

Міністерство освіти і науки України  
Державний вищий навчальний заклад  
"Національний гірничий університет"

Електротехнічний  
(факультет)

Кафедра Електропривода  
(повна назва)

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

дипломної роботи

магістра

(назва освітньо-кваліфікаційного рівня)

галузь знань 14 Електрична інженерія  
(шифр і назва галузі знань)

спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(код і назва спеціальності)

(освітня програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»)

освітній рівень магістр

(назва освітнього рівня)

Кваліфікація 2151.2 (Int) Інженер-електромеханік

(код і назва кваліфікації)

на тему: Режими роботи групового частотно-регульованого  
електропривода із спільною ланкою постійного струму

Виконавець:

Студент 6 курсу, групи 141м-16-4

Фастівець О.С.

\_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка	Підпис
проекту	Казачковський М.М.		
розділів:			
Розділ 1	Казачковський М.М.		
Розділ 2	Казачковський М.М.		
Розділ 3	Казачковський М.М.		

Рецензент			
-----------	--	--	--

Нормоконтроль	Казачковський М.М.		
---------------	--------------------	--	--

Дніпропетровськ  
2018

Міністерство освіти і науки України  
Державний вищий навчальний заклад  
"Національний гірничий університет"

---

---

**ЗАТВЕРДЖЕНО:**

завідувач кафедри  
Електроприводу  
(повна назва)

\_\_\_\_\_ Казачковський М.М.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 року

**ЗАВДАННЯ**  
на виконання кваліфікаційної роботи магістра  
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(код і назва спеціальності)  
(освітня програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»)

студенту 141М-16-4 Фастівець О.С.  
(група) (прізвище та ініціали)

Тема дипломної роботи :

**Режими роботи групового частотно-регульованого  
електропривода із спільною ланкою постійного струму**

### **1 ПІДСТАВИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ**

Наказ ректора ДВНЗ "НГУ" від 31.10.2017 № 1806-л

### **2 МЕТА ТА ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ**

Об'єкт досліджень Груповий частотно-керований електропривод мостового крана.

Предмет дослідження Оптимальні режими роботи загальної ланки постійного струму

Мета НДР Визначити оптимальний режим роботи ланки постійного струму групового електропривода крана.

Вихідні дані для проведення роботи Вихідні дані мостового крану (загальна технічна характеристика, кінематична схема, графік навантаження).

### **3 ОЧІКУВАНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ**

Наукова новизна Оптимальний режим роботи групового електропривода.

Практична цінність Зменшення витрат електричної енергії, можливе зменшення матеріалів, підвищення надійності експлуатації обладнання

#### 4 ВИМОГИ ДО РЕЗУЛЬТАТІВ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Результати роботи повинні містити математичні залежності, рекомендації до застосування, схемні рішення у вигляді структурних схем

---

---

#### 5 ЕТАПИ ВИКОНАННЯ РОБІТ

Найменування етапів робіт	Строки виконання робіт (початок-кінець)
Аналіз матеріалів з групового частотно-керованого електропривода	1.11.2017– 19.11.2017
Визначення режимів роботи електроприводу мостового крану	20.11.2017– 4.12.2017
Розрахунок показників роботи ланки постійного струму частотно-керованого групового електропривода мостового крану	5.12.2017– 19.12.2017

#### 6 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ

Економічний ефект скорочення витрат на електричну енергію.

Соціальний ефект

#### 7 ДОДАТКОВІ ВИМОГИ

---

---

---

---

Завдання видав \_\_\_\_\_

(підпис)

Казачковський М.М.

(прізвище, ініціали)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_

(підпис)

Фастівець О.С.

(прізвище, ініціали)

Дата видачі завдання: \_\_\_\_\_

Термін подання дипломної роботи до ЕК \_\_\_\_\_ 19.12.2017 \_\_\_\_\_

## Реферат

Пояснювальна записка: с., табл., мал., джерел.

Об'єкт розробки: груповий частотно-керований електропривод мостового крану.

Мета роботи: визначити оптимальні режими роботи ланки постійного струму групового частотно-керованого електропривода.

У вступі представлені сучасні тенденції розвитку частотно-керованих електроприводів об'єднаних загальною ланкою.

У першій частині зроблено аналітичний огляд систем групового частотно-керованого електропривода у різних галузях виробництва. Виявлені головні тенденції, визначені характеристики конкретних реалізацій.

Розділ 2 описує існуючі моделі кранів. Визначає режими їх роботи, характеристики, особливості експлуатації. Також в розділі розглянуті різні системи електропривода кранів.

У розділі 3 проведено розрахунки щодо визначення оптимального режиму роботи ланки постійного струму та конфігурації обладнання.

За результатами роботи зроблено відповідні висновки та надано рекомендації що до використання частотно-керованого електропривода з загальною ланкою постійного струму на мостовому крані.

**ЧАСТОТНО-КЕРОВАНІЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, ЗАГАЛЬНА ЛАНКА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, МОСТОВИЙ КРАН, ОПТИМАЛЬНІ РЕЖИМИ РОБОТИ.**

## **Abstract**

Explanatory note: 51 pages, 4 tables, 21 figures, 19 reference sources.

Design object: crank-gear mechanism with induction motor drive.

The goal of diploma project: development of the control system for the induction motor electric drive of crank-gear press mechanism in order to reduce energy losses.

The tendencies of electric drives with crank gears are given in the introduction.

The 1<sup>st</sup> section describes the crank-gear mechanism as an element of electromechanical system; the general description of the equipment with crank gear is given. The crank-gear press is examined.

The 2<sup>nd</sup> section is devoted to theoretical calculations of crank-gear press electric drive's energetic performances. The control algorithm for the variable frequency electric drive of the press is suggested. The specific properties of crank-gear press and its electric drive is analyzed.

The mathematical model of electric drive is developed in the 3d section; the simulation is carried out and the results are analyzed.

The final part gives conclusions and recommendations regarding the application of electric drive for the crank-gear presses.

CRANK-GEAR MECHANISM, CRANK-GEAR PRESS,  
ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE, VARIABLE FREQUENCY DRIVE,  
SIMULATION

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР .....	
1.1 Режимы работы групповых частотно-регулируемых электроприводов .....	
1.2 Анализ существующих и перспективных вариантов групповых частотно-регулируемых электроприводов с общим звеном постоянного тока .....	
2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....	
2.1 Выбор объекта исследования.....	
2.2 Описание и классификация подъемно-транспортных установок .....	
2.3 Электропривод подъемных кранов.....	
2.4 Рекомендации по выбору компонентов группового электропривода мостового крана .....	
2.5 Режимы работы мостовых кранов .....	
2.6 Электроснабжение подъемных кранов .....	
2.7 Системы кранового электропривода.....	
2.8 Структуры и системы управления преобразователями напряжения .....	
2.9 Задание на расчёт и моделирование .....	
3 РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ЗВЕНА ПОСТОЯННОГО ТОКА ГРУППОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	
ВЫВОДЫ.....	
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	

## ВВЕДЕНИЕ

Рассматривая все многообразие современных производственных процессов, в каждом конкретном производстве можно выделить системы, где целесообразно использование группового взаимосвязанного электропривода. Одним из способов взаимного связывания электроприводов является их объединение по общей шине питания, которая позволяет энергии циркулировать между оборудованием. Примером такой шины может служить шина постоянного тока электроприводов переменного тока с частотным регулированием.

Рассмотрение работы электрооборудования в взаимосвязи через общую промежуточную шину питания является актуальной задачей. Это связано в первую очередь с повышением энергоэффективности подобных систем, а также электромагнитной совместимости.

Под энергоэффективностью понимается снижение потерь электроэнергии, потребляемой из сети, а также более полное использование режимов генерации энергии электроприводами при наличии таких режимов.

Под электромагнитной совместимостью понимается способность оборудования противостоять внешним воздействиям и не генерировать таковые в системе. Применение преобразовательной техники, а именно активных выпрямителей, как основного источника энергии общей шины, позволит перевести такие индуктивные нагрузки как асинхронные двигатели в разряд чисто активных потребителей.

Рассмотрение, исследование, определение наиболее оптимальных конфигураций оборудования в таких системах является актуальной задачей требующей основательного изучения.

В данной работе на примере мостового крана общего назначения рассмотрено применение частотно-регулируемого электропривода с общей шиной постоянного тока, проведены расчеты по определению режимов работы такой системы, сформулированы рекомендации.

# 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

## 1.1 Режимы работы групповых частотно-регулируемых электроприводов

Для понимания и формулирования режимов работы производственных механизмов целесообразно перечислить возможные режимы работы групповых электроприводов.

В связи с большим разнообразием реальных графиков нагрузки различных производственных механизмов государственный стандарт ГОСТ 183-74 предусматривает указание номинальных данных двигателей для ряда стандартных видов графиков нагрузки.

Данные режимы работы обозначаются следующим образом:

- S1 – продолжительный режим;
- S2 – кратковременный режим с длительностью периода неизменной нагрузки 10, 30, 60 и 90 минут (если в технических условиях не установлено иное)
- S3 – повторно-кратковременный режим с продолжительностью включения (ПВ) 15, 25, 40 и 60 %, продолжительность включения принимают равной 10 минутам
- S4 – повторно-кратковременный режим с частыми пусками с продолжительностью включения (ПВ) 15, 25, 40 и 60 %, продолжительность включения принимают равной 10 минутам
- S5 – повторно-кратковременный режим с частыми пусками и электрическим торможением с продолжительностью включения (ПВ) 15, 25, 40 и 60 %, числом включений 30, 60, 120 и 240
- S6 – перемежающийся с продолжительностью нагрузки (ПН) 15, 25, 40 и 60 %, продолжительность одного цикла принимают равной 10 минутам
- S7 – перемежающийся с частыми реверсами при электрическом торможении с числом реверсов в час 30, 60, 120 и 240
- S8 – перемежающийся с двумя и более частотами вращения с числом циклов в час 30, 60, 120 и 240.

Различают продолжительный режим неизменной и изменяющейся нагрузки.

В продолжительном режиме с изменяющейся нагрузкой работают электроприводы конвейеров, насосов, компрессорных станций, прокатных станов, металлорежущих станков.

В кратковременном режиме работают электроприводы шлюзов, разного рода заслонок, вентилях и других запорных устройств.

В повторно-кратковременном режиме работают электроприводы лифтов, экскаваторов, подъемных кранов и устройств, для которых характерна цикличность работы (рабочий цикл).

В данной работе рассматриваются электроприводы, работающие преимущественно в продолжительном и повторно-кратковременном режимах. Ограничения, налагаемые сетью (источником питания) и механической частью (прочностью элементов исполняющего механизма), формируют диапазон возможных комбинаций нагрузочных диаграмм. Допустимые нагрузки (области функционирования) электродвигателя определяются не только ограничениями по нагреву, но и рядом других факторов, среди которых одним из основных является перегрузочная способность [1]. Влияние этого фактора наиболее существенно в повторно-кратковременных режимах. Паузы теплогенерации в повторно-кратковременных циклах создают принципиальную возможность увеличения допустимых потерь на их рабочих интервалах. Благодаря увеличению допустимых потерь увеличиваются допустимые по условиям нагрева величины мощности, развиваемой двигателем на рабочих интервалах, его электромагнитного момента и потребляемого тока. В реальных системах электропривода ток, потребляемый двигателем, ограничивается допустимой нагрузочной способностью его источника питания (например, преобразователя частоты). Такие ограничивающие факторы условно можно назвать ограничениями по электромеханике.

Наибольший интерес среди групповых частотно-регулируемых электроприводов представляют те, которые согласно технологии работают в продолжительных и повторно-



кратковременных режимах. Первые интересны в первую очередь тем, что позволяют использовать энергию торможения одних механизмов для питания электроприводов других механизмов группового электропривода практически перманентно, работая по схеме «генератор – двигатель» снижая потери на генерацию и потребление энергии в промышленную сеть, как в случае с индивидуальными приводами механизмов. Вторые обладают схожей характеристикой с той лишь разницей, что генерация и потребление энергии происходит попеременно, появляется возможность для большей части приводов механизмов быть как источником, так и приемником электроэнергии, появляется возможность, изменяя цикл работы механизмов влиять на общее энергопотребление группового электропривода.

Чаще всего в качестве примеров машин и механизмов, использующих групповой частотно-регулируемый электропривод приводят рольганги, конвейеры, прокатные клетки, вентиляторные установки, перематывающие установки, подъемные краны и т.д.

В следующих главах данного раздела будут рассмотрены существующие и перспективные варианты групповых частотно-регулируемых электроприводов с общим звеном постоянного тока.

## 1.2 Анализ существующих и перспективных вариантов групповых частотно-регулируемых электроприводов с общим звеном постоянного тока.

В данной главе приведены примеры компоновок групповых частотно-регулируемых электроприводов прокатных станов, насосных станций, вентиляторных установок, подъемных кранов, их краткий анализ и описание, перечень проблем, возникающих при проектировании и эксплуатации оборудования в зависимости от схмотехнического исполнения.

### 1.2.1. Групповой частотно-регулируемый электропривод насосной установки.

Для регулирования частоты вращения группы асинхронных двигателей в большинстве случаев используют общий двухзвенный преобразователь частоты (ПЧ), в состав которого входят диодный неуправляемый выпрямитель и транзисторный полностью управляемый автономный инвертор.

Структурная схема данной многодвигательной электромеханической системы (МЭС) приведена на рис. 1.1.

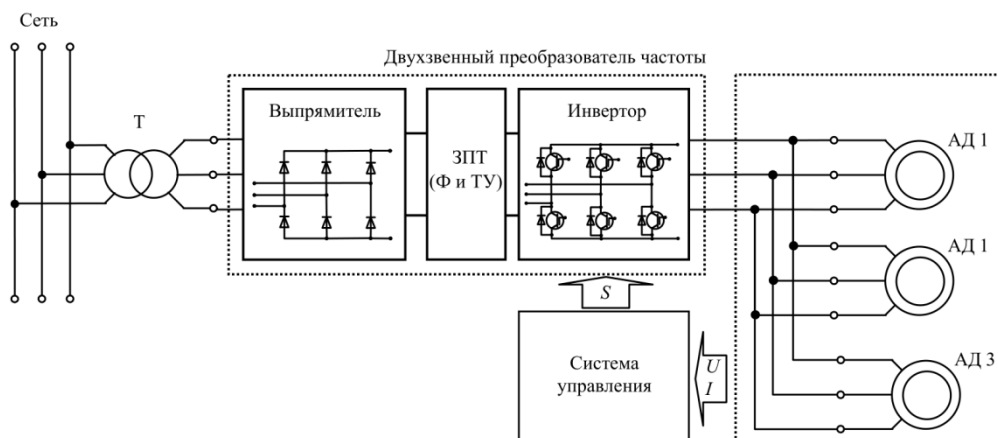


Рисунок 1.1 - Структурная схема многодвигательной электромеханической системы с общим преобразователем частоты.

Такие ПЧ обладают рядом энергетических недостатков. Значительный негативный эффект вносит диодный выпрямитель, который характеризуется низким уровнем электромагнитной совместимости с сетью электроснабжения, что выражается в следующем:

- высоком значении искажения напряжения сети электроснабжения и потребляемого тока;
- низком коэффициенте мощности электропривода;
- односторонней проводимости выпрямителя;
- низком коэффициенте использования трансформатора;
- значительными пульсациями напряжения в звене постоянного тока.

Другой негативный эффект от использования такого преобразователя частоты в МЭС – технологический, обусловлен общей системой управления, которая способна обеспечить только синхронное (одновременное и одинаковое) управление всеми механическими координатами приводных двигателей.

Энергетические проблемы МЭС, т. е. обеспечение коэффициента мощности МЭС с асинхронными двигателями на уровне единицы и синусоидальность напряжения сети и потребляемого тока, можно решить путем использования в ПЧ активного выпрямителя.

Силовая схема активного выпрямителя ПЧ, как правило, унифицируется со схемой автономного инвертора и выполняется по схеме, идентичной схеме инвертора и по существу представляет собой обращенный инвертор. При использовании активного выпрямителя в преобразователе частоты вместо трансформатора целесообразно использовать сетевые дроссели.

Системы управления активного выпрямителя и автономного инвертора, выполненные на основе алгоритма широтно-импульсной модуляции (ШИМ), также унифицированы. Благодаря использованию режима ШИМ, напряжение, формируемое активным выпрямителем на стороне переменного тока, имеет благоприятный гармонический состав, в котором основная (полезная) гармоника и высшие гармоники существенно различаются по частоте. Это повышает эффективность фильтрации высших гармоник тока, потребляемого из сети электроснабжения сетевыми дросселями. Таким образом, решается задача потребления из сети практически синусоидального тока.

Фазовый угол потребляемого тока зависит от соотношения амплитуд и фазовых углов напряжений, приложенных к сетевым дросселям со стороны сети электроснабжения, а также от их параметров (индуктивности и активного сопротивления).

Как преобразователь энергии постоянного тока в энергию переменного тока, автономный инвертор обладает чрезвычайно ценным свойством – возможностью двустороннего энергетического обмена между сетями постоянного и переменного тока. Это свойство сохраняется и в обращенной схеме включения автономного инвертора в качестве активного выпрямителя. В итоге двухзвенный ПЧ с активным выпрямителем обеспечивает двусторонний энергетический обмен между питающей сетью и электрическим двигателем, в том числе режимы рекуперации энергии в питающую сеть.

Технологические проблемы МЭС, т. е. обеспечение индивидуального управления каждым асинхронным двигателем электропривода, можно решить за счет использования многоинверторного преобразователя частоты (МПЧ). Каждый автономный инвертор такого преобразователя частоты, который формирует на обмотках статора приводных электродвигателей напряжения заданной амплитуды и частоты, имеет автономную систему управления, что позволяет регулировать электромеханические координаты каждого двигателя МЭС индивидуально.

Все инверторы такого преобразователя частоты подключены к общему выпрямителю, который обеспечивает поддержание стабильного напряжения в звене постоянного тока и уровень электромагнитной совместимости с сетью электроснабжения на заданном уровне.

Одним из примеров использования группового электропривода является привод технологической установки подачи воды теплоэлектростанций (ТЭЦ). На многих ТЭЦ данные установки являются либо нерегулируемыми, т.е. приводные двигатели напрямую подключаются к сети электроснабжения и регулирование их частоты вращения не

осуществляется либо используется общий двухзвенный преобразователь частоты для реализации общего управления всеми приводными электродвигателями насосов подачи воды. Ниже приведена функциональная схема МЭС технологической установки подачи воды (рис. 1.2).

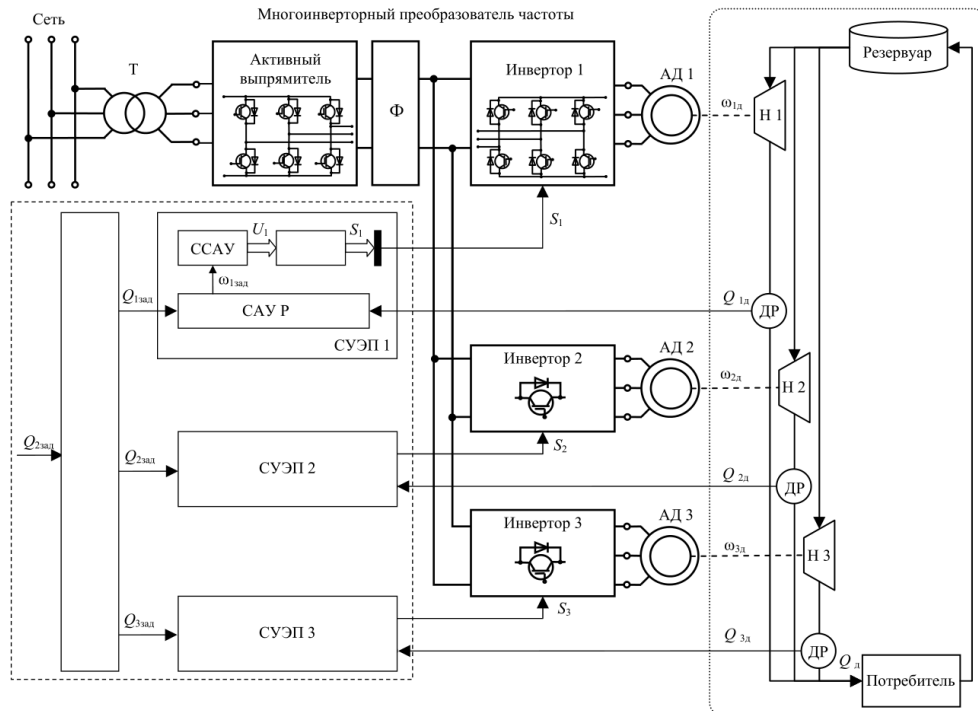


Рисунок 1.2 - Функциональная схема МЭС технологической установки подачи воды.

На рис. 1.2 приняты следующие условные обозначения: Т – трансформатор; АД – асинхронный двигатель; Н – насос; Ф – фильтр; ТСАУ – технологическая система автоматического управления; САУ Р – система автоматического управления расходом; ССАУ – скалярная система автоматического управления; ДР – датчик расхода; СУЭП – система автоматического регулирования электроприводом.

Результатом работы технологической САУ и СУЭП за счет выбора необходимого количества работающих приводных двигателей насосов и обеспечения их оптимального режима работы будет поддерживаться минимальное энергопотребление на уровне, соответствующем расходу на входе потребителя.

Исследование эффективности предложенных технических решений в силовой части преобразователя частоты и управления режимами работы асинхронных двигателей МЭС производилось путем имитационного моделирования данной системы в среде Matlab.

Осциллограммы активной и реактивной мощности, потребляемой электроприводом в процессе разгона двигателей и в установившихся режимах, показаны на рис. 1.3а. Осциллограммы фазного напряжения и тока, потребляемого электроприводом, приведены на рис. 1.3б.

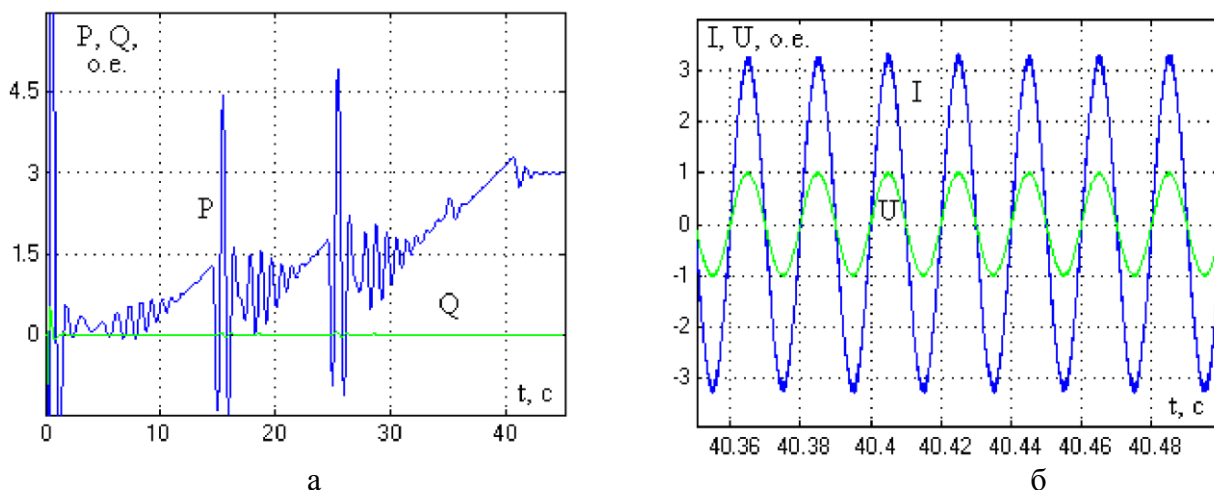


Рисунок 1.3 - Осциллограммы активной и реактивной мощности (а) и фазного напряжения и тока (б).

Как видно из представленных осциллограмм, использование активного выпрямителя обеспечивает работу МЭС без негативного влияния на форму напряжения сети электроснабжения и потребление МЭС с асинхронными двигателями синусоидальных токов. Также видно, что использование активного выпрямителя в многоинверторном ПЧ обеспечивает потребление практически чисто активной мощности. Эти два фактора обеспечивают работу электропривода с коэффициентом мощности около единицы.

### 1.2.2. Групповой частотно-регулируемый электропривод прокатных станов

Современные мощные электроприводы прокатных станов выполняются на базе синхронных и/или асинхронных двигателей и преобразователей частоты, построенных по схеме группового привода с активными выпрямителями и инверторами напряжения в составе. Характерной особенностью активных выпрямителей напряжения (АВН) является генерирование высокочастотных гармоник напряжения и тока высокого порядка (выше 20-го), что обусловлено применением ШИМ для управления ключевыми элементами привода. При большой протяженности кабельной продукции (что характерно для металлургических предприятий) значения распределенной мощности могут достигать нескольких микрофард, что является значительной величиной. В результате взаимодействия индуктивной составляющей трансформаторов и емкостной составляющей кабельной продукции в сети возникает резонанс токов высокой частоты. В таком случае возникает сильное искажение напряжения и перенапряжения на участках распределительных линий и узлов, что может вызвать рассинхронизацию формирователя импульсов управления силовыми ключами и возможному выходу из строя преобразователя частоты. При факте угрозы отказа дорогостоящего и, зачастую, уникального оборудования необходимо исследовать способы обеспечения электромагнитной совместимости преобразователя частоты с сетью. В текущей главе исследуются причины возникновения сильных искажений напряжения в промышленной сети высокого напряжения металлургического предприятия и способы их устранения.

Согласно ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии на качество электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения» показателями качества электроэнергии (КЭ) являются:

- установившееся отклонение напряжения;
- размах изменения напряжения;
- доза фликера;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения;

- коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения;
- коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности;
- коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности;
- отклонение частоты;
- длительность провала напряжения;
- импульсное напряжение;
- коэффициент временного перенапряжения.

Нормами качества электроэнергии являются:

- отклонение напряжения;
- колебание напряжения;
- несинусоидальность напряжения;
- несимметрия напряжений;
- провал напряжения;
- импульс напряжения;
- временное перенапряжение.

Необходимость соблюдения требований ГОСТа 13109-97 вынуждает проводить тщательный анализ совместимости проектируемого электропривода с сетью, что является комплексной задачей и требует привлечения дополнительных средств. Существенную экономию средств и формирование широкой выборки возможных режимов работы исследуемых элементов группового электропривода, имеется возможность получить при математическом моделировании. Для исследования использовалось математическое моделирование системы электроснабжения предприятия и групповых электроприводов прокатных станов.

