РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 88 страниц, 24 рисунков, 20 таблиц, 11 источник.

ЭЛЕКТРОПРИВОД ВЕНТИЛЯТОРА, АСИНХРОННЫЙ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ, СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ, СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ.

Объектом выпускной квалификационной работы является электропривод вентилятора. Цель работы – разработка и исследование асинхронного частотно-регулируемого электропривода вентилятора.

В выпускной квалификационной работе был произведён расчет и выбор приводного двигателя; преобразователя частоты, а также определены параметры силовой цепи. Обоснован выбор способа управления, рассчитаны механические и электромеханические характеристики. Методом имитационного моделирования на ЭВМ исследованы переходные процессы в основных режимах работы.

В разделе экономики произведен расчет сметы на пуско-наладочные работы электропривода вентилятора ВЦ 4 75

В разделе безопасность и жизнедеятельность труда рассмотрены вопросы охраны труда и техники безопасности. Проанализированы опасные и вредные факторы производства.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе MicrosoftWord 2010, в работе использованы программы MathCAD, MicrosoftVisio 2010, MicrosoftPowerPoint, Simulink (MatLab).

ВЕДЕНИЕ

Вентилятор промышленный – это вид воздухоочистительного оборудования, которое используется для охлаждения и очистки воздуха на предприятиях. Используется **вентилятор промышленный** как для охлаждения воздуха, являющегося сырьем или отходом производства, так и для охлаждения воздуха в помещениях предприятия – в цехах, складах и т.д. **Вентилятор промышленный** является вытяжным – его лопасти вращаются таким образом, чтобы отработанный, нагретый или загрязненный примесями воздух вытягивался из помещения.

В зависимости от типа конструкции, промышленные вентиляторы делятся на несколько групп. **Вентилятор промышленный** является неотъемлемой частью производственного помещения, будь то металлургическая, химическая, легкая, пищевая промышленность или любое другое производство. Для того чтобы работа на предприятии была безопасной, воздух должен быть чистым и не горячим. Однако помимо промышленного загрязнения, воздух вблизи тепловых установок очень быстро нагревается до высоких температур – **вентилятор промышленный** как раз и используется для того, чтобы воздух во всем помещении не был слишком горячим.

Вентилятор промышленный – это электромеханическая установка. Электрический импульс, поступая на контакты, заставляет вращаться лопасти, что влечет за собой изменение воздушного потока: его плотности, давления в нем, в результате чего воздух начинает перемещаться в нужном направлении – так происходит работа **вентилятора промышленного**. Воздух, выведенный из помещения, **вентилятор промышленный** направляет непосредственно на улицу или же выводит за пределы помещения по вентиляционной системе.

Вентилятор промышленный должен регулярно проходить технический осмотр, а при необходимости – и плановый ремонт. Неисправный

вентилятор промышленный неэффективно очищает воздух, что приводит к возникновению сложных и даже опасных условий на производстве. Выйти из строя **вентилятор промышленный** может даже в штатном режиме работы: на лопастях и других частях конструкции вентилятора оседают частицы, их загрязняющие: пыль, мельчайшие частицы отходов производства, жир и т.д. Они замедляют вращение лопастей, в результате чего **вентилятор промышленный** не справляется с нагрузкой, ломаются лопасти, выходят из строя механизмы.

1. Описание технологического процесса кабельного производства

Кабели и провода изготавливают по определенным конструкциям с заданными электрическими и физико-механическими свойствами, нормированной строительной длины и гарантированной надежности. Общими для всех кабельных изделий является наличие металлических (медных или алюминиевых) токопроводящих жил.

Жилы проводов и кабелей в зависимости от применения могут быть однопроволочными и многопроволочными.

В зависимости от конструкции токопроводящих жил процесс изготовления кабелей и проводов начинается либо с процесса волочения катанки, либо с процесса скрутки с последующим изолированием, либо с изолирования жил.

В зависимости от назначения технологические процессы и операции кабельного производства включают у нас: волочение, отжиг проволоки, скрутку проволок в жилу и изолированных жил в кабель, изолирование жил и сердечника, наложение пластмассовой оболочки.

Технологически различаются скрутки: однонаправленная и разнонаправленная, повивная и пучковая.

Процесс изолирования производится методом экструзии, то есть выпрессовыванием пластмассы.

Процесс наложения пластмассовой оболочки производится также методом экструзии.

Экструзионное оборудование различается по габаритам червяка (его диаметром), с меньшим - для наложения изоляции, а с червяком большего диаметра – для наложения оболочки и защитного шланга.

Основные механизмы кабельных машин в основном их четыре:

1) Отдающее устройство (отдатчик), в которое устанавливается отдающая тара (барабан, катушка и т. д.) с заготовкой и с которого заготовка поступает в машину.

