

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Інститут Електроенергетики
(інститут)

Електротехнічний факультет
(факультет)

Кафедра електропривода
(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеню _____ магістра _____
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студента _____ Раджабов Йормад Ятимович _____
(ПІБ)

академічної групи _____ 141М-17-4 _____
(шифр)

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

спеціалізації¹ _____

за освітньо-професійною програмою Електромеханічні системи автоматизації та електропривод
(офіційна назва)

на тему Частотно-регульований електропривод підкачки водопостачання житлового комплексу
(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи				
розділів:				
	<i>Азюковський О.О.</i>			
	<i>Тимошенко Л.В.</i>			
Рецензент				
Нормоконтролер	<i>Казачковський М.М.</i>			

Дніпро
2018

ЗАТВЕРДЖЕНО:
завідувач кафедри
електропривода
(повна назва)

_____ Казачковський М.М.
(підпис) (прізвище, ініціали)

« 01 » вересня 2018 року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
ступеня _____ магістра _____
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студенту _____ Раджабов Й.Я. _____ академічної групи _____ 141М-17-4 _____
(прізвище та ініціали) (шифр)
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

спеціалізації¹ _____
за освітньо-професійною програмою Електромеханічні системи автоматизації та електропривод
(офіційна назва)

на тему Частотно-регульований електропривод підкачки водопостачання
ЖИТЛОВОГО
КОМПЛЕКСУ

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 12.11.2018 № 1913-л

Розділ	Зміст	Термін виконання
Технологическая часть	Технічні вимоги до системи автоматизації	22.10.18 – 4.11.18
Автоматизированный электропривод	Розрахунок потужності і вибір електродвигуна насосної установки	5.11.18 – 18.11.18
Динамика электропривода	Динамічна модель асинхронного коротко замкнутого електродвигуна	12.11.18 – 3.12.18
Технико-экономическое обоснование	Розрахунок основних техніко-економічних показників впровадження дипломного проекту	04.12.18 – 09.12.18

Завдання видано

_____ (підпис керівника)

_____ Азюковський О.О.
(прізвище, ініціали)

Дата видачі 15 жовтня 2018

Дата подання до екзаменаційної комісії _____ 26.12.2018 р.

Прийнято до виконання

_____ (підпис студента)

_____ Раджабов Й.Я.
(прізвище, ініціали)

Реферат

Дипломний проект містить: 61 сторінок; 12 малюнків; 8 таблиць;

Дипломна робота на тему: «Частотно-регульований електропривод підкачка водопостачання житлового комплексу»

Розрахункова частина складається з 4 розділів Технологічна частина Автоматизований електропривод, Динамічний електропривод, Техніко-економічне. Описані основні технічні дані Завдання даної системи управління - підтримка постійного заданого напору у водопровідній магістралі житлового комплексу, забезпечення відпрацювання добової діаграми напорів, забезпечення енергозберігаючого управління напором, забезпечення захисту від перевищення і зниження тиску у водопровідній мережі. Відповідно до вихідних даних зроблений вибір двигуна і перетворювального пристрою, розрахована система електропостачання насосної станції, розроблена структурна схема системи управління, визначені параметри динамічних ланок. Синтезований ПІД-регулятор напору. Дослідження динамічних режимів системи управління виконано за допомогою моделювання на ЕОМ. Проведено економічний аналіз ефективності впровадження частотного приводу насосної установки.

ЕЛЕКТРОПРИВІД, НАСОСНА ВСТАНОВЛЕННЯ, АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОДВИГУН, ЧАСТОТНОГО РЕГУЛЮВАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ, ПІД- РЕГУЛЯТОР, MATLAB, SIMULINK

Abstract

The thesis project contains: 61 pages; 12 drawings; 8 tables; Thesis on the topic: "Frequency-controlled electric pumping water supply of a residential complex"

The calculation part consists of 4 sections Technological part Automated electric drive Dynamic electric drive Technical and economic describes the main technical data and low pressure in the water supply network. In accordance with the initial data, the engine and converter device were selected, the power supply system of the pumping station was calculated, a block diagram of the control system was developed, and the parameters of the dynamic links were determined. Synthesized PID regulator head. The study of the dynamic modes of the control system was performed using computer simulation. An economic analysis of the effectiveness of the introduction of the frequency drive pumping unit.

ELECTRIC DRIVE, PUMPING INSTALLATION, ASYNCHRONOUS MOTOR, FREQUENCY REGULATION, MODELING, PID-REGULATOR, MATLAB, SIMULINK

Реферат

Дипломный проект содержит: 61 страниц; 16 рисунков; 8 таблиц

Дипломная работа на тему: «Частотно-регулируемый электропривод подкачка водоснабжения жилого комплекса»

Расчетная часть состоит из 4 разделов Технологическая часть, Автоматизированный электропривод, Динамические электропривод, Технико-экономическое. Описаны основные технические данные. Задача данной системы управления – поддержание постоянного заданного напора в водопроводной магистрали жилищного комплекса, обеспечение отработки суточной диаграммы напоров, обеспечение энергосберегающего управления напором, обеспечение защиты от превышения и занижения давления в водопроводной сети. В соответствии с исходными данными произведен выбор двигателя и преобразовательного устройства, рассчитана система электроснабжения насосной станции, разработана структурная схема системы управления, определены параметры динамических звеньев. Синтезирован ПИД-регулятор напора. Исследование динамических режимов системы управления выполнено с помощью моделирования на ЭВМ. Проведен экономический анализ эффективности внедрения частотного привода насосной установки.

ЭЛЕКТРОПРИВОД, НАСОСНАЯ УСТАНОВКА, АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ, ЧАСТОТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПИД - РЕГУЛЯТОР, MATLAB, SIMULINK

Содержание

Введение.....	5
1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	7
1.2 Назначение и виды насосных установок.....	8
1.3 Технические требования к системе автоматизации.....	11
1.4 Аналитический обзор методов управления насосными установками. Регулировка подачи насосов.....	14
1.5 Обоснование выбора системы регулирования привода по системе ПЧ-АД.....	18
Вывод.....	23
2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД.....	24
2.1 Расчет мощности и выбор электродвигателя насосной установки.....	25
2.2 Расчет и выбор преобразовательного устройства.....	28
2.3 Выбор датчика давления.....	30
3. ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	35
3.1 Синтез системы управления.....	36
3.2 Динамическая модель асинхронного короткозамкнутого электродвигателя.....	36
3.3 Расчет параметров схемы замещения электродвигателя.....	39
3.4 Расчет параметров преобразователя частоты.....	41
3.5 Расчет параметров структурной схемы насосной установки.....	42
3.6 Синтез контура регулирования давления.....	44
3.7 Исследование динамики САУ насосной установки.....	46
Вывод.....	50
4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ.....	51
4.1 Введение в раздел.....	53
4.2 Расчет капитальных затрат.....	54
4.3 Расчет эксплуатационных расходов.....	55
4.4 Определение и анализ показателей экономической эффективности.....	55
4.5 Расчет стоимости потребленной электроэнергии.....	56
4.6 Определение годовой экономии от внедрения объекта проектирования.....	57
4.7 Определение и анализ показателей экономической эффективности.....	57
Вывод.....	60
Заключение.....	61
Список используемых источников.....	62

ВВЕДЕНИЕ

Около 60 % затрат электроэнергии в промышленности и коммунальном хозяйстве (ЖКХ) приходится на долю электрооборудования. При этом большая часть этого энергопотребления приходится на приводные системы вентиляторов, компрессоров, насосов и других установок с циклическим режимом нагрузки. Рост цен на энергоносители и ресурсы привел к тому, что доля затрат на них в суммарных расходах на производство стала достаточно большой. Анализ расхода энергоресурсов на многих предприятиях показывает, что решение этой задачи имеет два направления - организационно-технические мероприятия, направленные на исключение бесполезного расходования энергоресурсов, и внедрение энергоэффективных технологий и энергосберегающего оборудования, позволяющих выполнить тот же объем работ при меньших затратах энергии. Электропривод, является основой современного производства и в свою очередь, среди промышленных электроприводов преобладают электроприводы с асинхронными короткозамкнутыми двигателями, потребляющие до 50% энергии потребляемой электроприводом. Эти электроприводы благодаря своей простоте и относительно невысокой стоимости, нашли широкое применение в различных механизмах. Общеизвестны и их недостатки - тяжелый пуск при прямом подключении к сети, сопровождающийся 6-7 кратными токами, и, как следствие, невысокая эксплуатационная надежность, трудность регулирования скорости. Характерным примером использования асинхронных двигателей являются насосные станции холодного и горячего водоснабжения, канализационные насосные станции и системы отопления. Этот тип механизмов потребляет не менее 20-25% всей вырабатываемой электроэнергии. Завышенный уровень потребления электроэнергии является следствием низкого КПД насосных установок и систем водоснабжения в целом. В большинстве случаев электроприводы указанных механизмов являются нерегулируемыми, что не позволяет обеспечить режим

рационального энергопотребления и расхода при изменении технологических потребностей в широких пределах.

С внедрением в производство автоматической системы управления технологическими процессами качественно меняется форма и характер труда, повышается безопасность, квалификация и уровень знаний рабочих.

Целью этого дипломного проекта является детальная разработка электропривода центробежного насоса с использованием современной элементной базы, обеспечивающего выполнение следующих требований:

Разработать электропривод, который позволит осуществить технологические операции с минимальным расходом электроэнергии;

- возможность гибкой настройки привода при меняющихся режимах работы с целью экономии энергии;

Для решения этой задачи требуется:

- ознакомиться с процессом и технологией подачи воды;
- провести аналитический обзор технической литературы по данной проблематике;
- дать технико-экономическое обоснование выбранного принципа управления;
- осуществить выбор элементов электропривода, обеспечивающих работоспособность системы;
- разработать функциональную схему системы автоматического управления;
- провести математическое описание объекта и системы управления;
- осуществить моделирование и исследование системы в различных режимах работы;

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.2. Назначение и виды насосных станций

Насосные станции (НС) представляют собой сложный электрогидравлический технический комплекс сооружений и оборудования, в котором осуществляется преобразование электрической энергии в механическую энергию потока жидкости и управление этим процессом преобразования. Насосные водопроводные станции в зависимости от места, занимаемого в общей системе водоснабжения, подразделяют на станции 1-го, 2-го, 3-го и последующих подъемов. Их назначение показано в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Назначение и виды насосных станций

Объект	Задача
Насосная станция 1-го подъема	Управление глубинными насосами, расположенными в скважинах. Поддержание заданного уровня воды в накопительном резервуаре. Применяются в составе водоподъемных технологических сооружений совместно со станциями управления насосами 2-го и 3-го
Насосная станция 2-го подъема	Создание давления в водопроводной сети, с забором воды из аккумулирующей емкости. Давление создается из расчета обеспечения застройки малой и средней этажности. Поддержание постоянного значения давления согласно суточному или
Насосная станция 3-го подъема и последующих подъемов	Создание и поддержание необходимого давления в трубопроводе с забором воды из станции 2-го подъема для зданий средней и высокой этажности. Поддержание постоянного значения давления или согласно суточному или недельному графику

Основным энергетическим элементом НС является насосная установка, содержащая один или несколько насосов, всасывающую и нагнетательную систему трубопроводов, запорную арматуру, электропривод, а также датчики технологических параметров установки. В качестве основного силового оборудования на НС применяют объемные или динамические насосы.

Объемные насосы работают по принципу вытеснения, когда давление перемещаемой жидкости повышается в результате сжатия. К ним относятся возвратно-поступательные (диафрагменные, поршневые) и роторные (аксиально-поршневые и радиально-поршневые, шиберные, зубчатые, винтовые и т. п.) насосы.

Динамические насосы работают по принципу силового воздействия на перемещаемую среду. К ним относятся лопастные (центробежные (рис.1.2), осевые) нагнетатели и нагнетатели трения (вихревые, дисковые, струйные и т. п.). Преимущественное использование получили насосы центробежного типа.

Основными характеристиками НС являются зависимости выходных подачи и давления жидкости от времени и входной подачи, а также от ряда возмущающих воздействий. Эти зависимости отражают изменение режима работы НС.

