

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электромеханика
(направленность (профиль))

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему «Модернизация электропривода насоса водогрейного котла»

Студент(ка)

Д.Д. Ежов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

В.А. Денисов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультанты

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина _____

« ____ » _____ 2016 г.

Тольятти 2016

Аннотация

Проведена модернизация электропривода питательного насоса K150-125-315 водогрейного котла на базе частотного преобразователя MIKRO-MASTERvektor и асинхронного двигателя исполнения 4A200L4У3.

Выполнен расчет силовой схемы электропривода и механических характеристик при квадратичном законе частотного регулирования. Найдены скорости и моменты устойчивой работы системы асинхронный двигатель – питательный насос для частот 50 Гц., 42,5 Гц. и 35 Гц. заданной производительности и напора.

Разработано математическое описание электромеханических процессов и произведен расчет переходных процессов при прямом и частотном включениях электропривода с частотным регулированием методом моделирования в программе Matlab-simulink.

В технологической части работы разработаны вопросы изготовления ротора асинхронного двигателя. Рассмотрены вопросы безопасности и экологии при проведении безопасных наладочных работ по настройке и обслуживании асинхронного двигателя с частотным регулированием. Дано экономическое обоснование проведенной модернизации.

Работа выполнена на 59 листах, содержит 23 рисунка, 4 таблицы. Графическая часть составляет 6 листов формата А1.

Содержание

Введение	4
1 Состояние перспективы электроприводов с частотным регулированием	6
2 Характеристика системы пикового теплоснабжения	8
3 Расчет мощности двигателя насоса	12
4 Расчет элементов преобразователя частоты	17
4.1 Расчет и выбор ключей инвертора	17
4.2 Расчет и выбор вентилях диодного моста	20
4.3 Расчет фильтра	24
5 Расчет механических характеристик при скалярном управлении	27
5.2 Общий подход расчета механических характеристик асинхронного двигателя при частотном скалярном управлении	29
6 Математическое моделирование системы электропривода	37
7 Динамические характеристики системы	42
8 Технология изготовления ротора асинхронного двигателя и техника безопасности при эксплуатации электроприводов	45
8.1 Способы изготовления короткозамкнутых роторов асинхронного двигателя	45
8.2 Безопасность и экологичность электродвигателя с преобразователем частоты	48
9 Экономическое обоснование модернизации электропривода питательного насоса	54
Заключение	56
Список использованных источников	58

Введение

Энергосбережение является одной из важных, приоритетных задач технической политики нашего государства. В настоящее время более 60% всей электроэнергии электростанций потребляют электроприводы, что позволяет сделать вывод о высокой актуальности задач энергосбережения при их эксплуатации. На рубеже двадцать первого века достигнуты значительные успехи в силовой электронике: освоено промышленное производство мощных транзисторов IGBT и силовых модулей на их основе непосредственным микропроцессорным управлением. Достигнут колоссальный прогресс в области информационно-вычислительной техники, микропроцессорных систем управления и контроля, а также в углублении теории электропривода переменного тока. Это обуславливает устойчивую тенденцию развития и применения систем частотного управления, особенно систем электропривода переменного тока со скалярным и векторным управлением. Такие электроприводы не имеют ограничений по максимальной скорости вращения и предельной мощности, бесконтактны и имеют минимальные эксплуатационные затраты. Целенаправленное применение таких электроприводов позволяет решить актуальные сложнейшие задачи производства, включая задачи энерго и электросбережения.

Современные преобразователи частоты, используя принцип широтно – импульсной модуляции, обеспечивают формирование регулируемого трехфазного синусоидального напряжения высокого качества, что позволяет существенно снизить потери электроэнергии в статорных обмотках двигателя при питании их от преобразователя частоты. В сравнении другими двигателями асинхронный двигатель имеет следующие основные преимущества: простота конструкции, малая инерционность ротора, более высокая надежность работы (особенно с короткозамкнутым ротором), низкая стоимость и простота монтажа и эксплуатации. Все это, в сочетании с высокими регулировочными и динамическими показателями превращают частотный электро-

привод в доминирующий тип регулируемого электропривода массового применения.

Из множества областей, в которых требуется решать технологические вопросы, связанные с регулированием частоты вращения различных производственных механизмов и устройств, можно выделить наиболее важные и эффективные направления: более широкое внедрение электроприводов с частотным регулированием насосов асинхронных двигателей питательных насосов для систем водоснабжения, водоотведения и отопления; внедрение частотного электропривода для регулирования скорости вращения вентиляторов, нагнетателей, воздуходувок и компрессоров различных механизмов.

В названных областях по данным статистики приблизительно 25% вырабатываемой электроэнергии потребляют приводы центробежных насосов и вентиляторов различных объектах. Применение электропривода с частотным преобразователем открывает новую технологию энергосбережения, в которой экономится не только электроэнергия, но и сберегается тепловая энергия и сокращается расход воды за счет исключения утечек ее, так как отсутствует превышение давления в магистрали в процессе регулирования расхода. Частотный асинхронный электропривод насосов позволяет в значительной степени избежать аварийных ситуаций за счет предотвращения гидравлических ударов, возникающих при изменении режимов работы и пуске насосной системы по сравнению с нерегулируемым электроприводом. Поэтому по сравнению с другими электроприводами, предпочтение следует отдать электроприводу на основе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при питании статорных обмоток от преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока.

Целью данной работы является решение задачи энерго и электросбережения электропривода питательного насоса К150-125-315 водогрейного котла путем модернизации электропривода.

1 Состояние перспективы развития электроприводов с частотным регулированием

Электропривод обеспечивает движение различных рабочих механизмов и определяет перспективу развития большинства отраслей, хозяйственной деятельности человечества. Применение частотных преобразователей на базе силовых IGBT транзисторов повышает энергосбережение, которое в значительной мере определяется эффективностью электропривода. Разработка высокопроизводительных, компактных и экономичных систем привода на базе ПЧ является приоритетным направлением развития современной техники. Направление развития автоматизированного электропривода сместилась в сторону частотных электроприводов переменного тока. В условиях повышенных температур, влажности, запыленности, взрыво и пожароопасности, отсутствия возможности для обслуживания, необходимости повышенных и высоких частот применение асинхронного короткозамкнутого двигателя не имеет альтернатив. Частотные электроприводы с асинхронным двигателем не имеют ограничений по максимальной скорости вращения и предельной мощности, бесконтактны и имеют минимальные эксплуатационные затраты. Как составная часть автоматизированного электропривода, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором выигрывает по всем критериям сопоставления. В большинстве практических приложений преобразователь частоты является компонентом автоматизированной системы и выполняет управляющую, информационную и вспомогательную функции. Современные преобразователи частоты имеют встроенные регуляторы (ПИД-регуляторы), обрабатывают десятки входных и выходных сигналов, имеют развитые средства диагностики и защиты, интерфейсы, формируют предупредительные и аварийные сообщения. Помимо системного программного обеспечения и стандартного набора прикладных программ, многие преобразователи частоты предоставляют возможность пользователям разрабатывать собственные прикладные программы и использовать их наряду со стандартными макросами.

В последние десятилетия остро встала проблема энергосбережения в промышленности. Следствием этого стало внедрение регулируемого электропривода с короткозамкнутым ротором в традиционные отрасли промышленности, где применялся нерегулируемый электропривод. Опыт разных стран подтверждает высокую эффективность регулируемого электропривода в системах водоснабжения, теплоснабжения, вентиляции и отопления зданий, а также привода металлорежущих станков, механизмы металлургического производства и т.п. К примеру, в водоснабжении экономия электроэнергии достигает до 50%, а экономия воды и тепла до 15% и более. Исключаются гидравлические удары в системах водоснабжения, обеспечивается удобная диспетчеризация и учет энергоносителей. Срок окупаемости внедрения регулируемого асинхронного электропривода в систему водоснабжения составляет не больше года. В связи с этим даже появился термин «энергосберегающий регулируемый электропривод». За счет перехода от неэкономичного дроссельного регулирования подачи воды в системах теплоснабжения, к регулированию с помощью электроприводов с изменяемой частотой вращения, удастся достичь снижения потерь воды и электроэнергии и повысить энергоэффективность производства. Были произведены исследования нагрузки электроприводов насосных и тягодутьевых агрегатов в реальных условиях эксплуатации. Выделим факторы, отвечающие за оптимальные энергетические показатели привода и правильный его выбор по мощности: - при работе асинхронных машин от преобразователей частоты их КПД снижается на 2-3 процента, а коэффициент мощности $\cos\varphi$ до 5%. Для того чтобы улучшить электромагнитную совместимость преобразователя частоты (ПЧ) с сетью, применяют ряд перспективных решений. Например, применение фильтра на входе неуправляемого выпрямителя. Это позволяет улучшить состав питающего напряжения, коэффициент мощности системы и гармонический состав тока, потребляемого из сети.

2 Характеристика системы пикового теплоснабжения

Теплоснабжение производственных, жилых помещений и различных объектов в условиях рыночных отношений (как торговля продовольствием и другими товарами) приобретает важнейшее значение. Теплоснабжение наряду с энергетикой в целом выдвигается на первый план и является фактором безопасности страны. В большинстве регионов страны теплоснабжение нуждается в обновлении и модернизации. Это не только экономический кризис, не устаревшие виды тепловых источников, не обветшалость труб магистралей передачи тепловой энергии, а причина кроется в естественном монополизме организаций энергоснабжения, в отсутствии законов регулирования юридических отношений между организациями энергоснабжения и потребителями.

Понижение и изменение температуры в подающей магистрали теплосети, её отключение приводит к нарушению технологических процессов на заводах и предприятиях, а также серьезно отражается на качестве жизни населения. Однако, централизованное горячее водоснабжение от ТЭЦ может быть месяцами отключено. Это происходит несмотря то, что при комбинированной выработке электричества и теплоты, отключить централизованное горячее водоснабжение в открытой системе теплоснабжения в огромном городе приводит катастрофическому уменьшению выработки электроэнергии. Тем не менее, наши энергетические компании спокойно идут на такой огромный перерасход топлива, так как причина здесь не экономическая и не техническая, а политическая. Она заключается в борьбе с региональными властями, в навязывании своих условий при заключении договоров на теплоснабжение. Энергетические компании устанавливают тарифы, порядок учета и другие, отражаемые в договорах условия теплоснабжения.

В настоящее время в тепловых сетях широко практикуется недостаточный нагрев сетевой воды до температуры, соответствующей температурному графику. Недостаточный нагрев воды, применяемый вроде бы с целью эко-

номии топлива, на самом деле приводит к перерасходу топлива, потому что возникает разбаланс системы теплоснабжения и в конечном итоге, и сама тепловая электростанция начинает перерасходовать топливо. Неотъемлемой частью систем теплоснабжения являются источники пиковой тепловой мощности, в качестве которых используются водогрейные котлы.

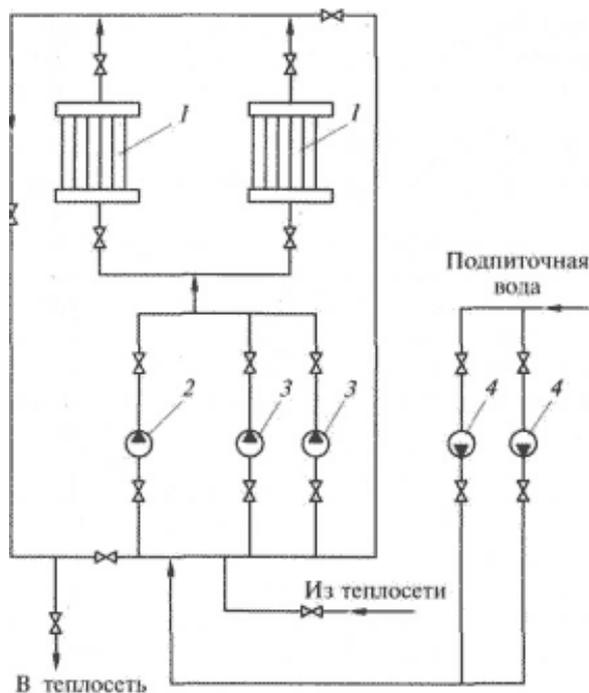


Рисунок 2.1-Система пикового теплоснабжения: 1-водогрейный котел; 2-резервный насос; 3-основные сетевые питательные насосы; 4-подпиточные насосы

В условиях рыночной экономики при значительно возросшей стоимости топлива необходимо пересмотреть подход к обеспечению пиковой тепловой нагрузки систем теплоснабжения в сторону повышения требований к надежности и экономичности.

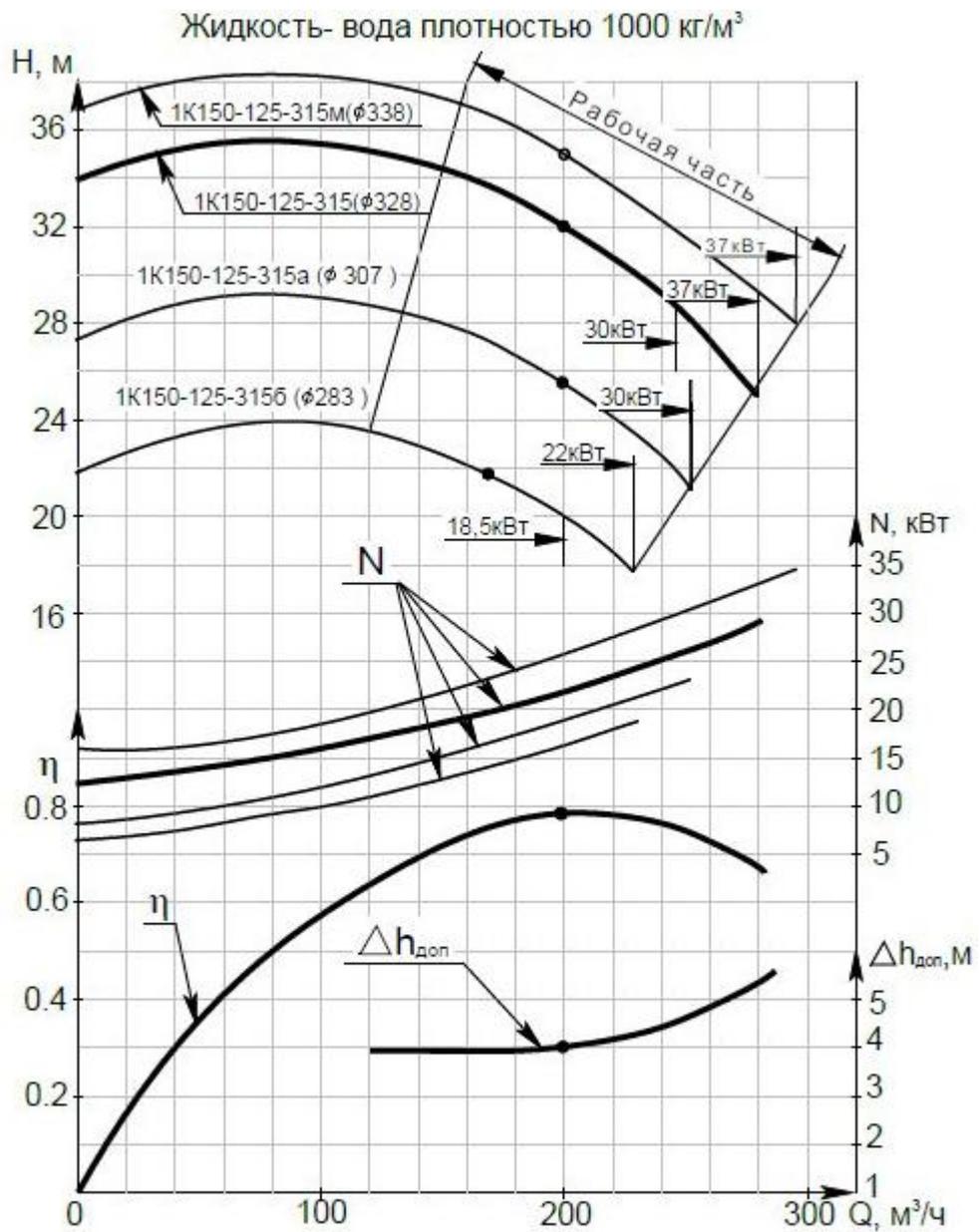
На рис. 2.1схема присоединения питательных трубопроводов котельной к водогрейным котлам 1 приведена. В котельных с водогрейными котлами для перемещения воды в них и в системе трубопровода применяют как минимум два сетевых питательных насоса с электроприводами. Напор и производительность насосов выбираются с таким расчетом, чтобы при выходе из

строю самого мощного насоса, оставшийся мог обеспечить нормальную работу системы теплоснабжения (табл. 2.1).

