

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество
АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ

кафедра электрических машин и электропривода

«Допущен к защите»

Зав. кафедрой ЭМЭП

Калиева К.Ж. к.т.н

(Ф.И.О., ученая степень, звание)

« » 2019 г.

(подпись)

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: Автоматизированный электропривод центробежного насоса ИПС

Выполнил (а) Каримов А.А.
(Фамилия и инициалы студента)

ЭЭ (ЭАТ) - 15 - 4
группа

специальность 5В071800 - Электроэнергетика

Научный руководитель Мустарши М.А. проф.
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)

ММ «01» 06 2019 г.
(подпись)

Рецензент: Ақмаңбетов Д.Б., к.т.н, доцент
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)

Д.Б. « » 2019 г.
(подпись)

Консультанты:

по экономической части:

Жакупов А.А. к.т.н., проф.

(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)

Ж «27» 05 2019 г.
(подпись)

по безопасности жизнедеятельности:

Сапанова Т.С. к.т.н, доцент

(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)

Т.С. «28» мая 2019 г.
(подпись)

Нормоконтролер: Жармоңбенова М.Б. стар. пр.

(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)

М.Б. «12» 06 2019 г.
(подпись)

Алматы 2019 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество
АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ

Институт Электроэнергетики и электротехники
Специальность 5В071800 - Электроэнергетика
Кафедра электрических машин и электропривода

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Студент Каримов Аян Алмагелдиевич
(фамилия, имя, отчество)

Тема работы Автоматизированный электропривод центробежного насоса ИПС

утверждена приказом ректора № 124 от «26» 10 2018 г.

Срок сдачи законченной работы «25» мая 2019 г.

Исходные данные, требуемые параметры результатов и исходные данные

Для автоматизации электропривода центробежного насоса ИПС были рассчитаны характеристики: напор, производительность, размер и потери напора.

Перечень вопросов подлежащих разработке в дипломной работе или краткое содержание:

1. Расчет насоса
2. Расчет номер установки
3. Расчет уменьшение производительности
4. Выбор системы регулирования
5. Безопасность и надежность
6. Экономическая часть

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Схема насоса
2. Схема АД
3. Схема регулятора
4. Механические детали устройства

Рекомендуемая основная литература

Ф.Фреер, Ф.Орттенбургер Введение в электронную технику регулирования - М.: «Энергия» 1973.

Слежановский О.В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями - М.: «Энергоатомиздат» 1983.

Правила устройства электроустановок РК. - Алматы, 2007.

Безопасность жизнедеятельности. Безопасность технологических процессов и производств. Охрана труда. П.П. Кукин, В.Л. Лапин, Н.Л. Пономарев, Н.Н. Сердюк-М: «высшая школа» 2002.

Самсонов В.С., Вяткин М.А. Экономика предприятий энергетического комплекса: Учеб. для вузов. - 2-е изд. - М.: Высш. шк., 2003.

Консультанты по работе с указанием относящихся к ним разделов

Раздел	Консультант	Сроки	Подпись
БЖД	Саматова Т.С.	10.04 - 30.05.19	Саматова
Экономическая часть	Жапаров А.А.	15.04 - 27.05.19	Жапаров
Основная часть	Мустафин М.А.	15.03 - 02.06.19	Мустафин

Г Р А Ф И К
подготовки дипломной работы

№ п/п	Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления руководителю	Примечание
1	Расчет насоса	18.03.19.	выполнено
2	Расчет потерь установки	19.03.19	выполнено
3	Расчет эффективности производства	25.03.19	выполнено
4	Выбор системы реуцирования	10.04.19	выполнено
5	Безопасность производства	19.04.19.	выполнено
6	Экономическая часть.	22.04.19	выполнено
7			выполнено
8			выполнено
9			выполнено
10			выполнено
11			выполнено
12			выполнено

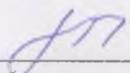
Дата выдачи задания « 26 » 10 2018 г.

Заведующий кафедрой


(подпись)

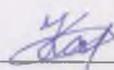
Калиева К.Ж.
(Фамилия и инициалы)

Руководитель


(подпись)

Мустафин М.А.
(Фамилия и инициалы)

Задание принял к исполнению


(подпись студента)

Каримов А.А.
(Фамилия и инициалы)

Аннотация

В дипломной работе представлены результаты автоматизированного электропривода центробежного насоса в нефтеперекачивающих станциях.

Проведен расчет мощности, напора, размера, производительности, частоты и потери напора в автоматизированном электроприводе центробежного насоса. Расчеты были проведены на базе «Mathcad» и разработаны модели отдельных элементов электропривода.

В дипломной работе рассмотрены вопросы относящиеся к безопасности жизнедеятельности труда с учетом заземляющего устройства и системы вентиляции, к тому же проведена экономический анализ целесообразности проекта.

Аңдатпа

Дипломдық жұмыста мұнай сорғы станцияларында центрифугалық сорғының автоматтандырылған электр жетегінің нәтижелері келтірілген.

Автоматты электр центрифугалық сорғыларда электр қуатын, қысымын, өлшемін, жұмысын, жиілігін және қысымын жоғалтуын есептеу. Есептеулер «Mathcad» базасында жүргізілді және электр жетегінің жеке элементтерінің үлгілері әзірленді.

Диссертациялық жұмыста жобаның орындылығы туралы экономикалық талдау, сонымен қатар, жерге орналастыру құрылғысы мен желдеткіш жүйесін ескере отырып, еңбек қауіпсіздігі мәселелерін қарастырды.

Annotation

The thesis presents the results of an automated electric drive of a centrifugal pump in oil pumping stations.

The calculation of power, pressure, size, performance, frequency and pressure loss in an automated electric centrifugal pump. Calculations were carried out on the basis of «Mathcad» and models of individual elements of the electric drive were developed.

In the thesis work addressed issues relating to the safety of labor, taking into account the grounding device and ventilation system, in addition, an economic analysis of the feasibility of the project.

Содержание

	Введение	9
1	Основные показатели насосной установки	10
1.1	Производительность и напор установки	10
1.2	Выбор типоразмера насоса и определение потребляемой мощности	10
1.2.1	Потребляемая мощность насоса	11
1.2.2	Определение мощности мотора	11
2	Напорные характеристики насоса и трубопровода	13
2.1	Напорная характеристика насоса	13
2.2	Напорная характеристика трубопровода	14
2.3	Параллельная и последовательная эксплуатация насосов	15
2.4	Условия всасывания и подачи самотёком	17
2.4.1	Показатель NPSH насоса	17
2.4.2	Показатель NPSH установки	17
2.5	Потери напора	19
2.5.1	Потери напора H_v в прямых трубопроводах	19
2.5.2	Потери напора в пластмассовых трубах	21
2.5.3	Потери напора в прямолинейных трубопроводах для вязких жидкостей	21
2.5.4	Потери напора H_v в арматуре и фитингах	22
3	Изменение производительности насосных агрегатов	24
3.1	Обточка рабочих колёс	24
3.2	Изменение частоты вращения	24
3.3	Перекачка вязких жидкостей	26
4	Выбор системы регулируемого электропривода центробежного насоса	26
4.1	Способы и методы решения проблем энергосбережения на насосных станциях транспортировки нефти	41
4.2	Анализ систем частотного регулирования мощных электроприводов, задачи создания специальных схем	45
5	Непосредственные преобразователи частоты в системе автоматизированного электропривода	50
5.1	Принцип действия непосредственного преобразователя частоты	50
5.2	Способы формирования выходного напряжения НПЧ	51
6	Безопасность жизнедеятельности	61
6.1	Расчет заземления электроаппаратуры НПС	61
6.2	Расчет вентиляционной системы насосной	71
6.3	Вывод по части безопасности жизнедеятельности труда	73
7	Экономическая часть	74
7.1	Методы оценки эффективности новой техники в энергетике.	74
7.2	Расчет эффективности инвестиций	76

7.3	Метод дисконтированного срока окупаемости	81
7.4	Вывод по части экономической части	83
	Заключение	84
	Список литературы	85

Введение

Нефтеперекачивающая станция (НПС) – это одно из главных частей любого нефтепровода. НПС представлен комплексом сооружений, а также оборудования для обеспечения приема, накопления, а также перекачки нефти по магистральному нефтепроводу. Главная функция любой НПС – перенести нефть из трубопровода, где низкий напор, насосами увеличить его и ввести в трубопровод с уже высоким напором. Продукция делится по своему назначению на виды с ёмкостью и нефтеперекачивающие станции без емкости.

Все объекты на нефтеперекачивающих станциях делят на две группы. К первой группе объектов относятся все объекты технологического назначения. Вторая же группа объектов – объекты вспомогательного, а также подсобно-хозяйственного значения.

Перекачивающие станции нефтепроводов и нефтепродуктопроводов оборудуются центробежными насосами с автоматизированным электроприводом. Центробежные насосы — это насосные установки, в основанная на работе движущей центробежной силе. Центробежные насосы чаще всего снабжены лопастными колесами различного типа. В этот класс насосов можно включить любые лопастные установки в том числе: консольные, осеводиagonальные. Однако на практике к центробежным насосам для нефтеперекачивающих станции относят традиционные лопастные установки, где основной механизм – вращающееся на валу лопастное колесо. Подача применяемых в настоящее время магистральных насосов достигает 11100 м³/ч.

Центробежные насосы нефтеперекачивающих станции используют для перекачивания незагрязненных механическими и газовыми примесями нефтепродуктов. Содержание твердых включений в перекачиваемых средах не более 0,6% по массе и размером не более 0,9 мм. Поэтому центробежные насосы в нефтяной промышленности ставятся в местах, где перекачиваемые жидкость уже очищена, однородна, чаще всего в магистральных транспортных узлах нефтепроводов.

1 Основные показатели насосной установки

1.1 Производительность и напор установки

Производительностью насоса Q является подаваемый в единицу времени полезный объёмный расход, измеряемый в $\text{м}^3/\text{с}$ (встречаются так же л/с и $\text{м}^3/\text{ч}$). Водосброс и утечки не относятся к производительности.

Напор насоса H есть ни что иное как сообщённая перекачиваемой жидкости полезная механическая работа, отнесённая к силе тяжести подаваемой жидкости и выраженная в метрах. Величина напора не зависит от плотности перекачиваемой жидкости ρ , а это значит, что центробежный насос перекачивает жидкости независимо от плотности ρ с одним и тем же по величине напором H . Плотность ρ определяет лишь давление в насосе и оказывает влияние на его потребляемую мощность P :

$$p = \rho \cdot g \cdot H. \quad (1.1)$$

Напор установки складывается из следующих составных частей (рисунки 1.1 и 1.2):

- H_{geo} , геодезической высоты подачи равна разнице высот между уровнями жидкости со всасывающей и с напорной стороны. В случае, если нагнетательный трубопровод установлен выше уровня воды, отсчёт производится от оси трубопровода;

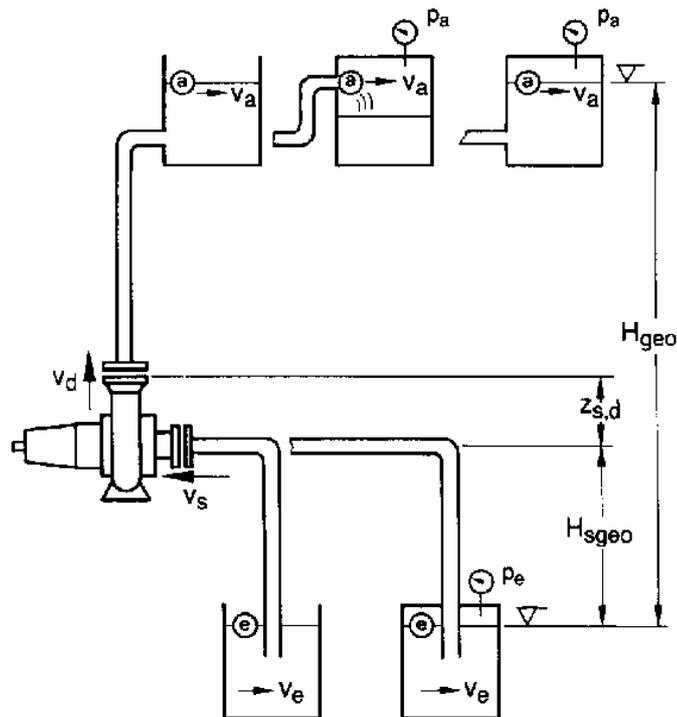


Рисунок 1.1 - Насосная установка при эксплуатации в режиме всасывания

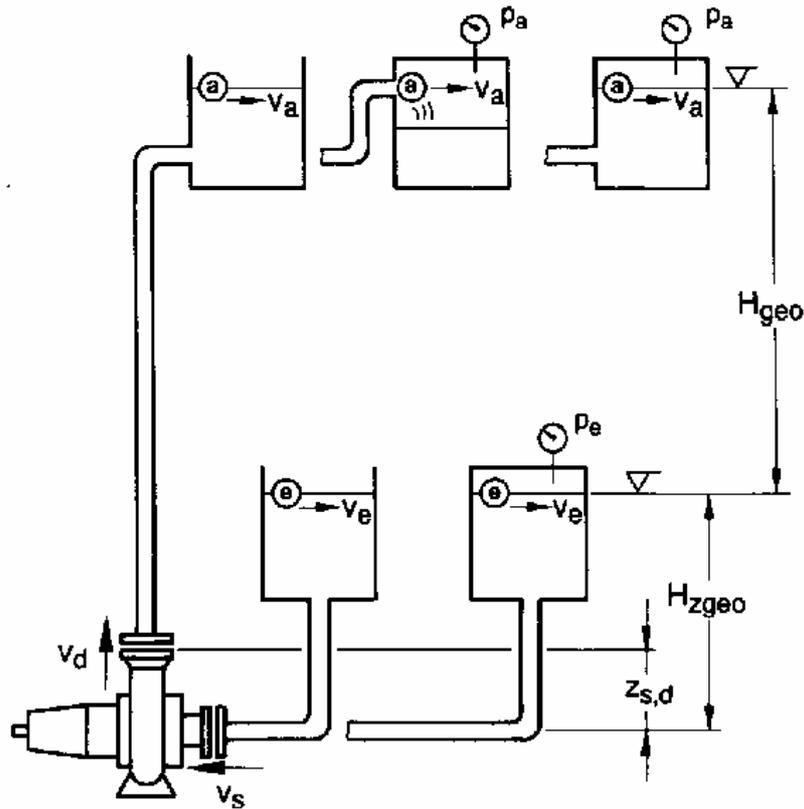


Рисунок 1.2 - Насосная установка при подводе самотёком

- $\frac{p_a - p_e}{\rho * g}$, разницы давлений между уровнями жидкости со всасывающей и с напорной стороны при закрытых ёмкостях;
- ΣH_y , суммы всех потерь напора (сопротивления в трубопроводах, сопротивления арматуры и фасонных деталей и т.д. во всасывающем и нагнетательном трубопроводах);
- $\frac{v_a^1 - v_e^1}{1g}$, разницы скоростей течения в ёмкостях.

Исходя из этого, напор установки H_A рассчитывается следующим образом

На практике можно пренебречь разницей скоростей течения. Таким образом получается для закрытых ёмкостей а для открытых ёмкостей

Исходя из этого, напор установки H_A рассчитывается следующим образом:

$$H_A = H_{geo} + \frac{p_a - p_e}{\rho * g} + \frac{v_a^1 - v_e^1}{1g} + \Sigma H_y. \quad (1.2)$$

На практике можно пренебречь разницей скоростей течения. Таким образом получается для закрытых ёмкостей:

$$H_A = H_{geo} + \frac{P_a - P_e}{\rho * g} + \Sigma H_y. \quad (1.3)$$

А для открытых ёмкостей:

$$H_A = H_{geo} + \Sigma H_y. \quad (1.4)$$

При приводах с электромоторами трёхфазного переменного тока (асинхронные электродвигатели с короткозамкнутыми роторами) установлены следующие частоты вращения насосов:

Таблица 1.1 – Характеристика частоты вращения АД

Число полюсных пар; Частота	2	4	6	8	10	12	14
	Базисные частоты вращения характеристических кривых 1/мин						
При 50 Гц	2900	1450	960	725	580	480	415
При 60 Гц	3500	1750	1160	975	700	580	500

На практике моторы работают всё же с незначительно отклонёнными, в большинстве случаев с увеличенными, частотами вращения, которые учитываются изготовителем насосов при согласовании с заказчиком во время расчёта параметров.

При регулируемой частоте вращения, при применении редукторов или ремённой передачи, возможны так же и другие частоты вращения.

1.2 Выбор типоразмера насоса и определение потребляемой мощности

Необходимые для выбора типоразмера насоса данные производительность Q и напор H желаемой рабочей точки известны, точно так же известна частота сети. Таким образом можно определить типоразмер насоса и частоту вращения при помощи семейства характеристик (может называться так же сборным семейством характеристик)

После этого определяются при помощи отдельных характеристических кривых остальные параметры выбранного насоса, такие как коэффициент полезного действия η , потребляемая мощность P и кавитационный запас NPSH.

Если не имеется особых причин для иного отбора, то рабочая точка выбирается в непосредственной близости от Q_{opt} (производительность в точке с наилучшим КПД).

$Q = 25$ л/сек (= 90 м³/час):

$H = 80$ м.

Частота 50 Гц.

Перекачиваемая жидкость — 60%-ая серная кислота (индекс sch) при:

- плотности $\rho_{sch} = 1,5$ кг/дм³;

- температуре $t_s = 20^\circ\text{C}$;

- кинематической вязкости $\nu_{sch} = 3,8 \cdot 10^{-6}$ м²/с (ρ_{sch} и ν_{sch} из таблиц).

Для данной перекачиваемой жидкости необходимо подобрать стандартный химический насос типоряда СРК. Технические характеристики и характеристические кривые типоряда СРК находятся в брошюрах подбора и характеристических кривых.

Из брошюры характеристических кривых СРК/НРК, при 50 Гц, получим из семейства характеристик для указанных данных следующие типоразмеры:

- СРК 65-250 при $n = 2900$ 1/мин;

- СРК 150-250 при $n = 1450$ 1/мин.

Из соображений экономичности выбираем типоразмер СРК 150-25

1.2.1 Потребляемая мощность насоса

Потребляемая мощность P центробежного насоса есть ни что иное как передаваемая от привода к муфте или валу насоса механическая энергия, она определяется при помощи следующей формулы:

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q}{1000 \cdot \eta} \quad (1.5)$$

где ρ плотность перекачиваемой жидкости кг/дм³;

Q - производительность насоса л/с;

g - ускорение свободного падения $9,8$ м/с²

H - напор м;

η - между 0 и 1 в кг/дм³.

Или же, применяемой на практике формулы:

$$P = \frac{\rho \cdot H \cdot Q}{111 \cdot \eta} \quad (1.6)$$

где ρ плотность перекачиваемой жидкости кг/дм³;

Q - производительность насоса м³/ч;

H - напор м;

111 - переводной множитель (константа).

Потребляемая мощность P в кВт для плотности $\rho = 1000$ кг/м³ может быть также достаточно точно считана непосредственно из характеристических кривых насоса. При другой плотности ρ необходим пересчёт определённой из диаграммы потребляемой мощности.

1.2.2 Определение мощности мотора

Так как на любой установке необходимо учитывать колебания производительности и смещения рабочей точки, которые в свою очередь требуют при определённых обстоятельствах увеличения потребляемой мощности P , а так же если заказчик не указывает особых условий эксплуатации, то на практике, при расчёте типоразмера мотора учитываются следующие коэффициенты запаса мощности:

- до 1,1 кВт примерно 10%;
- от 1,1 до 10 кВт примерно 11%;
- свыше 10 кВт примерно 10%.

При экстремальных колебаниях производительности типоразмер мотора должен выбираться в соответствии с максимальной производительностью, указанной в характеристических кривых, а так же с учётом

- требуемого диаметра рабочего колеса;
- условия $NPSH_{vorh} NPSH_{erf}$;
- допустимых значений P / n для подшипников.

При перекачке жидкостей с повышенным содержанием твёрдых веществ, точно так же как и при перекачке густых веществ, необходимо применение специальных насосов или же специальных рабочих колёс.

2 Напорные характеристики насоса и трубопровода

2.1 Напорная характеристика насоса

В отличие от объёмного насоса, например поршневого, центробежный насос имеет при постоянной частоте вращения ($n = \text{const.}$) изменяющийся, а именно с уменьшением напора H увеличивающийся расход Q . Таким образом насос обладает способностью саморегулирования. В дальнейшем от расхода Q зависят потребляемая мощность P и тем самым КПД η , а так же кавитационный запас $NPSH$ насоса. Форма и взаимосвязь этих величин изображается при помощи характеристических кривых, которые определяют рабочие характеристики центробежного насоса. При отсутствии иных данных, характеристические кривые базируются на плотности ρ и кинематической вязкости ν воды.

На рисунке 1.1 приведены расчет и построение основных рабочих характеристик центробежных механизмов и трубопроводов, зависимости напора от подачи $H(Q)$ – напорных характеристик. Для аналитических расчетов напорные характеристики насоса и трубопровода можно представить в виде

$$H_{H*} = H_{0*} (\omega_*^2 - C_{H*} Q_*^2); \quad (2.1)$$

$$H_{T*} = H_{C*} + Z_* Q_*^2, \quad (2.2)$$

где H_0 - напор насоса при закрытой задвижке ($Q = 0$);
 ω^* - угловая частота вращения рабочего колеса насоса, о.е.;
 H_c – статический напор, обусловленный разностью уровней начала и конца трубопровода, о.е.;
 Z^* - гидравлическое сопротивление трубопровода, о.е.

Программа и расчет напорных характеристик центробежного насоса и трубопровода(Mathcad 11)

$H_c := 0$ статический напор, обусловленный разностью уровней начала и конца трубопровода

$H_0 := 1.3$ напор насоса при закрытой задвижке ($Q=0$)

$C_n := 1 - \frac{1}{H_0}$ коэффициент C_n определяется из условия $H^*=1$ при $Q^*=1$

$H_m(Q) := H_c + 1 \cdot Q^2$ Характеристика трубопровода при полностью открытой задвижке ($Z = 1$)

$H_n(Q) := H_0 \cdot (1 - C_n \cdot Q^2)$ Характеристика насоса

$H_{m1}(Q) := H_c + 2 \cdot Q^2$ Характеристика трубопровода при $Z=1$

$H_{m2}(Q) := H_c + 4 \cdot Q^2$ Характеристика трубопровода при $Z=1$

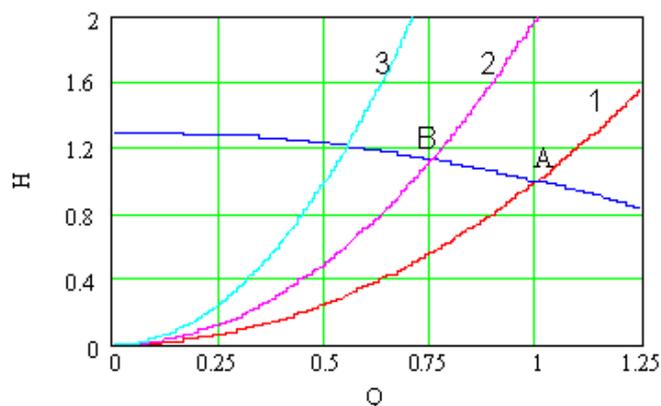


Рисунок 2.1- Кривые центробежного насоса и трубопровода

Коэффициент C_n определяется из условия $H^* = 1$ при $Q^* = 1$:

$$C_H = 1 - \frac{1}{H_{0*}}. \quad (2.3)$$

В случае расчета функции одной переменной (Q^*), задаем фиксированные значения остальных- H_0, ω^*, H_c, C_H и записываем уравнения характеристик насоса и трубопровода (рисунок 2.1).