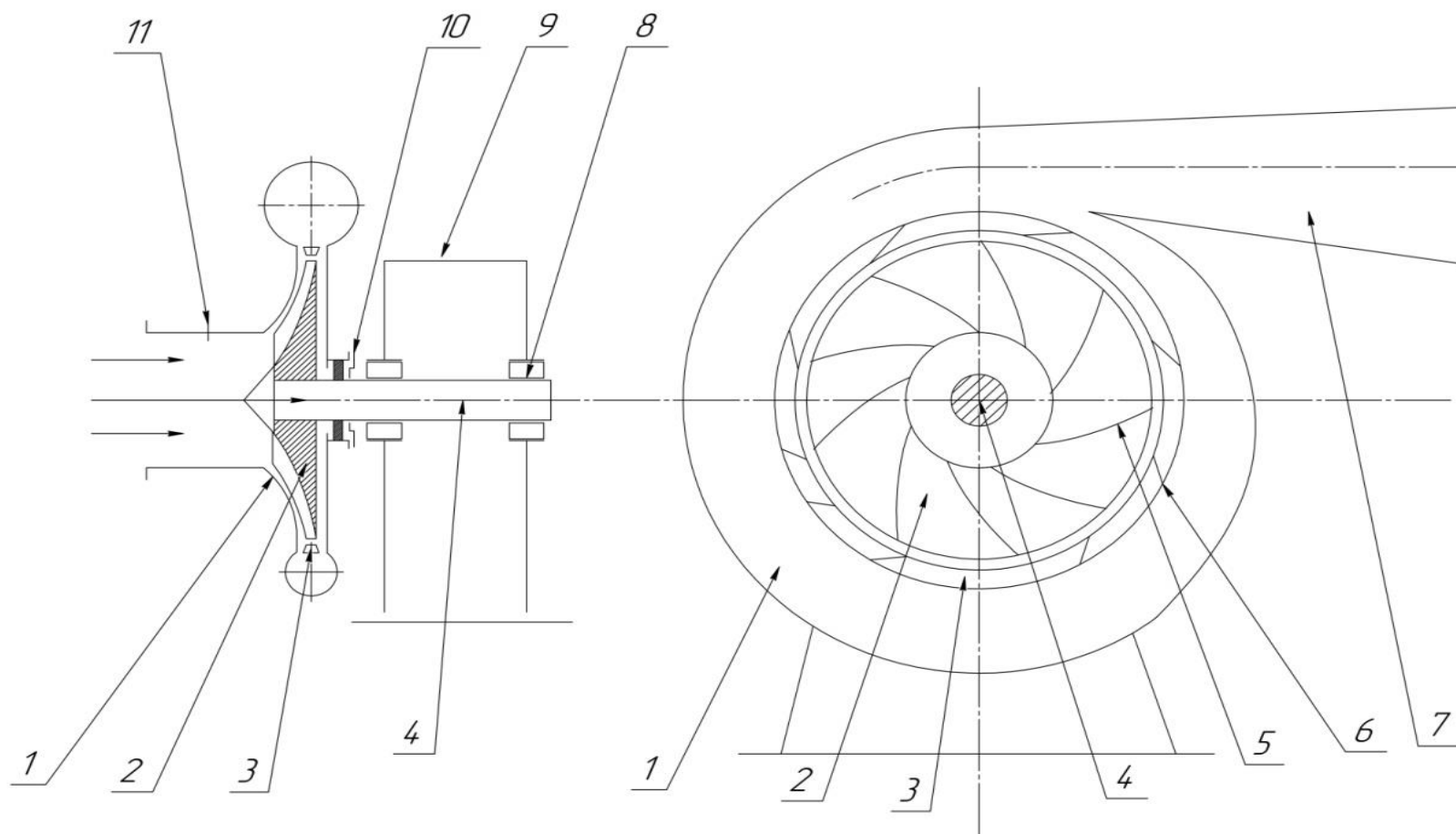


Рис. 1.1 - Принципиальная схема центробежного насоса.

- 1 - рабочая камера; 2 - рабочее колесо; 3 - направляющий аппарат; 4 - вал;
 5 - лопатка рабочего колеса; 6 - лопатка направляющего аппарата; 7 - нагнетательный патрубок; 8 - подшипник; 9 - корпус насоса (опорная стойка); 10 - гидравлическое торцовое уплотнение вала (сальник); 11 - всасывающий патрубок

1.3 Технические требования к системе автоматизации

Проектируемая установка входит в состав насосной станции, которая обеспечивает подачу холодной воды в водопроводную сеть жилищного комплекса. Технические требования к системе автоматизации

Применение регулируемого асинхронного электропривода для управления насосными агрегатами позволяет обеспечить:

- плавный пуск электродвигателя, бросков тока в сети;
- отсутствие гидравлических ударов;
- эффективное использование потребляемой насосным агрегатом мощности во всем диапазоне нагрузок и уровне водопотребления;

Насосная установка, обеспечивает следующие технические характеристики:

- Номинальная подача воды 315 м³/ч;
- Максимальная высота напора 65 м.

На насосной станции повышения надежности установлены два (один резервный) центробежных насоса типа 1Д315-71 (1 – первая модернизация; Д – двустороннего входа; 315 – подача, м³/ч; 71 – напор, м; Т – климатическое исполнение; 3.1 или 2- категория размещения);

Насос центробежный двустороннего входа типа Д предназначен для перекачивания воды и других жидкостей, имеющих сходные с водой свойства по вязкости до $36 \cdot 10^{-6}$ м²/с (36сСт) и химической активности, температурой от 274 до 358К (от 1 до 85°С), не содержащих твердых включений по массе более 0,05%, размеру более 0,2 мм и микротвердостью более 6,5 Гпа (650кгс/мм²). В табл. 1.3. приведены номинальные данные насоса.

Таблица 1.1. - Номинальные данные центробежного насоса 1Д315-71.

Параметр	Обозначение	Значение	Ед. измерения
Подача	Q	315 (0,087)	м ³ /час (м ³ /с)
Напор	H	71,00	М
Частота вращения	n	1450 (24.2)	об/мин (сек ⁻¹)
Максимальная потребляемая мощность	N	97,00	кВт
Допускаемый кавитационный запас	ΔH	6,5	м, не менее
Масса насоса	m	450	Кг
КПД	η _н	83	%
Момент инерции	J _н	1.91	кгм ²

. Насосы относятся к тем механизмам, в которых нельзя точно сказать какая нагрузка будет на валу двигателя в данный момент времени. Если рассматривать работу насосов статистически, то большую часть времени потребление воды будет небольшим, соответственно система регулирования снизит скорость насосов настолько, чтоб напор держался постоянным. Ввиду этого потребление мощности из сети будет небольшим, но вполне возможны и такие случаи, при которых потребление и, следовательно, скорость будут высоки.

Электропривод центробежного насоса, который рассматривается, должен удовлетворять следующие требования:

- Поддержка постоянного напора в системе водоснабжения с точностью не ниже 1% и возможность, при необходимости, ручного регулирования его уровня;
- Исходя из технологического процесса, требования к восстановлению давления при наброске нагрузки составляет не больше 2 с;

- Обеспечение режима плавного пуска от задатчика интенсивности за время 1-5 с;
- Наличие защиты от неблагоприятных режимов работы насосной станции;
- Электропитание установки осуществляется от 3-х фазной сети переменного тока 380/220 В, 50 Гц;
- Обеспечивать режим максимальной экономии при регулировании скорости.

Подход к проектированию системы управления насосной установкой, силовой части и повода в целом, должен отвечать мировым тенденциям развития электропривода.

Для реализации задачи управления насосной установкой электропривод должен обеспечивать:

- автоматическое, ручное управление пуском и остановкой насосной установки;
- автоматическое изменение частоты вращения вала двигателя для поддержания постоянным давления в потребительской сети;
- экстренный останов насоса в случае поступления аварийного сигнала
- защиту от аварийных режимов работы электродвигателя;
- включение резервного насоса в случае аварии;
- самозапуск после перепада напряжения.

АУ насосной установки должна обеспечить статическую ошибку в установившихся режимах работы равную 0.5.

При проектировании САУ должны быть предусмотрены меры по обеспечению безопасности при монтаже, эксплуатации, обслуживанию и ремонту технических средств в соответствии с действующими на территории Украины нормативными документами:

"Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий";

"Правила устройства электроустановок";

"Пожарная автоматика зданий и сооружений";

"Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное. Общие требования безопасности".

1. 4 Аналитический обзор методов управления насосными установками.

Регулировка подачи насосов.

Так как идёт большое потребление воды с утра и вечером, необходимо сделать регулировку подачи в насосах.

Подача насоса регулируется, в основном, тремя разными способами:

- * Дросселированием (с помощью заслонок)
- * Прерывистым регулированием (пуск – остановка)

Регулированием скорости вращения насоса с помощью электропривода.

Регулирование насосов на водопроводных и водоочистительных сооружениях выполняется прерывистым способом регулирования. К недостаткам этого способа принадлежат: невысокий КПД, частые пуски и

остановки, отрицательно действующие на трубопроводы и оборудование, невозможность плавного регулирования. При использовании данного способа регулирования необходимо предусматривать необходимый запас по мощности двигателя.

Регулирование скорости вращения позволяет осуществлять точное и плавное регулирование. Благодаря применению регулирования скорости вращения трубопроводы и клапаны получают меньшую нагрузку; увеличивается их срок службы, и уменьшается потребность в их обслуживании.

Благодаря применению привода с преобразователем частоты габариты двигателя можно уменьшить на 10-20%.

Динамические нагрузки заметно снижаются при «мягком» регулировании в сравнении с прерывчатым регулированием. Устраняются гидравлические удары, которые изнашивают трубопроводы и оборудование. Срок службы оборудования может даже удваиваться.

Регулирование путем изменения скорости вращения также позволяет осуществлять экономию энергии .

Исходя из вышесказанного, как способ регулирования напора выбираем регулирование путем изменения скорости вращения насоса.

Механизмы центробежного типа в силу особенностей их конструкций и условий технологического процесса не требуют реверсирования, их скорость согласуется со скоростью двигателя, поэтому электропривод этих установок выполняется безредукторным и поставляется обычно вместе с механизмом.

Отличительной особенностью рассмотренной группы механизмов есть облегченные условия их пуска. Эти механизмы, как в нормальных условиях, так и после аварийного отключения пускаются, как правило, вхолостую. При этом момент трогания не превышает 30-35% номинального момента. Для установок вентиляторного типа, которые пускаются под нагрузкой, момент сопротивления плавно возрастает с увеличением

скорости, которая согласуется с формой механической характеристики асинхронного двигателя.

В результате прямой пуск рассмотренных механизмов с асинхронным короткозамкнутым двигателем или синхронным двигателем с асинхронной пусковой обмоткой происходит под действием практически неизменного динамического момента.

Рассмотрим основные варианты применяемых регулируемых электроприводов.

Для установок сравнительно небольшой мощности (7-10 кВт) задача регулирования успешно решается с помощью системы регулятор напряжения – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Как регулятор напряжения применения находит тиристорный коммутатор.

Вентиляторная механическая характеристика нагрузки позволяет обеспечить устойчивую работу электропривода по системе тиристорный коммутатор – асинхронный двигатель в довольно большом диапазоне скорости без обратных связей.

Обычное изменение технологического режима, в котором принимает участие регулируемый электропривод, протекает довольно медленно и не требует высокого быстродействия.

Поэтому как регулятор напряжения может быть использован трехфазный магнитный усилитель, включенный в цепь статора. Довольно просто реализовать и импульсный способ регулирования скорости асинхронного двигателя. Тиристорный ключ, замыкаясь и размыкаясь, изменяет среднее за цикл коммутации значения дополнительного сопротивления.

Это сопротивление пропорционально скважности широтно-импульсной модуляции. Регулируя скважность, можно получить семейство механических характеристик электропривода. Скважность зависит от управляющего напряжения на входе системы управления тиристорным ключом. Так как критическое скольжение двигателя уменьшается при

увеличении дополнительного сопротивления, то диапазон скоростей устойчивой работы привода даже при «вентиляторной» характеристике механизма оказывается довольно незначительным. Введение обратной связи по скорости обеспечивает жесткие механические характеристики и устойчивую работу замкнутой системы электропривода в необходимом для механизма диапазоне скоростей.

Общим недостатком рассмотренных вариантов регулируемого электропривода есть выделение потерь скольжения при снижении скорости в самом двигателе.

Эти потери вызывают дополнительное нагревание двигателя и требуют соответствующего завышения установленной мощности двигателя.

В установках, где по условиям эксплуатации допустимо применение асинхронного двигателя с фазным ротором, возможности регулируемого электропривода расширяются.

Введение дополнительного сопротивления в цепь ротора позволяет вывести часть потерь скольжения из обмоток двигателя на добавочные сопротивления.

Благодаря этому снижается необходимое завышение габарита двигателя и появляется возможность расширить диапазон мощностей привода при рассмотренных выше способах регулирования скорости. Например, импульсный способ регулирования окажется более целесообразным относительно коммутации дополнительного сопротивления в роторной цепи. При этом механические характеристики привода обеспечивают устойчивую работу в довольно большом диапазоне скоростей при разомкнутой системе электропривода.

Во всех рассмотренных вариантах имеют место значительные потери скольжения, которые рассеиваются в виде тепла в обмотках двигателя, в регулировочных сопротивлениях или в муфте скольжения, и КПД электропривода оказывается низким.

При больших диапазонах регулирования ($D > 2$) и высоких требований к жесткости механических характеристик электропривода перспективна схема транзисторный преобразователь частоты — асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Первоначально из-за отсутствия надежных и дешевых преобразователей частоты (ПЧ) для управления скоростью насоса в продолжительном режиме пытались использовать преобразователи напряжения (ПН), т.е. осуществлять так называемое параметрическое регулирование.