Работа системы теплоснабжения характеризуется неравномерным потреблением воды и тепла в зависимости от погодных условий и времени года. Так как насосы оснащены нерегулируемым электроприводом, то для регулирования подачи воды применяют дросселирование, т.е. регулирование осуществляют открытием задвижки на напорной линии теплоснабжения. Такой способ регулирования приводит к существенному росту давления (напору) в системе, а это обуславливает утечки воды и неблагоприятно сказывается на работе насоса, оборудования и всей сети водоснабжения.

Таблица 2.1 Базовая характеристика сетевого насоса

Типоразмер насоса	Параметры насоса		Допуст. кави-тац. запас, м, не более	Частота вращ., (об/мин)	Мощность двиг-ля, кВт
	Подача, м ³ /ч	Напор, м			
К150-125-315	290	35	4,5	1450	37



Характеристики Q-η и Q-Δh_{доп} приведены для "основного" исполнения рабочего колеса

Рисунок 2.2 – Характеристика насоса К-150-125-315 при частоте вращения 1450 об/мин

Дополнительная характеристика

Масса насоса, кг 90

КПД насоса, % 67

3 Расчет мощности двигателя насоса

Центробежные насосы типа К150-125-315 применяются для водоснабжения котлов, насосных станций и других установок промышленного оборудования.

Полезная гидравлическая мощность насоса в номинальном режиме определяется выражением.

$$N_Q = \kappa_3 \cdot \rho \cdot Q_H \cdot H(Q_H), \quad (3.1)$$

где κ_3 – коэффициент запаса (1,1 - 1,4); ρ - удельный вес перекачиваемой жидкости, для воды он равен 9810 Н/м³; Q_H - подача воды при номинальном режиме, м³/с; $H(Q_H)$ - напор при номинальном режиме, м.

Для питательного насоса К150-125-315, используя характеристики насоса, имеем: $Q_H = 200$ м³/час и $H(Q_H) = 32$ м, КПД - $\eta(Q_H) = 0,78$

$$N_Q = \kappa_3 \cdot Q_H \cdot H(Q_H) \cdot \rho = \frac{1,2 \cdot 200 \cdot 32 \cdot 9810}{3600 \cdot 1000} = 25,5 \text{ кВт} \quad (3.2)$$

Потребляемая мощность электродвигателя в номинальном режиме

$$N = \frac{N_Q}{\eta_n \cdot \eta_\delta}, \quad (3.3)$$

где η_n - КПД насоса при номинальном режиме; η_δ - КПД двигателя при номинальном режиме.

Для питательного насоса КПД - $\eta_n = 0,78$

Для асинхронного двигателя предварительно принимаем $\eta_\delta = 0,9$.

$$N = \frac{N_o}{\eta_n \cdot \eta_o} = \frac{25,5}{0,78 \cdot 0,9} = 36,3 \text{ кВт} \quad (3.4)$$

В качестве двигателя насоса выбираем асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором 4A200L4У3: $P_2 = 37 \text{ кВт}$, $U = 220/380 \text{ В}$, $n_n = 1475 \text{ об/мин}$, $2p = 4$; конструктивное исполнение ИМ 1001; исполнение по способу защиты IP44; способ охлаждения IC0 141; климатическое исполнение и категория размещения УЗ, класс нагревостойкости изоляции F.

Характеристики насоса и сети строятся в координатах «напор-расход», точка пересечения этих характеристик называется рабочей точкой. Эта точка определяет энергетические параметры совместной работы насоса на сеть (рис. 3.1). При изменении характеристики сети или насоса рабочая точка соответственно смещается.

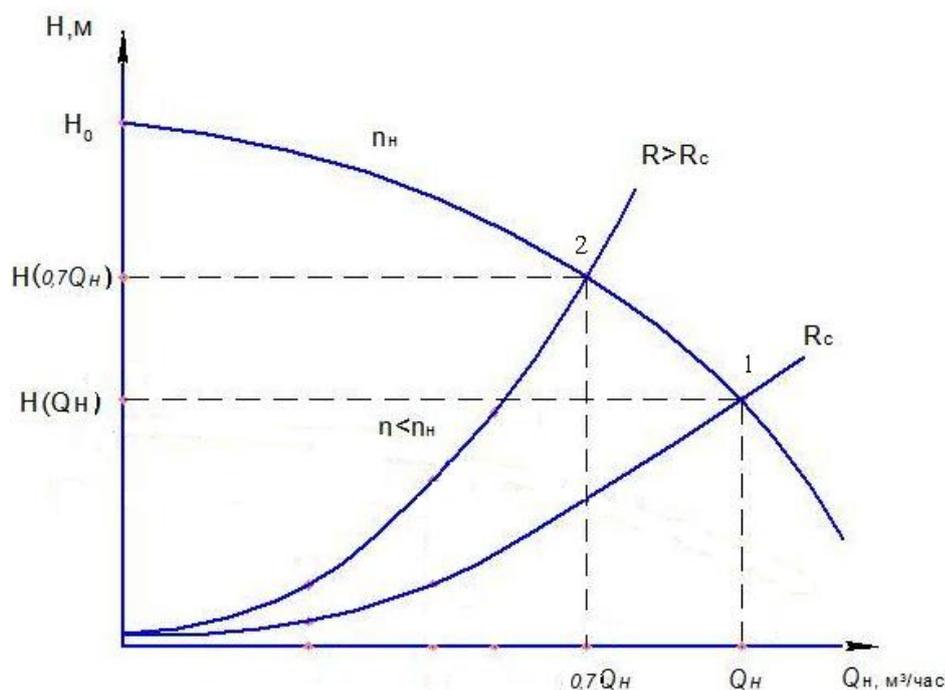


Рисунок 3.1 – Регулирование подачи воды с помощью задвижки (сопротивление сети)

Для изменения режима водоснабжения используются два способа регулирования:

1. Изменением характеристики внешней сети, т. е. регулированием гидравлического сопротивления с помощью задвижки при постоянной скорости вращения приводного асинхронного двигателя;
2. Изменением угловой скорости приводного электродвигателя.

Рассмотрим первый способ изменения режима водоснабжения при уменьшении подачи воды сети на 30%. Для этого уменьшают проходные сечения задвижки. В результате сопротивление внешней сети возрастает и рабочая точка 1 (рис. 3.1) смещается влево и занимает на графике новое положение (точка 2). При номинальном режиме полезная мощность определяется прямоугольником $0-Q_H-1-H(Q_H)$, а при уменьшении подачи на 30% - прямоугольником $0-0,7Q_H-2-H(0,7Q_H)$.

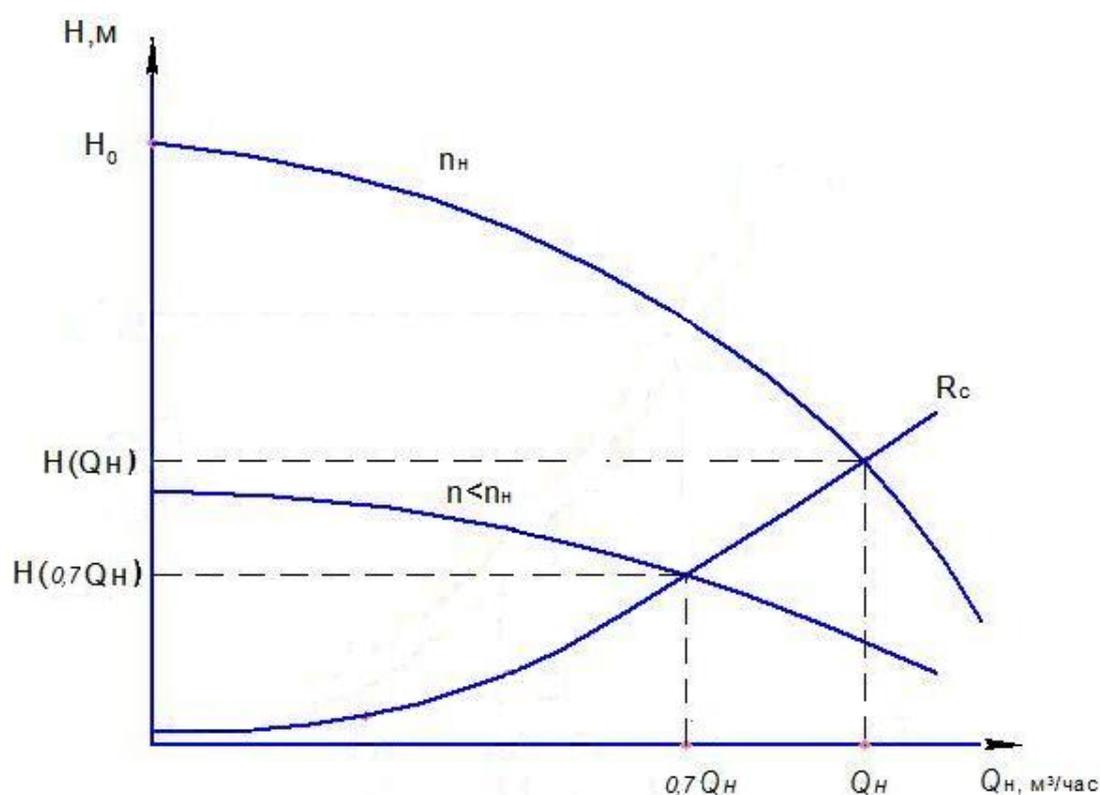


Рисунок 3.2 – Регулирование подачи воды изменением угловой скорости вала насоса (частотный способ)

В этом случае потребляемая двигателем мощность определяется:

$$N' = \frac{N_Q Q^* H^*}{\eta'_n \cdot \eta_\delta}, \quad (3.5)$$

где Q^* - относительная величина подачи ($Q^* = 1$ при номинальной подаче);
 $H^* = H_0 - (H_0 - 1)(Q^*)^2$ - напор при относительной величине подачи;
 $H_0 = 1,4H(Q_H)$ - напор при нулевой подаче; η'_n - КПД насоса при уменьшенном расходе.

При регулировании задвижки имеем: $Q^* = 0,7$ и $\eta'_n = 0,66$ при подаче 70% от номинальной величины.

$$N' = \frac{N_Q Q^* (H_0 - (H_0 - 1)(Q^*)^2)}{\eta'_n \cdot \eta_\delta} = \frac{25,5 \cdot 0,7 \cdot (1,4 - (1,4 - 1) \cdot 0,7^2)}{0,66 \cdot 0,9} = 36,1 \text{ кВт} \quad (3.6)$$

Потребляемая электродвигателем мощность при 50% подачи от номинальной мощности составляет

$$N'' = \frac{N_Q \cdot 0,5(H_0 - (H_0 - 1) \cdot 0,5^2)}{\eta_n \cdot \eta_\delta} = \frac{25,5 \cdot 0,5(1,4 - (1,4 - 1)0,5^2)}{0,66 \cdot 0,9} = 27,9 \text{ кВт} \quad (3.7)$$

При втором способе регулирования уменьшение угловой скорости вала насоса приводит к «опусканию» вниз его характеристики. При этом рабочая точка перемещается влево по характеристике внешней сети (рис. 2.2). Как следует из графика, полезная мощность при 70% подаче определяется прямоугольником $0-0,7Q_H-H(0,7Q_H)$.

Потребляемая электродвигателем мощность при уменьшении подачи изменением угловой скорости вала определяется как

$$N'' = \frac{N_Q (Q^*)^3}{\eta_n \cdot \eta_\delta} = \frac{25,5 \cdot 0,7^3}{0,84 \cdot 0,9} = 11,6 \text{ кВт} \quad (3.8)$$

Здесь величина η_n насоса изменяется незначительно, так как характеристика внешней сети и характеристика насоса до регулирования работали согласованно с наивысшим КПД. Тогда как при первом способе регулирования это согласование нарушается.

Потребляемая электродвигателем мощность при 50% подачи от номинальной мощности при частотном регулировании составляет

$$N^m = \frac{N_{\varrho} \cdot 0,5^3}{\eta_n \cdot \eta_{\delta}} = \frac{25,5 \cdot 0,5^3}{0,84 \cdot 0,9} = 4,21 \text{ кВт} \quad (3.9)$$

4 Расчет элементов преобразователя частоты

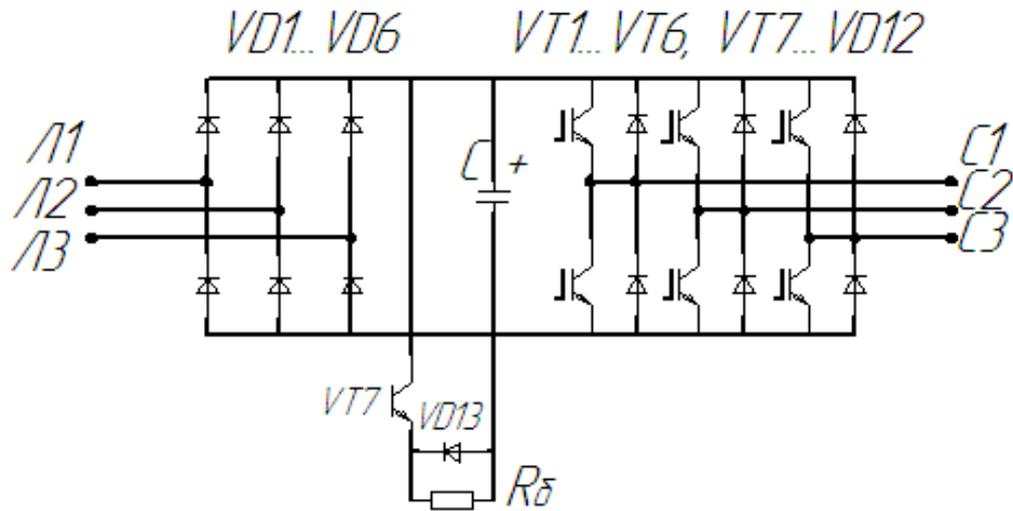


Рисунок 4.1 - Силовая схема преобразователя частоты

Преобразователь частоты (рис. 4.1) состоит из неуправляемого выпрямителя (диоды VD1...VD6), конденсатора С фильтра, автономного инвертора (транзисторы VT1...VT6) и обратного выпрямительного диодного моста (VD7...VD12).

Транзисторы автономного инвертора работают на частоте 5 кГц, обеспечивая широтно-импульсную модуляцию выходного напряжения преобразователя, что позволяет получить практически синусоидальную форму кривой статорного тока.