2) Рабочий механизм, с помощью которого осуществляется заданный технологический процесс (скрутка жилы, наложение изоляции и т.д.)

3) Тяговое устройство, обеспечивающее продольное перемещение изготавливаемого изделия через машину с постоянной линейной скоростью;

4) Приемное устройство (приемник), в который устанавливают приемную тару (барабан, катушку) и в которое поступает изделие, прошедшее через машину.

Кроме того, каждая машина имеет привод, состоящий из электродвигателя и механических передач для подбора необходимого режима работы машины. Механизмы раскладки изделия на приемном барабане (катушке) и регулирования частоты вращения приемной тары в зависимости от заполнения ее изделием.

Барабаны, катушки характеризуются 3-мя размерами: диаметром щеки, диаметром шейки и расстоянием между щеками.

В процессе производства приемный барабан (катушка) одной машины заполняется, снимается и передается на другую машину для выполнения следующей операции.

1.1. Устройство плавного пуска

Устройство плавного пуска и торможения предназначено либо для ограничения пускового момента, либо для плавного пуска и торможения асинхронных двигателей приводов передвижения. Использование устройства улучшает пусковые характеристики двигателей, обеспечивая контролируемый безударный плавный пуск. Оно позволяет исключить механические удары, являющиеся причиной преждевременного износа, уменьшить затраты на ремонт, сократить простои оборудования. Устройство плавного пуска ограничивает момент и броски тока при пуске механизмов, для которых не требуется большой пусковой момент. Устройства плавного пуска чрезвычайно компактны, легки в настройке, устанавливаются вплотную друг к другу, соответствуют нормам МЭК/EN 60947-4-2, сертификатам UL, CSA, с маркировкой CE. Технические характеристики:

1. Для двигателей мощностью до 1,5 кВт;
2. Напряжение питания двигателей 380-415 В, 50/60 Гц;
3. Номинальная сила тока 6 А;
4. Управление двумя фазами питания двигателя для ограничения пускового тока и плавного торможения;
5. В установках, для которых не обязательна гальваническая развязка, применение устройства плавного пуска позволяет обойтись без сетевого контактора.

Устройства плавного пуска и торможения оснащены:

1. Настраечным потенциометром времени пуска;
2. Настраечным потенциометром времени торможения;
3. Потенциометром для настройки начального уровня напряжения в зависимости от момента нагрузки двигателя;
4. Зелёным светодиодом сигнализации “устройство под напряжением”;

5. Жёлтым светодиодом сигнализации “двигатель запитан номинальным напряжением”;

6. Соединительным клеммником: — два дискретных входа для команд пуска / остановки; — дискретный вход для функции BOOST — дискретный выход для сигнализации окончания пуска; — релейный выход для сигнализации неисправности питания пускового устройства или остановки двигателя по окончании торможения.

1.2. Обоснование применения частотно-регулируемого электропривода для вентилятора

Во всех отраслях народного хозяйства, в быту, науке и во многих других сферах человеческой деятельности используются разнообразные технические устройства, предназначенные для реализации технологических процессов с целью выполнения социально-практического заказа, например, получения конечного полезного продукта. Для приведения в движение рабочих органов этих технических устройств и предназначена машина-двигатель, или привод, в качестве которого наиболее часто применяется электрический двигатель.

В общем случае под электроприводом понимают электромеханическую систему, приводящую в движение рабочие органы технического устройства и состоящую из передаточного, электродвигательного, преобразовательного и управляющего устройств. Электропривод, который в качестве преобразовательного устройства использует преобразователь частоты, называется частотно-регулируемый привод (ЧРП).

Принцип частотного регулирования, при котором частота и напряжение питания двигателя могут изменяться в соответствии с установленным соотношением независимо друг от друга, является наиболее эффективным способом управления скоростью асинхронных двигателей. Реализация такого способа определяется тем, что скорость вращающегося магнитного поля статора ω_0

согласно выражению (1) пропорциональна частоте источника питания f . Следовательно, изменяя частоту f , можно плавно и в широких пределах регулировать скорость вращения ротора. При этом скольжение s , определяемое по формуле (2), изменяется незначительно и, следовательно, потери, пропорциональные величине скольжения, также изменяются незначительно. Это важное преимущество частотного управления асинхронным двигателем позволяет реализовать энергосберегающие технологии как для двигателей с фазным ротором, так и с короткозамкнутым.

Из изложенного вытекает, что для частотно-регулируемого асинхронного привода требуется прежде всего источник переменного тока регулируемой частоты. Использование для этих целей синхронных генераторов с регулируемой скоростью вращения не оправдывается ни техническими, ни экономическими соображениями. Только при появлении статических полупроводниковых преобразователей возникла реальная возможность создания частотнорегулируемых промышленных электроприводов. Их основу составляют преобразователь частоты и асинхронный двигатель (ПЧ-АД).

