхронного, осуществляется изменением сопротивления роторной цепи. При этом часть потребляемой из питающей сети энергии  $P_1$  расходуется на прокрутку испытуемого двигателя  $P_1(1-s)$ , а

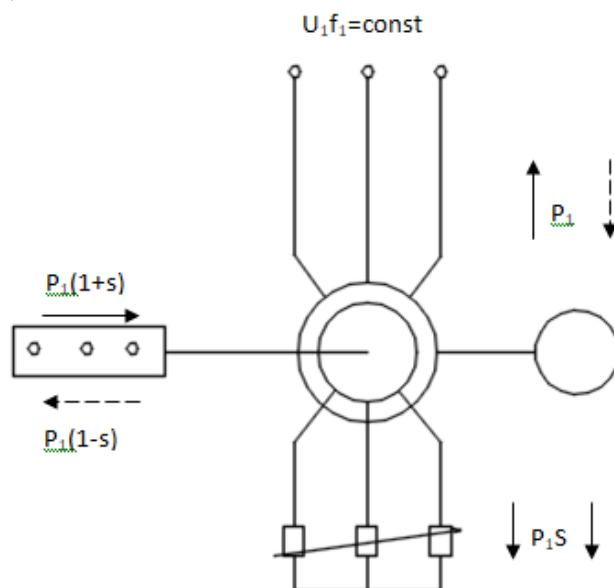


Рисунок 4.1 Нагружающее устройство на основе АМ с жидкостным регулятором цепи ротора.

другая часть  $P_1s$  теряется в резисторе. здесь  $s$  – скольжение асинхронной машины. В режиме горячей обкатки мощность испытуемого двигателя, поступающая на вал асинхронной машины  $P_1(1-|s|)$ , делится между статором и ротором. Мощность статора генерируется в питающую сеть, ротора  $P_1s$  теряется в резисторе. Горячая обкатка возможна только при частотах такого устройства может быть представлена ломаной линией  $a, b, c, d$  (рисунок 2.2).

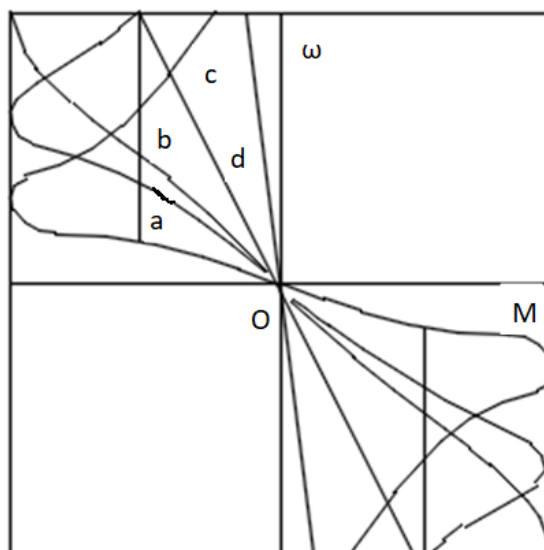


Рисунок 4.2 Механические характеристики НУ на основе АМ с жидкостным регулятором цепи ротора.

Линия *a* характеризует режим работы при закороченном роторе, *b* – предельное тепловое состояние тормоза, *c* – механическую прочность ротора, *d* – тормозной момент при разомкнутом роторе.

К недостаткам данной системы НУ следует в первую очередь отнести сложность автоматизации процесса обкатки, стабилизации и регулирования частоты вращения и нагрузочного момента.

Резистор в цепи ротора представляет жидкостный реостат, регулирования сопротивления которого осуществляется изменением положения погружающихся в раствор ножей. Испарение раствора, сгорание ножей, изменений влажности окружающей среды приводят к изменениям значений регулируемых параметров и, следовательно, к снижению качества испытаний.

Серьезным недостатком являются также потери энергии в роторной цепи, пропорциональные скольжению и возрастающие с увеличением начальной скорости испытуемого двигателя.

3.2 Нагружающее устройство на основе АМ с индукционным регулятором и резистором в роторной цепи [5,7]. Данная система НУ является развитием предыдущего варианта. С целью улучшения конструкции сопротивления роторной цепи применяют индукционный регулятор. При этом регулирование осуществляется индукционным регулятором, а сопротивление резистора включенного во вторичную сеть индукционного регулятора, остается постоянным. Остальные недостатки, присущие предыдущему варианту, характерны и для данного.

3.3 Нагружающее устройство на основе АМ с муфтой скольжения (рисунок 4.3).

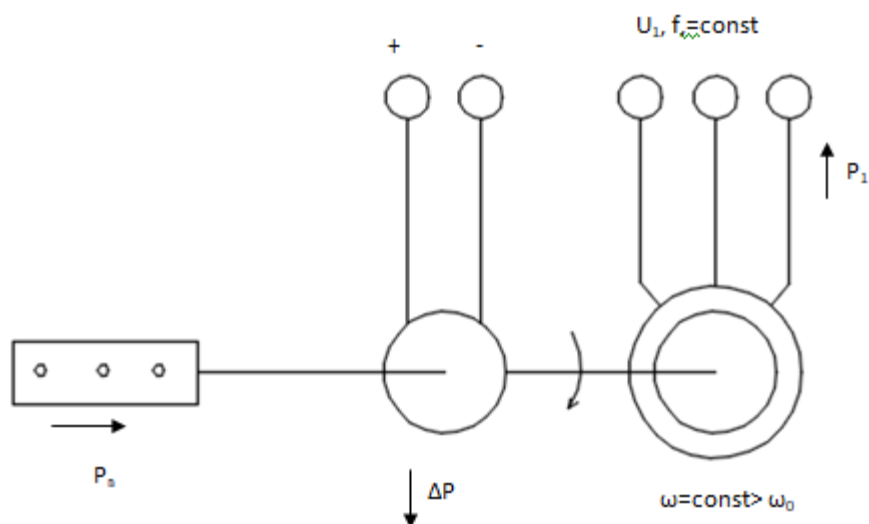


Рисунок 4.3 Нагружающее устройство на основе АМ с муфтой скольжения

Данный вариант НУ выгодно отличается от предыдущих тем, что использует наиболее простой, дешевый и надежный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором между используемым двигателем и АМ устанавливается муфта скольжения, выполняющая роль регулятора момента в режиме горячей обкатки и частоты вращения в режиме холодной обкатки. К недостаткам рассматриваемого варианта следует отнести значительные потери мощности в муфте скольжения, пропорционально скольжению.

4. Нагружающее устройство с полной рекуперацией ДВС [1,5,7]. К этой группе относятся наиболее перспективные НУ, отличающиеся высокими энергетическими показателями, большей степенью возможной автоматизации и выполнение на современном техническом уровне. Вполне очевидно, что НУ данной группы могут быть только на базе электрических машин. При этом если до 70-х годов НУ этого типа выполнялись на постоянном токе, то в настоящее время начинают внедряться в системы переменного тока. Так, по данным фирмы “АВВ” 54% изготовленных ею НУ имели электрические машины постоянного тока, 39% - асинхронные с короткозамкнутым ротором и 7% - асинхронные с фазным ротором. В качестве регулирующих органов все шире используются вентильные преобразователи.

4.1 Нагружающее устройство по системе “генератор-двигатель”. Данный вариант НУ обеспечивает режимы холодной и горячей обкатки во всем диапазоне частоты вращения электрической машины. При этом осуществляется практически полная отдача энергии испытуемого двигателя в питающей сети.