В зависимости от условий эксплуатации может быть наиболее выгодной либо пологая либо крутая характеристическая кривая. При одинаковой разнице напоров ΔH и крутой характеристической кривой производительность изменяется не так интенсивно как при пологой. Таким образом пологая характеристическая кривая обладает лучшими регулировочными характеристиками.

2.2 Напорная характеристика трубопровода

Требуемый для установки напор H_A , который изображается при помощи характеристической кривой установки (характеристической кривой трубопровода), нанесён на рисунке 1.1 в соответствии с производительностью Q . Характеристическая кривая складывается из статических и динамических составляющих установки. Статические составляющие состоят из геодезической, независимой от производительности части H_{geo} и разницы давлений $\frac{P_a - P_e}{\rho \cdot g}$ между уровнями жидкости входного и выходного сечения установки. При открытых ёмкостях, рисунки 2.1 и 2.2, эта составная часть отпадает.

Динамические составляющие состоят из вместе с производительностью квадратично возрастающей потерей напора H_V (раздел 1.1) и из разницы величин скоростей $\frac{V_a^1 - V_e^1}{1g}$ жидкости входного и выходного сечения установки.

Каждый центробежный насос настраивается на параметры рабочей точки B , являющейся пересечением характеристической кривой насоса (QH -линия) с характеристической кривой установки H_A , это значит, что изменение рабочей точки B (и тем самым производительности Q и напора H) при наличии радиальных рабочих колёс может осуществляться посредством изменения частоты вращения n , диаметра рабочего колеса D или же в результате изменения характеристической кривой установки H_A , условием тому является свободная от кавитации эксплуатация насоса.

Практически на установке со свободными от твёрдых веществ жидкостями нормальной вязкости изменение характеристической кривой может произойти лишь в результате увеличения или уменьшения сопротивлений (например закрытие или открытие дроссельной задвижки, изменение диаметра трубопровода при реконструкции, и т.д.) или же

посредством изменения статической составляющей (например при повышении или понижении давления или уровня жидкости в ёмкости).

2.3 Параллельная и последовательная эксплуатация насосов

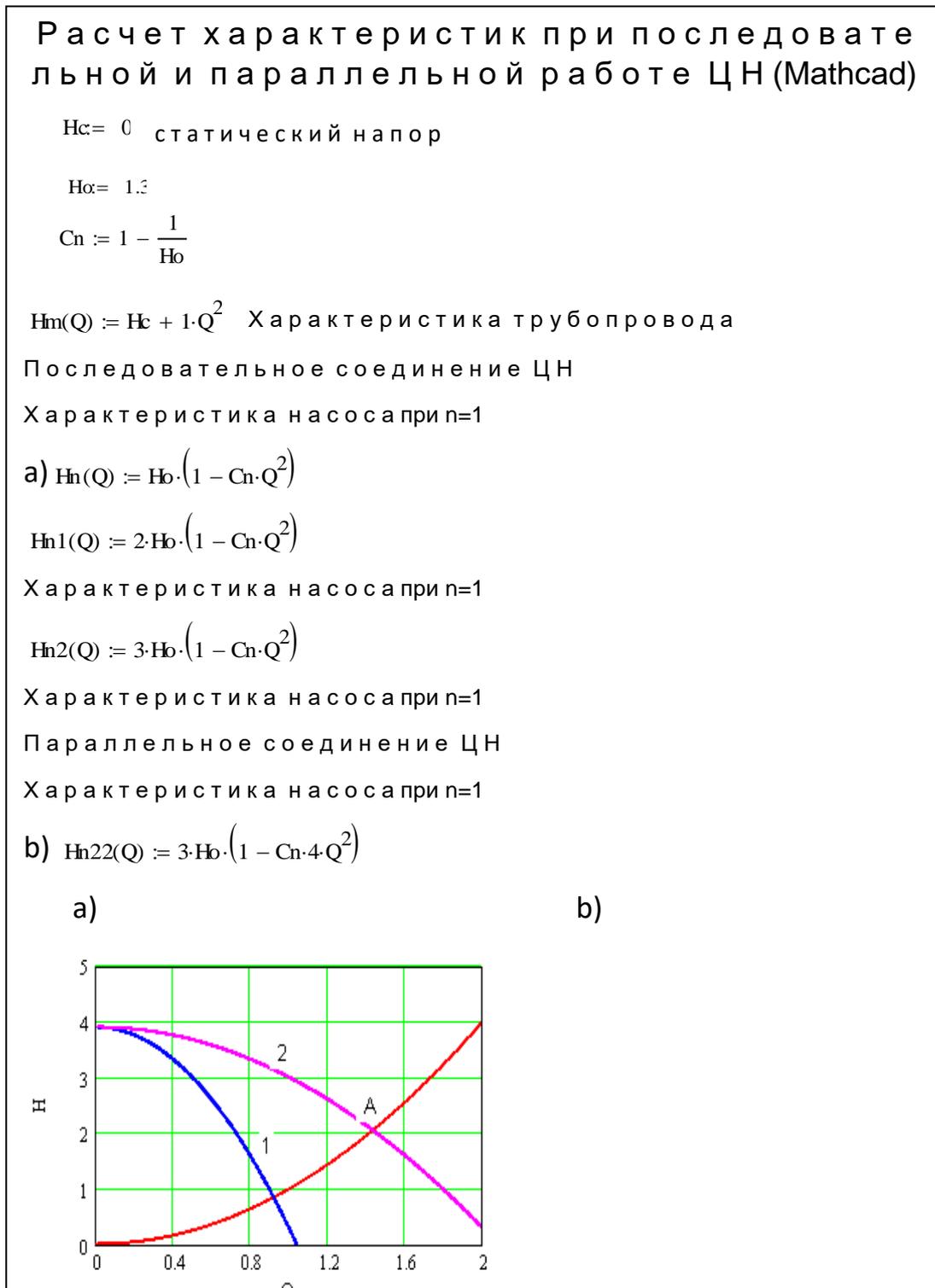


Рисунок 2.2 - Кривые параллельных и последовательных эксплуатационных насосов

В случае, если требуемая производительность Q не может быть достигнута при помощи одного насоса, существует возможность осуществлять подачу силами двух или более насосов в общий трубопровод. Для этого целесообразно (экономично) подбирать одинаковые насосы с одинаковыми нулевыми напорами.

На рисунке 2.2 показаны программа и расчет характеристик параллельного и последовательного включения двух или трех одинаковых насосов. следующая возможность подключения. При параллельной работе два насоса с одинаковыми нулевыми напорами H_0 , всё же с различными производительностями Q_I и Q_{II} , осуществляют подачу в заданной рабочей точке заданного трубопровода. При этом суммируется производительность Q_I насоса I с производительностью Q_{II} насоса II в общую производительность Q_I+Q_{II} при одинаковом напоре H .

2.4 Условия всасывания и подачи самотёком

2.4.1 Показатель NPSH насоса

(NPSH = Net Positive Suction Head)

Безотказная работа центробежного насоса возможна лишь в том случае, если в нём не происходит образование паров (кавитация). Поэтому величина давления в базисной точке для значения NPSH должна как минимум превышать величину давления пара перекачиваемой жидкости. Базисной точкой для значения NPSH является центр на входе рабочего колеса, т.е. точка пересечения оси насоса с перпендикулярной к ней плоскостью, проходящей через внешние точки входной грани лопасти.

Значение $NPSH_{crf}$ это необходимая для насоса величина, она определяется по характеристическим кривым насоса и выражается в метрах. На практике часто к этому значению добавляется ещё запас надёжности 0,1 м.

2.4.2 Показатель NPSH установки

При определении NPSH установки, $NPSH_{vorh}$, базисной точкой является центр всасывающего патрубка насоса. У изготовленных по стандарту насосов со спиральным корпусом и при горизонтальной установке, геодезическая высота между центром рабочего колеса и центром всасывающего патрубка равна нулю, рисунки 1.1 и 1.2. В отличие от вышеупомянутых (напр. при вертикальных насосах) эта составляющая должна быть всё же учтена. $NPSH_{vorh}$ рассчитывается следующим образом: Случай а) Режим всасывания, насос установлен над уровнем жидкости (Рисунок 2.3)

$$NPSH_{vorh} = \frac{P_e + P_b - P_D}{\rho * g} + \frac{V_e^1}{1g} - H_{v.s} - H_{z\ geo}. \quad (2.4)$$

При холодных перекачиваемых жидкостях, напр. воде и открытой ёмкости, а так же:

где P_b - давление воздуха ≈ 1 бар ($= 101 \text{ Н/м}^2$);

P_D - давление пара перекачиваемой жидкости;

ρ - плотность перекачиваемой жидкости кг/дм^3 ;

g - ускорение свободного падения $9,8 \text{ м/с}^2$.

На практике вышеуказанная формула упрощается до

$$\text{NPSH}_{\text{vorh}} \approx 10 - H_{v.s} - H_{z \text{ geo}} \quad (2.5)$$

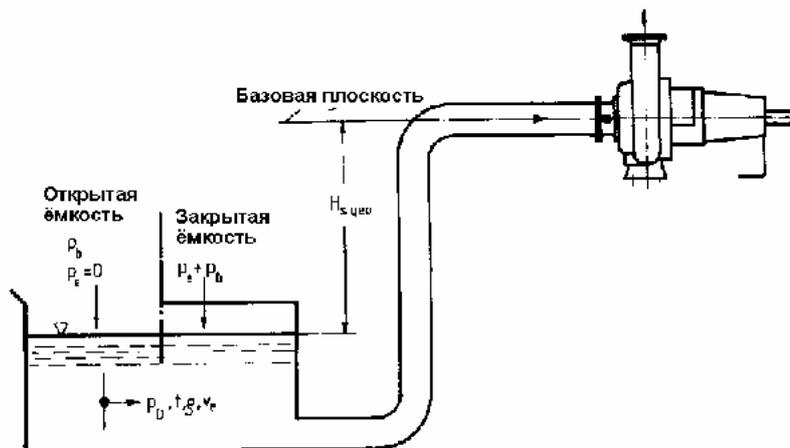


Рисунок 2.3 - Определение $\text{NPSH}_{\text{vorh}}$ в режиме всасывания

Случай б) Подвод самотёком, насос установлен ниже уровня жидкости (рисунок 2.4).

$$\text{NPSH}_{\text{vorh}} = \frac{P_e + P_b - P_D}{\rho * g} + \frac{V_e^1}{1g} - H_{v.s} - H_{z \text{ geo}} \quad (2.6)$$

с упрощением для практики, при условиях, указанных в получается:

$$\text{NPSH}_{\text{vorh}} \approx 10 - H_{v.s} - H_{z \text{ geo}} \quad (2.7)$$

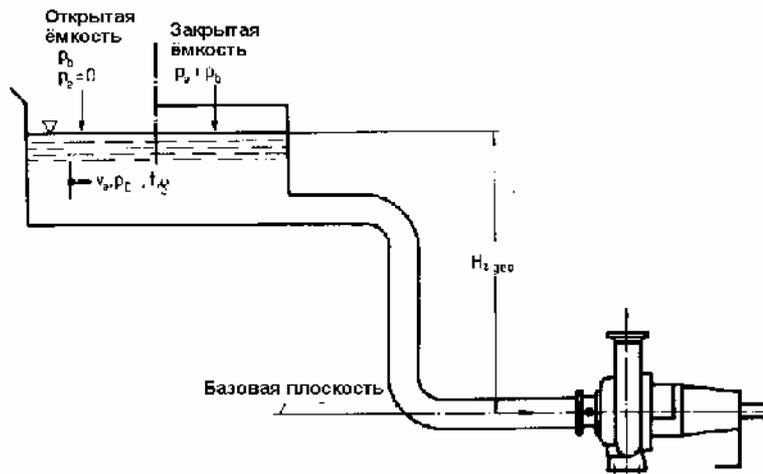


Рисунок 2.4 - Определение $NPSH_{vorh}$ при подводе самотёком

В любом случае условием свободной от кавитации работы является:
 $NPSH_{vorh} \geq NPSH_{erf}$

2.5 Потери напора

Потеря давления p_v это возникающая в результате трения о стенки и внутреннего трения в трубопроводах, фитингах, арматуре и др. разница давлений. Она рассчитывается из независимой от плотности ρ потери напора H_v при помощи формулы.

$$P_v = \rho \cdot g \cdot H_v . \quad (2.8)$$

2.5.1 Потери напора H_v в прямых трубопроводах

Для определения потери напора течения в прямолинейном трубопроводе применяется следующая формула:

$$H_v = \frac{\lambda \cdot U \cdot L}{1A} + \frac{v^1}{1g} . \quad (2.9)$$

где λ коэффициент трения трубопровода;

U - омываемый периметр сечения протекания A ;

L - длина трубы;

g - ускорение свободного падения $9,8 \text{ м/с}^2$;

v - скорость протекания через характерную для потери насоса площадь сечения A .

Для прямых трубопроводов с круглым сечением получается:

$$H_v = \frac{\lambda \cdot L}{D} + \frac{v^1}{1g} . \quad (2.10)$$

D – внутренний диаметр трубопровода.

Коэффициент трения трубопровода λ зависит от состояния течения среды и от качества омываемого трубопровода. Состояние течения среды определяется числом РЕЙНОЛЬДСА Re (законы моделирования):

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} . \quad (2.11)$$

соответственно при некруглых сечениях:

$$Re = \frac{v \cdot 1A}{\nu \cdot U} . \quad (2.12)$$

где ν – кинематическая вязкость.

Для гладких труб (новые катаные стальные трубы) λ может определяться расчётным путём:

В области ламинарного течения в трубе ($Re < 1750$) коэффициент трения рассчитывается следующим образом:

$$\lambda = \frac{11}{Re} . \quad (2.13)$$

В области турбулентного потока в трубе ($Re > 1750$) результаты экспериментов могут быть изображены при помощи уравнения ЭКА:

$$\lambda = \frac{0.205}{\lg \frac{Re}{1}} . \quad (2.14)$$

В области $1110 < Re < 101$ погрешности не превышают 1%.

Как показано на рисунок 11 λ , при достаточно больших числах РЕЙНОЛЬДСА, зависит ещё от параметра D/k ; k/D это «относительная шероховатость», которая вычисляется из «абсолютной шероховатости» k и внутреннего диаметра трубы D . k – это не что иное как средняя шероховатость (зернистость). По формуле МОДИ получим:

$$\lambda = 0.0065 + \frac{0.23}{\sqrt[3]{\frac{D}{k}}} . \quad (2.15)$$

Приблизительное определение k приводится так же в таблице 1.

На рисунке 2.4 указаны, употребляемые для применения на практике, потери напора H_v на 100 м прямого трубопровода. При этом потеря напора H_v рассчитывается по формуле

$$H_v = \zeta \cdot \frac{v^1}{1g} . \quad (2.16)$$

где ζ - коэффициент потерь;
 v - скорость течения;
 g - ускорение свободного падения.

Значения действительны для чистой воды при температуре 10°C или для жидкостей с такой же по величине кинематической вязкостью, при полностью заполненном трубопроводе и при новых трубах из чугуна, пробитумированных внутри ($k = 0,1$ мм). Потери напора H_v на рисунке необходимо умножить на:

- 0,1 для новых катаных стальных труб,
- 1,1 для инкрустированных труб (при этом определяющим является сужение поперечного сечения в результате инкрустации),
- 1,11 для старых заржавленных стальных труб.

Для труб с очень сильной инкрустацией действительная потеря напора может быть определена лишь экспериментальным путём. Отклонения от заданного диаметра значительно изменяют потерю напора, например, 0,11-кратный диаметр просвета влечёт за собой 1,1-кратное изменение потери напора H_v . Новые резиновые шланги и прорезиненные пеньковые шланги имеют приблизительно такие же значения H_v как указанные на рисунке 11.

Пример к рисунку 2.3:

Дано: Производительность $Q = 110$ м³/ч, новая чугунная труба, внутренний диаметр $D = 110$ мм.

Определено: Потеря напора $H_v \approx 1,11$ м на 100 м длины трубы, скорость течения $v \approx 1,1$ м/с.

2.5.2 Потери напора в пластмассовых трубах

Потери напора H_{vK} в пластмассовых (тянутых) трубах из поливинилхлорида и полиэтилена «твёрдого» и «мягкого» приблизительно равны по величине. Для практического расчёта величины H_{vK} соответствующие потери напора для чугунных труб H_{vG} (рисунок 2,2) перемножаются с зависящими от скорости течения v поправочными коэффициентами μ , указанными на рисунок 2,4. Определённые таким образом потери напора действительны для воды с температурой 10°C. При отличных от этой температурах воды эти потери напора умножаются ещё на температурный коэффициент ϕ (рисунок 2,2). Таким образом получаем:

$$H_{vK} = H_{vG} \cdot \mu \cdot \phi. \quad (2.17)$$

где H_{vK} - потери напора в пластмассовых трубах;
 H_{vG} - потери напора в чугунных трубах;
 μ - поправочный коэффициент;
 ϕ - температурный коэффициент.

2.5.3 Потери напора в прямолинейных трубопроводах для вязких жидкостей

Для практического применения потеря напора вязкой жидкости (индекс Z) определяется при помощи, если перед этим была считана потеря напора для холодной воды (10°C , $\nu = 10^{-1}$ м³/с, индекс W):

$$H_{vZ} = \frac{\lambda_z * H_{vw}}{\lambda_w}. \quad (2.18)$$

Дано: Производительность $Q = 100$ м³/ч, новая чугунная труба, внутренний диаметр $D = 110$ мм, кинематическая вязкость $\nu = 1 \cdot 10^{-1}$ м³/с.

Определено: Из рисунок 2.4 следует $H_{vw} = 0,11$ м / 100 м, из Рисунок следует $\lambda_z = 0,01$, $\lambda_w = 0,011$.

$$\text{Таким образом } H_{vZ} = \frac{0,01 * 0,11 \text{ м}}{0,011 * 100 \text{ м}} = 0,11 \text{ м / 100 м.}$$

Наиболее часто на практике в качестве вязкой жидкости встречается целлюлоза, вязкость которой изменяется со скоростью течения; она не является «НЬЮТОНОВОЙ» жидкостью, поэтому на неё не распространяются применяемые ранее гидродинамические законы. Ориентировочные значения потерь напора $H_v = f(Q)$ указаны на рисунках 11а до 11е, они действительны для 100 м прямых труб из стали, с условным проходом 100, 110, 100, 110, 100 и 110 мм для перекачки неотбеленной сульфидной целлюлозы при 11°C , 11°SR (степень измельчения, $^{\circ}\text{SR} = \text{Степень Шоппера-Риглера}$) и концентрации от 1,1 до 1 % абсолютно сухой массы. Если данная суспензия отличается от указанных на рисунке 11, тогда определённые по графику значения нужно умножить на нижеследующие коэффициенты:

- 1) $K = 0,1$ для отбеленной сульфидной целлюлозы, макулатурной массы;
- 2) $K = 1,0$ для отваренной древесной массы;
- 3) $K = 1,1$ для белой и коричневой грубой древесной массы.

В дальнейшем, если данная суспензия имеет температуру выше 11°C , определённая по графику и перемноженная с вышеупомянутыми коэффициентами потеря напора должна быть дополнительно откорректирована.

В этом случае для каждых 1°C разницы температуры от значения потери напора при 11°C отнимается 1% её величины. Для пластмассовых труб необходимо умножить значение H_{vK} на фактор 0,1. Коэффициент потерь уменьшается ещё больше, если данная суспензия содержит такие наполнители как, например, каолин. При содержании каолина 11% коэффициент потерь уменьшается на 11% и при содержании каолина 11,1% — на 11%.

2.5.4 Потери напора H_v в арматуре и фитингах

Для определения потерь напора H_v в арматуре и фитингах применяется выражение:

$$H_v = \zeta * \frac{v^1}{1g}. \quad (2.19)$$

где ζ - коэффициент потерь;

g - ускорение свободного падения 1,11 м/с²;

v - скорость течения в характерной для потерь напора площади поперечного сечения A .

В таблицах 1-1 и рисунках 11-11 приведены некоторые коэффициенты потерь, соответственно, потери напора.

H_v в арматуре и фитингах при работе с водой.

Примечание:

При ответвлениях по таблице 1 и переходниках по таблице 1 необходимо различать между необратимыми потерями давления (снижением давления):

$$P_v = \zeta * \frac{\rho * v_1^1}{1}. \quad (2.20)$$

- с одной стороны и обратимыми изменениями давления свободного от трения течения в соответствии с уравнением БЕРНУЛИ:

$$P_1 - P_1 = \frac{\rho}{1} (v_1^1 - v_1^1). \quad (2.21)$$

- с другой стороны. При ускорениях течения, например, при сужениях труб разница $p_1 - p_1$ является отрицательной, а при расширениях — положительной; и наоборот, определённые при помощи коэффициентов потерь ζ потери давления, необходимо всегда применять с отрицательным знаком, если общее изменение давления определяется как арифметическая сумма из p_v и $p_1 - p_1$.

Иногда, при перекачке воды, вместо коэффициента потерь ζ для арматуры применяется ещё так называемое значение k_v :

$$P_v = \left(\frac{Q}{k_v}\right)^1 * \frac{\rho}{1000} \quad (2.22)$$

где Q - объёмный расход в м³/ч;

ρ - плотность воды в кг/м³;

p_v - потеря давления в бар.

Значение k_v (измеряется в м³/ч) это объёмный расход арматуры при перекачке холодной воды ($\rho = 1000$ кг/м³) и $p_v = 1$ бар; оно показывает взаимосвязь между потерей давления p_v в барах и объёмным расходом в м³/ч.

Преобразование:

$$\zeta = 11 * \frac{d^1}{k_v^1} \quad (2.23)$$

где d - базисный диаметр (условный проход) арматуры .

3 Изменение производительности насосных агрегатов

3.1 Обточка рабочих колёс

При необходимости уменьшить производительность центробежного насоса при $n = \text{const.}$, должен быть уменьшен диаметр рабочего колеса D . В семействах характеристических кривых нанесены кривые насосов с некоторыми диаметрами обточки D в мм.

Для радиальных рабочих колёс (раздел 3.1), при обточке (обточка не является геометрически подобным уменьшением, т.к. ширина выхода остаётся как правило константной), взаимосвязь между Q , H и диаметром рабочего колеса D выглядит следующим образом:

$$\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^1 \approx \frac{Q_1}{Q_2} \approx \frac{H_1}{H_2}, \quad (3.1)$$

$$D_2 \approx D_1 * \sqrt{\frac{Q_2}{Q_1}} \approx D_1 * \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}. \quad (3.2)$$

Диаметр обточки может быть определён следующим образом (рисунок 3.1):

В диаграмме QH (линейное деление шкалы) проводится прямая из начала координат (при характеристических кривых с необозначенным началом координат необходимо сделать соответствующую поправку) через желаемую рабочую точку B_1 , которая пересекает так же имеющуюся характеристическую кривую для полного диаметра рабочего колеса D_1 в точке B_1 . При этом считываются парные значения для Q и H с индексами 1 и 2, которые при подстановке в формулу дают приблизительное значение D_2 .