Преимущества и плюсы внедрения частотных преобразователей на производстве

Как показывает практика, современное оборудование обладает огромным потенциалом в сфере энергосбережения. К типичным потерям мощности относятся траты механизмами энергии на собственные нужды. К таким агрегатам относят циркуляционные и питательные насосы, дымососы, мельничные и дутьевые вентиляторы.

Исходя из предлагаемых на частотный преобразователь цены и возможности экономного потребления энергии позволяет говорить о том, что срок окупаемости этого оборудования будет составлять около 10

месяцев. При том, что предлагаемые модели рассчитаны на 8 лет активной эксплуатации, выгодна от их установки очевидна.

Сейчас речь идет исключительно о прямом экономическом эффекте, получаемом путем снижения потребления электроэнергии. Однако стоит учитывать и косвенный экономический эффект, достижение которого осуществляется путем уменьшения числа протечек, возрастания ресурсов работы узлов, снижению аварийности и сокращению обслуживающего персонала. Эти данные позволяют снизить срок окупаемости до 3 месяцев (в среднем).

Внедрение на производстве регулируемого электропривода позволяет избежать крупных аварий трубопроводов, на ремонт и обслуживание которых затрачиваются значительные суммы денег. Создание щадящего режима работы для изношенного оборудования позволит снизить аварийность сетей, избежать гидроударов и гарантировать их качественную работу.

2.3. Расчет естественных характеристик электродвигателя

Расчет естественных характеристик проводится с целью оценки степени совпадения параметров основных характерных точек расчетных естественных характеристик электродвигателя с параметрами двигателя определенными по справочным техническим данным выбранного электродвигателя [3].

Расчет естественной механической характеристики

Естественная механическая характеристика $\omega(M)$ асинхронного электродвигателя рассчитывается для частоты $f_{и} = f_{1н} = 50$ Гц по выражению

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_{1\delta i}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[(X_{\delta i})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu} \right)^2 \right]}$$

Задаемся скольжением в пределах $s = 0.01, 0.02, \dots, 0.5$ и рассчитываем по программе *Mathcad* естественную механическую характеристику $\omega(M)$

где $\omega = \omega_0 \cdot (1 - s)$.

Также рассчитываем номинальное значение электромагнитного момента двигателя $M_{\text{эм.н}}$

$$M_{\text{эм.н}}(s_{\text{н}}) = M_{\text{эм.н}} = \frac{3 \cdot U_{1\phi \text{н}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_{\text{н}} \cdot \left[(X_{\text{кн}})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_{\text{н}}} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_{\text{н}} \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 1,455}{314 \cdot 0,05 \cdot \left[(3,9)^2 + \left(1,03 + \frac{1,455}{0,05} \right)^2 + \left(\frac{1,03 \cdot 1,455}{0,05 \cdot 75,6} \right)^2 \right]} = 18,97 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

критического скольжения

$$s_{\text{к}} = R_2' \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{R_1}{X_\mu} \right)^2}{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2}} = 0,072 \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{1,455}{75,6} \right)^2}{1,455^2 + 3,9^2}} = 0,247.$$

и электромагнитного критического момента

$$M_{\text{эм.н}}(s_k) = M_{\text{эм.к}} = \frac{3 \cdot U_{1\Phi\text{н}}^2}{\omega_0 \cdot 2 \cdot \left[R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{\text{кн}}^2) \cdot \left(1 + \frac{R_1}{X_\mu}\right)^2} \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{314 \cdot 2 \cdot \left[1,455 + \sqrt{(1,455^2 + 3,9^2) \cdot \left(1 + \frac{1,455}{75,6}\right)^2} \right]} = 41,1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Расчет естественной электромеханической характеристики

Естественная электромеханическая характеристика $I_1(s)$ электродвигателя рассчитывается для значения частоты $f_{\text{н}} = f_{1\text{н}} = 50$ Гц по выражению

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \varphi_2(s)}, \quad (2.1)$$

где

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\delta i}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{\text{эи}}')^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu}\right)^2}}; \quad (2.2)$$

$$\sin \varphi_2(s) = \frac{X_{\text{кн}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{\text{кн}})^2}}. \quad (2.3)$$

По вышеприведенным выражениям для скольжений $s = s_{\text{н}}$ и $s \rightarrow 0$ рассчитываются значения тока статора $I_1(s_{\text{н}})$ и тока холостого хода I_0

$$I_0 = \frac{U_{1\phi_H}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\delta} + X_\mu)^2}} = \frac{220}{\sqrt{1,455^2 + (0,19 + 75,6)^2}} = 2,85 \text{ A},$$

$$I_1(s_H) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s_H) \cdot \sin \varphi_2(s)} =$$

$$= \sqrt{2,85^2 + 9,76^2 + 2 \cdot 2,85 \cdot 9,76 \cdot 0,174} = 10,65 \text{ A},$$