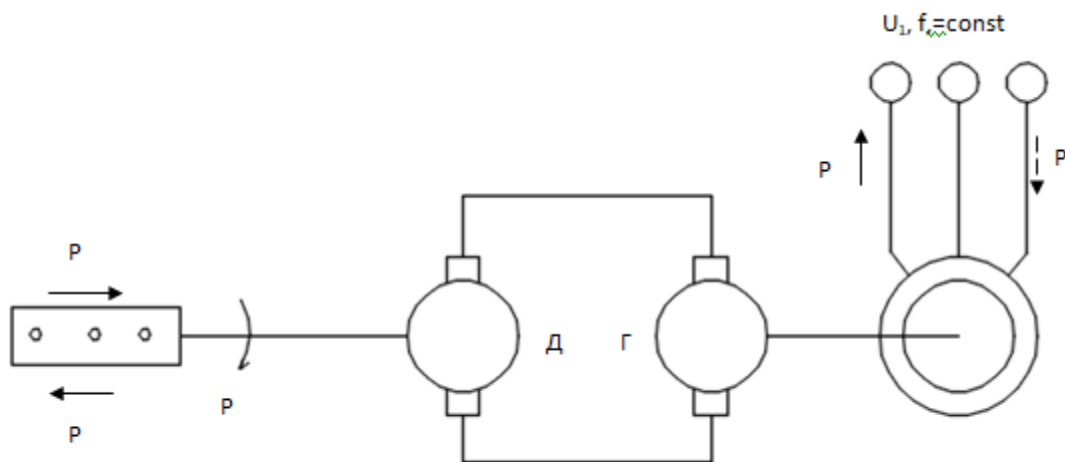


Рисунок 4.4 Нагружающее устройство по системе “генератор-двигатель”

Нагружающие устройства по такой схеме выпускались фирмами “Эшон унион”, “Браш”, “АВВ”, МЭЭ (Чехия) и др. Применяются они в основном для проведения научно-исследовательских испытаний. Степень стабилизации регулируемых параметров может быть получена очень высокой. К недостаткам рассматриваемой системы следует отнести большую установленную мощность электрооборудования и значительные потери энергии, связанные с тройным ее преобразованием. В нашей стране также НУ встречается довольно часто в исследовательских лабораториях институтов в мотостроительных заводах.

4.2 Нагружающее устройство по системе “машина постоянного тока – тиристорный преобразователь” [7]. Этот вариант НУ (рисунок 4.4) является развитием предыдущего. Здесь вместо пары “мотор - генератор” используется полупроводниковый преобразователь, как правило реверсивный. Нагружающее устройство по данной схеме выпускают фирмы “АВВ” и “Браш”, с максимальной частотой вращения до 5000 об/мин. При этом фирма “Браш” комплектует НУ измерителем крутящего момента, построенным на принципе измерения момента по параметрам электрической машины, что позволяет отказаться от балансирного исполнения двигателя. Точность измерения  $\pm 0,5\%$ . По своим нагрузочным характеристикам данный вариант практически не отличается от предыдущего.



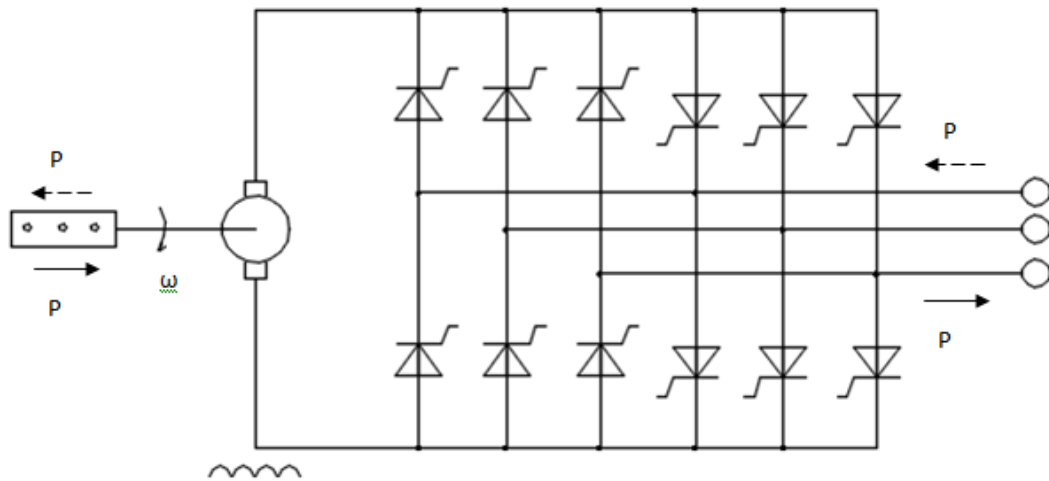


Рисунок 4.4 Нагружающее устройство по системе “машина постоянного тока – тиристорный преобразователь”

4.3 Нагружающее устройство по системе “асинхронный двигатель – преобразователь частоты” (рисунок 4.5). При необходимости испытаний двигателей с частотой вращения более 5000 об/мин затруднительно использовать машины постоянного тока. Для таких случаев наиболее целесообразной является систему НУ с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. При этом регулирование частоты вращения в режиме холодной обкатки и нагрузочного момента в горячей осуществляется преобразователем частоты. Опыт создания и эксплуатации такой системы имеет фирма “АВВ”, работавшая НУ мощностью 370 кВт с максимальной частотой вращения, равной 14000 об/мин. Выходная частота преобразователя изменяется от 0 до 234 Гц. Преобразователь должен обеспечивать изменение направления потока активной мощности.

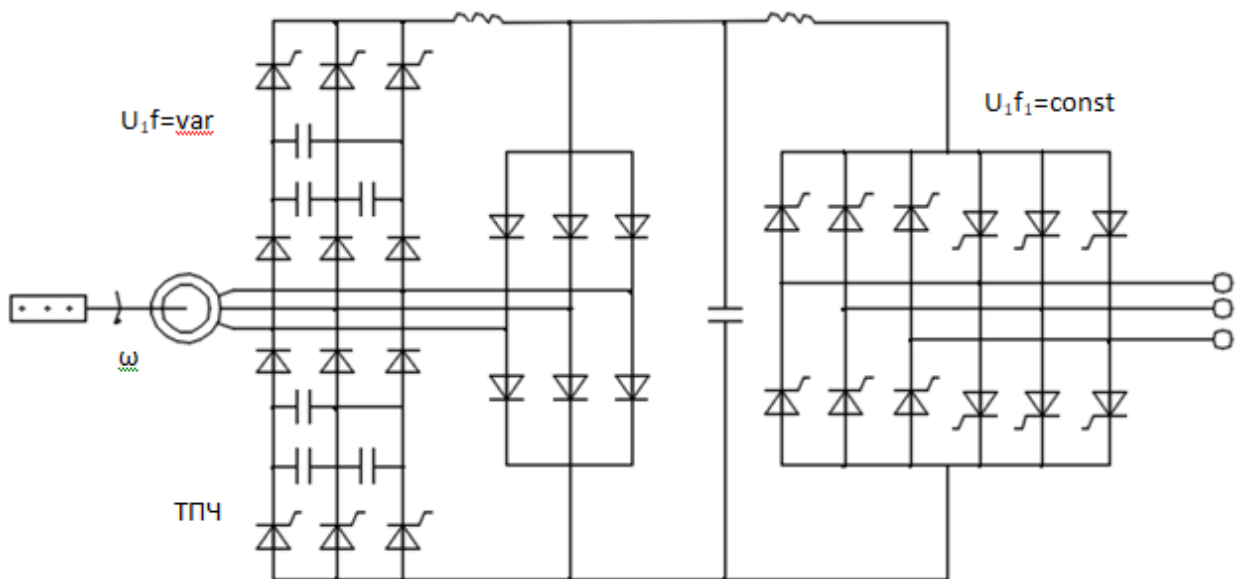


Рисунок 4.5 Нагружающее устройство по системе “асинхронный двигатель – преобразователь частоты”

Предельная нагрузочная характеристика такого НУ имеет вид характеристики системы “генератор - двигатель”. К недостаткам рассматриваемой системы следует отнести сложность преобразователя частоты и ее значительную установленную мощность.