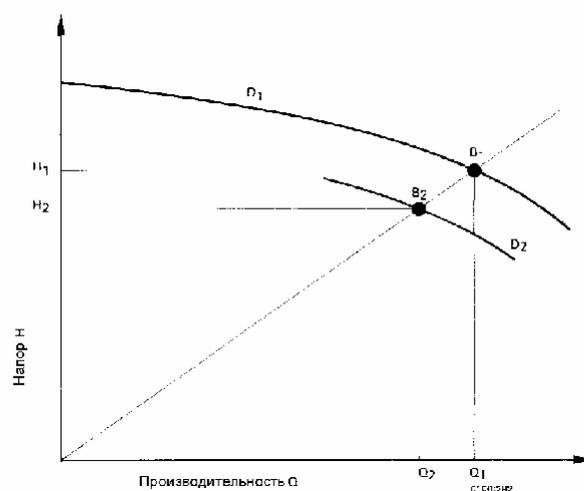


Рисунок 3.1- Влияние диаметра рабочего колеса

3.2 Изменение частоты вращения

Применяя регулируемый привод, можно напрямую плавно управлять скоростью вращения рабочего колеса ЦН и тем самым обеспечить требуемые значения расхода и подачи без использования дросселирующей арматуры. Последняя устанавливается только для вспомогательных целей и в процессе перекачки полностью открыта, что снижает гидравлическое сопротивление сети.

При регулировании подачи изменением частоты вращения колеса насоса и полностью открытой задвижке на выходе ($Z_{*}=1$) уравнения подачи, напора и гидравлической мощности примут вид:

$$Q_{*} = \sqrt{\omega_{*}^2 - \frac{H_{c*}}{H_{0*}}}; \quad (3.3)$$

$$H_{*} = C_n H_{c*} + \omega_{*}^2; \quad (3.4)$$

$$P_{TP*} = (C_n H_{c*} + \omega_{*}^2) \sqrt{\omega_{*}^2 - \frac{H_{c*}}{H_{0*}}}. \quad (3.5)$$

В этом случае снижение подачи происходит за счет уменьшения напора, создаваемого насосом, при этом исключаются дополнительные потери мощности в гидрорегуляторе и при любом значении подачи $P_{ЦН} = P_{TP}$.

Для различных частот вращения n существуют для одного и того же насоса различные характеристические кривые. Эти характеристические кривые связаны друг с другом по закону подобия. Если для частоты вращения n_1 известны значения Q_1 , H_1 , и P_1 , то новые значения для n_1 равны:

$$Q_1 = \frac{n_1}{n_1} * Q_1, \quad (3.6)$$

$$H_1 = \left(\frac{n_1}{n_1}\right)^1 * H_1, \quad (3.7)$$

$$P_1 = \left(\frac{n_1}{n_1}\right)^1 * P_1. \quad (3.8)$$

При изменении частоты вращения смещается так же и рабочая точка. Расчет приведен на рисунке 3.1.

Расчет характеристик магистрали и ЦН при регулировании частоты вращения (Mathcad 11)

$H_m(Q, H_c) := H_c + Q^2$ Характеристика трубопровода

$H_n(Q, \omega) := H_0 \cdot (\omega^2 - C_n \cdot Q^2)$ Характеристика насоса

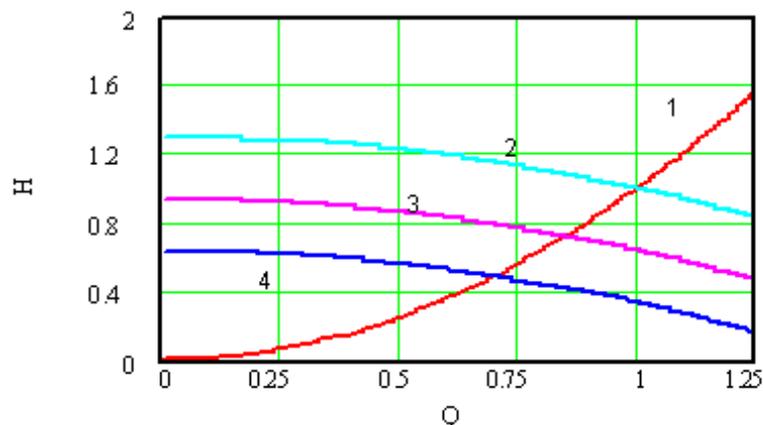


Рисунок 3.2 кривые HQ для частот вращения n_1 , n_2 и n_3

На рисунке 3.2 нанесены кривые HQ для частот вращения n_1 , n_2 и n_3 , которые имеют соответствующие точки пересечения B_1 , B_2 и B_3 с характеристической кривой установки НА. При соответствующем изменении частоты вращения рабочая точка смещается по характеристической кривой установки НА между точками B_4 и B_3 .

3.3 Перекачка вязких жидкостей

С увеличением вязкости ν перекачиваемой жидкости, при $n = \text{const.}$, уменьшаются производительность Q , напор H и КПД η ; одновременно с этим возрастает потребляемая мощность насоса P . Оптимальный КПД смещается в направлении меньшей производительности. Рабочая точка B_w смещается в положение B_z (Рисунок 3.3).

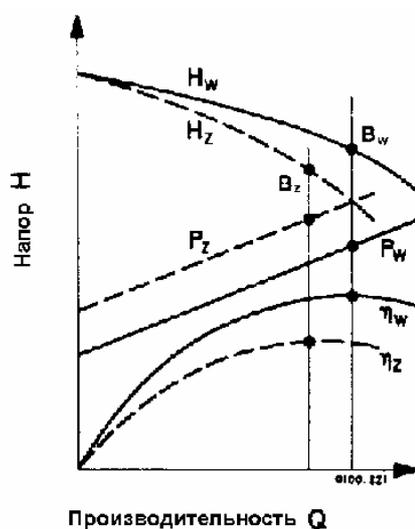


Рисунок 3.3 - Изменение рабочей точки при перекачивание вязкой жидкости соответственно воды

Известная рабочая точка для воды B_w с Q_w , H_w и η_w (W = индекс для воды) преобразовывается при помощи переводных множителей fQ , fH и $f\eta$ (рисунки 2.1а и 2.2б) в искомую рабочую точку B_z с Q_z , H_z и η_z (Z = индекс для вязкой жидкости).

При помощи этого метода пересчёта возможно:

- произвести перевод данной рабочей точки B_w в рабочую точку B_z при помощи рисунка 2.1а (раздел 1.2.1);
- определить искомый типоразмер насоса через B_w , исходя из данной рабочей точки B_z и при помощи Рисунка 2.2б (раздел 1.2.2).

Пересчёт действителен для:

- одноступенчатых центробежных насосов со спиральными корпусами и радиальными рабочими колёсами (раздел 2.2);
- удельных частот вращения $nq = 1$ до 11 1/мин (раздел 1.2.2 соотв. 1.2.4);
- кинематической вязкости $\nu_z = 1$ до $1000 \cdot 10^{-1} \text{ м}^2/\text{с}$ (кинематической вязкостью до $11 \cdot 10^{-1}$ можно на практике пренебречь).

4 Выбор системы регулируемого электропривода центробежного насоса

Наибольшее применение промышленные силовые щиты используют двухступенчатые двигатели Ahrochron Motors (AD): краткосрочные и фазовые роторы. Короткое замыкание дает вентилятору силу внешнего источника, через кровяное давление и воздух из театра. Электрические лампочки и внешние источники шин ротора могут предоставить две страницы и расческу о состоянии и вентиляции.

Регулирование артериального давления осуществляется регулятором мощности. Следующие особенности имеют существенное значение для

электромагнитных свойств, а также описывают метод изучения конкретных типов электронов. В некоторых случаях объект безопасности рассматривается как объект безопасности системы. В других случаях неограниченное количество машин не является частью регулирующего органа и является единственной целью контролировать их. В этом смысле, краткое изложение в качестве современного драйвера асинхронного питания представлен. В настоящее время используются следующие основные методы управления артериальным давлением: параметры, специальные шаги, частота и объем.

Управление параметрами изменяет реакторы и камеры, связанные с параметрами внешних резисторов, трафаретов и ступеней ротора. Функциональное напряжение подключено к реактору или вору во время этапов (рисунок 1.1). Метод метода нарушает Конституцию и не подходит для долгосрочных корректировок.

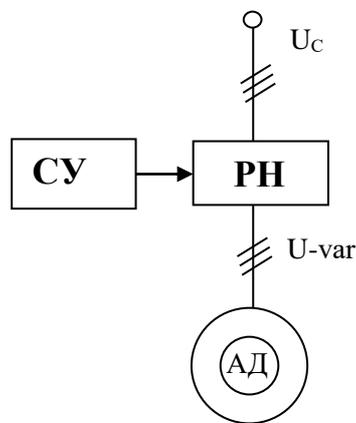


Рисунок 4.1- Изменение напряжения статора

Для контроля частоты (рис. 4.1) напряжение артериального давления в замкнутом контуре будет регулироваться изменением частоты и напряжения. Этот метод очень экономически оправдан и дифференцирует частоту вращения в зависимости от типа преобразователя частоты: Ультразвуковой диапазон (10-1 Red / S) и Ultra High (101 Red / S).

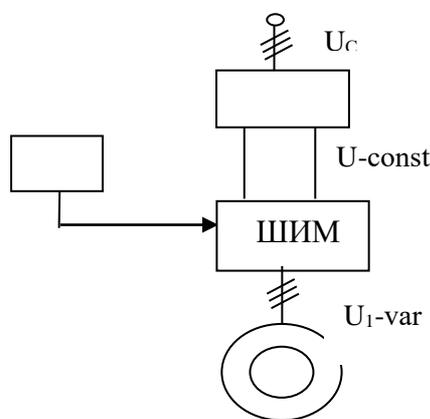


Рисунок 4.2 - Изменение частоты и напряжение короткозамкнутого АД

Соединение сети двигателя управления передачей и больше сети связано с цепью маршрутизатора. Эта ЭДС представляет собой вращающийся реактор и зависимый инвертор (асинхронный клапан - АВК, рис. 4.2). Цинкады инкинкоскопа просты и экономичны. Небольшие пределы регулировки (1: 1 - 1: 1), частотно-регулируемые приводы и приводы постоянного тока могут быть более экономичными. Их специфическое разрушение является относительно низким потенциальным фактором (0,1 или менее), особенно плотной частотой, что важно.

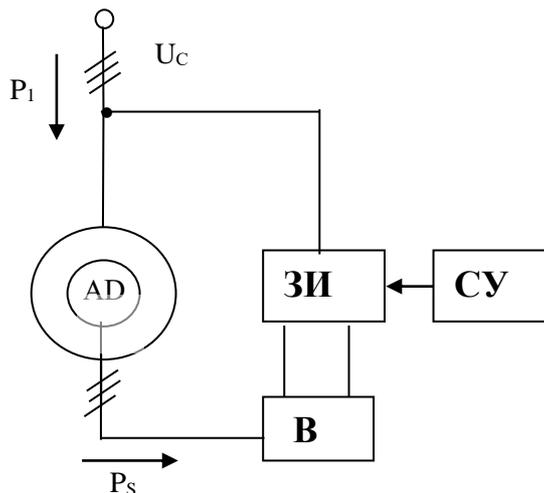


Рисунок 4.3 - Асинхронно-вентильный каскад – АВК

Особым типом каскадных соединений является так называемая машина двойного питания МДП (рисунок 4.3). Здесь внешняя ЭДС вводится в ротор с помощью ПЧ обычно непосредственно. Машина двойного питания экономична, она покрывает диапазон частот вращения с границами, отстоящими примерно на 10% вверх и вниз от синхронной. Преимущественно

МДП перед другими каскадами и частотным приводом – высокий коэффициент мощности в указанном диапазоне частот вращения.

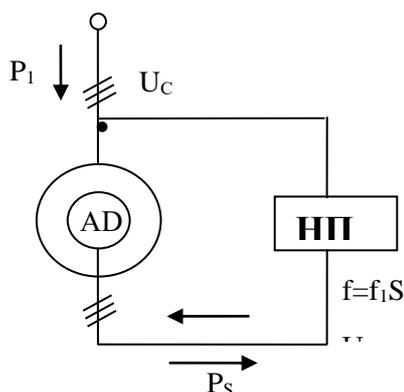


Рисунок 4.4 - Машина двойного питания - МДП

Из сказанного можно заключить, что среди рассмотренных приводов наиболее перспективны АВК, частотный привод НПЧ – АД и МДП. Вентильный каскад как объект управления близок к приводу постоянного тока. Поскольку статика и динамика АВК описаны достаточно полно, мы в дальнейшем сосредоточим внимание на двух последних системах – НПЧ – АД и МДП, являющихся наиболее универсальными среди асинхронных приводов. Так как оба этих привода содержат в качестве объекта регулирования АД, а в качестве силового регулирующего органа – НПЧ, то к ним применимы единые методы анализа и синтеза.

Напряжения статора и ротора трехфазного АД (рисунок 4.5) определяются следующими матричными уравнениями:

$$\|U_s\| = R_s \|i_s\| + \frac{d}{dt} \|\Psi_s\|, \quad (4.1)$$

$$\|U_r\| = R_r \|i_r\| + \frac{d}{dt} \|\Psi_r\|. \quad (4.2)$$

где

$$\|U_s\| = \begin{Bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{Bmatrix} \quad \|i_s\| = \begin{Bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{Bmatrix} \quad \|\Psi_s\| = \begin{Bmatrix} \Psi_{sa} \\ \Psi_{sb} \\ \Psi_{sc} \end{Bmatrix},$$

$$\|U_r\| = \begin{Bmatrix} U_{ra} \\ U_{rb} \\ U_{rc} \end{Bmatrix} \quad \|i_r\| = \begin{Bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{Bmatrix} \quad \|\Psi_r\| = \begin{Bmatrix} \Psi_{ra} \\ \Psi_{rb} \\ \Psi_{rc} \end{Bmatrix}.$$

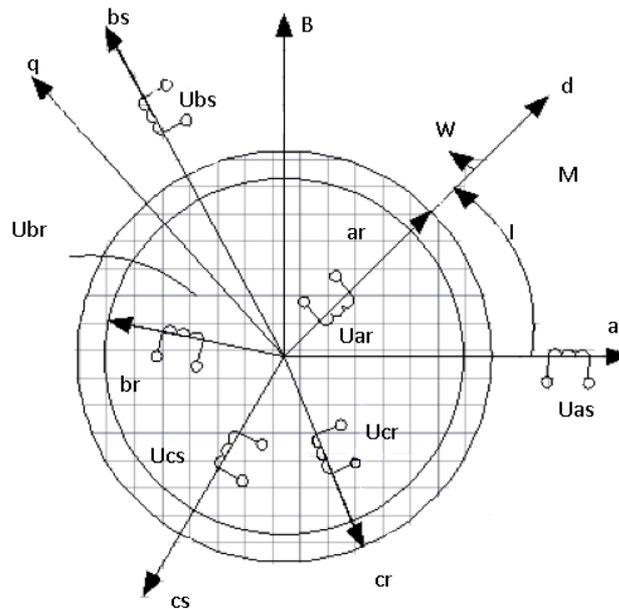


Рисунок 4.5 - Схема трехфазного АД

Так как обмотки статора и ротора симметричны, а воздушный зазор – равномерный, то индуктивности фазных обмоток статора равны:

$$L_{sa} = L_{sb} = L_{sc} = L_{s\phi} . \quad (4.3)$$

А также равны индуктивности фазных обмоток ротора:

$$L_{ra} = L_{rb} = L_{rc} = L_{r\phi} . \quad (4.4)$$

Эти индуктивности состоит из индуктивностей от полей рассеяния и индуктивностей от главного потока:

$$\left. \begin{aligned} L_{s\phi} &= L_{sl} + L_{sm} \\ L_{r\phi} &= L_{rl} + L_{rm} \end{aligned} \right\} . \quad (4.5)$$

Точно так же равны взаимные индуктивности фаз статора:

$$L_{ab}(s) = L_{bc}(s) = L_{ca}(s) = L'_m . \quad (4.6)$$

И фаз ротора:

$$L_{ab}(r) = L_{bc}(r) = L_{ca}(r) = L''_m . \quad (4.7)$$

Причем, так как обмотки ротора приведены к статору,

$$L'_m = L''_m = L_{m\phi} . \quad (4.8)$$

Ранее было принято синусоидальное распределение МДС от каждой фазной обмотки вдоль воздушного зазора, поэтому при цилиндрическом роторе взаимная индукция между двумя обмотками, магнитные оси которых сдвинуты на некоторый угол, равна произведению взаимной индукции при совпадении осей обмоток на косинус угла между ними. Тогда из (4.1) – (4.4) получим:

$$L_{m\phi} = L_{sm} \cos \frac{1\pi}{1} = -1/1 L_{sm} = -1/1 L_{rm} . \quad (4.9)$$

То же положение справедливо для взаимной индукции обмоток статора и ротора. При совпадении осей этих обмоток, сцепленных с одним и тем же главным потоком, взаимная индуктивность L_{sr} максимальна и выполняется равенство

$$L_{sr} = L_{sm} = L_{rm} . \quad (4.10)$$

Если же оси сдвинуты на угол α , то взаимная индуктивность равна $L_{sr} \cos \alpha$.

С учетом введенных соотношений получим следующие выражения для

потокосцеплений:

$$\|\Psi_s\| = \|L_{ss}\| \|ls\| + \|M_{sr}\| \|lr\|, \quad (4.11)$$

$$\|\Psi_s\| = \|M_{sr}\| \|ls\| + \|L_{rr}\| \|lr\|. \quad (4.12)$$

где

$$\|L_{ss}\| = \left\| \begin{array}{ccc} L_{s\phi} & L_{m\phi} & L_{m\phi} \\ L_{m\phi} & L_{s\phi} & L_{m\phi} \\ L_{m\phi} & L_{m\phi} & L_{s\phi} \end{array} \right\|,$$

$$\|M_{sr}\| = L_{sr} \left\| \begin{array}{ccc} \cos x & \cos(x + \frac{1n}{1}) & \cos(x - \frac{1n}{1}) \\ \cos(x - \frac{1n}{1}) & \cos x & \cos(x + \frac{1n}{1}) \\ \cos(x + \frac{1n}{1}) & \cos(x - \frac{1n}{1}) & \cos x \end{array} \right\|,$$

$$\|M_{rs}\| = L_{sr} \left\| \begin{array}{ccc} \cos x & \cos(x - \frac{1n}{1}) & \cos(x + \frac{1n}{1}) \\ \cos(x + \frac{1n}{1}) & \cos x & \cos(x - \frac{1n}{1}) \\ \cos(x - \frac{1n}{1}) & \cos(x + \frac{1n}{1}) & \cos x \end{array} \right\|,$$

$$\|L_{rr}\| = \left\| \begin{array}{ccc} L_{r\phi} & L_{m\phi} & L_{m\phi} \\ L_{m\phi} & L_{r\phi} & L_{m\phi} \\ L_{m\phi} & L_{m\phi} & L_{r\phi} \end{array} \right\|.$$

Одно из допущений, принятых для обобщенной машины, заключается в синусоидальном распределении МДС, создаваемых фазными токами, вдоль воздушного зазора. При этом МДС каждой фазной обмотки образуют собственную пространственную синусоидальную волну, а все вместе – результирующую. Так как в идеализированной машине потоки и потокосцепления пропорциональны МДС и токам, то можно оперировать с синусоидальными волнами потоков, потокосцеплений, токов, ЭДС и напряжений. Пространственная синусоидальная волна может быть представлена пространственным вектором, равным по модулю амплитуде волны и направленным вдоль этой волны. Результирующей волне соответствует результирующий вектор, который для трехфазной машины выражается следующим образом:

$$\ddot{u} = \ddot{u}_a + \ddot{u}_b + \ddot{u}_c. \quad (4.13)$$

Амплитуда результирующей волны в 1,5 раза больше фазной амплитуды.

Результирующий вектор удобно изображать на комплексной плоскости. Направим действительную ось вдоль оси фазы α , а мнимую – под углом $\pi/1$ в положительном направлении. Тогда:

$$\dot{v}_a = v_a; \dot{v}_b = v_b a; \dot{v}_c = v_c a^2. \quad (4.14)$$

где

$$\underline{a} = e^{j\pi/1} = -\frac{1}{1} + j\frac{\sqrt{1}}{1}; \underline{a}^1 = e^{j1\pi/1} = -\frac{1}{1} - j\frac{\sqrt{1}}{1}.$$

Подставив (4.11) в (4.12) и умножив обе части на $3/2$ получим:

$$\ddot{v} = \frac{3}{2} (v_a + v_b \underline{a} + v_c \underline{a}^2). \quad (4.15)$$

Вектор, обладающий тем свойством, что его проекции на оси фаз определяют мгновенные значения фазных величин, называется обобщенным. В матричной форме (4,13) представляется так:

$$\ddot{v} = \frac{1}{1} \|1aa1\| \begin{Bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{Bmatrix}.$$

или

$$\ddot{v} = \|a\| \|v\|. \quad (4.16)$$

где

$$\|a\| = \frac{1}{1} \|1aa1\|.$$

Теперь, умножив (4.14) и (4.15) на матрицу $\|a\|$ слева, получим с учетом (1.11)

$$U_s = I_s R_s + d\Psi_s/dt, \quad (4.17)$$

$$U_r = I_r R_r + d\Psi_r/dt. \quad (4.18)$$

Проделав ту же операцию над (4.17) и (4.18), после преобразований можем записать:

$$\Psi_s = I_s L_s + I_r L_m e^{jx}, \quad (4.19)$$

$$\Psi_r = I_r L_m e^{-jx} + I_r L_r. \quad (4.20)$$

где

$$L_m = \frac{1}{1} L_{sm}; L_s = L_{sl} + L_m; L_r = L_{rl} + L_m.$$

Уравнения электрического равновесия для нулевых составляющих имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} U_{so} &= I_{so} R_s + d\Psi_{so}/dt \\ U_{ro} &= I_{ro} R_r + d\Psi_{ro}/dt \end{aligned} \right\}. \quad (4.21)$$

где

$$\begin{aligned} \Psi_{so} &= I_{so} L_{so}; \Psi_{ro} = I_{ro} L_{ro}, \\ L_{so} &= L_s \phi + 1 L_m \phi; L_{ro} = L_r \phi + 1 L_m \phi. \end{aligned}$$

Введем на комплексных плоскостях системы ортогональных осей α, β для статора и d, q для ротора. Направления осей обозначены на Рисунке. Оси α, d будем считать действительными, а оси β, q – мнимыми. Тогда обобщенные векторы переменных статора и ротора можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} I_s &= i\alpha s + j\beta s \\ U_s &= u\alpha s + ju\beta s \\ \Psi_s &= \Psi\alpha s + j\Psi\beta s \end{aligned} \right\}, \quad (4.22)$$

$$\left. \begin{aligned} I_r &= i d r + j q r \\ U_r &= u d r + j u q r \\ \Psi_r &= \Psi d r + j \Psi q r \end{aligned} \right\}. \quad (4.23)$$

Подставляя (4.23) в (4.18), а (4.19) в (4.20) и приравнивая действительные и мнимые части в левой и правой частях уравнений, получаем:

$$\left. \begin{aligned} U_{\alpha s} &= i\alpha s R_s + d\Psi_{\alpha s}/dt \\ U_{\beta s} &= i\beta s R_s + d\Psi_{\beta s}/dt \end{aligned} \right\}, \quad (4.24)$$

$$\left. \begin{aligned} U_{d r} &= i d r R_r + d\Psi_{d r}/dt \\ U_{q r} &= i q r R_r + d\Psi_{q r}/dt \end{aligned} \right\}.$$

Преобразовав аналогично (4.24), (4.22) и подставив в (4.23), будем иметь в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} U_{\alpha s} \\ U_{\beta s} \\ U_{d r} \\ U_{q r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s + \frac{d}{dt} L_s & 0 & \frac{d}{dt} (L_m \cos Zpx) & -\frac{d}{dt} (L_m \sin Zpx) \\ 0 & R_s + \frac{d}{dt} L_s & \frac{d}{dt} (L_m \sin Zpx) & \frac{d}{dt} (L_m \cos Zpx) \\ \frac{d}{dt} (L_m \cos Zpx) & \frac{d}{dt} (L_m \sin Zpx) & R_s + \frac{d}{dt} L_s & 0 \\ -\frac{d}{dt} (L_m \sin Zpx) & \frac{d}{dt} (L_m \cos Zpx) & 0 & R_s + \frac{d}{dt} L_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i\alpha s \\ i\beta s \\ i d r \\ i q r \end{pmatrix}. \quad (4.25)$$

В случае двухфазной симметричной машины с равномерным воздушным зазором взаимные индуктивности обмоток выражают следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} M_{\alpha d} &= M_{d\alpha} = M_{\beta q} = M_{q\beta} = Lm \cos Zpx \\ M_{\beta d} &= M_{d\beta} = -M_{d q} = -M_{q d} = Lm \sin Zpx \end{aligned} \right\}. \quad (4.26)$$

Из сравнения (4.25) с учетом (4.26) следует, что при отсутствии токов нулевой последовательности уравнения трехфазной асинхронной машины в ортогональных координатах совпадают с уравнениями обобщенной машины.