Способ привлекателен тем, что тиристорный преобразователь напряжения (ТПН) очень прост и дешев. Однако, существует принципиальное ограничение на использование параметрического регулирования в продолжительном режиме — большие потери энергии в двигателе. Для того, чтобы все-таки использовать этот способ, используют

завышение установленной мощности электродвигателя в 2-2,5 раза, или двигатель с повышенным скольжением.

Очевидно, что при этом система с дешевым преобразователем ТПН оказывается слишком дорогой и нерациональной в практической реализации. Система ПЧ-АД, в которой скорость двигателя регулируется изменением частоты питающего напряжения, полностью лишена перечисленных недостатков. В этой системе экономится примерно вдвое больше энергии, так как в системах с ТПН половина экономящейся в насосе энергии рассеивается в двигателе, уменьшая срок службы его подшипников и других деталей.

Можно сделать вывод: наиболее эффективный способ регулирования скорости АД – изменение частоты с одновременным изменением напряжения при использовании ПЧ.

1.5. Обоснование выбора системы регулирования привода по схеме ПЧ-АД.

Рассмотрим характеристики основных типов ПЧ.

ПЧ предназначен для преобразования высокой частоты в низкую и состоит из 18 тиристоров, объединенных во встречно-параллельные группы (рис.3.1). В основе преобразователя лежит трехфазная схема выпрямления; каждая фаза преобразователя состоит из двух встречно включенных выпрямителей.

Различают выпрямители с отдельным и совместным управлением. При отдельном управлении управляющие импульсы должны подаваться на тиристоры одной из вентильных групп, в соответствии с направлением тока в нагрузке.

Для обеспечения отдельной работы применяется специальное логическое устройство, исключающее возможность прохождения тока в одной группе в то время, когда ток проходит в другой группе..

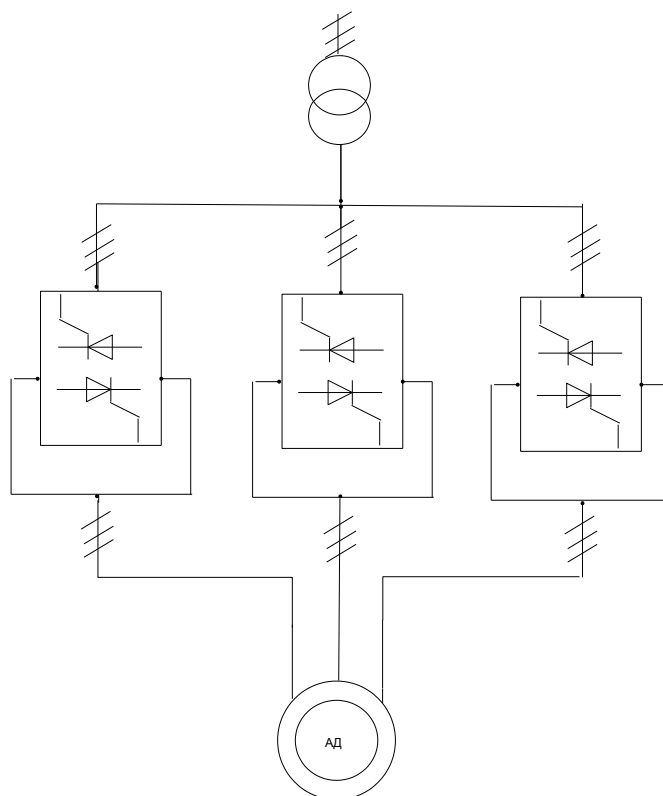


Рис. 1.1 – ПЧ с непосредственной связью

К достоинствам этого типа преобразователей можно отнести:

- 1) однократное преобразование энергии и, следовательно, высокий КПД (около 0,97—0,98);
- 2) возможность независимого регулирования амплитуды напряжения на выходе от частоты;
- 3) свободный обмен реактивной и активной энергией из сети к двигателю и обратно;
- 4) отсутствие коммутирующих конденсаторов, так как коммутация тиристоров производится естественным путем (напряжением сети).

К недостаткам рассмотренного ПЧ относятся:

- 1) сравнительно большое число силовых вентилей и сложная схема управления ими;
- 2) невысокий коэффициент мощности — максимальное значение на входе преобразователя около 0,8.

ПЧ со звеном постоянного тока:

Наиболее широкое применение в современных частотно регулируемых приводах находят преобразователи с явно выраженным звеном постоянного тока, функциональная схема которого приведена на рис. 1.7. В преобразователях этого класса используется двойное преобразование электрической энергии: входное синусоидальное напряжение с постоянной амплитудой и частотой выпрямляется в выпрямителе (УВ), фильтруется фильтром (с), сглаживается, а затем вновь преобразуется инвертором (И) в переменное напряжение изменяемой частоты и амплитуды. Двойное преобразование энергии приводит к снижению к.п.д. и к некоторому ухудшению массогабаритных показателей по отношению к преобразователям с непосредственной связью.

Преобразователь с промежуточным звеном постоянного тока позволяет регулировать частоту как вверх, так и вниз от частоты питающей сети; он отличается высоким КПД (около 0,96), значительным быстродействием, сравнительно малыми габаритами и надежностью.

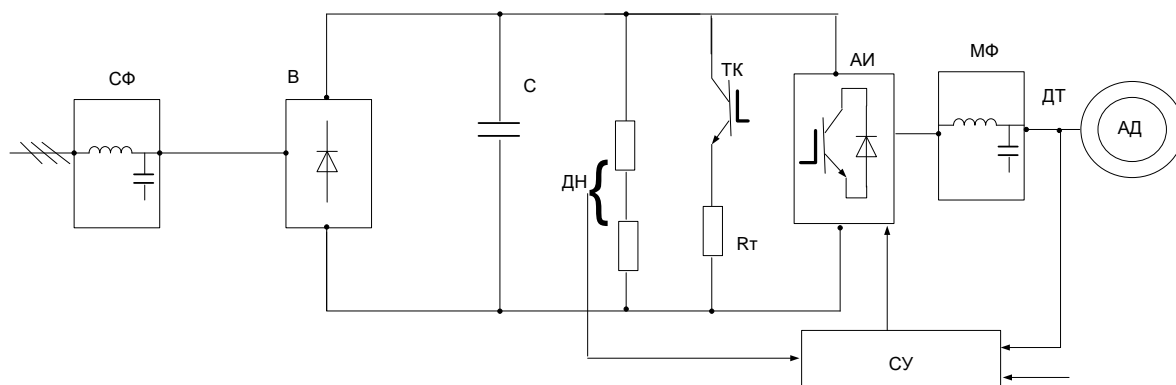


Рис. 1.2 – Функциональная схема ПЧ со звеном постоянного тока.

СФ – сетевой фильтр для отсекающих высших гармоник; В – выпрямитель, обычно не регулируемый (в ПЧ первого поколения) для регулирования напряжения в звене постоянного тока; ДН и ДТ – датчики напряжения и тока; ТК – тормозной ключ; АИ – автономный инвертор, обычно ШИМ (рис.3.3); МФ – мотор-фильтр, уменьшение высших гармоник на двигатель; СУ – система управления.

В качестве запираемых ключей в АИ (рис. 1.8) могут использоваться GTO тиристоры или IGBT транзисторы.

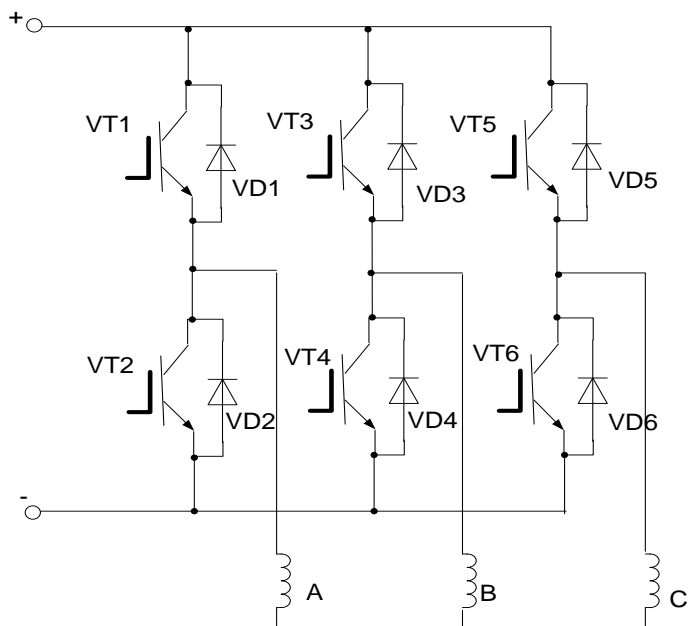


Рис. 1.3 – Принципиальная схема АИ

Биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT отличаются от тиристоров полной управляемостью, простой неэнергоемкой системой управления, высокой рабочей частотой

Вследствие этого преобразователи частоты на IGBT позволяют расширить диапазон управления скоростью вращения двигателя, повысить быстродействие привода в целом.

Применение IGBT с более высокой частотой переключения в совокупности с микропроцессорной системой управления в преобразователях частоты снижает уровень высших гармоник, характерных для тиристорных преобразователей. Как следствие – меньшие добавочные потери в обмотках и магнитопроводе электродвигателя, уменьшение нагрева электрической машины, снижение пульсаций момента и исключение «шагания» ротора в области малых частот.

Снижаются потери в трансформаторах, конденсаторных батареях, увеличивается их срок службы и изоляции проводов, уменьшаются

количество ложных срабатываний устройств защиты и погрешности индукционных измерительных приборов.

Для работы двигателя необходимо с изменением частоты изменять и напряжение. Для этого его изменяют в звене постоянного тока либо используют ШИМ.

При выборе соотношений между частотой и напряжением чаще всего исходят из условий сохранения перегрузочной способности.

Выбор преобразователя частоты производят исходя из условий:

$$U_{\text{вых.пч}} \geq U_{1н} \cdot I_{\text{выч.пч}} \geq I_{1н}$$

Выводы

1. Насосные водопроводные станции в зависимости от места, занимаемого в общей системе водоснабжения, подразделяют на станции 1-го, 2-го, 3-го и последующих подъемов

2. Насосы относятся к тем механизмам, в которых нельзя точно сказать какая нагрузка будет на валу двигателя в данный момент времени. Если рассматривать работу насосов статистически, то большую часть времени потребление воды будет небольшим, соответственно система регулирования снизит скорость насосов настолько, чтоб напор держался постоянным.

3. Наиболее эффективный способ регулирования скорости АД – изменение частоты с одновременным изменением напряжения при использовании ПЧ

4 Для работы двигателя необходимо с изменением частоты изменять и напряжение. Для этого его изменяют в звене постоянного тока либо используют ШИМ.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

2. Автоматизированный электропривод

2.1. Расчет мощности и выбор электродвигателя насосной установки

Для выполнения требований технического задания необходимо произвести расчет мощности и по каталогам производителей выбрать соответствующее оборудование.

Двигатели следует выбирать под номинальные параметры насоса.

Рассчитаем мощность на валу двигателя по формуле

$$P_{\text{в}} = \frac{g \rho Q_{\text{н.н}} (H_{\text{н.н}} + \Delta H)}{1000 \times \eta_{\text{н}}} = \frac{9,81 \times 1000 \times 0,087 \times (71 + 6,5)}{1000 \times 0,83} = 79,69 \text{ кВт}. \quad (2.1.)$$

Здесь

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;

$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды;

$Q_{\text{н.н}} = 0,087$ – номинальная производительность насоса, $\text{м}^3/\text{с}$;

$H_{\text{н.н}}$ – номинальный напор насоса, м;

$\Delta H = 6,5$ – кавитационный запас, м;

$\eta_{\text{н.н}} = 0,83$ – номинальный КПД насоса.