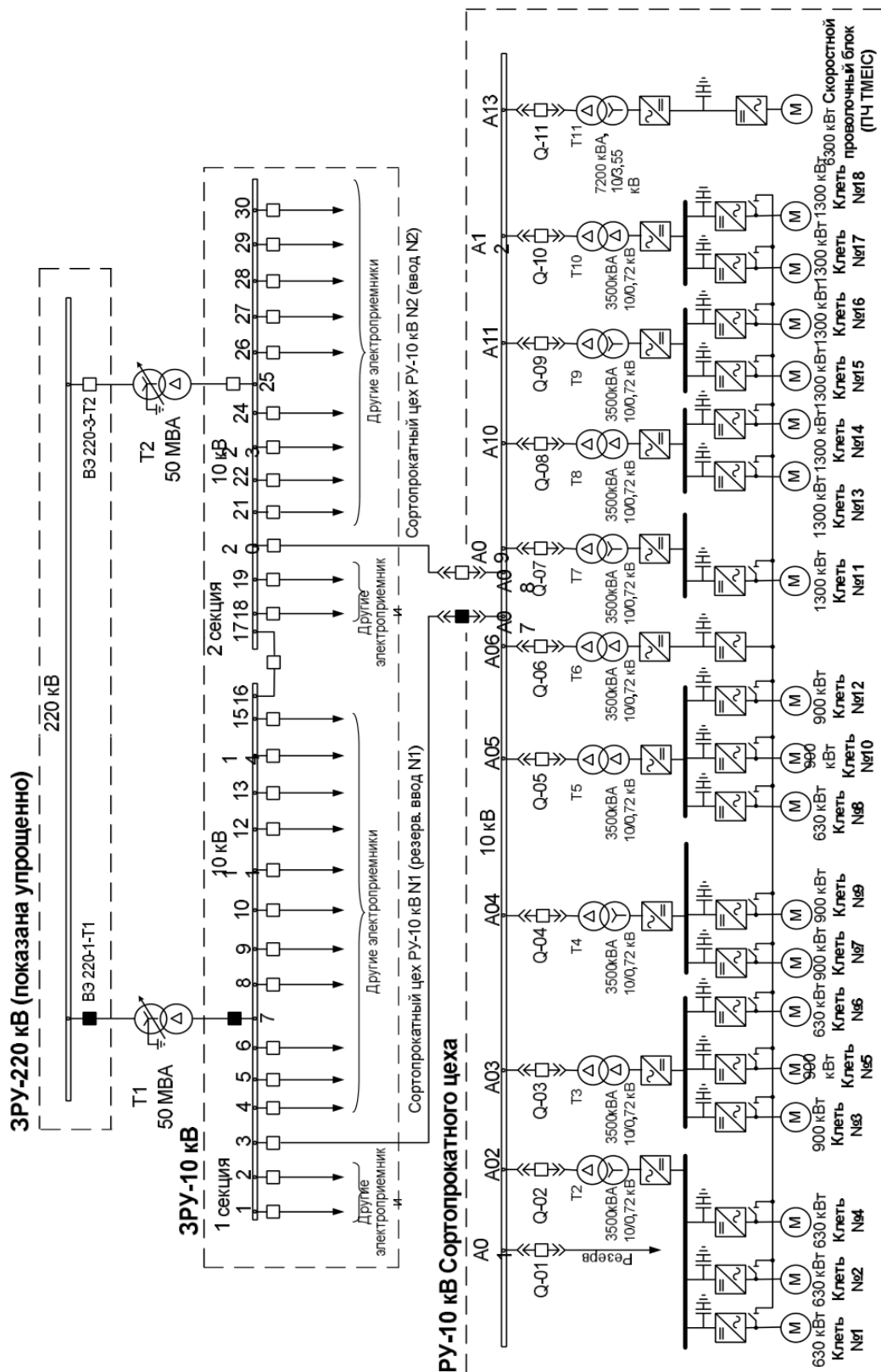


Рисунок 1.4 - Принципиальная схема группового электропривода с общим звеном постоянного тока

Ниже приведено описание металлургического агрегата, результаты исследования электромагнитной совместимости с сетью.

Стан включает 18 клеток с приводными двигателями мощностью 500-1500 кВт. Каждый двигатель питается от отдельного инвертора, а благодаря объединению звеньев постоянного тока шинами появляется возможность подключения нескольких инверторов к групповому выпрямителю. Чаще всего в силу технико-экономических соображений используется диодный мостовой выпрямитель, но не редки случаи задействования активных

выпрямителей на IGBT-транзисторах, позволяющих осуществлять рекуперацию избыточной энергии в звене постоянного тока в сеть.

Особенностью активного выпрямителя является то, что в двигательном режиме он используется как стандартный диодный выпрямитель (напряжение звена постоянного тока меньше амплитуды сетевого), а в тормозном режиме – как инвертор напряжения, обеспечивающий формирование синусоидального сетевого тока (напряжение звена постоянного тока превышает амплитуду сетевого).

На нижеприведенной схеме продемонстрирована комбинация «трансформаторы – двухзвенные преобразователи с трёхуровневыми инверторами напряжения – асинхронные двигатели».

Стан включает 18 клеток и скоростной прокатный блок. Выпрямителями электроприводов прокатных станов представляют собой диодно-транзисторные выпрямители.

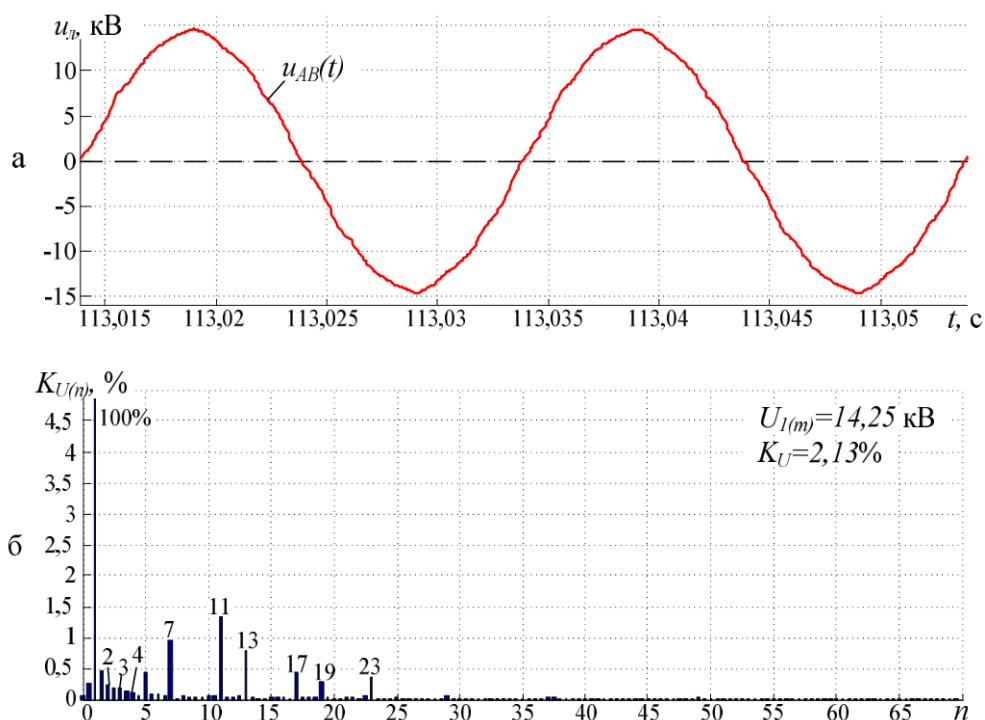


Рисунок 1.5 - График мгновенных значений линейного напряжения на шине 10кВ (а) и его гармонический состав (б).

Как видно из рис.1.6б, гармонический состав напряжения сети значительно ухудшился, добавились высокочастотные гармоники напряжения, способные привести к резонансу токов высокой частоты. Для обеспечения совместимости с питающей сетью и для устранения резонанса токов целесообразно применять устройства компенсации реактивной мощности (УКРМ). Формируя соотношение между индуктивностью реактора (должна быть максимально низкой, но не нулевой) и емкостью дополнительных конденсаторов можно добиться сдвига резонанса тока в область, где генерируемые гармоники имеют наименьшую амплитуду.

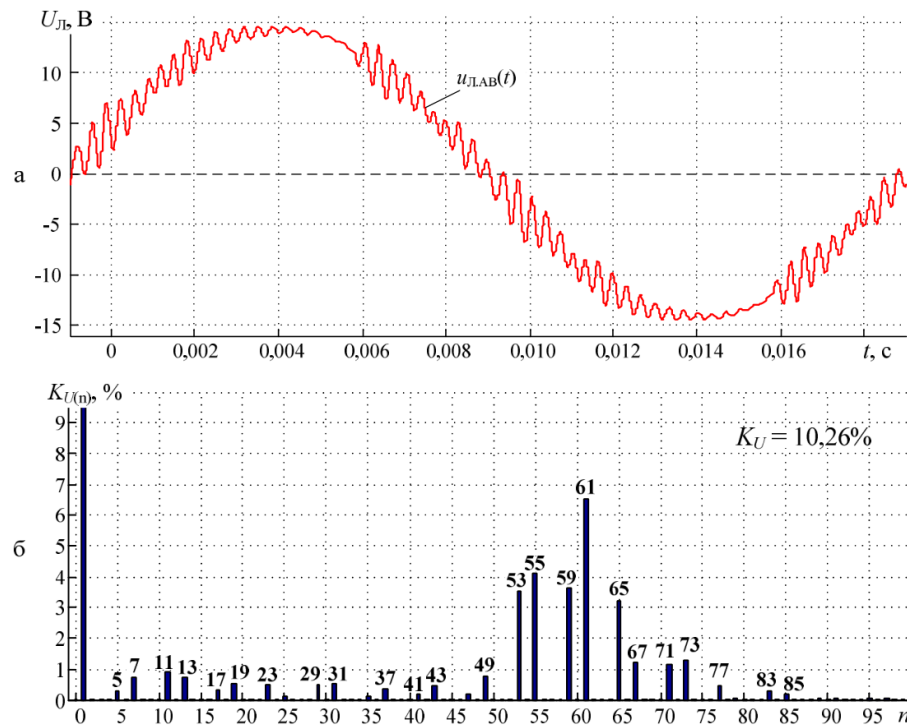


Рисунок 1.6 - График мгновенных значений линейного напряжения на шине 10 кВ (а) и его гармонический состав (б) после включения активного выпрямителя (ТМЕИС).

### 1.2.3. Групповой частотно-регулируемый электропривод буровой установки

В современной полупроводниковой преобразовательной технике для регулируемого электропривода переменного тока получили применение трехуровневые автономные инверторы, позволяющие увеличить число уровней выходного напряжения и улучшить гармонический состав переменного тока, питающего двигатель. С целью улучшения качества потребляемой электроэнергии в схемах мощных преобразователей с промежуточным звеном постоянного тока используются либо 12-пульсные неуправляемые выпрямители, либо трехуровневые активные выпрямители.

К недостаткам силовых схем с трехуровневыми автономными инверторами относятся наличие дополнительных фиксирующих диодов и проблема поддержания заданного значения нулевого уровня напряжения питания.

В работе [2] рассмотрен альтернативный вариант топологии силовой схемы – двухсекционный диодный выпрямитель напряжения, содержащий два потенциально разделенных источника (АВ1, АВ2), выполненных по трехфазным мостовым схемам и имеющие независимое питание от двух потенциально разделенных источников (обмоток НН силового трансформатора).

Применение трёхобмоточного трансформатора в этой схеме с вторичными обмотками, соединёнными в  $\Delta$  и  $Y$ , и общим выпрямительным устройством позволяет уменьшить содержание высших гармоник в питающей сети за счёт исчезновения 5 и 7 гармоник. От общих шин постоянного тока получают питание автономные инверторы напряжения (И), через которые энергия передаётся на асинхронные электродвигатели (АД) главных механизмов буровой установки: два буровых насоса (МН1 и МН2), ротор (МР) и лебёдка (МЛ).

В состав схемы может входить ФКУ ступенчатого типа (ФКУ-С), ступени которого (Ф1, Ф2, Ф3, Ф4) с помощью контакторов (или трехфазных тиристорных ключей) подключаются к вторичным обмоткам трансформатора (Т).



Нагрузки электроприводов главных буровых механизмов рассматриваемого электротехнического комплекса буровой установки:

- Электропривод бурового насоса. Мощность 950...1180 кВт. Режим работы – длительный, однозонное регулирование с постоянством момента в первой зоне.
- Электропривод ротора. Мощность 800 кВт. Режим работы – длительный, двухзонное регулирование с постоянством момента.
- Электропривод буровой лебедки. Мощность 900...1500 кВт. (1500 кВт – для односкоростной двухдвигательной лебедки). Режим работы – повторно-кратковременный, двухзонное регулирование с постоянством момента в первой зоне (до 1000 об/мин), с постоянством мощности во второй зоне (1000...1800 об/мин).

В составе группового электропривода неуправляемые диодные выпрямители являются двухкомплектными, что позволяет как потреблять, так и генерировать электроэнергию в сеть, тем самым, учитывая повторно-кратковременный режим работы электропривода буровой лебедки, значительно повысить энергоэффективность данного решения.

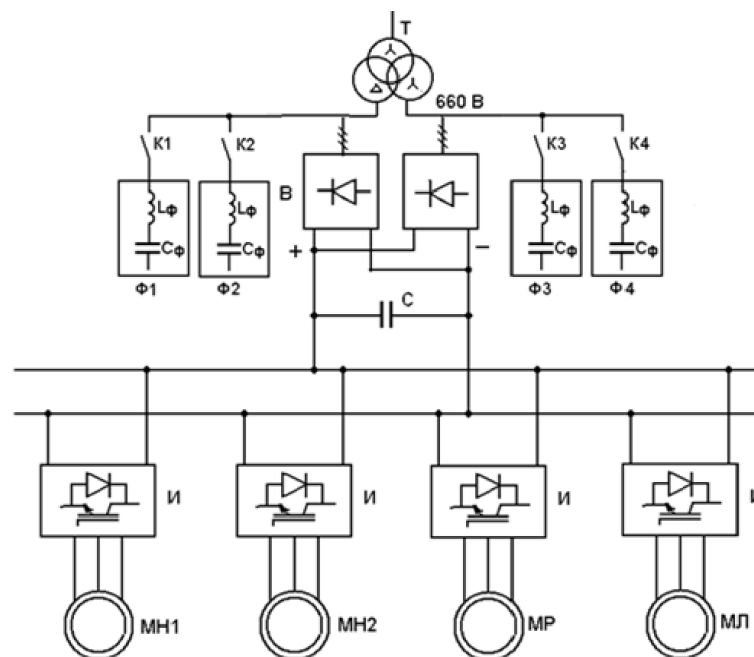


Рисунок 1.7 - Схема электрооборудования БУ с ЧРЭП и неуправляемым выпрямителем при питании от местной линии 6 кВ.

Активные выпрямители с высокочастотной ШИМ гораздо более адаптированы к нормам по электромагнитной совместимости с питающей сетью. Они могут быть использованы как средство энергосбережения и улучшения качества потребления и использования электроэнергии. Режим ШИМ позволяет подавлять в спектре сетевого тока низкочастотные составляющие, в частности 5,7,11,13 и т.д. гармоники.

По сравнению со схемой на рис. 1.7, схема на рис. 1.8 имеет следующие особенности:

- от шин 6 кВ комплектного распределительного устройства (КРУ) получает питание двухобмоточный силовой понижающий трансформатор (Т);
- ко вторичной обмотке трансформатора через фильтр Ф и реактор подключается АВН, от которого посредством шины (звена) постоянного тока запитываются инверторы двигателей;
- отсутствуют многочисленные фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ): они заменены последовательно подключенным LC-фильтром, что позволяет упростить алгоритм согласования ЧРП с питающей сетью.

Для наглядной оценки качества параметров силовых цепей электроприводов, построенных по схемам на рис. 1.2.7 и 1.2.8 (особенно сетевого тока и его гармонического состава для оценки влияния ЭП на параметры питающей сети) целесообразно продемонстрировать графики временных диаграмм сетевых токов. Данные диаграммы, являющиеся результатами математического моделирования, приведены на рис. 1.9а и рис. 1.9б.

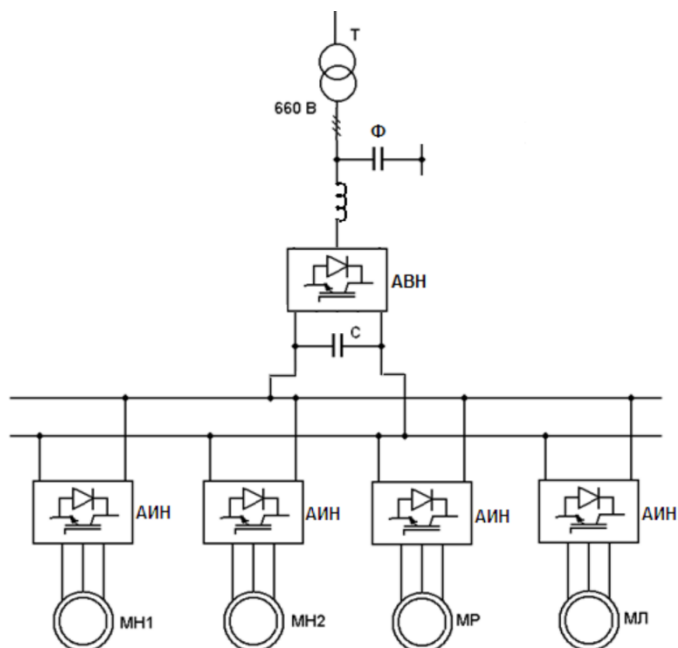


Рисунок 1.8 - Схема электрооборудования БУ с ЧРЭП и АВН при питании от местной линии 6 кВ.

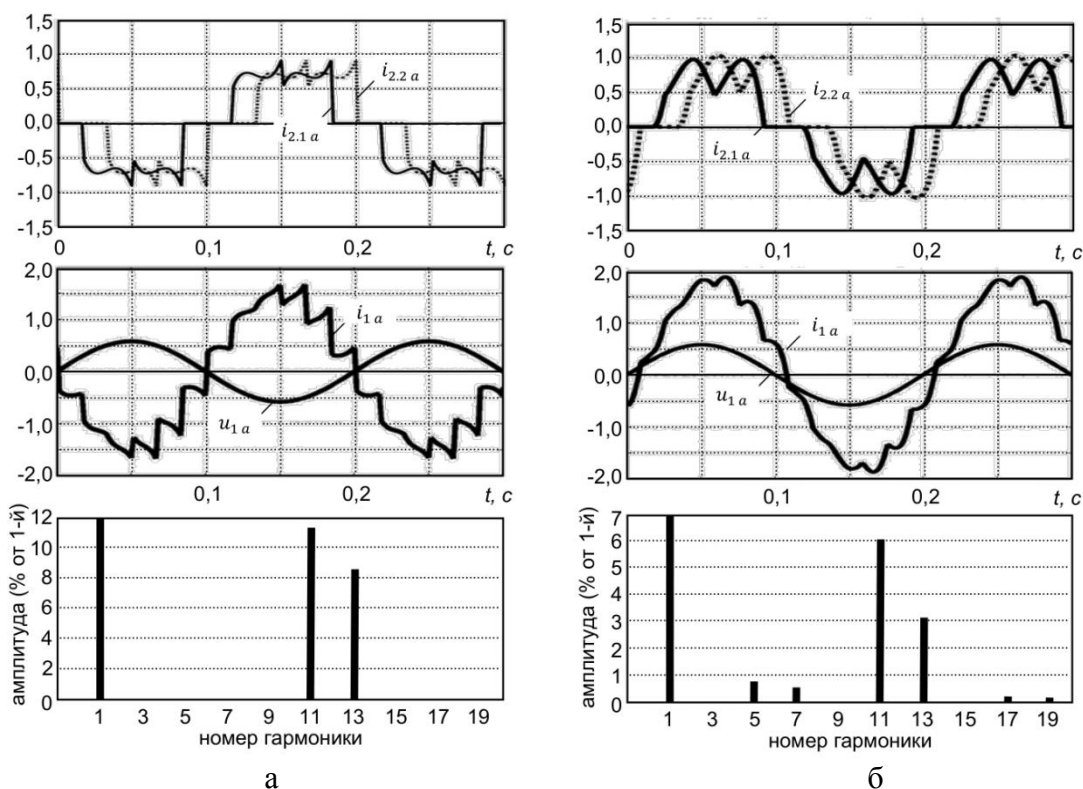


Рисунок 1.9 - Временные диаграммы сетевых токов на сторонах НН и сетевого тока и напряжения на стороне ВН и их гармонический состав для схемы с неуправляемыми диодными выпрямителями в двигательном режиме (а) и в рекуперативном режиме (б).

Диаграммы сетевого тока и напряжения на стороне ВН, но для схемы с АВН, приведены на рис. 1.10а и 1.10б.

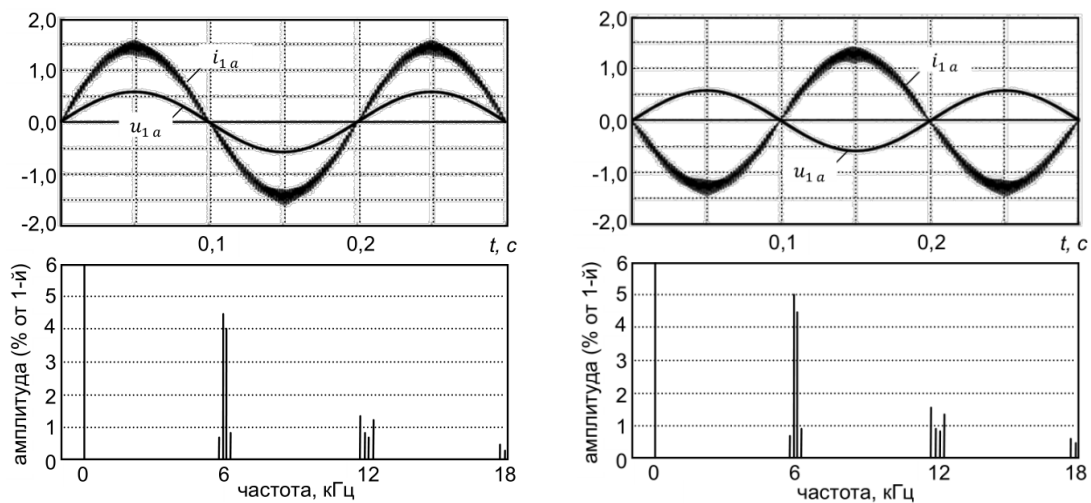


Рис. 1.10. Временные диаграммы сетевого тока и напряжения на стороне ВН и их гармонический состав для схемы с активным выпрямителем напряжения в двигательном режиме (а) и в рекуперативном режиме (б).

Форма сетевого тока на стороне ВН значительно приближена к синусоидальной. Гармонический состав сетевого тока улучшен за счет уменьшения амплитуд 5-й и 7-ой гармоник тока, но ухудшен все еще значительным влиянием теперь уже 11-й и 13-ой гармоник. В рекуперативном режиме 5-я и 7-я гармоники уменьшены до практически незаметной величины, но заметен рост влияния 11-й и 13-й гармоник в рекуперативном режиме.

Существенный ряд производителей полупроводниковой преобразовательной техники также предлагает возможность использования в групповом электроприводе общепромышленных механизмов преобразователей частоты с общим активным выпрямителем, подключенным к шине постоянного тока, запитанным от трех- или двухобмоточного трансформатора.

В статье [3] уделено внимание электромагнитной совместимости электропривода со статическими преобразователями энергии с питающей сетью, описываются требования к устойчивости оборудования в случае предельных отклонений параметров сети и, в то же время, устойчивости сети под влиянием работы статических преобразователей. Описаны требования к АЭП в части отклонений модуля питающего напряжения, скачкообразного изменения модуля на значительную (более 20 % номинала) величину и кратковременное исчезновение напряжения сети. Искажения напряжения, вызванные высокочастотными гармониками напряжения и тока, воздействует на систему синхронизации управляющих воздействий на ключи управляемых выпрямителей и инверторов, что может провоцировать выход из строя, вследствие перенапряжений, элементов силовых цепей, в частности транзисторов.

В статье [4] продолжена тема анализа ЭМС неуправляемых выпрямителей напряжения и питающей сети. Описана проблема генерации высших гармоник питающего напряжения в сеть и, как следствие, искажение формы питающего напряжения. Проведен краткий анализ амплитуд высших гармоник. Наиболее выражено влияние на питающую сеть 5-й и 7-й гармоник, имеющих наибольшую амплитуду, достигающую значений 35-80% амплитуды первой гармоники из-за прерывистой формы тока. На основе математического

моделирования показано что влияние на форму входного тока ПЧ-АД, и, соответственно, его гармонический состав существенное влияние оказывают: эквивалентное сопротивление питающей сети по отношению к точке подключения; номинальная мощность и величина загрузки подключенного к ПЧ двигателя (чем меньше нагрузка, тем более выражено искажение формы тока); величина емкости сглаживающего фильтра (прямопропорциональна коэффициенту пульсаций выпрямленного напряжения и реактивной мощности, запасенной в ней); несимметрия величин напряжения и сопротивления сети. Также исследована возможность компенсации реактивной мощности, потребляемой ЭП, с помощью активного фильтра тока, параллельно подключенного между сетью и ПЧ.

В статье [5] рассмотрен режим компенсации реактивной мощности в сети активным выпрямителем напряжения (АВН) в составе электропривода переменного тока. Исследования проводились методом математического моделирования. Анализ полученных результатов показал, что электропривод в составе с АВН имеет возможность компенсации потребляемой реактивной мощности в достаточно больших пределах. На рис. 1.11 рассмотрен принцип векторного управления активным выпрямителем.

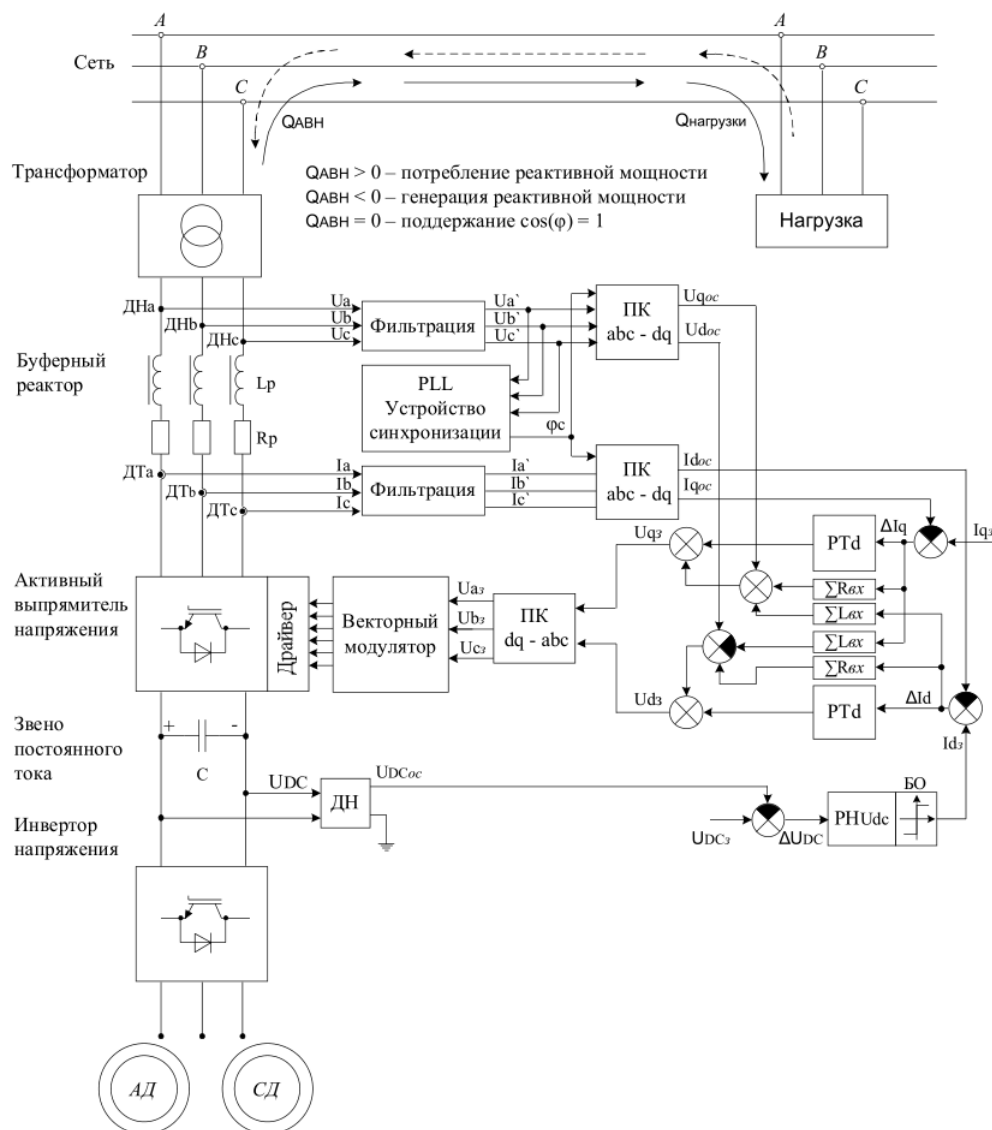


Рисунок 1.11 - Функциональная схема векторного управления активным выпрямителем.