Токи нулевой последовательности при синусоидальном распределении индукции в воздушном зазоре не создают электромагнитного момента и практически не влияют на динамику привода. Кроме того при соединении трехфазных обмоток АД в звезду без нулевого привода или симметричный треугольник токи нулевой последовательности отсутствуют.

Как можно видеть из (4.4), (4.3) и (4.21), приведение трехфазной машины к двухфазной позволило сократить число уравнений и уменьшить количество членов в них так как взаимные индуктивности ортогональных обмоток равны нулю. Однако уравнения (4.23) неудобны для исследования, поскольку их коэффициенты переменны. Это – следствие того, что уравнения статора и ротора записаны в собственных «естественных» системах координат α, β и d, q . Приведение обмоток статора и ротора к некоторой общей системе координат $1, 1$ позволит получить уравнения с постоянными коэффициентами, поскольку подобные фиктивные обмотки оказываются взаимно неподвижными.

Положим, что система координат $1, 1$ вращается со скоростью относительно неподвижной системы координат статора α, β , а система координат ротора d, q – со скоростью. Очевидны следующие соотношения для обобщенных векторов токов статора и ротора в различных системах координат:

$$I_{s1.1} = i_{s\alpha\beta} e^{-jxc}, \quad (4.27)$$

$$I_{r1.1} = i_{r_{d,q}} e^{-j(xc-x)}. \quad (4.28)$$

Для других обобщенных векторов соотношения аналогичны. Уравнения (4.27) с учетом (4.28) преобразуется к виду:

$$U_{s1.1} = I_{s1.1} R_s + d\Psi_{s1.1}/dt + j\omega_c \Psi_{s1.1}. \quad (4.29)$$

А (4.28) с учетом (1.29) – к виду:

$$U_{r1.1} = I_{r1.1} R_r + d\Psi_{r1.1}/dt + j(\omega_c - \omega) \Psi_{r1.1}. \quad (4.30)$$

Объединим (4.30) и (4.22), опустив индексы 1, 2, поскольку все обобщенные векторы относятся к одной и той же системе координат:

$$\left. \begin{aligned} U_s &= I_s R_s + d\Psi_s/dt + j\omega_c \Psi_s \\ U_r &= I_r R_r + d\Psi_r/dt + j(\omega_c - \omega) \Psi_r \end{aligned} \right\}. \quad (4.31)$$

Аналогично преобразуются к системе координат 1, 2 уравнения (4.32), (4.30):

$$\Psi_s = I_s L_s + I_r L_m; \quad \Psi_r = I_s L_m + I_r L_r. \quad (4.33)$$

Уравнения (4.33), (4.32) не содержат периодических коэффициентов, что является их большим преимуществом перед исходными уравнениями.

Если в (4.34) положить $\omega_c = 0$, то получим уравнения в системе координат α, β :

$$\left. \begin{aligned} U_{\alpha s} &= i\alpha_s R_s + \frac{d\Psi_{\alpha s}}{dt} \\ U_{\beta s} &= i\beta_s R_s + \frac{d\Psi_{\beta s}}{dt} \\ U_{\alpha r} &= i\alpha_r R_r + \frac{d\Psi_{\alpha r}}{dt} + \omega \Psi_{\beta r} \\ U_{\beta r} &= i\beta_r R_r + \frac{d\Psi_{\beta r}}{dt} - \omega \Psi_{\alpha r} \end{aligned} \right\}. \quad (4.34)$$

Выведем зависимость между фазными величинами и ортогональными составляющими обобщенного вектора. Из (1.11) и (1.11) следует:

$$\check{v}_{1.1} = v_1 + jv_1 = \check{v}_{\alpha,\beta} e^{-jxc} = 1/1 (v_a + \underline{a}v_b + \underline{a}^1 v_c) e^{-jxc}. \quad (4.35)$$

Разложив (4.35) на вещественную и мнимую части, получим формулы прямого преобразования фазных величин в ортогональные составляющие:

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= \frac{1}{1} [v_a \cos xc + v_b \cos \left(xc - \frac{1n}{1} \right) + v_c \cos \left(xc + \frac{1n}{1} \right)] \\ v_1 &= \frac{1}{1} [v_a \sin xc + v_b \sin \left(xc - \frac{1n}{1} \right) + v_c \sin \left(xc + \frac{1n}{1} \right)] \end{aligned} \right\}. \quad (4.36)$$

Система (4.36) должна быть дополнена в общем случае уравнением для нулевых составляющих

$$v_0 = 1/1 (v_a + v_b + v_c). \quad (4.37)$$

Проектируя обобщенный вектор на оси фазных обмоток и учитывая нулевые составляющие, получаем формулы обратного преобразования ортогональных составляющих обобщенного вектора в фазные:

$$\begin{aligned}
va &= v1 \cos xc - v1 \sin xc + v0 \\
vb &= v1 \cos \left(xc - \frac{1n}{1} \right) - v1 \sin \left(xc - \frac{1n}{1} \right) + v0 \\
vc &= v1 \cos \left(xc + \frac{1n}{1} \right) - v1 \sin \left(xc + \frac{1n}{1} \right) + v0
\end{aligned} \tag{4.38}$$

Формулы (4.38) и (4.39) действительны для обобщенных векторов токов, потокосцеплений, напряжений и ЭДС статора и ротора.

Электромагнитная энергия трехфазной машины определяют выражением

$$W_{\text{Э}} = \frac{1}{2} (\Psi_{\text{sa}} i_{\text{sa}} + \Psi_{\text{sb}} i_{\text{sb}} + \Psi_{\text{sc}} i_{\text{sc}} + \Psi_{\text{ra}} i_{\text{ra}} + \Psi_{\text{rb}} i_{\text{rb}} + \Psi_{\text{rc}} i_{\text{rc}}). \tag{4.39}$$

Электромагнитный момент определим в соответствии. При этом считаем, что при повороте на угол Δx токи в обмотках статора и ротора не изменились. Воспользовавшись выражениями для потокосцеплений (4.40), (4.39), получим:

$$\begin{aligned}
M &= Z_p \{ i_{\text{sa}} i_{\text{ra}} \frac{d[L_{\text{sr}} \cos x]}{dt} + i_{\text{sa}} i_{\text{rb}} \frac{d[L_{\text{sr}} \cos(x+1\pi/1)]}{dt} + i_{\text{sa}} i_{\text{rc}} \frac{d[L_{\text{sr}} \cos(x-1\pi/1)]}{dt} + \\
&+ i_{\text{sb}} i_{\text{ra}} \frac{d[L_{\text{sr}} \cos(x-1\pi/1)]}{dt} + i_{\text{sb}} i_{\text{rb}} \frac{d[L_{\text{sr}} \cos x]}{dt} + i_{\text{sb}} i_{\text{rc}} \frac{d[L_{\text{sr}} \cos(x+1\pi/1)]}{dt} + \\
&+ i_{\text{sc}} i_{\text{ra}} \frac{d[L_{\text{sr}} \cos(x+1\pi/1)]}{dt} + i_{\text{sc}} i_{\text{rb}} \frac{d[L_{\text{sr}} \cos(x-1\pi/1)]}{dt} + i_{\text{sc}} i_{\text{rc}} \frac{d[L_{\text{sr}} \cos x]}{dt} \}.
\end{aligned} \tag{4.40}$$

Подставив в (4.40) выражения для токов статора и ротора в соответствии с (4.15), после преобразований имеем:

$$M = 1/1 Z_p L_m (i_{1r} i_{1s} - i_{1r} i_{1s}). \tag{4.41}$$

Что можно представить в форме векторного произведения:

$$M = 1/1 Z_p L_m [\mathbf{I}_r \times \mathbf{I}_s] = 1/1 Z_p L_m \text{Re}\{j \mathbf{I}_r \mathbf{I}_s\}. \tag{4.42}$$

Из (1.10) следует, что электромагнитный момент не зависит от токов нулевой последовательности.

Если подставить в (4.42) выражения для векторов токов из (4.41), то можно получить другие, более удобные формулы для определения электромагнитного момента:

$$M = 1/1 Z_p [\Psi_s \times \mathbf{I}_s] = 1/1 Z_p (\Psi_1 s i_{1s} - \Psi_1 s i_{1s}), \tag{4.43}$$

$$M = 1/1 Z_p K_r [\Psi_r \times \mathbf{I}_s] = 1/1 Z_p K_r (\Psi_1 r i_{1s} - \Psi_1 r i_{1s}), \tag{4.44}$$

$$M = 1/1 Z_p K_s [\mathbf{I}_r \times \Psi_s] = 1/1 Z_p K_s (i_{1r} \Psi_1 s - i_{1r} \Psi_1 s). \tag{4.45}$$

Уравнения (4.43), (4.44) не содержат периодических коэффициентов при любом выбранном значении скорости ω , системы координат. В теории электрических машин обычно используются системы координат,

вращающиеся с синхронной скоростью (система x, y), со скоростью ротора (система d, q) и неподвижные (система α, β). Выбор той или иной из указанных систем координат обычно производится на соображениях удобства для расчетов при питании непосредственно от сети.

Целью настоящей работы является синтез высококачественных асинхронных частотно-управляемых электроприводов. Это накладывает дополнительные ограничения на выбор систем координат. В настоящее время разработаны сравнительно простые и удобные методы оптимизации переходных процессов для таких координат электропривода, которые постоянны в установившемся режиме. В этом отношении системы координат α, β и d, q не могут быть использованы, так как установившемся режиме частоты регулируемых координат отличны от нуля, и лишь система координат x, y отвечает указанному требованию.

Дополнительные преимущества с точки зрения простоты представления объекта и синтеза регуляторов получаются при рациональном выборе угловой скорости и ориентации координатных осей в переходном режиме. Поскольку результирующие пространственные векторы токов, напряжений и потокосцеплений статора и ротора в установившемся режиме взаимно неподвижны, если питающие напряжения синусоидальны, любая система координат, привязанная к одному из этих векторов (назовем его «опорным»), пригодна для оптимизации.

Для получения шести основных структурных представлений АД, которые обозначаются далее по выбранному опорному вектору как структуры $U_s, U_r, I_s, I_r, \Psi_s, \Psi_r$, исходными являются уравнения. Применительно к каждому частному случаю ось 1 – системы координат направлена по опорному вектору, а ось 2 – в опережающем её на 10° направлении, поэтому уравнения, и упрощаются, так как проекция обобщенного опорного вектора на ось 1 равна нулю. При выводе уравнений АД в различных системах координат использованы те выражения электромагнитного момента, которые позволяют получить простейшие структуры с минимальным числом важнейших переменных, подлежащих регулированию.

Рассмотрим вывод уравнений структуры Ψ_r . Вектор потокосцепления статора можно представить в виде:

$$\Psi_s = I_s L's + K_r \Psi_r. \quad (4.46)$$

где $L's = L_{sl} + K_r L_{rl}$

Подставив (4.46) в первое уравнение (4.21), получим уравнение в операторной форме (при нулевых начальных условиях):

$$U_s = I_s [rs + (p + j\omega_c)L's] + (p + j\omega_c) K_r \Psi_r. \quad (4.47)$$

Из второго уравнения (1.11) получим:

$$I_r = K_r (\Psi_r/L_m - I_s) . \quad (4.48)$$

Подставив (4.48) во второе уравнение (4.22), имеем:

$$U_r = \Psi_r [K_r R_r/L_m + p + j(\omega_c - \omega)] - K_r R_r I_s. \quad (4.49)$$

Из (1.11) и (1.11) найдем:

$$U_s - K_r U_r = I_s [R' + (p + j\omega_c)L's] + \Psi_r (jK_r\omega - K_r^1 R_r/L_m). \quad (4.50)$$

где $R' = R_s + K_r^1 R_r$.

Разложив (4.49) на действительную и мнимую части, получим:

$$\left. \begin{aligned} U_{1s} - K_r U_{1r} &= i_{1s} R' (1 + pT_l') - \omega_c L_s' l_{1s} - \frac{K_r}{T_r} \Psi_{1r} \\ U_{1s} - K_r U_{1r} &= i_{1s} R' (1 + pT_l') - \omega_c L_s' l_{1s} - K_r \omega \Psi_{1r} \end{aligned} \right\}. \quad (4.51)$$

где $T_l' = L's/R'$; $T_r = L_r/R_r$.

Разложив (4.51) на действительную и мнимую части, найдем:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{1r} &= (U_{1r} T_r + i_{1s} L_m) / (1 + pT_r) \\ \omega_c &= \omega + (U_{1r} + K_r R_r i_{1s}) / \Psi_{1r} \end{aligned} \right\}. \quad (4.52)$$

По уравнениям (4.50), (4.51) и уравнению электромагнитного момента

$$M = 1/1 Z_p K_r \Psi_{1s} i_{1s}. \quad (4.53)$$

На рисунок построена структура Ψ_r АД.

Рассмотрим вывод уравнений структуры Ψ_s . Из первого уравнения (4.54) имеем:

$$I_s = K_s (\Psi_s/L_m - I_r). \quad (4.55)$$

Подставив (4.56) в первое уравнение (4.33), получим:

$$U_s = - K_s R_s I_r + [K_s R_s/L_m + (p + j\omega_c)] \Psi_s. \quad (4.56)$$

Вектор потокосцепления ротора подставим в виде:

$$\Psi_r = I_r L_r' + K_s \Psi_s. \quad (4.57)$$

Подставим (4.57) во второе уравнение (4.32):

$$U_r = (R_r + pL_r') I_r + j(\omega_c - \omega) L_r' I_r + K_s [p + j(\omega_c - \omega)] \Psi_s. \quad (4.58)$$

Из (4.58) и (4.57) находим:

$$U_r - K_r U_s = I_r (R'' + pL_r') + j(\omega_c - \omega) L_r' I_r + K_s [p + j(\omega_c - \omega)] \Psi_s. \quad (4.59)$$

Разложив (4.59) на действительную и мнимую составляющие, получим:

$$\left. \begin{aligned} U_{1r} - K_r U_{1s} &= i_{1r} R'' (1 + pT_l') - \omega_c L_r l_{1r} - \frac{K_r}{T_r} \Psi_{1s} \\ U_{1r} - K_r U_{1s} &= i_{1r} R'' (1 + pT_l') + \omega_c L_r' l_{1r} - K_s \omega \Psi_{1s} \end{aligned} \right\}. \quad (4.60)$$

Разложив (4.60) на действительную и мнимую составляющие, найдем:

$$\omega_c = U_{1s} + K_s R_{si1r} / \Psi_{1s}; \quad \Psi_{1s} = T_s U_{1s} + L_{mi1r} / (1 + pT_s). \quad (4.61)$$

На рисунок по (4.61), (4.62) и уравнению электромагнитного момента:

$$M = -1/1 Z_p K_s \Psi_{1s} i_{1r}. \quad (4.62)$$

построена структура Ψ_s АД.

Опуская промежуточные преобразования, приводим конечные уравнения для остальных структур.

$$U_{1r} - K_s U_{1s} = R'' (1 + pT_l'') i_{1r} - (\omega_c - \omega) L_r' i_{1r} - K_s / T_s \Psi_{1s} + \omega K_s \Psi_{1s}$$

$$U_{1r} = R'' (1 + pT_l'') i_{1r} + (\omega_c - \omega) L_r' i_{1r} - K_s / T_s \Psi_{1s} - \omega K_s \Psi_{1s}$$

$$\Psi_{1s} = (U_{1s} + K_s R_{si1r}) T_n \frac{1+pT_s}{1+pT_n'+p1TsT_n'} + i_{1r} \frac{\omega_c L_m T_n'}{1+pT_n'+p1TsT_n'}$$

$$\Psi_{1s} = (U_{1s} + K_s R_{si1r}) (-\omega_c \frac{T_s T_n'}{1+pT_n'+p1TsT_n'}) + i_{1r} \frac{L_m T_n' (1+pT_s)}{T_s (1+pT_n'+p1TsT_n')}$$

$$M = \frac{1}{1} Z_p K_s (i_{1r} \Psi_{1s} - i_{1r} \Psi_{1s}); \quad M - M_c = \frac{j}{Z_p} p \omega.$$

$$(4.63)$$

где $T_n' = T_s / (1 + \omega_c T_s)$.

Уравнения структуры U_r :

$$U_{1s} - K_r U_{1r} = R' (1 + pT_l') i_{1s} - \omega_c L_s' i_{1s} - \frac{K_r}{T_r} \Psi_{1r} - \omega K_r \Psi_{1r}$$

$$U_{1s} = R' (1 + pT_l') i_{1s} + \omega_c L_s' i_{1s} - \frac{K_r}{T_r} \Psi_{1r} + \omega K_r \Psi_{1r}$$

$$\Psi_{1r} = (U_{1r} + K_r R_{ri1s}) T_n'' \frac{1+pT_r}{1+pT_n''+p1TrT_n''} + i_{1s} \frac{(\omega_c - \omega) L_m T_n''}{1+pT_n''+p1TrT_n''} \quad (4.64)$$

$$\Psi_{1r} = (U_{1r} + K_r R_{ri1s}) [-\omega_c \frac{T_r T_n''}{1+pT_n''+p1TrT_n''}] + i_{1s} \frac{L_m T_n'' (1+pT_r)}{T_r (1+pT_n''+p1TrT_n'')}$$

$$M = \frac{1}{1} Z_p K_r (i_{1s} \Psi_{1r} - i_{1s} \Psi_{1r}); \quad M - M_c = \frac{j}{Z_p} p \omega.$$

где $Tn'' = Tr/[1+(\omega c-\omega)Tr^1]$.

Уравнения структуры I_s :

$$\begin{aligned}
 U1s - KrU1r &= R'(1 + pTl')i1s - \frac{Kr}{Tr}\Psi1r - \omega Kr\Psi1r \\
 \omega c &= \frac{u1s - Kru1r + \frac{Kr}{Tr}\Psi1r - Kr\omega\Psi1r}{Ls'i1s} \\
 \Psi1r &= (U1r + KrRri1s)Tn'' \frac{1+pTr}{1+1pTn''+p1TrTn''} + u1r \frac{(\omega c-\omega)TrTn''}{1+1pTn''+p1TrTn''} \\
 \Psi1r &= (U1r + KrRri1s) \left[-(-\omega c - \omega) \frac{TrTn''}{1+1pTn''+p1TrTn''} \right] + u1r \frac{Tn''(1+pTr)}{Tr(1+1pTn''+p1TrTn'')} \\
 M &= \frac{1}{1} ZpKri1s\Psi1r ; M - Mc = \frac{j}{Zp} p\omega.
 \end{aligned} \tag{4.65}$$

Уравнения структуры I_r :

$$\begin{aligned}
 U1r - KsU1s &= R'(1 + pTl')i1r - \frac{Kr}{Tr}\Psi1s - \omega Ks\Psi1s \\
 \omega c &= \frac{u1r - Ksu1s + \frac{Ks}{Ts}\Psi1s - Ks\omega\Psi1s}{Lr'i1r} + \omega \\
 \Psi1s &= (U1s + KsRsi1r) \frac{\frac{pT_0}{T_0}}{1+p\frac{T_0}{Ts}+p1T_0} + u1s \frac{\frac{pT_0}{T_0}}{1+p\frac{T_0}{Ts}+p1T_0} \\
 \Psi1s &= (U1s + KsRsi1r) \frac{\frac{-T_0}{T_0}}{1+p\frac{T_0}{Ts}+p1T_0} + u1s \frac{\frac{T_0(1+pTs)}{Ts(1+p\frac{T_0}{Ts}+p1T_0)}}{Ts(1+p\frac{T_0}{Ts}+p1T_0)} \\
 M &= \frac{1}{1} ZpKsi1r\Psi1s ; M - Mc = \frac{j}{Zp} p\omega.
 \end{aligned} \tag{4.66}$$

где $T_0 = 1/\omega c$.

Обратимся к анализу полученных структур. Критерием сравнительной оценки структурных схем АД может служить их относительная простота, определяющая удобство измерения, вычисления и регулирования координат АД, а также простота технической реализации регуляторов.

Структурные схемы по потокосцеплению Ψ_r и Ψ_s имеют небольшое число перекрестных связей, простые выражения для момента, сравнительно простые выражения для ω_c ; нелинейности в прямых каналах регулирования отсутствуют. Решающее преимущество этих структурных схем заключается в том, что они содержат лишь одну составляющую потокосцепления Ψ_{1r} или Ψ_{1s} , которая простейшим образом выражается через ток напряжения. Трудности развязки каналов здесь минимальны, а передаточные функции регуляторов наиболее просты. По сложности структуры Ψ_r и Ψ_s одинаковы, однако они неравноценны, если рассматривать их применительно к различным типам

приводов. Структура Ψ_s , содержащая в явном виде лишь токи ротора i_{1r} и i_{1r} , которые в короткозамкнутом АД не поддаются непосредственному измерению, очевидно, малопригодна для системы НПЧ – АД. Для этой системы следует рекомендовать структуру Ψ_r . И, напротив, структура Ψ_r малопригодна для МДП, так как не позволяет произвести непосредственное симметрирование фазных токов ротора, питаемого от НПЧ, с помощью контуров фазных токов. Эта задача легко осуществляется в структуре Ψ_s .

Структура U_s содержит наибольшее число прямых и обратных, собственных и перекрестных связей между двумя основными каналами управления. Здесь – сравнительно сложное формирование момента, а виде суммы двух произведений, и сложные зависимости между потокосцеплениями Ψ_{1s} и Ψ_{1s} , с одной стороны, и токами i_{1r} , i_{1r} и напряжениями u_{1s} , с другой.

Некоторым преимуществом структуры U_s является то, что $\omega_c = \text{const}$ для МДП и ω_c – независимая величина для НПЧ – АД. В связи с этим структуру U_s удобно использовать для оптимизации МДП, так как в этом случае все нелинейности находятся лишь в перекрестных связях, подлежащих компенсации.