где

$$I_2'(s_H) = \frac{U_{1\phi_H}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s_H}\right)^2 + (X_{кн})^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_H \cdot X_\mu}\right)^2}} =$$

$$= \frac{220}{\pm \sqrt{\left(1,455 + \frac{1,03}{0,05}\right)^2 + (3,9)^2 + \left(\frac{1,455 \cdot 1,03}{0,05 \cdot 75,6}\right)^2}} = 9,76 \text{ A};$$

$$\sin \varphi_2(s) = \frac{X_{кн}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s_H}\right)^2 + (X_{кн})^2}} = \frac{3,9}{\sqrt{\left(1,455 + \frac{1,03}{0,05}\right)^2 + (3,9)^2}} = 0,174;$$

По результатам расчета строим естественные электромеханические характеристики токов статора $I_1 = f(\omega)$ и ротора $I_2' = f(\omega)$,

Сравнив значения расчетных параметров характерных точек естественных характеристик двигателя с его справочными данными приведенными в таблице 2.5. и рассчитанными в главе 2, можно сделать вывод об адекватности расчетных параметров схемы замещения двигателя.

Механическая характеристика вентилятора в режиме работы с максимальным давлением

Поскольку механическая характеристика двигателя рассчитана для электромагнитного момента, то полная нагрузка на валу электродвигателя должна учитывать собственный момент трения двигателя. Момент от сил трения на валу электродвигателя можно принять постоянным и равным

$$\Delta M_{с д\text{в}} = M_{э\text{м н}} - M_{д\text{в н}} = 18,97 - 18,4 = 0,57 \text{ Нм}. \quad (2.4)$$

Момент сопротивления турбомеханизма складывается из момента аэродинамического сопротивления, пропорционального квадрату частоты вращения, и момента, обусловленного механическим сопротивлением $\Delta M_{с д\text{в}}$.

Тогда характеристика момента сопротивления вентилятора от угловой скорости выражается зависимостью [8]

$$\begin{aligned} M_c(\omega) &= \Delta M_{с д\text{в}} + (M_{с.\text{макс}} - \Delta M_{с д\text{в}}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{д\text{в.н}}} \right)^2 = \\ &= 0,57 + (18,97 - 0,57) \cdot \left(\frac{\omega}{298,4} \right)^2, \end{aligned} \quad (2.5)$$

где $M_{с.\text{макс}} = M_{э\text{м н}} = 18,97 \text{ Нм}$ - момент нагрузки при скорости вращения $\omega_{д\text{в.н}} = 298,4 \text{ рад/с}$, равный номинальному электромагнитному моменту двигателя.

Механические характеристик полного момента сопротивления на валу двигателя, соответствующих механическим характеристикам вентилятора

Принимаем момент инерции вентилятора

$$J_{в\text{ен}} = 3J_{д\text{в}} = 3 \cdot 0,0075 = 0,0225 \text{ кг м}^2, \text{ тогда момент инерции электропривода}$$

$$J_{э} = J_{д\text{в}} + J_{в\text{ен}} = 0,0225 + 0,0075 = 0,03 \text{ кг м}^2.$$

Электродвигатель АИР100L2 обеспечивает требуемое значение максимальной скорости вентилятора ВЦ 4 - 75 $\omega_{\text{дв.н}} = 298,4$ рад/с, длительную работу при максимальном моменте нагрузки и более чем двукратную перегрузку по моменту.

3 Обзор систем управления и способов регулирования электропривода

3.1 Системы управления электроприводом

В приводах длительного режима работы с постоянной скоростью, диапазоном регулирования скорости не больше 1:10 и без особых требований к динамике целесообразно применение простейших структур и законов частотного управления [9]. Поэтому целесообразно скалярный принцип частотного управления применить при проектировании СУЭП по системе ПЧ-АД вентиляторной установки [7].

3.2 Выбор закона частотного регулирования

Закон частотного регулирования U_1/f_1 при скалярном управлении выбирается в зависимости от характера нагрузки производственного механизма. Для механизмов с постоянной нагрузкой выбирается закон управления $U_1/f_1 = \text{const}$, для механизмов с «вентиляторной» нагрузкой целесообразно выбрать закон $U_1/f_1^2 = \text{const}$ [9].

Последний является более сложным в реализации, но за счет дополнительного снижения напряжения позволяет уменьшить потребляемую из сети энергию. Для повышения пускового момента на малых скоростях до требуемых значений должна быть предусмотрена возможность настройки вольт-частотной характеристики. Определяя параметры вольт-частотной характеристики, нижним частотам ставят в соответствие значения напряжений выше, чем при выбранном законе регулирования.

3.2.1 Выбор преобразователя частоты

Для регулируемого асинхронного электропривода вентилятора целесообразно использовать преобразователи серии Micromaster 420 фирмы Siemens, который разработан специально для применения в области водоснабжения, вентиляции, компрессоров [11].