На стороне переменного тока в цепи обратной связи по напряжению и току предусмотрена система фильтрации сигналов. Затем очищенные от высших гармоник сигналы поступают в устройство синхронизации PLL и в преобразователи координат

$abc \rightarrow dq$  вектора сетевых фазных токов и напряжений, измеряемых датчиками  $DT_a, DT_b, DT_c$ , и, соответственно  $DN_a, DN_b, DN_c$ . Сигналы обратных связей по току и напряжению в системе координат  $dq$  поступают на входы и выходы регуляторов тока  $PT_d$  и  $PT_q$ , как показано на рис. 1.11. Рассогласование между заданными и фактическими значениями преобразованных токов обрабатываются регуляторами токов и после дополнения сигналами компенсации перекрёстных связей поступают на вход преобразователя координат  $dq \rightarrow abc$ . В результате обратного преобразования координат  $dq \rightarrow abc$  формируются управляющие воздействия  $U_{a.з}, U_{b.з}, U_{c.з}$  на информационном входе векторного модулятора. Внутренняя САР активного тока  $i_d$  подчинена внешней контуру регулирования напряжения в звене постоянного тока с регулятором напряжения (РН)  $u_{dc}$ . Задание на вход регулятора реактивного тока  $i_q$  определяет режим работы активного выпрямителя напряжения: генерация реактивной мощности, потребление реактивной мощности или обмен только активной мощностью.

Анализ полученных результатов показал возможность работы АВН в режиме компенсации реактивной мощности, не влияя на режим работы электропривода. В периоды времени, когда ЭП работает на холостом ходу или слабозагружен, АВН может дополнительно работать в режиме статического компенсатора реактивной мощности. Данный способ управления АВН позволяет повысить результирующий коэффициент мощности сети в моменты разбаланса по активной или реактивной мощности.

### 1.2.3. Технические решения по повышению энергоэффективности и отказоустойчивости ЧРП.

В статье [6] приводится наглядное описание технических решений по обеспечению резервного электроснабжения для электроприводов ответственных механизмов и повышению итоговой энергоэффективности установки.

Ответственные механизмы непрерывных производств топливно-энергетической, химической, металлургической отраслей промышленности, как правило, получают питание от двух независимых вводов. Широкое внедрение частотно-регулируемых электроприводов (ЧРП) накладывает свои особенности в организации и построении системы электроснабжения. Это связано с тем, что реакция ЧРП при провалах напряжения и его восстановлении при кратковременном отключении имеет особый характер [1].

Провалы сетевого напряжения приводят к возрастанию суммарного потребляемого электроприводами тока и, как следствие, к возможным отключениям потребителей электроэнергии (зачастую двигателей) средствами токовой или тепловой защиты. Решение данной проблемы часто находят в подсоединении двух выпрямителей преобразователей частоты к разным вводам (один выпрямитель подсоединяется к одному вводу, а другой – ко второму вводу). Выпрямители соединяются общей шиной на стороне постоянного тока. При такой конфигурации обеспечиваются требования резервирования: при исчезновении напряжения на одном из вводов или неравномерной просадке напряжения обеспечивается устойчивая работа электропривода без необходимости задействования автоматического ввода резерва (АВР). Вследствие неравномерности питающих привод напряжений, выпрямители оказываются неравномерно загруженными. Также требуется применять выпрямители с завышенными значениями токовой нагрузки для предотвращения термического разрушения силовых ключей преобразователя.

Автоматическое выравнивание нагрузок выпрямителей может быть достигнуто за счет введения обратных связей по току. Но наиболее оптимальным решением проблемы просадок напряжения является регулирование напряжения на зажимах питания ПЧ с помощью транзисторного преобразователя. В данном случае речь идет о создании комплекса преобразователей напряжения по схеме «управляемый ТрВН – неуправляемый ДВН с общей звеном постоянного тока». При такой конфигурации многоуровневый сетевой

фильтр применяется только на вводе, с которого запитывается активный выпрямитель. В случае просадки напряжения на одном из вводов возможно повышение выпрямленного напряжения благодаря отстройке ТрВН, а в случае исчезновения напряжения появляется возможность запитать привод посредством управляемого или неуправляемого выпрямителя. Данное решение также является затратным, но позволяет комбинировать сравнительно невысокую стоимость диодного выпрямителя с значительной стоимостью полностью управляемого транзисторного выпрямителя и позволяя сочетать возможность компенсации реактивной мощности посредством ТрВН, возможность рекуперации части накопленной в емкостном элементе звена постоянного тока энергии в сеть и простоту диодного выпрямителя.

Также оптимальным предложением является установка звена перекрестного подключения на стороне постоянного тока, обеспечивающая возможность задействовать неуправляемый выпрямитель при исчезновении напряжения на любом из вводов, что упрощает алгоритм автоматического ввода резерва (АВН) и надежность и простоту управления диодного выпрямителя. В качестве устройства утилизации накопленной в системе энергии, в случае невозможности её рекуперации или использования другими приводами, должен выступать резистивный элемент или каскада резисторов с повышенной устойчивостью к тепловым перегрузкам, дабы обеспечить нормальное или аварийное торможение приводов производственных механизмов.

В настоящее время наибольшее распространение среди ЭП с повышенными требованиями по отказоустойчивости и резервированию получили две схемы электропривода для систем с двумя вводами, приведенные на рис. 1.11а и рис. 1.11б.

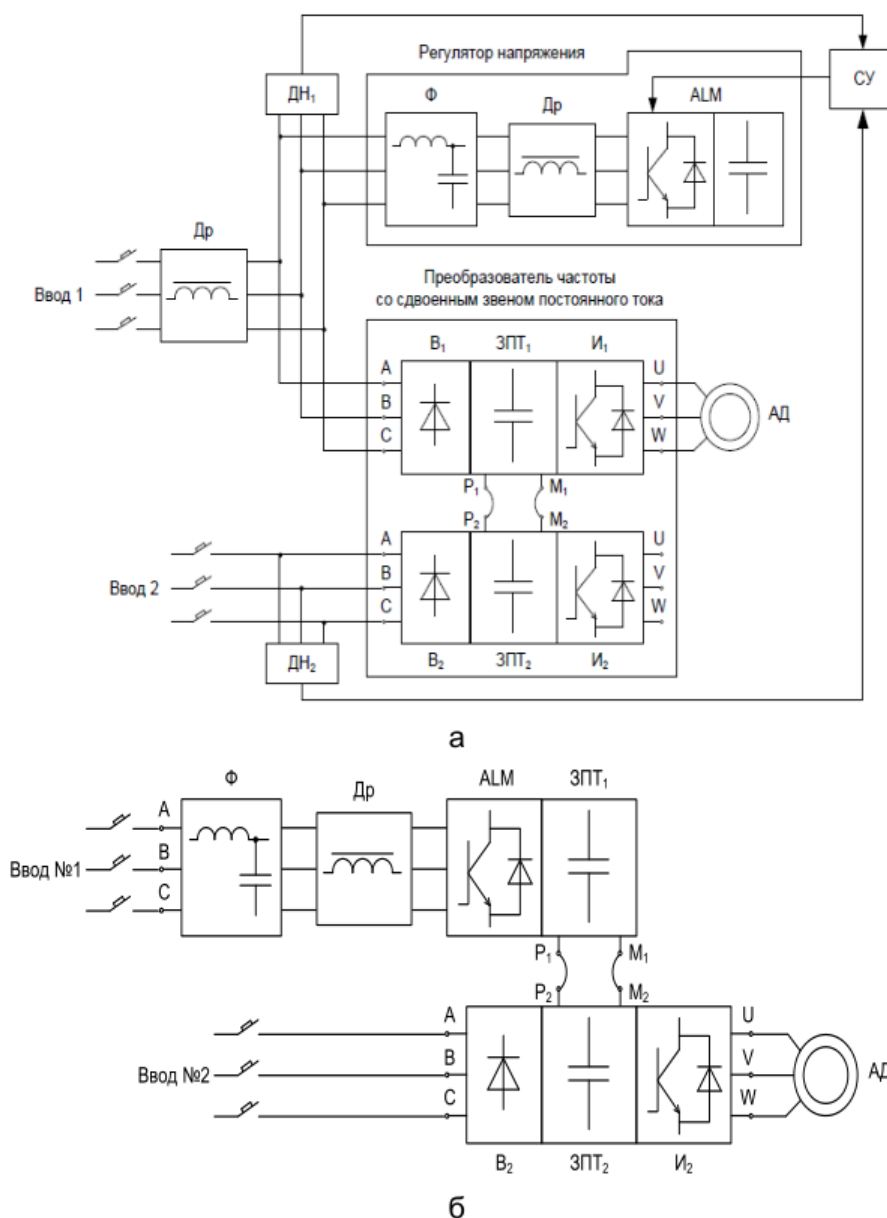


Рисунок 1.12 - Функциональные схемы ПЧ: со двоянным звеном постоянного тока (а), комбинация активного и пассивного выпрямителей, питающих разноименные вводы (б).

В схеме на рис.1.12а задействованы датчики напряжения ДН, передающие системе управления СУ сведения о уровне напряжения на вводах. СУ формирует управляющие воздействия на активный сетевой модуль (фильтр) АЛМ. В свое время АЛМ регулирует уровень напряжения в обе стороны. Для обеспечения возможности повышения или понижения с отстройкой от номинального напряжения устанавливается сетевой дроссель Др. Фильтр высших гармоник Ф обеспечивает электромагнитную совместимость по гармоническому составу тока сети. Тип или характер реактивного тока АЛМ обеспечивает повышение напряжения на вводе 1 в случае емкостного характера тока или понижение напряжения в случае индуктивного характера тока. Выше приведенное свойство также применимо для формирования нужного коэффициента мощности, обеспечивающего повышение итогового коэффициента мощности нагрузки сети.

Схема на рис. 1.12б задействует схожий принцип, что и описанный в начале данной главы. Регулирование напряжения обеспечивается посредством активного выпрямителя, подключенного к вводу 1 за счёт ШИМ напряжения. Данная конфигурация обеспечивает уменьшение задействованных элементов силовых цепей (за счёт замены диодного ВН), но

усложняется алгоритм управления ALM. Помимо усложнения программной части, удорожается и аппаратная часть комплекса, так как мощность ALM должна быть сопоставимой или равной мощности замененного диодного выпрямителя. Увеличение стоимости комплекса за счёт применения более мощного ALM может быть недопустимо в ряде случаев и должно быть оговорено при проектировании комплекса.

Для обоих вариантов компоновки возможно применение многоинверторного электропривода. Мощность, передаваемая в сеть при торможении двигателей исполнительных механизмов, зачастую не превышает большей доли номинальной мощности, так как учитываются потери в двигателе и инверторе. Применение компоновки электропривода, указанной на рис 1.12б может оказаться более экономически выгодно при условии, что наличествуют механизмы с достаточной энергией торможения, позволяющей рекуперировать её в сеть с целью уменьшения суммарного потребления электроэнергии установкой.

В статье [7] рассматривается вариант использования так называемых суперконденсаторов в крановом электроприводе общего назначения, когда блок суперконденсаторов подключается на общую шину постоянного тока, от которой питаются несколько автономных инверторов напряжения. При этом во время тормозных режимов работы одного из электроприводов энергия торможения запасается в суперконденсаторе и может быть затем использована для двигательных режимов работы. Очевидно, что в этом случае будет наблюдаться экономия электрической энергии по сравнению с частотно-регулируемым электроприводом, в котором используется тормозное сопротивление. Проведена оценка технико-экономической эффективности использования емкостных накопителей электрической энергии в крановых электроприводах. Задача решается с применением математических моделей кранового электропривода с общим звеном постоянного тока, приводятся результаты моделирования и приближённый расчет энергопотребления электроприводов с суперконденсатором и тормозным сопротивлением, дается сравнительная оценка технико-экономических характеристик электропривода и приводятся ориентировочные сроки окупаемости проектов по модернизации крановых электроприводов с использованием емкостных накопителей энергии.

#### **1.2.4. Энергосберегающий групповой электропривод козлового контейнерного крана**

В книге [8] рассматриваются два варианта использования частотно-регулируемых электроприводов с применением ППЧ в козловом контейнерном кране.

В первом варианте используются классические двухзвенные преобразователи частоты, содержащие неуправляемый входной диодный выпрямитель и транзисторный инвертор. Для гашения энергии в тормозных режимах применяются дополнительные тормозные модули и резисторы. Такое решение связано с существенным увеличением габаритных размеров оборудования и является неэкономичным, так как каждый из преобразователей требует наличия сетевого дросселя, тормозного модуля, контактора и автоматического выключателя. Мощности преобразователей выбраны таким образом, чтобы обеспечить перегрузку двигателей по току 2,2... 2,5. Варианты упрощенной однолинейной схемы электрооборудования козлового контейнерного крана показаны на рис. 1.13а и рис. 1.13б.

Во втором варианте для регулирования частоты вращения двигателей используются преобразователи частоты, включающие в себя выпрямители с возможностью рекуперации электроэнергии в сеть, общее звено постоянного тока и индивидуальные инверторы для питания каждого двигателя.



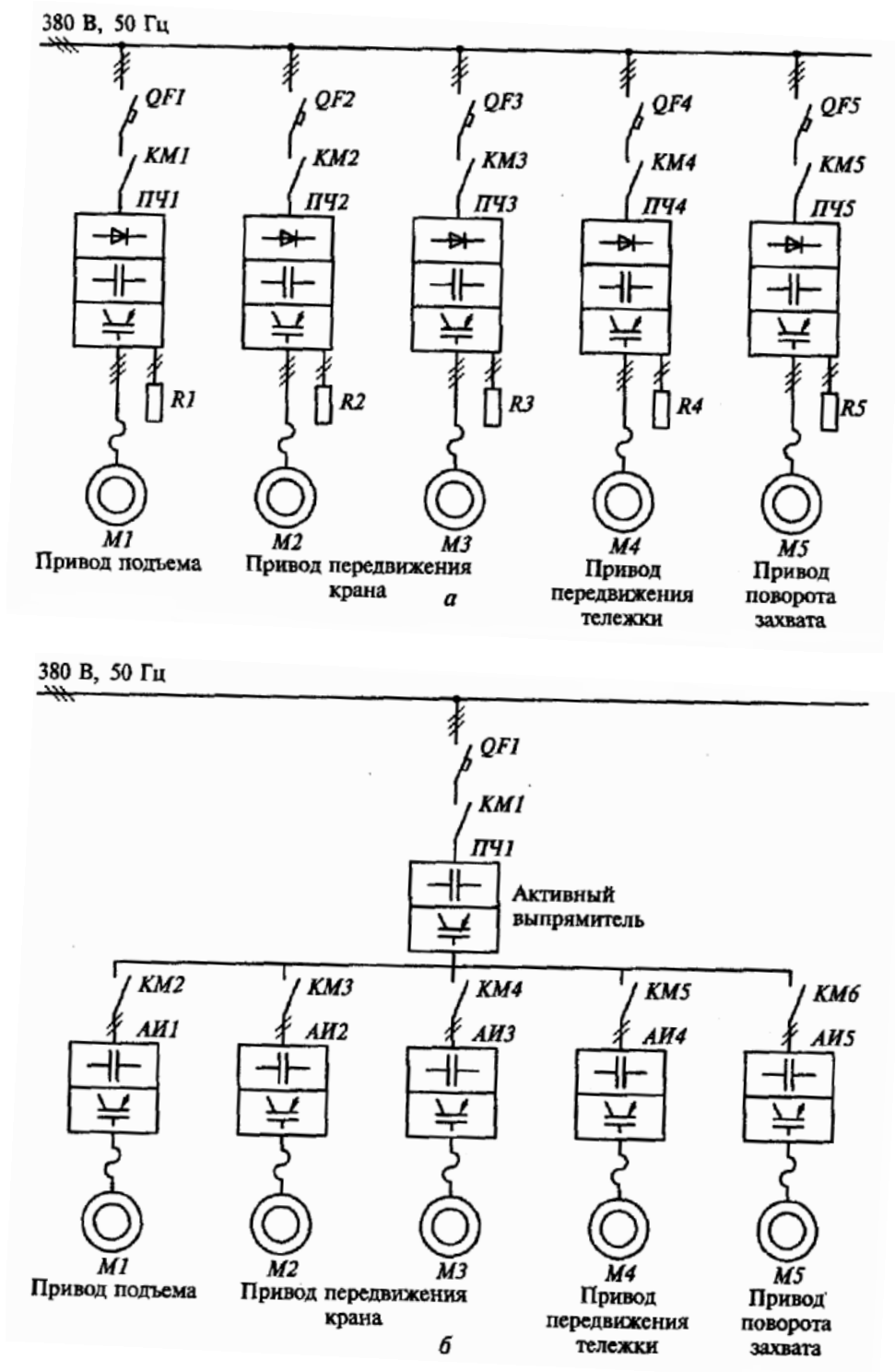


Рисунок 1.13 - Упрощенная однолинейная схема электрооборудования козлового контейнерного крана без рекуперации (а) и с рекуперацией (б).

Каждый из двигателей питается от собственного инвертора, преобразующего постоянное напряжение общего промежуточного звена в напряжение регулируемой частоты и амплитуды. Использование индивидуальных инверторов вместо группового электропривода позволяет использовать высококачественное векторное управление, выравнивать скорости и нагрузки двигателей одного механизма, а также обеспечивает резервирование за счет возможности работы при выходе из строя одного из преобразователей.

Для ограничения хода механизмов используются конечные выключатели. Остановка привода при достижении крайних положений осуществляется не полным отключением привода, а плавным снижением скорости с заданным темпом. При этом сохраняется возможность включения механизмов в обратном направлении.

Расчеты потребления энергии и потерь, выполненные с использованием методов математического моделирования показывают, что переход к частотному регулированию скорости короткозамкнутых асинхронных двигателей взамен реостатного управления с добавочными сопротивлениями в роторе обеспечивает снижение потерь практически во всех режимах работы механизмов подъема, перемещения крана и тележки. Так, пусковые потери могут быть снижены в 5—10 раз за счет реализации частотного пуска. Потери при работе на пониженной скорости в двигательном режиме снижаются пропорционально снижению скорости относительно номинальной, а потери при тормозном спуске груза могут быть снижены в 15 — 20 раз. Исключение режима торможения противовключением позволяет в 2 — 3 раза снизить потери в тормозных режимах.

Наиболее эффективным для рассматриваемого крана и других кранов оказывается применение преобразователей частоты с активными выпрямителями для реализации режима рекуперативного торможения. На рис. 1.14 приведены диаграммы относительного потребления энергии электроприводами подъема и перемещения тележки крана (продолжительность включений — 40 %, 120 включений в час).

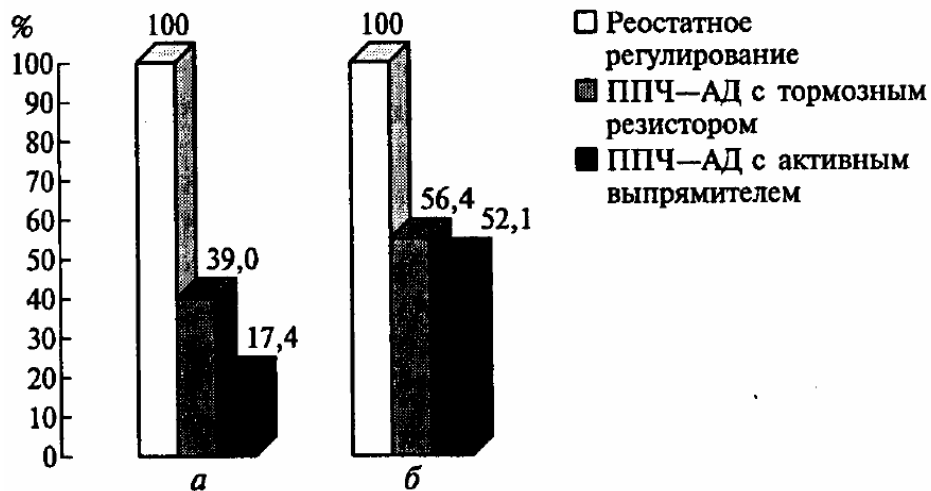


Рисунок 1.14 - Диаграммы относительного потребления электроэнергии в электроприводах подъема (а) и перемещения тележки крана (б).

Из приведенной выше диаграммы можно сделать вывод, что наименьшее за цикл относительное энергопотребление имеет электропривод подъема с активным выпрямителем. Это ожидаемо, так как существенную часть рабочего цикла (опускание груза) двигатель электропривода генерирует энергию в звено постоянного тока, что позволяет задействовать эту энергию для задач резервирования в ЗПТ, повторного использования другими нагрузками, подключенными к ЗПТ или рекуперации в промышленную сеть.

## 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 2.1. Выбор объекта исследования

В данной работе будет рассматриваться в качестве объекта исследования групповой частотно-регулируемый электропривод с общим звеном постоянного тока подъемного мостового крана. Для лучшего понимания специфики объекта исследования необходимо привести классификации подъемных кранов, общий вид крана, кинематические схемы его основных механизмов.

### 2.2. Описание и классификация подъемно-транспортных установок

К грузоподъемной технике относят механизмы с ручным (прямым) приводом и с внешним приводом (гидропривод, пневмопривод, электропривод и т.д.). Особенностью механизмов с ручным приводом является сравнительно малые веса грузов (по сравнению с электроприводными подъемными кранами) и малые перемещения (зачастую применяются для перемещения деталей по цеху).

К грузоподъемной технике с ручным приводом относятся: домкрат (винтовой, реечный, гидравлический), лебедка и таль (червячная, шестереночная).

К грузоподъемной технике с электроприводом относят все ту же лебедку, но уже с электроприводом, электроталь и краны с электроприводом основных механизмов.

Краном называется грузоподъемная машина, оснащенная стационарно установленными грузоподъемными механизмами.

Краны конструктивно подразделяются на:

- краны мостового типа (опорный, подвесной);
- краны козловые;
- краны кабельные;
- краны стрелового типа;
- краны порталные;
- краны башенные;
- краны консольные;
- краны грейферные;
- краны на гусеничном ходу.

На промышленных предприятиях наиболее распространенным и универсальным подъемно-транспортным устройством является двухбалочный опорный мостовой кран общего назначения [14].

Из всех представленных выше кранов в данной работе рассматривается мостовой опорный кран.

Мостовым краном называется ГПМ, передвигающаяся по рельсам на некотором расстоянии от земли (пола) и обеспечивающая перемещение груза в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Перемещаясь по путям, расположенным над землей, они не занимают полезной площади цеха или склада, обеспечивая в то же время обслуживание практически любой их точки [9, 10].

Мостовые краны классифицируются по области применения, роду привода основных механизмов, типу грузозахватного органа, конструктивным особенностям моста, по способу опирания на крановый путь, характеру и режиму эксплуатации и другим признакам. В зависимости от назначения мостовые краны подразделяются на следующие основные группы:

- общего назначения;
- специального назначения (с поворотной тележкой, с выдвижной поворотной и неповоротной стрелой и др.);

- металлургические (мульдозавалочные, литейные, штыревые, ковочные, колодцевые, с гибким подвесом траверсы, с подхватами, магнитные, грейферные и др.) [10, 14].

По грузоподъемности мостовые краны условно разделяют на:

- малые (масса груза 5 – 10т);
- средние (10 – 25 т);
- крупные (свыше 50 т).

В зависимости от конструкции моста краны делят на:

- однобалочные;
- двухбалочные;
- трехбалочные.

Однобалочный мост состоит из главной балки, соединенной с двумя концевыми балками. Двухбалочный мост имеет две главные балки, соединенные с двумя концевыми. Трехбалочный мост имеет три главные балки, соединенные с двумя поперечными балками.

По способу опирания на крановый путь:

- опорного;
- подвесного типа.

К мостовым кранам опорного типа относятся краны, опирающиеся ходовыми колесами на крановый рельс, закрепленный на подкрановой балке, установленной на колоннах цеха, эстакадах. Мостовые краны подвесного типа ходовыми колесами опираются на нижние полки двутавровых балок, подвешенных к потолочным конструкциям цеха [14].

По типу привода мостовые краны выполняют с ручным, гидравлическим или электрическим приводами.

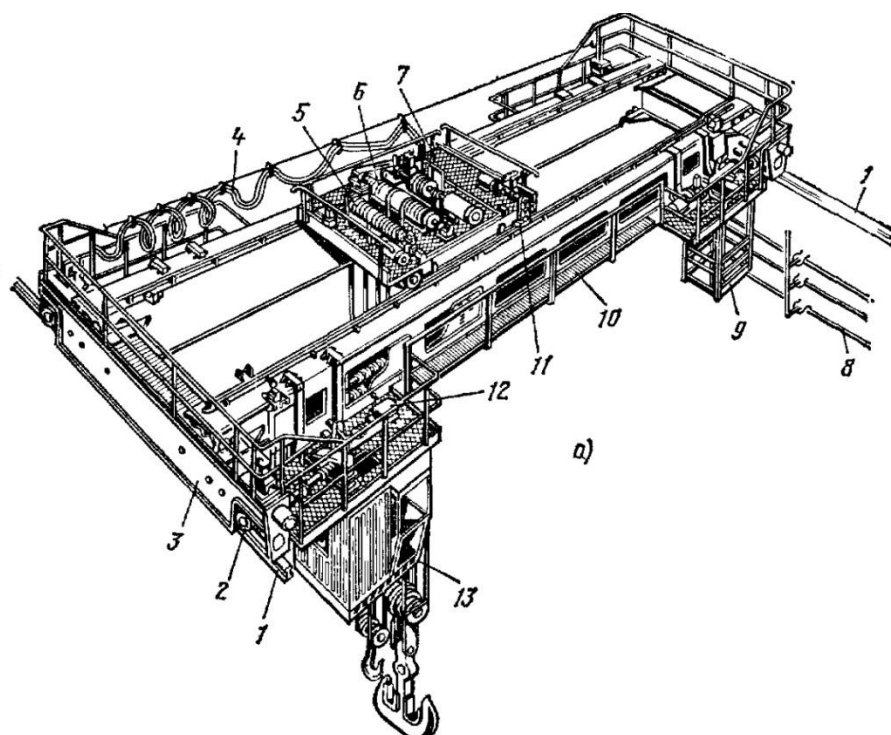


Рисунок 2.1. Общий вид типового мостового крана (перспективная аксонометрия).