4.1 Расчет и выбор ключей инвертора

4.1.1 Максимальный ток через ключи инвертора

$$I_{cmax} = \frac{P_n \cdot k_1 \cdot \sqrt{2} \cdot k_2}{\eta \cdot \cos \varphi_n \cdot \sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{37000 \cdot 1,3 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,2}{0,91 \cdot 0,90 \cdot \sqrt{3} \cdot 380} = 151,43 \text{ A} \quad (4.1)$$

где $k_1 = 1,2 - 1,3$ - коэффициент допустимой кратковременной перегрузки по току, необходимой для обеспечения динамики электропривода;

$k_2 = 1,1 - 1,2$ - коэффициент допустимой мгновенной пульсации тока;

U_d - линейное напряжения двигателя, В.

4.1.2 Выбор ключей инвертора

Ключи инвертора выбираем типа IGBT с постоянным (номинальным) током коллектора $I_c \geq I_{cmax}$, т.е. тип CM200DY-24MITSUBISHIELECTRIK, ток $I_c = 200 A$, напряжение $V_{ce} = 1200 B$.

Основные данные:

$U_{ce sat} = 2,0 - 2,6 B$; $t_{c on} = 0,13 мкс$; $t_{c off} = 0,45 мкс$; $I_{rr} \cong I_{cp}$; $t_{rr} = 0,6 мкс$; $U_{ee} = 0,9 B$; $U_{ces} = 1200 B$; $R_{th c-f} = 0,045 K/Bm$; $R_{th(j-c)q} = 0,085 K Bm$; $R_{th(j-c)r} = 0,18 K Bm$.

4.1.3 Расчет потерь в инверторе

4.1.4 Потери в IGBT в проводящем состоянии

$$P_{SS} = I_{cp} \cdot U_{ce} \left(\frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \cos \varphi \right) = 116,48 \cdot 2,2 \left(\frac{1}{8} + \frac{0,95}{9,42} 0,90 \right) = 55,29 Bm \quad (4.2)$$

где $I_{cp} = I_{cmax}$ $k_1 = 119 A$ – максимальная амплитуда тока на входе инвертора;

$D = t T = 0,95$ – максимальная скважность;

U_{ce} – прямое падение напряжения на ключе при его насыщении ($U_{ce} = 2,2 B$ при $T_{ja} = 125 \text{ }^\circ\text{C}$).

4.1.5 Потери в IGBT при коммутации

$$P_{sw} = \frac{1}{\pi \sqrt{2}} \cdot \frac{I_{cp} \cdot U_{cc} (t_{c on} + t_{c off}) f_{sw}}{2} = \quad (4.3)$$
$$= \frac{1}{4,44} \cdot \frac{116,48 \cdot 540 (0,13 + 0,45) \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^3}{2} = 20,54 Bm$$

где $t_{c on}$, $t_{c off}$ – продолжительность переходных процессов по цепи коллектора на открывания и закрывания;

U_{cc} - напряжение на коллекторе ключа, В;

f_{sw} - частота коммутаций IGBT, Гц (частота ШИМ равная 5000 Гц).

4.1.6 Суммарные потери IGBT

$$P_Q = P_{SS} + P_{sw} = 55,29 + 20,54 = 75,83 \text{ Вт} \quad (4.4)$$

4.1.7 Потери диода FWD в проводящем состоянии

$$P_{DS} = I_{ep} \cdot U_{ee} \frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \cos \varphi = 116,48 \cdot 0,9 \frac{1}{8} + \frac{0,95}{9,42} 0,90 = 22,61 \text{ Вт} \quad (4.5)$$

где $I_{ep} = I_{cp}$ - максимальная амплитуда тока через обратный диод, А;

U_{ee} - прямое падение напряжение на диоде (в в проводящем состоянии), В.

4.1.8 Потери при восстановлении запирающих свойств диода FDW

$$P_{DR} = \frac{1}{8} I_{rr} \cdot U_{cc} \cdot t_{rr} \cdot f_{sw} = \frac{1}{8} 116,48 \cdot 540 \cdot 0,6 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^3 = 23,58 \text{ Вт} \quad (4.6)$$

где I_{rr} – амплитуда обратного тока через диод, А;

t_{rr} – продолжительность импульса обратного тока, сек.

4.1.9 Суммарные потери диода FWD

$$P_D = P_{DS} + P_{DR} = 22,61 + 23,58 = 46,19 \text{ Вт} \quad (4.7)$$

i. Результирующие потери в гибридном модуле

$$P_T = P_Q + P_D = 75,83 + 46,19 = 122,02 \text{ Вт} \quad (4.8)$$

Найденные результирующие потери являются основой для теплового расчета инвертора, в ходе которого определяются тип и геометрия охладителя.

4.1.11 Тепловой расчет параметров охладителя инвертора

4.1.12 Максимально допустимые переходное сопротивление охладителя -
охлаждающая среда, для гибридного модуля

$$\begin{aligned} R_{th(f-a)} &= \frac{T_c - T_a}{P_T} - R_{th(c-f)} = \frac{373 - 321}{122,02} - 0,045 \\ &= 0,381 \text{ K/Wm} \quad (4.9) \end{aligned}$$

где $T_c = 363 - 383 \text{ K}$ - температура теплопроводящей пластины;

$T_a = 318 - 323 \text{ K}$ - температура охлаждающего воздуха;

$R_{th(c-f)}$ - термическое переходное сопротивление корпус – поверхность теплопроводящей пластины модуля.

4.1.13 Температура кристалла IGBT

$$T_{ja} = T_c + P_Q R_{th(j-c)q} = 373 + 75,83 \cdot 0,085 = 379 \text{ K} \quad (4.10)$$

где $R_{th(j-c)q}$ - термическое переходное сопротивление кристалл – корпус для IGBT.

4.1.14 Температура кристалла обратного диода FWD

$$T_{jd} = T_c + P_D R_{th(j-c)r} = 373 + 46,19 \cdot 0,1 = 381 \text{ K} \quad (4.11)$$

где $R_{th(j-c)r}$ - термическое переходное сопротивление кристалл – корпус для IGBT.

Температура кристалла IGBT и FWD не превышает $398 \text{ K} = 125^\circ \text{C}$, теплоотдача охладителя достаточна.

4.2. Расчет и выбор вентиля диодного моста

4.2.1 Среднее выпрямленное напряжение

$$U_d = K_{cu} \cdot U_n = 1,35 \cdot 380 = 513 \text{ B} \quad (4.12)$$

где $K_{cu} = 1,35$ - коэффициента схемы для номинальной нагрузки.

4.2.2 Максимальное значение среднего выпрямленного тока

$$\begin{aligned} I_{dm} &= \frac{\sqrt{3} \frac{I_{cmax}}{2} \cdot U_l \cdot \cos \varphi + nP_T}{U_d} = \\ &= \frac{\sqrt{3} \frac{151}{2} \cdot 380 \cdot 0,90 + 3 \cdot 122,02}{513} = 124 \text{ A} \end{aligned} \quad (4.13)$$

где n – количество пар IGBT /FWD.

4.2.3 Максимально рабочий ток диода

$$I_{vm} = K_{cc} \cdot I_{dm} = 1,045 \cdot 124 = 129,58 \text{ A} \quad (4.14)$$

где $K_{cc} = 1,045$ - коэффициент для мостовой трехфазной схемы при Γ – образном LC – фильтре, установленном на входе выпрямителя.

4.2.4 Максимально обратное напряжение диода

$$\begin{aligned} U_{vm} &= K_{zn} \cdot \sqrt{2} \cdot U_l \cdot K_{cn} \cdot K_c + \Delta U_n = \\ &= 1,15 \cdot \sqrt{2} \cdot 380 \cdot 1,35 \cdot 1,1 + 150 = 1065 \text{ B} \end{aligned} \quad (4.15)$$

где $K_{zn} \geq 1,15$ - коэффициента запаса по напряжению;

$K_{cn} = 1,35$ - для мостовой схемы;

$K_c \geq 1,1$ - коэффициент допустимого повышения напряжения сети;

$\Delta U_n = 100 - 150 \text{ B}$ - запас на коммутационные выбросы напряжения в звене постоянного тока.

Выбираем трехфазный диодный мост в составе модуля CM150DX-24A с постоянным током 150А и максимальным обратным напряжением 1200 В.

4.2.5 Расчет потерь в выпрямителе

$$P_{DV} = m_V \cdot K_{CS} \cdot \Delta U_6 \cdot \frac{I_{dm}}{k_1} = 6 \cdot 0,577 \cdot 1 \cdot \frac{124}{1,3} = 330.22 \text{ Вт} \quad (4.16)$$

где $K_{CS} = 0,577$ - для мостовой трехфазной схемы;

m_V - число полупроводниковых приборов модулей схем;

$\Delta U_6 \leq 1 \text{ В}$ - падение напряжение в выпрямителе/

4.2.6 Тепловой расчет параметров охладителя выпрямителя

4.2.7 Максимально допустимое переходное сопротивление охладитель – окружающая среда

$$R_{th(f-a)} = \frac{T_c - T_a}{P_{DV}} - R_{th(c-f)} = \frac{373 - 323}{330} - 0,045 = 0,106 \text{ К/Вт} \quad (4.17)$$

4.2.8 Температура кристалла

$$T_{jDV} = T_c + \frac{P_{DV}}{n_D} R_{th(j-c)r} = 373 + \frac{330}{6} \cdot 0,18 = 383 \text{ К} \quad (4.18)$$

где n_D - количество приборов в модуле.

Необходимое условие $T_{jDV} < 413 \text{ К}$ выполняется.

4.2.9 Расчет параметра охладителя

4.2.10 Требуемое суммарное переходное тепловое сопротивление охладитель – окружающая среда

$$R_{th(f-a)} = \frac{R_{th(f-a)вып} \cdot R_{\square(f-a)инв}}{R_{th(f-a)вып} + R_{th(f-a)инв}} = \frac{0,106 \cdot 0,381}{0,106 + 0,381} = 0,082 \text{ К Вт} \quad (4.19)$$

4.2.11 Площадь охладителя

Определяется из размеров конструкции для обеспечения эффективного отвода тепла.

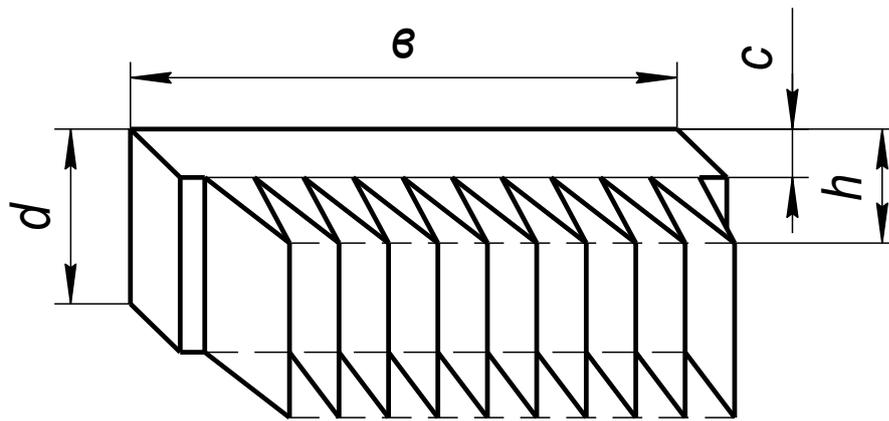


Рисунок 4.2 - Конструкция охладителя

$$A_{rad} = 2d b + h = 2 \cdot 0,2 \cdot 0,2 + 0,08 = 0,112 \text{ м}^2 \quad (4.20)$$

где $d = 0,2 \text{ м}$ – ширина охладителя;

$b = 0,2 \text{ м}$ - длина охладителя;

$h = 0,08 \text{ м}$ - высота охладителя вместе с ребрами.

4.2.12 Площадь охладителя, участвующая в конвекции

$$A_{conv} = 2d b + m(h - c) = 2 \cdot 0,2 \cdot 0,2 + 15(0,08 + 0,01) = 0,5 \text{ м}^2 \quad (4.21)$$

где $m = 15$ – число ребер охладителя;

$c = 0,01 \text{ м}$ - высота основания охладителя.

4.2.13 Переходное сопротивление излучению тепла

$$R_{Qrad} = \frac{\Delta T}{5,1 \cdot E \cdot A_{rad} \left(\frac{T_c}{100}^4 + \frac{T_a}{100}^4 \right)} = \quad (4.22)$$

$$\frac{50}{5,1 \cdot 0,8 \cdot 0,112 \left(\frac{373}{100}^4 + \frac{323}{100}^4 \right)} = 0,362$$

где $\Delta T = 50$;

$E = 0,8$.

4.2.14 Переходное температурное сопротивление теплопередачи конвекция

$$R_{Qconv} = \frac{1}{1,34 \cdot A_{conv} \cdot F_{rad}} \cdot \frac{d}{\Delta T}^{0,25} = \frac{1}{1,34 \cdot 0,5 \cdot 0,76} \cdot \frac{0,1}{50}^{0,25} = 0,751 \quad (4.23)$$

Где $F_{rad} = 0,76$ - коэффициент ухудшения теплоотдачи (конвекции).

4.2.15 Переходное температурное сопротивление охладителя – окружающая среда при естественном охлаждении

$$R_{th(f-a)} = \frac{R_{Qrad} \cdot R_{Qconv}}{R_{Qrad} + R_{Qconv}} = \frac{0,362 \cdot 0,751}{0,362 + 0,751} = 0,244 \text{ K Bm} \quad (4.24)$$

Полученное значение немного ниже требуемого суммарного значения, на основании этого можно сделать вывод, что охладитель с выбранными размерами обеспечит необходимый отвод тепла.

4.3 Расчет фильтра

4.3.1 Коэффициент пульсаций на входе фильтра

$$q_{1ex} = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{6^2 - 1} = 0,057 \quad (4.25)$$

Где $m = 6$ - пульсность схемы выпрямления.

4.3.2 Параметр сглаживания LC – фильтра

$$L_0 C_{01} = \frac{S+1}{2p m f^2} = \frac{7+1}{2 \cdot 6 \cdot 50^2} = 9,8 \cdot 10^{-6} \quad (4.26)$$

Где $S = 3 \dots 7$ – коэффициент сглаживания по первой гармонике.

4.3.3 Средний ток звена постоянного тока

$$I_d = \frac{I_{dm}}{k_1} = \frac{124}{1,3} = 95,3 \text{ A} \quad (2.27)$$

4.3.4 Индуктивность дросселя LC – фильтра

$$L_0 = 3L_{0min} = 3 \frac{0,013U_{\pi}}{2pfI_d} = 3 \frac{0,013 \cdot 380}{2p \cdot 50 \cdot 95,3} = 0,34 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (4.28)$$

4.3.5 Амплитуда тока протекающего через конденсатор фильтра на частоте первой гармоника

$$I_{com} = q_{1вых} \cdot U_d \cdot 2p\pi f \cdot C_{01} = 0,057 \cdot 513 \cdot 2p \cdot 6 \cdot 50 \cdot 20 \cdot 10^{-6} = 1,1 \text{ А} \quad (4.29)$$

где $C_{01} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$ - емкость конденсаторов, необходимая для протекания реактивного тока нагрузки инвертора.

4.3.6 Расчет снаббера

Для ограничения напряжения коммутации требуется установка демпфирующей цепи (снаббера).

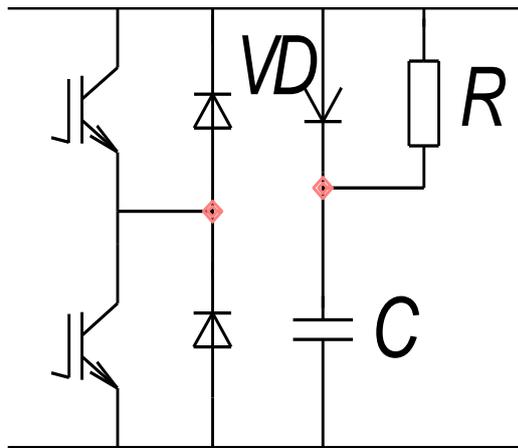


Рисунок 4.3 - Схема включения демпфирующей цепи (снаббера)

В качестве снаббера выбираем цепь представленную на рисунке 6. Емкость конденсатора C снаббера выбирается из расчета 1 мкф на 100 А.