Следовательно двигатели, установленные на насосной станции должны иметь номинальную мощность не меньше 79,69 кВт. По характеристикам подберем асинхронный двигатель из рекомендуемых производителем насоса

По рекомендации изготовителя насоса и расчетной мощности выбираем асинхронный двигатель мощностью 110 кВт серии 5AM

Таблица 1.3 Номинальные данные Асинхронные двигатель 5AM280S4

Номинальный ток при;	380В – 199 А
----------------------	--------------

Номинальный момент	707 Нм
Индекс механической характеристики	V
Степень защиты	IP54
Отношение пускового момента к номинальному моменту	2.3
Отношение пускового тока к номинальному току	6.8
Отношение максимального момента к номинальному моменту	2.8
Динамический момент инерции ротора	2,19 кг* м
Номинальная частота вращения-	1485 об/мин
Коэффициент полезного действия-	95,4%
Коэффициент мощности-	0,88

Внешний вид двигателя 5AM280S4 У3 показан на рис. 2.1

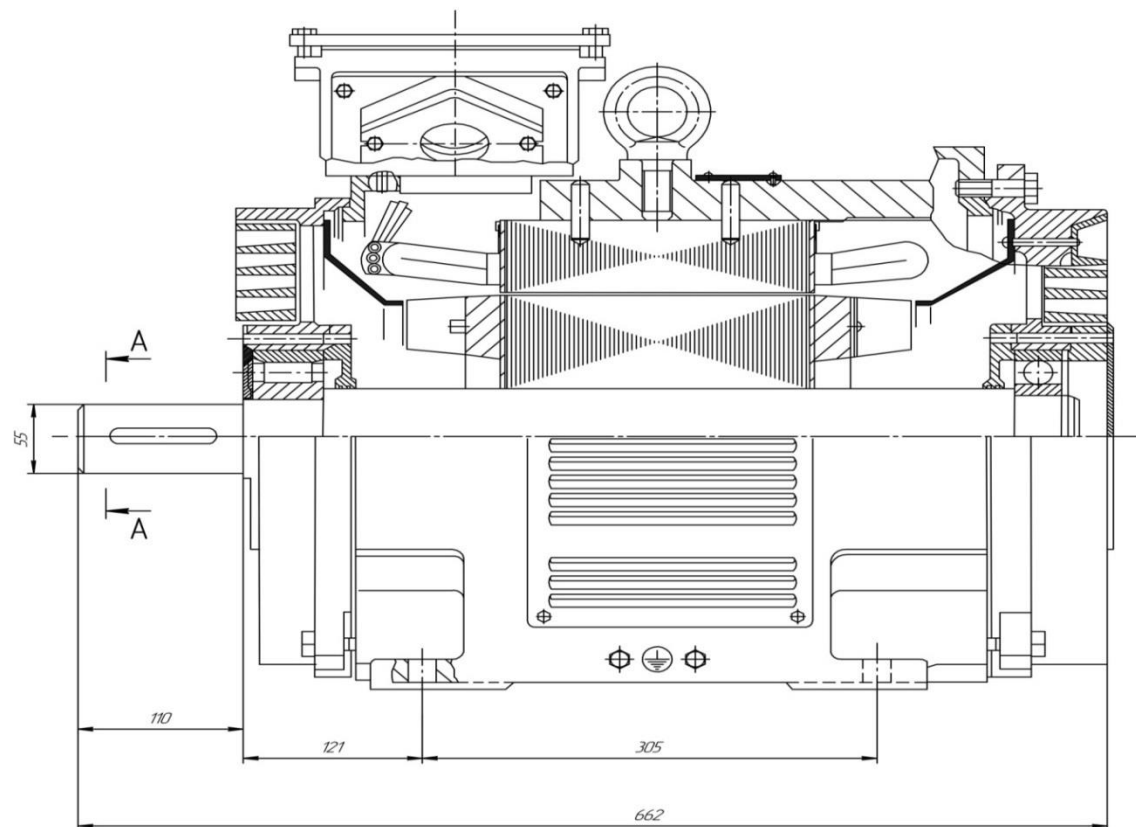


Рис. 2.1 - Асинхронный двигатель 5AM280S4 У3.

Установка должна обеспечивать регулирование давления в водонапорной сети, с целью понижения энергетических затрат, расхода воды, а также минимизировать количество и габаритов, используемой аппаратуры водоснабжения

2.2. Выбор преобразовательного устройства

Функцию преобразования параметров электрической энергии питающей сети к таким значениям, которые необходимы для нормальной работы приводного двигателя, а также функцию преобразования величины электрической энергии, подводимой к двигателю для регулирования его скорости и выполняет преобразовательное устройство.

Как было рассмотрено выше в качестве преобразовательного устройство принят преобразователь частоты, на базе автономного инвертора напряжения на IGBT-транзисторах со скалярной ШИМ-модуляцией .

При выборе преобразователя частоты необходимо руководствоваться следующими основными требованиями:

- высокая надежность при рабочих режимах работы;
- простота системы управления без ухудшения основных параметров выходного тока, напряжения и функциональных возможностей ПЧ;

В качестве преобразователя выбираем транзисторный преобразователь частоты 3G3HV-B11K японской фирмы OMRON .

Мощный инвертор широкого назначения 3G3HV является легко обслуживаемым прибором, имеющим расширенные функциональные возможности

Таблица 2.4. - Номинальные данные преобразователя.

Напряжение, В		220/380
Частота, Гц		50/60
Номинальная мощность, кВт		130
КПД		90 %
Сопротивление заземления не более, Ом		10
Параметры аналоговых входов	Напряжение, В	0..10 пост. тока
	Ток, мА	4..20
Максимальная длина кабеля между преобразователем и двигателем, м		100



Рис. 2.2- Преобразователь частоты 3G3HV-B11K японской фирмы OMRON.

В таблице 2.4 приведены основные характеристики преобразователя частоты 3G3HV-B11K.

Преобразователь обеспечивает следующие режимы работы и управления приводных машин и механизмов:

- плавный пуск;
- длительную работу в заданном диапазоне частот вращения и нагрузок;
- реверсирование движения;
- торможение и останов;
- защиту электрического и механического оборудования в аварийных и нештатных режимах.

Эффективность применения данного электропривода обусловлена:

- высоким качеством статических и динамических характеристик;
- высокими энергетическими показателями;

- гибкой настройкой рабочих параметров и режимов;
- развитым интерфейсом и адаптивностью к различным внешним системам управления и автоматизации, в том числе высокого уровня;
- высокой монтажно-наладочной готовностью;
- простотой и удобством управления и обслуживания в эксплуатации.

2.3. Выбор датчика давления.

Датчики давления разрабатываются рядом известных фирм. В дипломном проекте выбран датчик давления фирмы «Metran»:

Датчики давления Метран-100 предназначены для работы в системах автоматического контроля, регулирования и управления и обеспечивают непрерывное преобразование давления в унифицированный аналоговый сигнал.

Выбор датчика осуществим исходя из рабочего давления насоса $H_{\text{ном}}=65\text{м} = 6,5 \text{ атм.}$,

Выбираем датчик с ближайшим большим давлением Метран-100-ДИ

Измерение среды: жидкости, пар, газ, в том числе, газообразный кислород и кислородосодержащие газовые смеси.

Диапазоны измеряемых давлений:

минимальный 0-0,04 кПа;

максимальный 0-100 МПа;

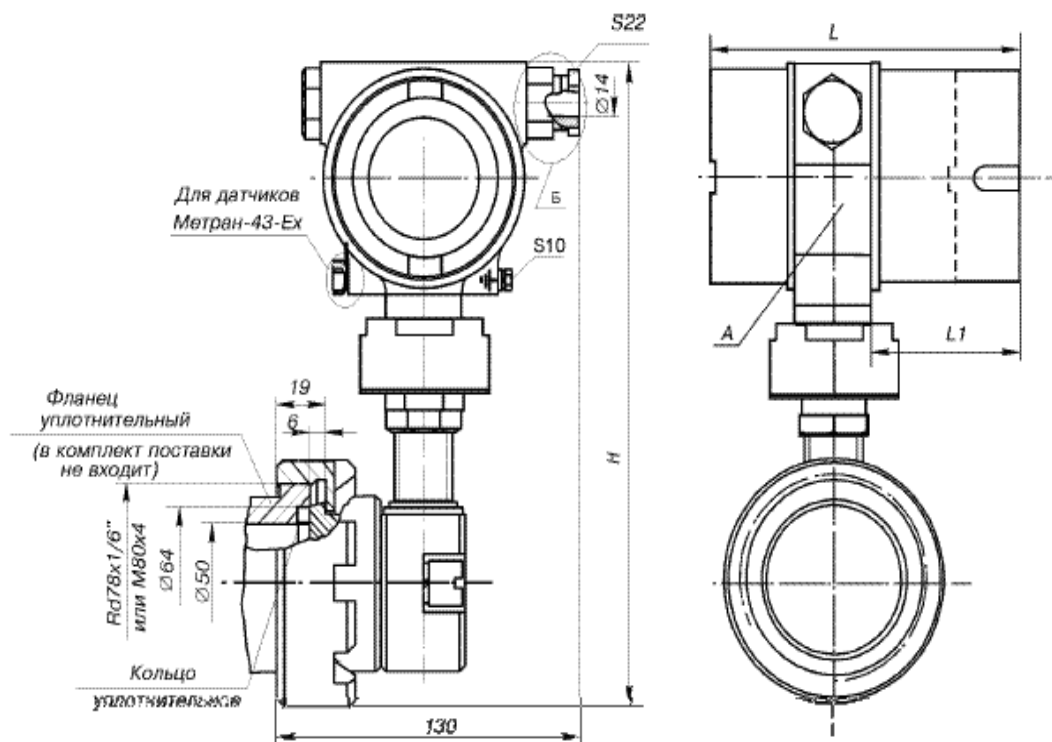
Основная погрешность: $\pm 0,1\%$, $\pm 0,15\%$, $\pm 0,25\%$, $\pm 0,5\%$;

Степень защиты от пыли и воды IP65.

Выходные сигналы:

аналоговый сигнал постоянного тока 4-20 мА, 0-5мА, 0-20мА. Для датчиков исполнения Ex - только 4-20 мА;

аналоговый сигнал постоянного тока 4-20 мА, с наложенным цифровым сигналом в стандарте HART;



Общий вид датчика давления Метран-100-Ди представлен на рис. 2.3.

При выборе места установки необходимо учитывать следующее:

- датчики Метран-100 общепромышленного и кислородного исполнения нельзя устанавливать во взрывоопасных помещениях
- места установки датчиков должны обеспечивать удобные условия для обслуживания и демонтажа;
- температура и относительная влажность окружающего воздуха должны соответствовать допустимым значениям
- среда, окружающая датчик, не должна содержать примесей, вызывающих коррозию его деталей;
- параметры вибрации не должны превышать допустимые значения
- напряженность магнитных полей, вызванных внешними источниками постоянного тока или переменного тока частотой 50Гц, не должна превышать 400 А/м.

Примерное представление гидравлической системы нагрузка насосного агрегата.

Это выражается в более высоких давлениях, более высоких температурах и в меньших объемах систем, что приводит к повышению кратности циркуляции и, следовательно, нагрузки на гидравлическую среду.

Разработки в области гидравлических жидкостей, а также их правильное применение имеют колоссальное экономическое значение как в настоящее время, так и в будущем. Оптимальное применение означает экономию энергии, увеличение интервалов между сменами масла, снижение износа, увеличение сроков службы машин и, следовательно, экономию средств.

Таблица 1.4 график нагрузка.

Время суток	Нагрузка
0	30
1	10

2	8
3	3
4	4
5	10
6	70
7	68
8	59
9	53
10	51
11	49
12	45
13	47
14	43
15	48
16	48
17	64
18	85
19	74
20	80
21	65
22	50
23	40

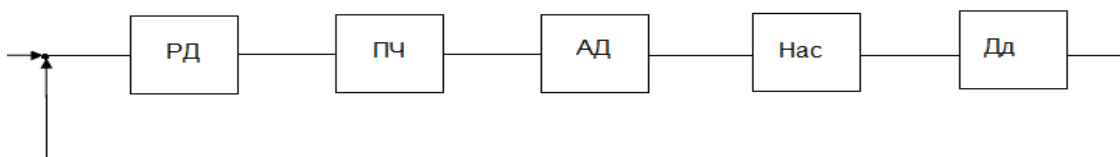


Рис. .2.4 – Графики нагрузка на насос в сутки

ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

3.1 СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

3.2 Динамическая модель асинхронного короткозамкнутого электродвигателя



Общая структурная схема 3.1

На основе Т-образной схемы замещения производится математическое описание асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и разработка его динамической модели.

При математическом описании АД, как объекта управления, принимаются следующие допущения:

- намагничивающие силы обмоток двигателя распределяются строго синусоидально вдоль окружности воздушного зазора;
- потери в “стали” статора и ротора отсутствуют;
- обмотки статора и ротора строго симметричны со сдвигом оси на 120°;

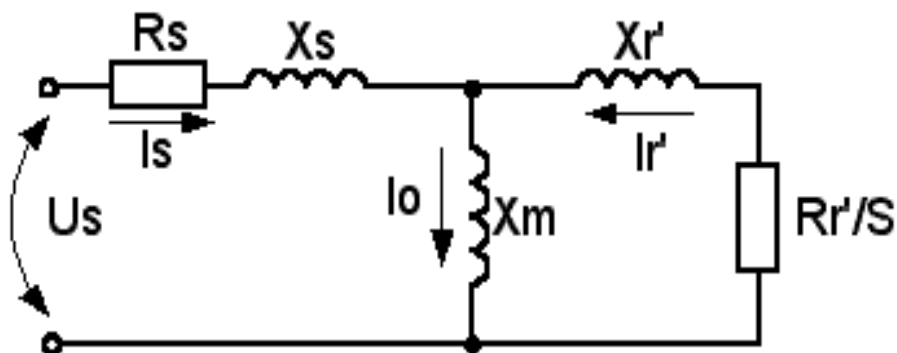


Рис. 3.2 - Схема замещения АД

Параметры схемы замещения:

$$\begin{aligned} X_1 &= X'_1 \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} \\ X'_2 &= X''_2 \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$R_1 = R'_1 \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}}$$

$$R'_2 = R''_2 \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}}$$

Где: X_μ - главное индуктивное сопротивление;

R'_1, X'_1 - активное и индуктивное сопротивления обмотки статора, о. е.;

R'_2, X'_2 - активное и индуктивное сопротивления обмотки ротора, приведенные к обмотке статора, о. е.;

X_1, X''_2, R_1, R''_2 - сопротивления статора и ротора, Ом;

$U_{1\phi n}, I_{1\phi n}$ - номинальные значения фазного напряжения, В и тока, А.