Двухбалочный мостовой кран представляет собой балочный или ферменный мост 10, опирающийся на поперечные концевые балки 3, в которых закреплены ходовые колеса 2, приводимые во вращение механизмом 12 передвижения крана. Мост перемещается по подкрановым путям 1, уложенным на подкрановые балки (зачастую – двутавровые балки). По мосту пережвигается тележка 7, на которой установлены механизмы главного 6 и вспомогательного 5 подъема, механизм передвижения тележки 11 и токопровод 4 к тележке.

Устойства управления размещаются в кабине 13. Питание крана электроэнергией осуществляется по троллеям 8, расположенным вдоль подкрановой балки. Для обслуживания их на мосту крана имеется площадка 9.

Параметры и габаритные размеры кранов определены стандартами. Двухбалочные краны изготавливаются грузоподъемностью 5 .. 500 т. От режима работы зависят скорости движения всех механизмов крана. Технические требования к изготовлению и качеству мостовых кранов определены в соответствующих ГОСТах.

Все механизмы мостового крана имеют схожую структуру и состоят из приводной части (электродвигателя, тормоза, передаточного устройства) и не приводной части (ведомых колес). Приводная часть подразделяется на механизмы с центральным приводом (один двигатель – один редуктор) и отдельным приводом (несколько двигателей – несколько редукторов).

Кинематическая схема механизма подъема представлена на рис. 2.2.

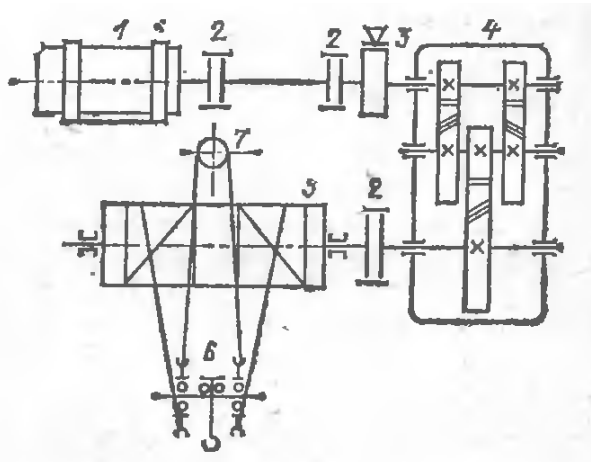


Рисунок 2.2. Кинематическая схема механизма подъема мостового крана.

Механизм подъема совместно с его электроприводом состоит из электродвигателя 1, зубчатых муфт 2, колодочного тормоза 3, редуктора 4, барабана 5, крюковой подвески и верхнего блока 7. Электродвигатель 1 посредством зубчатых муфт 2 крепится к быстроходному валу редуктора, на котором закреплен колодочный тормоз 3. Тихоходный вал редуктора 4 посредством одной из зубчатых муфт прикреплен к барабану 5, к которому посредством канатов и дополнительной опоры 7 прикреплена подвижная крюковая подвеска 6.

Механизмы передвижения кранов и тележек с приводными колесами имеют много общего, и поэтому рассматриваются совместно. Механизмы характеризуются видом ходового оборудования, типом привода и трансмиссией, связывающей привод с ходовым оборудованием [14].

На рисунке 2.3. показаны схемы приводных частей механизмов передвижения: а – четырехколесного крана (тележки) с центральным приводом и тихоходным валом; б – то же, с быстроходным валом; в – то же, с отдельным приводом.

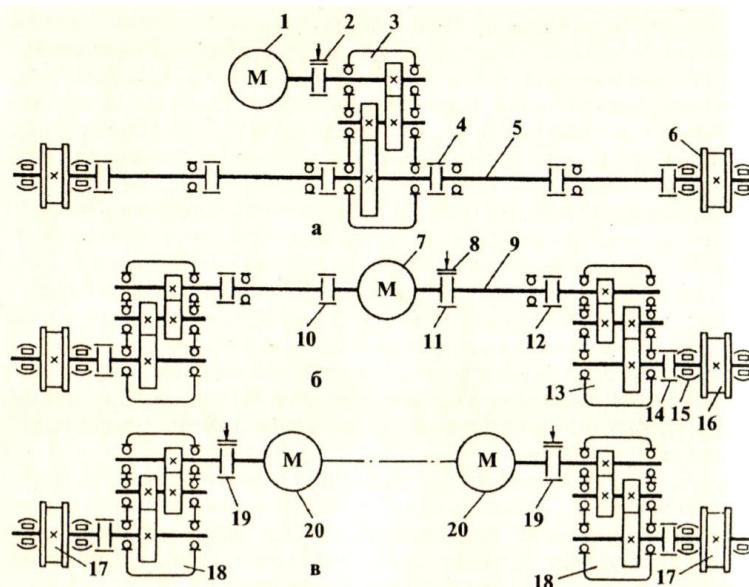


Рисунок 2.3. Кинематические схемы механизмов передвижения:

1, 7, 20 – электродвигатели; 2, 8, 19 – тормоза; 3, 13, 18 – редукторы; 4, 10, 11, 12, 14 – муфты; 5, 9 – валы; 6, 16 – ходовые колеса; 15 – буксы; 17 – приводное колесо.

Механизм передвижения с тихоходным валом (рисунок 2.1.2а) состоит из электродвигателя 1, колодочного тормоза 2, редуктора 3, передающего вращение через зубчатые муфты 4 трансмиссионному валу 5 и далее ходовым колесам 6. У данного механизма две половины трансмиссионного вала соединяются муфтами с валами ходовых колес и с тихоходным валом редуктора, который устанавливается в середине пролета моста. При этом угловая скорость трансмиссионного вала равна угловой скорости ходовых колес.

У механизма передвижения с быстроходным валом две половины трансмиссионного вала соединяются с валом электродвигателя, расположенного в середине пролета моста, и с быстроходными валами двух редукторов, установленных около концевых балок. В данном механизме (рисунок 2.1.2б) электродвигатель 7 имеет два выходных вала, соединенных с трансмиссионным валом 9, зубчатыми муфтами 10 и 11, причем на последней смонтирован тормозной шкив для тормоза 8. Соединение зубчатыми муфтами предохраняет вал от искривлений, а подшипники вала и подшипники электродвигателя – от перегрузок, вызываемых неточностью установки при монтаже крана. Вал состоит из отдельных секций, соединенных компенсирующими муфтами 12, и опирается на подшипники качения. Концевые секции быстроходного вала соединены с цилиндрическими редукторами 13, установленными на концах площадки крана. Выходные валы редукторов передают вращение посредством муфт 14 валам ходовых колес 16. Последние жестко закреплены на валах, смонтированных посредством сферических двухрядных самоустанавливающихся подшипников в буксах 15. Буксы с помощью сухарей и болтов жестко закреплены в специальных нишах концевых балок. В этом случае трансмиссионный вал, имеющий угловую скорости вала двигателя, передает минимальные крутящие моменты.

В механизме передвижения с индивидуальным приводом (рис. 2.2в) каждое приводное колесо 17 получает вращение от собственного электродвигателя 20 через редуктор 18 и затормаживается индивидуальным тормозом 19. При такой схеме привода из конструкции механизма передвижения исключается громоздкий трансмиссионный вал с опорами и муфтами. Нагрузка между приводами распределяется равномерно, а суммарная мощность электродвигателей не превышает мощности одного центрального двигателя. При этом маховые моменты роторов двигателей уменьшаются и облегчается пусковой режим. Электрическая схема включения двигателей обеспечивает синхронность их работы.

В механизмах передвижения кранов наибольшее распространение имеют горизонтальные редукторы с цилиндрическими зубчатыми шестернями. Применяют

также и вертикальные редукторы. Передаточное устройство в механизмах передвижения с отдельным приводом устанавливается как можно ближе к ходовому колесу.

В механизмах передвижения мостовых кранов используются цилиндрические двухребордные ходовые колеса. При числе колес с каждой стороны моста больше двух их объединяют в тележки с балансированной подвеской.

Конструктивные разновидности механизмов передвижения грузовых тележек отличаются в основном расположением редуктора: центрально – относительно колеи тележки либо консольно – с вынесением за пределы ее габаритов и способом соединения концов выходного вала редуктора и трансмиссионного вала.

### 2.3. Электропривод подъемных кранов

Наиболее требовательным к качеству регулирования скорости и момента, диапазона скоростей является электропривод подъема крана. Электроприводы механизмов передвижения тележки и крана менее требовательны, но применение унифицированной системы управления желательно для электроприводов всех механизмов крана. Для упрощения рассмотрения ограничимся электроприводом подъема крана, как наиболее требовательного.

Электропривод подъема крана относится к механизмам циклического действия. Каждый цикл работы делится на стадии разгона, движения с постоянной скоростью и торможения. При работе электропривод подъема крана функционирует в 2-х режимах: двигательном и тормозном. В двигательном режиме привод поднимает груз, преодолевая силу тяжести. При опускании большого по массе груза, для ограничения скорости опускания, электропривод работает в тормозном режиме, препятствуя увеличению скорости груза под действием силы тяжести.

Электропривод подъема крана работает в повторно-кратковременном режиме. Число и продолжительность включений влияют на показатели надежности и эксплуатационный ресурс работы крана. Электропривод подъема должен иметь возможность регулирования как скорости подъема груза, так и скорости спуска поднятого груза. Диапазон регулирования скорости подъема (спуска) определяется технологическим применением конкретного типа крана.

Основные требования к электроприводу подъема крана сформулированы в [10]:

- механические характеристики электропривода должны быть расположены во всех четырех квадрантах;
- электропривод должен обеспечивать плавный переход приводной электрической машины из двигательного режима работы в генераторный режим при спуске груза;
- диапазон регулирования скорости в большинстве случаев не выше 10:1;
- для выполнения операций по выбору слабины грузового каната необходимо иметь характеристику пониженной скорости;
- электропривод должен обеспечивать жесткие механические характеристики во всем диапазоне нагрузок.

Применение частотно-регулируемого асинхронного электропривода в механизмах подъемно-транспортного оборудования является эффективным методом повышения технологичности производства [11].

Использование таких приводов позволяет:

- значительно (до 40%) снизить энергопотребление крана, что особенно актуально при постоянно растущих тарифах на электроэнергию;
- осуществить разгон и торможение двигателя плавно, по желаемому закону во времени, при варьировании временем разгона и торможения от долей секунды до десятков минут;

- повысить динамические показатели при движении крана и долговечность механического оборудования благодаря плавности переходных процессов;
- защитить двигатель от перегрузок по току, перегрева, утечек на землю и от обрывов в цепях питания двигателей;
- снизить эксплуатационные расходы на капитальный ремонт оборудования за счет значительного снижения динамических нагрузок в элементах кинематической цепи.
- изменять скорости и ускорения движения механизмов крана применительно к конкретным технологическим задачам и тем самым оптимизировать технологический процесс.

Одним из наиболее тяжелых режимов динамического нагружения крана является подъем груза «с подхватом», когда провисание каната не устраняется путем предварительного натяжения, а привод подъема разгоняется до определенной скорости, и после устранения провисания каната происходит отрыв груза от поверхности опоры. Чем больше скорость «подхвата» груза, тем больше величина динамического нагружения. В большинстве случаев минимального провисания канатов достаточно, чтобы привод успел разогнаться до номинальной скорости. В этом режиме наиболее часто на кран действуют максимальные динамические нагрузки, ведущие к интенсивному накоплению усталостных повреждений, что одновременно увеличивает вероятность обрыва каната. В указывается, что около 80 % отказов грузоподъемных машин связано с динамическими нагрузками, одной из причин которых, как было отмечено ранее, является подъем груза «с подхватом».

В современных условиях развития техники и технологии, наиболее перспективным из возможных вариантов построения автоматизированного электропривода кранового механизма является электропривод по системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (ПЧ-АДКЗР). Одним из возможных вариантов построения системы управления электроприводом подъема на базе АДКЗР является скалярное управление.

Принцип скалярного управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода базируется на изменении частоты и текущих значений модулей переменных АД (напряжений, магнитных потоков, потокосцеплений и токов цепей двигателя). Управляемость АД при этом может обеспечиваться совместным регулированием либо частоты и напряжения, либо частоты и тока статорной обмотки. Первый способ управления принято трактовать как частотное управление, второй – как частотно-токовое управление.

Наиболее высокие требования предъявляются к приводу механизма подъема крана. Только управление с помощью преобразователя частоты обеспечивает устранение ощутимых динамических нагрузок при старте и остановке механизма, точное позиционирование груза. Помимо этого значительно повышается срок службы основных элементов подъемно-транспортного механизма – тяговых канатов, тормозных колодок, редукторов.

Всех вышеперечисленных качественных показателей электропривода подъема можно достичь только при векторном управлении, а именно регулированием амплитуды и фазы вектора поля двигателя.

Преимущества векторного регулирования при использовании в подъемных механизмах :

- точная отработка скорости с компенсацией скольжения (даже без обратной связи по скорости);
- глубокий диапазон регулирования (до 50:1 без использования датчика скорости);
- в области малых частот двигатель работает плавно и сохраняет момент вплоть до нулевой скорости;
- быстрая реакция на скачки нагрузки (при резких скачках нагрузки практически не происходит скачков скорости, вследствие высокой динамики регулирования);
- оптимизация КПД двигателя на низких частотах.



## 2.4. Рекомендации по выбору компонентов группового электропривода мостового крана.

За прошедшие годы созданы сотни работоспособных кранов, механизмы которых оборудованы частотно-регулируемым электроприводом. Однако проектирование при этом проводилось зачастую интуитивно, без анализа режимов работы крановых механизмов, а также без обоснования выбора основных компонентов электропривода: электродвигателя, преобразователя частоты, устройств рассеяния или рекуперации энергии.

При разработке новых и модернизации действующих кранов наметилось два подхода к внедрению частотно-регулируемого электропривода.

Первый из них подразумевает однозначное его применение вне зависимости от требуемого диапазона регулирования, режима работы, условий эксплуатации. В этом случае на всех механизмах применяются специальные (во многих случаях импортные) электродвигатели со встроенными датчиками скорости, встроенными тормозами, принудительной вентиляцией и устройствами обогрева. Наряду с преобразователями частоты вся остальная аппаратура (вплоть до тормозных резисторов) применяется также зарубежного производства. В многодвигательном электроприводе применяются индивидуальные преобразователи для каждого электродвигателя. Во многих случаях применяются устройства рекуперации энергии. Стоимость такого проекта достаточно велика, однако в докризисные времена была приемлема для предприятий сырьевого и энергетического комплексов. Такой подход позволяет выработать одно типовое решение и многократно тиражировать его (изменяя лишь мощность электродвигателей и преобразователей). И если для интенсивно работающих и специальных кранов, например в металлургии это оправдано, то для кранов общего назначения и редко используемых приводит к неоправданному увеличению стоимости и недоиспользованию заложенных в проект возможностей.

Второй подход базируется на дифференцированном подходе к выбору оборудования в зависимости от назначения, условий работы и предполагаемого срока службы крана. При этом используются следующие проверенные многолетней практикой принципы проектирования:

Для подавляющего большинства кранов реально необходимый диапазон регулирования скорости не превышает 50:1. Номинальная скорость механизмов подъема кранов мостового типа общего назначения не превышает, как правило, 15 м/мин (0,25 м/с). Значение посадочной скорости нормируется только для башенных кранов и составляет 4,8 м/мин. Такая скорость позволяет производить монтажные операции средней точности. Таким образом, указанная скорость в электроприводе механизмов подъема кранов мостового типа достигается при диапазоне регулирования чуть более чем 3:1. Установив диапазон регулирования скорости 20:1, получаем электропривод, позволяющий обеспечить весьма малую посадочную скорость, что для кранов общего назначения не является насущной необходимостью. Монтажные же краны большой грузоподъемности имеют более низкие номинальные скорости, например, 1,4 м/мин (0,023 м/с). Очевидно, что уже при диапазоне 10:1 возможно обеспечить монтажные операции с высокой точностью.

Механизмы передвижения кранов и тележек кранов мостового типа имеют номинальные скорости от 50 до 75 м/мин (0,83 ... 1,25 м/с). Реально требуемый диапазон также не превышает 50:1. Такой диапазон регулирования скорости достигается в современном частотно-регулируемом электроприводе при векторном бездатчиковом управлении. Это позволяет использовать крановые асинхронные короткозамкнутые электродвигатели без датчиков скорости (энкодеров), что существенно снижает их стоимость и повышает надежность всей системы. Следует заметить, что энкодеры в крановом электроприводе являются наименее надежным элементом, выход их из строя происходит достаточно часто.

Что касается защиты от падения груза, обеспечиваемой энкодерами в электроприводе механизма подъема, например, в случае неотрегулированного тормоза, то данная задача является больше организационной, чем технической. Тормоз механизма подъема (как и любой другой) должен быть всегда исправен и отрегулирован – это одна из главных обязанностей эксплуатационного персонала. Длительный опыт эксплуатации таких систем показал, что обслуживающий персонал вообще перестает следить за регулировкой тормоза. Итог – падение груза с разном электродвигателя при обесточивании крана, причем количество таких случаев достаточно велико. Напротив, в более простых электроприводах таких случаев не отмечено, поскольку неправильная регулировка тормоза быстро выявляется эксплуатационным персоналом.

В любом правильно спроектированном частотно-регулируемом крановом электроприводе тормоз и так накладывается при скорости, близкой к нулю, а значит, тормозные элементы практически не изнашиваются. Тем не менее, функции безопасности, реализуемые в системах с обратной связью по скорости чрезвычайно полезны.

Крановые электродвигатели серий (4)МТКФ, (4)МТКН показали свою достаточную надежность при работе в частотно-регулируемом электроприводе. Поскольку большую часть цикла электроприводы кранов общего назначения работает на номинальной скорости, в большинстве случаев возможно применение электродвигателей с самовентиляцией. Таким образом, вопреки сложившемуся мнению, обязательное применение двигателей с независимой вентиляцией в крановом частотно-регулируемом электроприводе не требуется.

Для кранов мостового типа общего назначения с наиболее распространенными пролетами (до 34,5 м) целесообразно использовать один преобразователь для питания параллельно включенных электродвигателей механизмов передвижения. Поскольку статический момент даже при перемещении номинального груза не превышает 50 % от номинального момента, требуемый диапазон регулирования скорости в большинстве случаев удается получить при скалярном принципе управления.

Резисторы, используемые ранее в составе электроприводов на базе двигателя с фазным ротором, показали свою пригодность в случае их применении в качестве тормозных в составе частотно-регулируемого электропривода. При этом их стоимость заметно меньше, чем стоимость аналогичных зарубежных изделий.

Устройства рекуперации целесообразно применять при режиме работы крана от 7К и выше. При этом наибольший эффект достигается на кранах имеющих в цикле работы режим опускания тяжелого грузозахватного органа – например грейфера. Использование устройств рекуперации на кранах общего назначения режимов до 5К как правило, не позволяет получить существенной экономии электроэнергии, срок окупаемости при этом может достигать десятков лет. На башенных кранах применение устройств рекуперации не только невыгодно (длительно опускается только пустой крюк), но и чревато потерей работоспособности при питании от передвижных электростанций.

Применение указанного подхода позволяет разумно сочетать современную зарубежную преобразовательную технику с отечественными изделиями, показавшими свою высокую надежность – электродвигателями, резисторами и некоторыми образцами электрической аппаратуры.

Казалось бы, что все вопросы, связанные с применением преобразователей частоты в крановом электроприводе решены. Однако остается ряд вопросов, решение которых может повысить технические и эксплуатационные характеристики электропривода:

1. В ПЧ, применяемых для кранового электропривода, целесообразно иметь функцию контроля исправности механического тормоза без применения датчика скорости (векторное бездатчиковое управление). Однако более желательным было бы иметь подобную функцию в наборе пользовательских настроек. Необходимо повысить быстродействие защит ПЧ при авариях, могущих привести к потере момента, например, при обрыве фазы на выходе ПЧ, при больших провалах напряжения.

2. Необходимо уточнить методику выбора электродвигателей применительно к особенностям частотно-регулируемого электропривода. С одной стороны, существенно снижаются пусковые потери, с другой стороны, увеличиваются потери от несинусоидальной

формы тока, а также появляются участки цикла, где электропривод работает в режиме электрического торможения. В настоящее время разработчики применяют электродвигатели с независимой вентиляцией выбранные «с запасом», без учета реального режима работы. Желательно определить области применения электродвигателей с независимой и самовентиляцией применительно к типам кранов и режимам работы механизмов.

3. Необходимо разобраться, в чем же преимущества специализированных частотно регулируемых крановых электродвигателей и оправдано ли увеличение их цены по сравнению с обычными крановыми. В чем, за исключением неочевидных преимуществ конструкции (скос пазов, конструкция клетки), их потребительские свойства отличны от обычных двигателей. Крановые электродвигатели серий (4)МТКФ, (4)МТКН показали свою достаточную надежность при работе в частотно-регулируемом электроприводе.

Поскольку основным способом управления для электроприводов механизмов подъема является векторный, очевидно, что значения перегрузочной способности и пускового момента двигателя на естественной характеристике могут не нормироваться – они формируются системой управления ПЧ. Таким образом, характеристики кранового частотно-регулируемого двигателя могут быть идентичны к аналогичным характеристикам двигателей общепромышленного исполнения режима S1. При этом из-за меньшей перегрузочной способности и соответственно меньшего значения тока холостого хода в ряде случаев возможно уменьшение габарита ПЧ. В последнее время некоторые разработчики используют для механизмов подъема именно общепромышленные машины режима S1. Однако конструкция таких машин не предназначена для работы в повторно-кратковременном режиме (крепление обмоток, пакета ротора, запас прочности деталей и т.д.). Можно сделать вывод, что крановый частотно-регулируемый электродвигатель для применения в электроприводе механизмов подъема должен иметь перегрузочную способность как у общепромышленных электродвигателей, а конструкцию как у крановых.

Для многодвигательных механизмов передвижения в случае питания параллельно включенных электродвигателей от одного ПЧ применяются, как правило, скалярные законы управления. В этом случае повышенная перегрузочная способность традиционных крановых

электродвигателей позволяет получить больший диапазон регулирования скорости по сравнению с двигателями общепромышленного исполнения.

4. С учетом низкой перегрузочной способности силовых полупроводниковых приборов мощность устройств рекуперации выбирается в настоящее время исходя из пиковой мощности торможения в переходном процессе. Переходный процесс торможения занимает в цикле работы механизма подъема весьма небольшое время, значительно меньше, чем время опускания груза с установившейся скоростью. Поэтому большую часть устройства рекуперации, выбранное по пиковой мощности, недогружено по току.

Представляется целесообразным иметь в составе электропривода с рекуперацией энергии также тормозной резистор, служащий для «срезания» пиков тока при торможении. Поскольку резистор допускает существенную кратковременную перегрузку, его мощность и габариты могут быть невелики. Мощность устройства рекуперации при этом может выбираться исходя из установившегося режима.

Исходя из вышеуказанных соображений, является целесообразным рассмотрение режимов работы мостовых кранов.

## **2.5. Режимы работы мостовых кранов.**

Условия эксплуатации электрооборудования на кранах характеризуются следующими параметрами: коэффициентом нагружения, циклом работы по ГОСТ 25546-82, относительной продолжительностью включения и числом включений в час по Правилам устройства и безопасной эксплуатации кранов Горгостехнадзора .

Режим работы электропривода любого механизма крана при циклической работе характеризуется относительной продолжительностью включения ПВ% в формулировке

ГОСТ 183-74 (2001), числом включений в час и величиной эквивалентного момента статических сопротивлений на валу электродвигателя, приведенного к нормативной относительной продолжительности включения. В соответствии с международными нормами ИСО 4301-80 и ГОСТ 25546-82 грузоподъемные краны по режимам работы объединяются в 8 групп 1К-8К, а механизмы кранов согласно ГОСТ 25835-83 объединяются в 6 групп 1М-6М. При этом основные принципы классификации определяются для кранов общим числом циклов нагружения и коэффициентом нагружения, а для механизмов - общим временем работы механизмов и коэффициентом нагружения.

ГОСТом 25835-83 предусматривается 6 видов эксплуатации, где каждый вид определен сочетающимися классами, учитывающими использование и нагружение механизмов. Норма времени эксплуатации кранового оборудования определяет класс по использованию. В таблицах 1 и 2 представлены ориентировочные характеристики классов, описывающих использование и нагружение механизмов.

Группу режима работы механизмов, классы использования и нагружения механизмов определяют по табл. 2.1-2.3.

Таблица 2.1. Соответствие классов, определяющих использование.

Классы использования	Частота задействования механизма
A0	Редко
A1	Нерегулярно
A2	Регулярно, но слабо интенсивно
A3	Регулярно, средне интенсивно
A4	Нерегулярно интенсивно (при двухсменной работе)
A5	Интенсивно (трёхсменная работа)
A6	Высоко интенсивно (трехсменная работа)

Таблица 2.2. Крановые механизмы и их режимы работы.

Классы использования	Норма времени работы механизма, ч.	Классы нагружения ГОСТ 25835-83			
		B1	B2	B3	B4
A0	до 800	1М	1М	1М	2М
A1	800-1600	1М	1М	2М	3М
A2	1600-3200	1М	2М	3М	4М
A3	3200-6300	2М	3М	4М	5М
A4	6300-12500	3М	4М	5М	6М
A5	12500-25000	4М	5М	6М	-
A6	25000-50000	5М	6М	-	-

В реальных условиях группа режима эксплуатации механизма крана нередко устанавливается в соответствии с группой режимов эксплуатации кранов в целом, определяемым нормативами.

Мостовые краны общего назначения определяются режимом работы, не превышающим 4К. Специальные краны, используемые на металлургических производствах, механизмы которых обычно имеют режимы работы, превышающие 4М. На фоне кранов, имеющих общее назначение, или рассматривая специальные краны, используемые на плотинах и гидроэлектростанциях, существует отдельная группа кранов, которые используются не часто и характеризуются режимом работы механизмов 1М – 2М. Это краны сверхбольшой грузоподъемности (несколько сотен тонн). Краны общего назначения при

обычных условиях работы поднимают груз с номинальной скоростью около 0,25 м/с и перемещают его со скоростью до 1,7 м/с, что укладывается в вышеописанные ограничения. ГОСТами не определяются точные диапазоны регулирования скоростей, но при этом механизм подъема (если посадочная скорость отдельно не оговаривается) может в этом отношении работать со скоростью одинаковой со скоростями, присущими башенным кранам – 0,08 м/с.