4.4 Нагружающее устройство на основе машины двойного питания [1,5,7] предусматривает применение асинхронных машин с фазным ротором. В нашей стране асинхронные балансирные машины выпускаются давно и широко используются в качестве НУ с резисторным регулятором момента и частоты вращения. За рубежом интерес к НУ на основе машин с фазным ротором появился давно.

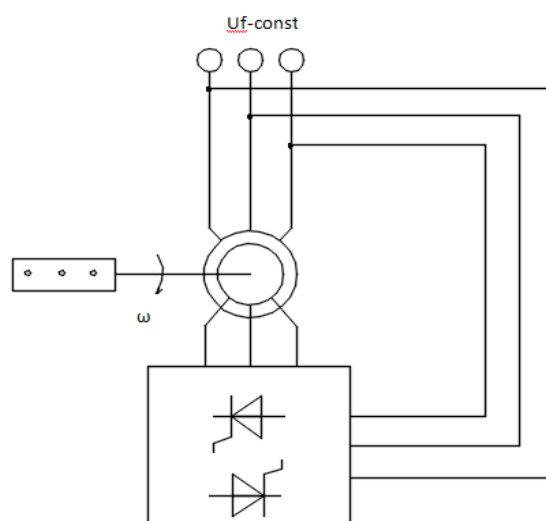


Рисунок 4.5 Нагружающее устройство на основе машины двойного питания

В качестве регуляторов момента или частоты вращения в таких системах используется полупроводниковый преобразователь, включаемый в роторную цепь асинхронной машины.

Отличительной особенностью таких НУ является то, что через вентильный преобразователь проходит лишь часть энергии испытуемого двигателя, пропорциональная скольжению асинхронной машины. В зависимости от типа вентильного преобразователя различают различные варианты НУ на основе МДП.

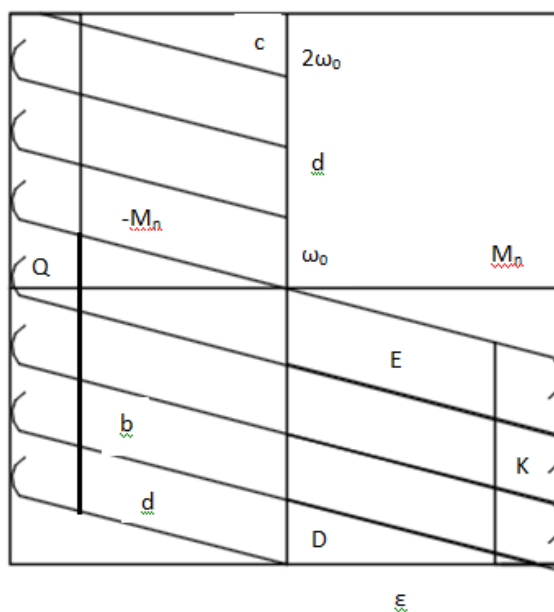


Рисунок 4.6 Механические характеристики НУ на основе машины двойного питания

Наиболее простым НУ из этой группы является система на основе асинхронно вентильных каскадов (АВК).

#### 4.2 Нагружающие устройства на основе асинхронных вентильных каскадов

Нагружающие устройства по схеме вентильного каскада выполняются по схеме, показанной на рисунке 4.7 [7].

С целью согласования напряжений ротора АМ и сети может быть применен согласующий трансформатор, включаемый в анодную цепь инвертора. Одновременно он выполняет функции ограничения токов короткого замыкания. При отсутствии согласующего трансформатора ограничение токов короткого замыкания обеспечивается токоограничивающим реактором  $L_a$ . Для снижения пульсаций выпрямленного тока ротора АМ, уменьшения зоны прерывистых токов,

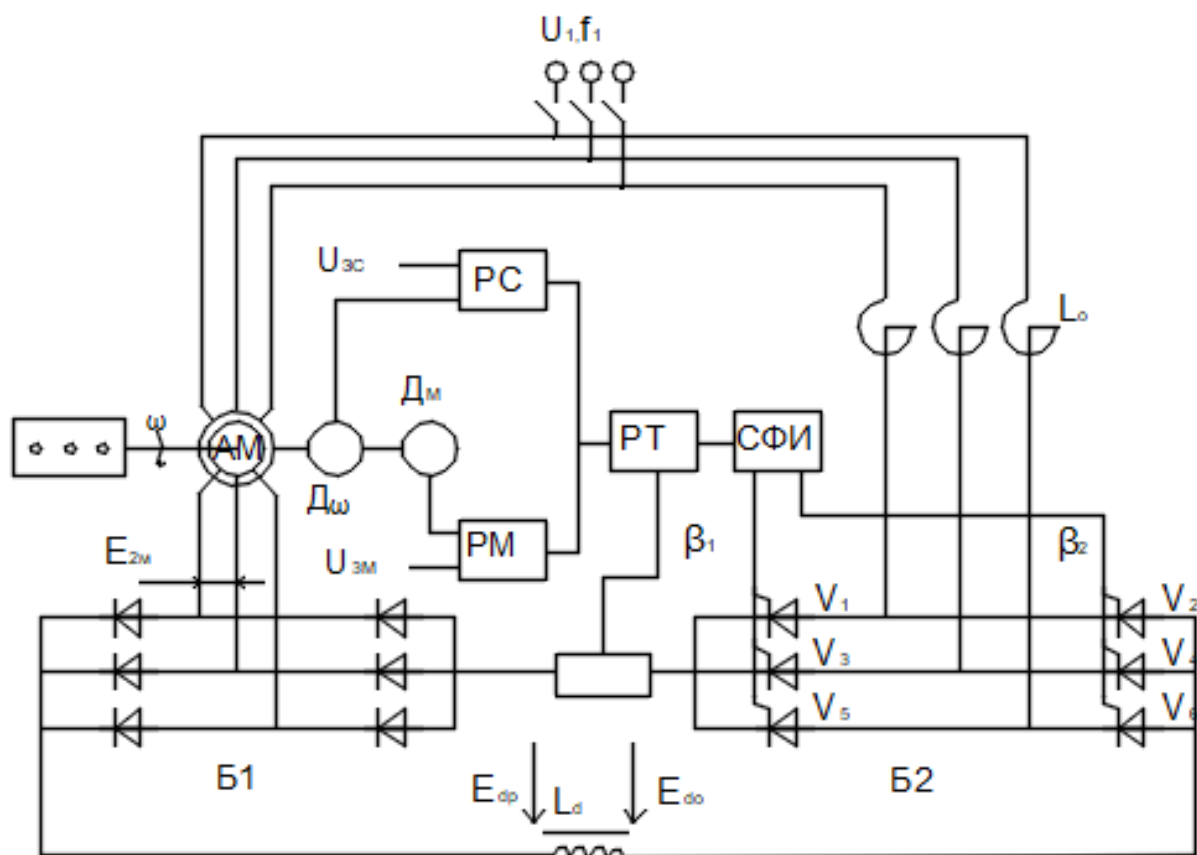


Рисунок 4.7 Нагружающее устройство по схеме АВК

улучшения использования АМ в промежуточную цепь постоянного тока вентильного преобразователя включен сглаживающий дроссель  $L_d$ , индуктивность которого, как будет показано ниже, является важным параметром, определяемым при проектировании.