В системе НПЧ – АД появляются нелинейные звенья в прямых каналах, формирующих Ψ_{1s} и Ψ_{1s} .

Структура U_r , сохраняя все недостатки структуры U_s , имеет более сложные нелинейные зависимости для формирования потокосцеплений, обозначенные через F_1 и F_1 , выражения для которых легко можно получить из Ψ_{1r} и Ψ_{1r} .

В токовых структурах I_s и I_r сокращается число перекрестных связей и упрощается формирование момента по сравнению с вариантами структур по напряжению. В частности, нет перекрестных связей по токам. Однако выражения для ω_c в токовых структурах значительно сложнее, чем во всех остальных, а нелинейные операторы F_1 , F_1 и F_1 , F_1 так же сложны, как и в структурах U_s и U_r . Последнее видно из выражений для Ψ_{1r} , Ψ_{1r} и Ψ_{1s} , Ψ_{1s} . Структура I_s несколько сложнее структуры I_r , но в целом токовые структуры практически сложны для технической оптимизации.

4.1 Способы и методы решения проблем энергосбережения на насосных станциях транспортировки нефти

Анализ возможных способов управления потоком нефти на НПС.

1) При помощи дросселирования на выходе.

Дросселирование насоса широко используется в нефтяной промышленности. При этом управляющая задвижка устанавливается на выходе насоса, как показано на рисунке 1.1.

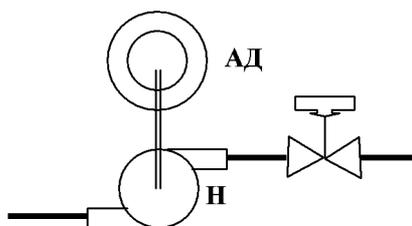


Рисунок 4.6 – Управление насосом при помощи дросселирования на выходе

При использовании этого метода управления перепад давления изменяет клапан обратного клапана. В результате можно повысить точность специальной кривой, а точка смещения насоса с точкой рабочего потока показана на рисунке 4.6.

Потеря барьера с широко открытой дверью для водопровода обычно составляет 10% от другой динамики. Эти потери должны быть скомпенсированы относительно расчетной точки для расчета характеристик напряжения сжатия.

Для многоходовых клапанов регулирующих клапанов необходимо иметь более 10-10% потенциального значения. Производители насосов не могут превышать $\pm 1\%$, потому что следует учитывать фактор погрешности. Кроме того, использование этого типа зоны или влияние зверя на использование трафика отрицательно влияет на эту ситуацию, поэтому рабочее колесо следует использовать для специальных целей или проекта недостаточно.

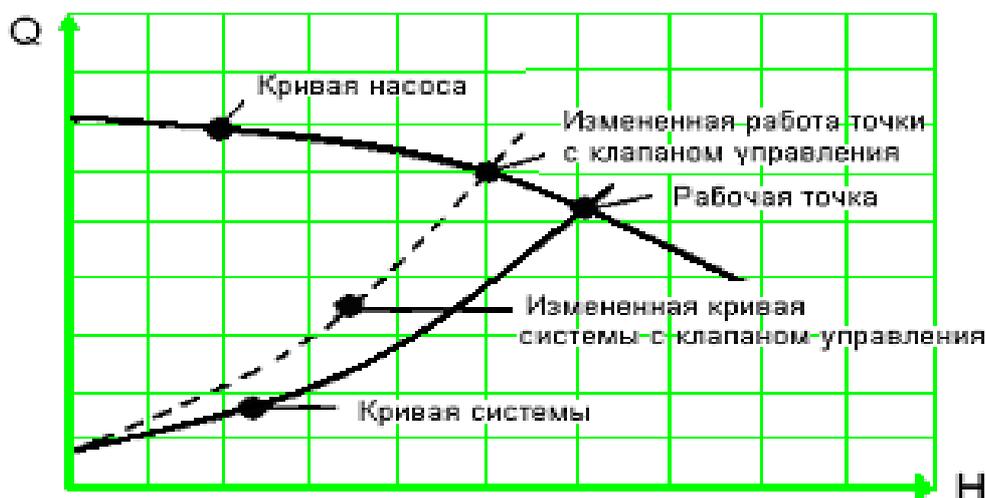


Рисунок 4.7 – Влияние дросселирования на характеристику сети

Имеются некоторые факторы, которые нужно отметить при этом способе управления.

Увеличенное падение давления, вызванное закрытием управляющей задвижки, является потерей энергии (рисунок 1.1).

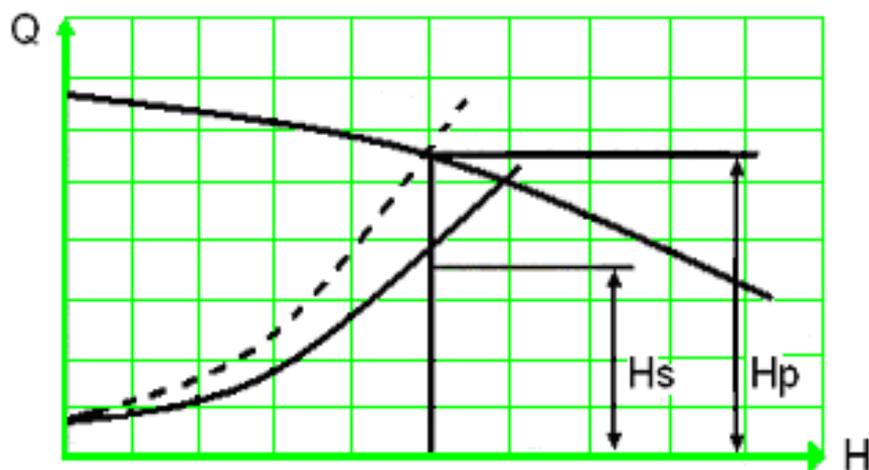


Рисунок 4.8 – Потери энергии при дросселировании

Полезный напор насоса – H_s , однако действительный напор насоса равен H_p . Поэтому разница ($H_p - H_s$) означает энергию, потерянную из-за дросселирования. Это только часть общих потерь к.п.д. Сдвиг рабочей точки также снижает к.п.д. насоса (рисунок 1.1). В этом случае к.п.д. насоса снижается с 11% до 11%.

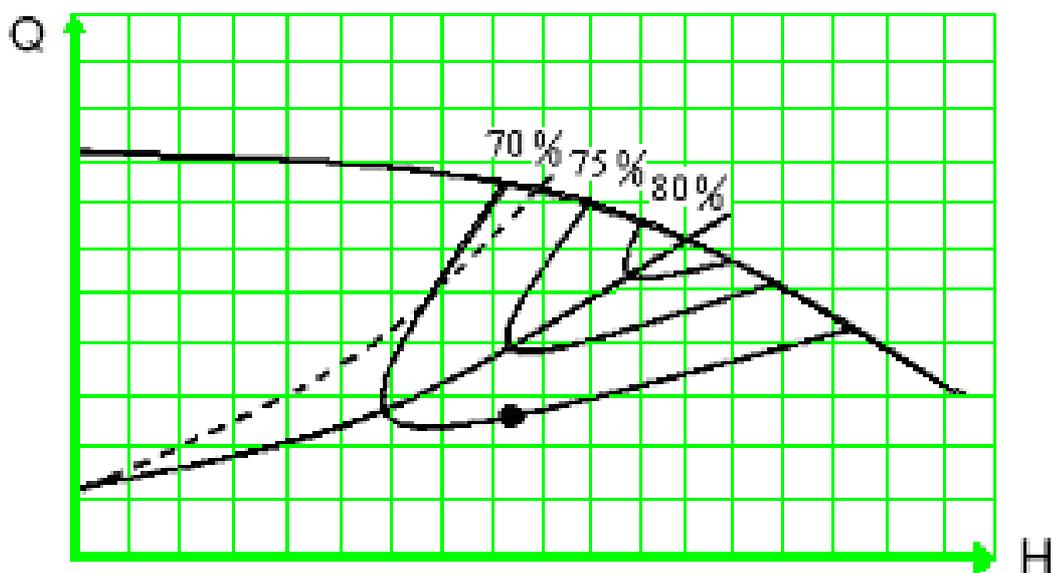


Рисунок 4.9 – Потери и к.п.д. насоса при использовании дросселирования

Трубопроводная система на рисунке 1.1 слишком упрощена. Необходимы трубы и вентили для изоляции и ремонта управляющей задвижки. Также необходимо предпринять меры для обеспечения минимального потока через насос во избежание парообразования жидкости и повреждения насоса. Отсюда конфигурация для этого вида управления может быть более сложной. Обычно полная система требует две управляющие задвижки и связанные с ними трубы и инструменты. Требования к байпасным

системам с большими подачами обычно связаны с экономично выбранными насосами с «горбатыми» характеристиками, это создает похожие трудности вне зависимости от того, используется или нет частотное управление.

2) Управление скоростью насоса с изменением скорости

Когда изменения насоса используются для управления составным потоком, специальная кривая изображения рисует поток рисунков на рисунке 1.1. Этот метод обеспечивает адекватную поставку адекватных поставок. Иногда этот метод контроля больше, чем исходящее управление, является более энергоэффективным. Однако при выборе этого метода учитывается множество факторов.

Этот тип управления сильно зависит от характеристик насоса и сети. Изображение, показанная на рисунке 1.1, является «идеалистической», которая показывает детали работы. В этом случае эффект разницы различен, и это лучшие способы регулировки частоты.

Периферийные конструкции (осевые и смешанные типы) не являются почти параболическими выражениями, которые не могут контролировать некоторые сострадательные рельефы. Обычно это сделано в насосе очень хорошей турбины насоса. Такой контроль скорости насоса отключен.

Потенциальная потеря может произойти. Перекачивание производится в небольших количествах, когда перекачивается.

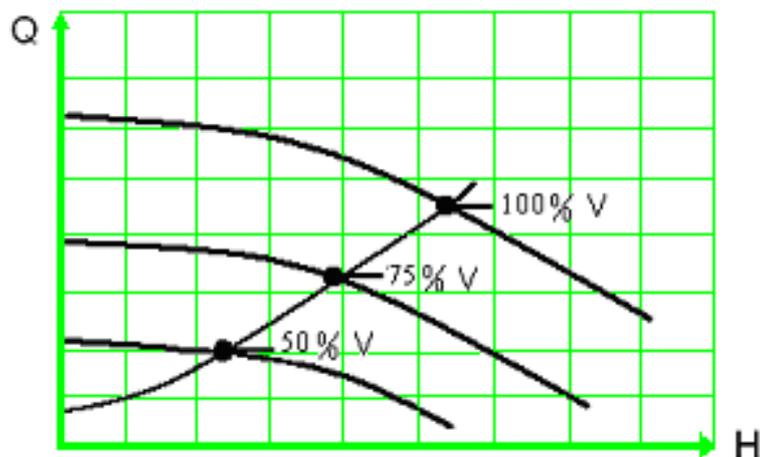


Рисунок 4.10 – Влияние управления скоростью на характеристику насоса

Регулирование режимов работы насосных агрегатов за счет изменения частоты вращения приводных двигателей в настоящее время, к примеру, возможно за счет применения следующих видов оборудования:

- гидравлические и электромагнитные муфты, для изменения частоты вращения вала насоса при сохранении постоянной частоты вращения вала электропривода;

- электронные регуляторы частоты вращения вала электропривода и, соответственно, частоты вращения вала насоса.

4.2 Анализ систем частотного регулирования мощных электроприводов, задачи создания специальных схем

Проведя анализ решения аналогичных проблем в других отраслях промышленности, в АО «КазТрансОйл» нами было отдано предпочтение частотному регулированию оборотов вала электропривода насосных агрегатов, поскольку, по предварительным расчетам, это при сравнительно невысоких затратах, результативно решало целый комплекс существующих проблем. Выбор в пользу технологии применения частотнорегулируемых электроприводов был сделан ввиду того, что данная технология является наиболее экономически эффективной при эксплуатации магистральных нефтепроводов, работающих в переменных технологических режимах перекачки нефти.

Мощность, потребляемая от сети при управлении преобразователем частоты, вычисляется по формуле:

$$P_{\text{элпч}} = P_{\text{мех}} / \eta_{\text{двиг}} \eta_{\text{п}}. \quad (4.67)$$

где $P_{\text{мех}}$ – механическая мощность на валу электродвигателя, равная полезной мощности механизма;

$\eta_{\text{двиг}}$ – к.п.д. электродвигателя;

$\eta_{\text{пч}}$ – к.п.д. преобразователя частоты.

При выполнении работ по внедрению частотных регуляторов необходимо максимально использовать основные функции применяемых частотных преобразователей:

- плавный пуск и торможение электродвигателей с регулируемым темпом;
- плавное регулирование либо поддержание на заданном уровне параметров электропривода;
- рекуперация энергии при торможении (эта способность характерна для преобразователей частоты на базе автономных инверторов тока);
- снижение усилий в обмотках двигателей;
- ограничение тока и момента при динамических режимах работы;
- автоматическое повторное включение (АПВ) после кратковременного исчезновения напряжения;
- диагностика неисправностей;
- связь через интерфейсы с системами управления и визуализации более высокого уровня;
- автоматическое регулирование технологического параметра при помощи встроенного пропорционально-интегрального регулятора.

Экономия энергии при использовании частотно регулируемых электроприводов.

Один из главных стимулов для использования частотно регулируемых электроприводов является экономия электроэнергии, которую можно

получить при их внедрении [1,1]. Это происходит благодаря законам подобия, которые определяют работу центробежного насоса (или вентилятора). Эти законы могут быть обобщены следующим образом:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2}, \quad (4.68)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{(N_1)^2}{(N_2)^2}, \quad (4.69)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{(N_1)^3}{(N_2)^3}, \quad (4.70)$$

где Q – подача насоса на выходе, м³/с;

H – напор на выходе насоса, м;

P – входная мощность на валу насоса, кВт;

N – частота вращения насоса, об/мин.

Из этих формул очевидно, почему используют энергосбережение, как главный стимул при использовании частотно регулируемых электроприводов. Если, например, нужно снизить подачу насоса на 10% (и поэтому скорость на 10%), из формулы (1.1) следует, что нужна входная мощность 11,1% от мощности, требуемой при 100% скорости. Это означает экономию энергии 11,1%.

Однако это утверждение не совсем корректно так как, уравнение (1.1) остается справедливым, если не требуется статический напор. Для того чтобы понимать, что происходит, необходимо построить базовую модель характеристик сети и насоса.

Потребность в энергии пропорциональна произведению $H \times Q$, но в расчёте также участвует к.п.д. привода (частотно регулируемый привод и двигатель) и к.п.д насоса, которые все являются функциями рабочей скорости и мощности. Существуют публикации, которые описывают методы для составления таблиц расходов на электроэнергию и также норму прибыли для частотно регулируемых электроприводов.

В дополнение к энергосбережению и большей точности в управлении при использовании частотно регулируемых электроприводов существует еще ряд преимуществ в работе, на которые необходимо обратить внимание.

Снижение эффекта “гидравлического удара”

Гидравлический удар – это проблема, вызванная быстрым снижением подачи нефти. Эти изменения подачи создают быстрые всплески давления, что вызывает повреждения труб или сдвиг опор трубопровода. Находящиеся по ходу потока устройства, такие как вентили, могут быть также повреждены.

Прямой пуск насосов может вызвать эти последствия гидравлического удара, так как не предусматривает возможности для плавного пуска насоса.

Имеются устройства плавного пуска с пониженным напряжением, которые способны взять на себя эти типы проблем. Если, однако, ЧРП рассматривается для управления насосом, это может принести дополнительное преимущество. ЧРП позволяет пользователю постепенно увеличивать темп разгона на желательном уровне, при этом развивая все же полный момент в диапазоне изменения скоростей, и также ограничивая пусковой ток на уровне не более 100% от полного тока нагрузки или меньше. В некоторых случаях, когда используются мощные насосы в местах со слабыми источниками электропитания, это может быть единственно возможным способом для запуска насосного агрегата.

Уменьшение проблем с кавитацией

Кавитация – это явление, которое возникает, когда статическое давление падает ниже давления парообразования жидкости. (Согласно теореме Бернулли там, где жидкость течет через сопротивление, динамическое давление растет, а статическое – падает). Результатом кавитации являются формирование пузырьков паров жидкости, которые потом разрушаются дальше по течению от точки с низким статическим давлением. Разрушающиеся пузырьки паров имеют очень высокую и концентрированную ударную силу, которые с течением времени образуют на поверхности эффект, подобный действию песчаной струи.

Когда насос работает в таком режиме, возможно, появление разрушающей кавитации, которое зависит от некоторых параметров насоса. Hydraulic Institute (ANSI/HI 1.1.1-1111) предлагает метод для определения возможности возникновения проблемы разрушающей кавитации.

Метод расчета основан на определении критической «энергии всасывания» (Suction Energy – S_E) [1].

$$S_E = De \times n \times S \times s.g. \quad (4.71)$$

где De – диаметр рабочего колеса, в дюймах;

n – частота вращения насоса, об/мин;

S – специфическая скорость всасывания (Suction Specific Speed) – $(n \times P_r \times 0,1)/(T_{кз} \times 0,11)$;

P_r – подача насоса, в галлонах в минуту;

$T_{кз}$ – требуемый кавитационный запас, т.е. требуемый напор на всосе, который необходим на стороне всасывания для втягивания внутрь жидкости;

$s.g.$ – удельная масса жидкости.

Стандарт Hydraulic Institute определяет, когда кавитация может вызвать проблемы для центробежного насоса. Он устанавливает ограничения на величину энергии всасывания, при $S_E = 110 \times 10$ когда величина энергии всасывания достигает значительных значений, и при $S_E = 110 \times 10$ начало недопустимо больших величин энергии всасывания.

Необходимо отметить, что в режимах работы насосных агрегатах, когда насос может перейти в точку с недопустимой высокой энергией всасывания,

снижение частоты вращения агрегата вызовет снижение энергии всасывания в квадратичной зависимости, что надо учитывать при проектировании системы управления.

Снижение износа уплотнений и подшипников

Снижение частоты вращения насоса снижает износ уплотнений и подшипников. Это можно проследить, исследуя индекс надежности (Reliability Index) (R_i) изготовителя насоса [1]. В частном случае R_i определяется как произведение трех величин:

$$R_i = F_R \times F_D \times F_Q. \quad (4.72)$$

где значение F_R – зависит от рабочей частоты вращения насоса;

значение F_D – зависит, от диаметра рабочего колеса насоса;

значение F_Q – зависит, от величины подачи.

По данным завода изготовителя значение $F_R = 0,1$, когда насос работает на номинальной скорости. Если насос работает ниже номинальной скорости, значение принимается равным от 0,1 до 1 в пропорции к рабочей скорости. Если, например, насос сконструирован для работы на номинальной частоте вращения 1000 об/мин, и при использовании ЧРП работает на 10% скорости (1100 об/мин), то $F_R = 0,1$.

F_D , зависит от частоты вращения насоса и диаметра рабочего колеса. Этот фактор учитывает силы, воздействующие на подшипники и уплотнения из-за неравномерного распределения давления в корпусе, и сил, возникающих из-за взаимодействия лопастей рабочего колеса с выходной производительностью насоса. Таким образом, если насос имеет диапазон подрезки от 110 мм до 111 мм, то принимается значение $F_D = 1,0$, если рабочее колесо подрезано до 111 мм, от оптимального диаметра, показатель падет по кубическому закону. При полном диаметре и полной скорости $F_D = 0,011$, но при снижении частоты вращения до 10%, величина $F_D = 0,1$.

F_Q является фактором для учета влияния величины подачи на выходе насоса на к.п.д. насосного агрегата. При изменении к.п.д. от максимума по кривой к.п.д., когда подача управляется дросселированием, происходит увеличение уровня вибраций в подшипниках и уплотнениях, что снижает надежность работы всего агрегата. Величина фактора снижается от $F_Q = 0,1$ до $F_Q = 0,11$.

Рассмотрим влияние изменение индекса надежности R_i в случае, когда насос работает на полной номинальной частоте вращения и дросселируется управляющей задвижкой на уровне 10% от номинальной подачи, подрезка рабочего колеса 10% от стандартного диаметра (что имеет место на некоторых насосных станциях “КазТрансОйл”). В этом случае к.п.д. насоса 11,1%, на верхнем пределе подачи к.п.д. – 11%, $F_R = 0,1$, $F_D = 0,1$, $F_Q = 0,101$. Следовательно, при управлении дросселированием индекс надежности $R_i = 0,111$.

При этих же условиях, когда используется ЧРП для снижения подачи до

10% при помощи управления частотой вращения насосного агрегата (подача пропорциональна скорости, статический напор отсутствует). $F_R = 0,1$, $F_D = 0,1$, $F_Q = 1,0$. И показатель надежности, значительно выше $R_i = 0,11$. То есть в случае регулирования скорости надежность увеличивается в 1,11 раз по сравнению со случаем дросселирования.

Конечно коэффициенты, указанные здесь, демонстрируют данные одного из изготовителей насосов, основанные на экспериментах, и приведены здесь в качестве примера. При использовании регулируемого электропривода центробежных насосов, в каждом конкретном случае для расчета индекса надежности необходимо иметь данные заводов изготовителей насосных агрегатов.

Применение частотнорегулируемого электропривода позволяет использование цифровой связи для управления электроприводом, передачи сигналов задания и контроля параметров системы привода, дает значительные преимущества при эксплуатации системы в транспортировке нефти. Это означает не только более точные сигналы управления, но и возможность отслеживать в режиме реального времени такие данные двигателя, как скорость, мощность, ток, напряжение, неисправности в системе, тепловые способности к перегрузке, выходы различных датчиков в системе и количество часов работы. Позволяет операторам тщательно следить за работой, искать неисправности, и использовать эти данные в пакетах программного обеспечения для более качественного и безаварийного технического обслуживания.

Снижение утечек

Если возможно устранить управляющие задвижки и связанные с ним трубы, это может позволить значительное снижение утечек в уплотнениях управляющих задвижек и фланцев. Используя данные фирмы SOСМЕ для легких жидкостей, получают данные об утечке только в уплотнениях управляющих задвижек и фланцев – около пол тонны в год.

На данный момент использование ЧРП в системах управления для центробежных насосов с обратной связью по нагрузке, исследовано недостаточно полно. Встречаются рекомендации по настройке контуров управления по расходу и давлению, с использованием вентилей управления, нет конкретных рекомендации по настройке этих контуров при использовании ЧРП, как конечного элемента управления.

Одним из основных преимуществ ЧРП по сравнению с управляющей задвижкой является устранение непостоянства, которое вносит управляющая задвижка в работу контура обратной связи. Это непостоянство вызвано зоной нечувствительности, которая присуща фрикционным компонентам управляющей задвижки таким, как шток и уплотнения. При подачи сигнала на задвижку, она начинает движение с задержкой времени. Эта зона нечувствительности, обусловленная трением, может быть в пределах 1% в новых задвижках и увеличивается за срок службы задвижки. Иногда используются цифровые системы позиционирования для уменьшения эффекта

зоны нечувствительности. Однако если возможно использовать управление скоростью насоса для достижения того же самого управления, отпадают проблемы с зоной нечувствительности.