Таблица 2.3. Характеристика классов, определяющих нагрузку механизмов крана.

Класс нагружен ия механиз мов	Характеристики эксплуатационной нагрузки	
	Механизмы, ответственные за подъем	Механизмы, обеспечивающие горизонтальное перемещение
B1	Наличие преобладающих минимальных нагрузок, редкое воздействие максимальных нагрузок (монтажные и ремонтные работы).	Наличие редких пусков и торможений, значительных рабочих и холостых пробегов, малых масс перемещаемого оборудования. Характерно для производств невысокой интенсивности в работе, выполняемой на больших обслуживаемых площадях.
B2	Преобладание средних и минимальных нагрузок, редкое появление максимальных нагрузок.	Наличие редких, но регулярных пусков и торможений, небольших рабочих и холостых пробегов, малых масс перемещаемого оборудования. Характерно для постоянно слабо-интенсивно функционирующих производств.
B3	Характерно преобладание средних и минимальных нагрузок эпизодического характера (производства с разнообразной номенклатурой груза).	Наличие регулярных пусков и торможений, небольших рабочих и холостых пробегов, достаточно больших масс перемещаемого оборудования. Характерно для постоянно интенсивно функционирующих производств на малых обслуживаемых площадях.
B4	Характерно преобладание максимальных и близких к ним нагрузок, средних нагрузок эпизодического характера (производства с неменяющейся номенклатурой груза).	Наличие частых пусков и торможений, практически полное отсутствие установившихся режимов, перемещение больших масс. Характерно для постоянно интенсивно функционирующих производств на ограниченных обслуживаемых площадях.

Согласно примечанию к таблице 2 ГОСТ 25835-83, норма времени работы механизма назначается, исходя из наибольшей экономичности для ожидаемых условий использования и с учетом группы режима крана по ГОСТ 25546-82.

При отсутствии исходных данных, необходимых для определения класса использования и коэффициента нагружения, и отсутствии указаний на группу режима механизма в нормативно-технической документации на кран, группу режима работы механизмов допускается устанавливать по приложению 1 к ГОСТ 25835-83.

Интересующий кран (мостовой кран с канатной лебедкой редкого использования) имеет согласно ГОСТ 25835-83 (приложение 1) одинаковые группы режима работы для всех механизмов (главного подъема, вспомогательного подъема, передвижения тележки и моста) равного 4М. Данное обстоятельство упрощает построение циклограмм работы механизмов крана в будущем.

Согласно таблицам 2.5.1-2.5.3, зная режим работы механизмов крана, можно определить класс нагружения и класс использования (норму времени работы механизма).

Этих пар всего четыре: В4-А1, В3-А2, В2-А3 и В1-А4. Соответственно, нормы времени работы механизмов крана лежат в интервале 800-12500 часов в год, что соответствует мало- и среднезагруженным механизмам.

Исходя из РД 10-112-3-97 таблицы 1, нормативный срок службы крана грузоподъемностью свыше 10 тонн, принимается равным 27000 мото-часам.

Таким образом, нормативный срок службы крана (упрощенно, согласно таблицы 1) принимается равным 10 лет.

Цикл работы крана состоит из перемещения груза по заданной траектории и возврата к исходному положению для нового цикла. Число грузовых циклов крана в час входит в понятие производительности крана. В цикле работы крана время включения и работы каждого из механизмов  $\sum t_p$  чередуется с временем отключенного состояния  $\sum t_n$ , этого механизма, когда включен другой механизм, происходит застроповка (расстроповка) груза или организационно-технологическая пауза.

Максимальная продолжительность цикла работы механизма  $\sum t_p + \sum t_n$ , нормированная ГОСТ 183-74 (2001), составляет 600 с. При фактической продолжительности одного грузового цикла работы механизма более 600 с он условно разделяется на законченные составные части, например, движение в одном направлении и паузу после этого движения общей продолжительностью не более 600 с. Условная тахограмма цикла работы крана приведена на рис 2.4.

Краны для перегрузочных операций в технологическом процессе грузообработки, например, контейнерные краны, грейферные краны, перегрузочные краны для штучных грузов, башенные строительные краны, лесопогрузчики, технологические краны металлургии, краны целлюлозобумажной промышленности, перегрузочные краны металлургии и строительной индустрии и другие имеют многократно и постоянно повторяющиеся грузовые циклы с тахограммой, близкой к типовой (см. рис. 2.1.4). Краны машиностроительных производств, судостроения, монтажные и разнообразные ремонтные краны не имеют повторяющихся циклов работы. Такие краны относятся к грузоподъемным машинам с условно циклической работой.

Для механизмов кранов относительная продолжительность включения определяется для отрезка времени 600 с по формуле:

$$ПВ\% = \frac{\sum t_p}{6}$$

где  $\sum t_p$  - общее время включения (работы механизма за отрезок времени 600 с).

Основные параметры грузового цикла крана характеризуются либо конкретной тахограммой выполнения грузовой операции (для специальных кранов с заданной постоянной траекторией движения груза), либо усредненной тахограммой цикла кранов универсального использования.

Большинство крановых механизмов, имеющих выработанные практикой или оптимизированные скорости по характеру использования, как правило, должны иметь малые установочные и посадочные скорости для обеспечения остановки в заданных координатах с необходимой точностью, безопасной посадки грузов или грузозахватных органов, либо для снижения нагрузки на механические тормоза с целью обеспечения необходимого уровня их износостойкое.

Точность остановки крана (моста) или тележки в заданных координатах зависит от величины скорости в начале торможения и от разброса времени срабатывания коммутационных электроаппаратов и тормозов. Поскольку разработчик крана не может влиять на факторы разброса времени срабатывания элементов механизма, единственным фактором достижения необходимой точности является выбор скорости начала торможения, т.е. малой скорости движения. При заданной точности остановки и известной номинальной скорости движения устанавливается требуемый диапазон регулирования скорости механизма  $D_p$  с целью избежать излишних дополнительных доводочных включений механизмов.

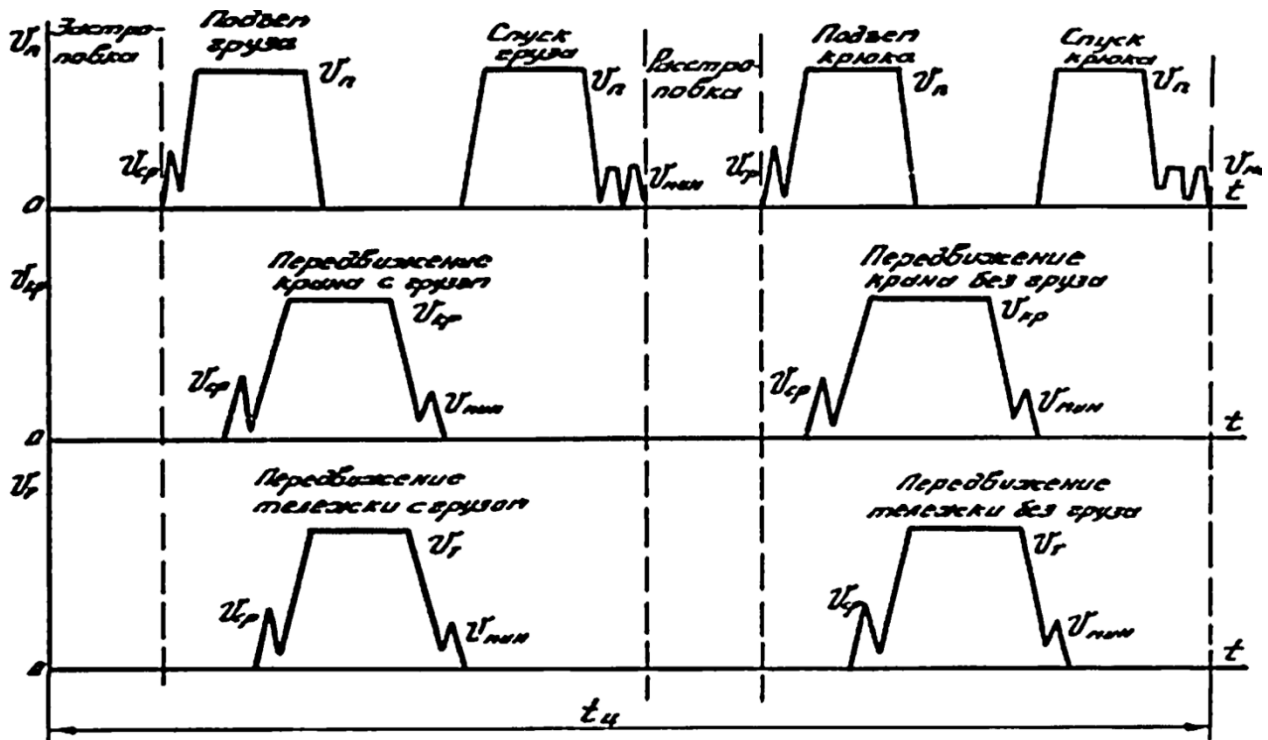


Рисунок 2.4. Условная типовая тахограмма цикла работы крана (ОСТ 24.090.85-88).

Расчетное число грузовых циклов в час  $\xi$  мостовых, козловых и порталных кранов универсального назначения определяется по формуле:

$$\xi = \frac{3600}{t_{\text{ц}}} = \frac{3600}{\frac{4,2 * K_{\text{р.с}}}{V_{\text{п}}} - 1,35 * K_{\text{р.с}} \left( \frac{L_{\text{к}}}{V_{\text{ср.т}}} + \frac{L_{\text{т}}}{V_{\text{ср.т}}} \right) + t_{\text{п}}}$$

где  $H$  - средняя расчетная высота подъема, м;  $L_{\text{к}}$  - средний путь перемещения (поворота) крана в одном направлении; 1,35 - коэффициент, учитывающий, в среднем, совмещение перемещения крана и тележки;  $L_{\text{т}}$  - средний путь перемещения тележки в одном направлении;  $t_{\text{п}}$  - время паузы на застроповку и расстроповку грузов, с;  $t_{\text{ц}}$  - время одного цикла, с;  $V_{\text{п}}$  - скорость подъема, м/с,  $K_{\text{р.с.}}$  - коэффициент увеличения времени торможения за счет регулирования скорости (см. рис. 2.4б);  $V_{\text{ср.т}}$  - средние скорости (м/с) движения крана и тележки, определяются по рис 2.4а в функции длины пробега  $L_{\text{к}}$ ,  $L_{\text{т}}$ ; 4,2 - коэффициент, учитывающий суммирование времени подъема и спуска груза и пустого крюка за цикл.

За цикл работы крана происходит определенное количество включений механизмов, в число которых входит как минимально необходимое число пусков до наибольшей скорости движения и соответствующее число торможений, так и некоторое дополнительное количество включений регулирования.

Для всех механизмов крана при усредненной типовой тахограмме  $K_{\text{вкл}} = 0,6$ .

При определенной производительности крана и известной продолжительности одного грузового цикла относительная продолжительность включения определяется по формулам:

- механизм подъема

$$\xi_{\text{п}} = \frac{4,2 * K_{\text{р.с}} * \left( \frac{H}{V_{\text{п}}} \right) + 0,2 * \sum t_{\text{п}}}{t_{\text{ц}}} * 100$$

- механизма передвижения крана

$$\xi_K = \frac{2 * \left( \frac{L_K}{V_{CPK}} \right) + 0,2 * \sum t_{\Pi}}{t_{\text{ц}}} * 100$$

- механизма тележки

$$\xi_K = \frac{2 * \left( \frac{L_T}{V_{CPT}} \right) + 0,2 * \sum t_{\Pi}}{t_{\text{ц}}} * 100$$

## 2.6. Электроснабжение подъемных кранов

Для питания крановых установок в настоящее время используют системы питания с переменным и постоянным током. Подавляющая часть электрической энергии для крановых установок (грейферных, мостовых, порталных) передается от источника к нагрузке с помощью трехфазных симметричных систем синусоидального напряжения, а малая часть – до 7 % (для металлургического производства) – с помощью систем электропитания постоянного напряжения [10].

Существующие механизмы подъема кранов, как правило, оснащены электроприводами на базе трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором и релейно-контактным управлением (мостовые, козловые, порталные краны).

Опыт работы показывает, что применение ЧРП на крановых установках целесообразно при их использовании с максимальной загрузкой, которая характерна для кранов с продолжительностью включения (ПВ)  $\geq 40$  % и коэффициентом использования  $K_{\text{исп}} = 0.2 \dots 0.5$ .

В настоящее время широкое применение получила так называемая АС – DC – АС система построения силовой части частотно-регулируемого электропривода, содержащая три основных блока: выпрямитель на входе, инвертор на полностью управляемых ключах на выходе и емкостной фильтр в звене постоянного тока.

Наиболее широкое распространение получило решение использовать, по возможности, наименьшее количество выпрямителей (в идеале – один выпрямитель) и индивидуальный инвертор для каждого двигателя группового привода. Если мощность двигателя слишком велика и не позволяет задействовать один инвертор по технико-экономическим соображениям, то задействуют параллельное подключение инверторов к двигателю.

Наиболее распространенной комбинацией оборудования группового частотно-регулируемого привода крановых механизмов является неуправляемый диодный выпрямитель напряжения (один – для 6-типульсной схемы, два – для 12-типульсной схемы с трехобмоточным трансформатором), подключенный к общей для инверторов шине постоянного тока (звену постоянного тока), к которой параллельно полярным проводникам (плюсовому и минусовому) подключена конденсаторная батарея.



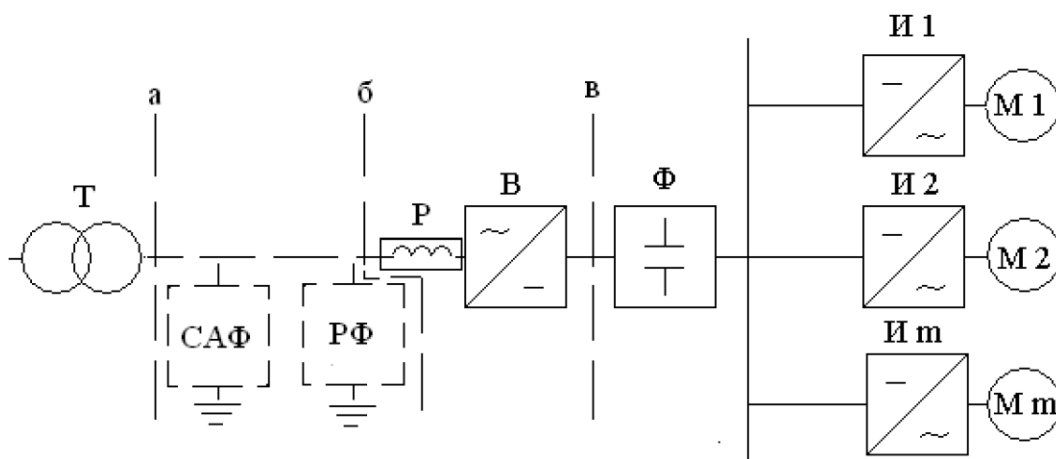


Рисунок 2.5 - Структурная схема системы электроснабжения крана (СЭК).

Зачастую емкостной фильтр звена постоянного тока является индивидуальным для каждого инвертора и, перед пуском в эксплуатацию инверторов заряжается посредством отдельной зарядной схемы (маломощный диодный выпрямитель с токоограничивающим реактором или резистором). В качестве инверторов чаще всего используются автономные инверторы напряжения с широтно-импульсной модуляцией, которые позволяют обеспечить пусковой режим работы в широком диапазоне скоростей и нагрузок кранового электропривода[11].

К фильтрующим устройствам (ФУ) относятся:

- линейные реакторы (Р);
- силовые активные фильтры (САФ);
- широкополосные УВЧ-фильтры;
- резонансные фильтры (РФ), настроенные на определенный спектр компенсируемых гармоник тока и напряжения.

В зависимости от количества крановых установок в составе производственного комплекса выделяют два схематических решения для систем электроснабжения крановых установок (КУ):

- электроснабжение КУ переменным током;
- электроснабжение КУ постоянным током.

В СЭК первого типа используются отдельные групповые выпрямители напряжения для каждой крановой установки (количество выпрямителей равно количеству кранов). Размещение фильтрующих устройств выполняется как в составе КУ, так и отдельностоящим модулем вне КУ.

В СЭК второго типа используется общий выпрямитель напряжения для всех КУ. Размещение фильтрующих устройств и выпрямителя обычно выполняется на базе распределительного устройства (РУ).

С точки зрения преобразования электрической энергии для двух исполнений сети электромагнитные процессы, вызывающие тепловые потери и искажения токов и напряжений в процессе преобразования, имеют одинаковую природу, и для их исследования применяется общепринятая методика. Однако конструктивное отличие выполнения сети имеет ряд особенностей в протекании электромагнитных процессов и вызывает различный подход к техническим решениям, обеспечивающим эффективность СЭК.

В данной работе будет исследован групповой электропривод только одного крана, но для целостности картины целесообразно краткое рассмотрение основных моментов обоих схемных решений.

СЭК, питающаяся от трансформаторной подстанции, обычно выполняют шинопроводом или шинами открытого исполнения, либо троллейной линией. Наиболее распространенный материал шин – алюминий и его сплавы. Связь между шиной и краном осуществляется гибким кабелем, конструктивное исполнение которого зависит от длины перемещения крана.

Шины переменного тока выполнены по четырехпроводной схеме (три фазы и один нулевой), а троллейная линия - по трехпроводной схеме. Как правило, системы питания переменного тока предусматривают напряжение 380 В.

Удельное сопротивление (проводимость) СЭК постоянного либо переменного тока в соответствии с физическими свойствами проводниковых материалов различно для алюминия и стали в зависимости от наличия или отсутствия волновых процессов, происходящих в них.

В токопроводах переменного тока наблюдается явление поверхностного эффекта, что приводит к неполному использованию сечения проводникового материала. В связи с этим допустимая плотность постоянного тока больше, чем для переменного тока.

Применение одного входного выпрямителя для крана более экономически оправдано по сравнению с индивидуальными выпрямителями для каждого привода крана. Наличие конденсаторного (емкостного) фильтра в звене постоянного тока позволяет аккумулировать энергию торможения одного или группы двигателей и передавать ее другим двигателям по цепи постоянного тока, минуя сеть, и тем самым сократить потери во входном звене преобразователя частоты [7,13].

Однако емкость такого конденсатора должна обеспечить поглощение энергии рекуперации во избежание повышения напряжения либо использовать инвертор для рекуперации энергии или другой поглотитель энергии (управляемый резистор).

Для крановых установок переменного тока входное звено преобразователя частоты (ПЧ) может быть выполнено неуправляемыми, управляемыми выпрямителями или 4q преобразователями. Использование разных входных типов выпрямителей определяется особенностью механизма и режимами его работы.

Наиболее распространенными, простыми и сравнительно небольшой стоимости являются неуправляемые выпрямители. Выполняемые на диодах, они характеризуются максимальной простотой и надежностью, высоким КПД в эксплуатации, а также требуемым показателем качества выходного (выпрямленного) напряжения и гармоничного состава тока, потребленного из сети. Коэффициент искажения тока составляет 0,95 при достаточно большой

индуктивности  $L_d$ -фильтра.

Энергия, поступающая в конденсатор фильтра, при торможении рассеивается в тормозном резисторе. Общее потребление электроэнергии крановых механизмов подъема при использовании такого выпрямителя зависит от относительного времени работы на сниженной скорости. Для стандартных мощностей двигателя подъема 30 кВт и 75 кВт в зависимости от относительного времени работы на сниженной скорости (5-20) % общее потребление уменьшается на (10-20) % [13].

При работе на активно-емкостную нагрузку, которая представляет собой ПЧ с емкостным фильтром, входные токи имеют непрерывный пульсирующий или прерывистый характер и отличаются высоким содержанием гармонических составляющих. Содержание гармоник значительно увеличивается при увеличении использования мощности ПЧ от суммарной мощности, низкой индуктивности сети и низкой загрузки асинхронного двигателя. Коэффициент гармоник входного тока находится в пределах: (65-90) % в зависимости от отношения мощности ПЧ (2-20) % к мощности питающего трансформатора, (80-90) % от загрузки двигателя (номинальная и режим XX), (80-85) % от индуктивности сети, которая для сетей предприятий напряжением 0,4 кВ определяется в основном индуктивностью питающего трансформатора.

Возникающая проблема электромагнитной совместимости, которая заключается в генерировании ПЧ высших гармоник тока и снижении качества электроэнергии, требует своего исследования и решения.

В большинстве случаев улучшение ЭМС входного неуправляемого выпрямителя с сетью достигается установкой входного реактора, необходимая индуктивность которого выбирается с учетом индуктивности сети. Применение входных реакторов приводит к известным преимуществам: ограничиваются скорости изменения тока и напряжения

сети, наводящие помехи в силовых цепях и цепях управления приводом. Чаще всего применяется входной реактор с напряжением короткого замыкания  $U_{кз} = 4 \dots 5 \%$  для обеспечения нормально допустимого значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения в соответствии с требованиями ГОСТ 13109-97 по качеству электроэнергии и требований стандартов по электромагнитной совместимости нелинейных потребителей с сетью. Вместе с тем использование входного реактора приводит к ухудшению массогабаритных показателей электропривода в целом. Меры по снижению уровня генерируемых приводом гармоник тока даются «дорогой» ценой.

В работе рассматриваются нелинейные нагрузки, поэтому используется показатель THD, как показатель электромагнитной совместимости.

Показатели качества электроэнергии и электромагнитной совместимости в Украине и зарубежной практике нормируются требованиями ГОСТ 13109-97 и стандартом IEEE 519-1992 или МЭК 61000-3-12:2004, МЭК 61800-3:2012, в значительной степени влияют на надежность и стоимость СЭК.

Эффективность систем питания кранов определяется капитальными и эксплуатационными затратами при обеспечении электромагнитной совместимости (ЭМС) в соответствии с требованиями стандарта IEEE 519-1992 или, что определяется требованиями заказчика и ПКЭ в соответствии с ГОСТ 13109-97.

Неуправляемые выпрямители не позволяют реализовать режимы рекуперации, необходимые для двигателей кранов, которые работают с частыми пусками и остановками. Для получения максимального эффекта экономии электроэнергии для кранов с ПВ  $\geq 40 \%$  рекомендуется использовать выпрямитель с рекуперацией. При использовании в механизме подъема ПЧ с рекуперацией потребление электроэнергии снижается до 50-55 % по сравнению с ПЧ без рекуперации.

Режим работы трехфазного мостового 4q преобразователя зависит от закона управления IGBT-транзисторами. Наиболее распространенные среди них:

- широтно-импульсная модуляция, в частности синусоидальная модуляция с коррекцией коэффициента мощности;
- управление ключами импульсом длительностью 120 гр. эл. и синхронизированного с работой соответствующих диодов, т.е. режим активного выпрямителя с двухсторонней проводимостью. Использование 4q преобразователя для повышения коэффициента мощности имеет ряд недостатков:
- обеспечение синусоидальной формы фазного тока в широком диапазоне изменения нагрузок требует установки входного реактора с  $U_{кз}$  до 40 %, что приводит к повышению напряжения в звене постоянного тока до 880 В при номинальном напряжении двигателя 380 В;
- увеличенное напряжение на емкости фильтра вызывает повышенные потери в силовых ключах, конденсаторах и в двигателе;
- увеличение импульсного напряжения на обмотке статора АД связано с необходимостью использования специального двигателя с повышенным требованием к изоляции обмоток статора.

Указанные недостатки приводят к увеличению габаритов и стоимости, к дополнительным потерям на всех элементах преобразователя и соответственно к снижению его КПД.

В основной массе в звене выпрямления, как правило, отсутствует сглаживающий дроссель  $L_d$ , что приводит к значительным пульсациям выпрямленного тока  $I_d$  и к увеличению гармоник фазного тока, что соответственно, ухудшает коэффициент искажения.

Наличие двухсторонней проводимости вызывает ряд особенностей в работе АВ в широком диапазоне изменения нагрузки.

В работах освещены разные вопросы выбора силового LC- фильтра АВ, который называют «синусным» фильтром. Индуктивное сопротивление «синус»-фильтра составляет 15-20 %  $U_{кз}$  при частоте ШИМ АВ на уровне 3 кГц. Установка дросселя в «синус»-фильтрах неизбежно приводит к снижению жесткости внешней характеристики его источника питания

и, как следствие, уменьшается напряжение на выходе ПЧ. Несмотря на его преимущества, такие как рекуперация энергии в сеть, работа преобразователя частоты с заданным значением коэффициента мощности, АВ обеспечивает синусоидальную форму входного тока, частота коммутации IGBT-транзисторов достигает до 10 кГц, что приводит к дополнительным динамическим потерям. Наличие различных подходов вызывает необходимость дополнительных исследований в выборе рациональных параметров «синус»-фильтров, реакторов и других элементов.

Управление IGBT-транзисторами входного АВ осуществляется непрерывным импульсом на протяжении  $120^\circ$ , который синхронизирован с моментом открытия соответствующих им диодов. Транзистор совместно с основным диодом в зоне проводимости (диоде) образуют двунаправленную проводимость. Управление IGBT-транзисторами входного АВ осуществляется от блока управления. Знак тока определяется разностью между напряжением на входе и выходе преобразователя. Обмен энергией происходит под действием разности напряжения источника питания  $U_1$  и напряжения на емкости фильтра  $C_\Phi$  в звене выпрямления.

На интервале проводимости (каждые  $120^\circ$ ) двунаправленного ключа АВ характерны два режима работы: режим потребления (РП) электроэнергии ( $U_1 > U_{cf}$ ) или режим рекуперации (РР) энергии в питающую сеть ( $U_1 < U_{cf}$ ).

При выпрямлении открыты диоды мостового выпрямителя на интервале проводимости. Инверторно-двигательная группа работает в режиме потребления (условно положительное направление тока) и отображает процесс преобразования энергии сети переменного тока в энергию постоянного тока на выходе.

При рекуперации открыты IGBT-транзисторы. Инверторно-двигательная группа работает в режиме генерации (условно отрицательное направление тока) и отображает процесс передачи постоянного тока в питающую сеть. В интервал проводимости входят коммутационный и межкоммутационный интервал.

Необходимо обратить внимание, что ток рекуперации в крановых механизмах меньше тока потребления и определяется из соотношения:

$$I_{1\text{ном.потреб}} - I_{1\text{ном.рекуп}} = \frac{P_1}{U_d * \eta_1} - \frac{P_2 * \eta_2}{U_d}$$

где  $P_1$  и  $P_2$  - мощности разгона и торможения,  $\eta_1$  и  $\eta_2$  - КПД электропривода и механизма в режиме пуска и торможения.

При  $\eta = 0.75 \dots 0.85$ , значение  $\Delta I = 0.45I_d$ . Таким образом, ток рекуперации существенно зависит от общего КПД механизма и загрузки крана. При снижении нагрузки двигателя резко падает эффективность режима рекуперации. Экономия энергии достигается, в основном, за счет возврата энергии, накопленной в маховых массах механизма и в режимах частотного пуска.