Выбираем конденсатор $C = 0,12 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$.

4.3.7 Мощность резистора снаббера

$$P = 0,5 \cdot C \cdot \Delta U^2 \cdot f_{sw} = 0,5 \cdot 0,12 \cdot 10^{-6} \cdot 60^2 \cdot 5 \cdot 10^3 = 1,08 \text{ Вт} \quad (4.30)$$

4.3.8 Сопротивление резистора, для обеспечения минимума колебаний тока

$$\text{коллектора IGBT} \quad R = 2 \frac{\overline{L_{sn}}}{C} = 2 \frac{\overline{10 \cdot 10^{-9}}}{0,12 \cdot 10^{-6}} = 0,57 \text{ Ом}$$

(4.31)

Где L_{sn} – индуктивность цепей снаббера, Гн (принимаяем $L_{sn} = 10 \text{ нГн}$).

Отношение максимума тока через диод снаббера к среднему (20-50):1. В качестве диода выбирается высокочастотный диод со временем восстановления запирающих свойств $t_{rr} = 0,3 \text{ мкс}$

5 Расчет механических характеристик при скалярном управлении

Параметры асинхронного двигателя 4А200L4У3:

Синхронная частота вращения	$n = 1500$ об/мин
Число пар полюсов	$p_n = 2$
Номинальная мощность	$P_H = 37000$ Вт
КПД	$\eta = 0,91$
Коэффициент мощности двигателя	$\cos \phi_n = 0,9$
Номинальное фазное напряжение	$U_{\phi H} = 220$ В
Число фаз обмотки статора	$m_1 = 3$
Динамический момент инерции ротора двигателя	$J = 0.368$ кг м ²
Кратность критического момента	$\lambda = 2,5$
Номинальное скольжение	$S_n = 0,017$

$x'_{\mu} = 4,4$; $x'_1 = 0,086$; $r'_1 = 0.013$; $x''_2 = 0,14$; $r''_2 = 0.018$ - параметры Г-образной схемы замещения.

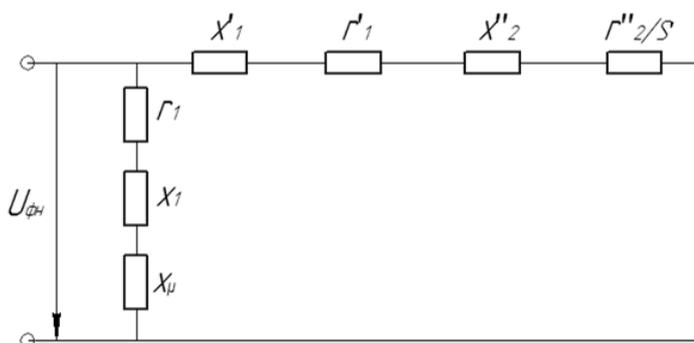


Рисунок 5.1 - Г-образная схема замещения асинхронного двигателя для номинального режима

Номинальный фазный ток статора:

$$I_{\phi H} = \frac{P_2}{m_1 \cdot U_{\phi H} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{37000}{3 \cdot 220 \cdot 0,9 \cdot 0,91} = 68,45 \text{ А} . \quad (5.1)$$

По формулам, приведенным в справочнике:

$$x_1 \cong \frac{2x'_1 \cdot x_\mu}{x_\mu + \sqrt{x_\mu^2 + 4x'_1 x_\mu}} = \frac{2 \cdot 0,086 \cdot 4,4}{4,4 + \sqrt{4,4^2 + 4 \cdot 0,086 \cdot 4,4}} = 0,084. \quad (5.2)$$

$$r_1 = r'_1 \cdot x_1 / x'_1 = 0,013 \cdot 0,084 / 0,086 = 0,01275. \quad (5.3)$$

Коэффициент перевода относительных единиц в физические:

$$c = \frac{U_{\Phi H}}{I_{\Phi H}} = \frac{220}{68,45} = 3,214. \quad (5.4)$$

Активное сопротивление обмотки статора:

$$R_s = r_1 \cdot c = 0,01275 \cdot 3,214 = 0,0409 \text{ Ом}. \quad (5.5)$$

Взаимная индуктивность фаз статора и ротора:

$$L_m = \frac{x_\mu \cdot c}{2\pi f} = \frac{4,4 \cdot 3,214}{314} = 0,04503 \text{ Гн}. \quad (5.6)$$

Параметры уточненной схемы замещения:

$$\begin{aligned} x'_1 &= c_1 \cdot x_1; & r'_1 &= c \cdot r_1; & r''_2 &= c_1 \cdot r'_2; & x''_2 &= c_1^2 \cdot x'_2, \\ c_1 &= \frac{x'_1}{x_1} = \frac{0,086}{0,084} = 1,023. \end{aligned} \quad (5.7)$$

Полная индуктивность фазы статора:

$$L_s = \frac{\left(x_\mu + x'_1 / c_1 \right) c}{2\pi f} = \frac{\left(4,4 + 0,086 / 1,023 \right) 3,214}{314} = 0,0459 \text{ Гн} \quad (5.8)$$

Активное сопротивление обмотки ротора:

$$R_r = \frac{r''_2 \cdot c}{c_1^2} = \frac{0,018 \cdot 3,214}{1,023^2} = 0,0552 \text{ Ом} \quad (5.9)$$

Полная индуктивность фаз ротора:

$$L_r = \frac{(x_\mu + \frac{x_2''}{c_1}) \cdot c}{2\pi f} = \frac{(4,4 + \frac{0,14}{1,023^2}) \cdot 3,214}{314} = 0,0464 \text{ Гн.} \quad (5.10)$$

Коэффициенты электромагнитной связи статора и ротора:

$$k_s = \frac{L_m}{L_s} = \frac{0,04503}{0,0459} = 0,9812 \quad (5.11)$$

$$k_r = \frac{L_m}{L_r} = \frac{0,04503}{0,0464} = 0,9704 \quad (5.12)$$

Коэффициент рассеяния обмоток:

$$\sigma = 1 - k_s \cdot k_r = 1 - 0,9812 \cdot 0,9704 = 0,04777 \quad (5.13)$$

Переходные индуктивности статора и ротора:

$$L'_s = L_s \cdot \sigma = 0,0459 \cdot 0,04777 = 0,00219 \text{ Гн} \quad (5.14)$$

$$L'_r = L_r \cdot \sigma = 0,0464 \cdot 0,04777 = 0,00221 \text{ Гн} \quad (5.15)$$

Переходное активное сопротивление статора:

$$R'_s = R_s + k_r^2 \cdot R_r = 1,4 + 0,9764^2 \cdot 0,8316 = 2,1558 \text{ Ом} . \quad (5.16)$$

Индуктивное сопротивление намагничивающего контура:

$$x_\mu = 2\pi \cdot L_m = 314 \cdot 0,04503 = 14,139 \text{ Ом} \quad (5.16)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния статора:

$$x'_{s\sigma} = 2\pi \cdot f(L_s - L_m) = 314 \cdot 0,00087 = 0,2733 \text{ Ом} \quad (5.17)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния ротора, приведенное к статору:

$$x'_{r\sigma} = 2\pi \cdot f(L_r - L_m) = 314 \cdot 0,00137 = 0,4302 \text{ Ом} \quad (5.18)$$

$$x'_K = x'_{s\sigma} + x'_{r\sigma} = 0,27 + 0,4302 = 0,7035 \text{ Ом.} \quad (5.19)$$

5.2 Общий подход расчета механических характеристик асинхронного двигателя при частотном скалярном управлении

Для определения момента двигателя и построения механических характеристик при частотном регулировании используют Γ – образные упрощенные схемы замещения, в которых контур намагничивания вынесен на вход схемы без учета падения напряжения на активном сопротивлении и индуктивном сопротивлении рассеяния статора.

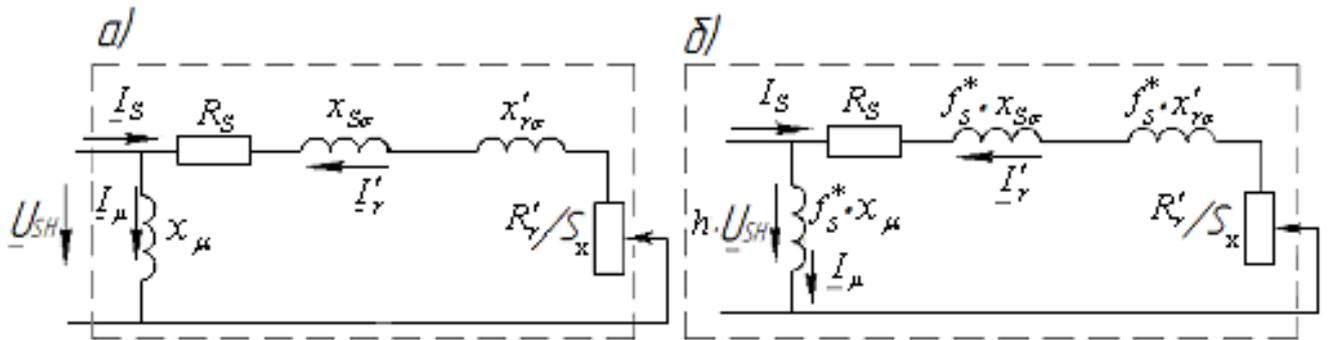


Рисунок 5.2 - Схемы замещения асинхронного двигателя при номинальных параметрах сети (а) и частотном управлении (б)

Для расчета характеристик приняты обозначения: $f_s^* = \frac{f_{sx}}{f_{sh}}$ - относи-

тельная частота питающего статор напряжения; $h = \frac{U_{sx}}{U_{sh}}$ - относительное

напряжение на статоре двигателя; $S_x = \frac{\omega_{sx} - \omega}{\omega_{sx}} = 1 - \frac{\omega}{\omega_{sh} \cdot f_s^*}$ - скольжение

при заданной частоте; $\beta = \frac{\omega_{sx} - \omega}{\omega_{sh}} = f_s^* \cdot \frac{\omega_{sx} - \omega}{\omega_{sx}} \cdot \frac{\omega_{sx}}{\omega_{sh}} = S_x \cdot f_s^*$ - абсолют-

ное скольжение, характеризующее наклон механической характеристики при изменении частоты питающего напряжения.

Используя схему замещения (рис.5.16,б) асинхронного двигателя при частотном регулировании, определяем ток фазы ротора:

$$I_r' = \frac{h \cdot U_{SH}}{\sqrt{R_S + R_r' / S_x + f_S^* \cdot x_k}}, \quad (5.20)$$

где $x_k = x_{S\sigma} + x_{r\sigma}'$ - индуктивное сопротивление рассеяния цепи короткого замыкания.

Электромагнитная мощность трехфазного двигателя при частотном регулировании определяется выражением

$$P_{ЭМ} = 3 \cdot f_r' \cdot R_r' / S_x = M_X \cdot \omega_{SX}. \quad (5.21)$$

Подставляя в выражение значение тока фазы ротора, получаем уравнение статической механической характеристики при частотном регулировании

$$M_X = \frac{3h^2 \cdot U_{SH}^2 \cdot R_r' / S_x}{f_S^* \cdot \omega_{SH} \left[R_S + R_r' / S_x + f_S^* \cdot x_k \right]} = \frac{3h^2 \cdot U_{SH}^2 \cdot R_r' \cdot S_x}{f_S^* \cdot \omega_{SH} \left[R_S \cdot S_x + R_r' + f_S^* \cdot x_k \cdot S_x \right]}. \quad (5.22)$$

Опрокидывающий момент механических характеристик

$$M_{KX} = \frac{3h^2 \cdot U_{SH}^2}{2 \cdot f_S^* \cdot \omega_{SH} \cdot \left[R_S \pm \sqrt{R_S^2 + f_S^* \cdot x_k} \right]}. \quad (5.23)$$

В приведенных выражениях знак плюс относится к двигательному режиму, а знак минус – к генераторному режиму работы.

Величина опрокидывающего момента двигателя определяется из (5.24)

$$\begin{aligned} f_S^* &= 1; \\ h &= 1. \end{aligned} \quad M_K = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 157 \cdot \left[0,0409 + \sqrt{0,0409^2 + 0,7135^2} \right]} = 530 \text{ Нм}. \quad (5.25)$$

Уравнение для расчета угловой скорости ротора двигателя

$$\omega = \omega_{SH} \cdot (1 - S_X) = 157 \cdot (1 - S_X) \quad (5.26)$$

Уравнение для расчета вращающего момента двигателя

$$M_X = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,055 \cdot h^2 \cdot S_X}{157 \cdot (0,0409 \cdot S_X + 0,055) + 0,7135 \cdot f_s^* \cdot S_X \cdot f_s^*} =$$

$$= \frac{50,87 \cdot h^2 \cdot S_X}{0,0409 \cdot S_X + 0,055 + 0,7135 \cdot f_s^* \cdot S_X \cdot f_s^*} \quad (5.27)$$

С использованием уравнений (1.36) и (1.34) в программе MATLAB составлен скрипт для расчета и построения семейства механических характеристик.

```
%Задание величины скольжения, относительной частоты и напряжения:
s=[0.001:0.005:1];f=1;h=1;
%Вычисление угловой скорости вращения ротора, принимаем Wшн=314 рад/сек,
%обозначаем угловую скорость вращения ротора w=y:
[y1]=157*f*(1-s);
%Вычисление момента двигателя, обозначаем момент M=x:
[x1]=50.87*h.^2*s./(((0.0409*s+0.055).^2+(0.7135*f*s).^2)*f);
%Вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.8 и h=0.8:
s=[0.001:0.005:1];f=0.8;h=0.8;[y2]=157*f*(1-s);
[x2]=50.87*h.^2*s./(((0.0409*s+0.055).^2+(0.7135*f*s).^2)*f);
%Вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.6 и h=0.6:
s=[0.001:0.005:1];f=0.6;h=0.6;[y3]=157*f*(1-s);
[x3]=50.87*h.^2*s./(((0.0409*s+0.055).^2+(0.7135*f*s).^2)*f);
%Вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.4 и h=0.4:
s=[0.001:0.005:1];f=0.4;h=0.4;[y4]=157*f*(1-s);
[x4]=50.87*h.^2*s./(((0.0409*s+0.055).^2+(0.7135*f*s).^2)*f);
%Вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=0.2 и h=0.2:
s=[0.001:0.005:1];f=0.2;h=0.2;[y5]=157*f*(1-s);
[x5]=50.87*h.^2*s./(((0.0409*s+0.055).^2+(0.7135*f*s).^2)*f);
%Построение семейства механических характеристик:
plot(x1,y1,x2,y2,x3,y3,x4,y4,x5,y5),grid
xlabel('x (Hm)'),ylabel('y (1/c)')
```