Полная динамическая модель АД с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат статора (a-b) представляется системой из пяти дифференциальных уравнений :

$$\omega = \frac{1}{J} \left[\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (\Psi_{2a} i_{1b} - \Psi_{2b} i_{1a}) - M_c \right]$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{1a}}{dt} &= -\frac{R_1}{\sigma} i_{1a} - \alpha \beta L_m i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} + \beta \omega p_n \psi_{2b} + \frac{U_{1a}}{\sigma} \\ \frac{di_{1b}}{dt} &= -\frac{R_1}{\sigma} i_{1b} - \alpha \beta L_m i_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} - \beta \omega p_n \psi_{2a} + \frac{U_{1b}}{\sigma} \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{2a}}{dt} &= -\alpha \psi_{2a} - \omega p_n \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a} \\ \frac{d\psi_{2b}}{dt} &= -\alpha \psi_{2b} + \omega p_n \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b} \end{aligned}$$

где $\alpha = \frac{R_2}{L_2}$ $\beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}$ $\sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2}$ $L_1 = L_m + L_{1\sigma}$ $L_2 = L_m + L_{2\sigma}$

ω – угловая скорость;

i_{1a}, i_{1b} – компоненты вектора тока статора;

ψ_{2a}, ψ_{2b} – компоненты вектора потокосцепления ротора;

U_{1a}, U_{1b} – компоненты вектора напряжения статора;

M_c – момент нагрузки;

R_1, R_2 – активные сопротивления статора и ротора;

L_1, L_2 – индуктивности статора и ротора;

L_m – индуктивность намагничивающего контура;

$L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ – индуктивности рассеивания статора и ротора;

p_n – число пар полюсов;

$$M = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}) - \quad \text{момент, развиваемый}$$

двигателем.

При стабилизации напряжения система работает в малых отклонениях относительно рабочей точки стабилизации и возможно использование линейной модели асинхронного двигателя

Структурную схему линеаризованной модели асинхронного двигателя можно представить в виде, модели, приведенной на рис.3.3:

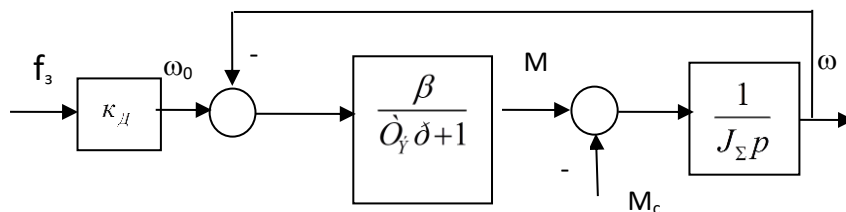


Рис. 3.4 - Линеаризованная модель АД

M – момент двигателя, $\dot{I} \cdot \dot{i}$;

β - жесткость линейного участка механической характеристики;

T_y – электромагнитная постоянная времени, с;

J_Σ – суммарный, приведенный к валу двигателя момент инерции, $\hat{e}\tilde{a} \cdot \dot{i}^2$;

ω_0 – задающая круговая частота вращения, рад/с;

f_3 – частота задания, Гц,

K_d – коэффициент передачи двигателя.

3.3. Расчет параметров схемы замещения электродвигателя:

$$X_1 = X'_1 \frac{U_{1\delta i}}{I_{1\delta i}} = 0,122 \frac{220}{202} = 0,133 \hat{I} \hat{i}$$

$$X'_2 = X''_2 \frac{U_{1\delta i}}{I_{1\delta i}} = 0,16 \frac{220}{202} = 0,1743 \hat{I} \hat{i}$$

$$R_1 = R'_1 \frac{U_{1\delta i}}{I_{1\delta i}} = 0,023 \frac{220}{202} = 0,025 \hat{I} \hat{i}$$

$$R'_2 = R''_2 \frac{U_{1\delta i}}{I_{1\delta i}} = 0,019 \frac{220}{202} = 0,0207 \hat{I} \hat{i}$$

$$X_{12} = X_\mu \frac{U_{1\delta i}}{I_{1\delta i}} = 4,9 \frac{220}{202} = 5,34 \hat{I} \hat{i}$$

$$\text{где } I_{1\delta i} = \frac{D_i}{3U_{1\delta i} \cos \phi \eta_i} = \frac{110000}{3 \cdot 220 \cdot 0,88 \cdot 0,951} = 202 \text{А} - \text{номинальный ток}$$

статора.

Взаимная индуктивность статора и ротора:

$$L_{12} = \frac{\tilde{O}_{12}}{2 \cdot \pi \cdot f_i} = \frac{5,34}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,017 \text{ Гн}$$

Индуктивность обмотки статора:

$$L_1 = \frac{\tilde{O}_1 + \tilde{O}_{12}}{2 \cdot \pi \cdot f_i} = \frac{0,133 + 5,34}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0174 \text{ Гн}$$

Индуктивность обмотки ротора:

$$L_2 = \frac{X'_2 + X_{12}}{2 \cdot \pi \cdot f_i} = \frac{0,1743 + 5,34}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0176 \text{ Гн}$$

$$\sigma = \frac{L_1 L_2 - L_{12}^2}{L_2} = \frac{0,0174 \cdot 0,0176 - 0,017^2}{0,017} = 0,00101$$

$$\alpha = \frac{R'_2}{L_2} = \frac{0,0207}{0,0176} = 1,176 \frac{\hat{I} \hat{i}}{\tilde{A} \hat{i}}$$

Коэффициент передачи: $i_n = 1$

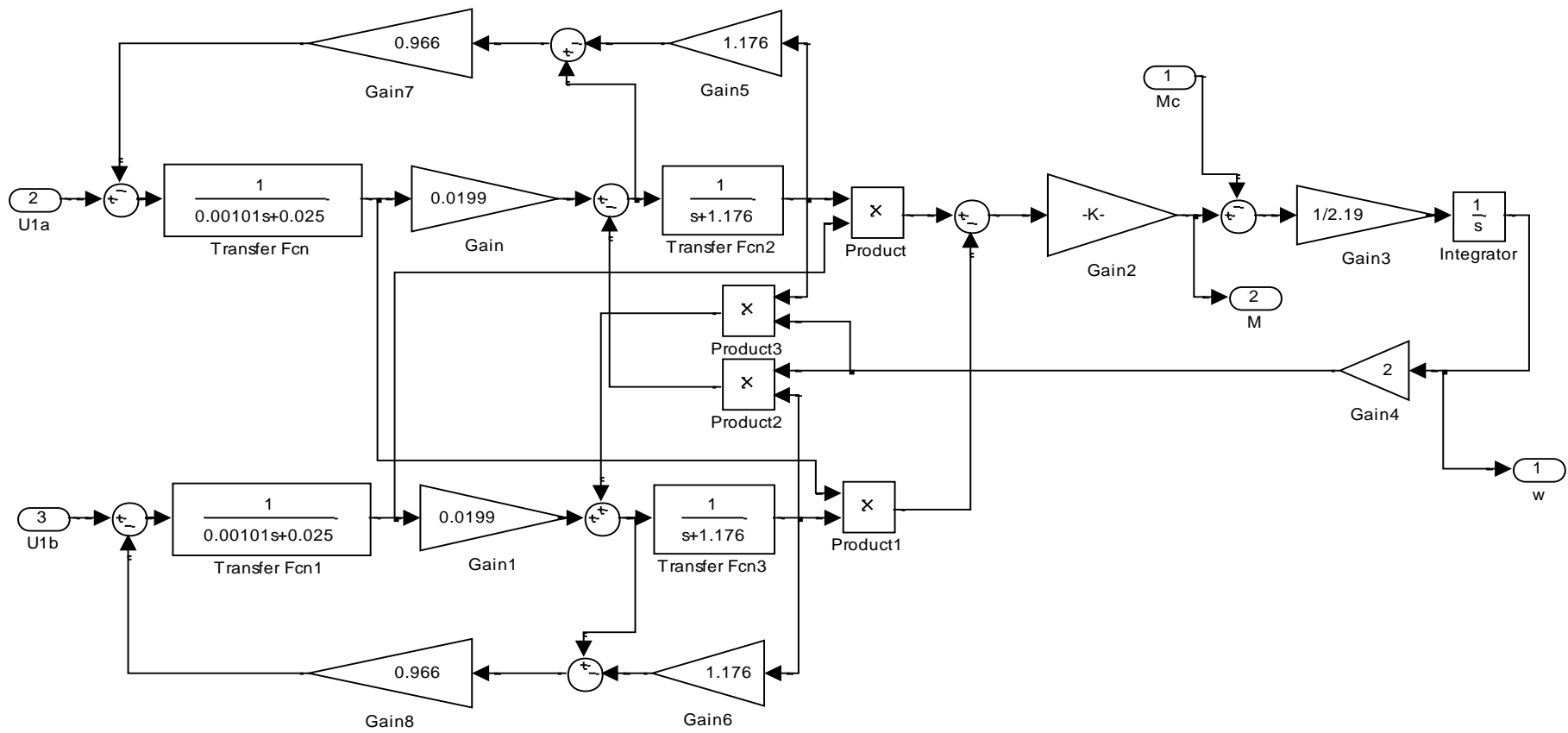


Рис. 3.4 Структурная схема асинхронного двигателя с рассчитанными параметрами замещения

3.4 Расчет параметров преобразователя частоты.

В состав преобразователя частоты со звеном постоянного тока входит управляемый выпрямитель, фильтр и автономный инвертор напряжения.

Транзисторный преобразователь представляет собой нелинейный дискретный динамический объект с ограниченной управляемостью, однако можно говорить, что специфика ПЧ, как нелинейного объекта существенно не сказывается на работе системы.

Частота среза контура регулирования в котором он находится, значительно ниже частот, существенных для динамики транзисторного преобразователя, при этом время переходных процессов в системе заметно превышает период дискретизации системы. Зачастую, выпрямитель при разработке систем управления электроприводами представляют в виде апериодического звена с коэффициентом передачи K_B и постоянной времени

T_B , а инвертор и вовсе как безынерционное звено K_I .

Для синтеза регуляторов системы управления будет использоваться линеаризованная модель преобразователя частоты (рис. 3.5):

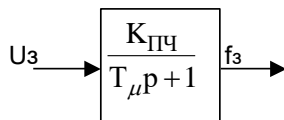


Рис. 3.5. Линеаризованная модель преобразователя частоты

где $K_{ПЧ}$ – коэффициент усиления преобразователя частоты;

T_{μ} - постоянная времени ПЧ.

$$W_{I \times}(\delta) = \frac{K_{I \times}}{\delta_{\mu} \delta + 1} = \frac{3,125}{0,01 \delta + 1}$$

где $K_{ПЧ} = f_{1Н}/I_3 = 50/16 = 3,125$ Гц/мА, - коэффициент усиления преобразователя частоты,

$f_{1Н} = 50$ Гц - номинальная частота напряжения сети,

$I_3 = 16$ мА – ток задания, принимается стандартным (20-4)=16мА

$T_{\mu} = 0,01$ с, постоянная времени ПЧ.

Для реальных систем $T_{\mu} = 0,008 \div 0,01$ с, для синтеза принимаем $T_{\mu} = 0,01$.

3.5 Расчет параметров структурной схемы насосной установки.