В соответствии с условием для номинального тока инвертора $I_{ин}$ преобразователя частоты

$$I_{ин} \geq I_{лн} = 10,5 \text{ А}$$

и рекомендуемой мощности двигателя 5,5 кВт, выбираем преобразователь частоты модели Micromaster 420, параметры которого приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Технические параметры преобразователя частоты

Модель	Число фаз	Напряжение питания, В	Рекомендуемая мощность двигателя, кВт	Номинальный входной ток, А	Максимальный ток, А	Степень защиты
<u>Micromaster</u> 420	3	380-500	5,5	15,6	23,4	IP56

Общие технические данные преобразователя частоты серии Micromaster 420 представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Характеристики преобразователя частоты Micromaster 420

Напряжение питающей сети	3 фазы, 380-500 В ($\pm 10\%$)
Частота сети, Гц	50
Коэффициент мощности (не менее)	0.98
Максимальная выходная частота, Гц	400
Перегрузка по току (в % от номинального тока в течение 1 мин.)	150%

Продолжение таблицы 3.2.

Способ управления	Вольт-частотный Линейный (U/f) Квадратичный (U/f^2) Прямое управление потоком FCC Режим оптимизации энергопотребления
Диапазон регулирования в разомкнутой системе	1:10
Вид регулятора для управления процессом с замкнутой обратной связью	ПИД
Виды защит	Низкое напряжение, Перенапряжение, Перегрузка по току, Перегрузка по мощности, Короткое замыкание, Перегрев двигателя,

	Перегрев преобразователя
Дискретные входы (параметрируемые)	6
Фиксированные частоты вращения	8
Релейные выходы	2, параметрируемые 230 В АС / 1.0 А
Аналоговые входы	2 (0 В до 10 В, 2 В до 10 В, -10 В до +10 В, 0/4 до 20 мА)
Аналоговые выходы (параметрируемые)	2 (0/4 до 20 мА)
Последовательный интерфейс	RS485
Уровень защиты	IP30, IP56
Параметры окружающей среды	
температура окружающей среды	От 0°C до +40°C
температура хранения	От -30°C до +70°C
высота над уровнем моря	1000 м

4. Расчет статических характеристик системы преобразователь – двигатель при частотном регулировании

С целью обеспечения заданного диапазона регулирования $D=10:1$ регулирование скорости вниз от основной $\omega_0 = 314$ рад/с до скорости $\omega_0 = 31,4$ рад/с осуществляется при реализации закона управления $U_1/f_1^2 = \text{const}$.

Вольт-частотная характеристика преобразователя при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$, рассчитанная по выражению [6]

$$U_1(f_1) = U_{1\text{фн}} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^2, \quad (4.1)$$

Максимальную частоту инвертора, соответствующую номинальному режиму работы вентилятора определяем из условия обеспечения номинальной рабочей скорости двигателя $\omega_{\text{дв.н}} = 298,4$ рад/с. Принимаем максимальное значение частоты инвертора $f_{\text{и макс}} = f_{1\text{н}} = 50$ Гц. Для обеспечения пусковой характеристики двигателя исходя из требуемого диапазона регулирования скорости 1:10, принимаем минимальную частоту инвертора $f_{\text{и мин}} = 5$ Гц.

4.1 Механические характеристики системы преобразователь-двигатель при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$

Механические характеристики $\omega(M)$ разомкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$ для ряда выбранных значений выходной частоты инвертора: $f_{1\text{н}1} = 50$ Гц; $f_{1\text{н}2} = 30$ Гц ; $f_{1\text{н}3} = 15$ Гц; $f_{1\text{н}4} = 5$ Гц рассчитываются с помощью программы *Mathcad* по выражениям [9]:

$$M(s, f_1) = \frac{3 \cdot U_1^2(f_1) \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot s \cdot \left[\left(X_{кн} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}} \right)^2 \right]} = \frac{3 \cdot U_1^2(f_1) \cdot 1,03}{314 \cdot \frac{f_1}{50} \cdot s \cdot \left[\left(3,9 \cdot \frac{f_1}{50} \right)^2 + \left(1,455 + \frac{1,03}{s} \right)^2 + \left(\frac{1,455 \cdot 1,03}{s \cdot 75,6 \cdot \frac{f_1}{50}} \right)^2 \right]}, \quad (4.2)$$

где

$$U_1(f_1) = U_{1\Phi H} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 = 220 \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^2;$$

$$\omega(s, f_1) = 314 \cdot \frac{f_1}{50} \cdot (1 - s).$$

По результатам расчета на рис. 4.2 построено семейство механических характеристик $\omega(M)$ системы преобразователь – двигатель при изменении частоты.