Система управления НУ обеспечивает его работу в режимах холодной и горячей обкаток. При этом в режиме холодной обкатки, когда основным регулируемым параметром является частота вращения НУ, система регулирования состоит из регуляторов частоты вращения РС и тока РТ. Аналоговый сигнал с регулятора тока поступает на вход системы формирования импульсов СФИ, где преобразуется в дискретный сигнал в виде последовательности импульсов, синхронизированных относительно питающего напряжения. Фазовый сдвиг управляющих импульсов, поступающих на тиристоры инвертора, определяются значением аналогового сигнала на входе СФИ. Значение частоты вращения НУ в режиме холодной обкатки определяется входным сигналом  $U_{зс}$  регулятора частоты вращения. Изменение  $U_{зс}$  на входе РС производят в конечном итоге к изменению значения аналогового сигнала на входе СФИ и, следовательно, к смещению импульсов управления относительно напряжения питающей сети и изменению среднего значения противо-ЭДС инвертора АВК.

В режиме горячей обкатки структура системы регулирования изменяется. Основным регулятором становится регулятор момента РМ, и если подчинен регулятор тока. Нагрузочный момент измеряется с помощью датчика момента  $D_M$ , сигнал с которого поступает на вход РМ и сравнивается с сигналом задания нагрузочного момента  $U_{3M}$ . Изменение  $U_{3M}$  приводит к изменению противо-ЭДС инвертора, которая определяет добавочную ЭДС, вводимую в цепь ротора.

Добавочная ЭДС, вводимая в цепь ротора должна иметь управляемую амплитуду и переменную частоту  $f_2$ , соответствующую частоте скольжения:

$$f_2 = f_1 s$$

где  $f_1$  – частота питающей сети.

В АВК применен наиболее экономичный и надежный вентильный преобразователь с промежуточной цепью постоянного тока, в котором функции выпрямителя и инвертора разграничены между двумя группами вентилях. Принцип действия АВК можно представить следующим образом. При работе в двигательном режиме с частотой вращения ниже синхронной ток ротора АМ выпрямляется с помощью группы вентилях  $B_1$ . В цепи постоянного тока встречено по отношению к ЭДС ротора вводится добавочная ЭДС, равная ЭДС инвертора  $B_2$ . Выпрямленная ЭДС ротора  $E_d$  должна установить ЭДС инвертора и падение напряжения в эквивалентном сопротивлении. Последнее учитывает падение напряжения в активном сопротивлении роторного контура и т коммутации. Пренебрегаем падением напряжения в вентилях, получаем

$$E_{dpo} s = E_{duu} c_p + I_d R_\varepsilon$$

где  $E_{dpo}$  – выпрямленная ЭДС ротора при скольжении  $s = 1$ ;

$E_{duu}$  – максимальная ЭДС инвертора;

$c_p = E_{du} / E_{duu}$  – степень регулирования ЭДС инвертор;

$I_d$  – среднее значение выпрямленного тока ротора;

$R_\varepsilon$  – эквивалентное активное сопротивление цепи выпрямленного тока.

Из вышеприведенного уравнения имеем

$$s = \frac{E_{duu} c_p + I_d R_\varepsilon}{E_{dpo} s}$$

Изменяя величину ЭДС инвертора, можно менять частоту вращения нагружающего устройства. Если ЭДС  $E_{duu} c_p$  равна выпрямленному напряжению ротора  $E_{dpo}$ , ток в цепи ротора равен нулю и ротор АМ

неподвижен. При уменьшении  $E_{\text{дн}}$  ток ротора возрастает, момент двигателя увеличивается и НУ разгоняется до частоты вращения, при которой справедливо равенство  $s=f(c_p)$ . При согласовании напряжения сети и ротора, т.е. когда  $E_{\text{дн}} > E_{\text{др}}$ , схема АВК обеспечивает плавный пуск АМ и регулирование частоты вращения  $\omega$  от 0 до  $\omega_0$ .

Векторная и энергетическая диаграммы этого режима, соответствующие холодной обкатке ДВС, приведены на рисунке 4.8.

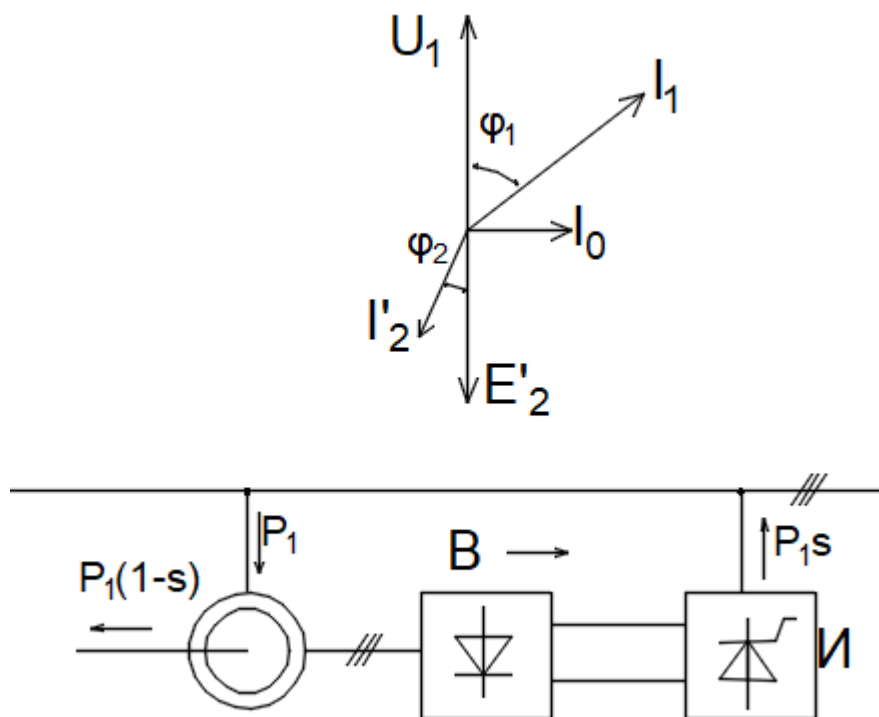


Рисунок 4.8 АВК в режиме холодной обкатки

Здесь часть мощности  $P_1$ , потребляемой АМ из питающей сети, идет на вал  $P_1(1-s)$  обеспечивает прокрутку испытуемого двигателя, а часть  $P_1s$  через вентильный преобразователь возвращается в питающую сеть. В выпускаемых в настоящее время НУ типа КИ эта мощность расходуется на нагрев регулировочных сопротивлений в роторной цепи, что существенно снижает КПД установки в целом. Режим холодной обкатки проходит при  $\omega < \omega_0$ . Холодная обкатка при  $\omega > \omega_0$  возможна только при изменении направления потока активной мощности в роторной цепи. При этом роторных блок вентилях должен работать в инверторном режиме, что принципиально не возможно для неуправляемых вентилях этого блока.