$p = 2$ - число пар полюсов обмотки статора двигателя;

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_{1H}}{\delta} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2} = 157 \text{ рад/с} - \text{номинальная скорость холостого хода};$$

$\omega_i = \omega_0(1 - s_H)$, $\delta \dot{\omega} / \tilde{n}$ - номинальная скорость двигателя;

$$s_H = \frac{\omega_0 - \omega_i}{\omega_0} = \frac{157 - 152,77}{157} = 0,03 - \text{номинальное скольжение двигателя};$$

$$s_K = s_H(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,03 \cdot (2,4 + \sqrt{2,4^2 - 1}) = 0,14 - \text{критическое скольжение};$$

где $\lambda = 2,4$ - отношение максимального момента к номинальному моменту,

$$K_{\dot{\omega}} = \frac{2\pi}{\delta} = \frac{6,28}{2} = 3,14 - \text{коэффициент передачи двигателя};$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{\omega_i \dot{Y}_E s_E} = \frac{1}{314 \cdot 0,14} = 0,022 - \text{электромагнитная постоянная времени}$$

двигателя;

$$\beta = \frac{\dot{I}_i}{\omega_{i1} - \omega_i} = \frac{707}{157 - 152,77} = 167,14 - \text{модуль статической жесткости};$$

$$J_{\Sigma} = J_{\dot{\omega}} + J_{\dot{\omega} \dot{\omega}} = 2,19 + 1,91 = 4,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 - \text{суммарный момент инерции};$$

$$\dot{\omega} = \frac{J_{\Sigma}}{\beta} = \frac{4,1}{167,14} = 0,025 - \text{электрохимическая постоянная времени}$$

двигателя, где $J_{\Sigma} = 4,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

На основе полученных параметров, передаточная функция двигателя будет иметь вид:

$$\begin{aligned} W_{\dot{\omega}\dot{\omega}}(\delta) &= \frac{\beta k_{\dot{\omega}}}{1 + \frac{J_{\Sigma} p (T_Y \delta + 1)}{\beta}} = \frac{\beta k_{\dot{\omega}}}{J_{\Sigma} T_Y \delta^2 + J_{\Sigma} p + \beta} = \frac{k_{\dot{\omega}}}{T_M T_Y \delta^2 + T_M p + 1} = \\ &= \frac{3,14}{0,00055 \delta^2 + 0,025 p + 1} \end{aligned}$$

Тогда структурная схема САУ насосной установки будет иметь, показанный на рис. 3.6:

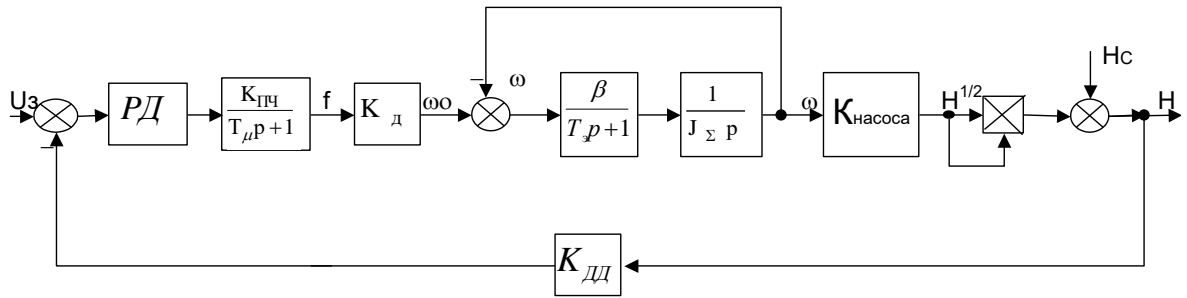


Рис. 3.6 - Структурная схема САУ насоса

где РД – регулятор давления;

$K_д$ – коэффициент передачи двигателя

$$K_д = \frac{2\pi}{p} \quad (3.6)$$

$K_{дд}$ – коэффициент обратной связи по давлению

$$K_{дд} = \frac{U_3}{H_H} \quad (3.7)$$

Важной частью системы регулирования напора является датчик давления. Датчик выбираем по номинальному напору насоса. Пересчитаем номинальный напор насоса в давление:

$$P_N = g \rho_{\text{вд}} H_N = 9,81 \cdot 1000 \cdot 65 = 0,64 \text{ МПа}.$$

Выбираем датчик давления типа Метран 100ДИ на максимальное давление 1 МПа. Минимальное давление датчика 0 МПа. С целью повышения помехозащищенности, датчик давления имеет токовый интерфейс.

Информация о давлении передается в виде тока. Ток при максимальном давлении – 20 мА, при минимальном – 4 мА. Рассчитаем коэффициент передачи датчика давления. Максимальный напор, измеряемый датчиком:

$$H_{\text{д.н. max}} = \frac{10^6}{9,81 \cdot 1000} = 101,937 \text{ м.} \quad (3.8)$$

Имеем коэффициент передачи:

$$K_{\ddot{a}\ddot{a}} = \frac{I_{\ddot{a}.H.\text{max}} - I_{\ddot{a}.H.\text{min}}}{H_{\ddot{a}.H.\text{max}} - H_{\ddot{a}.H.\text{min}}} = \frac{(20-4)}{101,937-0} = 0,157 \frac{\text{ì Ä}}{\text{ì}}. \quad (3.9)$$

Так как задание напора на регулятор будет приходиться также в виде тока, максимальная величина которого будет также 20 мА, а минимальная 4 мА, то в канале задания также появится масштабирующий коэффициент, который будет равен обратному значению коэффициента передачи датчика напора:

$$K_{\dot{c}\ddot{a}\ddot{a}} = \frac{1}{K_{\ddot{a}\ddot{a}}} = \frac{1}{0,157} = 6,369 \frac{\text{ì}}{\text{ì Ä}}.$$

3.6 Синтез контура регулирования давления

Синтез контура регулирования давления проведем методом последовательной коррекции. Настройку контура регулирования выполним на модульный оптимум.

Передаточная функция объекта регулирования (без регулятора и датчика давления) будет иметь вид:

$$W_i(p) = W_{I \times}(p) \cdot W_{\dot{A}}(p) \cdot W_{I \dot{A} \ddot{N}}(p) \quad (3.10)$$

$$W_i(p) = \frac{k_{I \times} \cdot k_{\dot{A}} \cdot k_{I \dot{A} \ddot{N}}}{(\dot{O}_{\mu} p + 1) \cdot (T_M T_{\dot{Y}} p^2 + T_M p + 1)} \quad (3.11)$$

Для синтеза регулятора давления пользуются заданием желаемой передаточной функции разомкнутой системы $W_{\text{д.н.д.д.}}(p)$, в которой компенсированы все большие постоянные времени объекта, исключая их из разомкнутого контура регулирования. Аналогичным путем возможно исключить с разомкнутого контура регулирования и все коэффициенты усиления, а для устранения статической ошибки ввести в него интегрирующий элемент с малой постоянной.

Таким образом, исходный разомкнутый контур регулирования удастся заменить результирующим контуром, который имеет общий коэффициент

усиления, равный $\frac{1}{K_{\ddot{a}\ddot{a}}}$ (ОС предусматривается не единичной), но

обладающим астатизмом первого порядка и обеспечивающим высокое быстродействие, благодаря малости постоянных времени, оставшихся некомпенсированными.

То есть, желаемая передаточная функция разомкнутой системы имеет вид (настройка на модульный оптимум):

$$W_{\delta.\omega \ddot{a}\ddot{a}}(p) = W_{\text{дл}}(p) \cdot W_i(p) = \frac{1 / K_{\ddot{a}\ddot{a}}}{2\dot{\Delta}_\mu p (\dot{\Delta}_\mu p + 1)} \quad (3.12)$$

Тогда передаточная функция регулятора будет иметь вид:

$$\begin{aligned} W_{\text{РС}}(p) &= \frac{W_{\delta.\omega \ddot{a}\ddot{a}}(p)}{W_i(p)} = \frac{\frac{1 / K_{\ddot{a}\ddot{a}}}{2\dot{\Delta}_\mu p (\dot{\Delta}_\mu p + 1)}}{\frac{k_{i \times} \cdot k_{\ddot{a}} \cdot k_{i \lambda \bar{N}}}{(\dot{\Delta}_\mu p + 1) \cdot (T_M T_Y p^2 + T_M p + 1)}} = \\ &= \frac{(\dot{\Delta}_\mu p + 1) \cdot (T_M T_Y p^2 + T_M p + 1)}{K_{\ddot{a}\ddot{a}} 2\dot{\Delta}_\mu p (\dot{\Delta}_\mu p + 1) \cdot k_{i \times} \cdot k_{\ddot{a}} \cdot k_{i \lambda \bar{N}}} = \frac{(T_M T_Y p^2 + T_M p + 1)}{2\dot{\Delta}_\mu p \cdot k_{i \times} \cdot k_{\ddot{a}} \cdot k_{i \lambda \bar{N}} \cdot K_{\ddot{a}\ddot{a}}} \end{aligned} \quad (3.13)$$

где $\dot{\Delta}_\mu$ - является малой, некомпенсированной постоянной времени.

Очевидно, что данная передаточная функция является пропорционально-интегральной (ПИ - регулятором) с соответствующими коэффициентами усиления пропорциональной \hat{e}_i , интегральной \hat{e}_\int частей регулятора.

Составляющие ПИ регулятора давления определяются:

$$\begin{aligned} \hat{e}_i &= \frac{T_M}{2 \times k_{i \times} \times k_{\ddot{a}} \times k_{i \lambda \bar{N}} \times K_{\ddot{a}\ddot{a}}} = \frac{0,025}{2 \times 3,125 \times 3,14 \times 0,693 \times 0,157} = 0,012, \\ K_{\text{И}} &= \frac{1}{2 \times T \times k_{\text{нч}} \times k_{\text{д}} \times k_{\text{нас}} \times K_{\text{дн}}} = \frac{1}{2 \times 0,01 \times 3,125 \times 0,693 \times 0,157} = 1,47 \end{aligned}$$

Подставив числовые значения, получим:

$$W_{\text{РС}}(p) = 0,012 + \frac{1,47}{p}$$

3.7. Исследование динамики САУ насосной установки

Для моделирования системы управления насосной установкой воспользуемся приложением SIMULINK пакета прикладного программного обеспечения MATLAB 7.1.

Следует отметить тот факт, что при реальных условиях работы пуск насосной установки, изменение давления в потребительской сети, не происходит скачкообразно, а достаточно плавно и длительно. Целью данного раздела является исследование работы установки в критических режимах работы, проверка правильности синтеза регулятора. Исследование переходных процессов в системе стабилизации давления проводим с использованием упрощенной модели АД и учетом постоянной времени насоса. Для исследования динамики системы в приложении Simulink разработана модель насосной установки, позволяющая проводить моделирование с учетом и без учета ограничений регулятора давления и с возможностью подачи на вход системы задания различного вида. Схема модели САУ насосной установки приведена на Рис. 6.1.

Проанализируем данную систему в следующих режимах без ограничения регулятора давления и с ограничением:

- Плавный пуск от задатчика интенсивности ;

В данном дипломном проекте принято, что влияние гидросети на АД учитывается ступенчатым характером

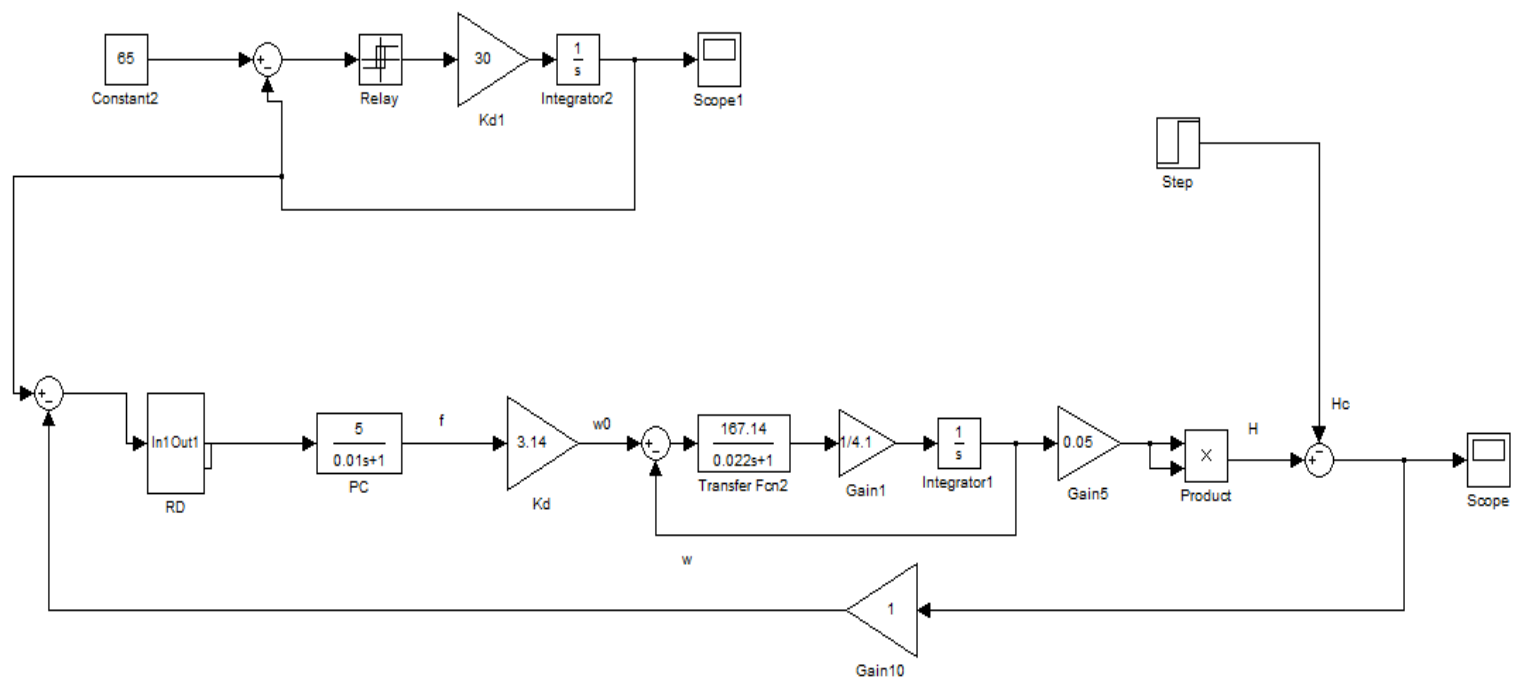


Рис. 3.7 - Схема модели САУ насосной установки

Перерегулирование:

$$\sigma = \frac{70-64}{64} \times 100\% = 9\%$$

Динамическое падение давления при при набросе нагрузки:

$$\Delta H_{\text{дв}} \% = \frac{\Delta H}{H_{\text{сн}}} \cdot 100\% = \frac{65-64}{65} \cdot 100\% = 1,5 \%$$