Рисунок 5.3 - Скрипт вычисления механических характеристик

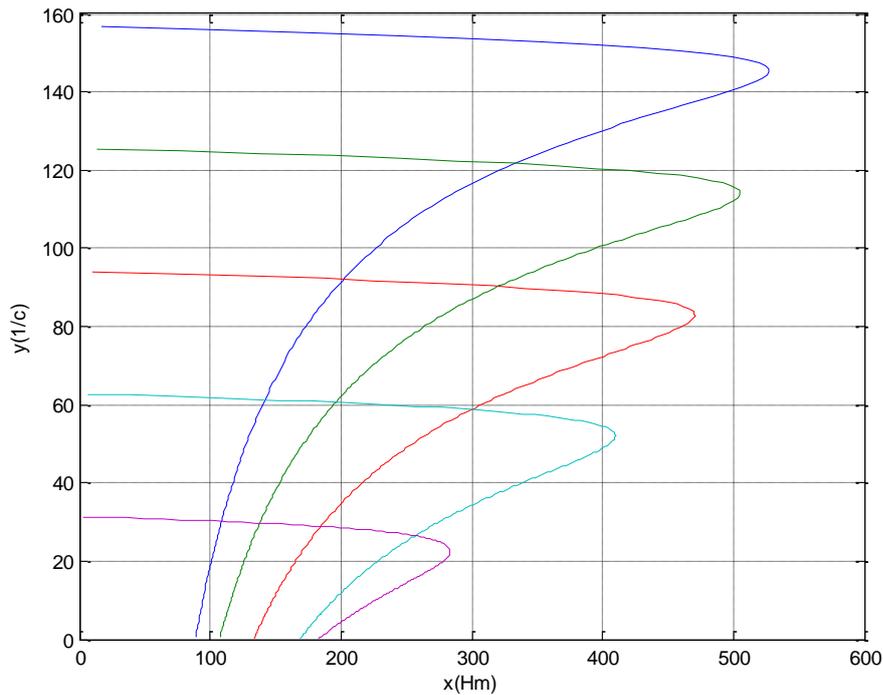
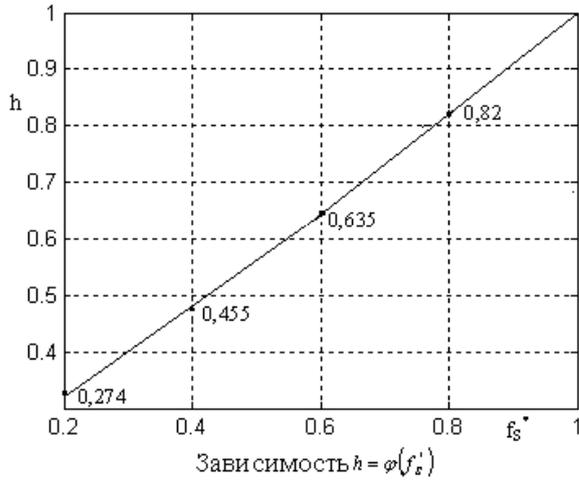


Рисунок 5.4 - Механические характеристики асинхронного двигателя

$$\text{при частотном регулировании } U_s / f_s = const$$

Из приведенных характеристик следует, что при снижении частоты уменьшается величина критического момента и снижается жесткость характеристик. Это обстоятельство объясняется тем, что с ростом нагрузки происходит падение напряжения на активном сопротивлении статорной обмотки. В свою очередь, это приводит к уменьшению магнитного потока и, следовательно, к снижению электромагнитного момента. Для сохранения постоянства опрокидывающего момента двигателя необходимо величину питающего напряжения на статоре в процессе регулирования уменьшать в меньшей степени, чем частоту. Для построения механических характеристик при $M_k = const$ необходимо вычислить относительные величины напряжения на статоре двигателя при изменении частоты, используя следующее выражение:

$$527 = \frac{3 \cdot h^2 \cdot 220^2}{2 \cdot 157 \cdot f_s^* \cdot \left[0,13 + \sqrt{0,13^2 + \left(f_s^* \cdot 0,735 \right)^2} \right]}. \quad (5.28)$$



В ходе расчета получаем: 1) при $f_s^* = 0.2$ величина $h = 0.276$; 2) при $f_s^* = 0.4$ величина $h = 0.455$; 3) при $f_s^* = 0.6$ величина $h = 0.635$; 4) при $f_s^* = 0.8$ величина $h = 0.82$. Приведенные результаты расчета позволяют построить функциональную зависимость $h = \varphi(f_s^*)$.

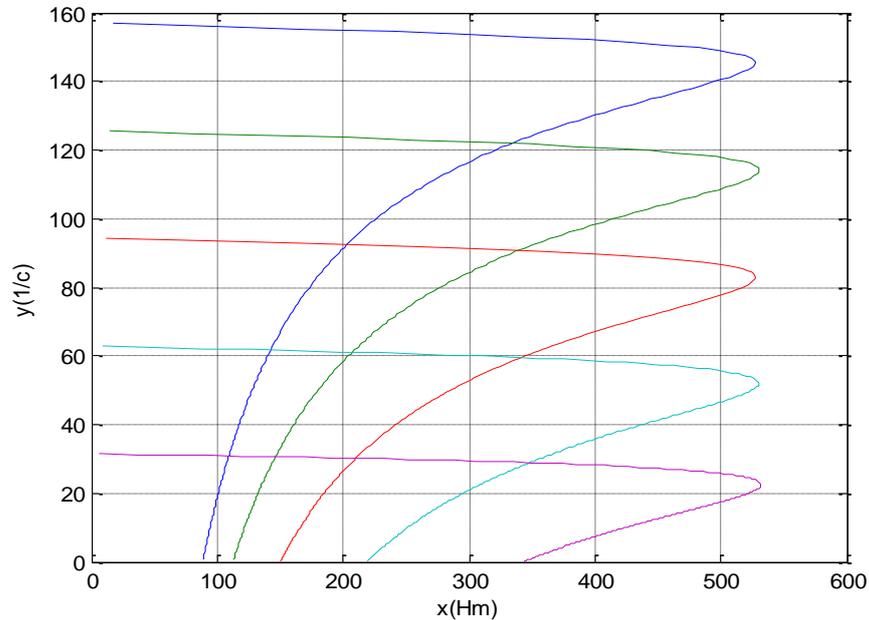


Рисунок 5.5 - Механические характеристики асинхронного двигателя с компенсацией.

Как видно из механических характеристик (рис. 5.5) перегрузочная способность двигателя остается постоянной, а жесткость соответствует жесткости естественной характеристики закона частотного регулирования вида:

```

%Задание величины скольжения, относительной частоты и напряжения:
s=[0.001:0.005:1];f=1;h=1;
%Принимаем Wнн=157 рад/сек,
%обозначаем угловую скорость вращения ротора w=y:
%Вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=50Гц и U=220 В :
[y1]=157*f*(1-s);
%Вычисление момента двигателя, обозначаем момент M=x:
[x1]=50.87*h.^2*s./(((0.13*s+0.055).^2+(0.735*f*s).^2)*f);
%Вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=42,2 Гц и U=158 В:
;s=[0.001:0.005:1];f=0.85;h=0.72;
[y2]=157*f*(1-s)
[x2]=50.87*h.^2*s./(((0.13*s+0.055).^2+(0.735*f*s).^2)*f);
%Вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=35 Гц и U=110 В:
s=[0.001:0.005:1];f=0.7;h=0.5;
[y3]=157*f*(1-s);
[x3]=50.87*h.^2*s./(((0.13*s+0.055).^2+(0.735*f*s).^2)*f);
%Вычисление угловой скорости и момента двигателя при f=25 Гц и U=55 В:
s=[0.001:0.005:1];f=0.5;h=0.25;
[y4]=157*f*(1-s);
[x4]=50.87*h.^2*s./(((0.13*s+0.055).^2+(0.735*f*s).^2)*f);
%Построение семейства механических характеристик:
plot(x1,y1,x2,y2,x3,y3,x4,y4),grid
xlabel('x(Hm)'),ylabel('y(l/c)')

```

Рисунок 5.6 - Скрипт вычисления механических характеристик при вентиляторной нагрузке

Питательный насос имеет вентиляторную нагрузку $M_c = c \cdot \omega^2$. При этом используется скалярный Рисунок 5.6 - Механические характеристики при пропорциональном частотном регулировании с $I \cdot r$ - компенсацией

$$\frac{U_s}{U_{SH}} = \frac{f_s^2}{f_{SH}^2} \quad \text{или} \quad \frac{U_s}{f_s^2} = const. \quad (5.29)$$

Для вычисления механических характеристик двигателя питательного насоса при вентиляторной нагрузке разработан специальный скрипт для частот =50 Гц, =42,5 Гц и =35 Гц. Коэффициент пропорциональности вычисляется по формуле

$$k = \frac{U_s}{f_{SH}^2} = \frac{220}{2500} = 0,088 \quad (5.29)$$

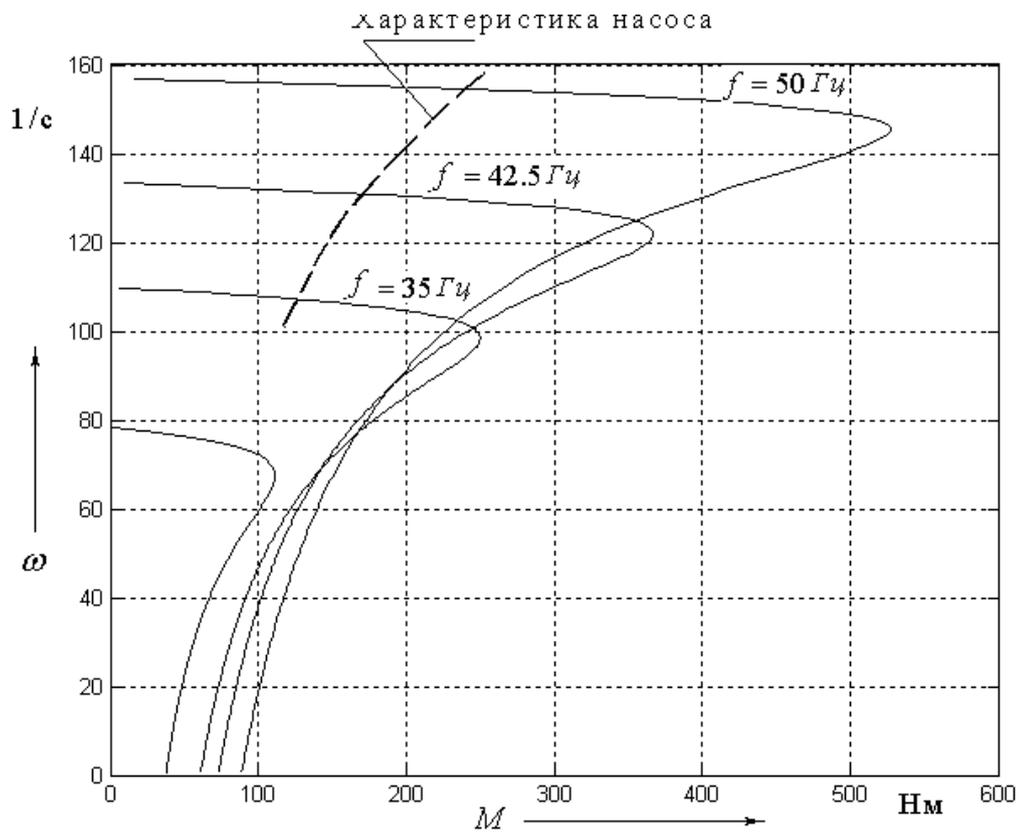


Рисунок 5.7 - Механические характеристики при вентиляторной нагрузке

6 Математическое моделирование системы электропривода

Уравнения и математическая модель асинхронного двигателя

Для математического описания и моделирования асинхронного электропривода обобщенные векторы величин асинхронного двигателя записываются в ортогональной системе координат α, β , неподвижной относительно статора

$$U_S = U_{S\alpha} + j \cdot U_{S\beta}; \quad i_S = i_{S\alpha} + j \cdot i_{S\beta}; \quad \psi_S = \psi_{S\alpha} + j \cdot \psi_{S\beta}; \quad \psi_r = \psi_{r\alpha} + j \cdot \psi_{r\beta}. \quad (6.1)$$

Система координат α, β удобна при анализе систем, когда в цепи статора машины имеет место не симметрия, в частности, включены транзисторные ключи автономного инвертора, или существует короткое замыкание статорных цепей. Кроме того, ось α совпадает с магнитной осью фазы a реальной асинхронной машины. Отсюда проекция тока $i_{S\alpha}$ будет равна реальному току двигателя.

Уравнения асинхронного двигателя записываем на основе системы уравнений. При этом полагаем, что $\omega_k = 0$ и $U_r = 0$.

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{S\alpha}}{d\alpha} &= U_{S\alpha} - R_S \cdot i_{S\alpha}; & \frac{d\psi_{r\alpha}}{d\alpha} &= -R_r \cdot i_{r\alpha} - p_{II} \cdot \omega \cdot \psi_{r\beta}; \\ \frac{d\psi_{S\beta}}{d\alpha} &= U_{S\beta} - R_S \cdot i_{S\beta}; & \frac{d\psi_{r\beta}}{d\alpha} &= -R_r \cdot i_{r\beta} + p_{II} \cdot \omega \cdot \psi_{r\alpha}. \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_{S\alpha} &= L_S \cdot i_{S\alpha} + L_m \cdot i_{r\alpha}; & \psi_{r\alpha} &= L_m \cdot i_{S\alpha} + L_r \cdot i_{r\alpha}; \\ \psi_{S\beta} &= L_S \cdot i_{S\beta} + L_m \cdot i_{r\beta}; & \psi_{r\beta} &= L_m \cdot i_{S\beta} + L_r \cdot i_{r\beta}. \end{aligned} \right\} \quad (6.3)$$

Для удобства построения математической модели систему уравнений выражаем через токи:

$$\left. \begin{aligned} i_{S\alpha} &= \frac{1}{L'_S} \cdot \psi_{S\alpha} - \frac{k_r}{L'_S} \cdot \psi_{r\alpha}; & i_{r\alpha} &= -\frac{k_S}{L'_r} \cdot \psi_{S\alpha} + \frac{1}{L'_r} \cdot \psi_{r\alpha}; \\ i_{S\beta} &= \frac{1}{L'_S} \cdot \psi_{S\beta} - \frac{k_r}{L'_S} \cdot \psi_{r\beta}; & i_{r\beta} &= -\frac{k_S}{L'_r} \cdot \psi_{S\beta} + \frac{1}{L'_r} \cdot \psi_{r\beta}, \end{aligned} \right\} \quad (6.4)$$

где $L'_S = \sigma \cdot L_S$, $L'_r = \sigma \cdot L_r$, $k_S = \frac{L_m}{L_S}$ и $k_r = \frac{L_m}{L_r}$ - соответственно коэффициенты связи статора и ротора;

$$\sigma = \left(1 - \frac{L_m^2}{L_S \cdot L_r} \right) = \sigma - k_S \cdot k_r - \text{коэффициент рассеяния.}$$

Как было показано выше, выражение электромагнитного момента асинхронного двигателя представляет собой векторное произведение пространственных векторов тока и потокосцеплений. Выбор того или иного вида уравнения для электромагнитного момента осуществляется из условия рационального построения структурной схемы математической модели.

$$M_{\text{э}} = \frac{3}{2} \cdot p_{\text{п}} \cdot \left(\psi_{S\alpha} \cdot i_{S\beta} - \psi_{S\beta} \cdot i_{S\alpha} \right) \quad (6.5)$$

Уравнение движения двигателя в одномассовой системе, имеет вид:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_{\Sigma}} \cdot \left(M_{\text{э}} - M_c \right) \quad (6.6)$$

где J_{Σ} - приведенный суммарный момент инерции ротора и механизма;

M_c - статический момент нагрузки.