Анализ приведенных на рис. 4.2 механических характеристик электропривода и нагрузки показывает, что при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$ не удастся обеспечить пуск электропривода при выборе начальной частоты инвертора $f_{и.мин} = 5$ Гц.

С целью обеспечения двукратного пускового момента экспериментально выполнен подбор параметров начального участка вольт-частотной характеристики преобразователя. Окончательно выбраны для начального участка характеристики следующие параметры (рис. 4.1): $U_{1мин} = 9$ В, $f_{и.мин} = 5$ Гц.

В результате вольт-частотная характеристика представлена зависимостью

$$U_1(f_1) = U_{1\text{мин}} + (U_{1\text{фн}} - U_{1\text{мин}}) \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}}\right)^2 = 9 + (220 - 9) \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^2 \quad (4.3)$$

4.2. Электромеханические характеристики системы преобразователь-двигатель при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$

Электромеханические характеристики $\omega(I_1)$ разомкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель после настройки вольт-частотной характеристики преобразователя в соответствии с (4.3) рассчитываются для выбранных ранее значений частоты по выражениям [9]:

$$I_1(s, f_1) = \sqrt{I_0^2(f_1) + I_2^2(s, f_1) + 2 \cdot I_0(f_1) \cdot I_2'(s, f_1) \cdot \sin \varphi_2(s, f_1)}; \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} I_0(f_1) &= \frac{U_1(f_1)}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_\mu)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}}\right)^2}} = \\ &= \frac{U_1(f_1)}{\sqrt{1,455^2 + (0,19 + 75,6)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^2}}; \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} I_2'(s, f_1) &= \frac{U_1(f_1)}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(X_{\text{кн}} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}}}\right)^2}} = \\ &= \frac{U_1(f_1)}{\pm \sqrt{\left(1,455 + \frac{1,03}{s}\right)^2 + \left(3,9 \cdot \frac{f_1}{50}\right)^2 + \left(\frac{1,455 \cdot 1,03}{s \cdot 75,6 \cdot \frac{f_1}{50}}\right)^2}}; \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\sin \varphi_2(s, f_1) = \frac{X_{\text{кн}} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(X_{\text{кн}} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}}\right)^2}} =$$

$$= \frac{3,9 \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}}}{\sqrt{\left(1,455 + \frac{1,03}{s}\right)^2 + \left(3,9 \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}}\right)^2}}, \quad (4.7)$$

где

$$U_1(f_1) = U_{1\text{мин}} + (U_{1\text{фн}} - U_{1\text{мин}}) \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}}\right)^2 = 9 + (220 - 9) \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^2,$$

$$\omega(s, f_1) = 314 \cdot \frac{f_1}{50} \cdot (1 - s).$$

Анализ приведенных характеристик электропривода и нагрузки показывает, что при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$ и настройке вольт-частотной характеристики в соответствии с (4.3) асинхронный привод обеспечивает пуск вентилятора с начальной частоты инвертора $f_{\text{и. мин}} = 5$ Гц, заданный диапазон регулирования скорости и не менее чем двукратную максимальную перегрузку во всём диапазоне регулирования скорости.

5. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод со скалярным управлением

В силовой канал электропривода входят:

- преобразователь частоты, выполняющий функцию электрического преобразователя;
- электродвигатель, который выполняет функцию электромеханического преобразователя;

- механическая система, которая выполняет функцию механического преобразователя.

При решении задач анализа и синтеза регулируемых асинхронных электроприводов обычно применяются модели электродвигателя, составленные на базе обобщенной электрической машины и выполненные в неподвижной или вращающейся двухфазной системе координат. На рисунке 5.1 приведена структурная схема силового канала непрерывной линеаризованной системы преобразователь - асинхронный электродвигатель в неподвижной системе координат. Входными координатами структурной схемы являются составляющие напряжения управления преобразователя $U_{уп.\alpha}$ и $U_{уп.\beta}$, а выходной величиной – угловая скорость двигателя ω . Структурная схема (рисунок 5.1) характеризуется следующими промежуточными координатами:

$U_{1\alpha}, U_{1\beta}, I_{1\alpha}, I_{1\beta}, \Psi_{2\alpha}, \Psi_{2\beta}$ – составляющие напряжения, тока статора и потокосцепления ротора в ортогональной системе координат α и β ;

$M_{дв.эм}$ – электромагнитный момент двигателя, Н·м.

Математическое описание силового канала системы преобразователь частоты - асинхронный электродвигатель (ПЧ-АД), в неподвижной системе координат α, β , ориентированной по вектору потокосцепления ротора.