Время восстановления напора:

$$t_{\text{в.с}}=1.5$$

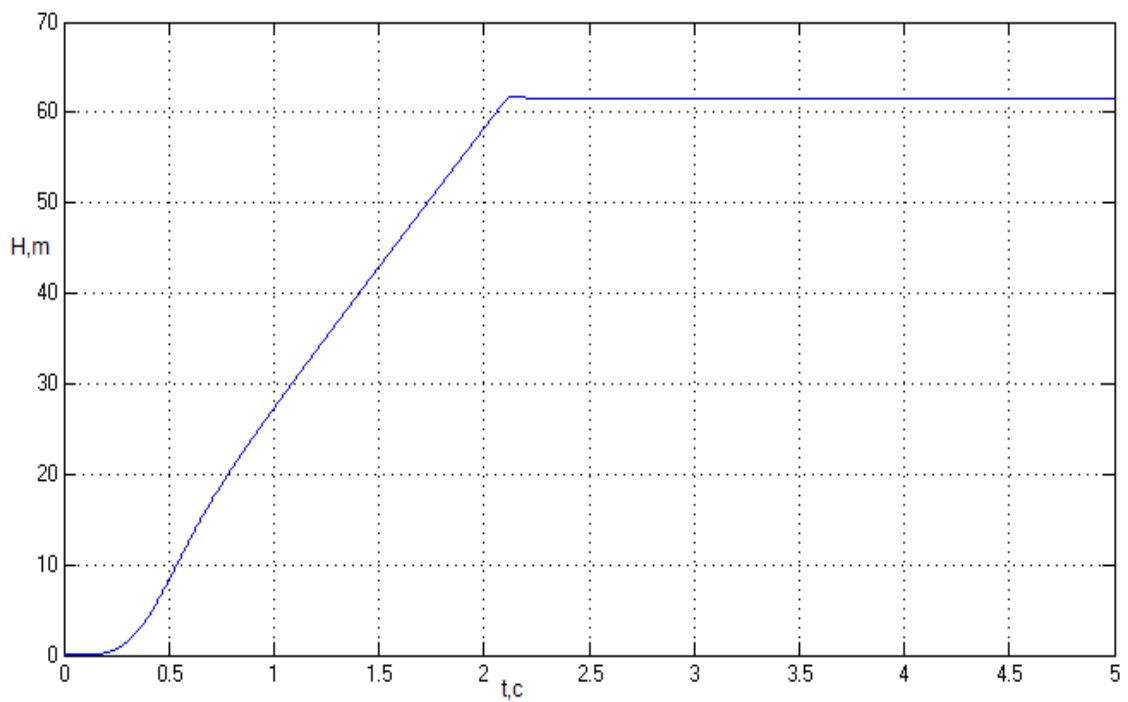


Рис. 3.8 - Графики переходного процесса изменения давления, при реакции на плавное нарастание сигнала задания с учетом ограничений на выходе регулятора давления и наброса нагрузки .

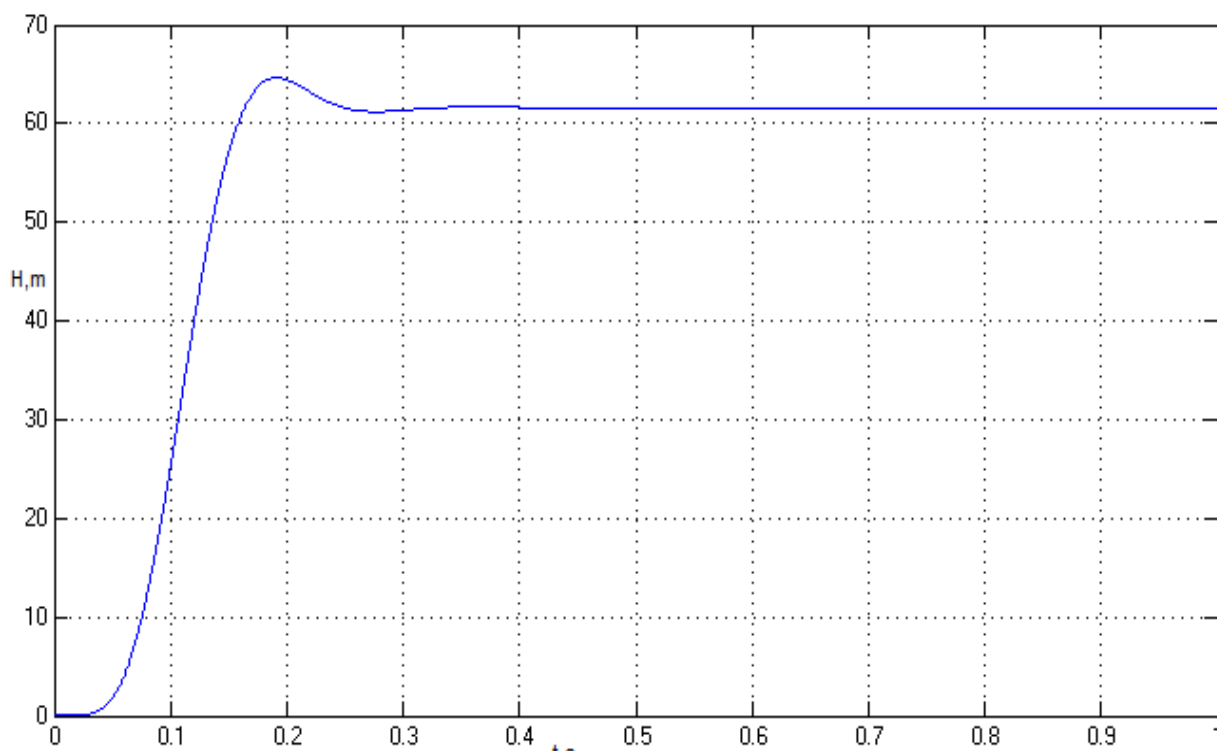


Рис. 3.10 - График переходного процесса изменения давления, при реакции на скачок сигнала задания с учетом ограничений на выходе регулятора давления и набрось нагрузки.

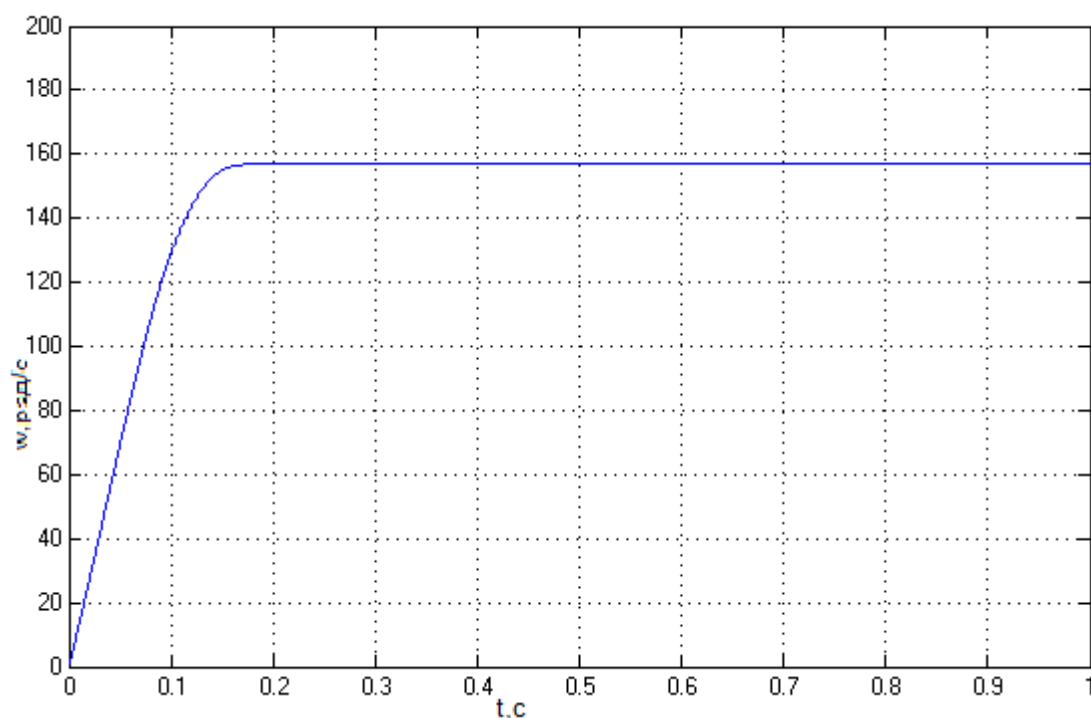


Рис. 3.11 – График переходного процесса изменения скорости, при реакции на скачок сигнала задания без учета ограничений на выходе регулятора давления и набрось нагрузки .

Вывод

Целью данного раздела является исследование работы установки в критических режимах работы, проверка правильности синтеза регулятора. Исследование переходных процессов в системе стабилизации давления проводим с использованием упрощенной модели АД и учетом постоянной времени насоса. Для исследования динамики системы в приложении Simulink разработана модель насосной установки, позволяющая проводить моделирование с учетом и без учета ограничений регулятора давления и с возможностью подачи на вход системы задания различного вида. Схема модели САУ насосной установки приведена на Рис. 6.1.

Проанализируем данную систему в следующих режимах без ограничения регулятора давления и с ограничением:

- Плавный пуск от задатчика интенсивности ;

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Введение.

В современных условиях жизни, введения в эксплуатацию жилых комплексах не обходимо обеспечивать комфортные и безопасные условия жизни для жильцов комплекса.

В дипломном проекте разработана система автоматизации насосной установки станции подкачки воды жилого комплекса. Практическое значение результата проектирования заключается в поддержании постоянного напора в водопроводной магистрали жилого комплекса, повышение безопасности эксплуатации и срока службы системы водоснабжения сети. Кроме того выбрана система привода, обеспечивающая экономию электроэнергии потребления. Согласноих одних даннях рассчитаны параметры системыдвигатель – частотный преобразователь.

Для установления экономических преимуществ внедрения частотного электропривода насосной установки не обходимо опеределить:

- объем капитальных затрат
- сумму эксплуатационных затрат
- показатели экономической эффективности

4.1. Расчет капитальных затрат.

При определении величины проектных капиталовложений ($K_{пр}$) воспользуюсь формулой:

$$K_{пр} = K_{об} \left(\sum_{i=1}^k C_i \right) + Z_{тзс} + Z_{м} + Z_{н} + Z_{пр} = 131400 + 1980 = 133380, \text{ грн (4.1)}$$

где $K_{об} \left(\sum_{i=1}^k C_i \right)$ – стоимость приобретения электрооборудования;

k - количество необходимых комплектующих элементов, ед.;

$Z_{тзс}$ – транспортно – заготовительные и складские расходы, грн;

$Z_{м}$ – затраты на монтажные работы, грн;

$Z_{н}$ – затраты на наладочные работы, грн;

$Z_{пр}$ – прочие единовременные вложения денежных средств, грн.

Сводка капитальных затрат

Таблица 4.1

№ п/п	Наименование технических средств (комплектующих изделий)	Количество	Цена за единицу, грн.	Сумма, грн.
1	Двигатель 5AM280S4 УЗ	1	16200	16200
2	Преобразователь OMRON	1	83700	83700
3	Насос	1	31500	31500
	Всего			131400

Цена на оборудование двигателя ООО "УКРЭЛЕКТРОИНВЕСТ" " от 01.02.2018

Источники информации <http://ukrelektroinvest.com.ua/p4814330-preobrazovateli-chastoty-omron.html>

$$\begin{aligned} Z_{м(н)} &= \sum (C_i \times a_i \times t_i) \times K_{\partial} \times K_{см} \times K_{пр} \\ &= 2 \times 32 \times 20 + 2 \times 35 \times 10 = 1980, \text{ грн} \end{aligned} \quad (4.2)$$

где $Ч_1$ – численность работников 3-го разряда, необходимых для выполнения монтажных и наладочных работ, чел.

a_1 – часовая тарифная ставка рабочего 3-го разряда, грн.

t_i – время, необходимое для выполнения монтажных и наладочных работ, час.