В режиме горячей обкатки нагружающее устройство работает тормозом, создавая нагрузочный момент на валу ДВС. Выпрямленный ток, определяющий момент, будет равен

$$I_d = (E_{dpo}s - E_{duu}c_p) / R_s$$

При изменении ЭДС инвертора при заданной частоте вращения испытуемого двигателя осуществляют регулирование величины  $I_d$  и, следовательно, нагрузочного момента НУ. В этом случае мощность испытуемого двигателя

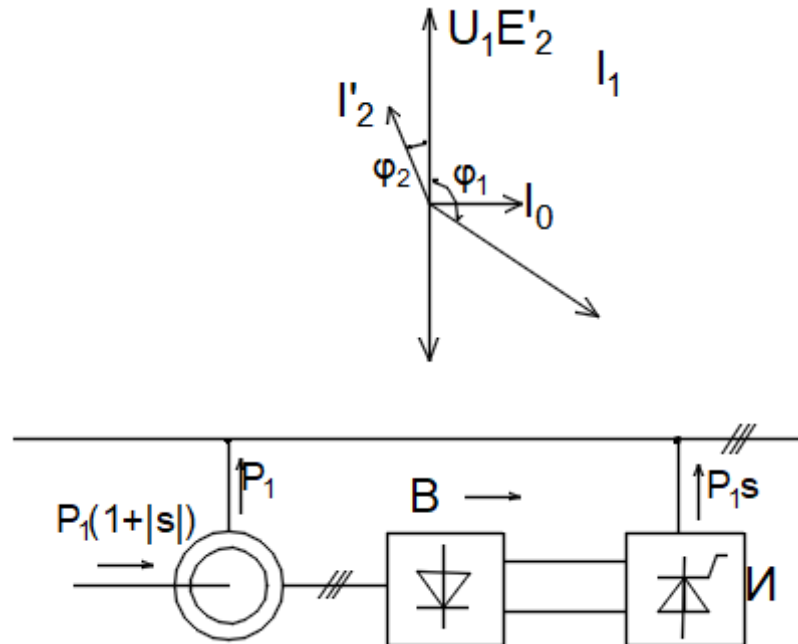


Рисунок 4.9 АВК в режиме горячей обкатки

через электрическую машину и вентильных преобразователь передается в питающую сеть. При сверхсинхронной частоте вращения  $\omega > \omega_0$  у электрической машины меняется порядок следования фаз напряжения ротора, а также их направление. Поэтому фазовый угол сдвига  $\varphi_2$ , направленный против часовой стрелки, является для цепи ротора через вентильный преобразователь в питающую сеть. Ввиду того, что роторная группа вентилей  $B_1$  выполняется неуправляемой,  $\varphi_2$  будет определяться углом коммутации тока ротора  $I_p$ . Таким образом в этом режиме работы мощность, поступающая от испытуемого двигателя на вал асинхронной машины, за вычетом потерь в машине и преобразователе генерируется в питающую сеть по данным каналам: через асинхронную машину  $P_1$  и преобразователь  $P_1s$ . Следует отметить, что генераторный режим возможен только при  $\omega > \omega_0$ . Подключение активной мощности в роторной цепи, что возможно только при управляемом роторном блоке  $B_2$ , когда НУ работает в режиме машины двойного питания.

Расширение диапазона частот вращения, при которых возможна горячая обкатка испытуемого двигателя, т.е. создание тормозного момента на валу АМ, возможно при переводе АВК в режим динамического торможения. В этом режиме тормозной момент можно

обеспечить при  $\omega \geq \omega_0$ . Для этого статор АМ отключается от питающей сети и возбуждается постоянным током (рисунок 4.10). Механическая энергия на валу, превращаясь в роторе в электрическую, инвертируется вентильным преобразователем в сеть. При этом роторный блок работает выпрямителем, а сетевой инвертором. Регулирование осуществляется изменением ЭДС инвертора или тока возбуждения статора. Здесь АМ работает в режиме обращенного синхронного генератора с переменной частотой вращения. При этом мощность испытуемого двигателя передается в сеть через вентильный преобразователь. Очевидно, что такой режим работы НУ целесообразно от нуля до синхронной частоты вращения.

Следует отметить, что указанный режим работы НУ является длительным потому расчет постоянного тока статора необходимо вести исходными не только из требуемого тормозного момента, но и из условия нагрева Р.

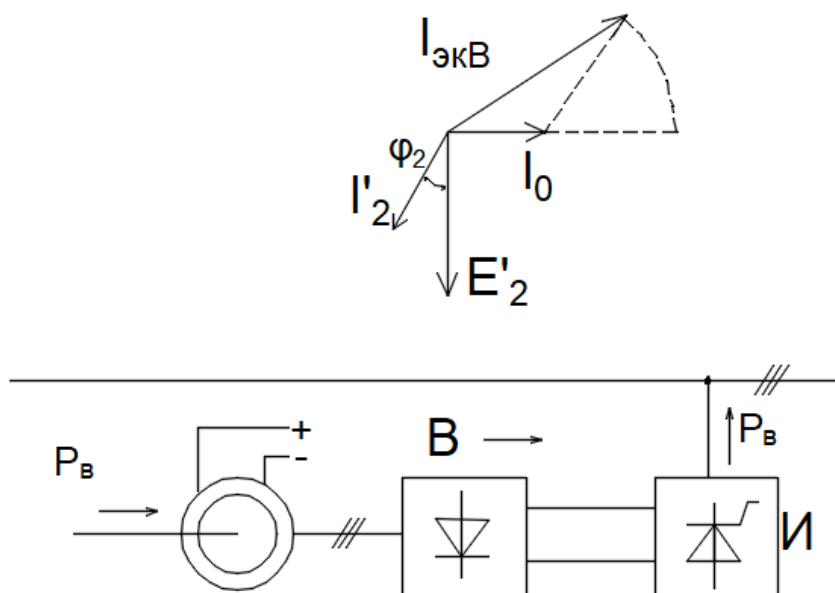


Рисунок 4.10 АВК в режиме динамического торможения



## 5 Безопасность жизнедеятельности

### 5.1 Анализ зануления на отключение двигателя с точки зрения электробезопасности людей

В проектах связанных с электрическими устройствами нужно предусмотреть когда защитные устройства не позволяют обеспечить безопасность для работников цеха. А именно замыкания на корпус электрических устройств. Известно, что в процессе эксплуатации электроприемников, неизбежно старение изоляции последующим ее повреждением, что может привести к появлению напряжения на металлических нетоковедущих частях этих устройств.

С целью обеспечения безопасности работников в цеху необходимо защитное зануление на отключение.

Зануление на отключение Основная цель защитного отключения – обеспечение электробезопасности человека, что достигается за счёт ограничения времени воздействия опасного тока на организм человека. С этой целью применяются специальные устройства защитного отключения, которые в постоянном режиме постоянно контролируют условия работы человека (контролируются токи утечки как в нормальном, так и в аварийном режимах). Они срабатывают при непрямом контакте человека с электроустановкой и при его соприкосновении с не находящимися в нормальном режиме работы под напряжением частями электроустановки, на которых оно появилось вследствие повреждения изоляции. УЗО отслеживает величину тока, проходящего через тело человека, и реагирует на неё, обеспечивая мгновенное (не превышающее 0,02 с) автоматическое отключение всех фаз аварийного участка электроцепи.

Защитное отключение осуществляется при помощи автоматических выключателей, снабженных специальным реле защитного отключения. Принципиальная схема защитного отключения изображена на рис.1. Основным элементом схемы является защитное реле 1 с постоянно замкнутыми контактами. При замыкании на корпус одной из фаз, когда корпус электроустановки окажется под напряжением выше допустимого, сердечник реле 1 втягивается и размыкает цепь питания катушки контактора 2, в результате чего электроустановка отключается. Защитное реле 1 срабатывает при заданном напряжении на корпусе электроустановки порядка  $24 \div 40$  В. для контроля исправного действия защитного реле, контактора и всех соединений предусмотрена контрольная кнопка 4.