Есть вопросы, на которые нужно обратить внимание при применении ЧРП в системе управления с обратной связью. Одним из них является скорость реакции, темп, с каким насос может изменить скорость по заданному сигналу системой управления. Определяется темп моментом инерции комплекса насос-трансмиссия-двигатель, инерцией столба жидкости и имеющимся избыточным моментом (большим, чем требуется для поддержания текущей скорости под нагрузкой). Это задает темп разгона

5 Непосредственные преобразователи частоты в системе автоматизированного электропривода

5.1 Принцип действия непосредственного преобразователя частоты

В последнее время частоты различаются для использования частоты различных преобразователей частоты (ПЧ) для управления, таких как теория работы, схемное решение и управление алгоритмом. Используйте современные стабильные преобразователи, потому что первый отказавший интерфейс питания не скомпрометирован.

По выходному напряжению или происхождению инвертора его можно частить на преобразователи частоты (NFC или циклонные преобразователи) и преобразователи звена постоянного тока.

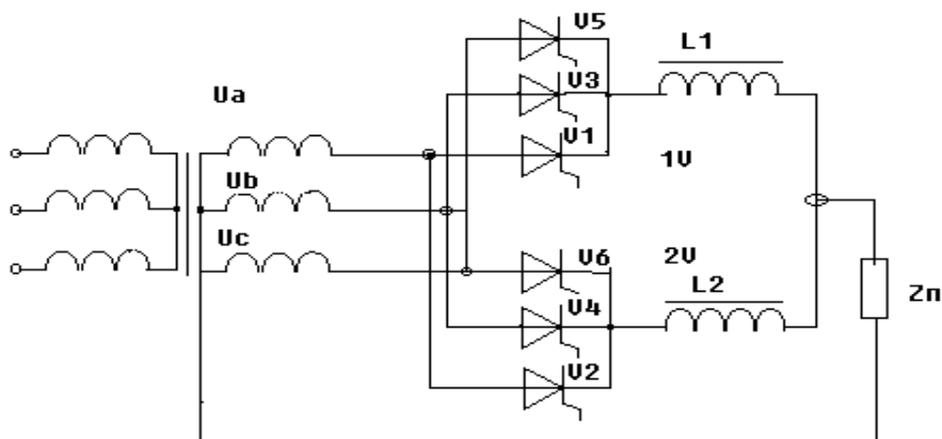


Рисунок 5.1 - Однофазный НПЧ

Многие функции поступают от входов NFC, частотных частот, размеров и перекрытий напряжений кривой фазового напряжения (или тока). Выполните этот тип устройства на устройстве на требуемое напряжение или текущее напряжение и разность напряжений, необходимых на устройстве. Он преобразует энергию, высокую эффективность, малый размер и NFC людей.

Они осуществляются в соответствии с поездками (однофазные, многофазные, нулевые, мостовые). Чтобы проиллюстрировать теорию преобразования на рисунке 5.1, упрощенные схемы NFC преобразуют однофазные напряжения в частоты $F1$ и усиливают трехфазное напряжение рабочей частоты $F1$.

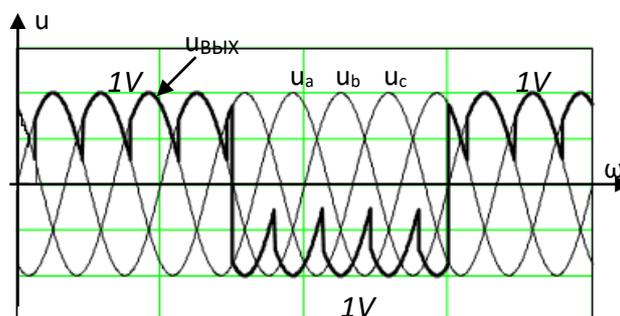


Рисунок 5.2 - Выходное напряжение преобразователя

Преобразователь выполнен по схеме двухкомплектного реверсивного выпрямителя по встречно-параллельной нулевой схеме. Каждая группа $1V$ и $1V$ открывается на время, равное полупериоду выходного напряжения $T_1/1$, причем положительная полуволна формируется при работе группы $1V$, отрицательная – группы $1V$. Выходное напряжение преобразователя представляет собой огибающую фазных напряжений (рисунок 5.2). Форма этого напряжения зависит от числа фаз сети, частоты выходного напряжения, которую можно регулировать путем изменения длительности проводимости групп $1V$ и $1V$, и т.д.

Недостатком NFC является ограниченный диапазон частот производства. Максимальный набор составляет 50 Гц в 50 мильях. Увеличение частоты клапана может быть связано с отказом от естественного цикла, увеличением фазы питания или подачей высокой частоты на преобразователь напряжения. Поэтому использование NFC в приводах управляемой электроники ограничивается низкоскоростным, электрическим током и цепями управления в соответствии со схемой вентилятора.

5.2 Способы формирования выходного напряжения НПЧ

Автоматическая схема питания использует прямые и частотные преобразователи в естественных и искусственных конструкциях.

Изучение исследований NFC является трудным для серии клинических гармоник выходного напряжения и невозможно в некоторых ситуациях. Потому что выходная кривая - это отношение входной и выходной частоты. Следовательно, вычисляется выходная кривая выходного напряжения, а затем вычисляется коэффициент Фурье, дополнительные сложности, такие как частотный выход и методы модуляции. Тем не менее, вы можете использовать результаты испытаний, показанные в виде таблеток и графиков.

В приведены расчеты электромагнитных процессов в НПЧ, проводимые с помощью так называемых переключающих или коммутационных функций.

Коммутационные функции при заданном временном законе изменения модулирующего напряжения дают возможность записать в аналитической форме последовательность включенных и выключенных состояний вентилях НПЧ. При известном законе изменения ЭДС источника питания преобразователя с помощью таких функций можно получить в общем виде аналитические выражения для напряжений, формируемых отдельными группами вентилях преобразователя.

Как известно, силовая схема НПЧЕ представляет собой m реверсивных преобразователей постоянного тока, подключенных к сети переменного тока, которая обеспечивает коммутацию тиристорных. Кривая выходного напряжения формируется с помощью системы управления из отрезков линейных напряжений питающей сети.

При использовании метода переключающих функций применяют следующие общепринятые допущения:

- сопротивление источника питания равно нулю (источник бесконечной мощности);
- вентили схем – идеальные, потери в цепях преобразователя равны нулю;
- коммутация вентилях мгновенная.

На рисунке 5.3 показана схема силовых цепей одной фазы НПЧ. Система управления преобразователя с естественной коммутацией вырабатывает импульсы с фазовыми углами $\alpha(t)$.

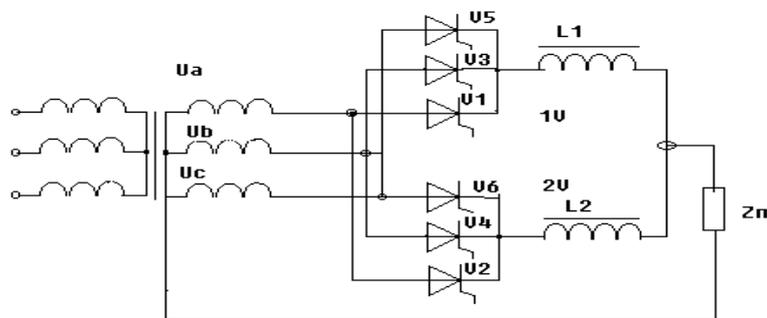


Рисунок 5.3 – Трехфазно - однофазный непосредственный преобразователь частоты

Выходное напряжение управляемого выпрямителя:

$$U_{\text{вых}} = U_m \cdot \frac{m}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha(t) . \quad (5.1)$$

где U_m - амплитуда фазного напряжения источника питания.

Для получения на нагрузке напряжения синусоидальной формы:

$$U_{\text{вых}} = U_m \cos(\omega_2 t). \quad (5.2)$$

угол управления вентилями необходимо менять по закону:

$$\alpha(t, r) = \arccos(r \cos(\omega_2 t)). \quad (5.3)$$

где $r = \frac{U_{2m}}{U_m \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}}$ - относительная величина выходного напряжения;

ω_1 - частота выходного напряжения.

При законе управления:

$$\alpha(t, r) = \arccos r. \quad (5.4)$$

получаем прямоугольную форму выходного напряжения.

Из принципа действия НПЧЕ следует, что вентили в группах коммутируются напряжением сети с углом управления, зависящим от желаемой формы и величины выходного напряжения, а переключение групп связано с изменением направления тока нагрузки. Для вывода аналитических выражений выходного напряжения НПЧ применены переключающие функции двух видов:

- $F(t, r), F^\wedge(t, r)$ - описывающие состояния каждого вентиля в фазе источника питания;

- $F(\varphi_2), F^\wedge(\varphi_2)$ - описывающие работу групп вентиляей (φ_1 - фазовый угол нагрузки).

Тогда выходное напряжение НПЧ можно записать, как:

$$U_{\text{Вых}} = \left\| F_{11}(t, r) F_{12}(t, r) F_{13}(t, r) \right\| \cdot \begin{Bmatrix} U_{\text{ex1}} \\ U_{\text{bx2}} \\ U_{\text{bx3}} \end{Bmatrix} \cdot F(\varphi_2) - \left\| F_{11}^\wedge(t, r) F_{12}^\wedge(t, r) F_{13}^\wedge(t, r) \right\| \cdot \begin{Bmatrix} U_{\text{bx1}} \\ U_{\text{bx2}} \\ U_{\text{bx3}} \end{Bmatrix} \cdot F^\wedge(\varphi_2). \quad (5.5)$$

Для трёхфазно - однофазного преобразователя переключающие функции равны:

$$F(t, r) = \frac{1}{3} - \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin n \frac{2\pi}{3}}{n\pi} \exp jn \left[\omega_1 t + M(t, r) - (g-1) \frac{2\pi}{3} \right], \quad (5.6)$$

$$F^\wedge(t, r) = \frac{1}{3} + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin n \frac{\pi}{3}}{n\pi} \exp jn \left[\omega_1 t - M(t, r) - (g-1) \frac{2\pi}{3} \right], \quad (5.7)$$

$$F(\varphi_2) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{2m-1} \sin[(2m-1)(\omega_2 t + \varphi_2)], \quad (5.8)$$

$$F'(\varphi_2) = \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{2m-1} \sin[(2m-1)(\omega_2 t + \varphi_2)]. \quad (5.9)$$

где $M(t, r) = \frac{\pi}{2} - \alpha(t, r)$;

Наиболее общее выражение выходного напряжения трёхфазного – однофазного НПЧ:

$$U_{\text{вых}} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} U_{\text{вх}} \left\{ \left[\sin M(t, r) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin[Pk\omega_1 t + (Pk \pm 1)M(t, r)]}{Pk \pm 1} \right], \quad (5.10)$$

$$\times F(\varphi_2) - \left[\sin M(t, r) - \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{Pk \sin[PK\omega_1 t - (pk \pm 1)M(t, r)]}{Pk \pm 1} \right] \times F(\varphi_2) \}. \quad (5.11)$$

где P - пульсность преобразователя.

Из (1.11) следует, что частота, величина и форма кривой выходного напряжения зависят только от вида модулирующей функции. Тригонометрические функции от $M(t, r)$ раскладываются в ряды Фурье:

$$\left. \begin{aligned} \cos[(PK \pm 1)M(t, r)] &= a_{pk \pm 1, 0} + \sum_{n=1}^{\infty} a_{pk \pm 1, 2n} \cos 2n(\omega_2 t + \psi); \\ \sin[(PK \pm 1)M(t, r)] &= \sum_{n=1}^{\infty} b_{pk \pm 1, n} \sin n(\omega_2 t + \psi); \\ \sin M(t, r) &= \sum_{n=1}^{\infty} b_{1, n} \sin n(\omega_2 t + \psi), \end{aligned} \right\} \quad (5.12)$$

$$\left. \begin{aligned} a_{pk \pm 1, 0} &= \frac{1}{\pi} \int_{\psi}^{\pi+\psi} \cos[(pk \pm 1)M(t, r)] d(\omega_2 t); \\ a_{pk \pm 1, 2n} &= \frac{2}{\pi} \int_{\psi}^{\pi+\psi} \cos[(pk \pm 1)M(t, r)] \cos 2n\omega_2 t d(\omega_2 t); \\ b_{1, n} &= \frac{2}{\pi} \int_{\psi}^{\pi+\psi} \sin M(t, r) \sin n\omega_2 t d(\omega_2 t); \\ b_{pk \pm 1, n} &= \frac{2}{\pi} \int_{\psi}^{\pi+\psi} \sin[(pk \pm 1)M(t, r)] \sin n\omega_2 t d(\omega_2 t). \end{aligned} \right\} \quad (5.13)$$

Используя соотношения (5.10)-(5.13), можно получить аналитическое выражение выходного напряжения НПЧ для любой модулирующей функции $M(t,r)$ с периодом T_1 . На рисунке 5.4 представлены программа и расчет кривой выходного напряжения НПЧ при линейной модулирующей функции. Рисунок 5.4 иллюстрирует программу и расчет выходного напряжения НПЧ при арккосинусоидальной модулирующей функции.

Важным достоинством метода переключающих функций является его универсальность-возможность расчёта напряжений и токов различных схем НПЧ для любой периодической модулирующей функции $M(t,r)$. Это преимущество, а также приемлемость применяемых допущений задачам данной работы позволяют использовать метод переключающих функций для исследования МДП при питании ротора от НПЧ с конечным числом фаз выходного напряжения.

В предыдущем часте параметры выходной частоты, фазы, напряжения, независимой, интерактивной регулировки и естественного переключающего клапана NFC могут быть реализованы посредством регулирования МДП, которое в настоящее время обсуждается законом, и полной схемы управления электроэнергией. Такие системы были заблокированы подключенными к ТИР-сертифицированным драйверам, искусственным гетахаруко (присоединение (GTO) полной цепи управления переключателем) и (aijisiiti) ТИР-драйверам, подключенным к различным полярным транзисторам, подключенным aibijiti.

Одним из таких вариантов является установка длительности импульса функции переключения выходного напряжения NFC. В отличие от системы СИ, модули постоянного тока используются для преобразователей, модификация не влияет на входное напряжение, но переключает переключатели групп клапанов. Этот метод определения выходного напряжения является SHIMP.

"Положительная" и "отрицательная" полуволны описываются, как:

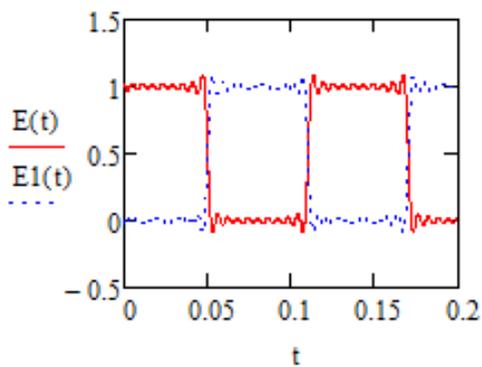
$$u_{2l}(t) := \left(\frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot U_m}{2 \cdot \pi} \right) \cdot \left[\sin(M(t)) + \sum_{k=1}^{10} \left[\frac{\sin[p \cdot k \cdot w \cdot t + (p \cdot k + 1) \cdot M(t)]}{p \cdot k + 1} + \frac{\sin[p \cdot k \cdot w \cdot t + (p \cdot k - 1) \cdot M(t)]}{p \cdot k - 1} \right] \right]$$

$$u_{21}(t) := \left(\frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot U_m}{2 \cdot \pi} \right) \cdot \left[\sin(M(t)) - \sum_{k=1}^{10} \left[\frac{\sin[p \cdot k \cdot w \cdot t - (p \cdot k + 1) \cdot M(t)]}{p \cdot k + 1} + \frac{\sin[p \cdot k \cdot w \cdot t - (p \cdot k - 1) \cdot M(t)]}{p \cdot k - 1} \right] \cdot (-1)^{p \cdot k} \right]$$

Ввод исходных данных:

$U_m := 100$ - амплитуда входного напряжения

$w := 100 \cdot \pi$ - частота входного напряжения

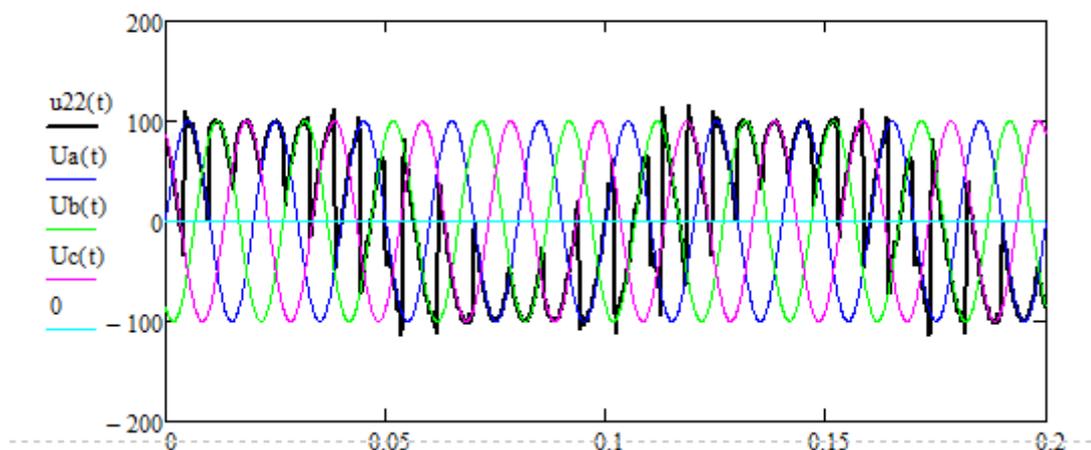


Переключающие функции:

$$\rho := \psi \quad E(t) := \left(\frac{1}{2}\right) + \left(\frac{2}{\pi}\right) \cdot \sum_{m=1}^{10} \left[\left(\frac{1}{2 \cdot m - 1}\right) \cdot \sin[(2 \cdot m - 1) \cdot (\omega_2 \cdot t + \rho)] \right]$$

$$E1(t) := \frac{1}{2} - \left(\frac{2}{\pi}\right) \cdot \sum_{m=1}^{10} \left[\left(\frac{1}{2 \cdot m - 1}\right) \cdot \sin[(2 \cdot m - 1) \cdot (\omega_2 \cdot t + \rho)] \right]$$

Результат расчета



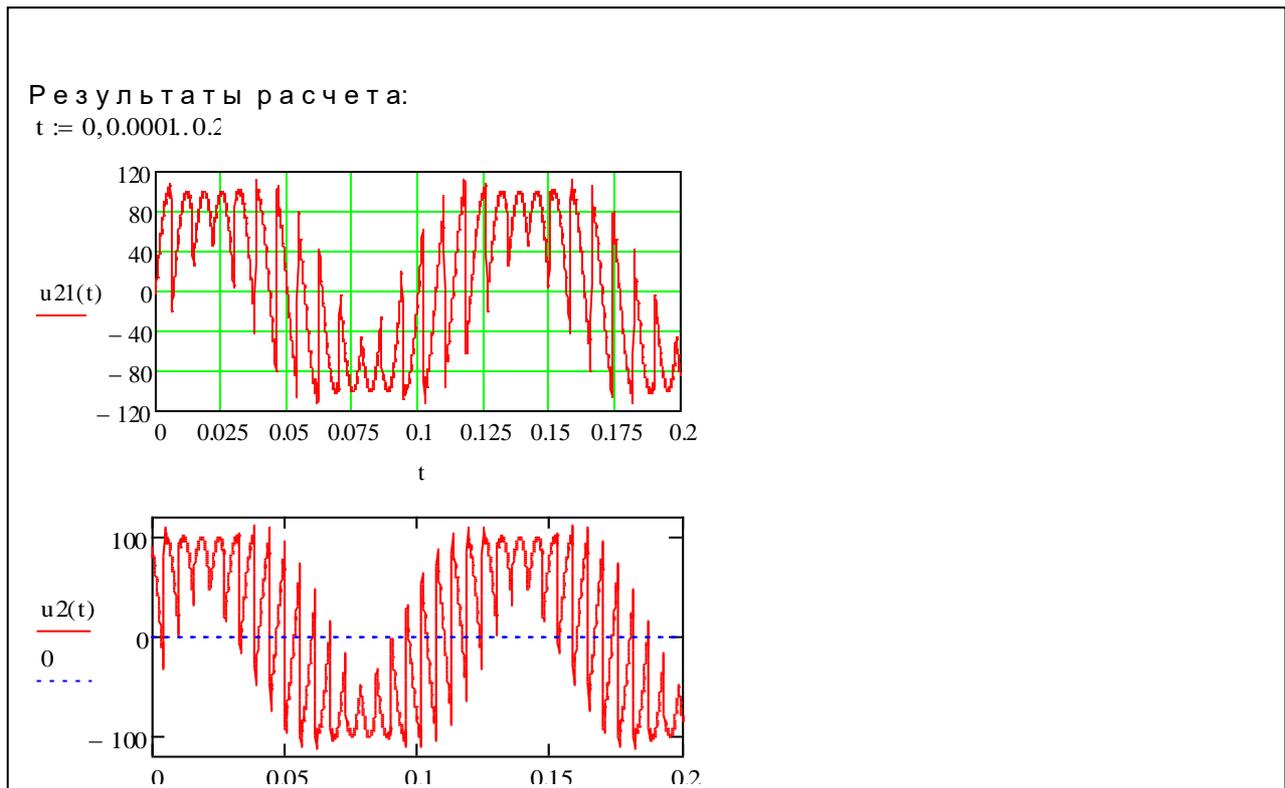
$$U_a(t) := U_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$U_b(t) := U_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t - 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right)$$

$$U_c(t) := U_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t + 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right)$$

- входное напряжение

Рисунок 5.4 - Результаты НПЧ с ШИМ



Ввод исходных данных:

$U_m := 100$ - амплитуда входного напряжения

$\omega := 100 \cdot \pi$ - частота входного напряжения

$\psi := \frac{\pi}{6}$ - угол сдвига нагрузки

$\omega_2 := \frac{\omega}{6}$ - частота выходного напряжения

$p := 3$ - число питающих фаз

"Положительная" и "отрицательная" полуволны описываются, как:

$$u_2(t) := \left(\frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot U_m}{2 \cdot \pi} \right) \cdot \left[\sin(M(t)) + \sum_{k=1}^{10} \left[\frac{\sin[p \cdot k \cdot \omega \cdot t + (p \cdot k + 1) \cdot M(t)]}{p \cdot k + 1} + \frac{\sin[p \cdot k \cdot \omega \cdot t + (p \cdot k - 1) \cdot M(t)]}{p \cdot k - 1} \right] \right]$$

Переключающие функции:

$$\rho := \psi$$

$$E(t) := \left(\frac{1}{2}\right) + \left(\frac{2}{\pi}\right) \cdot \sum_{m=1}^{10} \left[\left(\frac{1}{2 \cdot m - 1}\right) \cdot \sin[(2 \cdot m - 1) \cdot (\omega_2 \cdot t + \psi)] \right]$$

$$E1(t) := \frac{1}{2} - \left(\frac{2}{\pi}\right) \cdot \sum_{m=1}^{10} \left[\left(\frac{1}{2 \cdot m - 1}\right) \cdot \sin[(2 \cdot m - 1) \cdot (\omega_2 \cdot t + \psi)] \right]$$