## 2.7. Системы кранового электропривода.

В работе [12] приведены результаты исследования стоимостных показателей как функций токовой нагрузки электромеханической системы.

Для составления схмотехнических решений асинхронного группового частотно-регулируемого электропривода одним из основных моментов является предварительный выбор количества преобразователей частоты, активных/пассивных выпрямителей напряжения, инверторов напряжения. Наиболее часто задача составления схмотехнических решений ставится при модернизации уже действующих крановых установок, и зачастую системы двигатель – редуктор остаются без изменений. Замене чаще всего подвержены именно статические преобразователи энергии, поэтому следует рассмотреть принципы подбора статических преобразователей наиболее частоупотребимых при модернизации/проектировании кранового электропривода.

Согласно сводным данным научно-исследовательского центра «Приводная техника», одного из наиболее крупных КБ, занимающегося модернизацией и созданием новых систем кранового электропривода, при составлении схмотехнических решений чаще всего выбор статического преобразователя основывается на нескольких критериях оптимизации, одним из которых является степень унификации оборудования электроприводов крановых механизмов.

В качестве преобразователей частоты и напряжения задействуются линейки оборудования зарубежных и отечественных производителей, модели которых ранее использовались в электроприводах подъемно-транспортных механизмов. На данный момент ряды ПЧ, рассматриваемые при проектировании сводятся к нескольким линейкам специализированного оборудования, наиболее известными из которых являются:

- линейки SE, SK, SP, SPMA и SPMD фирмы ControITechniques;
- линейки ACS550, ACS800 и ACS880 фирмы ABB;
- линейки 3G3RVA и 3G3PVA фирмы Omron;
- линейка Simovert Masterdrives фирмы Siemens;
- линейки PowerFlex 520,700,750 AFE фирмы Allen Bradley;
- линейка AFE2000 фирмы Delta Electronics;
- линейка Altivar и Altivar AFE фирмы Schneider Electric;
- линейка NXP Common Bus NFE/AFE фирмы Vacon.

Критерий оптимизации электропривода, имеющего в составе вентильный преобразователь, может быть сформулирован в виде функции, которая бы учитывала затраты на компоненты электропривода. Как известно, полупроводниковый преобразователь вносит существенную долю в общую стоимость комплектного электропривода. Поэтому применение нестандартных (несерийных) схем силовых цепей требует дополнительного обоснования. С другой стороны, в диапазоне больших мощностей унификация элементной базы не имеет такого значения, как в серийных электроприводах малых и средних мощностей.

Оценка стоимостных показателей для разных схем силовых цепей может быть достоверна дана только для стандартных трехфазных схем силовых цепей (см. рис. 2.2.6, а) по данным фирм-дилеров силовой полупроводниковой техники. Но косвенная оценка может быть выполнена и для других вариантов схем, если их рассматривать как комбинацию стандартных мостовых схем. Как показывают исследования, такой подход дает незначительные расхождения между реальной ценой на нестандартные схемы и её оценкой. Поэтому найдем зависимость весового стоимостного коэффициента от величины тока.

На рис. 2.6 представлены линейные регрессионные зависимости исследуемого весового коэффициента от тока для разных типов полупроводниковых преобразователей.

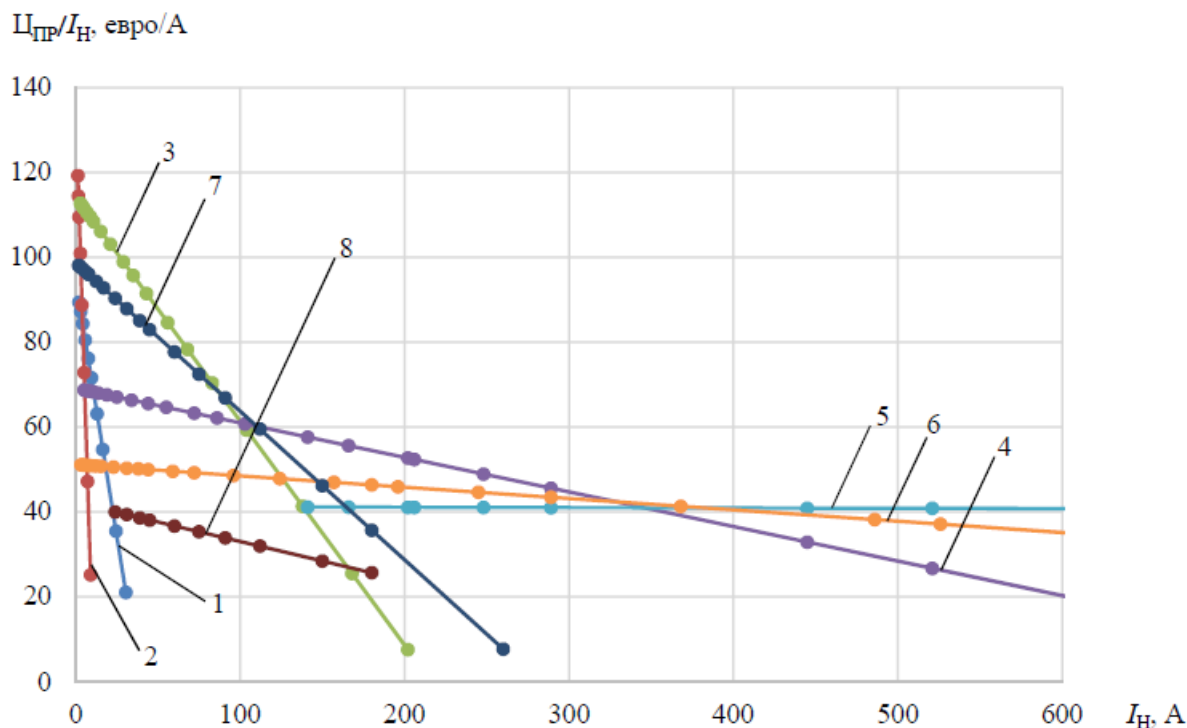


Рисунок 2.6. Линейная регрессионная зависимость удельной цены вентильных преобразователей от номинального тока нагрузки: 1 – SE фирмы ControlTechniques, 2 – SK фирмы ControlTechniques, 3 – SP фирмы ControlTechniques, 4 – ACS800 фирмы ABB, 5 – ACS880 фирмы ABB, 6 – ACS550-01 фирмы ABB, 7 – 3G3RVA фирмы Omron, 8 – 3G3PVA фирмы Omron.

Как известно, данные, полученные на основании регрессионного анализа, требуют обязательного физического обоснования, так как наличие сильной корреляционной связи не гарантирует реальную “физическую” зависимость одной переменной от другой. Из рис. 2.7 видно, что в области малых токов зависимость удельного коэффициента является существенно нелинейной. Объясняется это тем, что при малых номиналах тока существенную долю в стоимости полупроводникового преобразователя составляет цена на аппаратно-программную часть (стоимость микропроцессорного устройства и разработанного системного и прикладного программного обеспечения). Такая нелинейная зависимость наиболее выразительно проявляется для преобразователей, которые реализуют сложные алгоритмы регулирования координат электропривода. В диапазоне же больших токов удельная цена на преобразователь представляет собой практически линейную функцию, проходящую горизонтально.

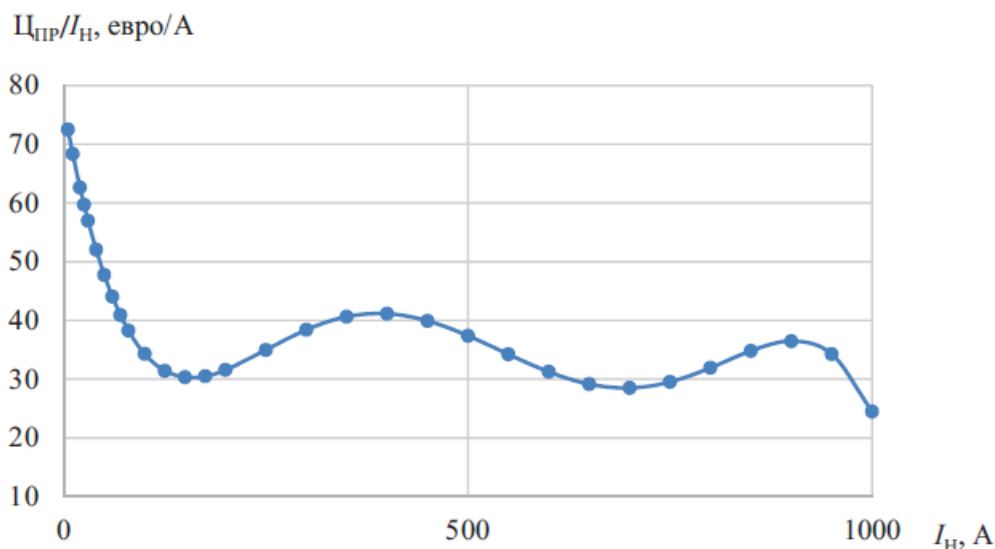


Рисунок 2.7 - Обобщенная регрессионная зависимость удельной цены полупроводникового преобразователя от тока.

Исходя из регрессионной зависимости, можно определить значение номинала преобразователя частоты, начиная с которого один полупроводниковый преобразователь может быть заменен двумя, меньшего номинала, при этом общая стоимость одного “большого” источника питания будет равна стоимости двух “малых”. Поставленную задачу оптимизации удобнее решать численными методами.

После определения количества преобразователей напряжения, исходя из технико-экономических показателей, можно перейти к анализу и описанию систем управления преобразователями напряжения.

## 2.8. Структуры и системы управления преобразователями напряжения

Наиболее часто рассматриваемым преобразователем питающего напряжения является диодный выпрямитель. Управление пассивным выпрямителем осуществляется со стороны силовой цепи (питающая сеть – нагрузка в виде звена постоянного тока) без использования датчиков и подсистем согласования величин, а также системы управления полупроводниковыми приборами (драйвера).

Управление активным выпрямителем напряжения требует разработки и внедрения более сложной системы управления с применением обратных связей по технологическим параметрам: напряжению и току. Для АВН в большинстве случаев используется векторная система управления с ориентацией по вектору напряжения сети. Задача данной СУ поддерживать на заданном уровне напряжения в звене постоянного тока и обеспечивать заданный коэффициент мощности на входе преобразователя. Для того чтобы осуществить ориентацию по вектору напряжения питающей сети, необходимо иметь информацию о положении вектора  $\theta_{ABH}$  и частоты сети  $\omega_{ABH}$ . Для этого предусмотрен блок фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), в зарубежной литературе именуемый как phase-locked loops (PLL), выполняющий вычисления этих параметров по результатам измерения мгновенных значений фазных напряжений. Реализация СУ АВН выполняется с помощью микропроцессорной техники [11-13].



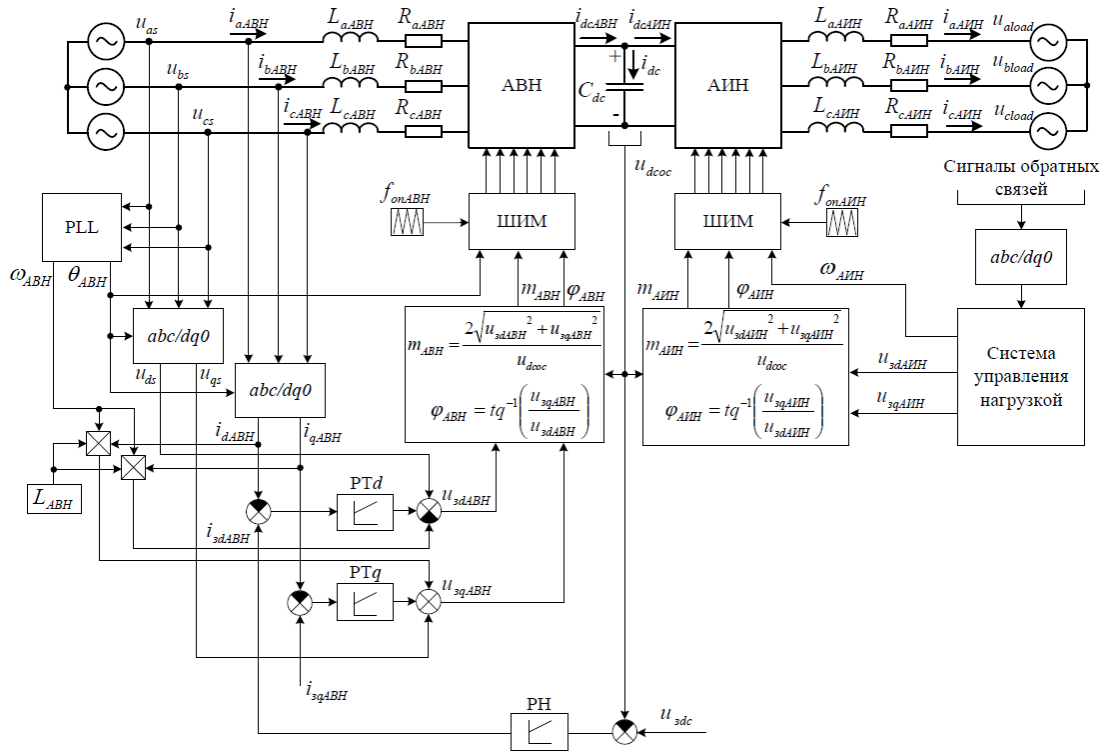


Рисунок 2.8 - Функциональная схема двухзвенного преобразователя частоты с АВН и АИИ.

На функциональной схеме (рис. 2.8.) для силовых цепей (жирные линии) используются следующие обозначения:  $u_{as}, u_{bs}, u_{cs}$  – мгновенные значения напряжения питающей сети,  $u_{aABH}, u_{bABH}, u_{cABH}$  – мгновенные значения напряжения АВН,  $i_{aABH}, i_{bABH}, i_{cABH}$  – мгновенные фазные токи АВН,  $R_{aABH}, R_{bABH}, R_{cABH}$  – эквивалентные фазные активные сопротивления и  $L_{aABH}, L_{bABH}, L_{cABH}$  – эквивалентные фазные индуктивности на входе АВН;  $u_{aAИH}, u_{bAИH}, u_{cAИH}$  – мгновенные значения напряжения АИИ,  $i_{aAИH}, i_{bAИH}, i_{cAИH}$  – мгновенные фазные токи АИИ,  $u_{aload}, u_{bload}, u_{cload}$  – мгновенные значения напряжения нагрузки,  $R_{aAИH}, R_{bAИH}, R_{cAИH}$  – эквивалентные фазные активные сопротивления и  $L_{aAИH}, L_{bAИH}, L_{cAИH}$  – эквивалентные фазные индуктивности на выходе АИИ;  $C_{dc}$  – ёмкость звена постоянного тока  $i_{dcABH}$  – выпрямленный ток АВН,  $i_{dcAИH}$  – выпрямленный ток АИИ,  $i_{dc}$  – ток через ёмкость DC,  $u_{dc}$  – напряжение звена постоянного тока.

Система дифференциальных уравнений для силовых цепей в системе координат ABC и  $dq0$  выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} u_{as} = i_{aABH} \cdot R_{aABH} + L_{aABH} \cdot p \cdot i_{aABH} + u_{aABH}; \\ u_{bs} = i_{bABH} \cdot R_{bABH} + L_{bABH} \cdot p \cdot i_{bABH} + u_{bABH}; \\ u_{cs} = i_{cABH} \cdot R_{cABH} + L_{cABH} \cdot p \cdot i_{cABH} + u_{cABH}; \\ u_{aAИH} = i_{aAИH} \cdot R_{aAИH} + L_{aAИH} \cdot p \cdot i_{aAИH} + u_{aload}; \\ u_{bAИH} = i_{bAИH} \cdot R_{bAИH} + L_{bAИH} \cdot p \cdot i_{bAИH} + u_{bload}; \\ u_{cAИH} = i_{cAИH} \cdot R_{cAИH} + L_{cAИH} \cdot p \cdot i_{cAИH} + u_{cload}; \\ i_{dcABH} - i_{dcAИH} = i_{dc}; \\ u_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \cdot \int (i_{dcABH} - i_{dcAИH}) \cdot dt. \end{cases}$$



$$\begin{cases} u_{ds} = R_{dABH}i_{dABH} + pL_{dABH}i_{dABH} - \omega_{ABH}L_{qABH}i_{qABH} + u_{dABH}; \\ u_{qs} = R_{qABH}i_{qABH} + pL_{qABH}i_{qABH} + \omega_{ABH}L_{dABH}i_{dABH} + u_{qABH}; \\ u_{dAИH} = R_{dAИH}i_{dAИH} + pL_{dAИH}i_{dAИH} - \omega_{AИH}L_{qAИH}i_{qAИH} + u_{dload}; \\ u_{qAИH} = R_{qAИH}i_{qAИH} + pL_{qAИH}i_{qAИH} + \omega_{AИH}L_{dAИH}i_{dAИH} + u_{qload}; \\ i_{dcABH} - i_{dcAИH} = i_{dc}; \\ u_{dc} = \frac{3}{2} \frac{1}{C_{dc}} \int (i_{dcABH} - i_{dcAИH}) \cdot dt; \end{cases}$$

Сигналы из силовых цепей поступают в систему автоматического регулирования (САР) после преобразования из неподвижной системы координат  $abc$  во вращающуюся систему координат  $dq0$ . Такое математическое преобразование применяется в электротехнике с целью упрощения анализа трёхфазных цепей. В случае симметричной трёхфазной цепи, применение  $dq0$  преобразования, позволяет получить вместо трёх переменных составляющих две постоянные. Матрица прямого преобразования из трёхфазной  $abc$  во вращающуюся систему координат  $dq0$  имеет вид, приведенный ниже:

$$P = \begin{bmatrix} K_d \cdot \cos(\theta) & K_d \cdot \cos\left(\theta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & K_d \cdot \cos\left(\theta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\ K_q \cdot \sin(\theta) & K_q \cdot \sin\left(\theta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & K_q \cdot \sin\left(\theta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\ K_0 & K_0 & K_0 \end{bmatrix},$$

где  $\theta$  - угол поворота, принимающий значения от 0 до  $2\pi$ ,  $\omega(t)$  – скорость вращения системы координат в функции от времени,  $\theta_0$  – начальный угол поворота оси системы координат  $dq0$ . Матрица прямого преобразования с такими коэффициентами называется матрицей прямого преобразования Парка. Скорость вращения системы координат  $dq0$  для АВН при условии точной синхронизации с питающей сетью определяется частотой сети  $\omega_{ABH}(t) = \omega c(t)$ .

Синтез регуляторов токов по осям  $dq$  (РТd и РТq) и регулятора напряжения DC (РН) выполняется методом подчиненного регулирования координат с последовательной коррекцией при использовании системы относительных единиц.

При отсутствии повышенных требований к диапазону скоростей и качеству переходных процессов, что действительно для электроприводов транспортных механизмов общего назначения, целесообразно применять бездатчиковое векторное управление автономным инвертором напряжения.

Датчики скорости и положения в таких системах отсутствуют, а частота вращения АД определяется косвенно наблюдателем скорости по текущим значениям токов и напряжений статора. Отсутствует также регулятор потока ротора, а задание  $I_{1d}^*$  на потокообразующую компоненту тока статора  $I_{1d}$  неизменно. Хотя подобные системы и уступают высококачественным системам полеориентированного управления, они позволяют без каких-либо дополнительных затрат несколько повысить быстродействие и расширить диапазон регулирования по сравнению со скалярными системами.

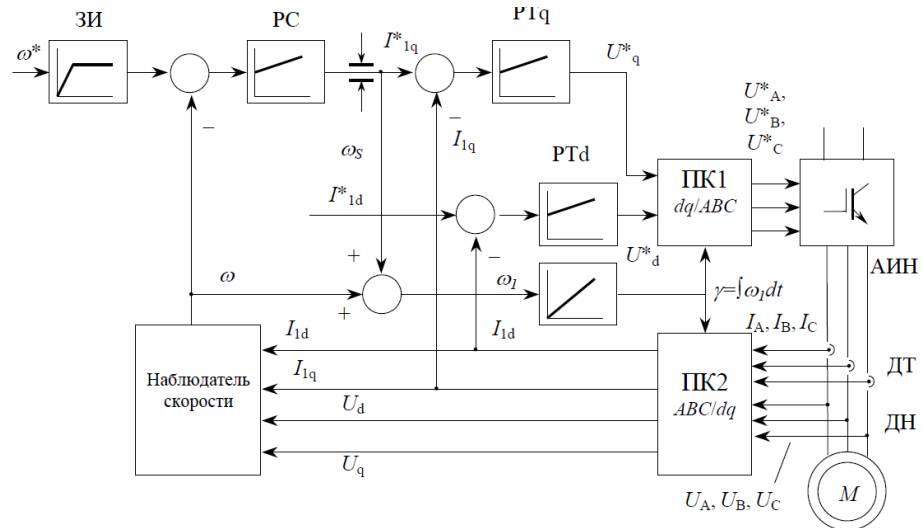


Рисунок 2.9 - Функциональная схема системы бездатчикового векторного управления.

В данной работе для моделирования систем управления преобразователями напряжения будут использоваться:

- для АВН – система векторного управления с ориентацией по вектору напряжения сети;
- для АИН – система бездатчикового векторного управления.

## 2.9. Задание на расчёт и моделирование

Основной задачей исследования режимов работы группового частотно-регулируемого электропривода с общим звеном постоянного тока является получение и анализ количественных и качественных показателей электропривода:

- суммарная потребляемая мощность из сети;
- гармонический анализ напряжения и тока сети в точке подключения;
- сопоставление возможных компоновок оборудования, входящего в состав группового ЭП, основанное на результатах математического моделирования с целью установления степени, в которой они удовлетворяют требования энергоэффективности и критерии качества электроэнергии согласно ГОСТа 13109-97. Для анализа и математического моделирования целесообразно использовать следующие схематические решения:

- групповой частотно-регулируемый электропривод (ГЧРЭП) мостового крана с общим звеном постоянного тока (ОЗПТ) на базе неуправляемого выпрямителя (НВ) и с модулем торможения (МТ) на резистивных элементах без применения устройства рекуперации;
- ГЧРЭП мостового крана с ОЗПТ на базе активного выпрямителя напряжения (АВН) с модулем торможения, обеспечивающим защиту фильтрующего конденсатора от перенапряжений путем разряда емкости на него, с сетевым LC-фильтром, позволяющим обеспечить требуемое ГОСТом 13109-97 качество напряжения сети.

В качестве базовой циклограммы работы мостового крана следует принять Условную типовую тахограмму цикла работы крана по ОСТ 24.090.85-88 с привязкой значений скорости, времени разгона/торможения и времени установившегося движения к исходным данным задания на проект, приведенных ниже.

В качестве примера задания на проект и расчёта параметров мостового крана был выбран пример выполнения курсового проекта мостового крана общего назначения [1, 14].

Данный пример выполнен на высоком уровне, прошел все стадии рецензирования профильными специалистами и является наиболее полным расчётом параметров мостового крана из найденных в открытых источниках. Также прилагается графическая часть и сводные таблицы расчётных данных, что облегчает восприятие информации.

### Исходные данные:

Кран мостовой электрических двухбалочный для работы в механосборочном цехе.

Грузоподъемность – 80/20 т.

Максимальная высота подъема – 25/28 м.

Пролет крана – 19 м.

Скорость подъема груза – 0.1/0.2 м/с.

Скорость передвижения тележки – 0.5 м/с.

Скорость передвижения моста крана – 1.0 м/с.

Группы режимов работы:

- механизма вспомогательного подъема – 3М;
- остальных механизмов – 4М.

Относительная продолжительность включения оборудования – 25%.

Срок службы крана – 10 лет.

Род тока и напряжения – переменный; 380 В.

Графики нагружения механизмов – типовые усредненные графики ВНИИПТМАШа.

Коэффициент применяемости унифицированных изделий – 75%.

### Результаты расчёта и выбора оборудования.

#### Механизм главного подъема:

Выбрана крюковая подвеска ПО «Сибтяжмаш» с параметрами ( $Q_n = 80\text{т.}$ ; режим работы средний;  $D_6 = 800\text{ мм.}$ ;  $m_n = 3675\text{ кг.}$ ).

Вес номинального груза:  $G_{ном} = 820,6\text{ кН.}$

Выбран двигатель МТН-613-10 ( $N_{дв} = 90\text{ кВт.}$ ;  $ПВ_{дв} = 25\%$ ;  $n_{дв} = 570\text{ об/мин.}$ ;

$J_{р.дв} = 6,25\text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $m_{дв} = 1240\text{ кг.}$

Выбран редуктор ГК-1000.

Частота вращения барабана:  $n_6 = 8,49\text{ об/мин.}$

Передаточное число лебедки:  $u_{лтр} = 65,9$ .

Передаточное число открытой передачи:  $u_{от} = 4$ .

Передаточное число редуктора:  $u_{ртр} = 16,5$ .

Класс нагружения механизма: В2.

Класс использования (при гр. режима работы 4М): А4.

Коэффициент нагружения:  $k = 0,25$ .

Машинное время работы механизма: 12500 ч.

Частота вращения тихоходного вала редуктора:  $u_t = 33,9\text{ об/мин.}$

Расчётный крутящий момент на тихоходном валу при подъеме номинального груза в период установившегося движения:  $T_p = 25,03\text{ кН} \cdot \text{м.}$

Коэффициент долговечности:  $k_d = 0,64$ .

Эквивалентный крутящий момент:  $T_{р.э.} = k_d \cdot T_p = 0,64 \cdot 25,03 = 16,02\text{ кН} \cdot \text{м.}$

Передаточное число механизма:  $u_{мех} = 243,36$ .

Угловая скорость вала двигателя:  $\omega_{дв} = 58,64\text{ рад/с.}$

Линейная скорость подъема груза:  $v_{под} = 0,11\text{ м/с.}$

Расчётный тормозной момент:  $T_{т.р.} = 1,75 \cdot T_{ст.т} = 2362\text{ Н} \cdot \text{м.}$

Выбран тормоз ПО «Сибтяжмаш» ( $T_{т.н.} = 2500\text{ Н} \cdot \text{м}$ ;  $ПВ = 25\%$ ;  $P_{эл} = 12945\text{ Н} \cdot \text{м}$ )

Выбрана муфта с тормозным шкивом ( $J_m = 3,75\text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ).

Число включений в час: 10-12.

Длительность рабочего цикла: 120 с.

Выбрана соединительная муфта 2-16000-90-2-110-2У2 ГОСТ 5006-83 ( $J_m = 1,15\text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ).