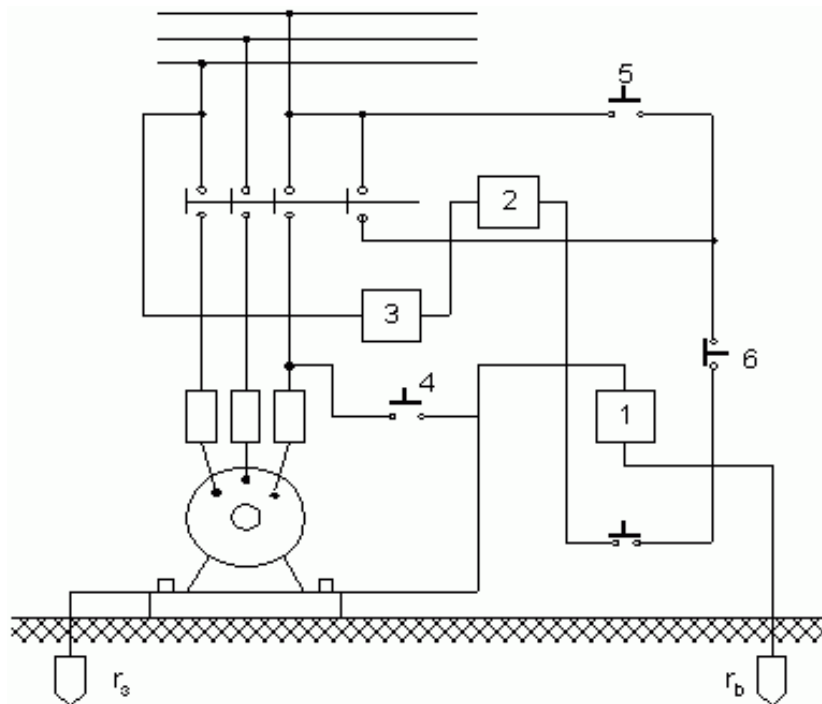


Рис. 5.1. Принципиальная схема защитного отключения.

## 5.2 Расчет зануления на отключения асинхронного двигателя.

Основные технические характеристики электродвигателя:

$P_n = 4300$  кВт – номинальная мощность;

$U_{1n} = 10000$  В – напряжение статора;

$I_{1n} = 173$  А – номинальный ток статора;

$I_{2n} = 323$  А – номинальный ток ротора;

$n_0 = 1500$  об/мин – синхронная скорость вращения;

$\eta = 0,93$  – номинальный к.п.д;

$\cos \varphi = 0.89$  – коэффициент мощности;

$U_{2n} = E_{2n} = 1000$  В – напряжение ротора;

$s_k = 8.4$  % - критическое скольжение;

$\mu = 2.0$  – отношение критического момента к номинальному;

$I_{пуск} / I_{ном} = 7,5$ .

Трансформаторы типа ТСЗ -1000 10/0,69-УХЛ4

$S_{тр} = 1000$  кВА;

Соединение - "треугольник-звезда".

Кабель от подстанции до вводов цеха: 4-х жильный,  $l=100$ м, сечения  $3 \times 50 + 1 \times 35$ , AL.

От щитка до двигателя  $l=30$ м,  $3 \times 35 + 1 \times 25$ , AL.

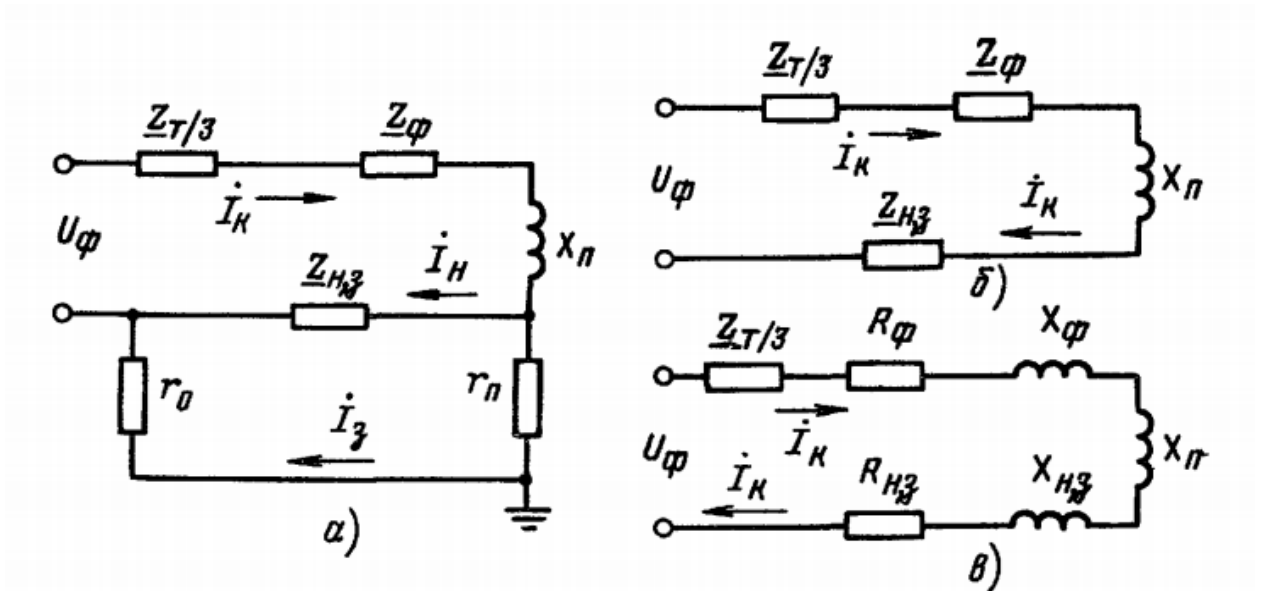


Рис. 5.2 Расчетная схема зануления в сети переменного тока на отключающую способность: а) – полная, б, в – упрощенные

Защита двигателя-плавкими вставками.

Расчет  $I_{кз}$  производится по формуле:

$$I_{кз} = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_T}{3} + Z_{II}} \quad (5.1)$$

где  $Z_{II}$  определяется по формуле:

$$Z_{II} = \sqrt{(R_{\phi} + R_{HЗ})^2 + (X_{\phi} + X_{HЗ} + X_n)^2} \quad (5.2)$$

Значение  $Z_T$  зависит от мощности трансформатора, напряжения, схемы соединения его обмоток и конструктивного исполнения трансформатора. При расчетах зануления  $Z_T$  берется из таблицы 1. В данном случае  $Z_T = 0,081$  Ом.

Таблица 4

Мощность трансформатора, кВ А	Номинальное напряжение обмоток высшего напряжения, кВ	zт, Ом, при схеме соединения обмоток	
		Y/Yн	Д/Ун У/ЗН
1000	6-10	0,081	0.027

1. Зная мощность  $P$  электродвигателя рассчитываем номинальный ток электродвигателя  $I_{н.д.в.}$ .

$$P_{кз} = \frac{\sqrt{3}U_H \cdot I_{н.д.в.} \cos \varphi}{1000} \quad (5.3)$$

$$I_{н.д.в.} = \frac{1000 \cdot P_{кз}}{\sqrt{3}U_H \cdot \cos \varphi} \quad (5.4)$$

где  $P$  – номинальная мощность двигателя, кВт;  
 $U_H$  – номинальное напряжение, В;

$$I_{н.д.в.} = \frac{1000 \cdot 4300}{\sqrt{3} \cdot 10000 \cdot 0,89} = 279,3$$

$\cos \varphi = 0,89$  – коэффициент мощности, показывающий, какая часть тока используется на получение активной мощности и какая на намагничивание.