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{1\alpha} = R_3 \cdot (T_3 p + 1) \cdot I_{1\alpha} - \frac{R_2' \cdot L_\mu}{L_2^2} \cdot \psi_{2\alpha} - \frac{L_\mu}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\beta}; \\ U_{1\beta} = R_3 \cdot (T_3 p + 1) \cdot I_{1\beta} - \frac{R_2' \cdot L_\mu}{L_2^2} \cdot \psi_{2\beta} - \frac{L_\mu}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\alpha}; \\ 0 = (T_2 p + 1) \cdot \psi_{2\alpha} - L_\mu \cdot I_{1\alpha} + \frac{L_2}{R_2'} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\beta}; \\ 0 = (T_2 p + 1) \cdot \psi_{2\beta} - L_\mu \cdot I_{1\beta} + \frac{L_2}{R_2'} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\alpha}; \\ M_{\text{дв.эм}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_\mu}{L_2} \cdot z_p \cdot (\psi_{2\alpha} \cdot I_{1\beta} - \psi_{2\beta} \cdot I_{1\alpha}); \\ \omega = \frac{1}{J_p} \cdot (M_{\text{дв.эм}} - M_c \cdot \text{sign}(\omega)) \end{array} \right.$$

На основании данной системы уравнений была составлена структурная схема асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат α, β и реактивной нагрузкой являются напряжения переменного тока – фазные напряжения статорных обмоток двухфазного АД:

$$U_{1\alpha}(t) = U_{1m} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t); \quad U_{1\beta}(t) = U_{1m} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t).$$

Параметры звеньев структурной схемы двигателя.

Эквивалентные индуктивности обмоток:

– статора

$$L_1 = L_{1\delta} + L_\mu = 5,2 \cdot 10^{-3} + 0,24 = 0,245 \text{ Гн};$$

– ротора

$$L_2 = L_{2\delta} + L_\mu = 7,06 \cdot 10^{-4} + 0,24 = 0,247 \text{ Гн}.$$

Коэффициент рассеяния

$$\sigma = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_1 \cdot L_2} = 1 - \frac{0,24^2}{0,245 \cdot 0,247} = 0,048.$$

Эквивалентное сопротивление

$$R_3 = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_u^2}{L_2^2} = 1,455 + 1,03 \cdot \frac{0,24^2}{0,247^2} = 1,51 \text{ Ом.}$$

Электромагнитные постоянные времени

$$T_3 = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_3} = \frac{0,048 \cdot 0,245}{1,51} = 0,0078 \text{ с}; \quad T_2 = \frac{L_2}{R_2} = \frac{0,247}{1,03} = 0,24 \text{ с.}$$

Переходные процессы скорости ротора и электромагнитного момента АД при прямом пуске и набросе нагрузки $M_{с.макс}=18,4\text{Нм}$, Как видно из графика, при набросе нагрузки, равной номинальному моменту двигателя, частота вращения вала двигателя уменьшается с синхронной $\omega_0 = 157 \text{ рад/с}$ до $\omega = 298,3 \text{ рад/с}$, величина скольжения

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{314 - 298,7}{314} \cdot 100 = 5\%$$

соответствует номинальному значению (таблица 2.1).

5.1 Функциональная схема системы скалярного частотного управления

В простейшем случае частотно-регулируемый асинхронный электропривод со скалярным управлением реализуется по разомкнутой структуре.

Функциональная схема такого частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением, выполненная по разомкнутой структуре АД выполнен в виде двухфазной модели в неподвижной системе координат α, β [9]. На функциональной схеме символом * обозначены сигналы задания и управления и приняты следующие обозначения:

ω - фактическое значение угловой скорости вращения двигателя;
ЗИС - задатчик интенсивности скорости с линейной характеристикой;
ФНУ - формирователь напряжений управления двухфазным АД, который формирует два напряжения переменного тока U_{α}^* и U_{β}^* при применении структурной схемы АД в неподвижной системе координат статора α, β ;
ФФН – формирователь фазных напряжений двухфазного двигателя.

В разомкнутой системе электропривода со скалярным управлением при уменьшении частоты максимальный момент двигателя уменьшается. Основная причина этого – возрастания влияния активного сопротивления обмотки статора при снижении частоты питающего напряжения. При законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$, как было показано выше, с целью обеспечения пускового момента на малых скоростях в преобразователе должна быть предусмотрена функция корректировки (повышение начального значения напряжения) вольт-частотной характеристики в области малых частот выходного напряжения инвертора. Либо, как показано в [9], можно применить так называемую IR - компенсацию (повышение фазного напряжения инвертора на величину падения напряжения на обмотке статора $I_1 \cdot R_l$) в области малых частот.

Для ограничения момента и тока АД в пуско-тормозных режимах электропривода механизмов, у которых по технологии невозможны механические перегрузки (к таким механизмам можно отнести привод насосов), достаточно применения задатчика интенсивности с линейной характеристикой, который устанавливается на входе электропривода в канале задания скорости.