Суммарный момент инерции на быстроходном валу:  $J_{\text{м.быстр}} = 4,35 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

### 3. РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ЗВЕНА ПОСТОЯННОГО ТОКА ГРУППОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

На основании расчёта, приведенного в Приложении 1, были получены данные для построения группы тахограмм для механизма подъема и перемещения тележки. Электроприводы подъема крана и передвижения тележки имеют различные значения относительной загруженности (работают со стандартизированными значениями нагрузки). Ниже приведены графики загруженности механизмов подъема и перемещения тележки крана для среднего режима работы:

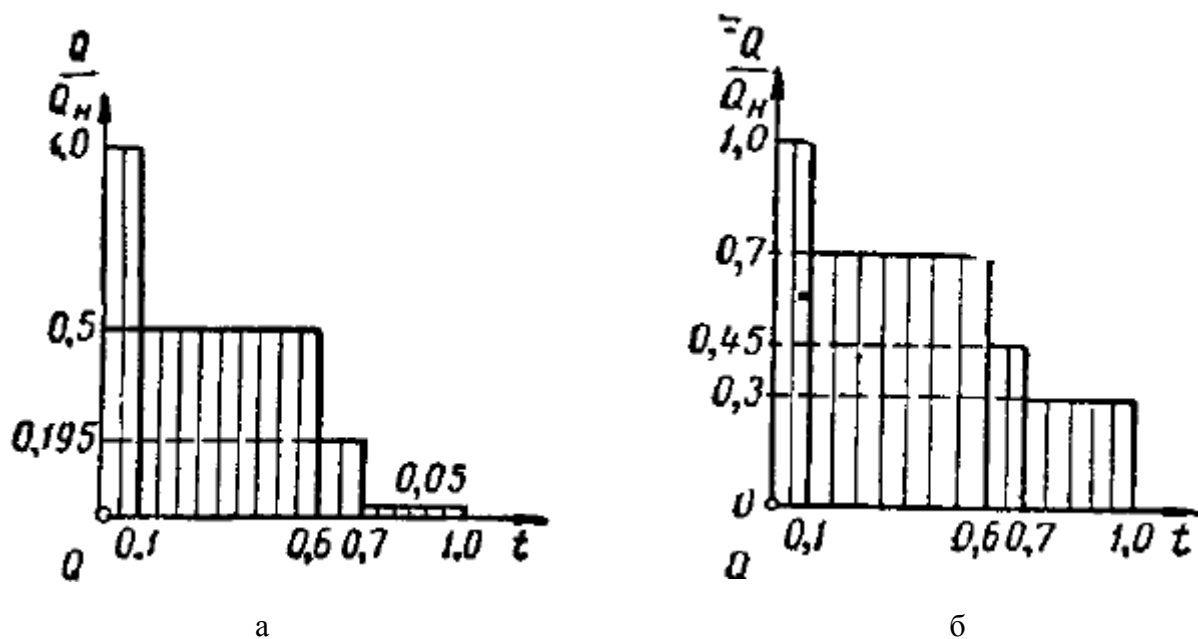


Рис. 3.1. Графики загруженности механизмов подъема крана (а) и перемещения тележки крана (б).

Для понимания возможных конфигураций электрооборудования мостового крана целесообразно привести расчетные типовые тахограммы для механизмов подъема и передвижения тележки крана. Расчетные данные, для удобства восприятия, сведены в таблицы.

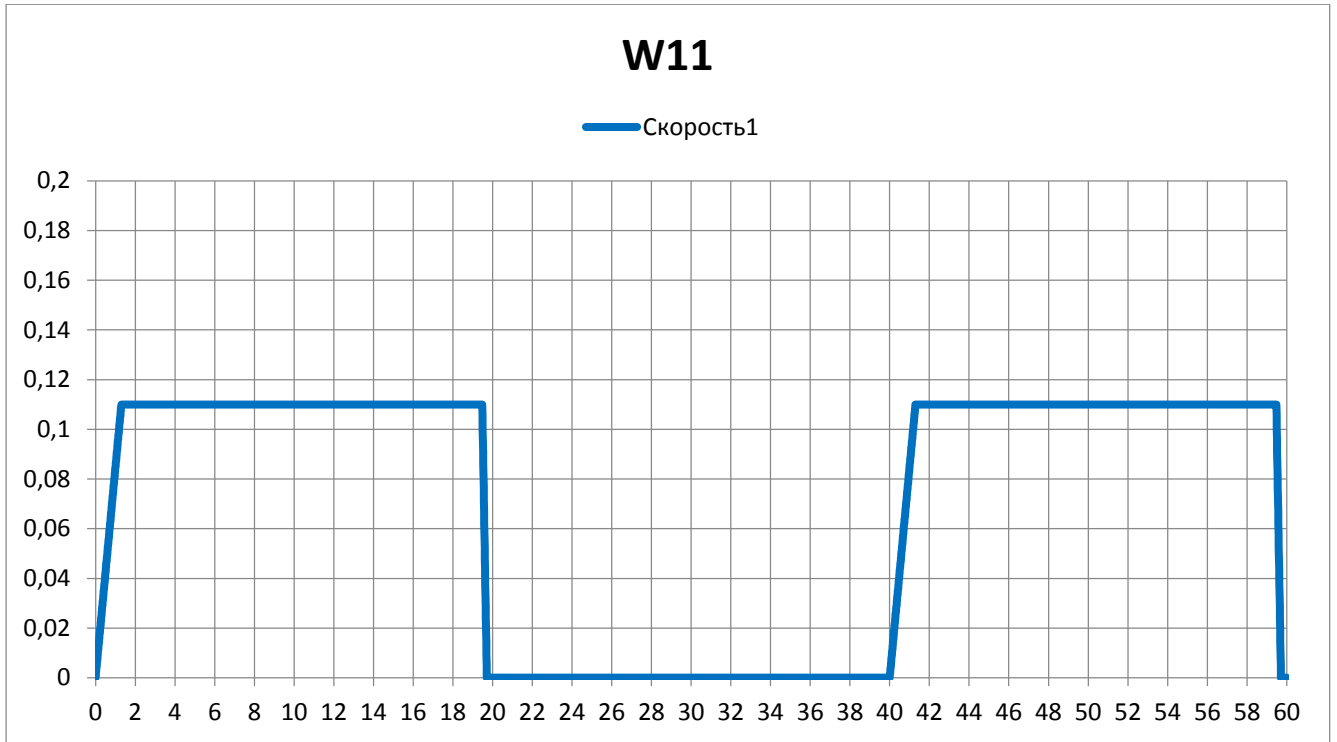


Рис.3.2. Тахограмма привода подъема крана при относительной загрузенности, равной 100%.

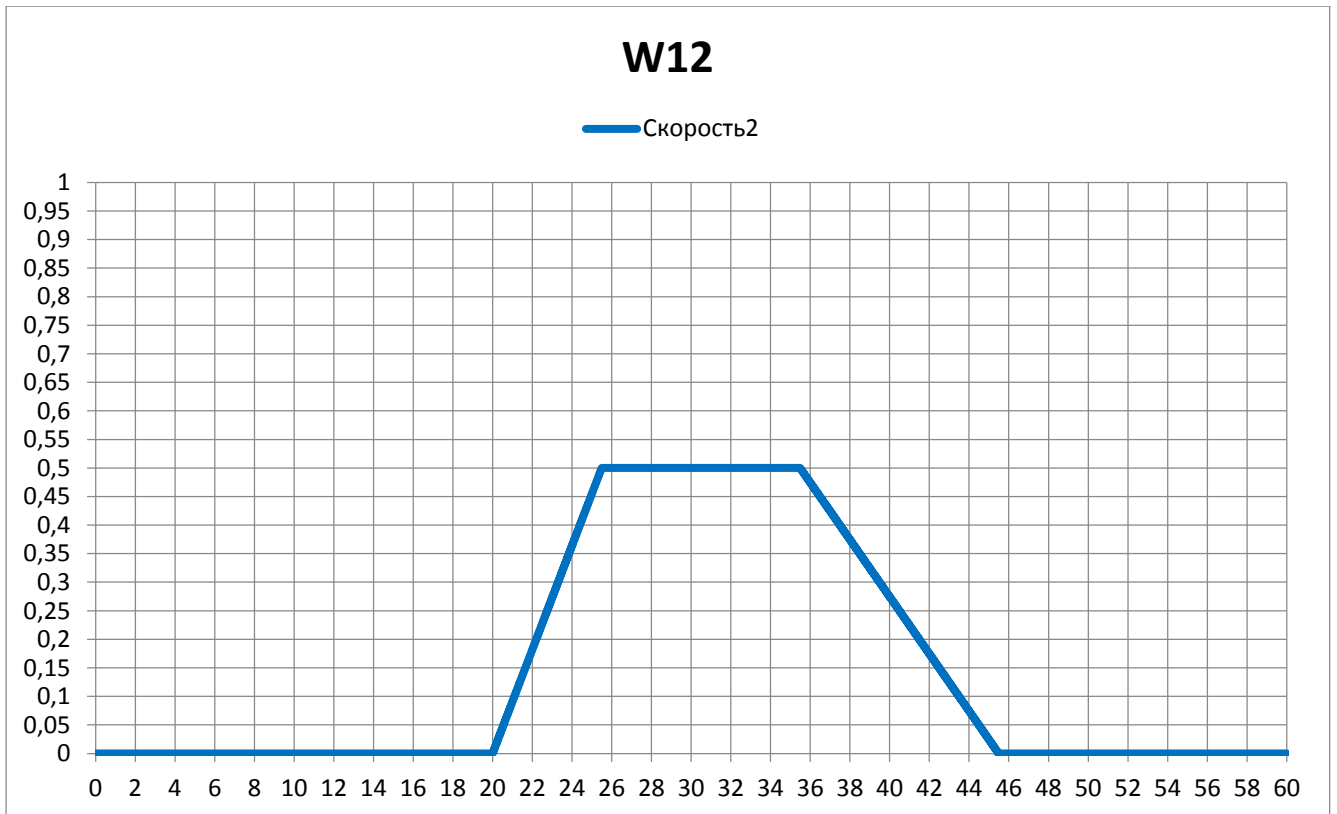


Рис.3.3. Тахограмма привода передвижения тележки крана при относительной загрузенности, равной 100%.

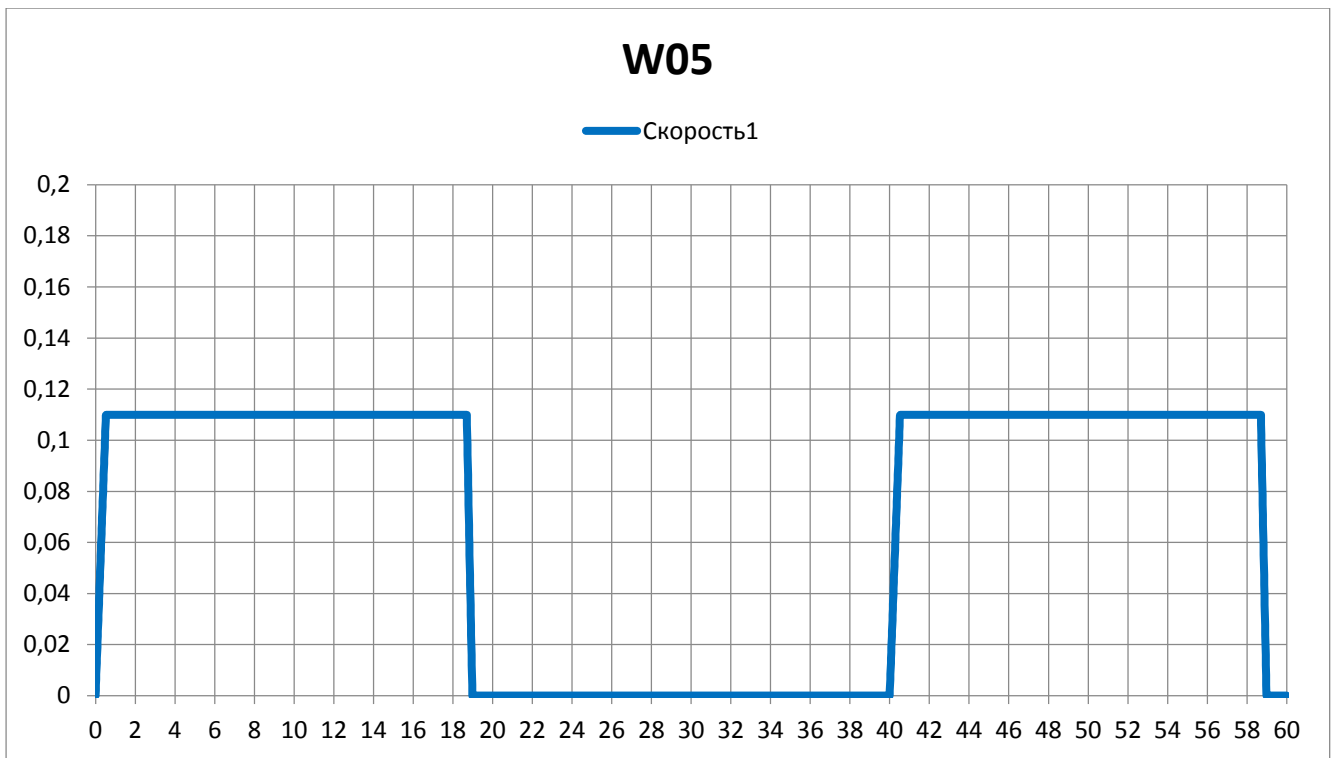


Рис.3.4. Тахограмма привода подъема крана при относительной загрузенности, равной 50%.

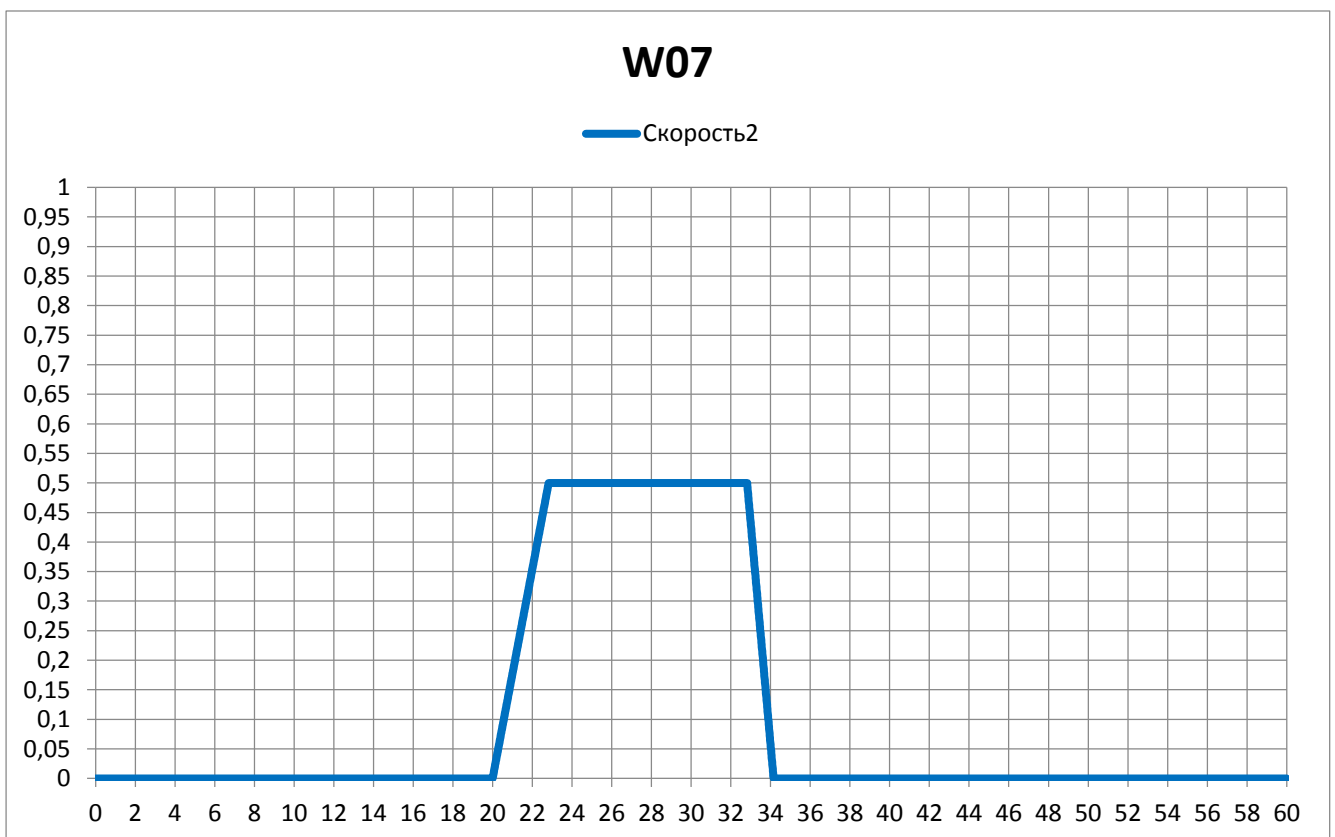


Рис.3.5. Тахограмма привода передвижения тележки крана при относительной загрузенности, равной 70%.

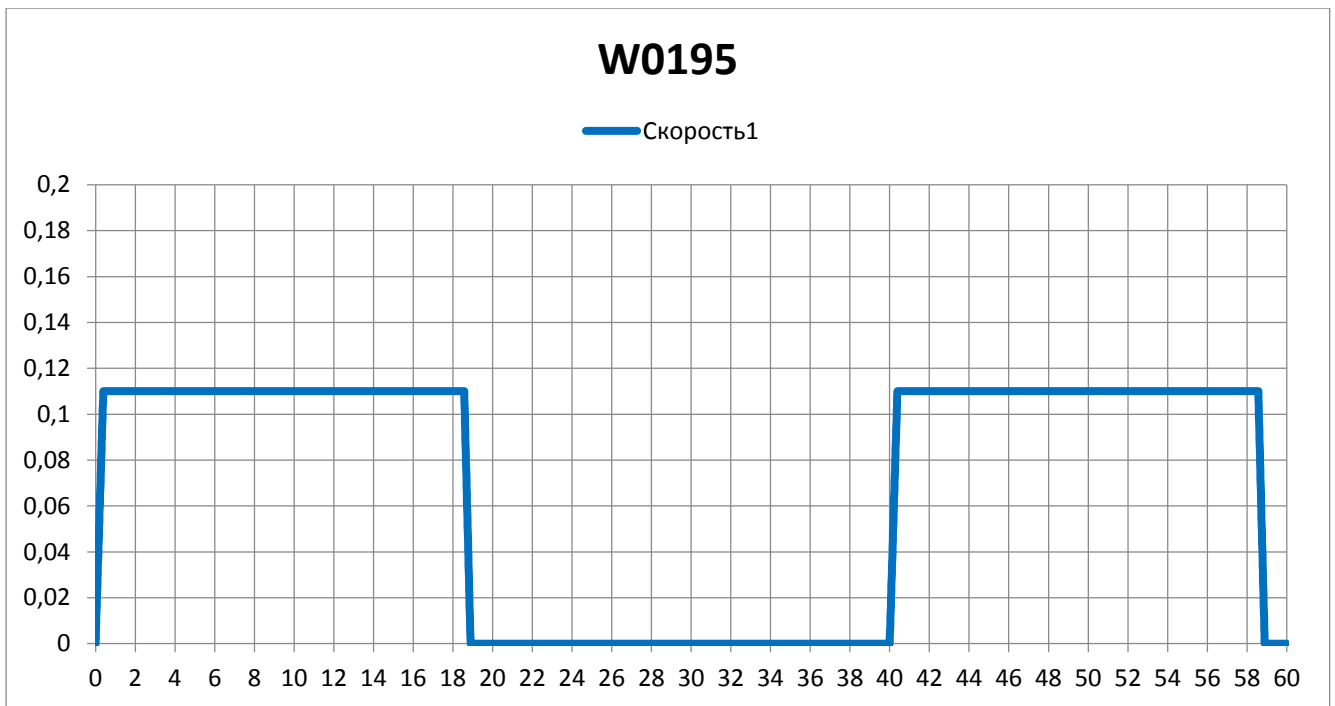


Рис.3.6. Тахограмма привода подъема крана при относительной загрузке, равной 19.5%.

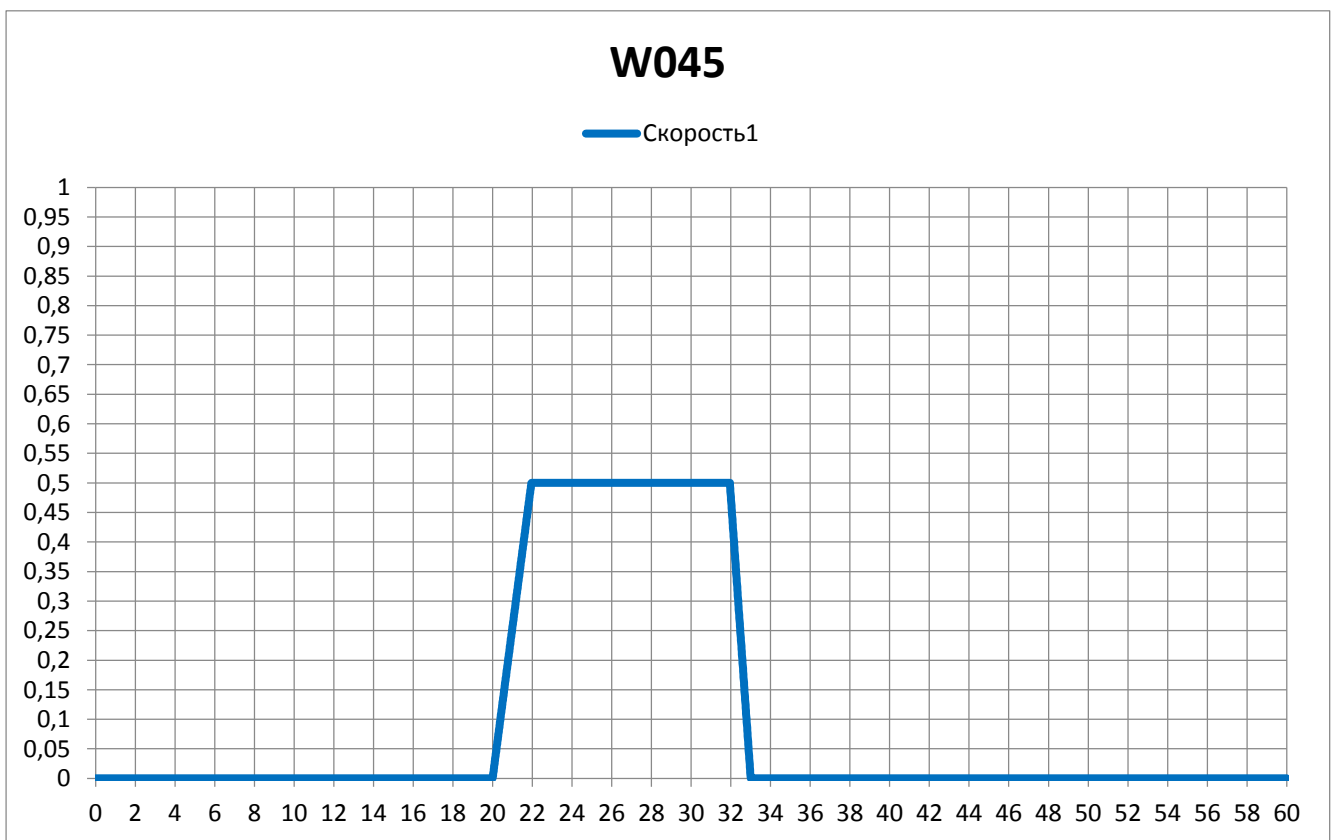


Рис.3.7. Тахограмма привода передвижения тележки крана при относительной загрузке, равной 45%.



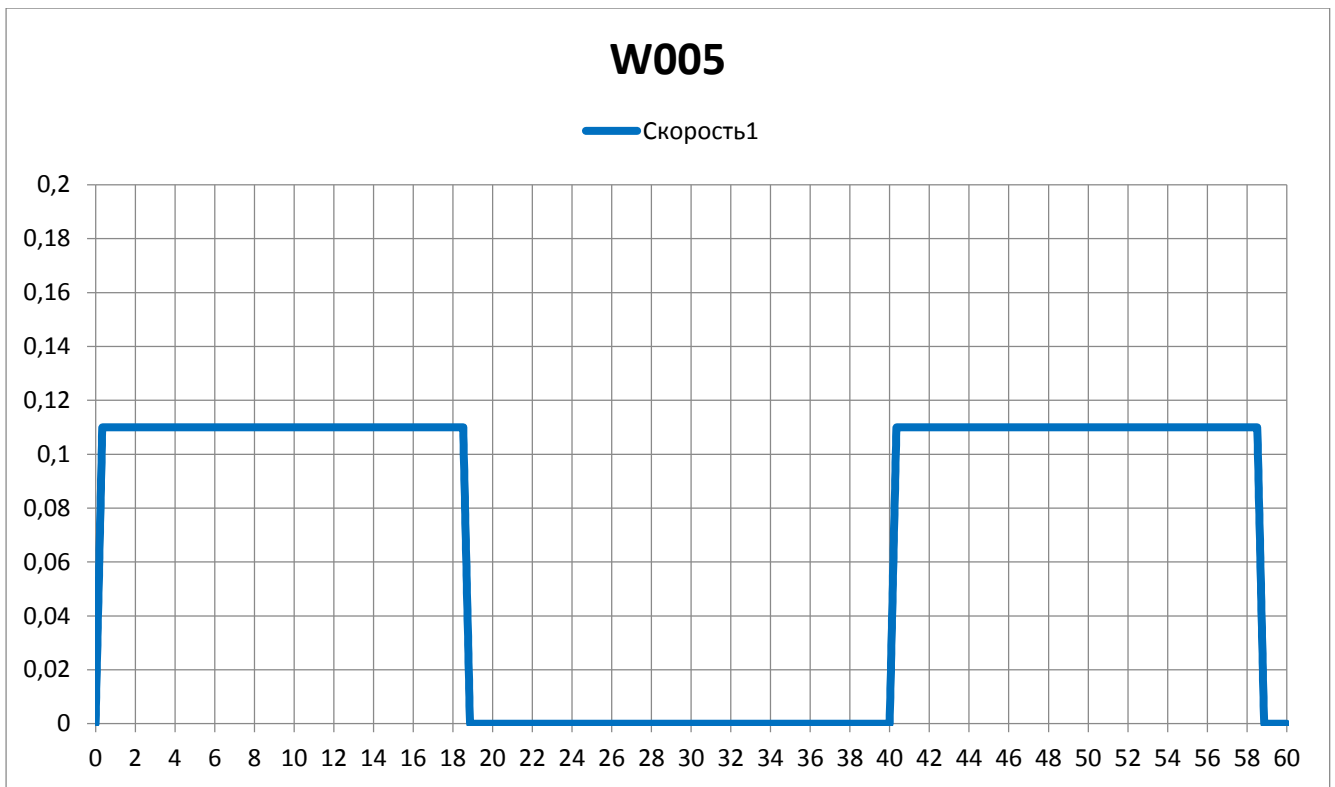


Рис.3.8. Тахограмма привода подъема крана при относительной загрузке, равной 5%.