2. Для расчета активных сопротивлений  $R_H$  и  $R_\phi$  необходимо предварительно выбрать сечение, длину и материал нулевого и фазного проводников. Сопротивление проводников из цветных металлов определяется по формуле :

$$R = \frac{\rho \cdot l}{s} \quad (5.5)$$

$$R_{\phi 1} = \frac{0,028 \cdot 100}{50} = 0,056 [Ом]$$

$$R_{\phi 2} = \frac{0,028 \cdot 30}{35} = 0,024 [Ом]$$

$$R_{\phi \Sigma} = 0,056 + 0,024 = 0,08 [Ом]$$

$$R_{H1} = \frac{0,028 \cdot 100}{35} = 0,08 [Ом]$$

$$R_{н2} = \frac{0,028 \cdot 30}{25} = 0,034 [Ом]$$

$$R_{н\Sigma} = 0,08 + 0,034 = 0,114 [Ом]$$

3. Для медных и алюминиевых проводников внутреннее индуктивное сопротивление фазного и нулевого проводников  $X_f$  и  $X_0$  невелико и составляет 0,0156 Ом/км, т.е.  $X_f = 0,0156 \cdot 0,13 = 0,0020$  Ом;  $X_0 = 0,0156 \cdot 0,13 = 0,0020$  Ом. Величину внешнего индуктивного сопротивления петли «фаза-нуль» в практических расчетах принимают равной 0,6 Ом/км.

5. Зная  $I_{нэл.дв}$  вычисляем пусковой ток электродвигателя:

$$I_{пуск.Эл.дв} = 7,5 \cdot I_{нэл.дв} = 7,5 \cdot 279,3 = 2094,75 [А] \quad (5.6)$$

Определяем номинальный ток плавкой вставки

$$I_{нпл.вст} = \frac{I_{пуск.Эл.дв}}{K_T} = 2094,75 / 2,5 = 837,9 [А] \quad (5.7)$$

где  $K_T$  – коэффициент режима работы ( $K_T = 1,6 \dots 2,5$ ); для двигателей с частыми включениями (например, для кранов)  $K_T = 1,6 \dots 1,8$ ; для двигателей, приводящих в действие механизмы с редкими пусками (транспортёры, вентиляторы),  $K_T = 2 \dots 2,5$ . В нашем случае принимаем  $K_T = 2,5$ .

$$I_{кз} > 3I_{нпл.вст} = 3 \cdot 837,9 = 2513,7 [А] \quad (5.8)$$

6. Определяем ожидаемое значение тока короткого замыкания:

Рассчитываем плотность тока  $\delta$  в нулевом и фазном проводниках. Допускаемая плотность тока в алюминиевых проводниках не должна превышать 8А/мм<sup>2</sup>:

$$\delta = \frac{I_{нэл.дв}}{s} = \frac{279,3}{35} = 7,98 [А / мм^2]$$

(5.9)

7. Определяем внешнее индуктивное сопротивление петли «фаза-нуль», зная, что  $X_{II} = 0,6 \text{ Ом/км}$

$$X_{II} = 0,6 \cdot 0,13 = 0,078 [\text{Ом}] \quad (5.10)$$

8. Рассчитываем сопротивление петли «фаза-нуль»  $Z_{II}$  и ток короткого замыкания:

$$Z_{II} = \sqrt{(0,08 + 0,114)^2 + (0,002 + 0,002 + 0,078)^2} = 0,21 [\text{Ом}]$$

$$I_{кз} = \frac{5780}{\left(\frac{0,081}{3} + 0,21\right)} = 24388 [\text{А}]$$

Проверим, обеспечено ли условие надёжного срабатывания защиты:

$$I_{кз} > 3I_{нпл.вст}; 24388 > 3 \cdot 837,9; 24388 > 2513,7 [\text{А}] \quad (5.11)$$

Значение коэффициента  $k$  принимается в зависимости от типа защиты электроустановки. Если защита осуществляется автоматическим выключателем, имеющим только электромагнитный расцепитель (отсечку), т. е. срабатывающим без выдержки времени, то  $k$  принимается в пределах 1,25—1,4.

$$I_{кз} > kI_{авт}^H \quad (5.12)$$

Как видим,  $I_{кз}$  более чем в три раза превышает номинальный ток плавкой вставки предохранителя и, следовательно, при замыкании на корпус плавкая вставка перегорит за 0,04...0,05с и отключит повреждённую фазу.

9. По расчётному номинальному току плавкой вставки выбираем предохранитель стандартных параметров:

NV/НН4 – 900;  $I_{пл.вст}^H = 900\text{А}$ , или выбираем автоматический выключатель по  $I_{авт}^H = 1,25 \cdot I_{эл.дв}^H = 1,25 \cdot 279,3 = 349\text{А}$ . Выбираем автоматический выключатель модели СВ400S3ТМ350;  $I_{авт}^H = 350 \text{ А}$ .

Вывод по разделу безопасность жизнедеятельности

В данном разделе был рассмотрен вопрос электробезопасности, обслуживающего персонала. Одной из защитных мер произведен расчет зануление на отключение асинхронного электродвигателя. В результате проведенных расчетов были определены ток короткого замыкания

номинальные ток электродвигателя, активные и реактивные сопротивления, ток пуска и ток плавкой вставки. К установке были приняты предохранитель - NV/NH4 – 900, или автоматический выключатель СВ400S3ТМ350.

## 6 Технико-экономические показатели

Расчет производственной программы агрегата начинается с составления баланса времени работы агрегата. Различают номинальное и фактическое время работы оборудования .

Номинальное время определяется исключением из календарного времени простоев, связанных с капитальными и текущими ремонтами.

Календарным временем считается нахождение оборудования в эксплуатации, независимо от ремонтов и простоев. В прошлом году  $T_k$  составило 321 день.

$$T_{ном} = T_{кал} - T_{кр} - T_{тр} \quad (6.1)$$

$$T_{ном} = 7704 - 240 - 1001 = 6463 \text{ ч}$$

Годовой фонд рабочего времени участка внутреннего покрытия ттгы:

$$TФ = T_{кал} - T_{кр} - T_{тр} - T_{пр} , \quad (6.2)$$

где  $T_{кал}$  – календарное время работы, ч;

$T_{кр}$  – время, затраченное на капитальные ремонты, ч;  $T_{тр}$  – время, затраченное на текущие ремонты, ч;  $T_{пр}$  – время, затраченное на текущие простои, ч.

$$TФ - 7704 - 240 - 240 - 1001 = 6223 \text{ ч}$$

Баланс рабочего времени работы оборудования представлен в таблице 5

Таблица 5

Простой, суточный			Время использования оборудования		Текущий простой		Календарное время работы, час.	Эффективный фонд времени, час
Праздничные дни	Капитал ремонт	Планов ремонт	Дни	Часы	Часы	%	6223	3193
11	10	23	321	7704	1001	13,0		



## Расчет сметы капитальных затрат

Смета капитальных затрат отражает ожидаемые расходы по реализации.

Для определения экономической эффективности мероприятий по установке станции промывки тгг необходимо определить сумму капитальных затрат на внедрение.

В таблице 6 произведен расчет стоимости приобретаемого оборудования.

Таблица – 6 Расчет стоимости приобретаемого оборудования

Наименование оборудования	Кол-во единиц (шт)	Оптовая цена за единицу (тг.)	Общая стоимость (тг.)
Асинхронный электродвигатель	1	15 000 000	15 000 000
Трансформатор ТСЗ - 1000 10/0,69-УХЛ4	1	4 180 000	4 180 000
Диод Д105-630Х-20	1	45 700	45 700
Тиристор Т-142-80-14	1	3 200	3 200
Итого			19228900

Дополнительные расходы на неучтенное оборудование составляют 5% от общей стоимости.

$$З_{\text{доп}} = 19228900 \cdot 0,05 = 961445 \text{ тг.}$$

Затраты на монтаж возьмем в размере 6% от общей стоимости оборудования.

$$З_{\text{монтаж}} = 19228900 \cdot 0,06 = 1153734 \text{ тг.} \quad (6.4)$$

Затраты на транспортировку возьмем в размере 5.4% от общей стоимости оборудования.

$$З_{\text{трансп}} = 19228900 \cdot 0,054 = 1038360 \text{ тг.} \quad (6.5)$$

Итого капитальные затраты на внедрение станции промывки составят: 22382439тг.