В соответствии с функциональной схемой, из библиотеки имитационных моделей систем ПЧ-АД, предложенных [10] в среде *Simulink*

системы *MatLab* выбираем модель, Имитационные модели входящих в нее блоков

Имитационная модель, представляющая насосную нагрузку, согласно выражению (2.5)

Кривая зависимости $U_1(f_1)$ аппроксимируется отрезками прямых представлена в таб.5.1, и набрана в нелинейном блоке *Lookup Table* в имитационной модели формирователя фазных напряжений.

Таблица 5.1- Параметры вольт-частотной характеристики преобразователя

$f_1, \text{Гц}$	5	22	50
$U_1, \text{В}$	9	50	220

Имитацию квантования по времени фазных напряжений на выходе автономного инвертора напряжения преобразователя частоты (рис. 5.9), происходящее в процессе его широтно-импульсной модуляции (ШИМ) производится с помощью стандартных блоков библиотеки *Simulink* : *Pulse Generator* и *Enabled Subsystem* [9].

Период квантования по времени напряжения инвертора ПЧ принимаем равным величине постоянной времени запаздывания при ШИМ

$$T_{\text{ин}} = \frac{1}{f_{\text{нч}}} = \frac{1}{10000} = 0,0001 \text{ с,}$$

где $f_{\text{нч}} = 10000 \text{ Гц}$ - несущая частота инвертора.

5.2 Имитационные исследования частотно-регулируемого асинхронного электропривода насоса со скалярным управлением

Имитационные исследования электропривода вентилятора проводятся с целью проверки его работоспособности в следующих основных технологических режимах: пуск на любую рабочую скорость вентилятора; переход с одной рабочей скорости на другую и останов в режиме электрического торможения. В процессе имитационных исследований рассмотрим следующие режимы работы системы электропривода вентилятора [9]:

- пуск электропривода на минимальную рабочую скорость;
- пуск электропривода с минимальной рабочей скорости на максимальную;
- торможение электропривода с максимальной скорости до минимальной;
- останов электропривода.

К электроприводу вентилятора не предъявляется жестких требований к динамическим показателям. Поэтому при выборе параметров настройки датчика интенсивности скорости прежде всего следует исходить из условия обеспечения мягкого пуска электропривода. В ходе имитационных экспериментов установлено, что для обеспечения мягкого пуска вентилятора достаточно принять постоянную времени датчика $T_{зи} = 2$ с.

В качестве примера рассмотрена отработка электроприводом вентилятора следующего цикла:

- пуск на минимальную частоту $f_{и.мин} = 5$ Гц
- переход на максимальную рабочую скорость насоса ($f_{р.макс} = 50$ Гц)
- переход на минимальную частоту $f_{и.мин} = 5$ Гц.
- останов электропривода.

Временные характеристики отработки электроприводом вентилятора с законом регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$ и настройкой вольт-частотной характеристики в соответствии с (таб.5.1) принятого цикла работы.

Выводы. Полученные результаты имитационных исследований доказывают, что частотно-регулируемый асинхронный электропривод вентилятора под «вентиляторной» нагрузкой при скалярном управлении с законом управления $U_1/f_1^2 = \text{const}$ и корректировкой вольт-частотной характеристики в соответствии с (4.3) обеспечивает пуск электропривода с начальной частоты $f_{\text{и.мин}} = 5$ Гц и требуемый диапазон регулирования скорости вентилятора. Переходные процессы в электроприводе протекают плавно с ограничением динамического момента, токов двигателя и преобразователя. Время пуска и электрического торможения электропривода определяется и может быть изменено путём выбора значения постоянной времени задатчика скорости.

Заключение

В данной выпускной квалификационной работе был выполнен обзор систем управления частотно-регулируемыми электроприводами. Проанализирован и выбран наиболее подходящий, по соотношению цена-качество, для рассмотренного технологического процесса закон регулирования – скалярное управление $2 Uf$. Доказано, что данный вид управления позволяет получить искусственные механические характеристики с требуемой жесткостью, ему свойственна техническая простота измерения и регулирования абсолютных значений переменных АД. В процессе работы установлено, что полученная модель в среде MATLAB Simulink поддерживает заданные параметры давления воздуха в сети, с требуемыми показателями качества и полностью удовлетворяет требованиям технического задания. Составлена

функциональная схема системы поддержания постоянного давления на основе преобразователя частоты фирмы Siemens серии Micromaster 420. В разделе производственной и экологической безопасности проведен анализ вредных факторов, рассмотрена техника безопасности, производственная санитария, пожарная безопасность технологического процесса. В организационно-экономической части выполнено планирование проектных работ, выполнены расчеты сметы затрат на проектирование работ, расчеты капитальных вложений на реализацию и расчеты расходов при эксплуатации данного электропривода. Выполнен расчет экономической эффективности показывающий реальное снижение затрат на эксплуатацию данного оборудования.