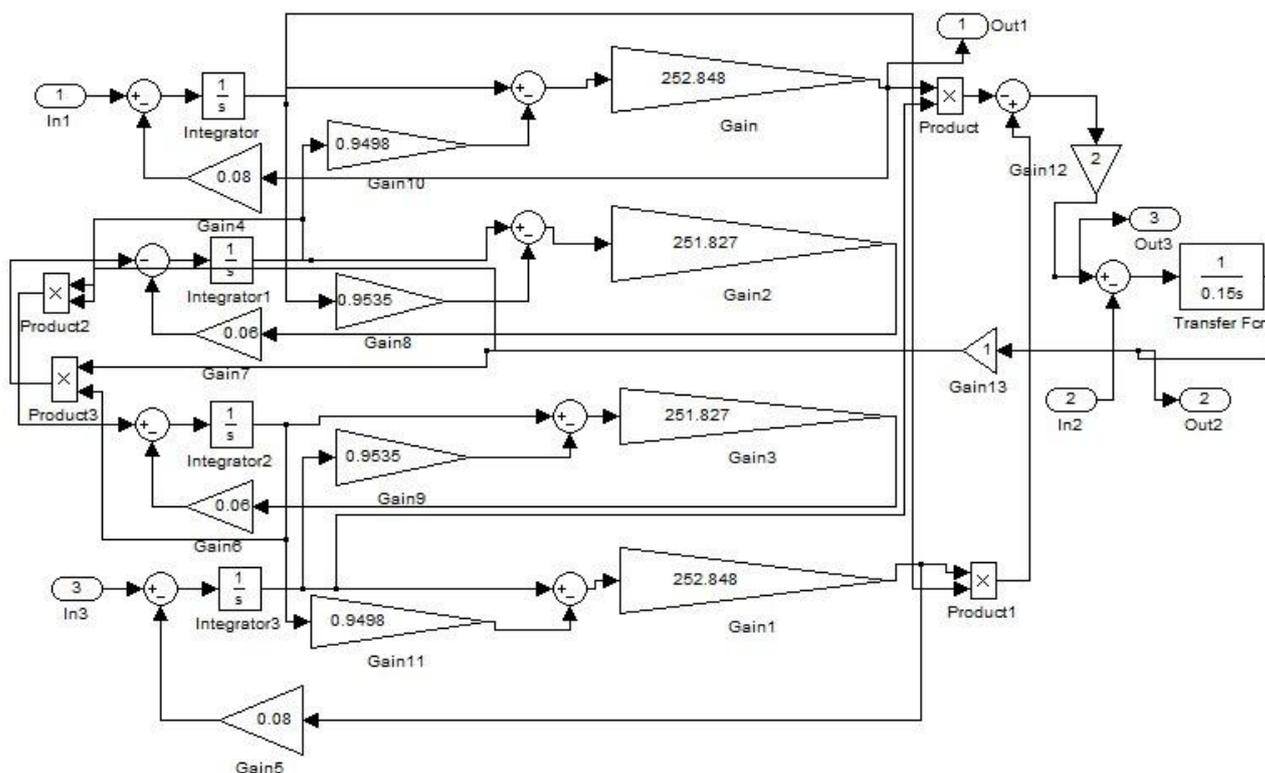


Рисунок 6.1 - Математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат (α, β) .

Математическая модель асинхронного двигателя построена по уравнениям в системе координат $\langle \alpha, \beta \rangle$ и приведена на рисунке 6.1.

В качестве входных напряжений $U_{s\alpha}$ и $U_{s\beta}$ подаются сигналы от источников SineWave:

$$U_{s\alpha} = U_m \cdot \sin\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \cdot \cos \cdot \omega_0 t; \quad (6.7)$$

$$U_{s\beta} = U_m \cdot \sin \cdot \omega_0 t,$$

где $U_m = \sqrt{2} \cdot 220 = 310 \text{ В}$ - амплитуда входного напряжения; $\omega_0 = 314 \text{ с}^{-1}$ - круговая частота электромагнитного поля статора.

В окне настройки блока SineWave необходимо задать амплитуду - 310, круговую частоту – 157rad/sec и фазу колебаний – 1,57 rad, а в окне настройки блока SineWave 1 задать амплитуду - 310, круговую частоту – 157rad/сеси

фазу колебаний – 0 rad. Окно настроек SineWave активизируется после переноса источника сигнала в рабочую область моделирования. Применение блоков SineWave обеспечивает питание статорных цепей асинхронного двигателя двухфазным переменным напряжением.

Момент сопротивления нагрузки на валу двигателя создается блоком Step.

Для исследования работы асинхронного электропривода с пропорциональным законом скалярного частотного управления необходимо питать статорные обмотки от модели преобразователя частоты (модель IGBT - Inverter). Для создания модели IGBT - Inverter используем модель гармонических колебаний регулируемой частоты, которая представляет собой модель идеального преобразователя частоты.

Схема модели приведена на рисунке 6.1 в указанной схеме изменение ω_0 и U_m во времени, т. е. интенсивность частотного пуска, задается задатчиком интенсивности, в который входят блоки Gain, Integrator и Saturation.

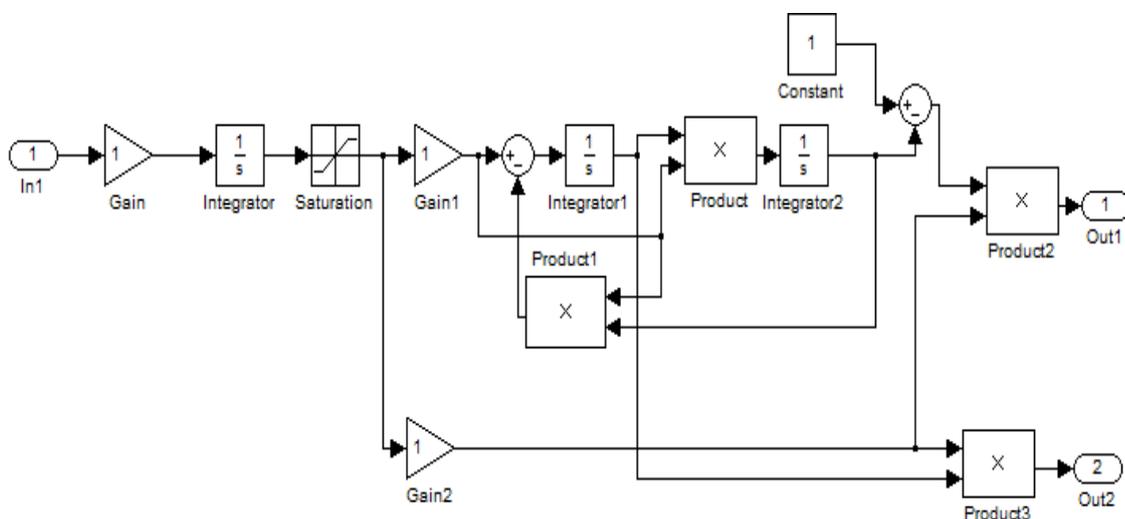


Рисунок 6.2 - Схема модели IGBT-инвертор

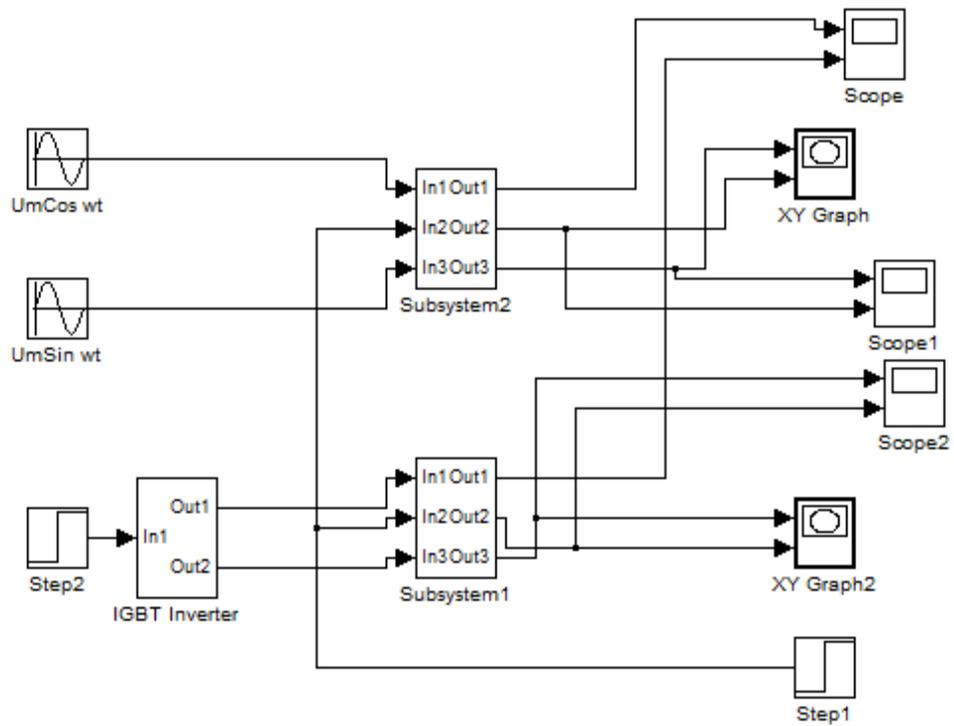


Рисунок 6.3 - Схема частотного пуска асинхронного электропривода

Схема математического моделирования (рисунок 6.1) состоит из двух частей, что позволяет проводить сравнительные исследования и анализ электромеханических процессов двух электроприводов.

7 Динамические характеристики системы

На рисунке 7.1, приведены сравнительные осциллограммы электромагнитного момента $M_{\text{э}}$ и угловой скорости ротора ω асинхронного двигателя при прямом пуске и частотном пуске. При частотном пуске использовался пропорциональный закон частотного управления $U_s / f_s = \text{const}$.

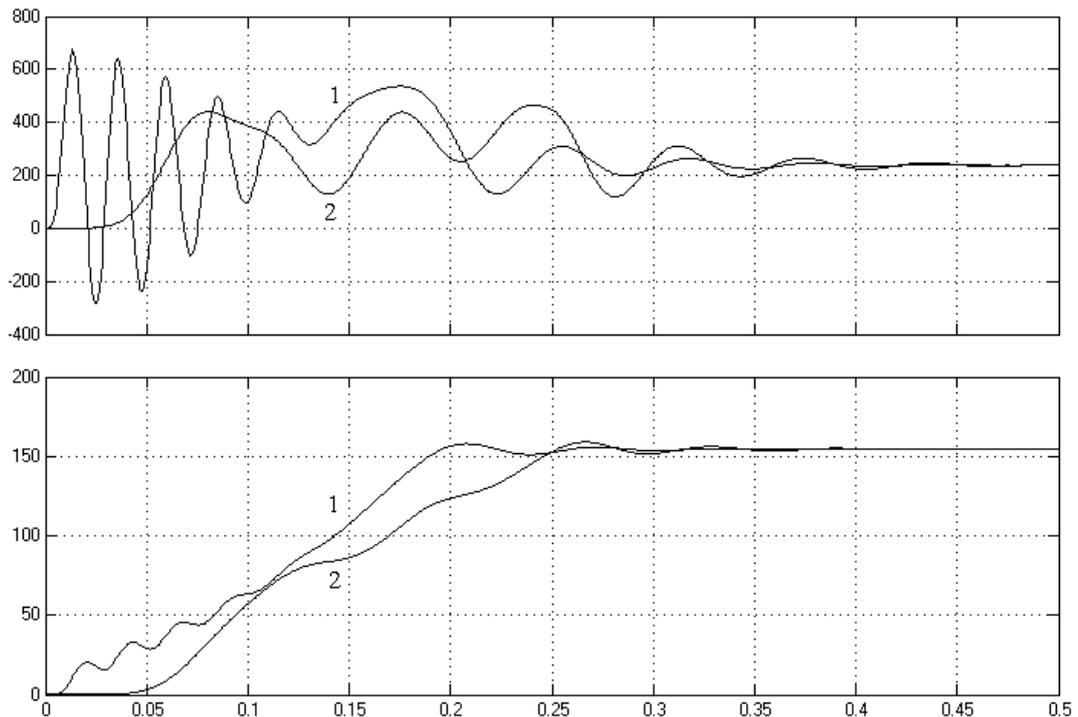


Рисунок 7.1 – сравнительные осциллограммы при прямом и частотном пусках двигателя

Сравнение динамических характеристик $\omega = f(M)$ показывает, что частотное управление пуском позволяет приблизить характеристику к кривой, обеспечивающей пуск двигателя с более постоянным моментом по сравнению с характеристикой прямого пуска асинхронного двигателя.

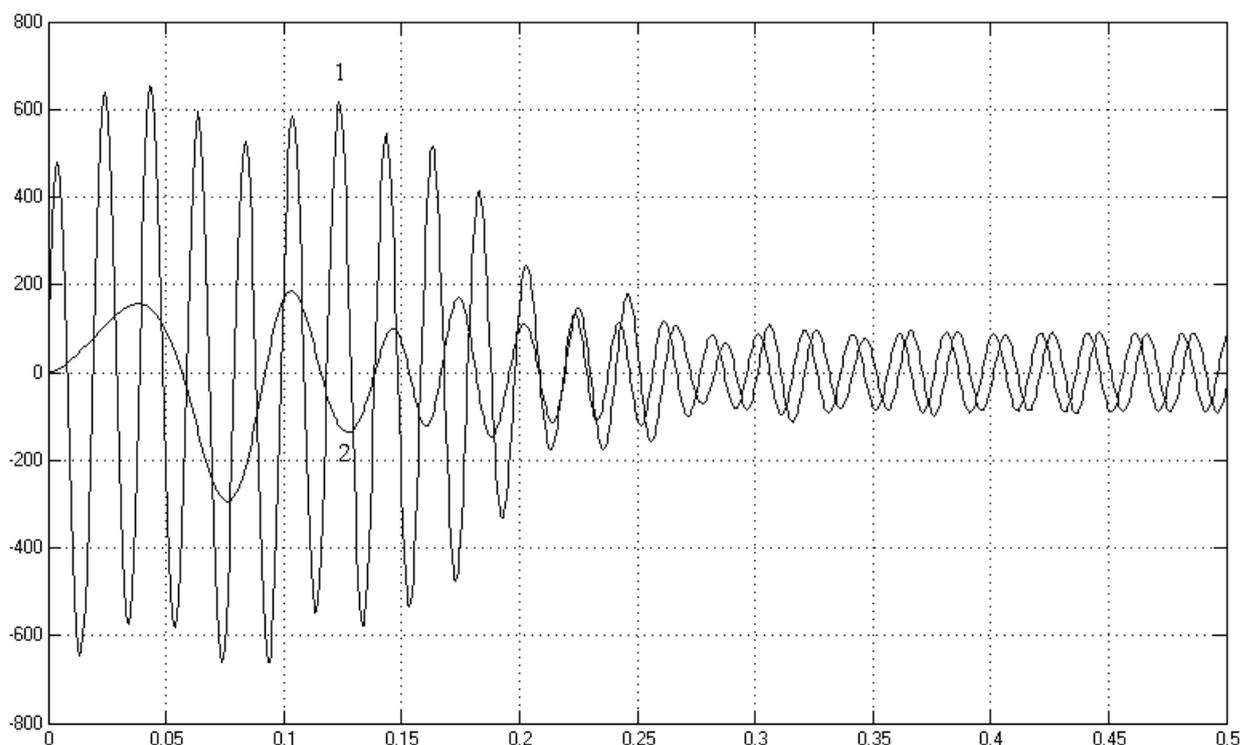


Рисунок 7.2 – сравнительные осциллограммы фазного тока статорной обмотки при прямом и частотном пусках двигателя

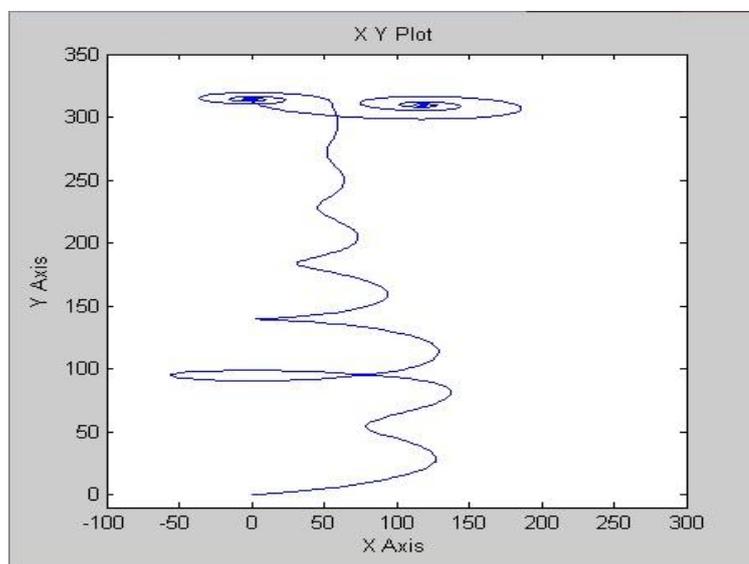


Рисунок 7.3 –Динамическая механическая характеристика при частотном пуске асинхронного двигателя

Как видно из приведенных осциллограмм (рис 7.2 и 7.3) при частотном пуске асинхронного двигателя амплитуда пускового тока в фазе А, снижается в 3.5

раза, что предотвращает механические удары при пуске насоса и позволяет настроить аппаратуру пуска.