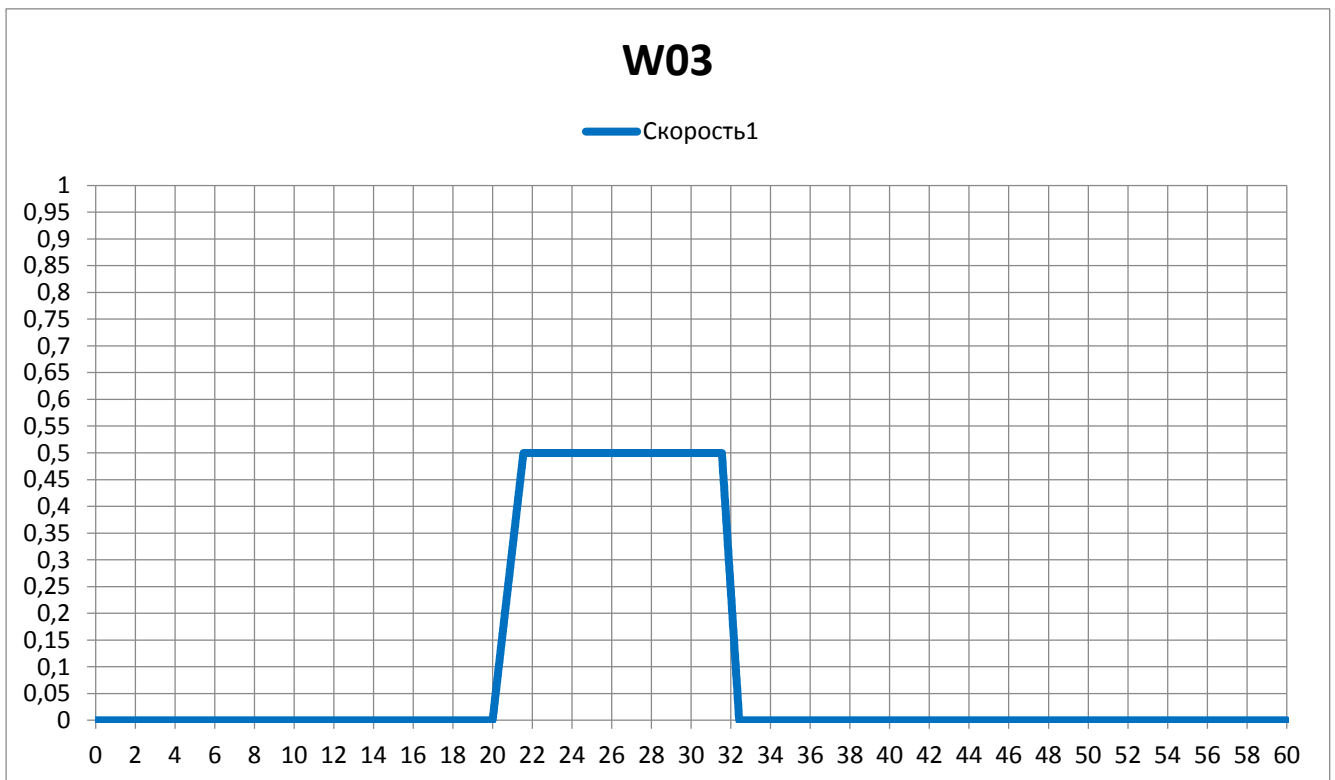


Рис.3.9. Тахограмма привода передвижения тележки крана при относительной загрузке, равной 30%.

## ВЫВОДЫ

Согласно рекомендациям производителей статических преобразователей, целесообразно не допускать существенных перенапряжений на фильтрующем конденсаторе (максимальное пиковое напряжение на конденсаторе не должно превышать 780 вольт). Для недопущения выхода из строя дорогостоящей преобразовательной техники и повышения её энергоэффективности рекомендуется применять тормозной резистор. В случае если суммарная энергия маховых масс является существенной величиной, необходимо рассмотреть вариант применения рекуперативного выпрямителя.

Рассматривая периоды разгона, установившегося движения и торможения можно более детально изучить итоговые мощности и энергии, циркулирующие в системе группового привода, определить графики изменения напряжения на шине постоянного тока, и, зная величину превышения напряжения, которую можно использовать для оценки накапливаемой в емкости энергии, сформировать группу критериев, характеризующих необходимость применения устройств рекуперации энергии или тормозных резисторов.

В данной работе был выполнен подробный аналитический обзор, расчет параметров группового частотно-регулируемого электропривода мостового крана (для уменьшения объема расчетов было решено отказаться от электропривода передвижения крана), сформированы сводные таблицы параметров, необходимых для построения расчетных тахограмм. Построены тахограммы для всех стандартных значений относительной загруженности, рассчитаны статические и приводные моменты. Согласно этим данным является возможным произвести подробную оценку целесообразности применения устройств рекуперации энергии.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Шрейнер Р.Т. Электромеханические и тепловые режимы асинхронных двигателей в системах частного управления [Текст] : учеб. пособие / Р.Т. Шрейнер, А.В.Костылев, В.К.Кривовяз, С.И. Шилин; под ред. проф. д.т.н. Р.Т. Шрейнера. Екатеринбург: ГОУ ВПО «Рос. гос. проф. пед. Ун-т», 2008. - 361 с.
2. Шевырева Н.Ю. Повышение качества электроэнергии буровых установок с частотно регулируемым электроприводом.
3. Мощный регулируемый электропривод переменного тока с внешними устройствами . Беляев.Д.В., Вейгер А.М.; Rockwell Automation, Москва.
4. Электромагнитная совместимость преобразователей частоты с системой электроснабжения промышленных предприятий административно-бытового комплекса. Фигаро Б.И., Павляик Л.Б., Медведев К.М. Беларусь, г. Минск Белорусский Национальный технический университет.
5. Компенсация реактивной мощности в сети с помощью активного выпрямителя напряжения. Радионов А.А., Маклаков А.С., Россия г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет.
6. Особенности исполнения преобразователей частоты с питание от двух вводов. Храмшин Т.Р., канд. ех. наук, Корнилов Г.П., д-р тех.наук, Храмшин Р.Р., канд.тех.наук, Галлямов Р.Р., зам. гл. инженера. VIII Международная конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2014.
7. Оценка технико-экономической эффективности внедрения частотно-регулируемых электроприводов с емкостными накопителями энергии в крановых механизмах. Браславский И.Я., Плотников Ю.В., Ишматов З.Ш., Полунин Ф.А.
8. Энергосберегающий асинхронный электропривод. Браславский И.Я., Плотников Ю.В., Ишматов З.Ш./ АСАДЕМА-М., 2004.-202с.
9. Метод. указания: Транспортно-технологические машины. Сост. Ремизович Ю.В. Россия, г. Омск «Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия»
10. Абдулаева О.В. Выбор и обоснование основных параметров механизмов передвижения мостовых кранов. Россия г.Омск «Сибирская государственная автомобильная –академия » .

11. Частотно-регулируемый электропривод грузоподъемных кранов. Попов Е.В., канд. тех. наук, Онищенко Г.Б., д-р тех. наук. Россия, г. Москва «МГОУ».
12. Силовые полупроводниковые преобразователи для питания синхронных реактивных электроприводов и обеспечение электробезопасности персонала, обслуживающего эти установки: монография / Григорьев М.А., Бычков А.Е., Белоусов Е.В. и др. Россия г. Челябинск «ЮУрГУ», 2014. - 99с.
13. Маклаков А.С. Энергосберегающий электропривод на базе двухзвенного преобразователя частоты с активным выпрямителем и автономным инвертором напряжения/ Российский Электротехнический Интернет-журнал. – 201.- №1.-С.23-30.
14. Курсовое проектирование грузоподъемных машин: учеб. пособие для студентов машиностроительных спец. вузов /Казак С.А., Дусье В.Е., Кузнецов Е.С., и др.: Под ред. Казака С.А. - М.: Высш. шк.,1989.-319с.: ил.
15. ГОСТ 13109-97. Электрическая Энергия. Совместимость технических средств.
16. ОСТ 24.090.85-88. Электроприводы кранов грузоподъемных. Нормы расчета.
17. ГОСТ 25546-82. Краны грузоподъемные. Режимы работы.
18. Расчет и выбор электрооборудования грузоподъемных машин. Сорокин П.А., Мишин А.В. Россия, г. Москва «Московский государственный университет путей сообщения».
19. ГОСТ 25835-83. Краны грузоподъемные. Классификация механизмов по режимам работы.
20. РД 10-112-3-97. Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы.
21. МЭК 61000-3-12:2004.
22. МЭК61800-3:2012.

# Распечатка

24 января 2018 г.

8:36

## Приложение 1:

$$Q_n := 80000$$

$$v_{podn} := 0.1$$

$$v_{pertn} := 0.5$$

$$v_{perk1} := 1.0$$

Механизм подъема груза:

$$G_{nom} := 820600$$

$$N_{dvpod} := 90000$$

$$DT_{dvpod} := 25$$

$$n_{dvpod} := 570$$

$$J_{rdvpod} := 6.25$$

$$m_{dvpod} := 1240$$

$$n_{barpod} := 8.49$$

$$u_{ltrpod} := 65.9$$

$$u_{otpod} := 4$$

$$u_{trpod} := 16.5$$

$$k_{pod} := 0.25$$

$$u_{tpod} := 33.9$$

$$T_{rpod} := 25030$$

$$k_{dpod} := 0.64$$

$$T_{repod} := k_{dpod} \cdot T_{rpod} \rightarrow 16019.2$$

$$u_{mehpod} := 243.36$$

$$w_{dvpod} := 59.69$$

$$v_{pod} := 0.11$$

$$r_{barpod} := 0.45$$

$$\eta_{sumpod} := 0.89$$

$$T_{trnompod} := \frac{G_{nom} \cdot r_{barpod} \cdot \eta_{sumpod}}{u_{mehpod}} \rightarrow 1350.4696745562130178$$

$$T_{trpod} := 1.75 \cdot T_{trnompod} \rightarrow 2363.3219304733727811$$

$$T_{trmpod} := 2500$$

$$m_{torpod} := 400$$

$$J_{mbustrpod} := 4.35$$

Механизм передвижения тележки:

Ggr := 784500

Gtel := 0.35·Ggr → 274575.0

Pstmaxpert := (Ggr + Gtel)· $\frac{1.1}{4}$  → 291245.625

Pstminpert := Gtel· $\frac{0.9}{4}$  → 61779.375

Wtr := 11940

Wuklt := 2120

mtel :=  $\frac{Gtel}{9.81}$  → 27989.296636085626911

mpost := mtel - 3675 → 24314.296636085626911

arasgr := 0.05

Win := 1.25·mpost·arasgr → 1519.6435397553516819

Wgib := (80000 + 3675)·arasgr → 4183.75

Wsum := Wtr + Wuklt + Win + Wgib → 19763.393539755351682

Ndvpert := 8200

DTdvpert := 25

ndvpert := 900

Jrdvpert := 0.115

mdvpert := 120

nkpert :=  $\frac{30}{3.14 \cdot 0.63}$  → 15.165301789505611162

upert :=  $\frac{ndvpert}{nkpert}$  → 59.34599999999999999999999

ntpert := nkpert → 15.165301789505611162

utpert := 5

urpert := 63

urpert := 0.94

wdvpert :=  $\frac{3.14 \cdot ndvpert}{30}$  → 94.2

Tdvnompert :=  $\frac{Ndvpert}{wdvpert}$  → 87.048832271762208068

ψpmaxpert := 2.0

Trpmaxpert := ψpmaxpert·Tdvnompert → 174.09766454352441614



$$Trpert := T_{pmaxpert} \cdot urpert \cdot \eta_{rpert} \rightarrow 10310.063694267515924$$

$$Trepert := 0.63 \cdot Trpert \rightarrow 6495.3401273885350321$$

$$rk := 0.315$$

$$vpert := \frac{wdvpert \cdot rk}{urpert} \rightarrow 0.471$$

$$Jmbpert := 0.06$$

$$Jmtpert := 2.25$$

$$Wukl0 := 0.002 \cdot Gtel \rightarrow 549.15$$

$$Win0 := 1.25 \cdot mtel \cdot arasgr \rightarrow 1749.3310397553516819$$

$$Wtr0 := 1550$$

$$Ty0 := \frac{550 \cdot rk \cdot \eta_{rpert}}{urpert} \rightarrow 2.585$$

$$Tin0 := \frac{1750 \cdot rk \cdot \eta_{rpert}}{urpert} \rightarrow 8.225$$

$$Ttr0 := \frac{1550 \cdot rk}{urpert \cdot \eta_{rpert}} \rightarrow 8.2446808510638297872$$

$$Ttrmehpert := Ty0 + Tin0 - Ttr0 \rightarrow 2.5653191489361702128$$

$$Ttrpert := Ttrmehpert \rightarrow 2.5653191489361702128$$

Г Ttrpert := 98%анизма главного подъема на время разгона:

$$Jmpod := 1.15$$

$$mtshpod := 84.5$$

$$rtshpod := 0.25$$

$$etshpod := 0.6$$

$$Jtshpod := mtshpod \cdot rtshpod^2 \cdot etshpod \rightarrow 3.16875$$

$$Jb1 := Jrdvpod + Jmpod + Jtshpod \rightarrow 10.56875$$

$$Jvr1 := 1.15 \cdot Jb1 \rightarrow 12.1540625$$

$$mpostpod := 3675 + Qn \rightarrow 83675$$

$$Jpostrpod := \frac{mpostpod \cdot 0.63^2}{341.92^2 \cdot 0.86} \rightarrow 0.33031580855767056559$$

$$Jmehrpod := Jvr1 + Jpostrpod \rightarrow 12.4843783085576705656$$

$$Tstrpod := \frac{Gnom \cdot 0.63}{341.92 \cdot 0.86} \rightarrow 1758.1223950114809938$$

$$T_{\text{dvnompod}} := \frac{90000}{\text{wdvpod}} \rightarrow 1507.7902496230524376$$

$$T_{\text{psrpod}} := 1.55 \cdot T_{\text{dvnompod}} \rightarrow 2337.0748869157312783$$

$$\text{trfactpod} := \frac{\text{wdvpod} \cdot J_{\text{mehrpod}}}{T_{\text{psrpod}} - T_{\text{strpod}}} \rightarrow 1.28713936231066535216$$

$$\text{apod} := \frac{\text{vpod}}{\text{trfactpod}} \rightarrow 0.0854608313761212445344$$

$$\eta_{\text{mehpod}} := 0.86$$

$$N_{\text{stmaxpod}} := \frac{G_{\text{nom}} \cdot \text{vpod}}{\eta_{\text{mehpod}}} \rightarrow 104960.46511627906977$$

$$G_{1\text{pod}} := 820600$$

$$G_{05\text{pod}} := 410300$$

$$G_{0195\text{pod}} := 160000$$

$$G_{005\text{pod}} := 41000$$

$$\eta_{\text{meh1pod}} := 0.86$$

$$\eta_{\text{meh05pod}} := 0.82$$

$$\eta_{\text{meh0195pod}} := 0.66$$

$$\eta_{\text{meh005pod}} := 0.38$$

$$T_{\text{st1pod}} := \frac{G_{1\text{pod}} \cdot r_{\text{barpod}}}{\text{umehpod} \cdot \eta_{\text{meh1pod}}} \rightarrow 1764.397275354341544$$

$$T_{\text{st1op}} := \frac{G_{1\text{pod}} \cdot r_{\text{barpod}} \cdot \eta_{\text{meh1pod}}}{\text{umehpod}} \rightarrow 1304.9482248520710059$$

$$T_{\text{st05pod}} := \frac{G_{05\text{pod}} \cdot r_{\text{barpod}}}{\text{umehpod} \cdot \eta_{\text{meh05pod}}} \rightarrow 925.23271756386202915$$

$$T_{\text{st05op}} := \frac{G_{05\text{pod}} \cdot r_{\text{barpod}} \cdot \eta_{\text{meh05pod}}}{\text{umehpod}} \rightarrow 622.1264792899408284$$

$$T_{\text{st0195pod}} := \frac{G_{0195\text{pod}} \cdot r_{\text{barpod}}}{\text{umehpod} \cdot \eta_{\text{meh0195pod}}} \rightarrow 448.26967903890980814$$

$$T_{\text{st0195op}} := \frac{G_{0195\text{pod}} \cdot r_{\text{barpod}} \cdot \eta_{\text{meh0195pod}}}{\text{umehpod}} \rightarrow 195.26627218934911243$$

$$T_{\text{st005pod}} := \frac{G_{005\text{pod}} \cdot r_{\text{barpod}}}{\text{umehpod} \cdot \eta_{\text{meh005pod}}} \rightarrow 199.50949859856742448$$

$$T_{\text{st005op}} := \frac{G_{005\text{pod}} \cdot r_{\text{barpod}} \cdot \eta_{\text{meh005pod}}}{\text{umehpod}} \rightarrow 28.809171597633136095$$

$$\text{mgr1} := 83675$$

$$\text{mgr2} := 43675$$

$$\text{mgr3} := 19200$$

mgr4 := 7675

$$Jgr1pod := \frac{mgr1 \cdot rbarpod^2}{umehpod^2 \cdot \eta meh1pod} \rightarrow 0.33267786364842935113$$

$$Jgr05pod := \frac{mgr2 \cdot rbarpod^2}{umehpod^2 \cdot \eta meh05pod} \rightarrow 0.18211499045474769022$$

$$Jgr0195pod := \frac{mgr3 \cdot rbarpod^2}{umehpod^2 \cdot \eta meh0195pod} \rightarrow 0.099468124047095371629$$

$$Jgr005pod := \frac{mgr4 \cdot rbarpod^2}{umehpod^2 \cdot \eta meh005pod} \rightarrow 0.069059180696348904192$$

$$Jmehr1pod := Jvr1 + Jgr1pod \rightarrow 12.4867403636484293511$$

$$Jmehr05pod := Jvr1 + Jgr05pod \rightarrow 12.3361774904547476902$$

$$Jmehr0195pod := Jvr1 + Jgr0195pod \rightarrow 12.25353062404709537163$$

$$Jmehr005pod := Jvr1 + Jgr005pod \rightarrow 12.22312168069634890419$$

$$tr1pod := \frac{wdvpod \cdot Jmehr1pod}{Ttrpod - Tst1pod} \rightarrow 1.24445291396134957594$$

$$tt1pod := \frac{wdvpod \cdot Jmehr1pod}{Ttrpod + Tst1pod} \rightarrow 0.180567886316946339331$$

$$tr05pod := \frac{wdvpod \cdot Jmehr05pod}{Ttrpod - Tst05pod} \rightarrow 0.512031122822682073018$$

$$tt05pod := \frac{wdvpod \cdot Jmehr05pod}{Ttrpod + Tst05pod} \rightarrow 0.223911874125227118164$$

$$tr0195pod := \frac{wdvpod \cdot Jmehr0195pod}{Ttrpod - Tst0195pod} \rightarrow 0.3819286092071423505523$$

$$tt0195pod := \frac{wdvpod \cdot Jmehr0195pod}{Ttrpod + Tst0195pod} \rightarrow 0.2601420634756578094822$$

$$tr005pod := \frac{wdvpod \cdot Jmehr005pod}{Ttrpod - Tst005pod} \rightarrow 0.3371817826596988602255$$

Hsr := 2

vop := 0.12

$$tustrpod := \frac{Hsr}{vpod} \rightarrow 18.1818181818181818$$

$$tusttpod := \frac{Hsr}{vop} \rightarrow 16.6666666666666667$$

Проверка двигателя механизма передвижения тележки:

$\eta meh1pert := 0.89$

$$\eta_{\text{meh07pert}} := 0.88$$

$$\eta_{\text{meh045pert}} := 0.84$$

$$\eta_{\text{meh03pert}} := 0.80$$

$$\frac{G_{\text{1pod-rbarpod}}}{\text{umehpod} \cdot \eta_{\text{meh1pod}}}$$

$$J_{\text{tshpert}} := 0.026$$

$$J_{\text{1pert}} := J_{\text{tshpert}} + J_{\text{rdvpert}} + J_{\text{mbpert}} \rightarrow 0.201$$

$$J_{\text{vrpert}} := 1.15 \cdot J_{\text{1pert}} \rightarrow 0.23115$$

$$G_{\text{1pert}} := 1058000$$

$$G_{\text{07pert}} := 823900$$

$$G_{\text{045pert}} := 627700$$

$$G_{\text{03pert}} := 510100$$

$$m_{\text{1pert}} := \frac{G_{\text{1pert}}}{9.81} \rightarrow 107849.1335372069317$$

$$m_{\text{07pert}} := \frac{G_{\text{07pert}}}{9.81} \rightarrow 83985.728848114169215$$

$$m_{\text{045pert}} := \frac{G_{\text{045pert}}}{9.81} \rightarrow 63985.728848114169215$$

$$m_{\text{03pert}} := \frac{G_{\text{03pert}}}{9.81} \rightarrow 51997.961264016309888$$

$$J_{\text{postr1pert}} := \frac{m_{\text{1pert}} \cdot r_{\text{k}}^2}{\text{urpert}^2 \cdot \eta_{\text{meh1pert}}} \rightarrow 3.0294700431799699916$$

$$J_{\text{postr07pert}} := \frac{m_{\text{07pert}} \cdot r_{\text{k}}^2}{\text{urpert}^2 \cdot \eta_{\text{meh07pert}}} \rightarrow 2.3859582059123343527$$

$$J_{\text{postr045pert}} := \frac{m_{\text{045pert}} \cdot r_{\text{k}}^2}{\text{urpert}^2 \cdot \eta_{\text{meh045pert}}} \rightarrow 1.9043371680986359885$$

$$J_{\text{postr03pert}} := \frac{m_{\text{03pert}} \cdot r_{\text{k}}^2}{\text{urpert}^2 \cdot \eta_{\text{meh03pert}}} \rightarrow 1.624936289500509684$$

$$J_{\text{mehr1pert}} := J_{\text{vrpert}} + J_{\text{postr1pert}} \rightarrow 3.2606200431799699916$$

$$J_{\text{mehr07pert}} := J_{\text{vrpert}} + J_{\text{postr07pert}} \rightarrow 2.6171082059123343527$$

$$J_{\text{mehr045pert}} := J_{\text{vrpert}} + J_{\text{postr045pert}} \rightarrow 2.1354871680986359885$$

$$J_{\text{mehr03pert}} := J_{\text{vrpert}} + J_{\text{postr03pert}} \rightarrow 1.856086289500509684$$

$$T_{\text{dvpert}} := 87$$

$$T_{\text{psrpert}} := 1.55 \cdot T_{\text{dvpert}} \rightarrow 134.85$$

$$Wstr1pert := 14050$$

$$Wint := 2120$$

$$Wstr1pert1 := Wstr1pert - Wint \rightarrow 11930$$

$$Wstr07pert := Wstr1pert1 \cdot 0.7 \rightarrow 8351.0$$

$$Wstr045pert := Wstr1pert1 \cdot 0.45 \rightarrow 5368.5$$

$$Wstr03pert := Wstr1pert1 \cdot 0.3 \rightarrow 3579.0$$

$$Tstr1pert := \frac{Wstr1pert \cdot rk}{urpert \cdot \eta_{meh1pert}} \rightarrow 78.932584269662921348$$

$$Tstr07pert := \frac{Wstr07pert \cdot rk}{urpert \cdot \eta_{meh07pert}} \rightarrow 47.448863636363636364$$

$$Tstr045pert := \frac{Wstr045pert \cdot rk}{urpert \cdot \eta_{meh045pert}} \rightarrow 31.955357142857142857$$

$$Tstr03pert := \frac{Wstr03pert \cdot rk}{urpert \cdot \eta_{meh03pert}} \rightarrow 22.36875$$

$$Jpostt1pert := \frac{m1pert \cdot rk^2 \cdot \eta_{meh1pert}}{urpert^2} \rightarrow 2.3996432212028542303$$

$$Jpostt07pert := \frac{m07pert \cdot rk^2 \cdot \eta_{meh07pert}}{urpert^2} \rightarrow 1.8476860346585117227$$

$$Jpostt045pert := \frac{m045pert \cdot rk^2 \cdot \eta_{meh045pert}}{urpert^2} \rightarrow 1.3437003058103975535$$

$$Jpostt03pert := \frac{m03pert \cdot rk^2 \cdot \eta_{meh03pert}}{urpert^2} \rightarrow 1.0399592252803261978$$

$$Jmeht1pert := Jvrpert + Jpostt1pert \rightarrow 2.6307932212028542303$$

$$Jmeht07pert := Jvrpert + Jpostt07pert \rightarrow 2.0788360346585117227$$

$$Jmeht045pert := Jvrpert + Jpostt045pert \rightarrow 1.5748503058103975535$$

$$Jmeht03pert := Jvrpert + Jpostt03pert \rightarrow 1.2711092252803261978$$

$$Wgr1 := (G1pert) \cdot 0.005 \rightarrow 5290.0$$

$$Wgr07 := (G07pert) \cdot 0.005 \rightarrow 4119.5$$

$$Wgr045 := (G045pert) \cdot 0.005 \rightarrow 3138.5$$

$$Wgr03 := (G03pert) \cdot 0.005 \rightarrow 2550.5$$

$$Wy := 2120$$

$$Wstt1pert := Wgr1 - Wy \rightarrow 3170.0$$

$$Wstt07pert := Wgr07 - Wy \rightarrow 1999.5$$

$$Wstt045pert := Wgr045 - Wy \rightarrow 1018.5$$

$$Wstt03pert := Wgr03 - Wy \rightarrow 430.5$$

$$Tstt1pert := \frac{Wstt1pert \cdot rk}{urpert \cdot \eta_{meh1pert}} \rightarrow 17.80898876404494382$$

$$Tstt07pert := \frac{Wstt07pert \cdot rk}{urpert \cdot \eta_{meh07pert}} \rightarrow 11.360795454545454545$$

$$Tstt045pert := \frac{Wstt045pert \cdot rk}{urpert \cdot \eta_{meh045pert}} \rightarrow 6.0625$$

$$Tstt03pert := \frac{Wstt03pert \cdot rk}{urpert \cdot \eta_{meh03pert}} \rightarrow 2.690625$$

$$tr1factpert := \frac{wdvpert \cdot J_{mehr1pert}}{Tpsrpert - Tstr1pert} \rightarrow 5.4929292431680412357$$

$$tr07factpert := \frac{wdvpert \cdot J_{mehr07pert}}{Tpsrpert - Tstr07pert} \rightarrow 2.8206909343974213527$$

$$tr045factpert := \frac{wdvpert \cdot J_{mehr045pert}}{Tpsrpert - Tstr045pert} \rightarrow 1.9550375573408869278$$

$$tr03factpert := \frac{wdvpert \cdot J_{mehr03pert}}{Tpsrpert - Tstr03pert} \rightarrow 1.5544219900734390152$$

$$tt1factpert := \frac{wdvpert \cdot J_{meht1pert}}{Tpsrpert + Tstt1pert} \rightarrow 1.6233614767378632184$$

$$tt07factpert := \frac{wdvpert \cdot J_{meht07pert}}{Tpsrpert + Tstt07pert} \rightarrow 1.339342651519264976$$

$$tt045factpert := \frac{wdvpert \cdot J_{meht045pert}}{Tpsrpert + Tstt045pert} \rightarrow 1.0527873595837093909$$

$$tt03factpert := \frac{wdvpert \cdot J_{meht03pert}}{Tpsrpert + Tstt03pert} \rightarrow 0.87056816138073189527$$