#### Расчет расходов на содержание и эксплуатацию оборудования

В данном разделе курсового проекта необходимо определить состав и размер эксплуатационных расходов, связанных с работой электрооборудования[16].

Эксплуатационные расходы, связанные с работой электрооборудования, состоят, как правило, из следующих видов затрат:

- 1) Заработная плата (ЗП);
- 2) амортизационных отчислений (А);
- 3) затрат на текущий ремонт и обслуживание электрооборудования (Стр).

Таким образом, затраты на эксплуатацию системы электропривода (С) рассчитываются по формуле:

$$C = Э + А + Стр + ЗП \quad (6.6)$$

#### Расчет затрат электроэнергии

Расчет затрат электроэнергии определяется умножением себестоимости 1 кВт.ч энергии на количество теряемой энергии в течение года.

Стоимость затрат электроэнергии собственных нужд для электродвигателя рассчитывается по формуле:

$$Э = P \cdot k_{CH} \cdot T_{Э} \cdot ЦЭ, \quad (6.7)$$

где P – мощность на входе установки, кВт;

$k_{CH}$  - коэффициент собственных нужд

$T_{Э} = 3193$  ч - эффективный годовой фонд рабочего времени;

$ЦЭ = 19,08$  тг. - себестоимость 1 кВт.ч электроэнергии.

$$Э = 4,3 \cdot 0,08 \cdot 3193 \cdot 19,08 = 20957 \text{ тг}$$

Стоимость затрат на потери электроэнергии в трансформаторе рассчитывается по формуле:

$$\Delta Э_{a.m.} = 8760 \cdot \Delta P_{x.x.} + \Delta P_k \cdot \beta^2 \cdot \tau = 8760 \cdot 1,8 + 9,7 \cdot 0,75 \cdot 3193 = 33189 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (6.8)$$

$$\mathcal{E}_m = 33189 \cdot 19,08 = 633246 \text{ мг}$$

Стоимость затрат электроэнергии в диоде и тиристоре рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_o = \frac{I \cdot U}{1000} \cdot \mathcal{C}_э \quad (6.9)$$

$$\mathcal{E}_o = \frac{50 \cdot 1,6}{1000000} \cdot 3193 \cdot 19,08 = 4,87 \text{ мг}$$

$$\mathcal{E}_o = \frac{210 \cdot 1,65}{1000000} \cdot 3193 \cdot 19,08 = 21,11 \text{ мг}$$

Представим полученные значения в таблице 7.

Таблица 7– Затраты на электроэнергию

	Сумма (тг./год)
Затраты электроэнергии на собственные нужды электродвигателя	20957
Потери электроэнергии в трансформаторе	633246
Затраты на диоды	4,87
Затраты на тиристоры	21,11
Итого	654229

Расчет амортизационных отчислений

Расчет годовой суммы амортизационных отчислений производится на основе капитальных затрат на оборудование и нормы амортизации для него.

Норму амортизации по оборудованию рассчитаем по формуле:

где  $H_a$  – норма амортизации оборудования, %;

$$H_a = \frac{100}{T_a} \quad (6.10)$$

$T_a$  – нормативный срок службы оборудования, равное 17 лет для данного типа оборудования.

$$H_a = \frac{100}{17} = 5,88\%$$

Сумма амортизации определяется по следующей формуле:

$$A = \frac{C_{пер} \cdot H_a}{100} \quad (6.11)$$

где  $C_{пер}$ —первоначальная стоимость оборудования, тг.;  $A$  – сумма амортизационных отчислений, тыс. тг.

Полученные значения приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Амортизационные отчисления

Группа амортизации	Первоначальная стоимость $C_{пер}$ , тг	Общая стоимость $C_0$ , тг	Норма амортизации $H_a$ , %	Сумма амортизации $A$
7	19228900	19228900	5,88	1130659

#### Расчет затрат на ремонт и обслуживание оборудования

Величина затрат на ремонты и обслуживание оборудования включает в себя:

- материалы;
- запасные части;
- инструмента и инвентаря;
- заработная плата ремонтного персонала.

Расчет затрат на текущий ремонт и обслуживание проводится по формуле:

$$C_{тр} = 90\% \cdot A \quad (6.12)$$

где  $A$ – годовая сумма амортизации оборудования.

$$C_{тр} = 1130659 \cdot 0,9 = 1017593 \text{ тг}$$

#### Расчет затрат на материалы и на оплату труда

Рассчитать среднемесячную заработную плату мойщика тгг(до внедрения агрегата), электромонтера, слесаря, мастера и электрик. Система оплаты труда сдельно-премиальная. Часовая тарифная ставка 1248,69 тг./час для слесарей, 1132,53 тг./час для электриков, 1481 тг./час – для мастеров, для электромонтеров 1062,84 тг./час, для инженера по автоматизации 283.76 тг./час.

В таблице 5 представлен расчет фонда оплаты труда персонала.  
Таблица 5– Расчет фонда оплаты труда персонала

Наименование должности	Кол-во работников	Часовая ставка (тг.)	Время работы (ч./мес)	Сумма заработной платы (тг./мес)
Инженер по автоматизации	1	1643,62	87	142 994,94
Слесарь	1	1248,69	103	128 615,07
Мастер	1	1481	85	125 885
Электромонтер	1	1062,84	115	122 226,6
Итого без страховых взносов:				519 721,611
Итого:				675 638,09

Сумма доп. заработной платы персонала рассчитывается по формуле:

$$\text{Стр.взн} = \text{ЗП} \cdot 30\% \quad (6.13)$$

Сумма доп.ЗП:

$$519721,61 \cdot 0,3 = 155916,8 \text{ тг}$$

Наименование показателя	Проектируемый вариант
Капитальные затраты, тг.	22382439
Эксплуатационные затраты, тг. в том числе	
Затраты на электроэнергию, тг.	654229
Фонд заработной платы, тг.	519721
Доп. ЗП, тг.	155916
Затраты на текущий ремонт и обслуживание	1017593
Затраты на амортизационные отчисления, тг.	1130659
Итого эксплуатационных затрат	3478118

Вывод по экономической части

Итого капитальные затраты составили 22382439 тг, затраты на электроэнергию в год 654229 тг, заработная плата 4 работникам в месяц 519721 тг, затраты на амортизационные отчисления 1130659 тг, затраты на текущий ремонт и обслуживание 1017593 тг. Общие эксплуатационные затраты составили 3478118 тг.

## Список литературы

1. Онищенко Г.Б. Теория электропривода: учебник. – М: Издательство Инфра-М, 2015. – 294с.
2. Онищенко Г.Б., Локтева И.Л. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания.- М.: Энергия, 1979.-200с.
3. Москаленко В.В. Системы автоматизированного управления электропривода: учебник. – М: Издательство Инфра-М, 2014. – 208с.
4. Ключев В.И. Теория электропривода. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат. – 1998. – 704 с.
5. М.А.Мустафин;-Автоматизированный электропривод по схеме «Асинхронный вентильный каскад»: Учебное пособие / Алматы: АИЭС.2002.-81с.
6. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода.- СПб.:Энергоатомиздат, 2000.-496с.
7. Хватов С.В., Титов Г.В. Асинхронно – вентильные нагружающие устройства. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 144с.
8. Правила устройства электроустановок. РК -А., 2007.
9. Долин П.А. «Основы техники безопасности». - М.: Энергия, 1982.-311с
10. Арустамов Э.А. «Охрана труда» - М., 2007.