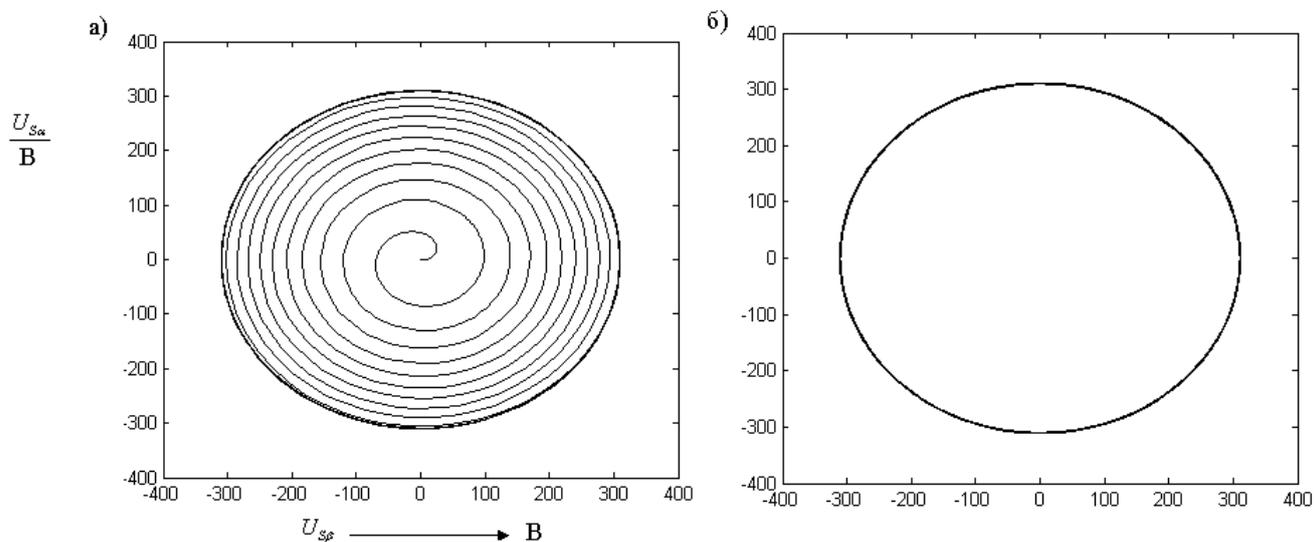


Рисунок 7.4 - Годографы вектора статорного напряжения: *a* – при пропорциональном частотном пуске; *б* – при прямом пуске

При сравнении годографов вектора статорного напряжения можно отметить, что годограф (рисунке 2) имеет вид спирали, постепенно переходящей в окружность. Это свидетельствует о том, частота и амплитуда напряжения на статоре двигателя изменяются пропорционально в процессе пуска.

Годографы вектора статорного напряжения двигателя получены при использовании блока `xuGraph`, у которого к входу x подключено напряжение $U_{s\alpha}$, а к входу y – напряжение $U_{s\beta}$. При этом в диалоговом окне блока на полях $x - \min$, $x - \max$, $y - \min$ и $y - \max$ должны быть введены значения 310.

8 Технология изготовления ротора асинхронного двигателя и техника безопасности при эксплуатации электроприводов

8.1 Способы изготовления короткозамкнутых роторов асинхронного двигателя

8.1.1 Заливка роторов статическим способом

Статический способ заливки обычно используют на мелкосерийном и единичном производстве. Окупаемость высокой трудоемкости процесса происходит за счет простоты заливки и оборудования, а также за счет небольших площадей для оборудования. Данный способ применяют для роторов диаметром 300-800 мм.

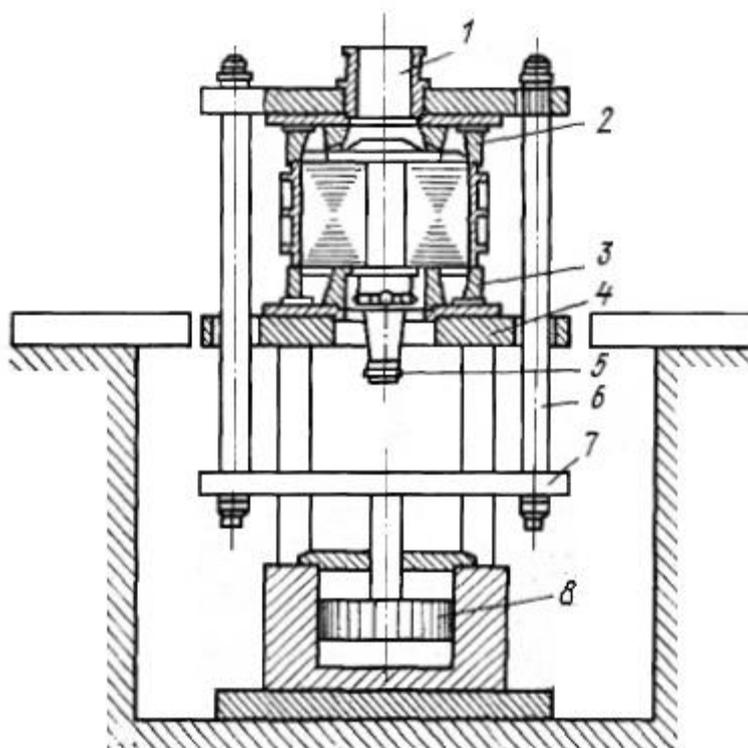


Рисунок 8.1 – Схема установки для заливки роторов в кокиль статическим способом: 1-литниковая чаша; 2-верхняя часть кокиля; 3-нижняя часть кокиля; 4-основание; 5-нижняя часть оправки; 6-механизм движения тяг; 7-форма; 8-поршень

В связи с недостаточным давлением в заливке данным способом, появляется множество дефектов, таких как недоливы, спаи и уменьшение сечения

стрежней относительно пазов. Давление в этом способе определяется высотой литниковой системы. Оксидная пленка, которая образуется на алюминии при данном способе заливки, является главной причиной разрывов стержней и спаев. Исходя из этого, статический способ дает низкое качество отливок.

8.1.2 Заливка роторов вибрационным и центробежным способами.

Данные способы позволяют добиться намного лучшего качества заливки, нежели статический способ. Главная особенность вибрационного способа, это то, что при заливке и кристаллизации металла, кокилю поступают колебательные движения различными механическими способами. С помощью вибрации устраняется большинство дефектов заливки, из расплава выделяются газы и неметаллические соединения, так же вибрация позволяет добиться более однородной и мелкой структуры металла. Как правило, этот способ используют при заливке роторов с малым сечением пазов.

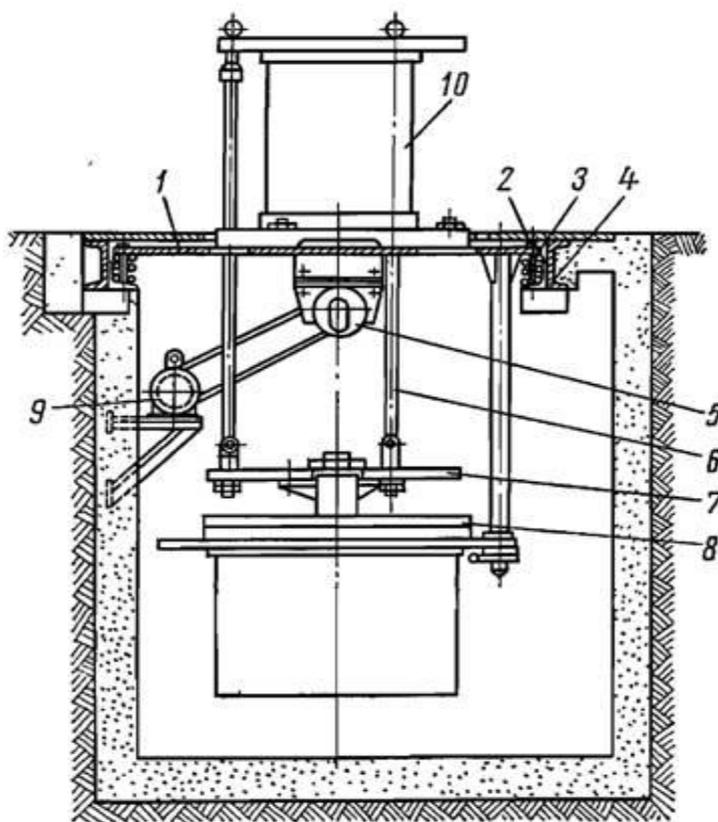


Рисунок 8.2 - Установка для вибрационной заливки роторов: 1-стол; 2-технологическая оправка; 3-литниковая чаша; 4-верхняя половина формы; 5-

разъемная рубашка; 6-сердечник; 7-нижняя часть формы; 8-тяги; 9- подвижная плита; 10-поршень

Особенность центробежного способа заливки заключается в том, что кокиль вращается вокруг вертикальной оси с частотой примерно 160 оборотов в минуту, а жидкий алюминий заливается через центральное отверстие.

8.1.3 Заливка роторов под низким давлением

В способах изготовления роторов, описанных ранее, заливка всегда происходила сверху в низ, из-за чего в форме образуются газовые раковины, что является серьезным дефектом ротора. Во время заливки ротора под низким давлением, расплавленный металл подается в форму снизу, непосредственно из печи, удаляя воздух из формы, и не образуя окислов.

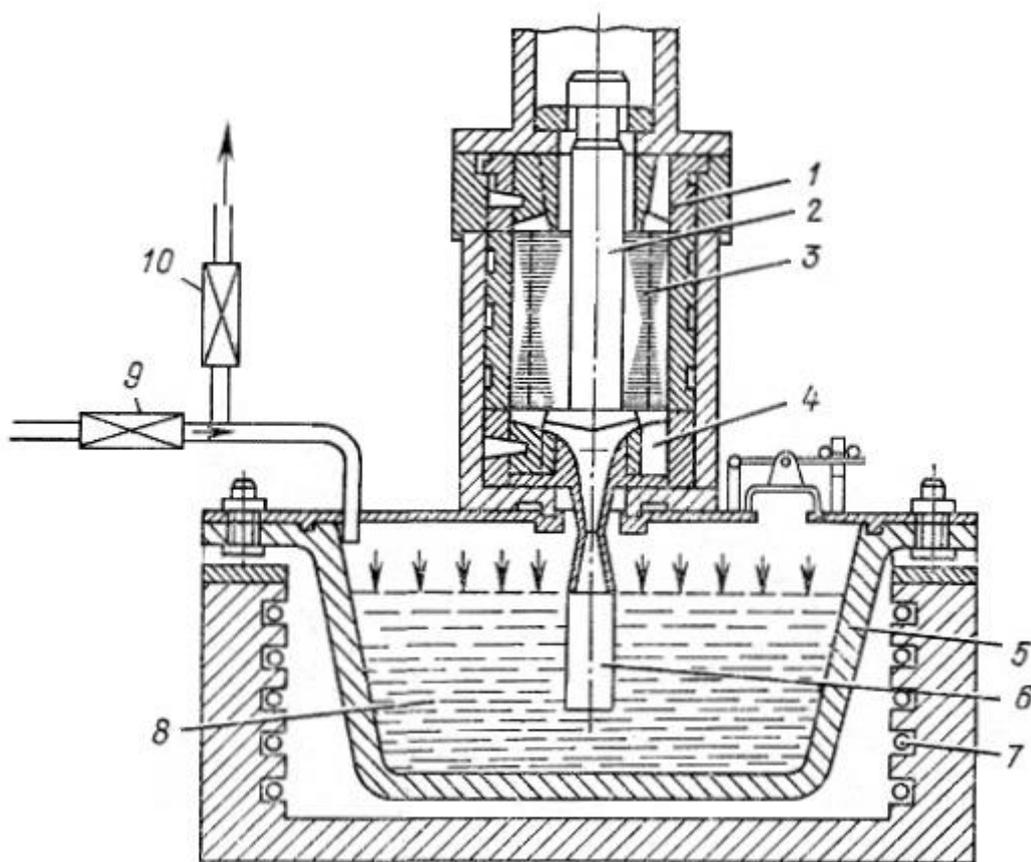


Рисунок 8.3 – Схема заливки роторов под низким давлением: 2-подвижная часть формы; 3-пакет ротора; 4-неподвижная часть формы; 5-тигель; 6-металлопровод; 7-печь; 8-воздухопровод

8.1.4 Заливка роторов под высоким давлением

Такая заливка роторов выполняется только на специальном литейном оборудовании. Особенностью метода является то, что перед заливкой нет необходимости подогревать сердечники, т.к. под высоким давлением металл сразу заполняет пресс-форму, не успевая остыть. Благодаря этому происходит значительное сокращение технологического цикла. Данный метод заливки может быть как автоматизирован, так и механизирован.

8.2 Безопасность и экологичность электродвигателя с преобразователем частоты

В период внедрения новых технологических процессов и оборудования, наиболее остро встает проблема охраны труда.

Основной задачей охраны труда является снижение количества профессиональных заболеваний и травматизма на производстве с обеспечением безопасных и в то же время комфортных условий при максимальной производительности труда.

При проектировании, строительстве, изготовлении, вводе в действие и эксплуатации новых объектов должны быть предусмотрены и разработаны меры по безопасности труда.

8.2.1 Описание рабочего места и оборудования

Асинхронный электродвигатель с преобразователем частоты расположен на валу питательного насоса K150-125-315 и закреплен горизонтально по отношению к приводному валу насоса и фронтально по отношению к оператору. Справа расположены наружные окна производственного участка.

Таблица 8.1 – спецификация оборудования для производственного участка

№ позиции на эскизе участка,	Наименование оборудования	Работы, операции, выполняемые на этом оборудовании
------------------------------	---------------------------	--

рабочего места		
1	Питательный насос К150-125-315	Подача воды и регулирование подачи в процессе работы
2	Асинхронный двигатель	Обеспечение вращения приводного вала
3	Преобразователь частоты	Регулирование угловой скорости вала питательного насоса

8.2.2 Идентификация опасных и вредных производственных факторов

Мероприятия по охране труда проводятся для защиты участников трудового процесса от воздействия опасных и вредных производственных факторов, возникающих в процессе его осуществления. В работе рассматривается асинхронный электропривод с частотным регулированием для питательного насоса.