K_d – коэффициент, учитывающий размер доплат;

$K_{см}$ – коэффициент, учитывающий отчисления на социальные мероприятия;

$K_{пр}$ – коэффициент, учитывающий прочие затраты на осуществление монтажных и наладочных работ.

4.2. Расчет эксплуатационных расходов.

Расчет амортизационных отчислений.

Текущие затраты на эксплуатацию и обслуживание объекта проектирования (проектный и базовый варианты) за год:

$$C_{пр} = C_a + C_3 + C_c + C_T + C_э + C_{пр} = \\ = 26676 + 18068 + 124382 + 5145 = 169126 \text{ ,грн}$$

$$C_{баз} = C_a + C_3 + C_c + C_T + C_э + = \\ = 19980 + 28444 + 420597 = 469021 \text{ ,грн}$$

$$\Delta Э = C_{баз} - C_{пр} = 469021 - 169126 = 299895 \text{ ,грн.}$$

C_a - амортизационные отчисления, грн;

C_3 - заработная плата обслуживающего персонала, грн;

C_c - отчисления на социальные мероприятия от заработной платы, грн;

C_T - затраты на тех. обслуживание и текущий ремонт оборудования, грн;

$C_э$ - стоимость электроэнергии, потребляемой объектом проектирования, грн;.

4.3. Расчет амортизационных отчислений.

Амортизационные отчисления

Таблица 4.2

№	Наименование показателей	Капитальные затраты, грн.	Норма амортизации, %	Сумма амортизации, грн.
1.	Проектный вариант	133380	20	26676
2.	Базовый вариант	99900	20	19980

4.4. Определение годовых затрат на техническое обслуживание и текущий ремонт.

Расходы на текущий ремонт аппаратуры автоматики и систем автоматизации можно рассчитать по формуле:

$$\begin{aligned}
 Z_{\text{т.р.пр}} &= \sum_{i=1}^n \left(R_i \cdot t_i \cdot R_{\Sigma i} + \frac{S_i \cdot \Pi_i}{T_i} \cdot T_{\Phi} \right) = \\
 &\left(32 \cdot (1.2 \cdot 2 + 7 \cdot 1 + 15 \cdot 0.1) \cdot 3.1 \cdot 6 + \frac{5000 \cdot 5}{131400} \cdot 8640 \right) + \\
 &\left(35 \cdot (1.2 \cdot 4 + 7 \cdot 2 + 15 \cdot 0.2) \cdot 6.2 \cdot 20 + \frac{20000 \cdot 2}{70080} \cdot 8640 \right) = 18068, \text{ грн}
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{\text{т.р.бз}} &= \sum_{i=1}^n \left(R_i \cdot t_i \cdot R_{\Sigma i} + \frac{S_i \cdot \Pi_i}{T_i} \cdot T_{\Phi} \right) = \\
 &\left(32 \cdot (1.2 \cdot 2 + 7 \cdot 1 + 15 \cdot 0.1) \cdot 3.1 \cdot 10 + \frac{8000 \cdot 2}{105100} \cdot 8640 \right) + \\
 &\left(32 \cdot (1.2 \cdot 2 + 7 \cdot 1 + 15 \cdot 0.1) \cdot 3.1 \cdot 5 + \frac{3000 \cdot 2}{105100} \cdot 8640 \right) = 28444, \text{ грн}
 \end{aligned}$$

где n - число устройств автоматики, подлежащих ремонту;

R_i - часовая ставка рабочих, выполняющих ремонт, грн;

t_i - трудоемкость одного ремонта при категории сложности ремонта в одну ремонтную единицу в зависимости от вида ремонта ч/ед.:

m_i - число ремонтов за год (для закрытых электромашин число малых ремонтов – 2, средних – 1, капитальных – 0,1);

R_{Σ} - суммарная категория сложности ремонта в зависимости от вида электрооборудования:

S_i - стоимость однотипных заменяемых элементов, грн.;

Π_i - количество однотипных заменяемых элементов;

T_i - средний срок службы деталей данного типа, ч.;

T_{ϕ} - число часов работы аппаратуры в год, ч.

4. 5. Расчет стоимости потребленной электроэнергии.

Стоимость затрат активной энергии для двигателя: за 1 кВт - час активной энергии.

Согласно постановлению Кабинета Министров Украины от 15.08.2005 № 745 «О переходе к единым тарифам на электрическую энергию, отпускаемую потребителям» и постановлением НКРЭ от 26.04.2013 № 524 розничные тарифы на электроэнергию для потребителей (кроме населения) с учетом предельных уровней при постепенном переходе к формированию единых розничных тарифов для потребителей на территории Украины 2018 года составят без НДС :163,754 коп за 1 кВт – час:

Стоимость годовых затрат активной энергии:

Для базового изделия:

$$C_{\text{зб}} = C_{\text{в}} \cdot W = (1.64 \cdot 1,2) \cdot 213718 = 420597, \text{ грн/год}$$

Для нового изделия:

$$C_{\text{эпр}} = C_{\text{в}} \cdot W = 63202.45 \cdot 1.968 = 124382, \text{ грн/год}$$

4.6. Определение годовой экономии от внедрения объекта проектирования.

Полная годовая экономия от внедрения системы автоматизации насосной установки определяется как экономия эксплуатационных на затратах:

$$\Delta \mathcal{E} = C_{\text{баз}} - C_{\text{пр}} = 469021 - 169126 = 299895, \text{ грн.} \quad (4.4)$$

4.7. Определение и анализ показателей экономической эффективности.

Коэффициент эффективности (доходности) капитальных затрат E_p показывает, сколько гривен дополнительной прибыли (экономии) приносит одна гривна капитальных затрат:

$$E_p = \mathcal{E}/K = 299895/133380 = 2.24 \text{ доли ед.,} \quad (4.5)$$

где \mathcal{E} – общая годовая экономия от внедрения объекта проектирования, грн.;

K – капитальные затраты по варианту, вызвавшие экономию, грн.

Срок окупаемости капитальных затрат T_p показывает, за сколько лет они окупятся за счет общей экономии от внедрения варианта:

$$T_p = K/\mathcal{E} = 133380/299895 = 0,44 \text{ лет} \quad (4.6)$$

Проект (проектный вариант) капитальных вложений признается целесообразным, поскольку:

$$E_p > E_k; \quad (4.7)$$

$$2.24 > E_k.$$

Вариант признается экономически целесообразным, так как расчетный коэффициент эффективности превышает величину банковской кредитной ставки:

$$E_p > (N_{\text{кр}} + N_{\text{инф}})/100 \quad (4.8)$$

$$2.24 > (19 + 12)/100 = 0,31$$

где $N_{\text{кр}}$ – банковская кредитная ставка, %;

$N_{\text{инф}}$ – годовой уровень инфляции, %.

Вариант признается экономически целесообразным, поскольку расчетный коэффициент эффективности превышает годовой уровень доходности базового варианта:

$$E_p > (N_{\text{деп}} - N_{\text{инф}})(1 - N_{\text{пр}}/100)/100, \quad (4.9)$$
$$2.24 > (23 - 12)(1 - 19/100)/100 = 0,089,$$

где $N_{\text{деп}}$ – годовая депозитная ставка, %;

$N_{\text{инф}}$ – годовой уровень инфляции, %;

$N_{\text{пр}}$ – ставка налога на прибыль, %.

Нормативное значение коэффициента эффективности можно определить также исходя из приемлемой для предприятия индивидуальной нормы доходности:

$$E_n = 1/T_{\text{ож}} = 1/5 = 0,2 \quad (4.10)$$

где $T_{\text{ож}}$ – ожидаемый, приемлемый для предприятия срок окупаемости капитальных вложений, лет.

При этом вариант признается экономически целесообразным при условии

$$E_p > 1/T_{\text{ож}} \quad (4.11)$$
$$2.24 > 0,2$$

Из сравниваемых вариантов выбирается тот, который обеспечивает наибольшее значение E_p . Целесообразнее выбрать проектный вариант, расчетный срок окупаемости капитальных затрат T_p которого составляет:

$$T_p = 0,44 \text{ лет.}$$

Сравнительная оценка технико-экономических показателей (Табл 4.3)

Таблица 4.3

№ п/п	Наименование показателей	Ед. измерения	Проектный вариант	Базовый вариант	Изменение по сравнению с базовым(±)
					тыс. грн.
1	Капитальные затраты	тыс. грн.	133380	99900	33480
2	Эксплуатационные расходы,	тыс. грн.	169126	469021	-299895
	всего				
	в том числе:				
3	* амортизационные отчисления	тыс. грн.	26676	19980	6696
4	*текущий ремонт и обслуживание		18068	28444	-10376
5	Расчетный коэффициент эффективности	доли ед.	2,24		
6	Расчетный срок окупаемости капитальных вложений	лет	0,44		
7	Экономия электроэнергии	тыс. грн.	124382	420597	-296215

Вывод

Поскольку все условия,необходимые для выбора проектного варианта, выполняются,то можно говорить о целесообразности внедрения варианта,расчетный срок окупаемости капитальных затрат которого составянт 0,45года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В дипломном проекте разработана система автоматизации насосной установки станции подкачки воды жилищного комплекса. Система разработана на базе асинхронного электропривода с частотным управлением.

Исходя из заданных величин давления и затраты воды, была рассчитана мощность электродвигателя насоса и выбран двигатель типа 5AM280S4 УЗ, а так же частотный преобразователь типа 3G3HV-B11K японской фирмы OMRON.

Синтезированная система управления с ПИ регулятором давления.

Методом цифрового моделирования в программном пакете Matlab проведено исследования динамических режимов САК.

Техническая реализация разработанной системы управления выполнена на базе частотного преобразователя 3G3HV-B11K.

Результаты моделирования показали, что разработанная система обеспечивает заданные характеристики стабилизации давления воды при изменении затрат воды.

Изложенное выше разрешает сделать вывод, что задание на дипломный проект выполнено. Спроектированный электропривод удовлетворяет требованиям электроприводов насосных установок по качеству переходных процессов и быстродействию.

В проекте были рассмотрены

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лобачев П. В. Насосы и насосные станции. М.: Стройиздат. 1990.
2. СНиП 2.04.02-84: Насосные станции. Электрооборудование, технологический контроль, автоматизация и системы управления.
3. Попкович Г. С., Гордеев М. А. Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения. М.: Высш. шк. 1986
4. Лезнев Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных установках. М.: ИК «Ягорба»-Биоинформсервис, 1998.
5. Возможности использования современного регулируемого электропривода в системах водоснабжения. //www.privod.ru
6. Дмитриенко Ю. А. Регулируемый электропривод насосных агрегатов. Кишинев: Штиинца, 1985.
7. Преобразователь частоты с многомоторной функцией управления.// www.privod.ru
8. Башарин А. В., Новиков В. А., Соколовский Г. Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. - Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. — 392 с, ил.
9. Регулируемый электропривод в насосных установках.// www.privod.ru
10. Каталог продукции ОАО «ВЛАДИМИРСКИЙ ЭЛЕКТРОМОТОРНЫЙ ЗАВОД».// www.электродвигатель.net.
11. ОАО "Ливгидромаш" Руководство по эксплуатации Н03.3.302.00.00.000 РЭ
12. Частотные преобразователи OMRON серии SYSDRIVE 3G3HV //www.omron.ru
13. Датчики давления Метран-100// www.metran.com
14. Коренькова Т.В., Михайличенко Д.А., и др. Исследование системы ПЧ-АД-Насос-Гидросеть. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Випуск 2/2003(19), с. 377.

15. Н.Г. Попович, Н.Г. Борисюк и др. «Теория электропривода» — К.: Выща шк., 1993. 494 с.: ил
16. Москаленко В. В. Электрический привод: Учебн. для электротехн. спец. техн. -М.: Высш. шк., 1991. -430 с: ил.
17. Асинхронные электродвигатели// www.privod.ru/engines
18. Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования / под ред. В.И. Круповича, Ю.Г. Барыбина, М.Л. Самовера. – М.: Энергоиздат, 1981.
19. Справочник по автоматизированному электроприводу. Под ред. В.А.Елисеева и А.В.Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – с.
20. Паспорт задвижки клиновой с выдвижным шпинделем
ПТ 13070-150-ПС-12.
21. Онищенко Г. Б., Юньков М. Г. Электропривод турбомеханизмов. М, «Энергия», 1972, 240с.
22. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання / К.Н.Ткачук, М.О.Халімовський, В.В.Зацарний та ін. – К.: Основа, 2006 – 448 с.
23. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник — Львів: УАД, 2006 – 336 с.
24. Жидецький В.Ц., Джигирей В.С., Сторожук В.М. та ін. Практикум із охорони праці. Навч. посібник / За ред. Жидецького В.Ц. – Львів: Афіша, 2000. – 352 с.
25. Купчик М.П., Гандзюк М.П., Степанець І.Ф. та ін. Основи охорони праці. – К: Основа, 2000. – 416 с.
26. Трахтенберг І.М., Коршун М.М., Чебанова О.В. Гігієна праці та виробнича санітарія. – К.: 1997. – 464 с.