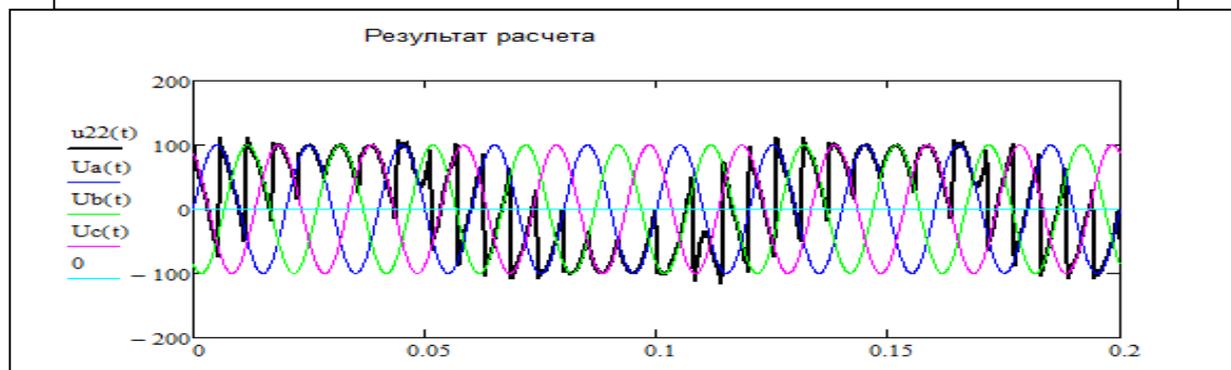
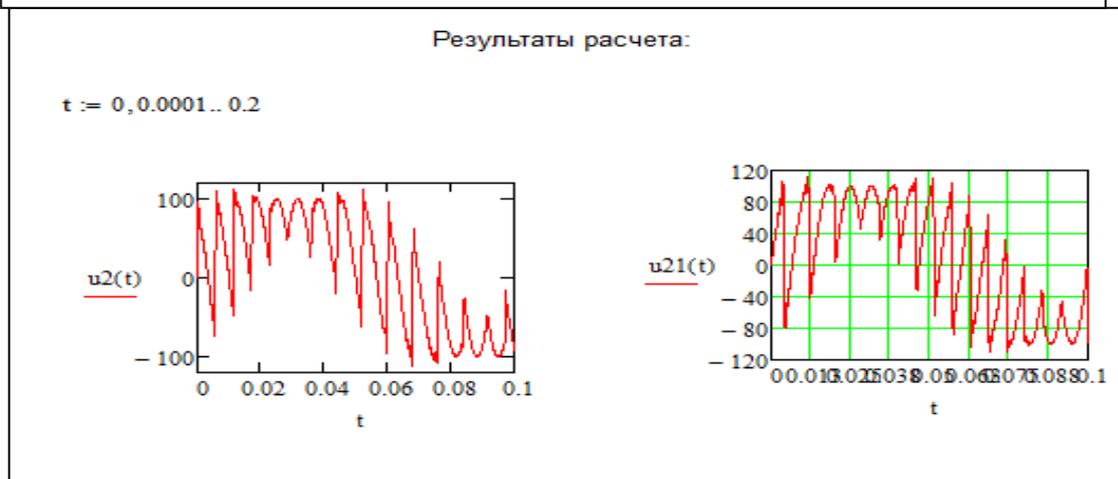


Рисунок 5.5 - Результаты НПЧ с ШИМП
В выходное напряжение НПЧ с ШИМП определено, как:

$$U_2 = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_{\text{вх.м}} \left[\frac{r}{2} \sin \omega_2 t + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{Pk} \frac{\cos[(Pk \pm 1) \arccos(\frac{r}{2})]}{Pk \pm 1} \sin[Pk \omega_1 + (Pk \pm 1) \omega_2] t \right]. \quad (5.14)$$

где $U_{\text{вх.м}}$ - амплитуда входного напряжения;

P – пульсность НПЧ;

r – относительный параметр регулирования напряжения;

ω_1, ω_2 – соответственно входная и выходная частота НПЧ.

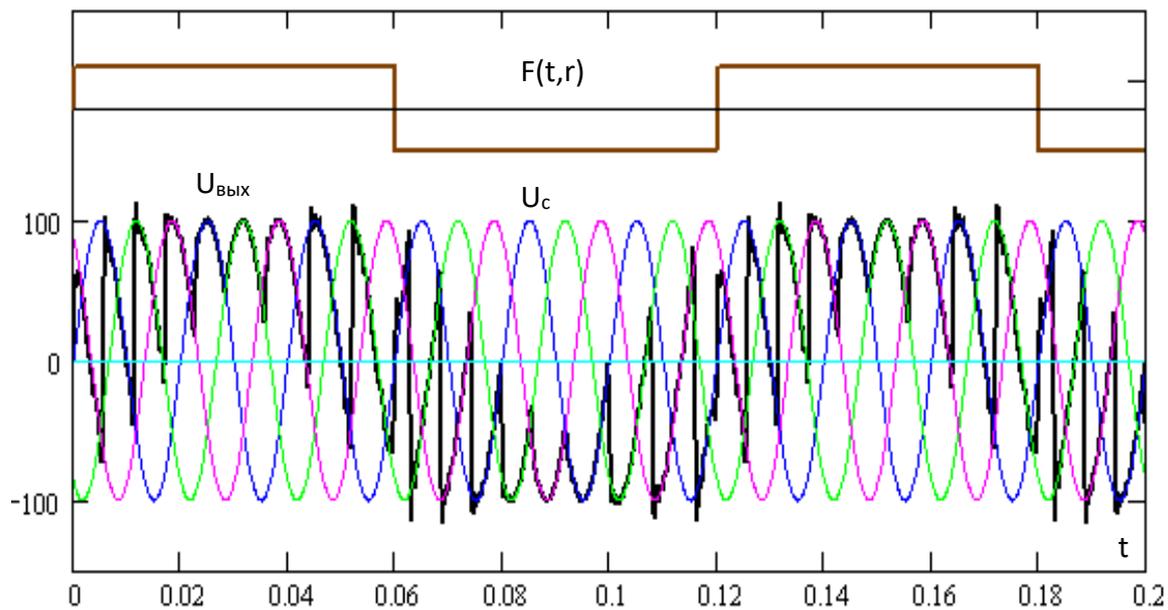


Рисунок 5.6 – Формирование выходного напряжения НПЧ

Амплитуда первой гармонической выходного напряжения :

$$A_1 = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_{\text{вх.м}} \frac{r}{2}. \quad (5.15)$$

при регулировании должна соответствовать величине $U_{2(1)}$, поэтому относительный параметр регулирования напряжения определяется, как:

$$r = \frac{2\pi U_2 K_T}{3\sqrt{3} U_1}. \quad (5.16)$$

где K_T - коэффициент трансформации трансформатора.

Кривые выходного напряжения НПЧ с ШИМП, рассчитанные в приложении «Mathcad», представлены на рисунке 5.7

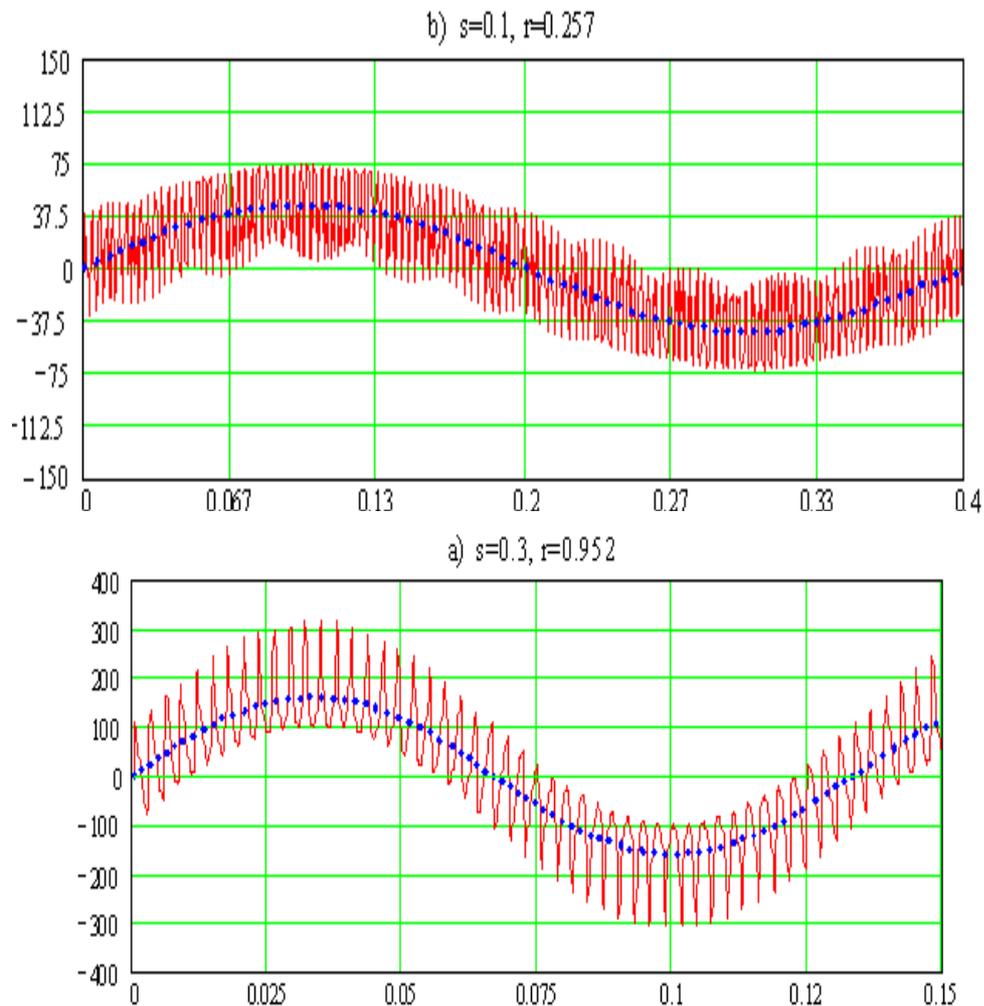


Рисунок 5.7 Выходное напряжение НПЧ с ШИМ при различных режимах работы ЦН

6 Безопасность жизнедеятельности

6.1 Расчет заземления электрооборудования НПС

Для заземления проводов электропривода насосов 10 кВ в работе предусмотрено использование ЗУ.

Главным заземлением на насосной станции является контурное заземление. По требованиям ПУЭ для сетей с эффективно заземленной нейтралью и значительным током замыкания на землю ($I_{\text{з}} > 500 \text{ А}$) величина допустимого сопротивления ЗУ не должна превышать 0,5 Ом.

Значения заземления:

ГПП являющаяся понижающей состоит из 2-ух трансформаторов 110/10 кВ на 1100 кВА.

Ожидаемый ток короткого замыкания на стороне 10 кВ: $I_{\text{кз}} = 2,627 \text{ кА}$.

Площадь площадки для заземления нейтрали трансформатора и защитного заземления КТП $S_{КТП} = 100 \times 100 = 10000 \text{ м}^2$.

Грунт двухслойный: удельное сопротивление первого слоя (суглинок) $\rho_{1ИЗМ} = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, второго (супесь) - $\rho_{2ИЗМ} = 150 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

По площади контура в грунт вколочены вертикальные элементы (стержни) диаметром $d = 0,12 \text{ м}$ и длиной $l = 3 \text{ м}$, закрепленные стальной полосой сечением $4 \times 40 \text{ мм}$, горизонтальная сетка внутри контура состоит из полос сечением $4 \times 40 \text{ мм}$.

Толщина первого слоя земли $h_1 = 2,6 \text{ м}$.

Глубина погружения электрода в землю - расстояние от поверхности грунта до электрода $t_0 = 0,8 \text{ м}$.

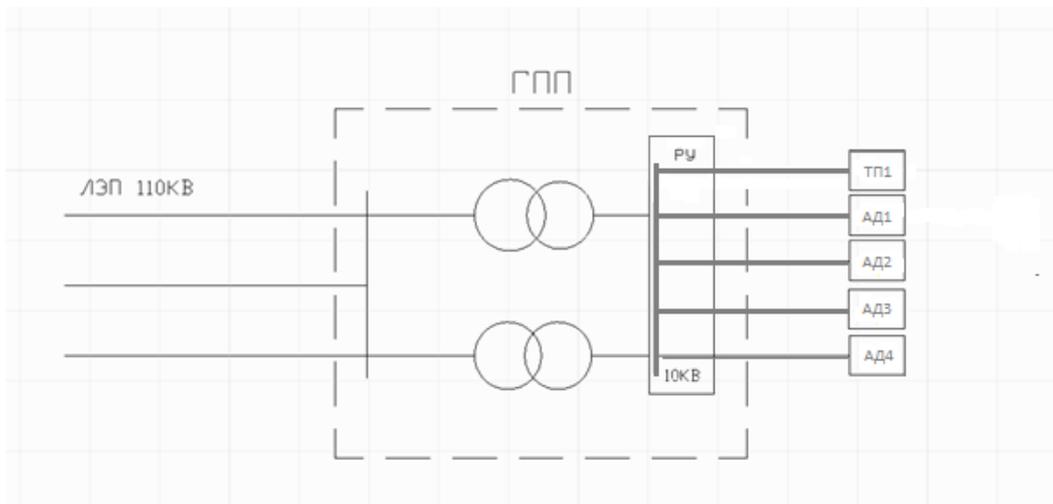


Рисунок 6.1 Предрабочая схема заземляющего устройства, по которой считаем площадь территории, занимаемой заземлителем, S , м^2 .

$$\rho_{1РАСЧ} = \rho_1 \cdot \psi, \quad (6.1)$$

где ψ – коэффициент сезонности для слоя сезонных изменений в многослойном грунте. Для климатической зоны III Б = 1,5.

$$\rho_{1РАСЧ} = 100 \cdot 1,5 = 150 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Так как условная толщина слоя сезонных изменений в III климатической зоне $h = 1,8 \text{ м}$, что меньше толщины первого слоя земли $h_1 = 2,6 \text{ м}$, то:

$$\rho_{2РАСЧ} = \rho_2, \quad (6.2)$$

$$\rho_{2РАСЧ} = 150 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Соотношение ρ_1/ρ_2 с расчетом коэффициента сезонности:

$$\frac{\rho_{1РАСЧ}}{\rho_{2РАСЧ}} = \frac{150}{150} = 1.$$

Примем расстояние между электродами в модели заземлителя $a=3$ м.
Найдем число вертикальных электродов при известном a :

$$n = \frac{4 \cdot \sqrt{S}}{a}, \quad (6.3)$$

где S – площадь территории, занимаемой заземлителем, m^2 ;
 n – число вертикальных электродов.

$$n = \frac{P}{a}, \quad (6.4)$$

где P – периметр контура заземлителя.

$$n = \frac{2 \cdot (100 + 100)}{3} = 134.$$

Относительная длина верхней части вертикального электрода, то есть части находящейся в первом слое земли, $l_{ОГН}$, определяется из выражения:

$$l_{ОГН} = \frac{h_1 - t}{l_B}, \quad (6.5)$$

$$l_{ОГН} = \frac{2,6 - 0,8}{3} = 0,6 \text{ м}$$

Эквивалентное удельное сопротивление ρ_3 двухслойной грунта для сплошного заземлителя в виде горизонтальной сетки с вертикальными электродами может быть рассчитана по формуле:

$$\rho_3 = \rho_2 \cdot \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^k, \quad (6.6)$$

где $K = 0,43 \cdot \left(l_{отн} + 0,272 \cdot \ln \left(\frac{a \cdot \sqrt{2}}{l_B} \right) \right)$, при $1 \leq \frac{\rho_1}{\rho_2} \leq 10$.

$$\rho_э = \rho_2 \cdot \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^K = 150 \cdot \left(\frac{150}{150} \right)^{0,299} = 150 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Найдем сопротивление сплошного заземлителя, состоящего из контура вертикальных заземлителей, соединенных горизонтальными электродами и сетки, которая находится внутри контура.

Сопротивление сложного заземлителя, состоящего из сетки и ряда вертикальных проводников, может быть определено из следующего выражения:

$$R_3 = 0,443 \cdot \frac{\rho_2}{\sqrt{S}} \cdot \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^g + \frac{\rho_1}{L + n \cdot l} \quad (6.7)$$

$$g = \frac{2 \cdot h_1}{\sqrt{S} + n \cdot l_B}; \quad l_B = l_1 + l_2 \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2};$$

где n – число вертикальных проводников;
 L – общая длина проводников.

На рисунке 6.2 показана двухслойная модель земли.

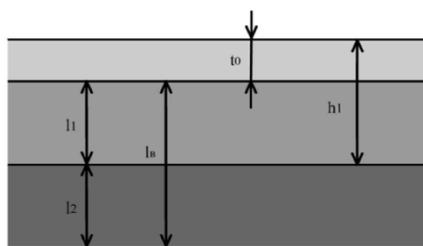


Рисунок 6.2 – Двухслойная модель земли

$$l_B = l_1 + l_2 \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2} = 1,8 + 1,8 \cdot 1 = 3,6 \text{ м},$$

$$g = \frac{2 \cdot h_1}{\sqrt{S} + n \cdot l_B} = \frac{2 \cdot 2,6}{\sqrt{10000} + 134 \cdot 3,6} = 0,0089,$$

$$L = 34 \cdot 100 + 34 \cdot 100 = 6800 \text{ м},$$

$$R_3 = 0,443 \cdot \frac{150}{\sqrt{10000}} \cdot \left(\frac{100}{150}\right)^{0,0089} + \frac{100}{6800 + 134 \cdot 3} = 0,676 \text{ Ом}.$$

Коэффициент напряжения прикосновения α_1 может быть определен из следующего приближенного выражения для заземлителей типа сетки с равномерным распределением проводников и дополненной вертикальными проводниками.

$$\alpha_1 = M \cdot \left(\frac{a \cdot \sqrt{S}}{l \cdot L}\right)^{0,45}, \quad (6.8)$$

где $\alpha = \frac{P}{N}$ – расстояние между вертикальными проводниками, м;

P – периметр сетки, м;

M – функция отношения $\frac{\rho_1}{\rho_2}$, $M = 0,82$.

$$\alpha_1 = M \cdot \left(\frac{a \cdot \sqrt{S}}{l \cdot L}\right)^{0,45} = 0,82 \cdot \left(\frac{3 \cdot \sqrt{10000}}{3 \cdot 6800}\right)^{0,45} = 0,123.$$

Коэффициент понижения напряжения прикосновения, зависящий от удельного сопротивления первого слоя земли может быть определен из формулы:

$$\alpha_2 = \frac{R_h}{R_h + 1,5 \cdot \rho_1}, \quad (6.9)$$

где ρ_1 – удельное сопротивление верхнего слоя земли;

R_h – сопротивление тела человека.

$$\alpha_2 = \frac{1000}{1000 + 1,5 \cdot 100} = 0,87.$$

Напряжение прикосновения определяется по следующей формуле:

$$U_{\text{ПР}} = I_{\text{КЗ}} \cdot R_3 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2, \quad (6.10)$$

$$U_{\text{ПР}} = 2627 \cdot 0,676 \cdot 0,123 \cdot 0,87 = 190,03 \text{ В.}$$

Допустимое напряжение при $t=0,15 \text{ с}$ с учетом АПВ, рекомендуемое время для расчета напряжения прикосновения и напряжения шага составляет 110 В.

Потенциал заземлителя определяется по формуле:

$$\varphi_3 = I_{\text{КЗ}} \cdot R_3, \quad (6.11)$$

Находим максимальное напряжение прикосновения:

$$U_{\text{ПР.МАХ}} = \varphi_3 \cdot \alpha_1. \quad (6.12)$$

Из условия безопасности прикосновения человека к заземленным предметам в зоне ЗУ в эффективно заземленной сети:

$$U_{\text{ПР}} = U_{\text{ПР.МАХ}} - I_h \cdot 1,5 \cdot \rho_C \leq U_{\text{ДОП}}, \quad (6.13)$$

Имеем:

$$I_h = \frac{U_{\text{ПР.МАХ}}}{R_h + 1,5 \cdot \rho_C}, \quad (6.14)$$

где I_h – ток, проходящий через человека.

$$I_h = \frac{U_{\text{ПР.МАХ}}}{R_h + 1,5 \cdot \rho_C} = \frac{218,4}{1000 + 1,5 \cdot 100} = 0,12 \text{ А.}$$

Проверим условие безопасности, где $U_{\text{ПР.ДОП}} = 450 \text{ В}$, определяемое ГОСТ 11.1.011 – 11.

$$218,4 - 0,1 \cdot 1,6 \cdot 100 \leq 450 \Rightarrow 203,43 \leq 450.$$

Условие выполняется.

Коэффициент напряжения шага для сложного заземлителя, состоящего из сетки и ряда вертикальных проводников, может быть определен в зависимости от типа заземлителя. Принимаем $\beta_1 = 0,15$. Определяем коэффициент β_2 – коэффициент снижения напряжения шага, зависящий от удельного сопротивления верхнего слоя земли согласно следующей формуле:

$$\beta_2 = \frac{R_h}{R_h + 6 \cdot \rho_1}, \quad (6.15)$$

$$\beta_2 = \frac{1000}{1000 + 6 \cdot 100} = 0,625.$$

По следующей формуле определяем напряжение шага:

$$U_{ш} = I_3 \cdot R_3 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2, \quad (6.16)$$

$$U_{ш} = 2627 \cdot 0,67 \cdot 0,15 \cdot 0,62 = 166,5 \text{ В}.$$

Условие безопасности для человека, шагающего в зоне распространения тока:

$$U_{ш} = U_{1-2.MAX} - I_h \cdot 6 \cdot \rho_1 \leq U_{доп}, \quad (6.17)$$

где $U_{доп} = 450 \text{ В}$ согласно ГОСТ для времени действия короткого замыкания с учетом АПВ $t = 0,15 \text{ с}$.

$$U_{1-2.MAX} = \varphi_3 \cdot \beta_1. \quad (6.18).$$

Ток через человека находим по следующей формуле:

$$I_h = \frac{U_{1-2.MAX}}{R_h + 6 \cdot \rho_c}, \quad (6.19)$$

$$I_h = \frac{266,3}{1000 + 6 \cdot 100} = 0,167 \text{ А}$$

Проверим условие безопасности:

$$U_{1-2,MAX} - I_h \cdot 6 \cdot \rho_1 \leq U_{ДОП},$$

$$266,3 - 0,16 \cdot 6 \cdot 100 \leq 450,$$

$$166,78 \leq 450.$$

Условие выполняется.

Рассмотрим возможность использования данного заземлителя по требованиям R_3 :

$$R_3^I = \frac{U_{ПР.ДОП}}{I_3 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2}, \quad (6.20)$$

$$R_3^I = \frac{450}{2628 \cdot 0,124 \cdot 0,87} = 1,6 \text{ Ом},$$

$$R_3^{II} = \frac{U_{Ш.ДОП}}{I_3 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2}, \quad (6.21)$$

$$R_3^{II} = \frac{450}{2628 \cdot 0,15 \cdot 0,62} = 1,82 \text{ Ом}.$$

Полученное в результате расчетов сопротивление заземления $R_3 = 0,676 \text{ Ом}$ удовлетворяет условиям $R_3 < R_3^I$ и $R_3 < R_3^{II}$.