В данном изделии присутствуют следующие опасные производственные факторы:

- повышенные значения напряжения в электрической цепи, питающий электрооборудование.

К вредным факторам следует отнести:

- повышенный уровень шума при работе асинхронного двигателя и насоса (уровень звука до 85 Дб);

- недостаточная освещенность рабочей зоны.

В таблице 8.2 представлены опасные и вредные производственные факторы в зависимости от видов выполняемых работ и операций.

Таблица 8.2 - опасные и вредные производственные факторы

№ п/п	Опасные и вредные производственные факторы	Виды работ, оборудования, технологических операций.
----------	--	---

1	Повышенные значения напряжения в электрической цепи	Подключение электрооборудования и электроизмерительных приборов.
2	Повышенный уровень шума	Работа двигателя и насоса
3	Недостаточная освещенность рабочей зоны	Снятие показаний с электроизмерительных приборов.

8.2.3 Воздействие производственных факторов на организм работников

Шум, являясь беспорядочным сочетанием различных по частоте звуков, оказывает неблагоприятное воздействие на организм человека, создавая акустический дискомфорт. Шум создает нагрузку на нервную, сердечно – сосудистую и дыхательную системы, поэтому необходимо принимать меры по снижению шума в рабочих помещениях. При длительном воздействии шум может вызвать такие профессиональные заболевания как тугоухость и шумовая болезнь.

Недостаточное освещение рабочего места или его отсутствие, равно как и слишком яркое освещение вызывают постоянное зрительное напряжение и как следствие ухудшение зрения.

8.2.4 Организационные и технические мероприятия по созданию безопасных условий труда при монтаже двигателя и преобразователя частоты

Монтаж преобразователя представляет собой потенциальную опасность, поскольку при проведении монтажных и профилактических работ человек может коснуться находящихся под напряжением токоведущих частей. Фактором, определяющим тяжесть поражения, является величина электрического тока, протекающего через тело человека.

Питание электропривода осуществляется от трехфазной сети с нулевым проводом частотой 50 Гц, напряжением 380 В.

Из анализа случаев электротравматизма следует, что проведения только организационных мер недостаточно, и требуются технические меры, такие как защитное заземление и защитное отключение неисправного станда.

Поскольку используется трехфазная сеть переменного тока напряжением до 1000 В, защита персонала осуществляется защитным заземлением – преднамеренным соединением металлических частей станда, доступных для прикосновения человека с внешней горизонтальным заземляющим электродом, что исключает поражение человека при возникновении замыкания на корпус.

В качестве горизонтального заземляющего электрода используют полосовую сталь сечением не менее 4×12 мм, или сталь круглого сечения диаметром не менее 6 мм.

Согласно «Правилам устройства электроустановок» (ПУЭ) сопротивление заземляющего устройства в электроустановках напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью должно быть не более 4 Ом.

Большое значение для предотвращения электротравматизма имеет правильная организация обслуживания действующих электроустановок, проведение монтажных, ремонтных и профилактических работ. Под правильной организацией понимают четкое выполнение организационных и технических мероприятий, установленных действующими «Межотраслевыми правилами по охране труда (Правила безопасности при эксплуатации электроустановок) (ПОТ Р М-016-2001 РД 153-34.0-03.150-00), «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей» (ПТЭЭП). При выполнении работ необходимо соблюдение следующих организационных и технических мер: ограждение, расположенных вблизи рабочего места и других токоведущих частей, к которым возможно прикосновение; работа в диэлектрических перчатках, стоя на диэлектрическом коврике; применение инструмента с изолирующими рукоятками; выполнение работ не менее чем двумя работниками.

В соответствии с ПТЭЭП и ПОТ Р М-016-2001 РД 153-34.0-03.150-00 обслуживающий персонал электроустановок должен соответствовать следу-

ющим требованиям: лица, не достигшие 18-летнего возраста, не могут быть допущены к работам в электроустановках; лица не должны иметь увечий и заболеваний, мешающих производственной работе; лица, после соответствующей теоретической и практической подготовки, должны пройти проверку знаний и должны иметь, для работ в электроустановках, удостоверение с группой допуска по электробезопасности не ниже третьей.

8.2.5 Обеспечение пожарной безопасности на рабочем участке

На рабочем участке на видном месте должна быть вывешена табличка с указанием номера телефона пожарной части и диспетчеров пожарной охраны. Должны быть установлены следующие нормы: установлен порядок уборки помещения; определен порядок обесточивания оборудования при пожаре и по окончании рабочего дня; установлен порядок проведения противопожарных работ, действия персонала при обнаружении пожара; установлены порядок и сроки прохождения инструктажа по пожарной безопасности и занятий по пожарно-техническому минимуму, назначены ответственные за их своевременное проведение; должен быть разработан и вывешен на видном месте план-схема эвакуации людей в случае возникновения пожара, а также предусмотрена установка системы оповещения людей о пожаре.

Производственные работники обязаны: соблюдать требования пожарной безопасности стандартов, норм и правил, утвержденных в установленном порядке в установленном порядке, а также соблюдать и поддерживать противопожарный режим; соблюдать меры предосторожности при пользовании легковоспламеняющимися жидкостями (ЛВЖ); в случае обнаружения пожара сообщить в пожарную охрану и принять меры по ликвидации пожара и спасению людей.

Порядок действия при пожаре: немедленно сообщить по телефону в пожарную охрану; принять по возможности меры по эвакуации людей, тушению пожара и сохранению материальных ценностей.

Должностное лицо, прибывшее к месту пожара, обязано: продублировать сообщение о возникновении пожара в пожарную охрану и поставить в

известность вышестоящее руководство, диспетчера, ответственного дежурного по объекту; в случае угрозы жизни людей немедленно организовать их спасение, используя для этого все имеющиеся силы и средства; проверить включение в работу автоматических средств пожаротушения; отключить электроэнергию; прекратить все работы в здании, кроме работ, связанных с мероприятиями по ликвидации пожара; удалить за пределы опасной зоны всех работников, не принимающих участие в тушении пожара; осуществить общее руководство по тушению пожара; организовать эвакуацию и защиту материальных ценностей; организовать встречу подразделений пожарной охраны и оказать помощь в выборе кратчайшего пути для подъезда к очагу пожара. Рабочий участок должен быть оборудован следующим: углекислотные огнетушители ручные ОУ-2, ОУ-5, ОУ-8 – 1 шт; пенные, химические, воздушно-пенные и жидкостные огнетушители – 1 шт;

9 Экономическое обоснование модернизации электропривода питательного насоса

Целью данного раздела является экономическое обоснование внедрения частотного преобразователя в систему электропривода вращения вала питательного насоса К150-125-315 при регулировании подачи воды котла промышленного оборудования, с целью сокращения затрат при регулировании по сравнению с базовым вариантом. В качестве базового варианта будем считать вариант, в котором регулирование подачи воды осуществляется с помощью задвижки. При этом скорость вращения вала питательного насоса остается постоянной, а изменяется сопротивление внешней сети. Характеристика работы питательного насоса К150-125-315 с асинхронным электроприводом: 1) нагрузка 100% в течении 20% рабочего времени; 2) нагрузка 70% в течении 50% рабочего времени; 3) нагрузка 50% в течении 30% рабочего времени. Время наработки насоса за год составляет 8000 часов.

Задачи данного раздела: 1) определить изменяющиеся показатели; 2) выполнить расчёт экономического эффекта проекта.

Имея базовый и проектный вариант, проведём анализ изменяющихся показателей. Результаты анализа приведены в табл. 9.1.

Таблица 9.1 - Анализ изменяющихся показателей

Конструктивные изменения		Изменяющиеся показатели
Базовый вариант	Проектный вариант	
1	2	3
Электропривод питательного насоса содержит асинхронный двигатель. Регулирование подачи воды осуществляется за задвижкой.	Электропривод питательного насоса содержит ПЧ. Регулирование подачи воды осуществляется изменением скорости вала через ПЧ.	Уменьшается расход электроэнергии, потребляемый электроприводом

1	2	3
2. Время простоев при аварии 4 часа	Время простоев при аварии 2 час	Снижение времени настройки и диагностики при ремонте
3. Количество выходов из строя (аварий) 10 раз в год	Количество выходов из строя (аварий) 5 раз в год	Увеличение надёжности электропривода

9.2 Расчёт экономической эффективности модернизации электропривода питательного насоса К150-125-315

Капитальные затраты включают в себя стоимость преобразователя частоты MICROMASTER (ф. SIEMENS) 6SE32 – 22-4DS45 - 132070 руб., монтаж и транспортные расходы – 3550 руб..

Стоимость затрат энергии при работе с дроссельным регулированием, кВт*ч

$$Z_{dr} = c \sum P_i \cdot T = 3.5 * (0.2 * 36.3 + 0.3 * 27.9 + 0.5 * 36.1) * 8000 = 943040 \text{ рублей.}$$

где $c = 3.5$ руб. – стоимость 1 кВт*ч электроэнергии; P_i - потребная мощность электропривода режима работы насоса; $T = 8000$ - число часов работы электропривода в год.

Стоимость затрат энергии при работе с преобразователем частоты, кВт*ч

$$Z_{chr} = c \sum P_i \cdot T = 3.5 * (0.2 * 36.3 + 0.3 * 4.21 + 0.5 * 11.6) * 8000 = 401044 \text{ рублей.}$$

Экономия потерь электроэнергии при модернизации электропривода питательного насоса составляет: $Z_{dr} - Z_{chr} = 943949 - 401044 = 541\,996$ рублей.

Заключение

В квалификационной работе рассмотрены вопросы модернизации асинхронного частотного электропривода применительно к сетевому питательному насосу К150-125-315 для водогрейного котла. Асинхронный частотный электропривод и обеспечивающего регулирования его водоснабжения по программе: 1) нагрузка 100% в течении 20% рабочего времени; 2) нагрузка 70% в течении 50% рабочего времени; 3) нагрузка 50% в течении 30% рабочего времени.

Дан анализ направления развития электроприводов с частотным регулированием. При этом выявлено, что в настоящее время резко возрос спрос на асинхронные двигатели для систем частотного регулирования, обеспечивающие энергосбережение и электромагнитную совместимость при работе в различных средах и установках.

Произведен расчет мощности и выбор типа электропривода для совместной работы с питательным насосом К150-125-315, что позволяет получить эффективное регулирование водоснабжения. Для выявления параметров, определяющих уровень энергосбережения и экономию электроэнергии, произведен расчет мощности асинхронного двигателя и преобразователя частоты.

При расчете механических характеристик двигателя при скалярном законе управления найдены скорости и моменты устойчивой работы системы асинхронный двигатель – питательный насос для частот 50 Гц., 42,5 Гц. и 35 Гц. заданной производительности и напора.

Выполнено математическое моделирование системы электропривода. Разработана модель асинхронного двигателя и виртуальная модель электропривода с частотным управлением, которая позволяет анализировать и исследовать смоделированные режимы частотного пуска асинхронного привода на персональном компьютере в программе MATLAB. Доказано, что применение частотного управления при пуске и регулировании скорости вращения

вала питательного насоса, привело, в сравнительном анализе с базовым вариантом, к существенному снижению потерь электроэнергии при работе асинхронного двигателя.

Рассмотрены вопросы ротор асинхронного двигателя и рассмотрены технологические операции его изготовления. Для проведения безопасных наладочных работ по настройке и обслуживании асинхронного двигателя с частотным регулированием, предусмотрены организационные меры по технике безопасности (описание рабочего места и оборудования, идентификация опасных и вредных производственных факторов, воздействие производственных факторов на организм работников, обеспечение пожарной безопасности на рабочем участке).

Дано экономическое обоснование проведенной модернизации. Показано, что разработанный асинхронный электропривод с частотным преобразователем позволяет существенно сократить годовой расход электроэнергии и получить годовой экономический эффект в сфере эксплуатации.

Список использованных источников

1. Шарапов, В.И. Пиковые источники теплоты систем централизованного теплоснабжения / В.И. Шарапов, М.Е. Орлов.-Ульяновск: УЛГТУ, 2007.- 204 с.
2. Шарапов, В.И. Повышение эффективности котельных систем теплоснабжения / А.А. Кудинов, Ю.В. Левушкина, М.Е. Орлов// Изв. вузов. Строительство, 2008.- №4.- с. 82-89.
3. Копылов, И.П. Электрические машины / И.П. Копылов. Учеб. для ВУЗов 4-е изд., испр.-М.:Высш. Школа., 2009.-607 с.
4. Денисов, В.А. Электроприводы переменного тока с частотным управлением : Учебное пособие / В.А. Денисов. - Старый Оскол : ТНТ, 2012 – 119 с.
5. Денисов, В.А. Управление электроприводами : Учебное пособие/ В.А. Денисов. - Тольятти : Тол ПИ, 2006 –262с.
6. Денисов, В.А. Электроприводы переменного тока с векторным управлением : Учебное пособие / В.А. Денисов. - Тольятти, 2006.- 96с.
7. Кравчик, А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А.Э. Кравчик. – М.: Энергоиздат, 2007.- 504 с.
8. Москаленко, В.В. Автоматизированный электропривод : Учебник для вузов / В.В. Москаленко. - М. : Энергоатомиздат, 2006. - 416 с.
9. Онищенко, Г.Б. Электрический привод : Учебник для вузов / Г.Б.Онищенко. – М. : РАСХН, 2006. - 320 с.
10. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин : Учебник для вузов/ И.П. Копылов. - М. : Высшая школа, 2008.- 327 с.
11. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г.Г. Соколовский. - М. : Издательский центр «Академия», 2006. - 272 с.

12. Герман-Галкин, С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. - СПб.: КОРОНА - Век, 2008.- 368с.
13. Терехов, В.М. Системы управления электроприводами: Учебник для вузов / В.М. Терехов. – М. : Издательский центр «Академия», 2007. – 304 с.
14. Герасимова, В.Г. Электротехнический справочник. В 4 т. Т. 4: / В.Г. Герасимова.- 8-е изд., испр. и доп. - М. : Изд-во МЭИ, 2006. - 696 с.
15. Алиев, И. И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию: Учебное пособие для вузов /И.И. Алиев.– 2-е изд., доп. – М.: Высш. шк., 2007. – 255с., ил.
16. Полтев, М.К. Охрана труда в машиностроении: учебник./ М.К. Полтев. – М.: Высш. школа, 2008. – 294 с., ил.
- 17.. Warne D. F. Electrical Engineer's Reference Book. - 2007. - 202 pp.
18. Jan Komsta Speed Variable Pump Drives Technology // 9/6/2012 | DCUS/SET1 Bosch Rexroth AG. – 2012. – 32 pp.
19. Dr.-Ing. Gerd Scheffel Variable Frequency Drives as Pump Prime Movers // Energy Efficient Hydraulics. – Speech @ Fluid Power Society Conference in Chicago on 28.10.2012. – 2013. – 3 pp.
20. Malik Usman Akhtar Variable speed drive as an alternative solution for a micro-hydro power plant // Degree project in Electrical Engineering Master of Science. – Stockholm, Sweden. – 2012.
21. Jiaqing MA, Yunpeng ZHU, Jing JIANG A novel method to calculate the thrust of linear induction motor based on instantaneous current value // Journal of Modern Transportation. – 2012. -Vol. 20, No. 2. -pp 76-81.
22. Lakhya Jyoti Phukon¹, Neelanjana Baruah A Generalized Matlab Simulink Model of a Three Phase Induction Motor // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. -2015. - Vol. 4, Issue 5. pp 2926 – 2934.