Рассмотрим возможности использования заземляющего устройства ГПП 110 кВ в качестве выносного для автоматизированного электропривода центробежного насоса. 10/0,4 кВ и сети 10/0,4 кВ. Протяженность кабелей питания двигателей составляет 10 м длина отдельных кабелей достигает 100 м, соответственно длина увеличивается в 3 раза. Необходимо учесть, что ответственные механизмы автоматизированного электропривода центробежного насоса имеют резервные двигатели, которые питаются по своим отдельным кабелям, с учетом этого имеем длину кабелей.

$$l_K = 3 \cdot (0,1 + 5 \cdot 0,06) = 1,2 \text{ км}. \quad (6.22)$$

В электроустановках выше 1000 В с изолированной нейтралью в качестве расчетного тока можно принять ток, вычисленный приближенно по формуле:

$$I_3 = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot (35 \cdot l_K + l_B)}{350}, \quad (6.23)$$

где U – фазное напряжение сети, кВ;

l_K – общая длина подключенных к сети кабельных линий, км;

l_B – общая длина подключенных к сети воздушных линий, км.

$$I_3 = \frac{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot (35 \cdot 1,2 + 0)}{350} = 2,076 \text{ А}.$$

При выносном исполнении заземления заземлители располагаются на некотором удалении от заземляемого оборудования. Поэтому заземленные корпуса находятся вне поля растекания – на земле, и человек, касаясь корпуса, оказывается под полным напряжением относительно земли, если не учитывать коэффициент α_2 , $U_{\text{пр}} = U_3$. Так как $\alpha_1 = 1$, ток через человека:

$$I_h = I_3 \cdot \frac{R_3}{R_h}. \quad (6.24)$$

Примем, что:

$$\alpha_1 = 1, \quad \beta_1 = 1, \quad R_3 = 0,676 \text{ Ом}, \quad R_h = 1000 \text{ Ом},$$

$$\alpha_2 = 0,834, \quad \beta_2 = 0,15, \quad I_3 = 2,076 \text{ А},$$

$$I_h = I_3 \cdot \frac{R_3}{R_h} \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 = 2,076 \cdot \frac{0,676}{1000} \cdot 1 \cdot 0,834 = 0,00029 \text{ А}.$$

Находим $U_{\text{пр}}$:

$$U_{\text{пр}} = I_3 \cdot R_3 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2, \quad (6.25)$$

$$U_{\text{IP}} = I_3 \cdot R_3 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 = 0,52 \cdot 0,67 \cdot 1 \cdot 0,83 = 0,29 \text{ В.}$$

Находим U_{III} :

$$U_{\text{III}} = I_3 \cdot R_3 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2, \quad (6.26)$$

$$U_{\text{III}} = 0,52 \cdot 0,26 \cdot 1 \cdot 0,15 = 0,053 \text{ В.}$$

Ток через человека:

$$I_h = I_3 \cdot \frac{R_3}{R_h} \cdot \beta_1 \cdot \beta_2, \quad (6.27)$$

$$I_h = 0,52 \cdot \frac{0,67}{1000} \cdot 1 \cdot 0,15 = 0,00005 \text{ А.}$$

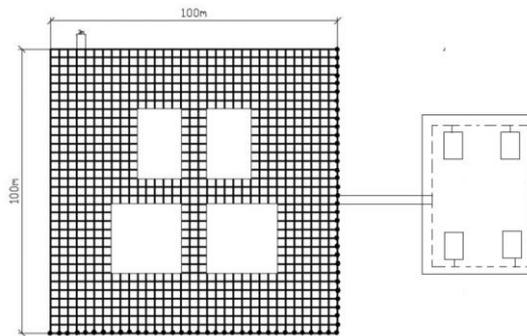


Рисунок 6.3 – Расчетная модель заземлителя

6.2 Расчет вентиляционной системы насосной

Вентиляционная система является важнейшим средством, обеспечивающим нормальные санитарно - технические условия в производственном помещении. Вентиляция осуществляется удалением загрязненного или нагретого воздуха из помещения с помощью подачи в него свежего воздуха. По способу перемещения воздуха вентиляция делится на естественную и механическую. Возможно сочетание этих двух вентиляций в помещении. По значению вентиляция может быть приточной, вытяжной, приточно-вытяжной; по месту действия - обще обменной, местной. Приток воздуха в помещение и вытяжка по объему не должны отличаться более чем на $\pm 10\%$. Необходимая концентрация воздуха при обще обменной вентиляции определяется следующим выражением.

Исходные значения:

Выделения вредных паров или газов бензина $N = 14434$ (мг/ч)

Концентрация вредных веществ в приточном и удаляемом воздухе $q_{\text{выт}} = 10$, $q_{\text{пр}} = 0$.

Объем помещения $V = 184 \text{ м}^3$

1. При выделении паров или газов бензина N (мг/ч) необходимое количество воздуха Q (м³/ч) рассчитывают, исходя из разбавления до допустимых концентраций q (мг/м³). Концентрация приточного или удаляемого воздуха равно:

$$Q = N / (q_{\text{выт}} - q_{\text{пр}}) . \quad (6.28)$$

$$Q = 14434 / (10 - 0) = 1443,4 \text{ м}^3/\text{ч}$$

где $q_{\text{выт}}$, $q_{\text{пр}}$ - концентрация вредных веществ в приточном и удаляемом.

Если наружный воздух не являет вредных веществ, то $Q = \dot{A} / q_{\text{выт}}$.

По санитарным нормам $q_{\text{пр}} \leq 0,3 \times q_{\text{пдк}}$

где $q_{\text{пдк}}$ - санитарная норма предельно допустимой концентрации вредных паров в воздухе.

2. Для ориентировочных значений, когда неизвестны виды и количество выделяющихся вредных паров, необходимое количество воздуха определяется по кратности воздухообмена. Кратность воздухообмена K (1/ч) показывает, сколько раз в час меняется воздух в помещении.

Количество воздуха:

$$Q = K * V . \quad (6.29)$$

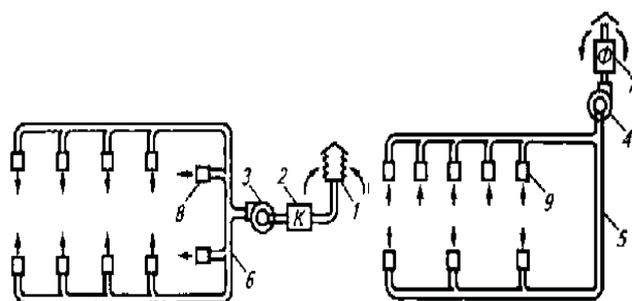
$$Q = K * V \Rightarrow K = \frac{Q}{V} = \frac{1443,4}{184} = 7,6$$

где V - объем помещения, м³;

$$K = 1:10.$$

Физическая вентиляция отличается от разницы между плотностью горячего воздуха и комнатной температурой. Адекватная вентиляция (вентиляция) наружного воздуха, который выпускается из выхлопных газов внутри кровли. Вентиляция через отверстия крыши или крышу невозможна. Вентиляция прохода происходит на стенах здания. Чтобы увеличить поток воздуха через крышу помещения, камера дефлектора расположена в верхней части дымохода и шахты (смесь воздуха и ветра).

Схема работы приточной и вытяжной части системы вентилиции изображена на рисунке 6.4



а

б

1 – воздухоприемное устройство; 2 – калорифер; 3 – соответственно приточный и вытяжной вентиляторы; 4 – соответственно вытяжные и приточные воздуховоды; 5 – фильтр (пылеуловитель); 6 – соответственно приточные и вытяжные вентиляционные насадки; а – схема работы приточной части системы вентиляции; б – схема работы вытяжной части системы вентиляции

Рисунок 6.4 – Механическая приточно-вытяжная вентиляция

Преимущество вентиляции заключается в том, что отсутствует механический вентилятор, и он намного дешевле, чем механическая вентиляционная система.

Отсутствие вентиляции снижает летнюю производительность, очистка воздуха не происходит, а ток возможен.

Используйте устройство для удаления пыли для очистки воздуха (круговой, электростатический, минеральный воск, дезинфицирующее средство, абсорбент, каталитический нейтрализатор и т. д.)

6.3 Вывод по разделу безопасность жизнедеятельности труда

В этом разделе описываются защитные устройства электроаппаратуры, системы защиты персонала и системы кондиционирования воздуха.

Вентиляция Промышленное предприятие является наиболее важным инструментом обеспечения чистоты. Вентиляция используется для отвода грязного или отработанного воздуха и для обеспечения чистого воздуха.

Кроме того, исходя из предыдущих выводов, проект может рассматриваться как отвечающий требованиям электробезопасности и вентиляции.

7 Экономическая часть

7.1 Методы оценки эффективности новой техники в энергетике.

Промышленная инновационная политика, включая энергетические проекты, создает портфель проектов инновационных проектов и не отбирает наиболее эффективных людей. Это оказывает большое влияние на выбор

специального инновационного решения. Но когда вы начинаете заниматься инновациями, вы можете достичь той же производительности и различной финансовой мощи. Это нелегко, требует тщательного осмотра, и в то же время необходимы риски и локализация ситуации. Таким образом, субъективный рабочий класс включает в себя предметную оценку эффективности инновационных проектов, которые определяют инновации, которые определяют весь процесс новой инновационной деятельности компании. Под энергетическим инновационным проектом будем понимать многоцелевой, масштабный, быстро окупаемый проект выхода предприятия на инновационную траекторию развития с целью обеспечения конкурентоспособности в долгосрочной перспективе. Успешное осуществление подобных проектов определяет эффективную реализацию инновационной политики предприятия в целом.

В нашей стране применяется множество различных методов оценки инноваций. Все они могут быть сведены в три группы:

- методы, основанные на технократическом подходе,
- методы, основанные на экономическом подходе,
- комплексные методы.

Основой технократического подхода является использование инновационных разработок в процессе замены старой аппаратуры новым, более перспективным. В контексте технически критических методов предполагается, что инновационные изменения могут оцениваться по количеству соответствующих факторов (количество запатентованных изобретений, количество новой аппаратуры, количество реализованных технических мер и т. Д.) С учетом сравнительных эффектов и расчетов специалистов. Оценка - не самый важный способ управления процессом инновационного развития. Оцените жизнеспособные инновации, основанные на производительности используемого аппаратуры..

В то же время технологически критические методы не решили центральной проблемы эффективного управления - оптимального распределения ресурсов. Кроме того, существует абстракция специфических свойств инновационных объектов. Экономический аспект инноваций все еще остается в стороне, а значение технических факторов остается необъяснимым.

При оценке инновационных экономических методов метод использования показателей стоимости имеет особое положение. Они имеют много преимуществ: они отражают основную цель эффективности производства, адекватные протезы для практического применения и поэтому могут применяться в процессе управления производством.

По мнению исследователей, нет никакой разницы между долгосрочными инвестициями в инновации и экономическим анализом. Инновационные показатели отражают только данные о доходах и расходах, денежные потоки и базы данных. Это нововведение является причиной использования инновационных методов оценки долгосрочных инвестиций. Другие исследователи предоставляют свои критерии для оценки выводов, основанных

на инновациях, которые необходимо учитывать природу инновационного процесса.

Рекомендует мировой опыт и анализ navasaraḥaruko и оценку «оценки воздействия проектов развития на энергетические и инженерные проекты и бизнес-планы». В связи с тем, что для финансирования необходимы некоторые вопросы, «Vidhvansatmaka предложил ...» и устройства необходимы для оценки воздействия проектов и инвестиций в электротехнике. Специфической особенностью проекта оценки проекта является проект проекта N, возведение и энергетические проекты с конкретными особенностями проекта для планирования энергетических проектов, вопросы о новых зданиях и особенностях, расширение проектов для расширения проектов У проекта защиты Маны появилось больше возможностей. Эти рекомендации включают ключевые показатели проекта.- коммерческая эффективность, учитывающая финансовые последствия реализации проекта для его непосредственных участников. При этом в качестве измерителя эффекта выступает реальный денежный поток - разность между притоком и оттоком денежных средств от операционной, финансовой и инвестиционной деятельности;

- Финансовая эффективность бюджетного потенциала, финансового, регионального и местного бюджета. Доходы бюджета увеличились из-за постоянного воздействия на бюджет;

- Повышайте национальные экономические выгоды независимо от финансовых интересов участников и обращайтесь внимание на затраты и результаты проекта. В целом, потенциал проекта в результате развития национальной экономики является результатом социального, политического, экологического, прямого и косвенного финансирования.

Инфляция и инфляция обсуждаются по расширению в оценке влияния проектов в оценке эффекта. Основные рекомендации по подготовке инвестиционных проектов, подробные алгоритмы с подробными источниками для оценки бизнеса и финансовой эффективности.

Операции и технические характеристики регионального рынка энергии и энергии. Методы оценки проектов в области энергетики. Планирование, описывает процесс выбора и выбора наиболее эффективного варианта.

7.2 Расчет эффективности инвестиций

Капитальные вложения в работе и возведение включают в себя несколько элементов и частей: монтажные работы, стоимость аппаратуры и транспортных услуг. Учитываются затраты на возведение здания, сооружения и т.д.

Общая сумма капитальных вложений ($K_{общ}$) рассчитывается по формуле :

$$K_{общ} = K_{пост} + K_0, \text{ млн. тенге,} \quad (7.1)$$

$$K_{\text{общ}} = 2,469 + 1,452 = 3,921 \text{ млн. тенге.}$$

где K_0 – капитальные вложения на приобретение оборудования;

$K_{\text{пост}}$ – постоянная часть затрат .

Расчет годовых эксплуатационных расходов ($I_{\text{общ}}$) находят по формуле:

$$I_{\text{общ}} = I_a + I_{\text{об/рем}}, \quad (7.2)$$

где I_a – амортизационные отчисления;

$I_{\text{об/рем}}$ – издержки на обслуживание и ремонты (капитальный текущие), тенге/год.

Постоянные издержки на амортизацию, тенге/год:

$$I_a = \frac{a_{\text{ам}}}{100} * K_{\text{пост}}. \quad (7.3)$$

где $a_{\text{ам}}$ – нормы отчислений на амортизацию, по методу ускоренной амортизации принимаем $a_{\text{ам}}$ равным 15%.

$$I_a = \frac{15}{100} * 3,921 = 1,588.$$

Постоянные издержки на обслуживание и ремонты, тенге/год:

$$I_{\text{об/рем}} = \frac{a_{\text{об/рем}}}{100} * K_{\text{пост}}. \quad (7.4)$$

где $a_{\text{об/рем}}$ - нормы отчислений на наладку электрических сетей и проверку, принимаем равной 6%.

$$I_{\text{об/рем}} = \frac{6}{100} * 3,921 = 0,235.$$

Тогда общие издержки:

$$I_{\text{общ}} = 1,588 + 0,235 = 1,823 \text{ млн. тенге,}$$

Так как электроэнергетика является капиталоемкой сферой, срок возврата капитальных вложений более 3 лет, и видимого эффекта обычно не наблюдается, то при принятии решений энергопредприятием о долгосрочных капитальных вложениях или инвестициях возникает потребность в прогнозировании их эффективности. Для этого рассчитываются следующие показатели:

- индекс рентабельности инвестиций – PI (Profitability Index);
- чистая приведенная стоимость – NPV (Net Present Value);
- дисконтированный срок окупаемости инвестиций – DPB (Discounted Payback Period);
- внутренняя норма доходности – IRR (Internal Rate of Return);

В рамках ТЭО достаточно расчета NPV и PI.

Этот метод основан на сопоставлении дисконтированных денежных потоков инвестициями. Для определения NPV необходимо спрогнозировать величину финансовых потоков в каждый год проекта, а затем привести их к общему знаменателю для возможности сравнения во времени. Чистая приведенная стоимость определяется по формуле:

$$\text{ЧПС} = \sum_{t=1}^n \frac{CF}{(1+r)^t} - I_c . \quad (7.5)$$

где I_c – инвестиции в данный проект, млн.тенге;

r – ставка дисконтирования, $r=15\%$;

n – время реализации проекта, год; CF - денежный поток, равный $I_a = 1,588$ млн.тенге/ год.

Лучшим инвестиционным проектом, по данному методу, будет считаться тот у которого;

- ЧПС<0, то проект отвергается, т.к. рыночная стоимость имущества уменьшается;

- ЧПС=0, то аналитик обязан провести дополнительные исследования по рассматриваемым проектам с учетом выплачиваемых налогов;

- ЧПС>0 и по максимальной его величине, следовательно, фирма получает дополнительную рыночную стоимость.

Считается, что CF не изменяется со временем. Расчет сводится в таблицу 7.3.

Таблица 7.1 – Расчет ЧПС

Год	CF, млн.тенге	$\frac{CF}{(1+r)^t}$ млн, тенг e	ЧПС, млн. тенге

0	-3,921		-3,921
1	1,588	1,38	-2,333
2	1,588	1,2	-0,745
3	1,588	1,04	0,843

Расчет ведется до первого положительного значения ЧПС, ЧПС больше нуля, следовательно, при данной ставке дисконтирования проект является выгодным для предприятия, поскольку генерируемый им приток дохода превышает норму доходности в настоящий момент.

Из приведенных расчетов видно, что срок окупаемости инвестиций составил около 3 года, удовлетворяющие требованиям эффективности проекта.

Оценка ВНП (IRR) имеет следующие свойства:

- не линейная форма зависимости;
 - не зависит от вида денежного потока;
 - позволяет предположить ожидать ли максимальную прибыль (норму доходности).
- представляет собой убывающую функцию;

Внутренняя норма прибыли определяется следующим образом:

$$IRR = 1 - \sqrt[n]{\frac{CF}{I_c}}, \quad (7.6)$$

где CF – денежный поток;

I_c – инвестиции.

$$IRR = (1 - 0.7398) * 100\% = 26.01\%.$$

т.е величина IRR больше, чем r , следовательно проект можно принять.

Таким образом, расчет NPV и IRR показывает эффективность данного проекта.

$$PV = 1,588 \times 1,38 + 1,588 \times 1,2 + 1,588 \times 1,04 = 5,748.$$

Индекс рентабельности, PI, представляет собой отношение суммы приведенных эффектов к величине инвестиционных затрат и рассчитывается по формуле:

$$PI = \sum_{t=1}^n \left(\frac{PV_t}{(1+r)^t} \right) / K_0, \quad (4.7)$$

$$PI = \sum_{t=1}^n \left(\frac{PV_t}{(1+r)^t} \right) / K_0 = \frac{5.748/1.15}{3.921} = 1.2.$$

Если: $PI < 1$, то проект следует отвергнуть, $PI > 1$, то проект следует принять, $PI = 1$, то проект ни прибыльный, ни убыточный. Логика критерия PI такова: он характеризует доход на единицу затрат. В отличие от чистого приведенного эффекта индекс рентабельности является относительным показателем. PI следует считать уже по времени расчета t , когда NPV положительный.

Так как $PI > 1$, то проект следует принять. Техничко – экономическое обоснование установки центробежного насоса показало, что необходимые суммарные капиталовложения, составляющие 3,921 млн. тенге дисконтированной стоимости, составляющей 1,588 млн. тенге окупятся за 3 года, т.е. установка можно считать экономически целесообразной.

7.3 Метод дисконтированного срока окупаемости

Возврат по инвестиционным доходам первоначально начисляется по текущей процентной ставке (ставке прибыли) на дату начала проекта.

Ранняя стоимость - стоимость покупки, установки и продажи основных товаров. Проще говоря, первоначальная стоимость считается такой же, как стоимость устройства, или аналогична комиссии другого комиссара. Первые затраты требуют размера бизнеса инвестиционного проекта.

Чтобы потратить инвестиционную стоимость, вычтена сумма, внесенная из начальной стоимости реализации инвестиционного проекта. Следовательно, расходы, понесенные в течение одного года реализации инвестиций, и сумма инвестиций эквивалентны вложению чистой суммы дисконта.

Преимущество метода четко указывает на то, что инвестиционные проекты приемлемы. При использовании этого метода проект получит этот проект, если он подлежит оплате на финансовой основе после реализации проекта.

Таблица 7.2 – Сравнение насосов дисконтированным методом

Тип насоса	Центробежный насос ЦНС 300-120	Паровой насос ПДГ 6/20 Б-О	Поршневой насос НС 4-20
Капиталовложение млн. тенге	3,921	4,628	3,689
Общие издержки млн. тенге	1,823	2,412	1,658

7.4 Вывод по разделу экономическая часть

Если возможно купить центрифужный насос, общая сумма инвестиций, необходимых для 3, 9 млн. 21 млн. Будет выплачена в течение трех лет. Покупка этого насоса экономически выгодна. Исходя из таблицы, центрифужный насос будет определяться осевой линией

Заключение

В дипломной работе проведены разработки автоматического электропривода центробежного насоса нефтеперекачивающих станции с применением компьютерного приложения «Mathcad».

При моделировании использован векторно-гармонический метод исследования электромагнитных и электромеханических процессов в электромеханических преобразователях. Представлена методика расчета токов и момента в электроприводе с учетом несинусоидальности выходного напряжения преобразователя частоты, расчета мгновенных значений токов и момента асинхронного двигателя.

Проведен расчет производительности, напора, размера и потерь напора и токов центробежного насоса на базе математической программы «Mathcad» разработаны компьютерные модели нескольких элементов электропривода: преобразователя фаз и координат, преобразователя частоты и асинхронного электродвигателя.

В разделе безопасность жизнедеятельности труда проведен анализ заземляющего устройства сети электропривода с точки зрения безопасности труда, разработаны меры защиты вентиляционной системы насосной станции.

В экономической части дипломной работы было произведено технико-экономическое сравнение автоматических электроприводов нескольких насосов, выполнен расчет капиталовложений и затрат на эксплуатацию и определен срок окупаемости вложенных денежных средств.

Список литературы

- 1 Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 248с.
- 2 Асинхронные двигатели серии 1А: Справ. /А.Э. Кравчик, М.М. Шлаер, В.И. Афонин и др. – М.: Энергоиздат, 1982. – 161 с.
- 3 Преобразователь частоты серии АПЧ (руководство по эксплуатации) 2012. – 77с.
- 4 Мустафин М.А., Мустафин М.Е. Энергосберегающие системы электропривода центробежных насосных агрегатов. – Алматы, 2009. – 129с.
- 5 Шеховцов В.П. Расчет и проектирование ОУ и электроустановок промышленных механизмов.- М.: Форум. 2010- 105с.
- 6 Сыромятников, И.А. Режим работы асинхронных и синхронных двигателей/И.А. Сыромятников. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
- 7 Кацман М.М. Электрический привод. -М.: Академия, 2014. - 182с.
- 8 Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 144 с.
- 9 Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для вузов.- 1-е изд., испр.- М.: Академия, 2008.- 162 с.
- 10 Ключев В.И. Теория электропривода. – 1-е изд., переработанное и дополненное. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 109 с.
- 11 П.А. Долин. Основы техники безопасности в электроустановках: Учеб. Пособие. – 1-е изд., перераб. И доп. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 111с.
- 12 Санатова Т. С., Мананбаева С.Е. Безопасность жизнедеятельности. Методические указания к выполнению раздела «Электробезопасность в электроустановках» в выпускных работах для специальности 1В011100 – Электроэнергетика. Бакалавриат – Алматы: АИЭС, 2009.
- 13 Санатова Т.С., Мананбаева С.Е.. Безопасность жизнедеятельности «Расчет зануления» Методические указания к выпускной работе для студентов-бакалавров всех специальностей и всех форм обучения – Алматы: АУЭС, 2011
- 14 Жакупов А.А., Валиева Л.Ш., Соколова И.С. Экономика отрасли. Конспект лекций для студентов специальности 1В011100-Электроэнергетика – Алматы: АУЭС. 2013.-36с.
- 15 Жакупов А.А., Валиева Л.Ш., Хижняк Р.С. Экономическая часть выпускной работы. Методические указания по выполнению экономической части выпускной работы для студентов специальности 1В011100 – Электроэнергетика. – Алматы: АУЭС; 2016. – 54с

